

# 团 体 标 准

T/CNIDA 015—2023

## 低水平放射性废物近地表处置场 水文地质调查与评价规范

Specification for hydrogeological investigation and evaluation on near surface  
disposal of low level radioactive waste

2023-12-18 发布

2024-04-01 实施

中国核工业勘察设计协会 发 布  
中 国 标 准 出 版 社 出 版

目 次

前言 ..... III

引言 ..... IV

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 基本规定 ..... 2

5 水文地质调查与评价各阶段任务与要求 ..... 3

    5.1 水文地质调查与评价各阶段的划分 ..... 3

    5.2 初步可行性研究阶段 ..... 3

    5.3 可行性研究阶段 ..... 4

    5.4 初步设计及施工图设计阶段 ..... 5

    5.5 建造及运行阶段 ..... 6

    5.6 关闭及关闭后阶段 ..... 6

6 水文地质调查方法 ..... 7

    6.1 水文地质测绘 ..... 7

    6.2 水文地质遥感 ..... 9

    6.3 水文地质钻探与取样 ..... 9

    6.4 水文地质物探 ..... 10

    6.5 现场试验 ..... 11

    6.6 室内试验 ..... 19

7 地下水长期监测 ..... 25

    7.1 地下水监测点位布设原则 ..... 25

    7.2 监测井基本要求 ..... 27

    7.3 监测因子及频次 ..... 29

    7.4 监测信息化系统的构建 ..... 29

    7.5 监测井的维护 ..... 30

8 水文地质条件分析与评价 ..... 30

    8.1 水文地质单元划分 ..... 30

    8.2 地下水补给、径流、排泄条件分析 ..... 31

    8.3 地下水化学分析 ..... 31

    8.4 地下水位动态变化 ..... 31

    8.5 水文地质条件综合评价 ..... 31

9 成果要求 ..... 32

9.1 成果资料 ..... 32

9.2 成果报告格式与内容 ..... 34

附录 A（规范性） 常用计算公式及方法 ..... 37

    A.1 核素迁移距离计算方法 ..... 37

    A.2 弥散试验计算方法 ..... 37

    A.3 静态批式试验方法 ..... 39

    A.4 动态柱试验方法 ..... 40

附录 B（资料性） 常用参数及物探方法 ..... 45

    B.1 常用岩土体渗透系数 ..... 45

    B.2 物探方法及应用条件 ..... 45

参考文献 ..... 47

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核工业勘察设计协会提出并归口。

本文件起草单位：中国核电工程有限公司、核工业南京工程勘察院、河北中核岩土工程有限责任公司、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司、国核电力规划设计研究院有限公司、中国辐射防护研究院、中核勘察设计研究院有限公司。

本文件主要起草人：王旭宏、杨球玉、吕涛、夏加国、刘兴伟、李昶、李星宇、康宝伟、赵军庭、施晓文、李昊辉、吴魁彬、武建峰、周韬、章中良、舒士成、韩林、汪华安、任国澄、胡学玲、付海军、孙卫春、张明、孙茂前、朱君、陈超、张艾明、邓小宁、王俊卿、李宁、丁鹏飞、刘琳。

## 引 言

为满足我国低水平放射性废物近地表处置场选址、设计、建造、运行、关闭、关闭后及安全全过程系统分析的水文地质调查工作需求,使得低水平放射性废物近地表处置场水文地质调查与评价工作技术先进、满足需求、保护环境、经济合理、确保质量,特制定本文件。

本文件以服务于我国低水平放射性废物安全处置水文地质调查与评价为宗旨。编制组经广泛调研,认真总结实践经验与科研成果,在参考国内外先进标准,广泛征求意见的基础上,编制完成本文件。

本文件结合我国放射性近地表处置工程特点及建设时序,重点关注影响放射性核素迁移及处置场长期安全稳定的水文地质条件调查分析,并给出相关试验方法指导。

# 低水平放射性废物近地表处置场 水文地质调查与评价规范

## 1 范围

本文件规定了我国低水平放射性废物近地表处置场各建设阶段的水文地质调查与评价要求。

本文件适用于我国低水平放射性废物近地表处置场水文地质调查与评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 50027 供水水文地质勘察规范

DZ/T 0148 水文水井地质钻探规程

DZ/T 0157 1:50 000 地质图地理底图编绘规范

DZ/T 0179 地质图用色标准及用色原则(1:50 000)

DZ/T 0270 地下水监测井建设规范

JGJ/T 87 建筑工程地质勘探与取样技术规程

SL 31 水利水电工程钻孔压水试验规程

DD 2019-04 水文地质调查图件编制规范 第1部分:水文地质图(1:50 000)

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**近地表处置 near surface disposal**

将放射性废物放置在地表面或地表面以下几十米深的设施中,并设置工程屏障。

### 3.2

**安全全过程系统分析 safety case**

支持和说明处置场安全的科学、技术、行政和管理等方面论据和论证的文件集成。

注:涵盖场址的适宜性,设施的设计、建造和运行的安全性,辐射风险评价的合理性,以及所有与处置场安全相关工作的充分性和可靠性。

### 3.3

**水文地质调查 hydrogeological investigation**

为查明某一区域水文地质条件而进行的野外和室内水文地质工作。

注:主要包括资料搜集、水文地质测绘、水文地质物探、水文地质钻探、现场试验、室内试验、地下水长期监测等。

3.4

水文地质测绘 hydrogeological mapping

在搜集和研究已有地质、水文地质资料的基础上,采用大于或等于测绘比例尺的地形地质图,按照一定的观测路线和观测点,对地面含水层、地貌、地下水露头及与地下水有关的各种地质现象所进行的实地观测和填图工作。

3.5

分配系数 distribution coefficient

$K_d$

平衡状态时,地质介质中的核素浓度与周围溶液中核素浓度的比值。

3.6

延迟因子 retardation factor

$R_f$

孔隙水流速与核素迁移速度的比值。

3.7

静态批式试验 batch experiment

将已知浓度的核素溶液与地质介质混合一段时间直至平衡,然后固液分离,分别测量地质介质和溶液中的核素浓度,计算核素的分配系数。

3.8

动态柱试验 dynamic column experiment

将非吸附示踪剂和已知浓度的核素溶液分别注入地质介质填充的柱体,得到非吸附示踪剂和核素的迁移曲线,根据两条迁移曲线的关系计算核素的分配系数。

4 基本规定

- 4.1 水文地质调查精度应满足相关阶段的使用需求,满足处置场安全全过程系统分析迭代更新需求。
- 4.2 水文地质调查工作量布置应根据水文地质条件复杂程度、水文地质调查阶段和已有工作的深度,综合考虑确定,水文地质复杂程度可依据表 1 划分。

表 1 调查区水文地质复杂程度表

| 简单地区                                                                                                      | 中等地区                                                                                                                         | 复杂地区                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a) 地层及地质构造简单;<br>b) 含水层空间分布稳定;<br>c) 地下水补给、径流和排泄条件清楚简单;<br>d) 地下水埋藏较深,处置场的建设对水文地质条件的影响微弱,与地下水相关的环境地质问题不突出 | a) 地层及地质构造较复杂;<br>b) 含水层层次多,但具有一定的规律;<br>c) 地下水补给、径流和排泄条件,水动力特征,水化学规律较复杂;<br>d) 地下水埋藏较浅,处置场的建设对水文地质条件有一定影响,存在少量与地下水相关的环境地质问题 | a) 地层及地质构造复杂;<br>b) 含水层系统结构复杂、含水层空间分布不稳定;<br>c) 地下水补给、径流和排泄条件,水动力特征,水化学规律复杂;<br>d) 地下水埋藏浅,处置场的建设对水文地质条件有影响,存在与地下水相关的环境地质问题 |

4.3 水文地质调查宜采用遥感、测绘、物探、钻探、现场试验及室内试验多种手段相互配合,利用多种手段相互验证。

4.4 低水平放射性废物近地表水文地质调查,除应执行本文件规定外,尚应执行国家现行有效规范和标准的规定。

## 5 水文地质调查与评价各阶段任务与要求

### 5.1 水文地质调查与评价各阶段的划分

低水平放射性废物近地表处置场水文地质调查应按照我国基本建设程序分阶段进行,水文地质调查的阶段应与放射性废物处置场选址、设计、运行、关闭及相关的安全分析、环境影响评价、安全全过程系统分析需求相适应。宜分为下列水文地质调查阶段:

- a) 初步可行性研究阶段;
- b) 可行性研究阶段;
- c) 初步设计及施工图设计阶段;
- d) 建造及运行阶段;
- e) 关闭及关闭后阶段。

除“关闭及关闭后阶段”外其他相邻阶段可根据场址区水文地质条件的复杂程度及资料收集翔实程度适当合并。且需满足两个阶段的调查要求,重点要符合两个阶段中后一阶段的详细程度要求。

### 5.2 初步可行性研究阶段

5.2.1 初步可行性研究阶段对低水平放射性废物近地表处置场候选场址开展水文地质调查工作。通过合理的水文地质调查手段,初步分析和查明候选场址的水文地质条件,对候选场址的适宜性作出初步评价,为场址的比选提出建议,通过比选初步确定优先候选场址。

5.2.2 初步可行性研究阶段工作重点如下。

- a) 了解候选场址所在地区的自然地理环境、区域人口分布及水资源利用现状与规划情况。
- b) 初步查明候选场址及周边地表水体、地下水出露、分水岭、地下水流向情况。
- c) 初步查明候选场址及附近是否存在影响水文地质条件的地质构造、不良地质作用。
- d) 初步查明候选场址地下水补径排条件,地表水与地下水及地下水间的水力联系;初步划分候选场址水文地质单元。
- e) 初步查明地下水类型、含水层与隔水层的分布及其渗透性;采取地表水及地下水水样,初步查明地表水和地下水的水化学特征。
- f) 初步查明是否存在阻隔放射性核素迁移所需的天然屏障,对候选场址的适宜性作出初步评价和对比。预测水文地质条件发生改变对候选场址产生的影响。

5.2.3 初步可行性研究阶段水文地质调查工作布置原则与要求如下。

- a) 本阶段水文地质调查以搜集资料为主,辅以必要的水文地质测绘、水文地质钻探、水文地质试验、物探、室内试验等手段。
- b) 本阶段搜集的资料内容主要有且不限于以下方面:区域及近区域的水文地质资料、地质资料、矿产资料;候选场址的水文、地质、水文地质、气象、遥感等资料;区域内人口分布及规划情况等。搜集资料的范围应包含与候选场址相关的完整水文地质单元及边界,面积不宜小于20 km<sup>2</sup>。
- c) 对搜集到的资料进行整理,根据汇总的资料结合水文地质测绘对候选场址的水文地质特征进行验证和细化调查。水文地质测绘主要围绕场址及近场址范围进行,面积一般不小于4 km<sup>2</sup>,根据水文地质条件复杂程度,测绘比例尺宜在1:10 000~1:5 000之间,并布置不少于1条穿过候选场址的典型水文地质剖面。
- d) 根据候选场址水文地质条件复杂程度及调查需要,在场址范围及临近场址的区域选择控制性

地段布置水文地质钻孔。每个场址钻孔数量不宜少于 3 个,水文地质条件复杂的区域可适当增加。钻孔深度范围应包含包气带及主要含水层,并进入处置场预设基底以下相对隔水层不小于 5 m。

- e) 在条件允许情况下,可布置适当的物探、水文地质遥感工作,通过物探成果、遥感图像解释与水文地质测绘工作相互验证补充。本阶段遥感图像分辨率应不低于 1 m。
- f) 根据地质体岩性在钻孔内布置抽水试验、压水试验等初步测定含水层渗透系数,或可取原状样进行室内渗透试验,试验方法和数量应根据候选场址水文地质条件复杂程度确定,一般每个含水层不低于 3 组水文地质试验,每层取样不低于 6 组。
- g) 根据已有资料翔实程度和水文地质调查需要,可布置 1 组~2 组地下水流速流向试验。
- h) 对不同水文地质单元的地下水和主要地表水体应分别采取水样进行水化学全分析,取样数量均不宜少于 2 组。
- i) 可利用勘探孔和区内井、泉等,作为地下水临时监测点,初步了解地下水的动态变化情况;根据水文地质条件复杂程度监测时间宜每次间隔 1 个月~3 个月。

### 5.3 可行性研究阶段

5.3.1 可行性研究阶段应在初步可行性研究确定的优先候选场址进一步开展工作,以野外水文地质测绘、水文地质钻探、物探、现场试验、室内试验为主要手段,查明各优先候选场址的水文地质条件,并对各优先候选场址的适宜性给出明确结论,为拟建场址的确定提供建议。

5.3.2 可行性研究阶段工作重点如下:

- a) 搜集优先候选场址所在地区自然地理环境、气候、区域人口分布及矿产资源利用现状、土地利用历史与规划情况;
- b) 调查优先候选场址所处水文地质单元范围,及其与相邻水文地质单元的相互关系;
- c) 查明周边地表水与地下水以及地下水间的水力联系,开展必要现场试验,测定主要地表水体(河流、泉等)的流量;
- d) 查明优先候选场址所在水文地质单元地下水补径排条件,详细掌握优先候选场址所在水文地质单元内地下水开发利用现状与规划,查明地下水环境敏感目标;
- e) 查明含(隔)水层结构特征,含(隔)水层岩性、厚度、孔隙度及其渗透性;
- f) 查明地下水流场、地下水动态变化特征;
- g) 查明地下水水化学特征;
- h) 采用静态批式试验或动态柱试验测定包气带和含水岩组对主要核素的吸附阻滞参数;
- i) 测定包气带防污性能及土壤水分特征参数。

5.3.3 可行性研究阶段水文地质调查工作布置原则与要求如下。

- a) 本阶段水文地质调查范围宜以天然水文地质单元边界为调查边界,重点关注优先候选场址下游地下水环境敏感目标情况。对于处置场距离水文地质单元边界较远的场址,宜在相关资料分析的基础上,划分重点调查区与一般调查区,重点调查区范围以处置场为参考点,重点调查区范围距离处置场下游不小于下游迁移距离  $L$ ,下游迁移距离  $L$  应符合附录 A 中 A.1 的规定。如  $L$  大于水文地质单元边界,需说明地下水排泄点位,距离处置场上游及两侧不小于下游迁移距离  $L/2$ 。常用岩土体渗透系数经验值见附录 B 中 B.1。一般调查区为重点调查区至水文地质单元边界的中间区域。
- b) 重点调查区测绘比例尺宜在 1:10 000~1:5 000 之间,并布设不少于 2 条通过处置区的实测水文地质剖面,两条水文地质剖面宜垂直相交于处置场区域。水文地质复杂地区可适当增加。
- c) 一般调查区水文地质测绘比例尺应不小于 1:25 000,应布设不少于 2 条通过场址的相互垂直的水文地质剖面。

- d) 本阶段调查应以水文地质测绘和现场试验为主,辅助以遥感、物探等多种水文地质调查方法对水文地质特征进行验证和细化。
- e) 根据候选场址水文地质条件复杂程度及调查需要,在场址范围及临近场址的区域选择控制性地段布置水文地质钻孔。每个主要水文地质单元钻孔数量不应少于3个,水文地质条件复杂的区域可适当增加。钻孔深度范围应包含包气带及主要含水层,并进入处置场预设基底以下稳定隔水层不小于5 m。
- f) 针对性地开展试验工作,确定场址区包气带和含水岩组的岩性及结构特征、背景值及影响核素迁移的关键参数。
- g) 通过抽、注、压水试验测定含水层渗透系数等水文地质参数。
- h) 对水文地质单元补给、径流、排泄区域地下水进行同位素分析,确定地下水循环条件。
- i) 对水文地质单元补给、径流、排泄区域地下水和主要地表水体应分别采取水样进行水化学全分析,取样数量不宜少于5组。其中,补给区、径流区和排泄区地下水水样各不得少于1组。
- j) 构建地下水监测系统,适当加密地下水监测网,开展长期监测。其中,处置场上游和两侧的地下水水质监测点均不得少于1个,处置场区及下游地下水水质监测点不得少于3个。
- k) 考虑地下水水位季节性变化和多年变化,完成至少1个水文年的水位动态监测,应分别在地下水丰水期及枯水期完成水位统测,绘制地下水流场。
- l) 宜同步建立地下水数值模型,对水文地质条件进行综合论证。

#### 5.4 初步设计及施工图设计阶段

5.4.1 初步设计及施工图设计阶段应在可行性研究阶段工作确定的拟建场址,有针对性地开展水文地质调查工作,并应完善地下水监测系统。当需完善地下水数值模型进行放射性核素迁移评价时,可适当补充地下水流速流向试验、现场弥散试验、批式法试验或动态柱试验等。

5.4.2 初步设计及施工图设计阶段工作重点如下:

- a) 查明处置区包气带的厚度及含水特征;
- b) 查明处置场场地的降雨入渗系数;
- c) 查明各处置单元水、土对建筑材料的腐蚀性;
- d) 分析处置场场地平整、处置设施建设对地下水补径排条件及地下水流场的影响;
- e) 分析断层、溶洞、海岸潮汐影响带等对处置场的潜在影响;
- f) 分析处置场及周边水文地质条件和水文地球化学条件,综合评价其对核素运移的阻滞能力;
- g) 分析预测水文地质条件在施工和运行期间可能产生的变化及其对处置场的影响,提出防治措施建议;
- h) 结合前期监测数据,对处置场及周边水文地质条件进行论证分析,提出场址布局的优化建议。

5.4.3 初步设计及施工图设计阶段水文地质调查工作布置原则与要求如下。

- a) 本阶段水文地质调查范围以处置场用地边界为调查边界,重点关注处置场场地平整、处置设施建设对地下水流速、流向影响;经分析发现水文地质条件发生变化或核素有向下游迁移的趋势时,应将调查范围扩展至可行性研究阶段确定的重点调查区并补充水文地质测绘,测绘比例尺应不小于1:5 000。
- b) 本阶段调查以现场试验、地下水特征监测为主,必要时可进行水文地质试验和水文地质测绘。
- c) 主要进行室内水质全分析试验。水文地质条件发生变化时进行流速流向试验、现场弥散试验、批式法试验或动态柱试验等。
- d) 在前期构建的地下水监测系统的基础上,进一步完善地下水长期监测系统。根据需要在场区

内及下游区域各补充监测点不宜少于 3 个。

- e) 本阶段水文地质钻探应结合前期已有钻孔、水文地质单元及主要受影响含水层、监测点的设置等情况综合确定,每一主要受影响含水层现场试验应不少于 3 个,深度应穿透受影响主要含水层进入稳定隔水层不少于 5 m。

## 5.5 建造及运行阶段

5.5.1 建造及运行阶段对地下水水位与水质进行长期监测,并对前期水文地质调查成果进行验证,对异常地段补充开展水文地质调查工作;建造及运行过程中水文地质条件发生变化或发现新的水文地质问题时,应开展针对性的水文地质调查工作。

5.5.2 建造及运行阶段工作重点如下:

- a) 充分搜集已有水文地质调查成果,结合处置场的工程特点,进一步分析处置场水文地质条件及变化规律;
- b) 根据水文地质条件,充分利用已有井、泉和长期观测孔对处置场及周边可能受影响的水文地质单元进行地下水长期监测工作;
- c) 根据监测资料对现阶段的水文地质条件进行分析与评价,并与前期水文地质变化规律进行对比,当出现较大差异变化时应进一步分析、验证,必要时补充开展水文地质调查工作;
- d) 处置场采用人工屏障防渗处理时,应对防渗效果进行定期监测,人工屏障对地下水流场有较大影响时,应补充开展水文地质调查工作。

5.5.3 建造及运行阶段水文地质调查工作布置原则和要求如下。

- a) 调查范围宜同设计阶段调查范围,重点是场区周边及地下水径流下游的调查工作。当水文地质条件发生变化时,需要进行水文地质调查,调查精度应满足设计阶段的要求。
- b) 本阶段以地下水水位、水质等长期监测为主,必要时开展针对性的水文地质调查工作。
- c) 主要进行室内水质简分析及水质全分析试验,水文地质条件发生变化时进行流速、流向等试验。
- d) 根据地下水类型,每个水文地质单元的主要含水层(组)在场区、上游及下游布置监测点,其中孔隙水及岩溶水不少于 4 个点、裂隙水不少于 5 个点,当下游有密集的居民点或重要取水点时,应加密监测点。
- e) 影响范围内存在多层地下水时应分层监测。
- f) 水位监测宜使用自动连续监测系统,水位观测时间间隔宜 7 d~15 d,每个监测点宜每季度或分丰、平、枯水期各完成 1 次水质简分析,每一水文年完成 1 次水质全分析试验、同位素组分检测。
- g) 长期监测应涵盖处置场建造及运行的全过程。

## 5.6 关闭及关闭后阶段

5.6.1 关闭及关闭后阶段主要对处置场运行期所发现的水文地质问题进行专项调查与重点监测,以专项水文地质调查和监测为主,为处置场关闭活动及关闭后的长期监测提供支持。

5.6.2 关闭及关闭后阶段工作重点如下:

- a) 对前期水文地质调查结论与预测进行验证,更新相关认识;
- b) 更新区域人口及水资源利用数据,测定主要地表水体流量;
- c) 对历史监测数据(水位、水化学等)进行整理分析,分析原因,预测潜在趋势;
- d) 重点监测关闭活动对场址区水文地质环境的影响;

- e) 对监测因子(处置场所处置的核素)超过限值的情况,应开展专项调查,并采取相应的措施。

### 5.6.3 关闭及关闭后阶段水文地质调查工作布置原则与要求如下:

- a) 本阶段调查范围宜以天然水文地质单元边界为调查边界,重点对前期水文地质调查所获取的源汇项数据进行核实更新,必要时可适当扩展调查范围,明确关闭及关闭后阶段处置设施与周边水文地质条件的相互关系;
- b) 重点对运行期发现的水文地质环境问题,进行补充调查,细化分析;
- c) 本阶段以现场监测和补充调查为主,对处置场运行过程中发现的水文地质问题进行深入调查分析,以保障处置场的关闭安全;
- d) 关闭前在紧邻处置单元或周边包气带进行分层取样,结合包气带岩性、结构特征在处置单元底板埋深以下取 1 个及以上样品进行浸溶试验,测试分析浸溶液成分,如发现相关核素成分,需开展专项调查分析;
- e) 调整优化地下水监测网,如需要可在处置场下游区域增设地下水水质监测点,对潜在污染迁移途径进行重点监测。

## 6 水文地质调查方法

### 6.1 水文地质测绘

6.1.1 水文地质测绘应搜集区域地质和水文地质资料,场址的地质、水文地质、工程地质、遥感图像水文地质解译资料,以及水文、气象和与地下水有关的人类活动等资料。

6.1.2 水文地质测绘应对搜集到的资料进行分析整理,根据场址和区域的水文地质特征,按水文地质单元、地下水流向和环境影响敏感点等 3 个层次布置水文地质测绘工作。

6.1.3 在未进行地质测绘地区应同时进行工程地质和水文地质测绘。

6.1.4 测绘路线宜以穿越法和追索法相结合的方式布置,观测路线宜按下列要求布置:

- a) 沿含水层(岩组)和富水性、水化学特征变化显著的方向;
- b) 沿垂直地层走向或构造线走向方向;
- c) 沿地貌变化显著方向穿越地貌单元界线;
- d) 沿河谷、沟谷延伸方向;
- e) 沿井、泉等地下水露头多或地表水体分布多的方向。

6.1.5 观测路线沿线的各类地质、地貌界线及水文点应有观测点控制,观测点应有代表性,并详细记录,采集必要的样品,观测点宜布置在下列位置:

- a) 地层界线、断层线、褶皱轴线、岩浆岩与围岩接触带、标志层、典型露头和岩性、岩相变化带等;
- b) 地貌分界线和地质现象发育处;
- c) 井、泉、钻孔、地表水体等;
- d) 与地下水有关的其他重要位置。

6.1.6 测绘精度的相关要求如下。

- a) 水文地质测绘应在比例尺大于或等于测绘比例尺的地形图的基础上进行。
- b) 填图单位的最小尺寸为图上 2 mm,对于具有水文地质特殊意义的地质单元体,可扩大比例尺表示。水文地质界线的标绘误差不得大于 2 mm。
- c) 水文地质点应根据精度要求选用适当方法定位,控制性水文地质点位置、重要地质界线和实测水文地质剖面应采用测量仪器定位。
- d) 每平方千米的观测点数和观测路线长度可按表 2 确定。

表2 水文地质测绘的水文地质点数和测绘路线长度

| 测绘比例尺                                                                                                                                                                                | 地质观测点数/(个/km <sup>2</sup> ) |             | 水文地质观测点数<br>个/km <sup>2</sup> | 测绘路线长度<br>km |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------------------|--------------|
|                                                                                                                                                                                      | 松散层地区                       | 基岩地区        |                               |              |
| 1:25 000                                                                                                                                                                             | 0.60~1.80                   | 1.50~3.00   | 1.00~2.50                     | 2.50~4.00    |
| 1:10 000                                                                                                                                                                             | 1.80~3.60                   | 3.00~8.00   | 2.50~7.50                     | 4.00~6.00    |
| 1:5 000                                                                                                                                                                              | 3.60~7.20                   | 6.00~16.00  | 5.00~15.00                    | 6.00~12.00   |
| 1:2 000                                                                                                                                                                              | 9.00~18.00                  | 15.00~45.00 | 12.50~37.50                   | 12.00~20.00  |
| <p>注1: 同时进行水文地质与工程地质测绘时,表中地质点数乘以2.5;复核性水文地质测绘水文地质点数为规定数量的40%~50%。</p> <p>注2: 水文地质条件简单时采用小值,复杂时采用大值,条件中等时采用中间值。</p> <p>注3: 表中数据为基本规定,如调查区客观存在的水文地质点不能满足表中规定数量,需对存在的水文地质点全部进行观测记录。</p> |                             |             |                               |              |

#### 6.1.7 水文地质测绘宜包括以下工作内容:

- 搜集测绘范围及周边地区的地质、水文地质、工程地质、水文及气象等资料;
- 地形、地貌特征及其与含水层的分布和地下水的埋藏、补给、径流、排泄的关系;
- 含水层的组成、分布特征、渗透性、富水性及其变化规律;
- 处置场包气带的分布特征、厚度、岩性、渗透性等;
- 破碎带、节理密集带、褶皱和断裂等地质构造的类型、特征、分布、组合关系及富水性和透水性特征;
- 井所在地段的地形、地貌、含水层特征,主要含水层的岩性、时代及井的类型、深度、井壁结构、出水量、水位、水质及其动态变化;
- 泉的出露条件、成因类型和补给来源,泉的流量、水质、水温、气体成分,泉的动态变化及利用情况,与工程有关的泉需长期观测;
- 地表水体的类型、分布、水位、水质、流速、流量,流域汇水面积及历史最高水位;
- 地表水与地下水的补排关系以及地下水位的季节变化情况;
- 地表水和地下水的开发利用现状和未来规划情况;
- 与地下水开发利用有关的环境问题,重点调查地表水体及污染情况、污染源分布,工业与生活废物堆放场地的分布。

#### 6.1.8 野外调查期间应及时对获取的野外记录与手图、照片、视频资料、标本进行整理,对采集的岩、土、水样品及时送样,测绘完成后宜提交如下原始资料:

- 各类野外调查记录、卡片、表格等;
- 实际材料图、各类野外调查成果草图、剖面图等;
- 岩、土、水样品采集记录,送样单及测试分析报告;
- 现场试验资料;
- 各类照片、视频资料;
- 各类资料、成果汇总表;
- 野外质量检查记录等。

#### 6.1.9 水文地质测绘成果应包括以下图表:

- 水文地质测绘实际材料图;
- 综合水文地质图(包含实测水文地质剖面图和水文地质柱状图);

- c) 与地下水有关的等值线图；
- d) 水文气象资料图表；
- e) 井(泉)调查表。

## 6.2 水文地质遥感

6.2.1 遥感工作前,应充分收集分析地理、地质、水文及物化探资料,了解调查区的地理环境、水文地质工作程度和存在的主要问题,确定遥感工作的方法和重点。

6.2.2 水文地质遥感解译工作应贯穿于水文地质调查的全过程,根据各阶段水文地质调查工作,以地下水系统或地表水流域进行部署。水文地质遥感解译步骤见图 1。

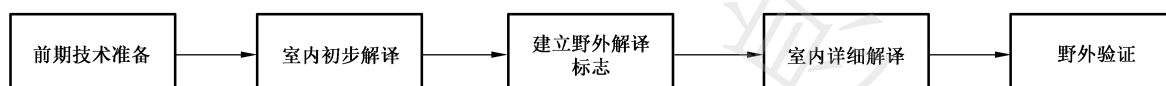


图 1 水文地质遥感解译步骤

6.2.3 应在各项工作开始前率先完成初步解译工作,为现场踏勘工作和水文地质工作大纲的编制提供依据。后续工作可与野外水文地质测绘紧密结合,在水文地质测绘中丰富解译标志,提高水文地质测绘效果。

6.2.4 遥感解译的范围应根据水文地质调查阶段及场地的水文地质条件综合确定,小比例尺遥感解译的范围应考虑水文地质单元的完整性;大比例尺遥感解译调查范围宜大于水文地质测绘范围。

6.2.5 应选择云彩覆盖少、清晰度高、可解性强的最新卫星图像及遥感图像,必要时可选用多类型、多时相的遥感图像数据。遥感图像的分辨率应根据水文地质调查阶段确定,其中初步可行性研究阶段和可行性研究阶段分辨率应不低于 1 m。在水文地质排泄区等重点调查区可选用分辨率大于 0.5 m 的遥感数据或无人机遥感数据。

6.2.6 遥感解译内容应包括:

- a) 地貌单元、地表水系及分水岭,判断地形地貌、水系特征与地质、水文地质条件的关系;
- b) 主要地质构造,特别是新构造断裂、节理裂隙密集带、背向斜的分布位置、发育规模及展布特征,判定地质构造与水文地质条件的关系,结合地貌特征为水文地质单元的划分提供依据;
- c) 具有明显影像特征的地层岩性,为含水岩组划分提供依据;
- d) 植被和土地覆盖、土地利用状况,分析土地利用变化对地下水资源的影响;
- e) 各种水文地质现象,圈定泉点、泉群、泉域、地下水溢出带的位置,河流、湖泊、库塘、沼泽、湿地地表水体及其渗失带的分布、变化,圈定河床、湖泊泥砂淤积地段及古溃口和管涌等发育地段、洪水淹没区域,确定古(故)河道变迁、地表水体的变化以及各种岩溶现象的分布发育;
- f) 与地下水开发利用有关的问题,重点解译地表水体及污染情况、污染源分布,工业与生活废物堆放场地的分布;
- g) 可采用遥感数据反演土壤含水量、蒸发量等参数。

6.2.7 遥感工作在水文地质调查中所获成果均为基础资料,是对各种水文地质和工程地质现象的直观反映,应分门别类加以整理,为水文地质调查报告编制提供支持。必要时在水文地质调查总报告中设置遥感相关章节或编写水文地质遥感专题报告,其主要内容应详细论述遥感图像(数据)特征和解译技术方法以及所获得的各项成果。

## 6.3 水文地质钻探与取样

### 6.3.1 水文地质钻探

6.3.1.1 应在分析、利用已有资料的基础上,根据需要解决的问题并考虑长期观测的需要布置钻孔,宜

一孔多用。

6.3.1.2 水文地质钻孔的深度应根据含水层(组)的情况、需要测试含水层位置、试验测试要求等情况综合考虑,并且控制深度应揭露对拟建工程有影响的主要含水层(组)。

6.3.1.3 水文地质钻孔的孔径应在满足对地质体鉴别的前提下,同时满足孔内测试等试验的要求。

6.3.1.4 钻孔岩芯采取率,黏性土和完整基岩应不小于 80%;砂性土、松散砾砂岩、基岩强风化带、破碎带应不小于 65%。

6.3.1.5 钻孔应采用清水钻进,钻进过程中应观测孔内水位变化,记录冲洗液漏失量,钻孔涌水的深度和涌水量,自流水头,钻进中出现的异常现象,初见水位、终孔稳定水位等。当有多层地下水时,应分层观测。

6.3.1.6 水文地质成孔、洗井、滤料、滤管等技术要求应遵循 DZ/T 0148 的相关规定。

6.3.1.7 钻孔应有独立的编号,并保留钻孔所有相关信息,形成钻孔综合图表。

### 6.3.2 取样

6.3.2.1 土样:应满足 JGJ/T 87 的有关规定,同时满足室内试验的相关要求。

6.3.2.2 地下水样:应采集所需含水层中的天然水样,水样数量应超过各项试验所需水量之和的 20%~30%。盛水容器宜采用专业容器,容器应洗涤清洁,取样前应用所需采集的水反复冲洗 3 次以上。

6.3.2.3 采水样过程中尽量避免或减轻样品与大气发生接触,取含不稳定成分的水样时,应及时加入稳定剂,井孔中采集时应避免搅动井水和底部沉积物。

6.3.2.4 水样采集后应及时贴样签,注明取样地点、深度、时间、加入的稳定剂等信息。

6.3.2.5 试样应放置在不受阳光照射的阴凉处,并及时送至实验室,试样的保存和送检要求应符合 GB/T 14848 的相关规定。

6.3.2.6 批式试验和动态柱试验等特殊试验的取样要求应满足 6.6 的相关要求。

### 6.3.3 钻孔回填

6.3.3.1 孔内工作完成后,应根据工程要求选用适宜的材料分层回填。

6.3.3.2 钻孔宜采用原土回填,并应分层夯实,回填土的密实度不宜小于天然土层。

6.3.3.3 临近堤防的钻孔应采用干黏土球回填,并应边回填边夯实;有套管护壁的钻孔应边起拔套管边回填;对隔水有特殊要求时,可用水泥、膨润土(4:1)制成浆液或水泥浆通过泥浆泵由孔底向上灌注回填。

6.3.3.4 基岩层应用水泥浆回填。

6.3.3.5 对于 I 类子项或者甲级基坑,应对所有已封的钻孔进行复测坐标。

### 6.3.4 钻孔保护

对于需要长期保留的水文钻孔,孔口应设置保护措施,避免杂物进入,并根据后期对钻孔的需要进行相关保护。对于长期观测孔应做好长期的维护措施。

长期保留钻孔的保护措施可参照 HJ 164 的相关规定。

## 6.4 水文地质物探

6.4.1 水文地质物探应充分利用被探测对象的物性条件,结合工程需要和场地条件合理使用,宜在水文地质测绘基础上进行。

6.4.2 采用的水文地质物探方法应具备下列基本条件:

- a) 被探测对象与周围介质之间有明显的物性差异;

- b) 被探测对象具有一定的埋藏深度和规模,且地球物理异常有足够的强度;
- c) 有干扰因素存在时仍能分辨出被探测对象引起的异常;
- d) 地形影响不妨碍野外作业和资料解释,或其影响能利用有效手段处理修正。

6.4.3 应根据要解决的问题,结合现场条件选择适宜的水文地质物探方法。地质条件复杂或存在多种干扰因素时,单一方法不易判定或较复杂的水文地质问题,宜采用两种或两种以上方法综合探测。水文地质调查中采用的物探方法见 B.2。

6.4.4 水文地质物探宜结合水文地质测绘和钻探进行工作布置,对可能的岩溶发育地段、可能存在隐伏断裂或大节理带的地段宜布置水文地质物探工作。

6.4.5 水文地质物探测线和测点应根据需要解决的水文地质问题并结合现场条件布置,水文地质物探剖面方向宜充分结合勘探点垂直被探测对象的总体走向或沿着水文地质条件变化大的方向。物探测线布置的相关规定如下:

- a) 测网应根据工程需要和地形、地质条件布置,拟定的测线位置可根据实际情况适当调整,测线移动的允许距离在相应比例的平面图件上宜为 5 mm;
- b) 测网密度应保证异常的连续、完整和便于追踪;
- c) 测线长度应保证异常的完整和具有足够的正常背景。

6.4.6 发现异常应加密探测点,确定异常性质或异常范围。

6.4.7 宜在水文地质钻孔中进行物探测井工作,配合钻探取样划分地层。

6.4.8 外业作业中,工作参数的选择、检查点的数量、观测精度、操作和记录、仪器定期检查,应符合国家现行有关物探标准要求。测试数据应根据场地条件、岩土特性、地区经验、仪器设备等因素及时检查和质量评价。外业质量检查的相关规定如下。

- a) 检查方式应根据具体方法的技术要求确定。
- b) 检查量不应少于总工作量的 5%。
- c) 检查点应在测区均匀分布、随机选取,对畸变点、异常点、拟验证点、可疑地段等重点检查。当原始数据检查不合格时应分析原因,制定措施或调整工作方案后重新观测。

6.4.9 水文地质物探成果应结合其他勘探方法获得的成果,对所获取的物探数据进行综合处理、分析和解译。物探成果应包括文字报告、测线平面布置图、各种定性和定量分析、解译图件、质量检查数据或数据质量评定等内容。资料解释的相关规定如下:

- a) 资料解释应在分析测区物性参数和既有勘探资料的基础上,遵循从已知到未知、由浅及深、点面结合、综合分析、定性指导定量的原则进行;
- b) 定性解释应在区分干扰异常和有效异常的基础上,根据异常的幅值、强度、形态、分布等特征确定异常体的性质及规模,估算其埋深,初步建立物探异常与地质体的对应关系;
- c) 定量解释宜利用已知的物性参数和测井及资料作为边界条件进行反演;
- d) 各种物探方法的解释结果应相互补充、相互验证,并对其进行综合分析,有验证点时应利用已知资料对物探解释结果进行修正。

## 6.5 现场试验

### 6.5.1 抽水试验

6.5.1.1 抽水试验用于获取岩土层渗透系数、导水系数、给水度、贮水系数等水文地质参数,评价含水层的富水程度等。

6.5.1.2 抽水试验可根据水文地质条件的复杂程度及试验目的,选用单孔抽水试验和多孔抽水试验。同时应根据调查阶段、岩土层分布及特征以及场地地表水体和敏感点的分布等确定抽水试验方法,其相关要求如下。

- a) 初步可行性研究阶段和水文地质条件简单场地可进行单孔抽水试验。水文地质条件复杂场地,且处于可行性研究及其后续阶段,宜进行多孔抽水试验。
  - b) 对于富水性较强的大厚度含水层,需分段评价时应进行分段抽水试验,分段长度宜采用 20 m~30 m。
- 6.5.1.3 观测孔的布置,应根据试验目的和计算公式的要求确定,其相关要求如下。
- a) 以抽水孔为原点,宜布置 1 条~2 条观测线。一条观测线时,宜垂直地下水流向布置;两条观测线时,其中一条宜平行地下水流向布置。每条观测线上的观测孔不宜少于 2 个。
  - b) 距离地表水体较近的抽水试验观测孔宜垂直地表水体走向布置观测线,必要时可平行地表水体布置观测孔。
  - c) 距抽水孔近的第一个观测孔,应避开三维流的影响,其距离不宜小于含水层的厚度。最远的观测孔距第一个观测孔的距离不宜太远,并应保证各观测孔内有一定水位下降值。
  - d) 各观测孔的过滤器长度宜相等,并安置在同一含水层和同一深度。
- 6.5.1.4 试验过程中,应对附近可能受到影响的孔、井、洞、泉、地表水体等进行水位或流量观测。
- 6.5.1.5 在抽水试验各次降深中,水泵吸水管口均应放在同一深度,不同降深的试验宜连续进行。
- 6.5.1.6 抽水试验前和抽水试验时,应同步测量抽水孔和观测孔、点(包括附近的水井、泉和其他水点)的自然水位和动水位。如自然水位的日动态变化很大时,应掌握其变化规律。抽水试验停止后,应按 6.5.1.8 的要求测量抽水孔和观测孔的恢复水位。
- 6.5.1.7 抽水试验时,应防止抽出的水在抽水影响范围内回渗到含水层中。
- 6.5.1.8 水位观测的相关规定如下。
- a) 抽水试验前应测定静水位。
  - b) 同一试验中采用同一测量方法和工具,抽水孔和观测孔应同步观测。
  - c) 抽水孔中水位测量应读数到厘米(cm),观测孔中水位测量应读数到毫米(mm)。
  - d) 恢复水位观测应在抽水停止后第 1 min、2 min、3 min、4 min、6 min、8 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min、40 min、50 min、60 min、80 min、100 min、120 min 各观测 1 次,以后每隔 30 min 观测 1 次。
  - e) 静止水位或恢复水位符合下列条件之一时,可停止观测:
    - 1) 连续 3 h 水位不变化;
    - 2) 水位呈单向变化时,连续 4 h 内每小时水位变化不超过 1 cm;
    - 3) 水位升降与自然水位变化一致;
    - 4) 水位历时曲线呈锯齿状变化时,连续 4 h 内升降之最大差值不超过 5 cm;
    - 5) 采用压力表观测时,连续 8 h 指针不动;
    - 6) 达不到上述条件时,观测时间已超过 72 h。
- 6.5.1.9 出水量测量精度的相关规定如下:
- a) 采用堰箱或孔板流量计时,水位测量应读到毫米(mm);
  - b) 采用容积法时,量桶充满水所需的时间不宜少于 15 s,应读数到 0.1 s;
  - c) 采用水表时,应用秒表测定流出 10 m<sup>3</sup> 水所需的时间,应读数到 0.1 s。
- 6.5.1.10 稳定流抽水试验的主要技术要求如下。
- a) 抽水试验时,水位下降的次数应根据试验目的确定,宜进行 3 次。其中,最大下降值可接近孔内的设计动水位,其余两次下降值宜分别为最大下降值的 1/3 和 2/3。当抽水孔出水量很小,试验时的出水量已达到抽水孔极限出水能力时,水位下降次数可减少。
  - b) 承压完整井抽水试验时,主孔设计动水位不宜超过承压含水层顶板;潜水完整井抽水试验时,主孔设计水位下降值不宜超过潜水含水层厚度的 1/3。
  - c) 在抽水稳定延续时间内,抽水孔出水量和动水位与时间关系曲线只在一定的范围内波动,且没

有持续上升或下降的趋势。

- d) 抽水试验的稳定延续时间应不小于 4 h。
  - e) 抽水试验时,动水位和出水量观测的时间,宜在抽水开始后第 5 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min 各测 1 次,以后每隔 30 min 或 60 min 测 1 次。水温、气温观测的时间,宜每隔 2 h~4 h 同步测量 1 次。
- 6.5.1.11 非稳定流抽水试验主要技术要求如下。
- a) 抽水孔的出水量应保持常量,其稳定标准应符合 6.5.1.10 的要求。
  - b) 抽水试验的延续时间,应按水位下降与时间 $[s(或 \Delta h^2)-lgt]$ 关系曲线确定( $S$  为水位降深,  $\Delta h^2 = H^2 - h^2$ ,其中  $H$  为潜水含水层的自然厚度, $h$  为抽水后潜水含水层的厚度),并应符合下列要求: $s(或 \Delta h^2)-lgt$  关系曲线有拐点时,则延续时间宜至拐点后的线段趋于水平。 $s(或 \Delta h^2)-lgt$  关系曲线没有拐点时,则延续时间宜根据试验目的确定。抽水试验时,动水位和出水量观测的时间,宜在抽水开始后第 1 min、2 min、3 min、4 min、6 min、8 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min、40 min、50 min、60 min、80 min、100 min、120 min 各观测 1 次,以后可每隔 30 min 观测 1 次。抽水结束或因故中断抽水时,应观测恢复水位,观测频率应与抽水时一致,水位应恢复到接近抽水前的静水位。

## 6.5.2 注水试验

6.5.2.1 注水试验用于测定土层、岩石全风化层~强风化层以及破碎岩体、断层破碎带等的渗透系数。

6.5.2.2 对于地下水位以上表层土及埋藏较浅土层,可采用试坑单环和试坑双环注水试验。试验深度较大时可采用钻孔注水试验,钻孔注水试验包括降水头和常水头两种方法。

6.5.2.3 试坑单环注水试验适用于地下水位以上砂土、砂卵砾石等透水性较强的土层,试验的主要技术要求如下。

- a) 在选定的试验位置,挖一个圆形或方形试坑至试验层,在坑底部再挖一个深 15 cm~20 cm 注水试坑并放入铁环,环外用黏土填实,环底铺 2 cm~3 cm 厚的粒径 5 mm~10 mm 的砾石或碎石作为缓冲层。
- b) 向环内注水,当环内水深达到 10 cm 时,开始记录量测时间和注入水量,在试验过程中,应保持水深 10 cm,波动幅度不应大于 0.5 cm。
- c) 水量量测精度应达到 0.1 L;开始每隔 5 min 量测 1 次,连续量测 5 次,以后每隔 20 min 量测 1 次并至少连续量测 6 次。当连续 2 次量测的注入流量之差不大于最后一次流量的 10% 时,试验即可结束,取最后一次注入流量作为计算值。
- d) 试验土层的渗透系数按公式(1)计算。

$$K = \frac{16.67Q}{F} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$K$  ——渗透系数,单位为厘米每秒(cm/s);

$Q$  ——注入流量,单位为升每分(L/min);

$F$  ——试环面积,单位为平方厘米(cm<sup>2</sup>)。

6.5.2.4 试坑双环注水试验适用于地下水位以上黏性土、粉土等透水性较弱的土层,试验的主要技术要求如下。

- a) 试坑开挖按照单环的开挖规定。将直径分别为 25 cm 和 50 cm 的两个试环按同心圆状压入坑底,深约 5 cm~8 cm;在内环及内、外环之间环底铺上厚 2 cm~3 cm、粒径为 5 mm~10 mm 的砾石或碎石作为缓冲层。
- b) 试验过程中,应同时向内环和内、外环之间注水,水深均为 10 cm。量测注水量时,开始每隔

5 min 量测 1 次,连续量测 5 次;之后每隔 15 min 量测 1 次,连续量测 2 次;以后每隔 30 min 量测 1 次并至少量测 6 次。

- c) 当连续 2 次观测的注入流量之差不大于最后一次注入流量的 10% 时,试验即可结束。取最后 1 次注入流量作为计算值。
- d) 试验土层的渗透系数按公式(2)计算。

$$K = \frac{16.67Q \times Z}{F(H + Z + 0.5H_a)} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$K$  —— 渗透系数,单位为厘米每秒(cm/s);

$Q$  —— 内环的注入流量,单位为升每分钟(L/min);

$Z$  —— 从试坑底算起的渗入深度,单位为厘米(cm);干燥炎热条件下应扣除蒸发水量;

$F$  —— 内环的底面积,单位为平方厘米(cm<sup>2</sup>);

$H$  —— 试验水头,单位为厘米(cm);

$H_a$  —— 试验土层的毛细上升高度,单位为厘米(cm)。

6.5.2.5 常水头法适用于砂土、砂卵砾石等透水性较强的土层,以及破碎岩体、断层破碎带等。试验的主要技术要求如下。

- a) 试验段不应使用泥浆钻进,应防止扰动岩土层,孔底沉淀物厚度不应大于 10 cm。
- b) 试验前应进行地下水位观测。试段止水可采用栓塞或套管脚黏土等止水方法,对孔壁稳定性差的试段宜采用花管护壁。同一试段不宜跨越透水性相差悬殊的两种岩土层。对于均一岩土层,试段长度不宜大于 5 m。
- c) 试段止水后,应向套管内注入清水,使套管中水位高出地下水位一定高度或至孔口并保持固定不变,用流量计或量桶量测注入流量。量测注水量时,开始每隔 5 min 量测 1 次,连续量测 5 次;之后每隔 20 min 量测 1 次,至少连续量测 6 次。试验结束要求同试坑法。
- d) 当试段位于地下水位以下时,岩土层的渗透系数按公式(3)计算。

$$K = \frac{16.67Q}{A \times H} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$A$  —— 形状系数,单位为厘米(cm)。

其他符号意义同公式(2)。

- e) 当试段位于地下水位以上,且  $50 < H/r < 200$ 、 $H \leq l$  时,岩土层的渗透系数按公式(4)计算。

$$K = \frac{7.05Q}{l \times H} \lg \frac{2l}{r} \dots\dots\dots(4)$$

式中:

$r$  —— 钻孔半径,单位为厘米(cm);

$l$  —— 试段长度,单位为厘米(cm)。

其他符号意义同公式(2)。

6.5.2.6 降水头法适用于地下水位以上或以下黏性土、粉土等透水性较弱的土层或全风化~强风化岩层,试验的主要技术要求如下。

- a) 成孔、地下水位观测和试段止水同常水头注水试验。
- b) 试段止水后,应向套管内注入清水,使管中水位高出地下水位一定高度或至套管顶部作为初始水头值,停止供水,并开始记录水位随时间变化情况。开始间隔时间为 1 min,连续观测 5 次,然后间隔为 10 min,观测 3 次,后期观测间隔时间应根据水位下降速度确定,可按 30 min 间隔进行,当试验水头下降到初始试验水头的 0.3 倍或连续观测点达到 10 个以上

时,即可结束试验。

- c) 岩土层的渗透系数按公式(5)计算。

$$K = \frac{0.052}{A} \frac{3r^2}{t_2 - t_1} \ln \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$t_1$ 、 $t_2$  —— 试验某一时刻的试验时间,单位为分(min);

$H_1$ 、 $H_2$  —— 在试验时间  $t_1$ 、 $t_2$  时的试验水头,单位为厘米(cm)。

其他符号意义同公式(3)~公式(4)。

### 6.5.3 压水试验

6.5.3.1 压水试验用于测定岩体的透水率,评价岩体的透水性。

6.5.3.2 试验可采用单栓塞分段隔离进行,止水栓塞长度应不小于8倍钻孔直径,宜采用水压式或气压式栓塞。试验用的水泵应压力稳定,出水均匀,在1 MPa压力下,流量能保持100 L/min。

6.5.3.3 测量压力的压力表应反应灵敏,卸压后指针回零,量测范围应控制在极限压力值的1/3~3/4;压力传感器的压力范围应大于试验压力。流量计应能在1.5 MPa压力下正常工作,其量测范围与水泵的出力相匹配,并能测定正向和反向流量。

6.5.3.4 压水试验的主要技术要求如下。

- a) 试段长度宜为5 m,岩体完整时,可适当加长试段,一般不宜大于10 m。
- b) 试验应按三级压力5个阶段进行,宜采用0.3 MPa~0.6 MPa~1 MPa~0.6 MPa~0.3 MPa;当试段埋深较浅时,最大压力应适当降低。
- c) 洗孔应采用压水法,洗孔时钻具应下至孔底,流量应达到水泵的最大出力。洗孔应至孔口回水清洁,肉眼观察无岩粉时方可结束。当孔口无回水时,洗孔时间不得少于15 min。
- d) 下栓塞前应对压水试验工作管进行检查,不得有破裂、弯曲、堵塞等现象。接头处应采取止水措施。栓塞应安设在岩体较完整的部位。
- e) 下栓塞前应先观测1次孔内水位,试段隔离后,再观测工作管内水位。工作管内水位观测应每隔5 min进行1次;当水位下降速度连续2次均小于5 cm/min时,观测工作即可结束,用最后的观测结果确定压力计算零线。
- f) 试验开始后流量观测工作应每隔1 min~2 min进行1次。当流量无持续增大趋势,且5次流量读数中最大值与最小值之差小于最终值的10%,或最大值与最小值之差小于1 L/min时,本阶段试验即可结束,取最终值作为计算值;将试段压力调整到新的预定值,重复上述试验过程,直到完成该试段的试验。
- g) 在降压阶段,如出现水由岩体向孔内回流现象,应记录回流情况,待回流停止,流量达到上述6款规定的标准后方可结束本阶段试验。
- h) 在试验过程中,对附近受影响的露头、井、洞、孔、泉等应进行观测。

6.5.3.5 压水试验成果分析包括下列内容。

- a) 试验资料整理应包括校核原始记录,绘制P-Q曲线、确定P-Q曲线类型和计算试段透水率等。
- b) 试段的P-Q曲线类型应根据升压阶段P-Q曲线的形状以及降压阶段P-Q曲线与升压阶段P-Q曲线之间的关系确定。
- c) 试段透水率采用第三阶段的压力值( $P_3$ )和流量值( $Q_3$ )按公式(6)计算。

$$q = \frac{Q_3}{L \times P_3} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$q$  ——试段的透水率,单位为吕荣(Lu),计算结果取两位有效数字；

$Q_3$  ——第三阶段的计算流量,单位为升每分钟(L/min)；

$L$  ——试段长度,单位为米(m)；

$P_3$  ——第三阶段的试段压力,单位为兆帕(MPa)。

d) 当需要根据压水试验成果计算岩体渗透系数时,可按 SL 31 的公式计算。

#### 6.5.4 弥散试验

6.5.4.1 弥散试验用于研究污染物在地下水中运移时其浓度的时空变化规律,并通过试验获得弥散度、水力弥散系数等参数,为核素迁移数值模型的建立与验证提供基础数据。

6.5.4.2 试验所选用的示踪剂应符合无毒、不易被固体颗粒吸附、灵敏度高、能随水流动、一定时间内化学性质稳定且不会改变地下水的物理性质、渗透速度及流向容易检出等条件,其中人工放射性同位素必须采用法律允许、可靠安全的人工放射性同位素,并且在试验区内应无生活饮用水水源。

6.5.4.3 试验前,应对场地地质、水文地质条件、地下水流向等有足够了解,并获取基本的水文地质参数;示踪剂投放前应测定地下水中示踪剂的背景值,并根据试验场地条件和试验目的选用合适的示踪剂。

6.5.4.4 弥散试验接收孔布设宜采用以投源孔为中心“十”字形剖面,孔距宜根据水文地质条件、含水层岩性等因素考虑,一般采用 5 m 或 10 m;也可采用以投源孔为中心的同心圆布设方法,同心圆半径可采用 3 m、5 m 或 8 m。在地下水主流线上的接收孔两侧宜各布置一个辅助接收孔,且由主接收孔、投源孔与辅助接收孔构成的夹角一般不宜大于 15°。

6.5.4.5 试验过程中可通过在接收孔下游一定距离布设抽水孔的方式加快试验进程。试验开始前(示踪剂投放前),应先在抽水孔中进行定流量抽水,使地下水位基本达到稳定状态,同时测定各井孔的稳定水位、稳定流抽水量。

6.5.4.6 试验孔深以揭穿地下水主要含水层为准,弥散试验主要在代表地段的地下水主要含水层/径流带进行。所有试验孔(包括投源孔、接收孔、抽水孔等)成孔时均需在整个含水层段下滤管;对不进行试验的层位采用止水措施;试验前所有钻孔应清洗;滤水管、止水措施、洗孔等工艺应严格按相关规范要求

进行。

6.5.4.7 示踪剂应准确投放至目标含水层,且应与含水层中地下水混合均匀。示踪剂投放方式宜采用瞬时注入式。

6.5.4.8 试验开始后,采用相应的浓度计对示踪剂的浓度进行现场监测。两个时间非常重要:一是示踪晕前缘到达的时间;二是浓度峰值到达的时间。示踪剂浓度监测频率以确保得到完整的浓度变化曲线为宜。

6.5.4.9 试验数据记录和整理:数据主要包括投源孔和接收孔、抽水孔的相对位置,地下水位、采样时间、示踪剂浓度、累计时间等。对所获得的实测数据,应及时在室内整理,并做出相应曲线,判断试验进程直至试验结束,随后进一步整理计算水动力弥散系数。具体弥散系数计算应符合 A.2 的规定。

#### 6.5.5 流速、流向测试

6.5.5.1 地下水流速、流向可采用几何法、流速流向仪或电位法、示踪试验、单孔同位素稀释示踪法和充电法测定,也可用于测定含水层、含水层之间、地下水露头点相互之间连通性和水力联系。

6.5.5.2 采用几何法测定地下水流向时,量测点不应少于呈三角形分布的 3 个测孔(井)。测点间距按岩土渗透性、水力梯度和地形坡度确定,宜为 50 m~100 m,应同时量测各孔(井)内水位,确定地下水

的流向。

6.5.5.3 采用流速流向仪来测定地下水流速流向,即在单孔中放置流速流向仪,测定单个钻孔所揭露的主要含水层中地下水实际流速及流向。采用流速流向仪测定地下水流速、流向时主要技术要求如下。

- a) 所测量的水体浊度应能满足流速仪使用条件。
- b) 设备连接完成后将探头放入井中水面以下,然后打开电源开关,在设备自带的电脑上打开软件新建文件,校准探头 GPS,根据水质混浊情况调整灵敏度。
- c) 为消除仪器放置对孔内地下水水流环境短时间的的影响,开始测试时,宜等待 10 min~30 min,直至水流恢复至原始状态才开始测试,以排除人为扰动水流的误差干扰。
- d) 水流稳定后开始测试,测试时间为 10 min~20 min。测试获取的数据包括钻孔内地下水的平均流速、实际流速和实际流向等。
- e) 宜根据测量段与邻近段测量结果的差异来判断是否需要加密测量,若测量结果差异较大则需要加密测量,若结果相近则可加大测量间距。

6.5.5.4 电位法宜采用单孔法,以其为中心观测电位差,绘制基本等位线,判断地下水流向。

6.5.5.5 采用示踪试验时主要技术要求如下。

- a) 所选示踪剂要求同弥散试验。
- b) 测量地下水流速前,应沿着地下水流向布置 2 个钻孔,上游为示踪剂投源孔,下游为接收孔,且宜在接收孔两侧垂直地下水流向上增加 2 个辅助接收孔。投源孔和接收孔之间的距离应按照含水层渗透性选择,并符合下列要求:
  - 1) 细砂含水层为 2 m~5 m;
  - 2) 粗砂、砾石含水层为 5 m~15 m;
  - 3) 卵石含水层或渗透性强的裂隙含水层为 10 m~15 m。
- c) 试验过程中宜在固定时间观测示踪剂的浓度,试验后绘制浓度随时间的变化曲线图,并选用合适的公式计算地下水流速。

6.5.5.6 采用单孔同位素稀释示踪法测定地下水流速、流向时主要技术要求如下。

- a) 在进行流速测井之前,首先要进行井孔水文地质条件调查,包括井的结构(井径、滤水管及填料特性),井深,钻孔地层岩性,水位埋深,是否受到周边环境干扰等。
- b) 作为单孔放射性同位素示踪剂,应具备以下特征:
  - 1) 浓度低,可检测灵敏度较高;
  - 2) 在滤水管内的较大体积中能均匀混合,有助于定向测定地下水渗流流向;
  - 3) 示踪剂稳定;
  - 4) 不会改变地下水的天然流向;
  - 5) 便于深井测试等。常用示踪剂为以 NaI 为载体的<sup>131</sup>I 放射性同位素。
- c) 测试段长度宜为 1 m~2 m,可根据含水层岩性和井孔结构适当调整。试验时将溶液稀释后,装入投源器中,将投源器放入测试井段,上下拉动投源器,使示踪剂在测段内分布均匀。
- d) 宜将测段分为几个测点,每个测点观测 4 次~5 次,一般每隔 10 min~30 min 观测 1 次,将记录的  $\ln N$  随着时间  $t$  变化的测值标注在坐标上,选择位于  $\ln N-t$  直线上点进行拟合,得到斜率  $m$ ,代入公式(7),求得各测点的流速,进而采用加权平均法求得各测段的平均流速。

$$V_f = \frac{3.14r \times m}{2\alpha} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$V_f$  ——地下水的渗流速度,单位为米每天(m/d);

$r$  ——钻孔半径,单位为毫米(mm);

$m$  ——  $\ln N-t$  半对数曲线图上拟合直线的斜率;

$\alpha$  —— 流场畸变校正系数。

- e) 测定地下水流向时,将探头放到被测井段,通过手控或自动方式,使探测器沿顺时针方向旋转,每  $45^\circ$  测量 1 次放射性示踪剂的浓度,再逆时针方向反转,每隔  $45^\circ$  再测量 1 次放射性示踪剂的浓度,计算 2 次测量的各方向放射性示踪剂浓度的平均值,将各个方向的计数率平均值按同一比例做成玫瑰花图,计数率最大的方向就是可能的地下水流向。为了更为准确地确定地下水流向,在可能地下水流向的方位,进行小角度加密观测,即每隔  $10^\circ$  测试 1 次井中放射性示踪剂浓度,计数率最大的方位就是地下水流向。

#### 6.5.5.7 采用充电法测定地下水流速、流向时主要技术要求如下。

- a) 以井口为中心,在地表布置互成  $45^\circ$  角的 8 个方位标志,或互成  $30^\circ$  角的 12 个方位标志,作为以井口为中心的 8 条或 12 条放射状测线。
- b) 充电电极 A 应置于井内待测含水层深度位置,“无穷远”B 极应置于地面距井口较远处,其离井口的距离应不小于待测含水层深度的 20 倍以上。
- c) 测量电极 N 固定设置在与事先估计的水流方向相反的方向上,离开井口的距离一般应取待测含水层的深度。当井内有较长的金属套管时,应适当把固定电极至井口的距离增加 2 倍~3 倍,另一测量电极 M 则在沿事先布置的各条测线移动。
- d) 在往井内加盐之前,应先观测 1 次正常场等位线。测量电极 M 依次沿着各条测线移动,找出各条测线上与固定测量电极 N 电位相等的点。量出各条测线上这些点至井口的距离,按一定比例尺绘在平面上,通过这些点勾绘出正常等位线。当井周围介质均匀和各向同性时,正常等位线是以充电点在地表投影为中心的圆。当周围介质不均匀或为各向异性时,正常等位线可能是椭圆或其他形状的封闭曲线。
- e) 测出正常等位线后,往井内注入一定数量的浓试验溶液,同时放入装有食盐的布袋。布袋应悬挂在正对待测含水层的深度。记下放入盐水和盐袋的时间  $t_1$ 。在整个观测过程中应随时注意检查盐袋,当发现食盐溶液将近完时应更换新的盐袋,一般井或钻孔每观测 1 次约需食盐 15 kg~20 kg。
- f) 放入食盐后,隔一定时间(视地下水流速而定,一般为 2 h~3 h;在流速很慢地区,有时需隔 5 h~6 h),按前述相同的方法沿各条测线找出新的等位点,量出它们至井口的距离,以相同比例尺绘于绘有正常等位线的平面图上,勾出异常等位线。观测过程中,在等位点位移最大的测线两侧(偏  $15^\circ\sim 25^\circ$ )应加点,以便更精确地判断地下水的流向。记下观测时间  $t_2$ ,当观测时间较长时,以观测位移最大的等位点的观测时间为准。
- g) 异常等电位线相对于正常等电位线向外位移最大的方向,即地下水的流向。当发现固定测量电极 N 未正好位于与流向相反的方向上时,应改变固定 N 极位置,把它沿正常等位线移到与流向相反的方向上,重新进行观测。
- h) 地下水流速可按异常等电位线中心  $O'$  相对于正常等电位线中心  $O$  的偏移速度或沿水流方向上等电位线的移动速度来确定。

#### 6.5.6 微水试验

6.5.6.1 微水试验用于获取岩土层渗透系数、贮水系数等水文地质参数。一般适用于低渗透性地层,具有试验历时时间短、成本低、无需抽出或注入大量水的特点。

6.5.6.2 试验设备主要包括水头激发装置和水位测量装置。根据水头激发方法的不同,水头激发装置主要分为抽水/注水、机械和真空/压力 3 类,水位测量装置宜与激发装置相匹配。

6.5.6.3 试验过程中,水位变化测量频率取决于试验地层渗透性。在试验早期阶段,宜尽可能加密水位测量频次,直到水位恢复至 60%~80%。试验后期,随着试验的进行,可适当加大水位测量时间间隔。试验数据分析多采用曲线拟合技术,整个试验过程应采集足够多的数据以定义水位-时间响应曲线。

6.5.6.4 在水位变化迅速的地层中,宜采用连接到电子数据记录器的压力传感器来测量和记录水位,传感器和数据记录器的使用可提供足够的测量频率。

6.5.6.5 试验完成后,应对试验数据进行初步分析,以确定是否需重新进行试验。

6.5.6.6 试验报告应包括试验孔号、孔深、试验段内径、日期、时间、水头激发方法、试验前静止水位、原始测试数据文件等。

## 6.5.7 包气带土-水特征曲线测试

6.5.7.1 包气带水分运移试验用于拟合包气带土体水-土特征曲线,获取包气带水分的能量状态(基质势或压力水头)和相应的土壤含水率之间的函数关系,为核素迁移数值模型的建立与验证提供基础数据。

6.5.7.2 试验原理:采用负压计法,通过注水产生地表积水条件模拟放射性液体泄漏,包气带介质达到饱和后停止注水并清除地表积水,通过监测包气带脱水过程的含水量  $\theta$  和吸力值  $h$  获取土-水特征曲线。

6.5.7.3 试验点位的选择宜考虑以下因素:

- a) 试验点位尽量位于或靠近研究区或调查区;
- b) 试验点位尽量位于地下水汇流区域;
- c) 要有充足厚度的包气带进行现场试验研究;
- d) 各试验点位包气带沿线与研究区或调查区内部尽可能保持一致。

6.5.7.4 试验主要设备包括:基质吸力传感器及数据记录终端仪器、含水率传感器及数据记录终端仪器、集水器、自动水位计、铁环、数据记录终端仪器等。

6.5.7.5 试验前根据现场采集土样对含水率传感器进行校正。数据记录频率可设置为每 5 min 或 10 min 自动记录 1 次。试坑开挖后,宜在不同深度处布设含水率传感器 TDR 和水势传感器,并在各深度采集适量包气带介质进行颗粒分析,同时在最大试验深度以下 30 cm 处安装集水器。含水率传感器 TDR、水势传感器和集水器安装深度可根据实际情况适当调整。设备布设安装后迅速分层回填,恢复至开挖前状态。

6.5.7.6 设备布设安装并回填后,在地表嵌入高度约 30 cm、直径约 1 m 的铁环,并确保含水率传感器、水质传感器和集水器包含在铁环正下方的垂直柱体中。24 h 持续向铁环内注水,确保环内水位高度始终保持在地表以上 15 cm 处,对包气带地层进行定水头湿润。

6.5.7.7 根据设置的监测频率,持续监测土壤含水量和土壤水吸力值,并监测集水器中水位变化,直至土壤含水量降至注水前状态。

6.5.7.8 根据监测数据,绘制各深度处地层含水率和基质吸力随时间变化曲线。

6.5.7.9 土-水特征曲线可采用数学模型进行拟合,通过适合的软件进行求解,并结合拟合参数的物理背景对模型进行评价。

## 6.6 室内试验

### 6.6.1 土壤 pH 的测定

把 pH 玻璃电极和甘汞电极插入土壤悬浊液时,构成一电池反应,两者之间产生一个电位差,由于参比电极的电位是固定的,因而该电位差的大小决定于试液中的氢离子活度,其负对数即为 pH,在 pH

计上直接读出。

### 6.6.2 土壤饱和含水量的测定

土壤饱和含水量是在土壤中的孔隙全部充满水时的含水量,代表土壤最大的容水能力。利用环刀采集原状土样,放在水中浸泡,直至土壤水分饱和达恒量时,测定其含水量。

### 6.6.3 土壤比重的测定

将已知质量的土样放入液体中,排尽空气,求出由土壤代换出的液体的体积。以烘干土样质量除以体积,即得土壤比重。

### 6.6.4 土壤容重的测定

利用一定容积的环刀切割自然状态的土壤,使土壤充满其中,称量后计算单位体积的烘干土壤质量。

### 6.6.5 土壤孔隙度的测定

单位体积的土壤中孔隙所占的百分数称为土壤孔隙度,按公式(8)进行计算。

$$P_1 = (1 - d_v/d_s) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$P_1$ ——土壤孔隙度,%;

$d_v$ ——土壤容重,单位为克每立方厘米( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$d_s$ ——土壤比重,单位为克每立方厘米( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

### 6.6.6 饱和渗透系数的测定

#### 6.6.6.1 概述

测定方法分为定水头法和变水头法。饱和渗透系数大于 0.25 m/d 的地层介质采用定水头法,其他地层介质采用变水头法。

#### 6.6.6.2 定水头法

首先使整个土柱体饱和,上部安装定水头装置,如图 2 所示。调整入水口供水量,使试验期间水头差  $H$  保持不变,记录时间  $\Delta t$  和底部出口流量  $Q$ ,根据 Darcy 定律计算饱和渗透系数,计算公式见公式(9)。

$$K_s = \frac{Q \times L}{A \times H \times \Delta t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$K_s$ ——饱和渗透系数,单位为厘米每秒( $\text{cm}/\text{s}$ );

$Q$ ——出水流量,单位为毫升( $\text{mL}$ );

$L$ ——土柱体高度,单位为厘米( $\text{cm}$ );

$A$ ——土柱截面积,单位为平方厘米( $\text{cm}^2$ );

$H$ ——水头差,单位为厘米( $\text{cm}$ );

$\Delta t$ ——时间,单位为秒( $\text{s}$ )。

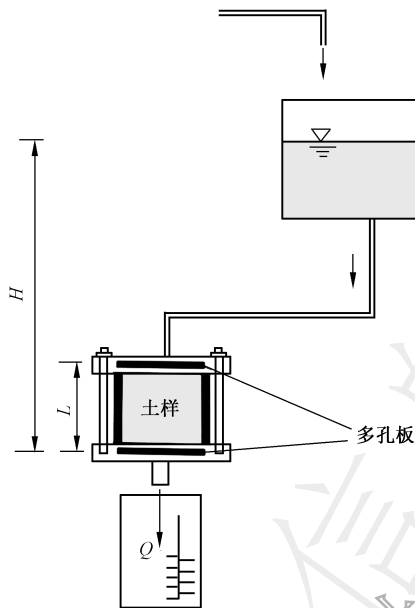


图 2 定水头法测定饱和渗透系数示意图

6.6.6.3 变水头法

将试验土柱从底端通水,使整个土柱体饱和,放入装置中,水由一竖管流入土壤,如图 3 所示。当  $t=0$  时开始记录最初的水头差  $h_1$ ,经过  $\Delta t$  时间后记录水头差  $h_2$ ,按公式(10)计算饱和渗透系数。

$$K_s = 2.303 \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \lg \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (10)$$

- 式中：
- $K_s$  ——饱和渗透系数,单位为厘米每秒(cm/s)；
  - $a$  ——竖管截面积,单位为平方厘米( $\text{cm}^2$ )；
  - $L$  ——土柱体高度,单位为厘米(cm)；
  - $A$  ——土柱横截面积,单位为平方厘米( $\text{cm}^2$ )；
  - $\Delta t$  ——时间,单位为秒(s)；
  - $h_1$  ——试验初始的水头差,单位为厘米(cm)；
  - $h_2$  ——试验结束后的水头差,单位为厘米(cm)。

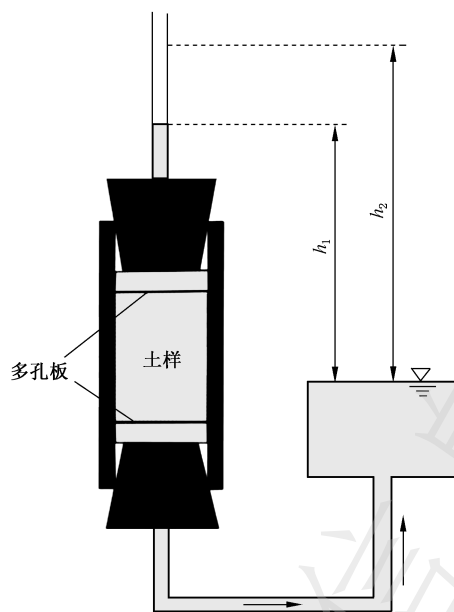


图3 变水头法测定饱和渗透系数示意图

### 6.6.7 土壤水分特征曲线测定

#### 6.6.7.1 概述

测定方法分为机械张力计法、砂性漏斗法、压力膜仪法、离心机法。

#### 6.6.7.2 机械张力计法

##### 6.6.7.2.1 适用范围

张力计在土壤比较湿润的时候测量土壤基质势很准确,适合于灌溉和水分胁迫的连续监测,而且受土壤空间变异性的影响较小。其缺点是反应慢,需长时间后才能达到水平衡,测量范围窄,通常只对0~0.08 MPa 吸力范围内有效,不适合于较干燥土壤,陶土头需定期维护和更换,如用水银做压力计,需防止水银外泄污染,如用水做压力计,则需及时加水,整个测量过程所消耗的劳力与时间较多,运行费用高。

##### 6.6.7.2.2 试验原理

内部充满水的张力计(陶土头先饱和),安设于土壤中,要使陶土头与土壤紧密接触。张力计内的水通过陶头多孔壁(或称膜)与土壤孔隙中的水相连通。在平衡过程中由少量的水从陶头流入土壤或从土壤流进陶头内。

当达到平衡时,土壤总水势  $\mu_{w0}$  与张力计总水势  $\mu_{wt}$  相等。在不考虑温度影响时,按公式(11)和公式(12)计算。

$$\mu_{w0} = \mu_w^0 + \varphi_p + \varphi_m + \varphi_R \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\mu_{wt} = \mu_w^0 + \varphi_{st} + \frac{1}{\rho_w}(p_t - p_0) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$\mu_{w0}$  ——土壤总水势,单位为厘米(cm);

$\mu_w^0$  ——标准状态下纯自由水的化学势,单位为厘米(cm);

- $\varphi_p$  ——土壤水压力势,单位为厘米(cm);  
 $\varphi_m$  ——土壤水基质势,单位为厘米(cm);  
 $\varphi_R$  ——土壤水溶质势,单位为厘米(cm);  
 $\mu_{wt}$  ——张力计总水势,单位为厘米(cm);  
 $\varphi_{st}$  ——张力计中水的溶质势,单位为厘米(cm);  
 $\rho_w$  ——水的密度,单位为克每立方厘米( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $p_i$  ——张力计内水承受的压力,单位为厘米(cm);  
 $p_0$  ——张力计外水承受的压力,单位为厘米(cm)。

#### 6.6.7.2.3 试验方法

试验方法如下。

- 将干土捣碎过筛,去掉石子,加入少量的水,使土壤达到 5%~10% 含水率,按土盒体积和土容重,计算所需土壤重量。取一半装入土盒中压实,从张力计孔插入一支 13 mm 钻头,再装填另一半土压实,取出钻头,插入张力计杆,旋紧固定螺帽。
- 打开张力计后盖,用注射器给张力计注入无气水,使张力计杆、尼龙管、毛细管内充满水没有气泡为止,加橡皮塞旋紧。
- 安装完毕后,将土盒放入水中从下往上饱和后,取出土盒称重。
- 初始脱湿过程让土壤水自然蒸发,每天早、晚各称重 1 次并读负压值,一直到负压读数不能继续升高为止,即完成初始脱湿过程。
- 吸湿过程均匀加入少量的水,加盖防止水蒸发,第 2 天称重读数,重复上述过程,直到负压为零,即可测得主要吸湿过程。
- 主要脱湿过程再进行土壤脱水蒸发,每天称重读负压值,直到负压值达到最大值,取土烘干,求得残余含水率。
- 绘制水分特征曲线。

#### 6.6.7.3 砂性漏斗法

##### 6.6.7.3.1 适用范围

测定范围上有限制,只能在较小的土壤吸力条件下适用,不能获取整个含水率范围内的土壤水分特征曲线。

##### 6.6.7.3.2 试验原理

漏斗里的土样通过多孔板与悬挂水柱建立水力联系,可以传递静水压力。当处于平衡状态时,土壤水的总土水势与多孔板下方的自由水总水势相等。漏斗和右端带刻度玻璃管的液位差,即为土壤水的基质势。

##### 6.6.7.3.3 试验方法

试验方法如下。

- 先将砂性漏斗在水中浸水 1 天,使砂芯充分饱和,清除漏斗水室和水管中的气泡,然后将土样装入漏斗中压实,从多孔板底部缓慢进水饱和土样,并放置过夜。用封口膜封住漏斗口和玻璃管口,并扎一些针孔,减少蒸发并保持漏斗内气压恒定。
- 试验开始时,降低玻璃管使砂芯底部产生负压,土样开始排水,待介质中的液体自由排出并达到平衡,通过玻璃管的刻度记录排出液体的体积,逐次降低玻璃管并读取数据直至脱湿过程结束,通过记录试验过程中各次的含水率和土壤水吸力,得出土壤水吸力与含水率的对应关系,此即脱湿曲线。土样中含水率根据排出水的体积计算,毛细压力用压水头表示,为试验过

程中土样出水稳定后用刻度尺量测的土样上表面到悬挂玻璃管中液面的距高。

- c) 待脱湿过程曲线测定完成后,逐次升高玻璃管,试验从很大吸力开始,用上述同样的方法得吸湿曲线。

#### 6.6.7.4 压力膜仪法

##### 6.6.7.4.1 适用范围

适用于所有土壤介质及吸力范围。利用压力膜仪测定某区土壤水分特征曲线时,试验步骤较为繁琐,试验过程要反复称重,不可避免地存在着水分的蒸发和土壤小颗粒的散失,耗时可长达2周。

##### 6.6.7.4.2 试验原理

湿土样放入压力膜仪中,外加已知的压力,使相应压力的多余土壤水分被压出。通过在不同的压力下分析样品,则可确定土壤含水量与水势关系的标准曲线。

##### 6.6.7.4.3 试验方法

试验方法如下。

- 修平环刀取得的土壤样品,使之与陶土板接触良好。对于扰动土壤样品,首先使用2 mm的圆孔筛去掉较大的石块,使剩余物直径小于2 mm。若需要,则可以把直径2 mm~6 mm的石块放回样品中去,然后将准备好的土壤混合,最后堆成高2 cm~4 cm的样品堆。
- 将准备好的土壤样品环放置在陶土板上,陶土板上小心加水,使样品能够吸水至少16 h,达到充分饱和,然后用吸管吸掉陶土板上多余的水分。
- 将压力室组装好,注意避免土壤颗粒接触O形环。
- 调节压力调节阀,逐渐加大到所需压力。如果土样环和土壤有1 cm高,可在48 h内达到平衡。一些土壤的平衡时间为18 h~20 h,可以在出水管口放置1个小量桶,若量桶内的水位长时间没有变化,则可认为达到平衡。
- 反向转动调压阀到1个标准大气压,打开压力室后立即称量土壤样品的质量。
- 将最终样品放置在烘箱内,在105℃下烘干6 h~8 h,得到最终的干土质量,计算体积含水率。
- 根据试验数据绘制土壤水分特征曲线。

#### 6.6.7.5 离心机法

##### 6.6.7.5.1 适用范围

采用离心机法测定土壤特征曲线,获取速度高效、快速、温度可控,可以研究土壤水分特征曲线和温度的关系;可测吸力的范围比较广泛。相较于其他方法,离心机法具有操作简单、省时、可测较宽的吸力范围等优点。

##### 6.6.7.5.2 试验原理

实际上就是用离心场替代重力场。在重力场中, $H$ 高度的水体是受重力加速度 $G$ 作用。在离心场中, $G$ 的作用由离心加速度代替。可由公式(13)表示。

$$H = 1.118 \times 10^5 \times n \times h \left( r_1 - \frac{h}{2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$H$  ——水势,单位为厘米(cm);

$n$  ——转速,单位为转每分(r/min);

- $h$  ——装土量,单位为克(g);  
 $r_1$  ——离心机半径,单位为厘米(cm)。

#### 6.6.7.5.3 试验方法

将过 2 mm 筛的风干土样以  $h$  的高度,按试样容重要求(即不同的压实度标准)分层在离心管里,然后进行毛管饱和,饱和后放在离心机里,按不同的转速度进行脱水。然后,进行烘干计算不同的转速对应的土壤体积含水率。

#### 6.6.8 岩石颗粒密度

岩石颗粒密度是指岩石固体矿物颗粒部分的单位体积内的质量。岩石的固体部分的质量,采用烘干岩石的粉碎试样,用精密天平测得,相应的固体体积,一般采用排开与试样同体积之液体的方法测得,通常用比重瓶法测得岩石固体颗粒的体积。

#### 6.6.9 岩石块体密度

测定岩石的块体密度常用量积法、水中称量法与蜡封法。量积法适用于能制备成规则试样的岩石;除遇水崩解、溶解和干缩湿胀性岩石外,均可采用水中称量法;不能用量积法或水中称量法进行测定的岩石可以采用蜡封法,如软弱岩石、风化岩石及遇水易崩解、溶解的岩石等。

#### 6.6.10 岩石含水率

通过烘烤将岩石中的水分去除,求得烘干前后岩石质量,进一步获得岩石含水率。

#### 6.6.11 岩石的吸水率及饱和吸水率

岩石的吸水率是岩石试样在大气压力和室温条件下自由吸入的水量与试样固体质量的比值,用百分数表示;岩石的饱和吸水率是岩石试样在强制状态下(1 500 个大气压或真空),吸入的最大水量与试样固体质量的比值,也用百分数表示。

#### 6.6.12 静态批式试验

在核素迁移途径上,现场采集地层介质和地下水样品,在实验室中将 1.0 g 经过预处理的地层介质样品放入 15 mL 的聚丙烯离心管,将已知浓度的核素溶液与地层介质混合一段时间直至平衡,然后固液分离,分别测量地层介质和溶液中的核素浓度,计算核素的分配系数。分配系数计算应符合 A.3 的规定。

#### 6.6.13 动态柱试验

在核素迁移途径上,现场采集地层介质的原状样,柱体长度一般选择范围为 5 cm~60 cm,长度与直径之比为 2~3。在实验室中加装供水箱、蠕动泵(控制注入流速)和流出液自动采样器。将非吸附示踪剂和已知浓度的核素溶液分别注入柱体,得到非吸附示踪剂和核素的迁移曲线,根据两条迁移曲线的关系计算核素的分配系数。分配系数计算应符合 A.4 的规定。

### 7 地下水长期监测

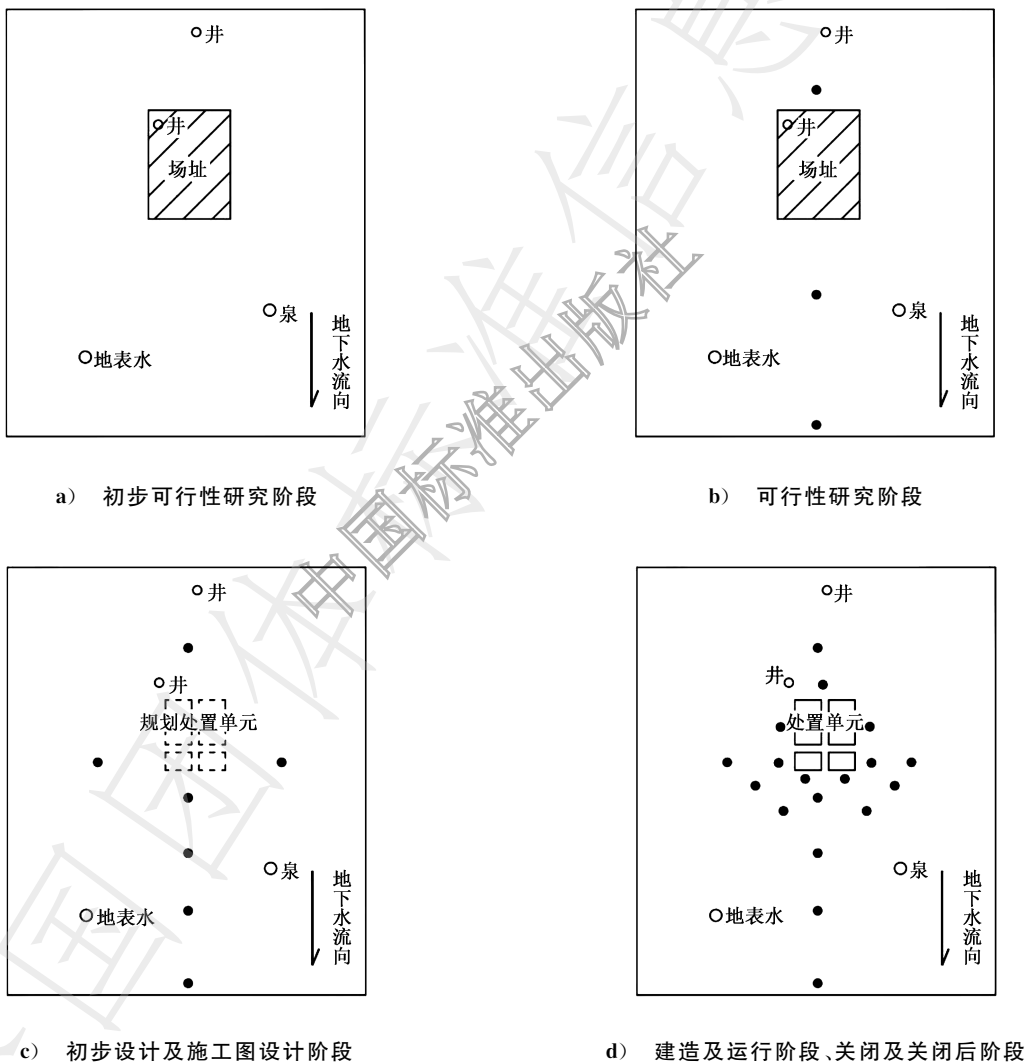
#### 7.1 地下水监测点位布设原则

低水平放射性废物近地表处置场的地下水监测建议从初步可行性研究阶段开始,一直持续到处置场关闭及关闭阶段。监测点布设原则应结合场址大小、位置、水文地质单元的划分及其边界、地下水的

补径排等条件综合确定：

- a) 监测点采用控制性布点与功能性布点相结合的布设原则,既要掌握水文地质参数变化,又要起到对核素等污染物渗漏监控作用；
- b) 监测点网应能控制场址所处水文地质单元的边界条件、地下水的补给、径流、排泄路径；
- c) 监测点网应分区布设,且能掌握地下水动态变化规律,覆盖核素潜在运移路径；
- d) 为满足数值法计算要求,观测孔的布置应保证对计算区各分区参数的控制；
- e) 当存在多层地下水时,应分层设置监测点；
- f) 应充分利用勘探孔、非经常开采的井、泉等。

水文地质调查各阶段监测点具体布设可参考图 4 及表 3 考虑。



注 1：上图监测点布设仅为参考,无数量要求。

注 2：○为自然存在的井、泉等,●为监测井、孔。

图 4 各阶段监测点布设示意图

表 3 不同阶段监测点布设原则

| 阶段                                                                                                                            | 布设原则                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初步可行性研究阶段                                                                                                                     | 根据候选场址复杂程度确定是否进行监测点的布设。可利用场址及周边井、泉、地下水水源地或水文地质条件易发生改变的地段作为简易监测点                                                       |
| 可行性研究阶段                                                                                                                       | 本阶段正式开始布设地下水监测系统。拟建场址上游至少布置 1 处监测点,场址附近布置不少于 1 处监测点,场址下游布置不少于 2 个监测点。监测点可利用已有井、泉、水文勘探孔等,布置范围宜为场址中心 1 km 内             |
| 初步设计及施工图设计阶段                                                                                                                  | 除利用上阶段监测点外,拟建场址两侧布置监测孔,增加下游监测点数量,监测点间距宜为 80 m~150 m。布置范围为场址中心 0.5 km 内                                                |
| 建造及运行阶段                                                                                                                       | 拟建场址周围布置监测点,最终形成包围场址的监测网。其中下游监测点数量不宜少于 2/3,也可根据处置单元分别进行布置,监测点间距宜为 50 m~80 m。处置场运行过程中若发生核素向外迁移等异常情况,可在局部适当加密监测点,配合查明原因 |
| 关闭及关闭后阶段                                                                                                                      | 本阶段原则上不再增设监测点                                                                                                         |
| 根据低水平放射性废物近地表处置场的运行特点,上述单个监测点应满足对场址地下水影响范围内可能出现的孔隙水和基岩裂隙水同时进行监测;若场址存在岩溶,且同时满足作为处置场的初步条件,根据岩溶水分布不均、水力联系各向异性等特点,其监测点的布设应进行专门研究。 |                                                                                                                       |

7.2 监测井基本要求

- 7.2.1 监测井设计深度应满足监测目标要求,监测目标层与其他层及地表水之间应止水良好。
- 7.2.2 监测井井径、井斜应满足设计要求,井管外径不宜小于 146 mm,以能下放监测仪器、采取水样为准。
- 7.2.3 钻进施工按照 DZ/T 0270 中的相关要求和 DZ/T 0148 中相关要求执行,并按照 ISO 9001 质量管理体系监控钻进施工全过程。
- 7.2.4 在天然覆盖层区域钻进宜采用干钻,以准确记录地下水初见水位和稳定水位,钻至地下水位以下可采用泥浆护壁钻进。
- 7.2.5 为方便取芯工作可采用小口径钻进取芯,大口径扩孔成井工艺。
- 7.2.6 监测井材料要求如下。
- a) 监测井管材应采用具有耐久性的无污染材质,宜选用不锈钢、无缝钢管,壁厚不得小于 4.5 mm。滤水管材质应与上部井管相同,可采用约翰逊滤水管、缠丝滤水管、桥式滤水管。
  - b) 对于粉细砂含水层,可采用贴砾滤水管,基岩裂隙水和岩溶水监测井可采用不缠丝滤水管。
  - c) 滤料应选用磨圆度好的砾砂,以选用石英砾料为宜,砾料粒径应根据含水介质粒度确定,按照 GB 50027 中相关要求执行,同时应大于滤水管开孔直径(间隙)。砾料应用清水或蒸汽清洗。
  - d) 止水材料宜选用优质黏土球或水泥等。
- 7.2.7 下管时安装井管应设扶正器,确保井管处在井孔中心位置。井管各接头连接时不能用任何粘合剂或涂料,宜采用螺纹式连接或焊接,且应保证井管严密性。
- 7.2.8 滤水管长度应等于监测目的层中含水层总厚度。对巨厚(大于 30 m)含水层可适当减少滤水管长度,减少长度宜不超过含水层厚度的 25%。
- 7.2.9 地下水监测井在井管过滤器下端,应设置管底封闭的沉淀管,沉淀管长度 3 m~5 m,沉淀管材质应与井管及过滤管相同。
- 7.2.10 填砾过滤器的滤料厚度,粗砂及以上含水层不小于 75 mm,中砂、细砂、粉砂及粉土含水层不小于 100 mm。

- 7.2.11 地下水监测井填砾之后应对砾料顶端以上井段进行封闭和止水。回填黏土段应由承压含水层顶板位置至地表井台。
- 7.2.12 成井后应及时洗井,洗至水清沙净,并进行相关水文试验。
- 7.2.13 为保护监测井,应设置井口保护装置,包括井口保护筒、井台、防护栏、井口标识等部分,有条件的地区可建井房。监测井保护装置示意图如图 5 所示。
- 7.2.14 监测井建造完成后应测量井口坐标和高程。

单位为毫米

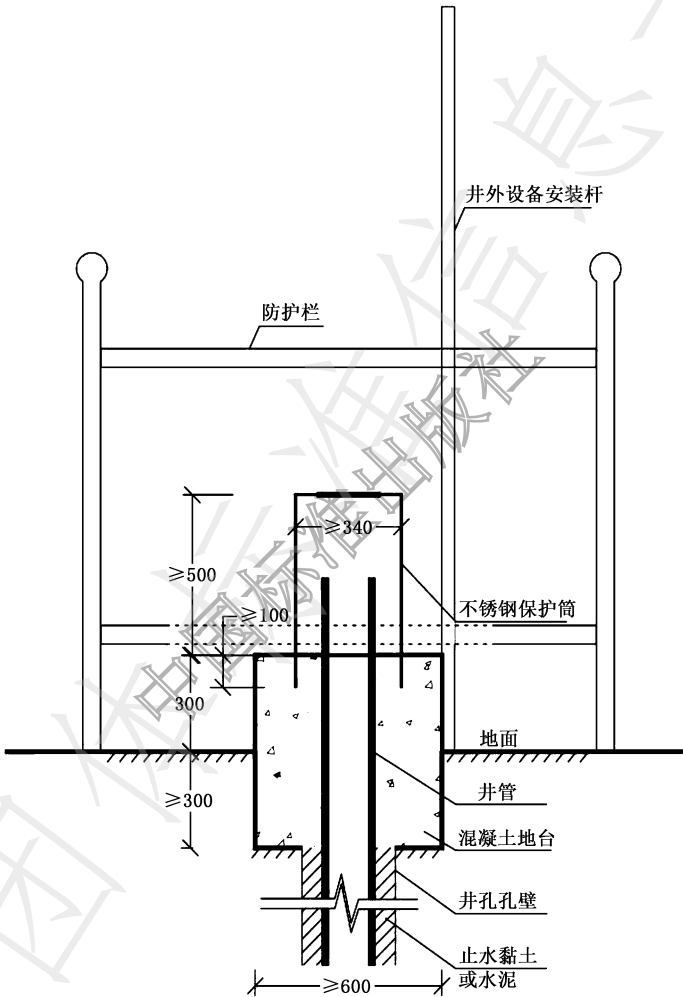


图 5 监测井保护装置示意图

- 7.2.15 分层监测要求如下：
- a) 地下水监测主要以浅层地下水(一般 80 m 深度以上)为主,具体深度根据处置单元所在深度和水文地质条件综合确定,无特殊要求深层地下水可不作监测；
  - b) 在浅层地下水系统中由于连续隔水层的存在,地下水含水层不止一层,单一监测井不能满足监测要求,需建造监测井群或蜂巢井,进行分层采样监测,以查明水文地质特征在垂向的空间分布及变化。

### 7.3 监测因子及频次

#### 7.3.1 水位监测

7.3.1.1 水位监测频率,宜每隔 7 d~15 d 监测 1 次,水位变化剧烈时段应增加监测频次。

7.3.1.2 水位监测,应测量 2 次或 2 次以上,且 2 次测量误差应不大于 1 cm/10 m。

7.3.1.3 监测水位时,应同时记录附近抽排水或其他影响水位变化有关情况。

#### 7.3.2 水质监测

7.3.2.1 调查区的补给区,径流区,排泄区,主要水质分区,污染源及其下游,咸水与淡水过渡带及其两侧宜布设监测点。

7.3.2.2 水质监测频率至少在监测期的每年丰、枯水期各测 1 次,水质变化较大时应增加监测次数;咸水入侵区的水质监测频率宜为每季(或月)1 次。

7.3.2.3 采集水样前宜进行抽水洗井(孔)。

7.3.2.4 水质监测可根据测定项目及各项的稳定性选择采样室内测定,采样野外水质监测仪现场测定,或安装自动水质记录仪自动测定。

7.3.2.5 需查明调查区内地下水化学类型和对地下水进行腐蚀性评价时,应进行水质简分析;需查明调查区内地下水水质、污染情况、环境地下水本底值和为地下水环境影响评价提供资料时,应进行水质全分析。

- a) 水质简分析项目:感官性状(色、浑浊度、臭、味、肉眼可见物)、pH、钾、钠、钙、镁、铵、重碳酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氢氧化物、氯化物、硝酸盐(以氮计)、游离二氧化碳、侵蚀性二氧化碳、总硬度(以碳酸钙计)、永久硬度、暂时硬度、溶解性总固体等。
- b) 水质全分析项目:除包括上述简分析项目外,还应包括氟化物、氰化物、碘化物、磷酸盐、高锰酸盐指数、挥发酚类、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、可溶性二氧化硅、化学耗氧量、生化需氧量、总碱度、总酸度、全铁、砷、汞、铜、铅、锌、锰、镉、六价铬、总  $\alpha$  放射性、总  $\beta$  放射性、铀、钍等。在监测过程中,可根据需要调整分析项目。

#### 7.3.3 水温、气温观测

7.3.3.1 在水位、水量、水质观测点观测时,宜同步观测水温、气温。

7.3.3.2 观测孔内水温测量时,水温计的探头宜置于含水层过滤器部位;泉水水温测量时,水温计的探头宜置于泉眼处;抽水井孔水温测量时,可在抽水井孔的水口处测水温。

7.3.3.3 水温计的结构和精度,应满足在井孔内和泉水中的测温要求。

### 7.4 监测信息化系统的构建

#### 7.4.1 基本要求

7.4.1.1 监测信息化系统宜偏重于初步设计及施工图设计、运行及关闭阶段应用,运行及关闭阶段应予以突出。

7.4.1.2 地下水自动监测系统应符合下列规定:

- a) 遵循技术先进、质量可靠、管理方便的原则;
- b) 监测项目和监测频次按不同监测目的和要求确定;
- c) 监测仪器设备具有较好的耐久性,并定期进行设备检定。

7.4.1.3 组建地下水监测信息化系统需要使用的设备包括:传感器、固态存储器、通信设备、遥测终端机、通信控制机、计算机及其外设和电源等主要设备,以及避雷针、人工置数装置和用于系统安装、调试、

维修的多功能测试仪等。

7.4.1.4 选用的主要设备均应经过行业(地方)主管部门组织的产品(技术)鉴定或经过国家授权质检机构的产品型式试验检测,并符合有关国家标准或行业标准的要求。对于为系统配套而选用的新型产品,其性能指标应经过检测合格后,方能正式采用。

#### 7.4.2 信息系统功能

7.4.2.1 实现对地下水监测井包括但不限于水位、水温、pH、浑浊度、总 $\alpha$ 放射性、总 $\beta$ 放射性、气温、降雨量等指标相关运行数据的采集、传输、计算、统计。

7.4.2.2 直观显示监测数据的历史变化过程及当前状态。

7.4.2.3 地下水水质出现紧急异常情况,系统能及时发出预警信息。

7.4.2.4 能实现地下水监测系统的远程登录、远程访问、远程管理、远程控制和远程维护。

#### 7.4.3 信息系统构建

7.4.3.1 应建立统一的地下水数据库结构,并在此基础上实现地下水信息的交换与共享。

7.4.3.2 信息系统构建的相关规定如下。

- a) 系统 B/S 结构软件设计,应支持网络(因特网、局域网)浏览、操作。
- b) 系统软件支持 SQL 数据库,可存储不少于 3 年的各种历史数据。
- c) 主界面地图显示功能,宜包括:主界面以各监测点分布图为背景,显示所有监测点位置分布情况;用户可以通过鼠标拖动自行编辑监测点的位置;将鼠标置于监测点上,可以显示监测点的基本信息及最新监测数据,单击测点可进入该测点的实时监测界面,查看详细数据;系统可支持手机 APP 展示、维护查询、系统管理。
- d) 系统宜支持终端设备定时自动上报、定时问询、即时召测。定时自动上报是指测控终端按指定时间间隔定期上报监测数据,自动上报时间间隔可设。定时质询是指软件定时下发采集命令,采集现场所有监测点数据,采集时钟基准统一为计算机时钟,保证数据同时性。即时召测是指用户需要时,通过软件下发命令,采集指定监测点当前数据。
- e) 系统功能应进行模块化设计,同时支持多种通信方式。主要功能模块宜包括:系统信息管理、基础信息管理、实时监控、历史数据查询、图形分析、汇总统计与报表管理等功能模块。在各项功能模块中,均支持根据所在区域、地理位置、规模及测点名称等进行组合查询,查询结果可以表格、图片等形式输出。
- f) 能够接收现场报警数据,弹出报警提示信息和声音提示。
- g) 系统能够扩展方便。

#### 7.5 监测井的维护

7.5.1 应指派专人对监测井的设施进行经常性维护,设施一经损坏,应及时修复。每 2 年应测 1 次监测井深度,如有淤塞影响正常监测时,应及时处理。

7.5.2 井口有变动时,应及时重新测量井口高程,并记录。

7.5.3 每 2 年对监测井进行一次透水灵敏度试验,当向井内注入灌水段 1.0 m 井管容积的水量,水位复原时间超过 15 min 时,应进行洗井。

### 8 水文地质条件分析与评价

#### 8.1 水文地质单元划分

8.1.1 水文地质单元划分应在资料搜集、野外调查及相关试验成果综合分析的基础上进行。

8.1.2 水文地质单元是由地下水补给、排泄边界和完整的隔水边界构成的独立完整的地下水系统。

- a) 水文地质单元应反映控制区域水文地质条件的主要水文地质界线,包括:地表分水岭、地下水分水岭、断层边界、补给边界、排泄边界、隔水边界等地下水系统边界等。
- b) 水文地质单元应反映区域地下水补给、径流、排泄主要特征。宏观规律上,反映区域水文地质单元划分、分布情况;微观特征上,反映地下水补给区段、地下水排泄带、区域地下水主流线、局部地下水流向、地下水强径流带、地下水与地表水的补排关系等。

8.1.3 水文地质单元划分应根据宏观地貌单元、大地构造格局、气候分带以及一级地表水系特征的差异,划分出不同的水文地质单元分区,在此基础上,再结合实际工作的需要,依据每个分区内地下水循环特征、水动力特征、水化学特征以及含水层结构的不同,对水文地质单元进行分级。

8.1.4 水文地质单元应描述地形地貌特征,地下水类型,含水层、隔水层埋藏条件、厚度、组合关系等空间分布规律及特征,岩土层的水理性质(给水度、透水性等),补给区、排泄区的特征,地下水流速、流向等。

## 8.2 地下水补给、径流、排泄条件分析

8.2.1 地下水补给、径流、排泄条件应在资料搜集、野外调查及相关试验成果综合分析的基础上进行评价,应分析评价以下内容:

- a) 地下水的补给来源、补给方式或途径、补给区分布范围及补给量,地下水人工补给区的分布、补给方式和补给层位、补给水源类型、水质、水量及补给历史;
- b) 地下水流场、流速、流向,宜绘制等水位线图、地下水流网图;
- c) 地下水排泄区(带)分布、排泄形式、排泄途径及排泄量;
- d) 地表水与地下水的水力联系;
- e) 地下水人工调蓄条件、调蓄范围、调蓄库容等。

8.2.2 地下水的补给、径流、排泄条件是一个动态的变化,加强与前期资料的分析评价,及时更新数据。

## 8.3 地下水化学分析

8.3.1 根据水质分析结果,确定各含水层(组)的地下水化学类型,并用库尔洛夫式表示。

8.3.2 根据水质全分析成果,按照 GB/T 14848 的相关规定对地下水质量进行分类。

8.3.3 根据长期水质分析结果,提供主要离子在时间上的变化曲线,并结合地下水的补给及周边环境的变化进行分析。

## 8.4 地下水位动态变化

8.4.1 根据同一时期的水位观测情况,绘制该时期不同含水层(组)的地下水水位等值线图。

8.4.2 根据地下水长期观测资料,编制地下水长期观测报告和地下水长期观测年度报告。地下水长期观测报告和地下水长期观测年度报告的内容宜包括:

- a) 地下水监测点位信息,地下水水位、水量等要素及影响因素的历时曲线;
- b) 地下水水文要素与气象、水文等关系曲线图;
- c) 当有足够的观测资料时,绘制不同水文年丰、平、枯水期的地下水水位等值线图;
- d) 对于井、泉的水量观测,编制涌水量统计表、年报表;
- e) 地下水变化规律及变化趋势。

## 8.5 水文地质条件综合评价

8.5.1 场址附近水文地质条件:

- a) 分析场址附近水资源分布特征、地下水开发利用现状与远景规划;

- b) 分析场址附近地形地貌、地层分布特征、主要地质构造及其水文地质特征；
- c) 场址附近水文地质单元划分结果及各水文地质单元的基本特征；
- d) 分析地下水类型和赋存条件、补径排条件；
- e) 提供主要岩土层的水文地质参数。

#### 8.5.2 场址区水文地质条件：

- a) 分析场址区地形地貌、地层结构、地质构造主要特征及其水文地质特征等，应重点分析场址区可能存在的断层、岩脉、侵入岩体、破碎带、节理密集带的富水性和导水性，是否为核素运移通道等；
- b) 分析场址区地下水类型、含水岩组、富水程度等；
- c) 分析场址区各水文地质单元主要特征等；
- d) 分析场址区岩土层的渗透性，应测定具体渗透性参数；
- e) 分析场区场地平整后水文地质条件变化情况。

#### 8.5.3 水文地球化学特征：

- a) 分析地下水主要化学类型及分布特征；
- b) 分析岩体介质关键溶质运移参数；
- c) 分析场址区岩土介质对核素运移的阻滞能力。

#### 8.5.4 应综合分析评价场址区水文地质条件复杂性，水文地质复杂性划分应符合 4.2 的规定。

#### 8.5.5 应根据 8.5.1~8.5.4 的分析，综合评价场址的适宜性，厂址适宜性可分为适宜、不适宜和需专门研究 3 类，并应符合下列规定。

- a) 同时符合下列条件时，为适宜场地：
  - 1) 地质构造简单；
  - 2) 天然屏障分布均匀、面积广、厚度大，渗透性分级很弱到微，且具有强吸附性；
  - 3) 水文地质条件简单，包气带厚度大，场区边界离水源的距离不小于 500 m。
- b) 符合下列条件之一时，为不适宜场地：
  - 1) 地质构造复杂；
  - 2) 天然屏障渗透性强、吸附能力很弱或无天然屏障；
  - 3) 水文地质条件复杂且难以查明，处置单元底板位于地下水位附近或地下水位以下。
- c) 介于适宜场地和不适宜场地之间时，为需专门研究场地。

## 9 成果要求

### 9.1 成果资料

#### 9.1.1 水文地质调查与评价报告所依据的原始资料和引用资料，应进行整理、检查、分析、鉴定，确认无误后方可使用。对前期已有调查资料应合理利用。

#### 9.1.2 编写水文地质调查与评价报告应符合下列要求：

- a) 报告全面真实反映调查区的客观条件，资料和内容完整、层次分明、重点突出、数据无误、图表清晰、论证充分、结论明确、建议合理、有明确的工程针对性；
- b) 报告的文字、术语、代号、符号、数字、计量单位、标点等，均符合国家相关标准的规定；
- c) 文字论述、图件、照片、表格内容等互相吻合、相辅相成、前后呼应。

#### 9.1.3 水文地质图的绘制应符合相关标准的规定，并应符合以下要求。

- a) 图件客观反映水文地质条件、特征和规律，突出重点，科学简洁，美观实用。
- b) 调查工作平面布置图、实际材料图反映水文地质调查工作量和调查精度，比例根据工程规模和调查范围、面积，同时考虑成图方便确定。

- c) 综合水文地质图着重反映基础水文地质条件、水文地质规律、典型水文地质特征和水文地质单元或地下水系统划分等,地质要素花纹图案及设色依据 DZ/T 0157、DZ/T 0179 和 DD 2019-04。比例满足调查阶段和任务书要求的精度。

9.1.4 现场试验和室内试验数据应满足信息化工作及相关数据库建立的要求。

9.1.5 水文地质调查与评价报告附图和附表类型和翔实程度应与调查阶段和任务要求的精度相适应。

各阶段水文地质调查与评价报告宜附图表见表 4。

表 4 各阶段水文地质调查与评价报告宜附图表

| 图表                     |                         |             | 调查阶段    |       |          |       |        |
|------------------------|-------------------------|-------------|---------|-------|----------|-------|--------|
|                        |                         |             | 初步可行性研究 | 可行性研究 | 初步设计及施工图 | 建造及运行 | 关闭及关闭后 |
| 平面图类                   | 调查工作平面布置图               |             | √       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 水文地质调查实际材料图             |             | √       | √     | √        | ○     | ○      |
|                        | 综合水文地质图                 | 场址附近区域及附近范围 | √       | √     | ○        | ○     | ○      |
|                        |                         | 场址区         | ○       | √     | ○        | ○     | ○      |
|                        | 场址区地下水水位等值线图            |             | ○       | √     | √        | √     | ○      |
|                        | 场址区包气带等厚度图              |             | ○       | √     | ○        | ○     | ○      |
|                        | 场址区地下水化学类型图             |             | ○       | √     | ○        | ○     | ○      |
| 柱状图类                   | 水文地质综合柱状图               |             | √       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 水文地质钻孔柱状图               |             | ○       | √     | √        | ○     | ○      |
| 剖面图                    | 实测水文地质剖面图               |             | √       | √     | ○        | ○     | ○      |
| 综合图表类                  | 水文地质试验图表(压水、抽水、注水/渗水试验) |             | √       | √     | √        | ○     | ○      |
|                        | 水文地质物探成果图表              |             | √       | √     | ○        | ○     | ○      |
|                        | 水化学成分分析成果表              |             | √       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 岩土化学特性分析成果表             |             | √       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 地下水动态观测图表               |             | ○       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 地下水流速流向测量图表             |             | ○       | √     | √        | √     | √      |
|                        | 弥散试验成果图表                |             | ○       | √     | √        | ○     | ○      |
|                        | 水文气象资料图表                |             | √       | √     | ○        | ○     | √      |
|                        | 井(泉)调查表                 |             | √       | √     | ○        | ○     | √      |
| 注：“√”表示应编制，“○”表示需要时编制。 |                         |             |         |       |          |       |        |

9.1.6 不同勘察阶段宜根据工程实际情况及要求编制专题报告：

- 水文地球化学专题报告；
- 水文工程物探专题报告；
- 室内试验报告；

- d) 地下水水位动态监测报告。

## 9.2 成果报告格式与内容

### 9.2.1 水文地质调查与评价报告应根据相应调查阶段的任务要求编制,其相关规定如下。

- a) 初步可行性研究阶段:初步可行性研究阶段水文地质调查与评价报告应阐明各场址的主要水文地质条件和水文地球化学特征,对场址附近范围、场址区的水文地质和水文地球化学条件等方面作出初步评价,并初步评价场址的适宜性,同时为场址比选提出建议。
- b) 可行性研究阶段:可行性研究阶段水文地质调查与评价报告应对场址水文地质条件和水文地球化学特征等作出明确评价,预测处置场建设引起的地下水变化特征;对场址的适宜性作出评价。
- c) 初步设计及施工图设计阶段:初步设计及施工图设计阶段水文地质调查与评价报告应对处置场分区/建筑地段作出详细的水文地质和地球化学条件分析、评价,重点是处置区水位地质特征和天然屏障特性,分析和预测水文地质条件在施工和与运行期间可能产生的变化及引起的水文地质问题,并应提出防治建议。
- d) 建造及运行阶段:建造和运行阶段水文地质调查与评价报告应对场地平整、开挖后的水文地质和水文地球化学条件作出详细的分析、评价,对比分析场地平整/开挖后水文地质条件、水文地球化学条件与前期调查成果的一致性;进一步评价水文地质条件与处置场建设的影响。
- e) 关闭及关闭后阶段:关闭及关闭后阶段水文地质调查与评价报告应对场址在运行期所发现的水文地质问题进行专项调查与重点监测,并与背景值进行对比分析,关注水文地质条件的变化及趋势,为判断是否需要采取进一步措施保证关闭及关闭后处置设施的安全提供评价条件。

### 9.2.2 初步可行性研究阶段水文地质调查与评价报告应包括以下主要内容:

- a) 工程概况、调查目的及任务、工作依据等;
- b) 调查方法、调查工作过程和完成的调查工作量;
- c) 自然地理概况,包括场址地理位置、气象条件等;
- d) 区域地质、构造特征;
- e) 区域水文地质条件和水文地球化学特征;
- f) 场址附近范围的地质、水文地质条件和水文地球化学特征及相关参数;
- g) 场址区地质条件,包括地形地貌、地层岩性及分布特征、地质构造等;
- h) 场址区水文地质条件,包括水文地质单元划分及其特征、地下水类型及赋存条件、地下水补径排条件、地层的渗透性、地表水与地下水的水力联系等;
- i) 地表水和地下水的水化学特征,包括地下水及地表水主要化学成分、地下水的化学类型、地下水的 Eh 及 pH 等;
- j) 场址附近范围水资源分布特征、地下水开发利用现状与远景规划等;
- k) 水文地质条件和水文地球化学特征初步分析、水文地质条件复杂性划分和适宜性初步评价;
- l) 各候选场址水文地质条件和水文地球化学特征对比分析及建议;
- m) 结论及建议。

### 9.2.3 可行性研究阶段水文地质调查与评价报告应包括以下主要内容。

- a) 工程概况、测绘与调查目的及任务、工作依据等。
- b) 水文地质调查方法、工作过程和完成的调查工作量。
- c) 自然地理概况,包括场址地理位置、气象条件等。
- d) 场址附近范围的地质和构造、水文地质条件、水文地球化学特征。地质条件包括地形地貌、地层结构及分布特征,地层主要物理力学参数;地质构造包括分布特征、规模、与场区的位置关系、水文地质特征等;水文地质条件包括水文地质单元划分及其特征、透水层、隔水层、包气带

的性质和分布特征,地下水循环规律和动态特征,地下水与地表水的联系、地下水开发利用现状等;水文地球化学特征包括地下水化学类型、成因和分布等。

- e) 场址区/场区地质条件,包括地形地貌、地层岩性及其特征、地层分布特征、地质构造等。
- f) 场址区/场区水文地质条件,包括水文地质单元划分及其特征、地下水类型及赋存条件、含水层和隔水层的分布规律、地下水补径排条件、水文地质参数、地层的渗透性及分级、地下水流向和流速、地下水水位动态特征、地表水与地下水的水力联系等。
- g) 场址区水文地球化学特征,包括地表水和地下水的化学成分、地下水化学类型、成因和分布等,岩土的水化学特征、关键溶质运移参数、吸附特征,地球化学条件评价等。
- h) 地下水开发利用现状与远景规划。
- i) 工程建设和地下水影响。
- j) 场址区水文地质条件复杂性划分。
- k) 水文地质与水文地球化学分析与评价,主要分析场址区水文地质基本特征,评价场址区地下水渗流及其他动力特征;分析场地平整后地下水流场变化及其对处置场的影响;评价场址区水文地质条件的复杂程度及其对场址适宜性的影响;初步评价场址区地下弥散特征,初步分析核素在地下水中的主要迁移途径和过程,预测水文地质条件可能发生的变化和对处置场建设的影响及工程建设可能对水文地质环境产生的影响;分析场址区水文地球化学特征,评价场址岩土层对核素运移的阻滞能力;评价场址的适宜性影响。
- l) 结论及建议。

#### 9.2.4 初步设计及施工图设计阶段水文地质调查与评价报告应包括以下主要内容。

- a) 工程概况、调查目的及任务、工作依据等。
- b) 水文地质调查方法、工作过程和完成的调查工作量。
- c) 场址区地质、水文地质条件和水文地球化学特征概述,根据前期专题研究结果,分析、概述场址区地形地貌、地层条件、水文地质条件和水文地球化学特征等。
- d) 处置场区分区及各建筑地段的工程地质条件,包括地形、地貌特征,岩土层的分布及其特征,地质构造基本特征等。
- e) 处置场区分区及各建筑地段的水文地质条件,包括水文地质基本特征(所在水文地质单元基本特征、地下水类型及赋存条件、含水层和隔水层特征、地下水补径排关系、地下水稳定水位埋深及变化幅度等)、水文地质参数、地下水水位动态监测、地质构造(破碎带、节理密集带等)水文地质条件等。
- f) 处置场区分区及各建筑地段的水文地球化学特征,包括水文地球化学参数等。
- g) 水文地质与水文地球化学分析与评价,主要包括分析评价处置场区分区及各建筑地段的水文地质条件、地下水渗流及其他动力特征、破碎带及节理密集带等地质构造的导水性能、分析场地平整后或分期建设后场地的水文地质条件变化情况、岩土层对核素运移的阻滞能力等。预测处置场水文地质条件在施工和运行期间可能产生的变化及对处置场的影响,并提出防治建议。
- h) 结论与建议。

#### 9.2.5 建造及运行阶段水文地质调查与评价报告应包括以下主要内容。

- a) 工程概况、调查目的及任务、工作依据等。
- b) 水文地质调查方法、工作过程和完成的调查工作量。
- c) 场区/处置场分区地质、水文地质条件和水文地球化学特征概述,根据前期专题研究结果,分析、概述场区/处置场分区地形地貌、地层条件、水文地质条件和水文地球化学特征等。
- d) 场地平整/开挖后工程场地的工程地质、水文地质条件。工程地质条件包括揭露地层的岩性、特征及分布,揭露可能影响天然屏障特性的断裂破碎带、节理密集带、破碎的岩脉、差异风化破

碎岩层等地质体；水文地质条件包括地下水的类型和赋存条件、含水层和隔水层特征、地下水位埋深及水量、径流及排泄条件、地下水水位动态监测结果、建造阶段发现新的水文地质问题及解决方案等。

- e) 水文地球化学特征,主要为水文地球化学参数等。
- f) 水文地质与水文地球化学分析与评价,对比分析场地平整/开挖后水文地质条件、水文地球化学条件与前期调查成果的一致性;预测核素运移规律;进一步评价水文地质条件与处置场建设的影响。
- g) 结论与建议。

9.2.6 关闭及关闭后阶段水文地质调查与评价报告应包括以下内容:

- a) 工程概况、调查目的及任务、工作依据等;
- b) 水文地质调查方法、工作过程和完成的调查工作量;
- c) 场址水文、气象条件概况;
- d) 地下水动态监测结果,岩土的化学特征试验结果;
- e) 运营过程中发现的问题及解决方案;
- f) 水文地质与水文地球化学分析与评价,分析运营后地下水动态变化和岩土地球化学特征,对比分析运营前后水文地质条件、水文地球化学条件与前期调查成果的差异,进一步预测核素运移规律等;
- g) 结论与建议。

## 附录 A

### (规范性)

### 常用计算公式及方法

#### A.1 核素迁移距离计算方法

核素下游迁移距离按公式(A.1)计算。

$$L = \alpha \times K \times I \times T / n_e \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$L$  ——下游迁移距离,单位为米(m);

$\alpha$  ——不确定性引起的变化系数,  $\alpha \geq 2$ ;

$K$  ——渗透系数,单位为米每天(m/d);

$I$  ——水力坡度,无量纲;

$T$  ——质点迁移天数,单位为天(d),取值不小于 500 年(182 500 d);

$n_e$  ——有效孔隙度,无量纲。

#### A.2 弥散试验计算方法

天然流场瞬时注入示踪剂的二维弥散试验,其解析解见公式(A.2)。

$$C(x, y, t) = \frac{m}{4\pi n u t \sqrt{\alpha_L \alpha_T}} \exp\left\{-\lambda t - \frac{(x - ut)^2}{4\alpha_L u t} - \frac{y^2}{4\alpha_T u t}\right\} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$C(x, y, t)$  ——在  $t$  时刻的观测孔  $i(x, y)$  处减去背景值的示踪剂浓度,单位为摩尔每升(mol/L);

$t$  ——示踪剂投放后的某时刻,单位为天(d);

$m$  ——单位厚度含水层上投放示踪剂的质量,单位为千克(kg);

$n$  ——含水介质的孔隙度;

$u$  ——地下水实际流速,单位为米每天(m/d);

$\alpha_L$  ——纵向弥散度,单位为米(m);

$\alpha_T$  ——横向弥散度,单位为米(m);

$\lambda$  ——示踪剂的放射性衰变系数(示踪剂为同位素时)。

求取弥散度的方法主要有标准曲线配线法、逐点求参法和解析公式法。

a) 标准曲线配线法

引入下列无量纲变量:

$$C_R = C_i / C_{\max}, \quad t_R = ut / \alpha_L, \quad a = \sqrt{\frac{x^2}{\alpha_L} + \frac{y^2}{\alpha_T}}$$

$$K = t_{R\max} \exp\{(a^2 + t_{R\max}^2) / 4t_{R\max}\}, \quad t_{R\max} = \sqrt{4 + a^2} - 2$$

经过一系列变换无量纲化,可得到解析式(A.3)。

$$C_R(a, t_R) = \frac{K}{t_R} \exp\left(-\lambda \frac{\alpha_L t_R}{u} - \frac{a^2 + t_R^2}{4t_R}\right) \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$C_i$  —— $t$  时间观测孔  $i$  减去背景值的示踪剂浓度,单位为摩尔每升(mol/L);

$C_{\max}$  ——观测孔  $i$  减去背景值的示踪剂峰值浓度,单位为摩尔每升(mol/L)。

利用公式(A.3)绘制  $C_R\text{-lgt}_R$  标准曲线,将绘制的标准曲线与实测  $C_R\text{-lgt}$  曲线配线,得配线值  $a$ ,并利用公式(A.4)计算纵向弥散度和横向弥散度。

$$\begin{cases} \alpha_L = x_i / \alpha_i \\ \alpha_T = y_j^2 / [\alpha_L (\alpha_j^2 - x_j^2 / \alpha_L^2)] \end{cases} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

$x_i$  ——主流向上( $y=0$ )的观测井  $i$  的  $X$  轴坐标;

$x_j, y_j$  ——偏离主流向的观测井  $j$  的坐标;

$a_i, a_j$  —— $i, j$  两井实测  $C_R\text{-lgt}$  曲线与标准曲线  $C_R\text{-lgt}_R$  的配线值。

b) 逐点求参法

设有 2 个时刻  $t_1, t_2$  对应的示踪剂浓度为  $C_1, C_2$ ,由公式(A.4),可以得到纵、横向弥散度计算公式(A.5)。

$$\begin{cases} \alpha_L = \frac{(t_1 - t_2)(x^2 - u^2 t_1 t_2)}{4 t_1 t_2 u \ln \left( \frac{C_1 t_1}{C_2 t_2} \right)} \\ \alpha_T = \left\{ \frac{m}{2 \pi n u C_1 t_1 \sqrt{\alpha_L u}} \exp \left[ -\frac{(x - u t_1)^2}{4 \alpha_L u t_1} \right] \right\}^2 \end{cases} \dots\dots\dots (A.5)$$

c) 解析公式法

基于解析原理,弥散参数的计算步骤如下。

- 1) 在实测弥散曲线上找到最大浓度值  $C_m$ ,及其相应的时间  $t_m$ 。
- 2) 把全部实测数据标配在  $[x = (t - t_m)^2 / t; y = \ln(C_m t_m / C_t) + (t - t_m)^2 / t]$  专用坐标系中。在此特殊坐标中,任意一观察孔测得的弥散数据应构成一条直线: $y = \beta x$ ,可求得参变量  $\beta$ 。
- 3) 已知  $t_m$  和参变量  $\beta$ ,可求出参变量  $\gamma: \gamma = \beta t_m^2 + t_m$ 。
- 4) 计算曲线  $C(t)$  与纵坐标轴  $t$  所围面积  $\omega$ ,进而求得另一参变量:

$$\delta = \ln \omega + \sqrt{4 \gamma \beta} + 0.25 \ln (16 \gamma \beta / \pi^2)$$

5) 方程组求解:

$$\begin{cases} \ln \alpha + \frac{x_1}{2 \alpha_L} = \delta_1 \\ \frac{x_1^2}{\alpha_L} + \frac{y_1^2}{\alpha_T} = 16 \gamma_1 \beta \alpha_L \\ \ln \alpha + \frac{x_2}{2 \alpha_L} = \delta_2 \\ \frac{x_2^2}{\alpha_L} + \frac{y_2^2}{\alpha_T} = 16 \gamma_2 \beta \alpha_L \end{cases}$$

式中,  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  是两个观察孔的坐标,  $(\delta_1, \gamma_1), (\delta_2, \gamma_2)$  分别为对应观察孔的一组参变量。

6) 按公式(A.6)进行弥散度计算。

$$\begin{cases} \alpha_L = \frac{x_2 - x_1}{2(\delta_2 - \delta_1)} \\ \alpha_T = \frac{y_1^2}{16 \gamma_2 \beta \alpha_L - \frac{x_1^2}{\alpha_L}} \end{cases} \dots\dots\dots (A.6)$$

### A.3 静态批式试验方法

#### A.3.1 样品采集

试验所需要的地层介质和地下水样品从处置场现场采集,采样点主要布置在处置场内以及水文地质调查与评价范围的地下水流向的下游方向。采样点数量需要反映地层空间分布的非均质性和满足评价的需求。

地下水:选取适当的取样方法在处置场现场采集地下水样品,现场检测水温、pH、电导率、氧化还原电位、溶解氧、浊度。取样方法参照 DZ/T 0420。

地层介质:一般采用地层介质的扰动样,从钻孔岩芯辨析不同深度处的岩性,将试验所需要的地层介质装入密实袋并按照采样点位置进行编号,注明采样日期、采样员姓名、采样点坐标及对样品的简单描述。

#### A.3.2 样品表征

地下水:pH,水化学( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{NO}_3^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$ )。

地层介质:矿物成分,比表面积,阳离子交换容量,含水率,粒径分布。

#### A.3.3 地下水同位素组分检测

同位素组分包括: $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{18}\text{O}$ 、 $^{15}\text{N}$ 、 $^{32}\text{Si}$ 、 $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{81}\text{Kr}$ 、 $^4\text{He}$ ,方法参照 DZ/T 0420。

#### A.3.4 样品制备

##### A.3.4.1 地下水

试验开始前,用  $0.45\ \mu\text{m}$  的滤膜过滤。

##### A.3.4.2 地层介质

A.3.4.2.1 松散孔隙介质和强风化岩石介质,用木棒等软质工具碾碎,通过筛分去除粒径大于  $1.0\ \text{mm}$  的颗粒。如果要在惰性或受控大气环境中进行试验,则应在同样的大气条件下制备样品。

A.3.4.2.2 岩石介质粉碎,将样品通过  $1.0\ \text{mm}$  和  $0.3\ \text{mm}$  的筛,获得粒径在  $0.30\ \text{mm}\sim 1.00\ \text{mm}$  之间的颗粒。粉碎应尽量减少外来物质(如金属屑)进入样品。

A.3.4.2.3 处理后的样品开展粒度测定,然后进行均质化处理,确保试验时的平行样品得到相同的粒度分布。

#### A.3.5 预平衡

A.3.5.1 准备  $15\ \text{mL}$  的聚丙烯离心管,对离心管进行编号、称重和记录。

A.3.5.2 将  $1.0\ \text{g}$  ( $1.0\ \text{g}\pm 0.01\ \text{g}$ ) 的样品称重、记录放入离心管中。

A.3.5.3 每个离心管加  $10\ \text{mL}$  过滤、不含放射性示踪剂的地下水,包括不含地层介质的空白样,用于冷洗。将离心管放在振荡器上进行  $1\ \text{d}$  的振荡(大约每秒 1 次)。

A.3.5.4 将离心管放入离心机,进行固液分离。用移液枪去除上清液,防止地层介质被扰动(有一定的溶液会残留在离心管中)。

A.3.5.5 重复以上冷洗流程 3 次。在进行第 3 次冷洗离心步骤之前,测量并记录溶液的 pH。如果 pH 偏离了现场测量值,则地层介质和地下水还没有重新建立平衡,需要继续洗涤,直到 pH 稳定。

A.3.5.6 冷洗结束后,重新称量每个离心管,并记录重量,以确定每个样品中残留溶液的体积。

**A.3.5.7 放射性示踪剂:**放射性示踪剂溶液在试验条件下放置至少一周(如果地层介质与空气处于平衡状态,则与空气处于平衡状态;如果地层介质与空气不处于平衡状态,则在受控的大气条件下)。在平衡时间内对 pH 进行必要的调整。计算、记录添加的放射性示踪剂的含量。同时,测量地层介质和地下水中该元素的同位素含量。

**A.3.5.8 试验过程如下。**

- a) 每个含有 1.0 g 地层介质的离心管中加入 10 mL 含有放射性示踪剂的地下水,固定离心管的盖子,用密封胶带包裹,防止蒸发和泄漏。此外,在 3 个空白离心管中也加入 10 mL 含有放射性示踪剂的地下水,用于检测离心管管壁对示踪剂的吸附。
- b) 离心管放入塑料袋中,防止离心管泄漏引起的污染。然后将离心管水平放置在振荡器上(最大限度地使固液接触),振动速度设置为 0.8 次/s~1.2 次/s,确保固液混合,但减少地层介质颗粒的磨损和破坏。
- c) 通常分配系数取平衡状态下的试验值,一般放射性核素的平衡时间是 45 d。然后将离心管从振荡器中取出,检查是否有泄漏。如果需要考虑时间因素的影响,可以按照研究需求设置试验时间。
- d) 试验样品和空白样品在  $10\,000g$  ( $g=980\text{ cm/s}^2$ ) 离心 20 min,取出 10 mL 的上清液用  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  的滤膜过滤,测量上清液中放射性示踪剂的浓度。同时,计算空白样品离心管的管壁上吸附的残留示踪剂的活度,如果空白样品管壁上的示踪剂活度大于初始投入总活度的 10%,需要选择吸附性能更小的材质的离心管。

**A.3.5.9 分配系数计算方法如下。**

- a) 离心管的管壁不吸附放射性示踪剂

计算分配系数  $K_d$  (mL/g),需要以下试验数据:冷洗以后残留在离心管中的地下水体积,  $V_1$  (mL,根据称重记录,用质量除以密度);地层介质的质量,  $M_s$  (g);加入含有放射性示踪剂的地下水体积,  $V_2$  (mL);试验结束后,试验样品离心上清液中放射性示踪剂的浓度,  $C_1$  (dpm/mL);空白样品初始加入的放射性示踪剂的浓度,  $C_2$  (dpm/mL)。分配系数计算公式见公式(A.7)。

注: dpm 为每分钟发生一次衰变。  $1\text{ Bq}=1\text{ dps}=60\text{ dpm}$ 。

$$K_d = \frac{(C_2 \times V_2) - C_1(V_1 + V_2)}{C_1 \times M_s} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

- b) 离心管的管壁吸附放射性示踪剂

需要直接测量地层介质中吸附的放射性示踪剂的活度。固液分离后,将地层介质干燥,并转移到干净的离心管中,然后确定地层介质的质量  $M_s$  (g) 和示踪剂的活度  $C_s$  (dpm)。分配系数计算公式见公式(A.8)。

$$K_d = \frac{C_s - C_1 \times V_1}{C_1 \times M_s} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

## A.4 动态柱试验方法

### A.4.1 样品采集

试验所需要的地层介质和地下水样品从处置场现场采集,采样点主要布置在处置场内以及水文地质调查与评价范围的地下水流向的下游方向。采样点数量需要反映地层空间分布的非均质性和满足评价的需求。

地下水:同 A.3 相关要求。

地层介质:一般采用地层介质的原状样,从取样工具设备、取样操作、土试样质量的现场鉴别、土样封装、贮存、运输参照 JGJ/T 87,确保原状土土样合格地运输到实验室。

A.4.2 样品表征

同 A.3 相关要求。

A.4.3 地下水同位素组分检测

同 A.3 相关要求。

A.4.4 柱体长度和直径

试验样品直接来源于采集的原状样,柱体长度一般选择范围为 5 cm~60 cm,长度与直径之比为 2~3。

A.4.5 试验装置

一般由供水箱、蠕动泵(控制注入流速)、柱体和流出液自动采样器 4 部分组成,如图 A.1 和图 A.2 所示。

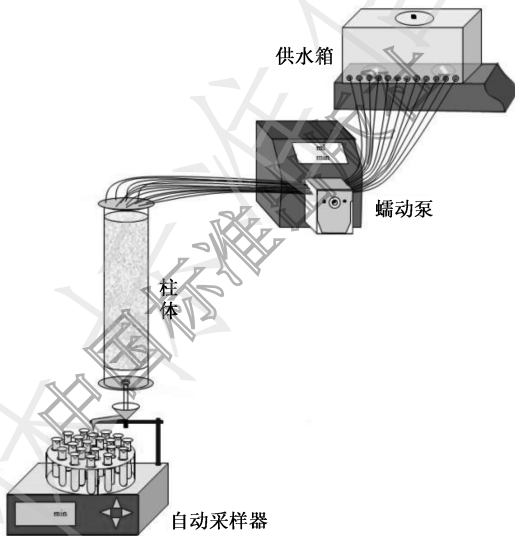


图 A.1 包气带柱试验测定分配系数的示意图

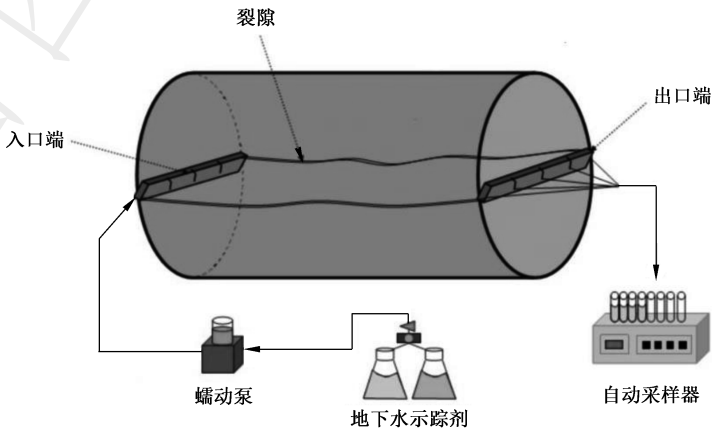


图 A.2 单裂隙柱试验测定分配系数的示意图

## A.4.6 土壤水分特征曲线模型及参数拟合方法

## A.4.6.1 Van Genuchten 模型

模型的数学表达式见公式(A.9)~公式(A.12)。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$K(h) = K_s S_e [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \dots\dots\dots (A.10)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \dots\dots\dots (A.11)$$

$$m = 1 - 1/n \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

$\theta$  —— 体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$  —— 残余含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$  —— 饱和含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\alpha$  —— 进气值倒数;

$h$  —— 非饱和带压力水头,单位为厘米(cm);

$K(h)$  —— 非饱和渗透系数,单位为厘米每天(cm/d);

$K_s$  —— 饱和渗透系数,单位为厘米每天(cm/d);

$S_e$  —— 有效饱和度;

$m, n$  —— 拟合参数。

## A.4.6.2 Brooks-Corey 模型

模型的数学表达式见公式(A.13)~公式(A.15)。

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases} \dots\dots\dots (A.13)$$

$$K(h) = K_s S_e^{2/n+2} \dots\dots\dots (A.14)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \dots\dots\dots (A.15)$$

式中:

$l$  —— 孔隙连通性参数。

其他参数同上。

## A.4.6.3 Modified Van Genuchten 模型

模型的数学表达式见公式(A.16)~公式(A.20)。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \dots\dots\dots (A.16)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h < h_k \\ K_k + \frac{(h - h_s)(K_s - K_k)}{h_s - h_k} & h_k < h < h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases} \dots\dots\dots (A.17)$$

$$K_r = \frac{K_k \left( \frac{S_e}{S_{ek}} \right) \left[ \frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_k)} \right]^2}{K_s \left( \frac{S_e}{S_{ek}} \right)} \dots\dots\dots (A.18)$$

$$F(\theta) = \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_a}{\theta_m - \theta_a} \right)^{1/m} \right]^m \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

$$S_{ek} = \frac{\theta_k - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

式中:

$\theta$  ——体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_m, \theta_a$  ——土壤持水函数中的参数( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$h_s$  ——非零最小毛细高度,单位为厘米(cm);

$h_k$  ——非零最大毛细高度,单位为厘米(cm);

$K_s$  ——饱和渗透系数,单位为厘米每天(cm/d);

$K_r$  ——相对渗透系数,单位为厘米每天(cm/d);

$S_{ek}$  —— $\theta_k$ 时的有效饱和度;

$K_k$  ——非饱和渗透系数的实测值,单位为厘米每天(cm/d);

$\theta_k$  —— $K_k$ 对应的实测含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

#### A.4.6.4 Kosugi 模型

模型的数学表达式见公式(A.21)~公式(A.22)。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\ln(h/\alpha)}{\sqrt{2}n} \right\} & (h < 0) \\ 1 & (h \geq 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.21)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln(h/\alpha)}{\sqrt{2}n} + \frac{n}{\sqrt{2}} \right] \right\}^2 & (h < 0) \\ K_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.22)$$

式中参数同上。

#### A.4.7 试验周期估算

利用地层介质的有效孔隙度  $n_e$ 、密度  $\rho_b$ 、静态批式试验获得放射性示踪剂的分配系数  $K_d$ ,按公式(A.23) 计算延迟因子  $R_f$ 。

$$R_f = 1 + \frac{K_d \rho_b}{n_e} \quad \dots\dots\dots (A.23)$$

式中:

$n_e$  ——有效孔隙度( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\rho_b$  ——密度,单位为克每立方厘米( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$K_d$  ——分配系数,单位为克每立方厘米( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

另外,延迟因子  $R_f$ (无量纲)可以定义为孔隙水流速  $V_p$ (cm/h)与放射性示踪剂迁移速度  $V_c$ (cm/h)的比值。在试验条件确定孔隙水流速  $V_p$ (cm/h,可参考现场地下水流速或者降水强度)后,可以按公式(A.24) 估算放射性示踪剂的迁移速度  $V_c$ (cm/h)。

$$V_c = \frac{V_p}{R_f} \quad \dots\dots\dots (A.24)$$

最后,由柱体长度  $L$ (cm)和放射性示踪剂放射性示踪剂的迁移速度  $V_c$ ,按公式(A.25)计算试验周期  $T$ (h)。

$$T = \frac{L}{V_c} \quad \dots\dots\dots (A.25)$$

## A.4.8 试验过程

需要用非吸附性示踪剂和放射性示踪剂同时开展试验。非吸附性示踪剂选择氚( $^3\text{H}$ ),  $^3\text{H}$  在柱体中的浓度随时间变化过程可以提供孔隙水流速  $V_p$  的信息。

根据注入方式的不同,分为脉冲注入和连续注入。确定注入方式后,定期采集流出液,测量 $^3\text{H}$  和放射性示踪剂的浓度,得到 $^3\text{H}$  和放射性示踪剂的穿透曲线,分别计算 $^3\text{H}$  的平均滞留时间  $T_1$  和放射性示踪剂的平均滞留时间  $T_2$ 。

a) 脉冲注入时的平均滞留时间按公式(A.26)进行计算。

$$T = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t C_i dt}{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} C_i dt} \dots\dots\dots (\text{A.26})$$

式中:

$T$  ——平均滞留时间,单位为小时(h);

$t_{\min}$  ——穿透曲线前端时间,单位为小时(h);

$t_{\max}$  ——穿透曲线后端时间,单位为小时(h);

$C_i$  ——放射性示踪剂浓度(dpm/mL);

$t$  ——时间,单位为小时(h)。

b) 连续注入时的平均滞留时间按公式(A.27)进行计算。

$$T = \frac{\int_{C_{\min}}^{C_{\max}} t dt}{\int_{C_{\min}}^{C_{\max}} C_i dt} \dots\dots\dots (\text{A.27})$$

式中:

$T$  ——平均滞留时间,单位为小时(h),在理想条件下  $t_{\text{step}}$  等于穿透曲线达到 50% 的时间 ( $C_i/C_0=0.5$ );

$C_{\min}$  ——流出物中放射性示踪剂的最小浓度(dpm/mL);

$C_{\max}$  ——流出物中放射性示踪剂的最大浓度(dpm/mL)。

## A.4.9 分配系数计算

由柱体长度  $L$  及 $^3\text{H}$  的平均滞留时间  $T_1$ 、放射性示踪剂的平均滞留时间  $T_2$ ,按公式(A.28)~公式(A.29) 分别计算得到孔隙水流速  $V_p$  与放射性示踪剂迁移速度  $V_c$ 。

$$V_p = \frac{L}{T_1} \dots\dots\dots (\text{A.28})$$

$$V_c = \frac{L}{T_2} \dots\dots\dots (\text{A.29})$$

由孔隙水流速  $V_p$  与放射性示踪剂迁移速度  $V_c$  的比值,按公式(A.30)计算延迟因子  $R_f$ 。

$$R_f = \frac{V_p}{V_c} \dots\dots\dots (\text{A.30})$$

利用地层介质的有效孔隙度  $n_e$ 、密度  $\rho_b$ 、延迟因子  $R_f$ ,按公式(A.31)计算放射性示踪剂的分配系数  $K_d$ 。

$$K_d = \frac{(R_f - 1) \times n_e}{\rho_b} \dots\dots\dots (\text{A.31})$$

附 录 B  
(资料性)  
常用参数及物探方法

B.1 常用岩土体渗透系数

常用岩土体渗透系数见表 B.1。

表 B.1 常见岩土体渗透系数经验值表

| 岩性名称 | 渗透系数/(cm/s)                            | 渗透系数/(m/d)                               |
|------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 黏土   | $<1.2\times10^{-6}$                    | $<1.04\times10^{-3}$                     |
| 粉质黏土 | $1.2\times10^{-6}\sim6.0\times10^{-5}$ | $1.04\times10^{-3}\sim5.18\times10^{-2}$ |
| 黏质粉土 | $6.0\times10^{-6}\sim6.0\times10^{-4}$ | $5.18\times10^{-2}\sim5.18\times10^{-1}$ |
| 黄土   | $3.0\times10^{-4}\sim6.0\times10^{-4}$ | $2.59\times10^{-1}\sim5.18\times10^{-1}$ |
| 粉砂   | $6.0\times10^{-4}\sim1.2\times10^{-3}$ | $5.18\times10^{-1}\sim1.04$              |
| 细砂   | $1.2\times10^{-3}\sim6.0\times10^{-3}$ | $1.04\sim5.18$                           |
| 中砂   | $6.0\times10^{-3}\sim2.4\times10^{-2}$ | $5.18\sim20.74$                          |
| 粗砂   | $2.4\times10^{-2}\sim6.0\times10^{-2}$ | $20.74\sim51.84$                         |
| 砾砂   | $6.0\times10^{-2}\sim1.8\times10^{-1}$ | $51.84\sim155.52$                        |

B.2 物探方法及应用条件

常用物探方法及应用条件见表 B.2。

表 B.2 物探方法探测应用

| 方法名称 |       | 探测对象  |       |      |       |     |      |      |       |     |      |         |        |          |         |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-----|------|------|-------|-----|------|---------|--------|----------|---------|
|      |       | 覆盖层厚度 | 风化层厚度 | 岩层界线 | 断裂破碎带 | 滑动面 | 岩溶空洞 | 软弱夹层 | 地震动参数 | 含水层 | 地下水位 | 地下水流速流向 | 咸淡水分界面 | 受污染地下水界面 | 地下水渗漏通道 |
| 电法   | 电测深法  | ◆     | ◆     | ◆    | ◇     | ◆   | ◆    | —    | —     | ◆   | ◆    | —       | —      | —        | —       |
|      | 电剖面法  | ◇     | —     | ◆    | ◆     | —   | ◇    | —    | —     | —   | —    | —       | —      | —        | ◇       |
|      | 高密度电法 | ◆     | ◇     | ◇    | ◆     | —   | ◆    | —    | —     | ◆   | —    | —       | —      | —        | ◇       |
|      | 自然电场法 | —     | —     | —    | ◇     | —   | —    | —    | —     | —   | —    | ◆       | —      | ◇        | ◆       |
|      | 充电法   | —     | —     | —    | —     | —   | —    | —    | —     | —   | —    | ◆       | —      | ◇        | —       |
|      | 激发极化法 | —     | —     | —    | ◇     | —   | —    | —    | —     | ◆   | ◆    | —       | —      | —        | ◇       |

表 B.2 物探方法探测应用（续）

| 方法名称                       |             | 探测对象      |           |          |           |     |          |          |           |     |           |                 |            |                  |                 |
|----------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----|----------|----------|-----------|-----|-----------|-----------------|------------|------------------|-----------------|
|                            |             | 覆盖层<br>厚度 | 风化层<br>厚度 | 岩层<br>界线 | 断裂<br>破碎带 | 滑动面 | 岩溶<br>空洞 | 软弱<br>夹层 | 地震<br>动参数 | 含水层 | 地下水<br>水位 | 地下水<br>流速<br>流向 | 咸淡水<br>分界面 | 受污染<br>地下水<br>界面 | 地下水<br>渗漏<br>通道 |
| 电<br>磁<br>法                | 探地雷达<br>剖面法 | ◇         | —         | —        | ◇         | ◆   | ◆        | ◇        | —         | —   | —         | —               | —          | ◇                | ◇               |
|                            | 钻孔探地<br>雷达  | ◇         | —         | —        | ◇         | ◆   | ◆        | ◇        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 频域电磁<br>测深法 | ◇         | —         | —        | ◆         | —   | ◆        | —        | —         | —   | ◇         | —               | —          | —                | ◇               |
|                            | 磁共振法        | —         | —         | —        | —         | —   | —        | —        | —         | ◇   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
| 弹<br>性<br>波<br>法           | 浅层地震<br>反射法 | ◆         | ◇         | ◇        | ◆         | ◇   | ◇        | ◇        | —         | ◇   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 浅层地震<br>折射法 | ◆         | ◇         | ◇        | ◆         | ◇   | —        | —        | —         | ◇   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 浅层地震<br>面波法 | ◆         | ◇         | ◇        | ◇         | ◇   | ◇        | ◆        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 单跨孔波速       | ◆         | ◆         | ◆        | ◇         | —   | —        | —        | ◆         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 地脉动         | —         | —         | —        | —         | —   | —        | —        | ◆         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
| 放<br>射<br>性<br>探<br>测<br>法 | 测氦法         | —         | —         | —        | ◆         | —   | ◇        | —        | —         | ◇   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 自然伽马        | —         | —         | —        | ◆         | —   | —        | —        | —         | ◇   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
| 综<br>合<br>测<br>井           | 电阻率         | ◆         | ◇         | ◆        | ◇         | —   | —        | ◆        | —         | ◆   | ◆         | ◇               | ◆          | ◆                | ◆               |
|                            | 自然电位        | ◇         | ◇         | ◇        | ◇         | —   | —        | ◇        | —         | ◆   | ◇         | ◇               | ◆          | ◇                | ◇               |
|                            | 自然伽马        | ◇         | ◇         | ◇        | ◇         | —   | —        | ◇        | —         | ◆   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 中子测井        | ◇         | ◇         | ◇        | ◇         | —   | —        | —        | —         | ◆   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 声波测井        | —         | —         | ◇        | —         | —   | —        | ◆        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 超声成像        | —         | —         | —        | —         | ◇   | —        | ◇        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 光学成像        | ◇         | ◇         | ◇        | —         | ◇   | ◆        | ◆        | —         | —   | ◇         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 同位素测井       | —         | —         | —        | —         | —   | —        | —        | —         | —   | —         | ◆               | —          | —                | ◆               |
|                            | 电阻率 CT      | ◇         | ◇         | ◇        | ◆         | ◇   | ◆        | —        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 电磁波 CT      | ◇         | ◇         | ◇        | ◆         | ◇   | ◆        | —        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |
|                            | 弹性波 CT      | ◇         | ◇         | ◇        | ◆         | ◇   | ◆        | —        | —         | —   | —         | —               | —          | —                | —               |

注：◆为主要方法，◇为辅助方法。

### 参 考 文 献

- [1] GB 9132 低、中水平放射性固体废物近地表处置安全规定
  - [2] GB/T 14157 水文地质术语
  - [3] GB/T 50983 低、中水平放射性废物处置场岩土工程勘察规范
  - [4] DZ/T 0282 水文地质调查规范(1 : 50 000)
  - [5] DZ/T 0420 地下水采样技术规程
  - [6] HJ 164 地下水环境监测技术规范
  - [7] HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
  - [8] NNSA-HAJ-0001 放射性废物处置安全全过程系统分析
  - [9] 放射性废物分类(环境保护部、工业和信息化部、国家国防科技工业局公告 2017 年第 65 号)
-