

团 体 标 准

T/CSES 125—2023

水环境承载力评估技术导则

Technical guidelines for water environment carrying capacity assessment

(发布稿)

2023 - 12 - 20 发布

2023 - 12 - 20 实施

中国环境科学学会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体原则	1
5 评估程序	2
6 评估对象与评估范围的确定	2
7 评估指标体系构建	3
8 数据获取与处理	4
9 评估方法选取	5
10 评估分级标准	7
附录 A（资料性） 指标含义	8
附录 B（资料性） 常见权重确定方法	14

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。

本文件由北京师范大学环境学院提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件主要起草单位：北京师范大学、中国环境科学研究院、生态环境部环境规划院、中国科学技术信息研究所、济南市环境研究院(济南市黄河流域生态保护促进中心)。

本文件主要起草人：曾维华、李瑞、王东、宋永会、王立婷、解钰茜、姚瑞华、马俊伟、陈岩、刘仁志、于会彬、吴波、栾朝旭、曹若馨、张文静、高涵、李佳颖、张瑞珈、冷卓纯、张鹏。

引 言

为贯彻《中华人民共和国水污染防治法》《生态文明体制改革总体方案》等法律法规文件，规范和指导水环境承载力评估，制定本文件。

水环境承载力评估技术导则

1 范围

本文件规定了水环境承载力评估的总体原则、评估程序、评估对象与评估范围、评估指标体系、数据获取与处理、评估方法和分级评估标准。

本文件适用于江河、湖泊、水库、运河、渠道等已划定水功能区的区域或国家、省（自治区、直辖市）、设区的市等行政区域的水环境承载力评估。

流域、子流域与水污染控制单元水环境承载力评估工作可参照本文件执行。

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 3838 地表水环境质量标准

GB 8978 污水综合排放标准

HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水环境承载力 water environment carrying capacity

在一定时期内，一定技术经济条件下，在某一水系统功能结构不被破坏前提下，水环境可持续为人类活动提供支持能力的阈值。

3.2

水环境承载力大小 magnitude of water environment carrying capacity

自然水系统能够为人类活动提供的支撑能力的阈值量化结果，表征水环境承载力绝对大小。

3.3

水环境承载力承载状态 status of water environment carrying capacity

社会经济活动给自然水系统带来的压力与水环境承载力相比的程度。

3.4

承载率 carrying rate

社会经济活动给自然水系统带来的压力与对应的水环境承载力分量指标的比值，可以反映水环境承载力承载状态。

3.5

水环境承载力开发利用潜力 development and utilization potential of water environment carrying capacity

水系统可为社会经济活动提供的开发利用潜在能力，可从水环境承载力大小、水环境承载力承载状态与区域发展能力（即社会经济投入与科技水平）等方面表征。

4 总体原则

4.1 系统性原则

根据水环境承载力的内涵，评估指标的选取应能反映社会经济活动对自然水系统的压力，以及自然水系统对社会经济活动的支持能力。

4.2 代表性原则

选取代表性强、客观性强的指标构建水环境承载力评估体系，避免指标重复。

4.3 可行性原则

水环境承载力评估数据应便于获取且真实可靠，评估方法简单且可操作。

4.4 适应性原则

充分考虑不同区域、不同时间尺度上的差异性，适当结合当地的实际情况与特征，因地制宜地丰富完善评估指标。

5 评估程序

水环境承载力评估按图1所示的程序进行。

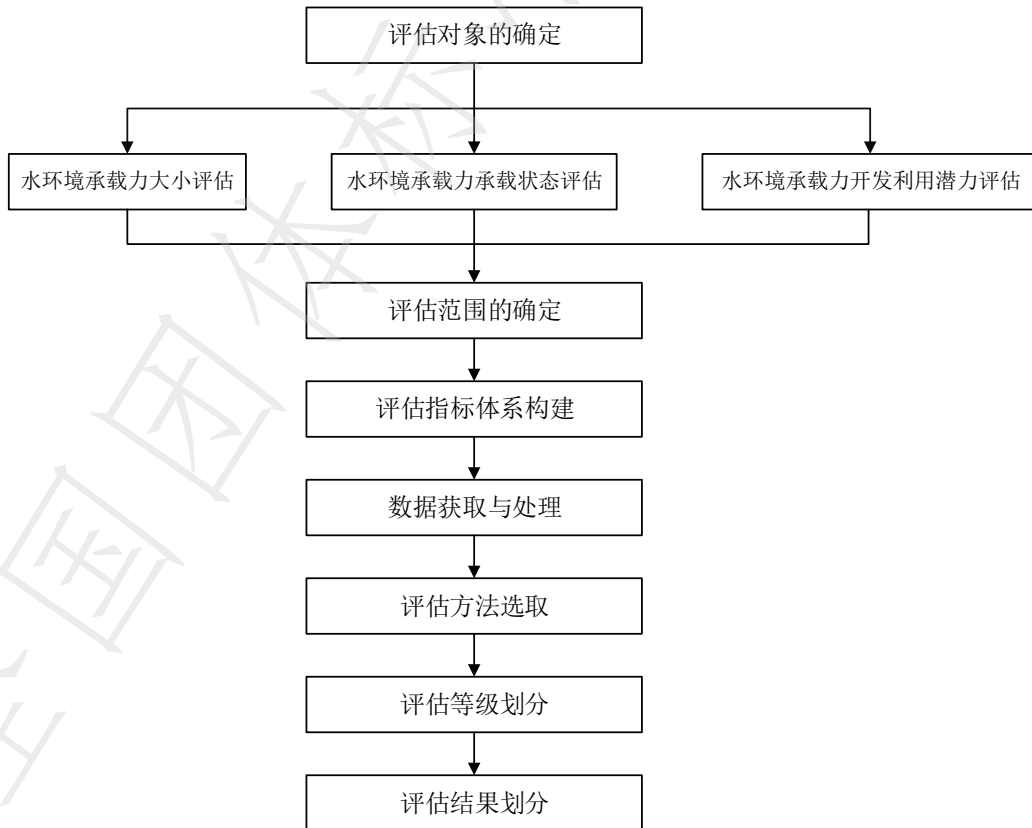


图1 评估程序

6 评估对象与评估范围的确定

6.1 评估对象

6.1.1 根据水环境承载力评估的目的确定水环境承载力评估对象，构建相应的评估指标体系。

6.1.2 水环境承载力评估对象包括以下三类：

- a) 水环境承载力大小，可用于指导国土空间规划布局。
- b) 水环境承载力承载状态，可用于流域（区域）水系统规划与管理。
- c) 水环境承载力开发利用潜力，可指导国土空间规划布局。

6.2 评估范围

6.2.1 水环境承载力评估范围应包括空间范围和时间范围。

6.2.2 水环境承载力评估的空间范围可为各级行政区域和各流域控制单元。

6.2.3 水环境承载力评估的时间范围可选择以年或季节为时间尺度。其中，年际评估的时间尺度至少5年以上；季节性评估的时间尺度按照水域特点可以分为平水期、枯水期、丰水期。

7 评估指标体系构建

7.1 一般规定

7.1.1 宜根据不同的水环境承载力评估对象构建相应的评估指标体系。

7.1.2 水环境承载力评估指标体系宜由指标层和分指标层构成。

7.2 水环境承载力大小评估指标体系

水环境承载力大小评估指标体系指标层宜由水环境容量分量、水资源分量、水生态分量组成。分指标层指标的选择宜符合表1的规定。

表1 水环境承载力大小评估指标体系

指标层	分指标层
水环境容量分量（A）	本地COD环境容量/环境容量指数（A1） ¹
	本地NH ₃ -N环境容量/环境容量指数（A2） ¹
	本地TP环境容量/环境容量指数（A3） ¹
水资源分量（B）	降水量（B1）
	再生水量（B2）
	地表水量（B3） ²
	地下水量（B4） ²
水生态分量（C）	湿地面积占比（C1）
	水源涵养能力（C2）
	水质净化能力（C3）
	河流蜿蜒度（C4）
	河流纵向连通性（C5）
注1：评估单元为流域控制单元时，推荐使用环境容量；评估单元为行政区域时，推荐使用环境容量指数；有条件获取更多污染物数据时，可进一步增加其他污染物环境容量指标。	
注2：地表水量（B3）（含调水量）和地下水量（B4）存在重复计算的，重复计算的部分需要剔除。	

7.3 水环境承载力承载状态评估指标体系

水环境承载力承载状态评估指标体系指标层宜由水系统压力与水环境承载力大小组成。分指标层指标的选择宜符合表2的规定。

表2 水环境承载力承载状态评估指标体系

指标层	分指标层	
水系统压力	点源排放量 (D)	COD点源排放量 (D1)
		NH ₃ -N点源排放量 (D2)
		TP点源排放量 (D3)
	面源排放量 (E)	COD面源排放量 (E1)
		NH ₃ -N面源排放量 (E2)
		TP面源排放量 (E3)
	水资源利用量 (F)	生活用水量 (F1)
		工业用水量 (F2)
		农业用水量 (F3)
		生态环境用水量 (F4)
	上游来水压力 (G)	上游来水COD量 (G1)
上游来水NH ₃ -N量 (G2)		
上游来水TP量 (G3)		
水环境承载力大小	同表1	
注：若表1水环境容量分量 (A) 中增加其他污染物环境容量/环境容量指数指标，宜在表2中增加其他污染物的点源排放量 (D)、面源排放量 (E)、上游来水压力 (G)。		

7.4 水环境承载力开发利用潜力评估指标体系

水环境承载力开发利用潜力评估指标体系指标层宜由水环境承载力大小、水环境承载力承载状态、污染物排放强度与水资源利用强度和区域发展能力组成。分指标层指标的选择应符合表3的规定。

表3 水环境承载力开发利用潜力评估指标体系

指标层	分指标层	
水环境承载力大小	同表1	
水环境承载力承载状态	同表2	
污染物排放强度与水资源利用强度 (H)	水资源	人均综合用水量 (H1)
		万元GDP水耗 (H2)
	水污染物	万元GDP COD排放量 (H3)
		万元GDP NH ₃ -N排放量 (H4)
		万元GDP TP排放量 (H5)
区域发展能力 (I)	城镇化率 (I1)	
	人均GDP (I2)	
	第三产业占比 (I3)	
	环保投资占比 (I4)	
	污水处理率 (I5)	
注：若表1水环境容量分量 (A) 中增加其他污染物环境容量/环境容量指数指标，宜在表3中增加其他污染物排放强度指标。		

8 数据获取与处理

8.1 数据获取

收集数据进行水环境承载力评估时，宜满足表1、表2、表3的规定，指标含义与计算方法参见附录A。

8.2 数据标准化处理

数据标准化处理时可选择最小-最大标准化或Z-score标准化，并宜符合以下规定：

a) 最小-最大标准化

按照数值是否越大越优原则，将指标划分为正向指标和负向指标。对于正向指标，应按照公式（1）进行标准化处理；对于负向指标，应按照公式（2）进行标准化处理。

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$x_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中：

x_i ——指标 X_i 标准化处理以后的数值，其大小在[0, 1]范围内；

X_{\max} , X_{\min} —— X_i 数据集中的最大值与最小值。

b) Z-score标准化

所有指标可依次按照公式（3）、公式（4）和公式（5）进行标准化处理。

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

式中：

x_i ——指标 X_i 标准化处理以后的数值，其大小在[0, 1]范围内；

\bar{X} —— X_i 数据集的平均值；

S —— X_i 数据集的标准差。

9 评估方法选取

9.1 一般规定

9.1.1 宜根据评估目的、评估对象选择适宜的评估方法。

9.1.2 水环境承载力典型的评估方法包括短板法、内梅罗指数法、向量模法、线性加权求和法、指数加权求积法、隶属度函数法等。

9.2 短板法

9.2.1 短板法适用于水环境承载力大小和水环境承载力承载状态的评估。

9.2.2 按照公式（6）计算。

$$\begin{cases} \text{当 } P_i \text{ 为正向指标: } P = \min(P_1, P_2, \dots, P_n) \\ \text{当 } P_i \text{ 为负向指标: } P = \max(P_1, P_2, \dots, P_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中：

P ——水环境承载力大小或水环境承载力承载状态的评估结果；

P_i ——第 i 个指标的评估结果；

n ——指标的个数。

9.3 内梅罗指数法

9.3.1 内梅罗指数法适用于水环境承载力承载状态评估。

9.3.2 按照公式（7）和公式（8）计算。

$$P = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (8)$$

式中：

P ——水环境承载力承载状态评估结果；

\bar{P} ——承载率的平均值；

P_{\max} ——承载率的最大值；

P_i ——第*i*个指标的承载率。

9.4 向量模法

9.4.1 向量模法适用于水环境承载力大小评估。

9.4.2 按照公式（9）计算。

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i \bar{E}_{ij})^2} \quad (9)$$

式中：

P ——水环境承载力大小评估结果；

W_i ——第*i*个指标的权重，常见权重确定方法见附录B；

\bar{E}_{ij} ——第*j*个水平年或第*j*个分区中的第*i*个指标；

\bar{E}_{ij} —— E_{ij} 标准化后的结果，标准化方法见8.2。

9.5 线性加权求和法

9.5.1 线性加权求和法适用于水环境承载力承载状态和水环境承载力开发利用潜力的评估。

9.5.2 按照公式（10）计算。

$$P = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (10)$$

式中：

P ——水环境承载力承载状态或水环境承载力开发利用潜力的评估结果；

w_i ——第*i*个指标的权重，常见权重确定方法见附录B；

x_i ——第*i*个指标的标准化结果。

9.6 指数加权求积法

9.6.1 指数加权求积法适用于水环境承载力承载状态和水环境承载力开发利用潜力的评估。

9.6.2 按照公式（11）计算。

$$P = \prod_{i=1}^n x_i w_i \quad (11)$$

式中：

P ——水环境承载力承载状态或水环境承载力开发利用潜力的评估结果；

w_i ——第*i*个指标的权重，常见权重确定方法见附录B；

x_i ——第*i*个指标的标准化结果。

9.7 隶属度函数法

9.7.1 隶属度函数法适用于水环境承载力大小、水环境承载力承载状态和水环境承载力开发利用潜力的评估。

9.7.2 按照公式（12）计算。

$$B = W \times R \quad (12)$$

式中：

B ——隶属度函数结果;

W ——指标权重集, $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$, 常见权重确定方法见附录B;

R ——隶属度矩阵。

10 评估分级标准

10.1 一般规定

评估分级标准分为评估指标分级标准和评估结果分级标准。根据评估指标分级标准,可以确定评估结果分级标准。

10.2 评估指标分级标准

通过与流域(区域)自身或者与相邻或相似地区进行比较,选取评估指标的最大值和最小值,分别作为评估指标的上限和下限,并将指标上限和下限五等分,确定评估指标的不同等级。

10.3 评估结果分级标准

10.3.1 对水环境承载力大小而言,宜按照评估结果分为承载力低、承载力较低、承载力中等、承载力较高、承载力高,共5个等级。

10.3.2 对水环境承载力承载状态而言,宜按照评估结果分为承载状态良好、承载状态一般、临界超载、一般超载、严重超载,共5个等级。

10.3.3 对水环境承载力开发利用潜力而言,宜按照评估结果分为开发利用潜力小、开发利用潜力较小、开发利用潜力一般、开发利用潜力较大、开发利用潜力大,共5个等级。

附录 A
(资料性)
指标含义与计算方法

A.1 水环境容量分量 (A)

A.1.1 本地COD环境容量/环境容量指数 (A1)

含义：本地COD环境容量特指在满足水环境质量的要求下，水体容纳污染物COD的最大负荷量。本地COD环境容量指数是指在无法计算水环境容量时，利用河流或湖泊断面水环境质量与目标期望值的差距衡量当前水环境所能容纳的污染物COD负荷量。

计算方法：参照《全国水环境容量核定技术指南》和公式(A.1)。

A.1.2 本地NH₃-N环境容量/环境容量指数 (A2)

含义：本地NH₃-N环境容量特指在满足水环境质量的要求下，水体容纳污染物NH₃-N的最大负荷量。本地NH₃-N环境容量指数是指在无法计算水环境容量时，利用河流或湖泊断面水环境质量与目标期望值的差距衡量当前水环境所能容纳的污染物NH₃-N负荷量。

计算方法：参照《全国水环境容量核定技术指南》和公式(A.1)。

A.1.3 本地TP环境容量/环境容量指数 (A3)

含义：本地TP环境容量特指在满足水环境质量的要求下，水体容纳污染物TP的最大负荷量。本地TP环境容量指数是指在无法计算水环境容量时，利用河流或湖泊断面水环境质量与目标期望值的差距衡量当前水环境所能容纳的污染物TP负荷量。

计算方法：参照《全国水环境容量核定技术指南》和公式(A.1)。

$$A = \frac{QC_s}{C_0} \quad (\text{A.1})$$

式中：

A ——水环境容量指数， m^3 ；

C_s ——断面水功能目标对应的污染物浓度， mg/L ；

C_0 ——上游来水污染物浓度， mg/L ；

Q ——过境河流断面地表水资源量或湖泊水资源量， m^3 。

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）水资源公报。

A.2 水资源分量 (B)

A.2.1 降水量 (B1)

含义：一定时间内，从天空降落到地面上的液态或固态（经融化后）水，未经蒸发、渗透、流失而在水平面上积聚的深度。

数据来源：中国（地区）水资源公报。

A.2.2 再生水量 (B2)

含义：污废水经适当处理后，达到一定的水质标准，满足某种使用要求，可以回用于景观用水、农田灌溉、园林绿化、工业（冷却水、锅炉水工艺用水）等的水量（ m^3 ）。

计算方法：

$$B2 = \text{再生雨水} + \text{再生废水} \quad (\text{A.2})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）水资源公报。

A.2.3 地表水量 (B3)

含义：陆地表面上动态水和静态水的总量，主要包括河流、湖泊、沼泽、冰川、冰盖等各种液态和固态的水体（ m^3 ）。

计算方法：

$$B3 = \text{河流水} + \text{湖泊水} + \text{沼泽水} + \text{冰川水} + \text{冰盖水} \quad (\text{A.3})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报、分布式水文模型模拟。

A.2.4 地下水量 (B4)

含义：地下水水面以下饱和含水层中的水量 (m³)。

计算方法：

$$B4 = \text{渗入水} + \text{凝结水} + \text{初生水} + \text{埋藏水} \quad (\text{A.4})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报、分布式水文模型模拟。

A.3 水生态分量 (C)

A.3.1 湿地面积占比 (C1)

含义：地表过湿或经常积水，生长湿地生物的地区面积占区域总面积的比例 (%)。

计算方法：

$$C1 = \frac{\text{土地利用类型为湿地的栅格数} \times \text{单位栅格面积}}{\text{所有土地利用类型的栅格总数}} \times 100 \quad (\text{A.5})$$

数据来源：中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站 (<https://www.resdc.cn/>)。

A.3.2 水源涵养能力 (C2)

含义：生态系统通过其特有的结构与水相互作用，对降水进行截留、渗透、蓄积，并通过蒸发实现对水流、水循环的调控的能力 (mm)。

计算方法：

$$C2 = \min\left(1, \frac{249}{\text{流速系数}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{\text{土壤饱和导水率}}{300}\right) \times \text{年产水量} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{年产水量} = \text{年降水量} - \text{年蒸发量} - \text{表面径流量} \quad (\text{A.7})$$

数据来源：国家（地区）统计局网站、中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站 (<https://www.resdc.cn/>)。

A.3.3 水质净化能力 (C3)

含义：陆域生态系统截留面源污染的能力，主要与土地利用类型相关 (%)。

计算方法：

$$C3 = \frac{\sum (\text{某个斑块的水质净化能力} \times \text{某个斑块的面积})}{\sum \text{某个斑块的面积}} \quad (\text{A.8})$$

数据来源：国家（地区）统计局网站、中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站 (<https://www.resdc.cn/>)。

A.3.4 河流蜿蜒度 (C4)

含义：河段两 endpoint 之间河流弯曲弧线长度与河段两 endpoint 之间河流直线长度的比值 (%)。

计算方法：

$$C4 = \frac{\text{河段两 endpoint 之间河流弯曲弧线长度}}{\text{河段两 endpoint 之间河流直线长度}} \times 100 \quad (\text{A.9})$$

数据来源：中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心网站 (<https://www.resdc.cn/>)。

A.3.5 河流纵向连通性 (C5)

含义：单位长度河流上已建和在建的拦河建筑物的数量 (座/km)。

计算方法：

$$C5 = \frac{\text{某一河流上已建和在建的拦河建筑物的数量}}{\text{河流的长度}} \quad (\text{A.10})$$

A.4 点源排放量 (D)

A.4.1 COD 点源排放量 (D1)

含义：评估区内由固定排放点排放的COD总量 (t)。

计算方法：

$$D1 = \sum \text{某固定排放点COD排放量} \quad (\text{A.11})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.4.2 NH₃-N 点源排放量 (D2)

含义：评估区内由固定排放点排放的NH₃-N总量 (t)。

计算方法：

$$D2 = \sum \text{某固定排放点NH}_3 - \text{N排放量} \quad (\text{A.12})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.4.3 TP 点源排放量（D3）

含义：评估区内由固定排放点排放的TP总量（t）。

计算方法：

$$D3 = \sum \text{某固定排放点TP排放量} \quad (\text{A.13})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.5 面源排放量（E）

A.5.1 COD 面源排放量（E1）

含义：评估区内由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的COD总量（t）。

计算方法：

$$E1 = \sum \text{某非固定排放点COD排放量} \quad (\text{A.14})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.5.2 NH₃-N 面源排放量（E2）

含义：评估区内由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的NH₃-N总量（t）。

计算方法：

$$E2 = \sum \text{某非固定排放点NH}_3 - \text{N排放量} \quad (\text{A.15})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.5.3 TP 面源排放量（E3）

含义：评估区内由土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药、各种大气颗粒物等组成，通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水等方式进入水、土壤或大气环境的TP总量（t）。

计算方法：

$$E3 = \sum \text{某非固定排放点TP排放量} \quad (\text{A.16})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报、国家（地区）统计局网站。

A.6 水资源利用量（F）

A.6.1 生活用水量（F1）

含义：人类日常生活所需用的水量，包括城镇生活用水和农村生活用水。城镇生活用水由居民用水和公共用水（含服务业、餐饮业、货运邮电业及建筑业等的用水）组成，农村生活用水除居民生活用水外还包括牲畜用水（t）。

计算方法：

$$F1 = \text{城镇生活用水} + \text{农村生活用水} \quad (\text{A.17})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报。

A.6.2 工业用水量（F2）

含义：工业生产过程中使用的生产用水及厂区内职工生活用水的总量。生产用水主要用途是：①原料用水，直接作为原料或作为原料的一部分而使用的水；②产品处理用水；③锅炉用水；④冷却用水等（t）。

计算方法：

$$F2 = \text{原料用水} + \text{产品处理用水} + \text{锅炉用水} + \text{冷却用水} \quad (\text{A.18})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报。

A.6.3 农业用水量 (F3)

含义：用于灌溉和农村牲畜的用水总量 (t)。

计算方法：

$$F3 = \text{灌溉用水} + \text{农村牲畜用水} \quad (\text{A.19})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报。

A.6.4 生态环境用水量 (F4)

含义：保护、修复或建设给定区域的生态与环境需要人为供给的水量 (t)。

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、中国（地区）水资源公报。

A.7 上游来水压力 (G)

A.7.1 上游来水 COD 量 (G1)

含义：评估区上游来水中COD总量 (t)。

计算方法：

$$G1 = \text{上游来水中COD浓度} \times \text{上游来水量} \quad (\text{A.20})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.7.2 上游来水 NH₃-N 量 (G2)

含义：评估区上游来水中NH₃-N总量 (t)。

计算方法：

$$G2 = \text{上游来水中NH}_3\text{-N浓度} \times \text{上游来水量} \quad (\text{A.21})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.7.3 上游来水 TP 量 (G3)

含义：评估区上游来水中TP总量 (t)。

计算方法：

$$G3 = \text{上游来水中TP浓度} \times \text{上游来水量} \quad (\text{A.22})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.8 污染物排放强度与水资源利用强度 (H)

A.8.1 人均综合用水量 (H1)

含义：评估区内每人的耗水量 (m³/人)。

计算方法：

$$H1 = \frac{\text{评估区内年用水量}}{\text{评估区内总人口}} \quad (\text{A.23})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.8.2 万元 GDP 水耗 (H2)

含义：评估区内每万元GDP的耗水量 (m³/万元)。

计算方法：

$$H2 = \frac{\text{评估区内年用水量}}{\text{评估区内以万元计的GDP}} \quad (\text{A.24})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.8.3 万元 GDP COD 排放量 (H3)

含义：评估区内每万元GDP所产生的COD总量 (t/万元)。

计算方法：

$$H3 = \frac{\text{评估区内COD排放总量}}{\text{评估区内以万元计的GDP}} \quad (\text{A.25})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.8.4 万元 GDP NH₃-N 排放量 (H4)

含义：评估区内每万元GDP所产生的NH₃-N总量 (t/万元)。

计算方法：

$$H4 = \frac{\text{评估区内NH}_3\text{-N排放总量}}{\text{评估区内以万元计的GDP}} \quad (\text{A.26})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.8.5 万元 GDP TP 排放量（H5）

含义：评估区内每万元GDP所产生的TP总量（t/万元）。

计算方法：

$$H5 = \frac{\text{评估区内TP排放总量}}{\text{评估区内以万元计的GDP}} \quad (\text{A.27})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.9 区域发展能力（I）

A.9.1 城镇化率（I1）

含义：城镇人口占总人口（包括农业人口与非农业人口）的比重（%）。

计算方法：

$$I1 = \frac{\text{评估区内城镇人口}}{\text{评估区内总人口}} \times 100 \quad (\text{A.28})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.9.2 人均 GDP（I2）

含义：评估区在核算期内（通常是一年）实现的GDP与这个地区的常住人口（或户籍人口）的比值（万元/人）。

计算方法：

$$I2 = \frac{\text{评估区内GDP}}{\text{评估区内常住人口（或户籍人口）}} \quad (\text{A.29})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.9.3 第三产业占比（I3）

含义：评估区内各类服务或商品GDP占评估区GDP的比重（%）。

计算方法：

$$I3 = \frac{\text{评估区内各类服务或商品GDP}}{\text{评估区GDP}} \times 100 \quad (\text{A.30})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、国家（地区）统计局网站。

A.9.4 环保投资占比（I4）

含义：为解决现实的或潜在的环境问题、协调人类与环境的关系、保障经济社会的持续发展而支付的资金占评估区GDP的比重（%）。

计算方法：

$$I4 = \frac{\text{评估区内各类环保支出}}{\text{评估区GDP}} \times 100 \quad (\text{A.31})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国生态环境统计年报》、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报和国家（地区）统计局网站。

A.9.5 污水处理率（I5）

含义：经过处理的生活污水量、工业废水量占污水排放总量的比重（%）。

计算方法：

$$I5 = \frac{\text{经过处理的生活污水量} + \text{经过处理的工业废水量}}{\text{评估区内污水排放总量}} \times 100 \quad (\text{A.32})$$

数据来源：中国（地区）统计年鉴、《中国生态环境统计年报》、中国（地区）国民经济和社会发展统计公报和国家（地区）统计局网站。

附录 B
(资料性)
常见权重确定方法

经过建立流域（区域）水环境承载力评估体系、数据标准化处理之后，需要选定合适的权重确定方法，主要包括层次分析法、结构方程法、熵权法等。

B.1 层次分析法

a) 建立层次结构

将决策的目标、考虑的因素和决策对象按照其相互关系分为最高层、中间层和最低层，画出层次结构图。

b) 构造判断矩阵

采用一致矩阵法确定各层次各因素之间的权重，即不把所有因素放在一起比较，而是两两进行比较，判断矩阵是表示本层所有因素针对上一层某一因素的相对重要性进行比较。

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

式中：

A ——比较同一层中的因素相对于上一层某个因素的重要性的判断矩阵；

a_{ij} ——第*i*个因素相对于第*j*个因素的重要度，其值大于0，则 $a_{ij}=1/a_{ji}$ ， $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

c) 计算单排序权向量并做一致性检验

为确保判断的一致性，需要进行一致性检验，使得 $CR < 0.1$ ，公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{B.2})$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{B.3})$$

式中：

CI ——一致性指标； λ_{\max} ——最大特征根； CR ——一致性比率； RI ——随机一致性指标， n 与 RI 的关系如表B.1所示。

表 B.1 随机一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当 CR 值小于0.1， A 的不一致程度在容许范围之内，通过一致性检验，可用其归一化特征向量作为权向量 W_i ，否则需要重新构造判断矩阵。

$$W_i = \frac{\sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{im}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{im}}} \quad (\text{B.4})$$

d) 计算总排序权向量并做一致性检验

计算最低层对最高层总排序的权向量并做一致性检验。

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_m CI_m}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_m RI_m} \quad (\text{B.5})$$

当 CR 值小于0.1，符合一致性检验，否则需要重新考虑判断矩阵。

B.2 结构方程法

结构方程模型（Structural Equation Model, SEM）是一种基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的统计方法，是验证性因子模型与因果模型的结合。SEM整合了路径分析与多元回归等方法，能够处理多个因变量，能够进行流域（区域）水环境承载力影响因子的路径分析。

结构方程模型分为测量方程和结构方程，其中测量方程是观察观测变量与潜变量之间的关系，结构方程通过路径关系图直观描述潜变量之间的关系。测量方程以因子分析的方式展示、描述潜变量与观测指标之间的关系；结构方程则通过一种路径关系图直观地描述潜变量之间的关系。在结构方程模型中，无法直接测量的变量用潜变量表征；可直接测量的变量用观测变量来表征。

e) 测量模型

$$X = \Lambda_X \zeta + \delta \quad (\text{B.6})$$

$$Y = \Lambda_Y \eta + \varepsilon \quad (\text{B.7})$$

式中：

ζ 、 η ——外生潜变量矩阵和内生潜变量矩阵；

X 、 Y —— ζ 、 η 的测量变量矩阵；

Λ_X 、 Λ_Y —— X 、 Y 和 ζ 之间的关系测量系数矩阵；

δ 、 ε ——方程残差矩阵。其中， δ 与 ζ 、 η 及 ε 不存在相关性， ε 与 η 、 ζ 及 δ 也不存在相关性。

f) 结构模型

$$\eta = B\eta + \Gamma\zeta + \zeta \quad (\text{B.8})$$

式中：

B ——描述内生潜变量间关系的系数矩阵；

Γ ——描述外源潜变量对内生潜变量影响关系的系数矩阵。

在流域（区域）水环境承载力模型假设基础上，运用测量模型和结构方程进行迭代计算，可以求解各影响因子对水环境承载力的影响路径以及贡献值。

g) 权重确定

结构方程可以分析单项指标对总体的作用以及单项指标之间的相互关系，利用结构方程确定各变量之间的相关作用系数，进而确定各指标的权重。可通过构建水环境承载力大小以及水环境承载力承载状态结构方程，确定潜变量与观察变量之间的关系，确定各指标权重，最后确定水环境承载力大小与承载状态，如公式B.9所示。

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \quad (\text{B.9})$$

$$\omega_i = \frac{|\lambda_i|}{\sum_{i=1}^n |\lambda_i|} \quad (\text{B.10})$$

式中：

P ——流域（区域）水环境承载力评估结果；

ω_i ——第 i 个指标的权重；

λ_i ——第 i 个指标的路径系数；

x_i ——第 i 个指标的标准化结果；

n ——指标个数。

B.3 熵权法

熵权法是一种根据各项指标观测值所提供的信息的大小（即信息熵）来确定指标权重的客观赋权方法。指标的离散程度越大，该指标对综合评估的影响越大，则其权重也就越大。可利用熵权法确定水环境承载力评估指标权重，然后确定流域（区域）水环境承载力大小、承载状态以及开发利用潜力，如公式B.11所示。

$$P_i = \sum_{j=1}^m (w_j x_{ij}) \quad (\text{B.11})$$

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)} \quad (\text{B.12})$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (\delta_{ij} \ln \delta_{ij}) \quad (\text{B.13})$$

$$\delta_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (\text{B.14})$$

式中:

P_i ——第*i*个评估单元或第*i*年流域(区域)水环境承载力评估结果, $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

w_j ——第*j*个指标的权重, $j = 1, 2, 3, \dots, m$;

E_j ——第*j*个评估单元或第*j*年流域(区域)的信息熵, 当 $\delta_{ij}=0$, 令 $E_j=0$;

δ_{ij} ——指标标准化的占比;

x_{ij} ——指标标准化结果;

m ——指标个数;

n ——评价对象个数。