

ICS: 07.060

CCS: A47

团 体 标 准

T/CI 091-2022

流域降水预报服务平台

Basin precipitation forecasting service platform

2022-10-27 发布

2022-10-27 实施

中国国际科技促进会 发布

目次

| | |
|---|-----|
| 前 言 | II |
| 流域降水预报服务平台 | 1 |
| 1 适用范围 | 2 |
| 2 规范性引用文件 | 2 |
| 3 术语和定义 | 2 |
| 3.1 | 2 |
| 降水量 Precipitation | 2 |
| 3.2 | 2 |
| 降水量等级 Grade of Precipitation | 2 |
| 3.3 | 3 |
| 临近降水预报 Precipitation Nowcasting | 3 |
| 3.4 | 3 |
| 短期降水预报 Short-Range Precipitation Forecast | 3 |
| 3.5 | 3 |
| 中期降水预报 Medium-Range Precipitation Forecast | 3 |
| 3.6 | 3 |
| 预报时效 Forecast Leading Time | 3 |
| 3.7 | 3 |
| 大气模式 Atmospheric Model | 3 |
| 3.8 | 3 |
| 全球气候模式 Global Climate Model | 3 |
| 3.9 | 3 |
| 数值天气预报 Numerical Weather Prediction | 3 |
| 3.10 | 3 |
| 数值天气预报模式 Numerical Weather Prediction Model | 3 |
| 3.11 | 4 |
| 确定性预报 Deterministic Forecast | 4 |
| 3.12 | 4 |
| 概率预报 Probabilistic Forecast | 4 |
| 4 平台总体设计 | 4 |
| 4.1 总体要求 | 4 |
| 4.2 平台架构 | 4 |
| 4.3 技术指标要求 | 6 |
| 5 平台降水预报模型 | 7 |
| 5.2 降水预报模型技术指标 | 8 |
| 5.3 降水预报模型构建 | 9 |
| 5.4 降水预报模型运行 | 14 |
| 5.5 降水预报模型高效运行框架搭建 | 156 |

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》起草：某些内容可能涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件为首次发布，今后将根据流域降水预报服务平台要求及技术发展情况适时修订。

本文件由中国国际科技促进会标准化工作委员会负责管理，由中国水利水电科学研究院负责具体技术内容的解释。为了提高标准质量，请各单位在使用过程中，总结经验和积累资料，及时将发现的问题和意见反馈给中国水利水电科学研究院，以供后续修订时参考。

联系方式：北京市海淀区玉渊潭南路1号水科院大厦A座922室，邮编：100038；E-mail：dongnp@iwhr.com。

本文件起草单位：中国水利水电科学研究院、水利部数字孪生流域重点实验室、流域水循环模拟与调控国家重点实验室、中国水资源战略研究会、海南省水文水资源勘测局、华能澜沧江水电股份有限公司、四川省玉溪河灌区运管中心、四川水利职业技术学院、四川省水利科学研究院、四川省都江堰水利发展中心、北京答墨科技有限公司。

本文件主要起草人：杨明祥、董宁澎、王贺佳、李彦富、龙艺、苏冠波、谢卫宁、程文、林尤文、肖静、莫书平、张鹭、李红刚、管镇、张攀全、周毅、刘双美、罗茂盛、卢鑫、唐颖复、叶生进、胡其德。

本文件为首次发布。

引言

2022年，水利部印发了《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》、《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》、《智慧水利建设顶层设计》、《“十四五”智慧水利建设规划》等四项文件，提出要以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为实施路径，提升预报、预警、预演、预案的“四预”能力，加快构建智慧水利体系。其中，《智慧水利建设顶层设计》等文件明确要求通过集成“降水—产流—汇流—演进”全过程模型，实现未来降水的精准预报。

面向水利部建设智慧水利、提高四预能力的要求，通过建立降水数值预报模型，可以提前预测暴雨、台风、洪水、干旱等自然灾害，从而有效减少灾害损失，社会效益显著。然而，流域精细化降水预报模型需要消耗大量计算资源，须部署在大型计算设备上，且对维护人员的专业技术水平要求较高，导致开展精细化数值降水预报的物力和人力成本较高，各级水利单位获取降水预报的难度较大。

借鉴物联网、共享经济模式，以提供服务为目的，通过开发通用的软件架构和标准服务接口，搭建流域降水预报服务平台，是解决上述问题的新途径。然而，目前国内外相似技术产品正处于起步阶段，尚未形成统一的标准体系，导致流域降水预报服务平台在研发、推广和应用等环节均存在一定困难。为此，制定本标准以期对流域降水预报服务平台的设计和开发提供指导。

本标准的编制工作得到了国家重点研发计划重点专项（2021YFC3000202）、海南省院士创新平台科研专项（YSPTZX202142）、华能集团总部科技项目“HNKJ21-HF241 澜沧江流域气象水文一体化预报系统技术研究”资助。

流域降水预报服务平台

1 适用范围

本标准规定了流域降水预报服务平台的总体目标、总体架构、主要功能、核心模块和预报模型。

本标准适用于流域降水预报服务平台的设计和开发,可作为流域降水预报服务平台设计与开发的依据。

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标准必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本标准;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本标准。

GB/T 20271-2006 信息安全技术 信息系统通用安全技术要求

GB/T 35273-2020 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 28594 临近天气预报

GB/T 21984-2017 短期天气预报

GB/T 27956-2011 中期天气预报

GB/T 28592-2012 降水量等级

SL 323-2011 实时雨水情数据库表结构与标识符

SL 330-2011 水情信息编码标准

3 术语和定义

3.1

降水量 Precipitation

某一时段内,从天空降落到地面上的液态(降雨)或固态(降雪)(经融化后)降水,未经蒸发、渗透、流失而在水平面上积聚的深度。

3.2

降水量等级 Grade of Precipitation

降水量大小的级别标准。

3.3

临近降水预报 Precipitation Nowcasting

某一区域未来 0h~2h 降水变化的描述和预告。

3.4

短期降水预报 Short-Range Precipitation Forecast

某一区域或地点未来 72h 内降水变化的预先估计和预告。

3.5

中期降水预报 Medium-Range Precipitation Forecast

某一区域未来 72h 以上, 240h 内天气变化的预先估计和预告。

3.6

预报时效 Forecast Leading Time

又称预见期, 指预报内容所覆盖的时间长度。单位为小时 (h)。

3.7

大气模式 Atmospheric Model

指利用流体力学和热力学的方程组对实际大气进行理想化和简化的数学模型, 可以用于研究大气演变规律、预测未来大气状态等。

3.8

全球气候模式 Global Climate Model

指可以在全球尺度上开展气象模拟的一类大气模式。

3.9

数值天气预报 Numerical Weather Prediction

指根据大气实际情况, 在一定的初值和边值条件下, 通过大型计算机作数值计算, 求解描写大气演变过程的流体力学和热力学的方程组, 预测未来一定时段的大气运动状态和天气现象的方法。

3.10

数值天气预报模式 Numerical Weather Prediction Model

指用于开展数值天气预报的一类大气模式。

3.11

确定性预报 Deterministic Forecast

指对未来某气象要素作出唯一预报值的一类预报。

3.12

概率预报 Probabilistic Forecast

指对未来某气象要素在一定取值范围内出现的概率所作的预报。

4 平台总体设计

4.1 总体要求

流域降水预报服务平台应包括硬件设备、数据库、模型软件、通信网络等，满足相关部门信息共享、信息交换和信息上报的要求，并充分考虑与水文预报、防洪调度系统等兼容要求。

4.2 平台架构

4.2.1 硬件设备

硬件设备配置应满足流域降水预报服务平台的功能要求，包括计算机局域网及机房等建设要求。基本设备配置一般应包括路由器、交换机、防火墙、VPN 网关、服务器、计算机、不间断电源、信息接收设备、显示设备及机房等。

4.2.2 数据库

数据库应包括实时雨水情数据库、预报降水数据库及进行数据交换的临时数据库。实时雨水情数据库应按照 SL 323-2011 的要求执行，预报降水数据库的设计应按相关规范要求统一库表结构和定义，入库对象按编码规则统一编码。

4.2.3 功能模块

流域降水预报服务平台应具有基础信息查询、流域水雨情形势分析、临近降水预报、短期降水预报、中期降水预报、系统管理等功能。

(1) 基础信息查询模块实现对流域内任意雨量站或气象站基本信息及站点降水量的检索。基本信息包括测站名称、编码、经纬度、高程、站址、建站年月等信息。降水量数据可按任意时段进行查询统计，并能以图形和表格的形式进行展示。

(2) 临近降水预报模块实现流域内 0~2 小时的降水预报以及实时雷达降水监测，支持网格降水、流域面雨量及站点雨量预报结果的查询与动态展示，并可

实现滚动预报，滚动预报的更新频率不应低于次/1 小时。当达到气象灾害预警信号标准时，应及时发布预警信息，包括预警级别、降水强度、降水量级、降水影响区域及影响时间等，并以图形、表格、文字的形式给出。

(3) 短期降水预报模块实现流域内 0~72 小时的降水预报，支持网格降水、流域面雨量及点雨量预报结果的查询与动态展示。预报结果查询的累计时段支持 1、3、6、12 和 24 小时。短期降水预报应支持滚动预报与集合预报，滚动预报的更新频率不应低于次/6 小时，集合预报应发布逐时段平均降水、最大降水与最小降水 3 个结果，并给出最优预报推荐。

(4) 中期降水预报模块实现流域内 72~240 小时的降水预报，支持网格降水、流域面雨量及点雨量预报结果的查询与动态展示。预报结果查询的累计时段支持 1、3、6、12 和 24 小时。中期降水预报应支持滚动预报与集合预报，滚动预报的更新频率不应低于次/24 小时，集合预报应发布逐时段平均降水、最大降水与最小降水 3 个结果，并给出最优预报推荐。

(5) 系统管理模块实现用户管理、权限管理、模型管理及基础数据维护等功能。用户管理实现用户的创建、修改、删除等功能。权限管理实现用户权限分配及更改等功能，用户权限可由系统管理员根据需要动态设置。模型管理实现降水预报模型的基本信息查询与参数设置，模型基本信息包括模型名称、模型代码、模型状态、模型说明等。模型参数包括模型所有参数化方案中的各参数的描述、默认参数取值及上下限范围。只有具有相应权限的用户才可修改模型状态与模型默认参数。基础数据维护实现对接入系统的实时水雨情数据以及初始场和边界场数据的更新以及数据清洗。

4.2.4 通信网络

应根据当地实际情况选择合适的网络接入方式，用于外部数据接收、数据传输、预警信息发布等。预警信息应兼顾与各流域管理机构、各级水利（水务）管理部门、水利水电规划设计单位、水库等水利工程运营管理单位间的信息共享需求。

4.2.5 模型软件

模型软件一般为基于数值天气预报模式的降水预报模型，通常包括实时同化程序、前处理程序、模式主程序、后处理工具等模块。用户可根据预报预警的实

际需求选择合适的模型分辨率与预见期开展业务预报。

4.3 技术指标要求

4.3.1 技术要求

(1) 基于 GIS 平台开发，采用 B/S 模式。

(2) 平台应采用模块化设计，各主要功能在数据层面应相对独立，可灵活组装各功能模块。

(3) 具备用户认证、授权和访问控制；发生系统安全事件时，应能以事件触发的方式通知系统管理员处理，系统参数的维护与管理应通过操作界面完成。

(4) 能够连续 24h 不间断工作，出现故障应能及时报警。

(5) 模型版本应易于升级，符合流域降水预报相关标准，满足扩展性和兼容性要求。

4.3.2 性能要求

(1) 基于高性能集群环境搭建中尺度数值天气预报模型，在多机互信的前提下，利用 NFS 网络文件映射机制实现模型运行目录在各集群节点中的映射，配置 mpich 并行计算框架，实现集群并行计算。

(2) 人机交互、信息查询、图形处理等操作应简单易用。

(3) 水雨情形势分析、临近降水预报、短期降水预报、中期降水预报等模块应能基于 GIS 界面进行查询与动态展示。

(4) GIS 响应速度应小于 5s，复杂报表响应速度应小于 5s，一般查询响应速度应小于 3s。

(5) 平台应实现云端访问，支持多用户并发操作等。

(6) 基于 json 格式开发标准、通用的数据访问接口，并部署于云端，用户可根据预报区域代码和预见期，实现预报信息的远程获取。

4.3.3 功能要求

(1) 基础信息查询应能对流域范围内各雨量站基本情况、历史观测数据等进行检索、查询、添加、修改与删除等操作。数据应实现自动批量导入和导出。

(2) 流域水雨情形势分析应能对流域水雨情进行监测、预报、查询统计与对比分析等。水雨情信息应能通过信息播报等方式告警，并显示预警相关信息。

(3) 临近预报应提供实时雷达降水监测、未来 2h 内的网格降水预报、流域

面雨量预报及点雨量预报结果的查询与动态展示。

(4) 短期降水预报应提供未来 72h 内的网格降水预报、流域面雨量预报及点雨量预报结果的查询与动态展示，累计时段包括 1、3、6、12 和 24 小时。

(5) 中期降水预报应提供未来 72h 以上，240h 内的网格降水预报、流域面雨量及点雨量预报结果的查询与动态展示，累计时段包括 1、3、6、12 和 24 小时。

(6) 针对同一预报时次，预报模型应能提供多个预报结果，使用大数据分析挑选最优预报，据此形成集合预报范围和最优预报推荐。

(7) 系统管理应提供用户管理、权限管理、模型管理及基础数据维护等功能。

5 平台降水预报模型

5.1 降水预报模型基本架构

一般选取数值天气预报模式作为降水预报模型。

数值天气预报模式一般包含实时同化程序、前处理程序、模式主程序等部分。实时同化程序负责不断接收气象站、探空、船舶等常规气象观测资料和卫星、雷达等非常规气象观测资料，并以此为基础对模式进行同化；前处理程序负责处理地形、土壤、植被等静态基础数据和大气背景场资料，形成模式的预报初始场和边界场；随后，实时同化程序和前处理程序将处理好的同化数据和驱动数据传递给模式主程序，由模式主程序开展气象预报并输出计算结果，同时根据需要将计算结果传递回实时同化模块开展模式的循环同化。模式输出的计算结果经后处理工具处理之后可形成用户所需的数据形式。

降水预报模型的基本架构如下图所示。

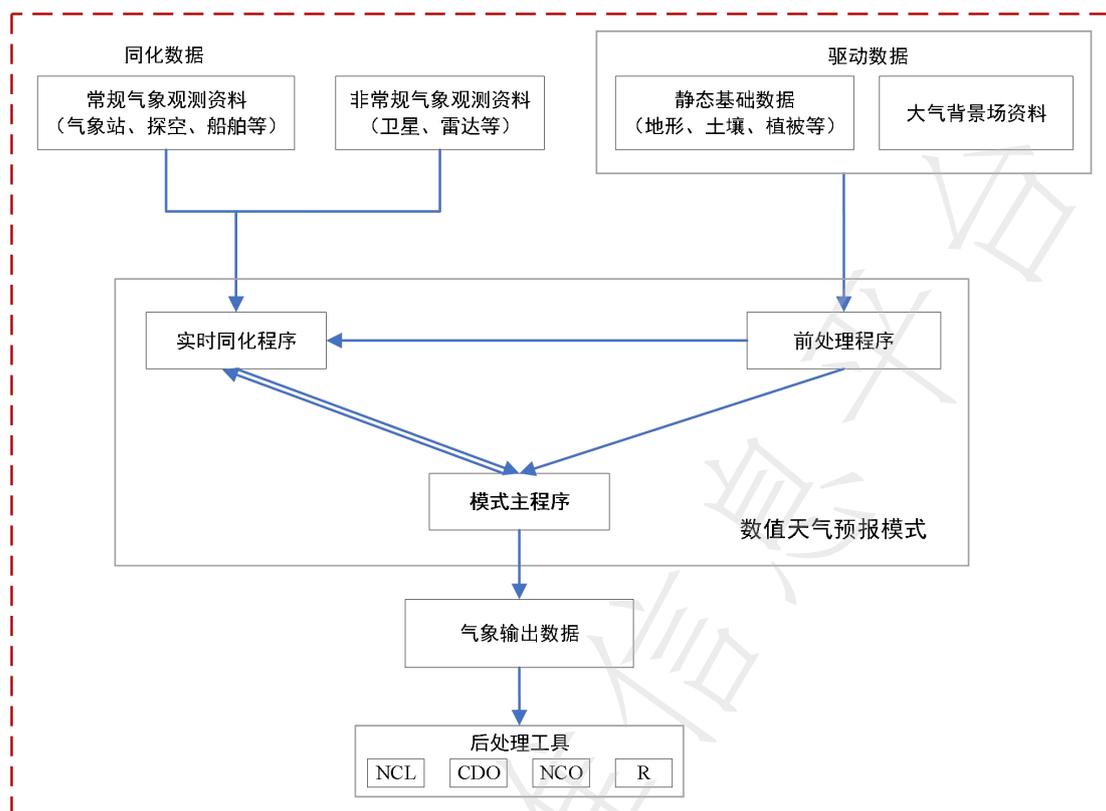


图 5-1 预报模型架构

5.2 降水预报模型技术指标

5.2.1 模型分辨率

降水预报模型的时间及空间分辨率根据用户预报预警实际需求，综合计算力和运行时间等多种因素确定。

5.2.2 模型预见期

根据预见期的不同，气象预报主要可以分为临近天气预报（未来 2 小时，《GB/T 28594 临近天气预报》）、短期天气预报（未来 72 小时，《GB/T 21984 短期天气预报》）和中期天气预报（未来 72~240 小时，《GB/T 27956 中期天气预报》）。

降水预报模型的预见期根据用户预报预警实际需求，综合计算力和运行时间等多种因素确定。

5.2.3 模型预报精度

开展确定性预报时，采用公平技巧评分、偏差评分、命中率、空报率、均方根误差等指标对降水预报模型的预报精度进行检验；采用公平技巧评分、命中率、空报率等指标对灾害性天气落区精度进行检验。相关指标的具体介绍见 5.3.3 节。

开展概率预报时,采用 Brier 评分、秩概率评分等指标对概率预报的预报精度进行检验。相关指标的具体介绍见 5.3.5 节。

降水预报模型的预报精度根据用户预报预警实际需求确定。

5.2.4 预报时间及频次

降水预报的预报时间及频次可根据预报变量、预见期、支撑业务类型、用户需求综合确定。其中,为确保预报时效性,临近降水预报的发布频次不应低于 1 次/1 小时,短期降水预报的发布频次不应低于 1 次/6 小时,中期降水预报的发布频次不应低于 1 次/24 小时。

模型应在每个预报时间节点之前自动下载大气背景资料并开展计算,并按时输出预报结果。

5.3 降水预报模型构建

5.3.1 模型区域及嵌套方式确定

该部分主要依据预报区域的地理空间位置确定降水预报模型覆盖的区域,以及模型采取的降尺度方案。模型区域在设置过程中,应尽量包括影响预报区域的主要天气系统和大地形,尽可能避免区域边界落在地形变化较大的区域,同时应充分考虑现有的数据和计算条件,选择大小合适的计算区域以及合理的网格分辨率。

5.3.2 参数化方案组合及实验设计

根据预报区域降水形成机理,选择对该变量影响较大的参数化方案,组成参数化方案队列 $P = \{P_1, P_2 \cdots P_m\}$ 。从观测资料中选取代表性较强的降水事件,组成事件队列 $E = \{E_1, E_2 \cdots E_n\}$ 。从而组成 $m \times n$ 个模拟案例,并结合模型区域及嵌套方式等信息形成用于提交降水预报模型运行的实验设计方案。

5.3.3 模型精度评价指标体系

从评价对象的多个角度出发,构建模型精度的评价指标体系。在指标体系构建过程中,既应考虑对面尺度精度的考察也应考虑对点尺度精度的评价。其中,面雨量是一定时间段内落在预报区域的总雨量,是影响洪水总量的重要因素;点雨量能够反映降水的时空分布变化,是洪峰流量以及峰现时间的主要影响因素。因此,评价指标体系主要根据面雨量评价和点雨量评价来构建。

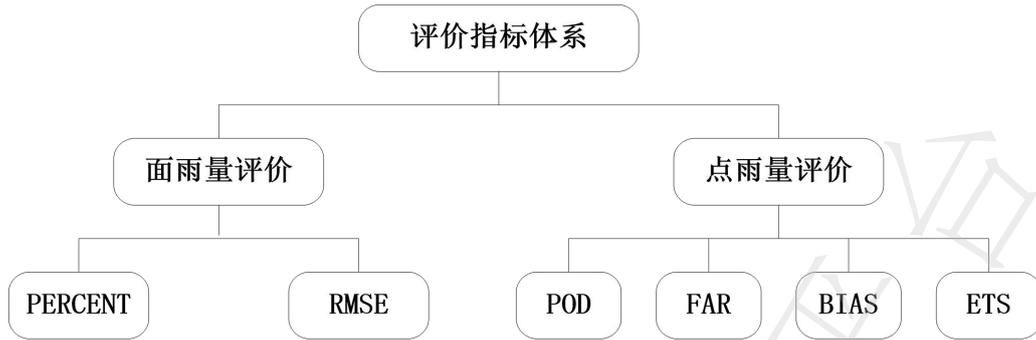


图 5-2 模型精度评价指标体系

面雨量评价中主要包括 *PERCENT* 和 *RMSE* (root mean squared errors, 均方根误差) 两个评价指标。指标 *PERCENT* 用于计算面雨量的相对误差, 其计算公式如下:

$$PERCENT = \begin{cases} \frac{S - O}{(S + O)/2}, & S + O > 0 \\ 0, & S + O = 0 \end{cases}$$

式中: S 代表模拟面雨量; O 代表观测面雨量。

指标 *RMSE* 的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (S - O)^2}$$

其中: *RMSE* 为均方根误差; S 为单个格点上的模拟值 (mm/d); O 为单个格点上的观测值; N 为预报区域所包含的格点数量。

针对点雨量的评价, 主要有命中率 *POD*、空报率 *FAR*、偏差评分 *BIAS* 和公平技巧评分 *ETS*。点雨量评价指标依据下表计算:

表 5-1 th 阈值上观测值 (O) 与模拟值 (S) 列联表

| 模拟值 | 观测值 | |
|-------------|-------------|----------|
| | $O \geq th$ | $O < th$ |
| $S \geq th$ | H | F |
| $S < th$ | M | N |

th 代表某一降水量级, 例如 5mm/d、10mm/d、25mm/d 等。H 代表正确预报 (Hit), 其值为观测值与模拟值同时大于阈值 th 的观测点数量; F 代表空报 (False), 其值为观测值小于阈值 th 、模拟值大于阈值 th 的观测点数量; M 代表漏报 (Miss), 其值为观测值大于阈值 th 、模拟值小于阈值 th 的观测点数量。N 代表无效事件

(Null), 其值为观测值和模拟值均小于阈值 t_h 的观测点数量。在一场降水评价中, 如果 H 较大则说明模型在预报区域的站点上对超过阈值 t_h 的降雨具有较好的预报效果, 如果 F 较大则说明模型有空报的倾向, 如果 M 较大则说明模型有漏报的倾向。基于上述要素, 构建由命中率 POD 、空报率 FAR 、偏差评分 $BIAS$ 和公平技巧评分 ETS 组成的评价指标组, 其计算公式如下所示:

$$POD = H/(H + M)$$

$$FAR = F/(H + F)$$

$$BIAS = (H + F)/(H + M)$$

$$ETS = (H - E)/(H + M + F - E)$$

$$E = (H + F)(H + M)/N_s$$

其中: N_s 是观测站点的数量; E 代表随机预报技巧。

由各指标计算公式的物理意义可知, POD 的大小反映了模型对某一降水量级的预报能力, 其取值范围介于 0 到 1 之间, 1 代表模型在观测站点上能够预报出所有超过指定量级的降水。 FAR 的大小反映了模型对降水量级的空报情况, 其取值范围介于 0 到 1 之间, 0 代表模型在观测站点上没有任何误报发生。 $BIAS$ 的大小反映了模型对降水量级预报的偏移情况, 其取值范围为 0 到 $+\infty$; 其中, 取值为 1 代表模型空报的站点数量与漏报的站点数量相等, $BIAS$ 分别取值为 $1/n$ 和 n 时 ($n > 1$) 两者所代表的偏移程度相同。 ETS 代表了模型的综合预报能力, 取值为 1 时说明该次预报为完美预报, 0 则代表其预报技巧与随机预报相当。

5.3.4 模型参数化方案组合评价模型

根据实验方案安排降水预报模型运行, 并获取模型输出的格点降水数据。根据地理坐标将观测数据与模拟数据进行对应, 并依据 5.3.3 节中构建的指标体系计算各指标值。由于用于评价模型降水模拟精度的指标较多, 各个指标的侧重点均有所不同, 有些指标关注降雨落区精度的评价, 而有些指标则侧重降雨量级精度的评价, 并且一种参数化方案组合很难在所有的单项指标评价中均取得比其他参数化方案更好的效果, 仅凭不同指标的评价和分析, 很难准确地选择出综合表现效果最好的参数化方案组合。因此, 引入欧几里得贴近度的概念构建方案综合评价模型, 选取欧几里得贴近度取最小值的模型参数化方案组合为最优组合。

(1) 欧几里得贴近度

欧几里得贴近度是两个模糊子集之间接近程度的一种度量, 设 u_1 和 u_2 为论域 U 上的两个模糊子集, 则 u_1 与 u_2 之间的欧几里得贴近度被定义为:

$$e(u_1, u_2) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [v_{u_1}(X_i) - v_{u_2}(Y_i)]^2}$$

式中: v 为模糊子集 u_1 和 u_2 的隶属度函数, u_1 和 u_2 的向量形式可以表示为:

$$u_1 = \{v_{u_1}(X_1), v_{u_1}(X_2), \dots, v_{u_1}(X_n)\}$$

若 s 同为属于 U 的模糊子集, 已知 u_1, u_2, \dots, u_m 共 m 个模糊子集, 并且有下式成立, 则可以说明模糊子集 s 与 u_k 最贴近。

$$e(s, u_k) = \min \{ e(s, u_1), e(s, u_2), \dots, e(s, u_m) \}$$

(2) 基于欧几里得贴近度的方案评价模型

模糊数学为解决这类问题提供了有效的方法, 由欧几里得贴近度的概念可知, 欧几里得贴近度可以较好的表征两个模糊子集的接近程度, 这种特性在模型参数化方案优化组合中具有重要的意义。将 $PERCENT$ 、 $RMSE$ 、 \overline{POD} 、 \overline{FAR} 、 \overline{BIAS} 、 \overline{ETS} 六个指标组成论域 U , 其中 \overline{POD} 、 \overline{FAR} 、 \overline{BIAS} 、 \overline{ETS} 是 POD 、 FAR 、 $BIAS$ 、 ETS 在各阈值上的平均值:

$$\overline{POD} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (W_m \cdot POD_m)$$

$$\overline{FAR} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (W_m \cdot FAR_m)$$

$$\overline{BIAS} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (W_m \cdot BIAS_m)$$

$$\overline{ETS} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (W_m \cdot ETS_m)$$

式中, POD_m 是阈值 th_m 上的 POD 指标值, 其他指标类似, 阈值集合为 $th = \{th_1, th_2, \dots, th_m, \dots, th_M\}$; W_m 是某一阈值的权重, 一般可取为等权重, 或可根据业务需要确定, 且 $\sum W_m = 1$ 。

将模拟降水事件对应的评价结果设为模糊子集 S_i , 并且构建各指标值的隶属

度函数 $\mu(x)$ ，得到下式：

$$S_i = \{\mu(PERCENT_i), \mu(RMSE_i), \dots, \mu(\overline{ETS}_i)\}$$

式中：

$$\mu(PERCENT_i) = PERCENT_i / \max\{|PERCENT_1|, \dots, |PERCENT_n|\}$$

$$\mu(RMSE_i) = RMSE_i / \max\{RMSE_1, RMSE_2, \dots, RMSE_n\}$$

$$\mu(\overline{POD}_i) = \overline{POD}_i$$

$$\mu(\overline{FAR}_i) = \overline{FAR}_i$$

$$\mu(\overline{BIAS}_i) = \ln \overline{BIAS}_i / \max\{|\ln \overline{BIAS}_1|, |\ln \overline{BIAS}_2|, \dots, |\ln \overline{BIAS}_n|\}$$

$$\mu(\overline{ETS}_i) = \begin{cases} \overline{ETS}_i & \overline{ETS}_i > 0 \\ 0 & \overline{ETS}_i \leq 0 \end{cases}$$

以上各式中 $i \in [1, 2, \dots, n]$ 为降水事件的序号。

将理论上各指标的最优值形成模糊子集 O ，根据指标体系中各指标的物理意义，设置 $O = \{0, 0, 1, 0, 0, 1\}$ 。

为了避免因单次降水事件评价而导致的较大的随机误差，在实际方案评价过程中一般采用多场降水过程的平均表现来判断不同方案组合的优劣，因此某一方案组合基于欧几里得贴近度的综合评价值可以表示成该方案下多次降水事件指标评价结果（模糊集 S_i ）与 O 的欧几里得贴近度的算数平均值，如下式所示：

$$E(S, O) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e(S_i, O)$$

5.3.5 概率预报构建

基于前述模型参数化方案组合评价模型，可以筛选得到若干组降水模拟效果较好的参数化方案组合。以这些参数化方案组合为基础，构建集合预报成员，并用预报某降水量级发生的成员数与总成员数之比计算该降水量级的发生概率。

利用 Brier 评分（BS）和秩概率评分（RPS）等指标来评估概率预报的预报效果。

（1）Brier 评分（BS）

BS 评分是对某个降水等级（即某降水事件发生）的概率预报结果进行评价

的一个指标。BS 评分 (B_S) 按下式计算:

$$B_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2$$

式中, P_i 为某一等级降水事件发生的预报概率; O 表示实况, 如果该事件发生, 则 $O_i = 1$, 若没有发生, 则 $O_i = 0$; n 为预报次数。

BS 评分是一种逆向评分方法, 其值越小, 预报质量越高。 $B_S = 0$, 表示预报完全正确, 反之, 其值越大, 预报质量越低; $B_S = 1$, 表示预报完全不正确。

(2) 秩概率评分 (RPS)

秩概率评分 (Ranked Probability Score, RPS) 是对多个等级的概率预报结果进行综合评价的一个指标。RPS 评分 (R_{PS}) 可写成:

$$R_{PS}(P, O) = \sum_{k=1}^J \left(\sum_{i=1}^k P_i - \sum_{i=1}^k O_i \right)^2$$

式中, P_i 、 O_i ($i = 1, 2, \dots, J$) 分别表示不同降水等级 J 的预报概率和实际观测值; O_i 是唯一确定的, 非 1 即 0, 且只能有一个为 1。 R_{PS} 值在 0 ~ 1 范围内, 且越小越好, $R_{PS} = 0$ 时, 概率预报最优。

5.4 降水预报模型运行

5.4.1 模型输入数据准备

降水预报模型的输入数据包括大气背景资料等气象驱动数据, 以及 DEM 数据、土壤数据、植被及土地利用数据等静态基础数据。在降水预报中, 大气背景资料通常由全球气候模式提供; DEM 数据、土壤数据、植被及土地利用数据等静态数据一般取自公开数据源。

5.4.2 模型数据前处理

模型数据的预处理部分主要指准备模型运行所必需的数据, 包括模拟区域内的地形、植被等静态数据以及背景场数据等, 同时还包括常规及非常规观测资料的处理过程。数据前处理的主要目的是将各类数据转换成降水预报模型可读取的数据形式, 并通过插值、重采样等方法将各类数据展布到降水预报模型的时空分辨率上。

5.4.3 模型主程序运行

降水预报模型运行通常需要设置的参数包括：模型空间分辨率、气象驱动的时间分辨率、模型输出的时间分辨率、参考经度、参考纬度、投影方式等。降水预报模型的常见投影方式包括墨卡托投影（Mercator）、兰伯特正轴等角割圆锥投影（Lambert Conformal Conic）和极球面投影（Polar Stereographic），分别适用于低纬度地区、中纬度地区和高纬度地区。由于我国大部分地区属中纬度地区，可选择兰伯特正轴等角割圆锥投影为模型的投影方式。

在完成模型参数设置和数据前处理之后，可运行模型主程序，开展气象模拟及预报。

5.4.4 输出数据后处理

根据用户需求和业务类型，输出预见期内的降水等气象变量，可利用 NCL、CDO 等后处理工具对数据进行处理、统计、分析及可视化，主要目的是便于用户理解使用。

5.5 降水预报模型高效运行框架搭建

5.5.1 模型多线程运行环境

降水预报模型计算量大，需要基于高性能服务器构建集群计算环境，从而保证模型的高效运行。整体采用可扩展分布式计算环境，配备自动运行功能，每天可在指定的时间点自动下载初始场和边界场信息，并实现文件的自动传送和前处理，启动模型主程序开展降水预报，最终将预报结果写入平台。模型部署环境和运行环境的示意图如下所示。

可扩展分布式计算环境

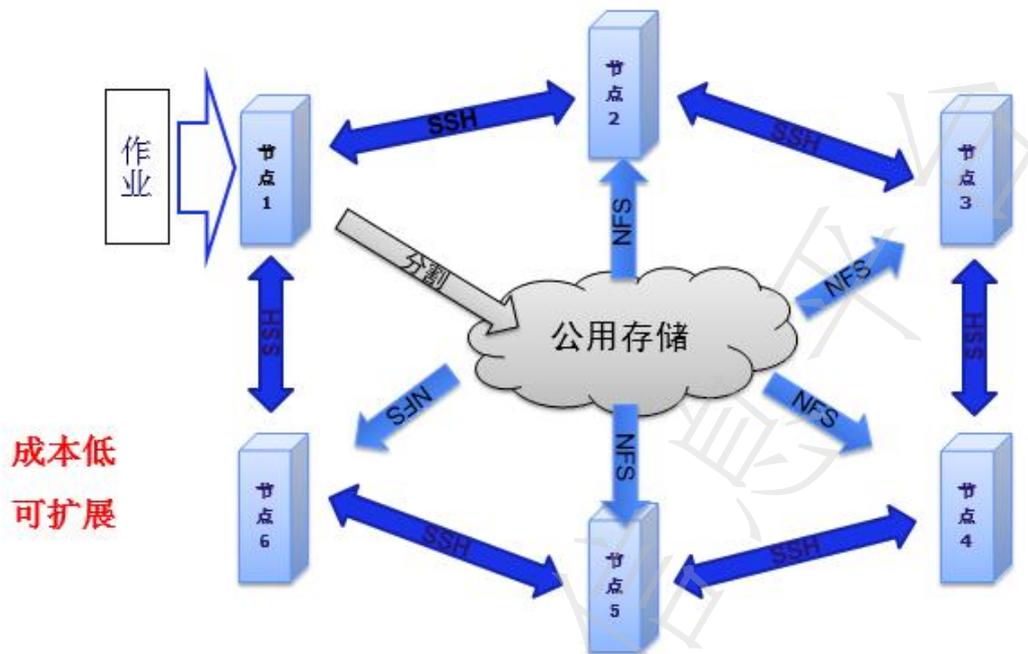


图 5-1 降水预报模型部署环境

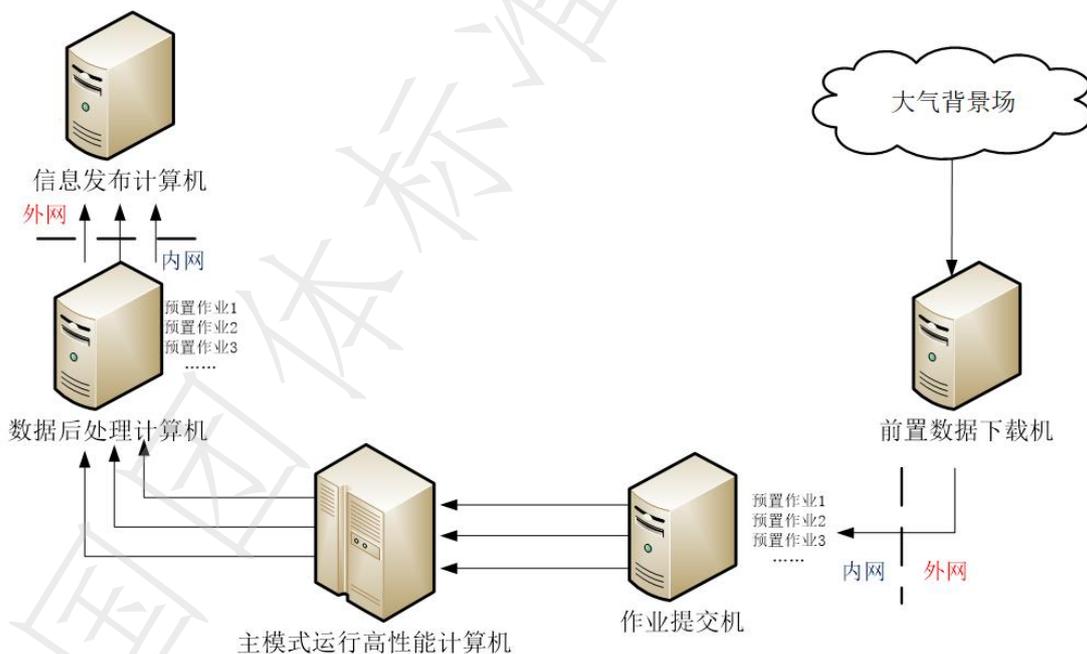


图 5-2 降水预报模型运行环境

5.5.2 模型自主运行程序

(1) 大气背景场数据自动下载

编写大气背景场数据下载脚本。用户通过配置大气背景场数据入口参数，调用下载线程对相应时段的大气背景场数据进行多线程下载；编写大气背景场数据维护脚本，用于定期重启大气背景场数据下载脚本；编写大气背景场数据停止脚

本，用于结束正在执行的大气背景场数据维护脚本与大气背景场数据下载脚本。

(2) 模型自动运行

编写脚本程序，在数据下载完成后针对不同预见期、时空分辨率等自动修改前处理程序中的参数，主要包括模型运行的起止时间、嵌套设置，以及一些物理参数等，实现预报模型的无人值守自主运行；并按照预报结果的输出频率，利用 NCL、CDO 等后处理脚本自动实现预报数据的处理、分析与发布。

(3) 预报结果自主评价

基于 5.3.3 节所述的评价指标体系及 5.3.4 节所述的评价模型，编写程序定时开展预报结果的自主评价。

(4) 参数化方案组合滚动优选

针对影响降水预报效果比较敏感的参数化方案，如微物理参数化方案和积云对流参数化方案，开展各个参数化方案组合的自主选择，并在过去一段时间预报结果评价的基础上，实现最优参数化方案组合的滚动更新。
