

流域视角下生态保护分析技术体系研究

□ 周星宇, 郑段雅, 涂胜杰, 严慧慧

【摘要】流域内各生态要素以水为媒介, 形成一个彼此高度关联的复杂系统。要对其进行全面分析并科学保护, 需要系统构建技术体系并合理引入各类模型工具和数据。文章综合其他学科相对成熟的理论和技术, 提出流域视角下国土空间规划中生态保护分析的技术体系, 包括流域划定、基础模拟、专项分析 3 个主要步骤, 其中流域划定要点在于选择合理的水文响应单元, 并进行人工/自然区分及耦合地下水流域; 基础模拟的目的在于对流域内大气(降水、气温和大气辐射)模型和陆面(植物截留、生态系统蒸散和土壤下渗)模型进行统一模拟并双向耦合, 以形成一致的地表径流结果用于后续专项分析; 专项分析则根据国土空间规划生态保护的实际内容, 具体可分为灾害防护、安全保障、生态多样性保护 3 个大类和 6 个中类, 每类分析中的模型工具、数据均存在各自的适用领域和特性, 需要仔细对比甄别。

【关键词】流域; 国土空间规划; 生态保护; 大气模型; 陆面模型; 灾害防护; 安全保障; 生物多样性保护

【文章编号】1006-0022(2022)11-0022-06 **【中图分类号】**TU981 **【文献标识码】**A

【引文格式】周星宇, 郑段雅, 涂胜杰, 等. 流域视角下生态保护分析技术体系研究[J]. 规划师, 2022(11): 22-27.

Technical System of Ecological Preservation Analysis of River Basin/Zhou Xingyu, Zheng Duanya, Tu Shengjie, Yan Huihui

【Abstract】Diverse ecological elements in a river basin form a correlated and complex system with water as the central medium. A technical system for ecological analysis and preservation shall be established to introduce needed models and data. Based on a review of mature theories and techniques, the paper proposes a technical system of ecological preservation analysis in territorial space planning for river basins with three major steps: river basin delimitation, basic simulation and special analysis. In river basin delimitation, the reasonable hydrological response units are specified, artificial/natural basins are divided, and underground water streams are coupled; in basic simulation, the atmospheric environment (precipitation, temperature, and radiation) and land surface (plant interception, evaporation, and soil infiltration) models are unified for further analysis; special analysis consists of three major and six intermediate issues in territorial space planning, each having its particular model and data in analysis.

【Key words】River basin, Territorial space planning, Ecological preservation, Atmospheric model, Land surface model, Disaster prevention, Safe supply, Biodiversity conservation

0 引言

《辞海》定义:“流域是指地表水及地下水分水线所包围的集水区的总称”。流域中的核心要素是水, 但又不仅限于水, 水历经的土地、土地上承载的生态资源和人类活动相互影响, 成为一个紧密整体。正如马世骏院士所言:“流域在其边界范围内由于水的自然流动性形成了一个十分重要的社会—自然—经济复合生态系

统”^[1]。国土空间规划作为保护生态资源、建设生态文明的重要工具, 以流域作为规划切入点, 能够更全面、科学有效地协调和统筹其中各要素之间的关系。

流域内上游与下游、地表水与地下水、河水与陆域、大气与陆地等众多要素之间彼此相互影响, 要想进行科学分析和规划, 势必要借助专业化科学技术。本文将尝试基于国土空间规划中对于生态保护的分析要求, 梳理相关行业成熟较成熟的流程方法、模型工具和数据,

【基金项目】 国家自然科学基金重点项目 (71774124)

【作者简介】 周星宇, 高级工程师, 现任职于武汉市规划研究院区域规划所。

郑段雅, 通讯作者, 高级工程师, 现任职于武汉市园林建筑规划设计研究院有限公司。

涂胜杰, 教授级高级工程师, 现任职于武汉市规划研究院区域规划所。

严慧慧, 高级工程师, 现任职于武汉市规划研究院区域规划所。

构建相对完整的技术体系,为开展类似工作提供技术索引。

1 相关研究综述

在国外,很早就有研究者认为流域(集水区)为生态系统调查评估和管理提供了必要的空间框架^[2]。例如,美国环保局国水资源办公室提倡用“集水区系统管理体系”来解决美国复杂的水污染问题。美国地质调查所在“国家水资源概况”项目中,将美国分为21个水资源区域和352个水文地质单元^[3],并认为这些单元是构建任何比例流域的基本框架。澳大利亚制定了《墨累—达令流域计划》,以指导其境内最大流域的水环境保护工作^[4]。相应的,许多模型和工具也将流域作为分析单元,并耦合气象、水文、土壤、生态等多个学科模型。比较知名的例子是区域水文生态模型(RHESSys),其将森林生态系统模型(Forest-BGC)与流域水文模型(TOPMODEL)进行耦合,可模拟区域尺度下流域地形与气候变化对植被的影响,并最终分析整个流域的水生态环境变化。一些成熟的水文工具软件,如MIKE系列、SWAT等,都会关联气象、土壤、植被等模型和参数,以提升分析的准确性。

在我国,水利、环保等行业较早涌现出类似流域保护的观念,并逐步传播至其他相关学界,规划学界的一些研究者受其影响,早在数年前就尝试在生态保护分析中引入流域理念及其相关工具^[5]。但真正突出流域理念的当属《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》^[6],该纲要正式提出以省级流域作为国土空间规划的基础。此后,相关研究层出不穷^[7-10],但大多聚焦于理念、策略或实施机制等层面,对于专业技术和方法的介绍较少,有恐落入“有其形而无其神”的局面。因此,本文尝试探索国土空间规划中生态保护分析的流程构建、模型工具、数据选介与耦合等体系性、基础性工作,以应对引入流域

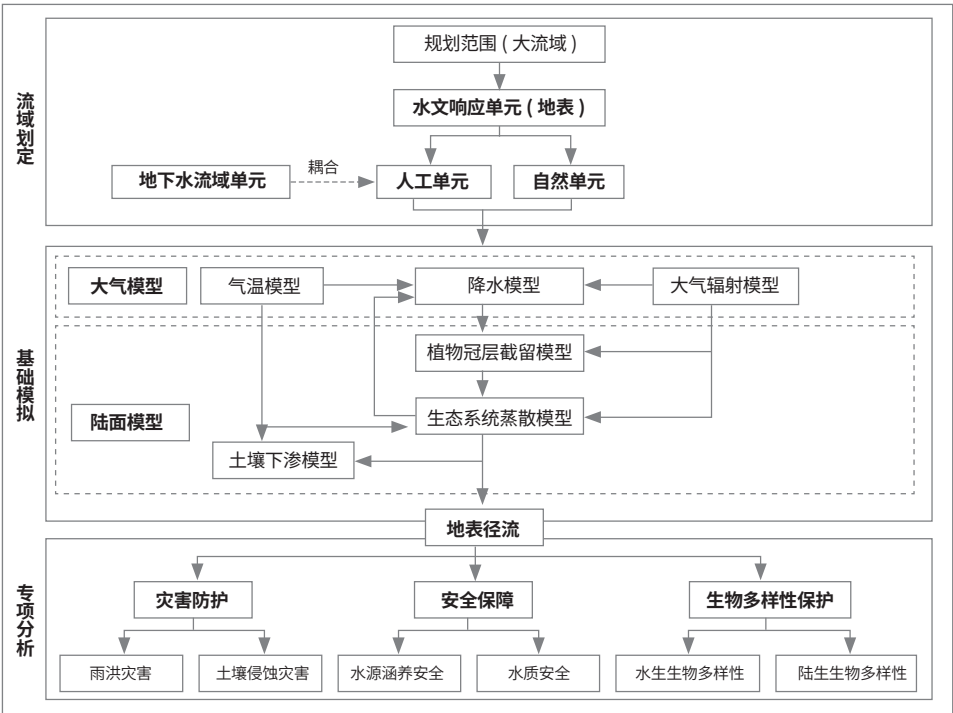


图1 流域视角下生态保护分析框架示意图

理念后的国土空间规划新业务需求。

2 流域视角下生态保护分析技术流程

根据资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价(以下简称“双评价”)及多个级别的国土空间规划指南,再结合规划的实际工作流程,本文尝试从流域视角将规划中生态保护分析的整体技术流程分为流域划定、基础模拟、专项分析3个主要步骤(图1)。

流域划定是开展生态保护分析的基础,其工作重点在于选择合理的分析精度(水文响应单元),予以人工/自然分类并耦合地下水流域,以指导后续分析的模型选取和数据标准统一。

流域内大气—陆面两者的水汽交换,是整个流域生态系统运转的基础。由于流域内各区域的时空差异性明显,引用的模型和数据也往往不一致,会不断累积偏差,最终造成全流域的分析结果严重失真,因此需要对上述基础模型进行统一设置并验证,才能正确、有效地逐

层传导至后续分析。

基于统一模拟的基础成果,方能高效开展各类生态保护专项分析。结合“双评价”,确定与流域高度相关的生态保护内容,具体可分为灾害防护、安全保障、生态多样性保护3个大类和6个中类,其余项目则尚不需要刻意从流域视角进行分析。这些分析项目涉及多个专业的模型数据,因此对相关模型和数据如何按照规划分析的要求进行选择与组合,是本文主要探讨的内容。

3 流域视角下生态保护分析技术步骤

3.1 流域划定

3.1.1 细分子流域至水文响应单元

流域由分水线包围形成,根据不同等级的水系及其对应的分水线,可以对流域进行相应的组合或细分,以适应不同尺度的规划分析。中国河流水系地图系统收集了国内约4000余条长度超过50 km的河流,并分为5个级别,较适合区域、省、市级的规划分析,若要开

展更细致的研究,则需要依赖地形图或者高程 DEM 进行子流域划分,其中常用工具为 ArcGIS 的水文工具集。该工具集基于 D8 算法,通过对填注后的地形 DEM 进行流量和流向分析,实现河网分级和相应的流域提取,但受制于数据、算法本身和工具专业性描述不足,其存在一些缺点,如对内封闭型流域或狭长型流域等特殊流域的划分失真、与实际地形存在偏差、细小流域精度不足等。对此,相关研究者进行了技术改进探索,如通过算法改进、重新编码、设置虚拟河道等^[11-13],运用 SWAT、ArcHydro 等模型工具进行河道耦合、水文点数据纠偏等来矫正误差。

对于子流域划分的最终成果,建议可按照 SWAT 模型所提出的水文响应单元划分标准来确定流域分析基本要素^[14],即将具有相同坡度、土地利用方式和土壤特征的地块,按照统一的颗粒度和格式进行归类及再切割,作为分析的最小独立空间单元。该方法能够在兼顾精度和效率的前提下,有效提升分析结果与实际情况的拟合度。例如,李曼曼等人^[15]借助 SWAT 模型对洱海流域进行合理的子流域和水文响应单元细分,使得模拟结果与实际情况的相对偏差降为 0.72%。

3.1.2 区分自然与人工单元

既然引入了水文响应单元概念,就需要区分自然和人工两种单元的差异。自然单元往往是连续、混合和渐变的,可以采用类似于栅格 (Raster) 或不规则网络 (Mesh) 数据层叠的形式进行表征和计算,如 MIKE 系列水文模型便推荐采取统一网络化的建模标准。而人工单元则完全不同,现实中人工环境对于水资源的管理有着较明晰的流程,如对于雨水采取“地表汇流—管道运输—排放/处理”流程,相应的在计算方面则会使用类似矢量型数据方式。例如,SWMM 模型分析流程为将人工环境沿道路划定若干个多边形集水区,设置积水点收集雨水,再设置不同管径、高程的线性管网和设

施彼此连通以处理雨水。两种迥异的单元特性,将很大程度决定后续模型的选取及彼此的耦合方式。

3.1.3 耦合地表水与地下水流域

流域包括地表水和地下水两个系统,要将两者耦合才能全面反映流域的生态特性。耦合的技术选取则恰好受限于自然与人工单元划分,如果是面向以自然单元为主的大尺度生态型区域,对于地下水流域则可以采用连续型模型,即把通过裂隙下渗的地下水流等效平摊至其所在的整个介质,从而能便捷地估算整体地下水位水量,来支撑后续的分析评估(如资源环境承载力评价)。但若分析对象中的人工单元面积较大,则要采用非连续模型,即探明或估算人工单元中的主要裂隙位置,模拟其渗流状态,为水源涵养或水土流失等分析提供确切的空间数据。目前, ArcGIS 自带的地下水工具支撑常见的连续型模型(多孔介质达西流),配合 Arc Hydro Groundwater(内置地下水三维流有限差分模型)可以实现地下水系统三维可视化分析及显示,而 GMS、Visual MODFLOW、PHREEQC 等专业地下水水文软件则可支撑更多、更复杂的连续或非连续型地下溶质运移模型,不仅能满足常用的分析需求,还能作为海水入侵、农业面源污染等特殊分析场景提供帮助。

3.2 基础模拟

3.2.1 统一大气模型

相关大气模型包括降水模型、气温模型和大气辐射模型等,其中降水模型是产生地表径流的核心来源,而气温和大气辐射模型是影响降雨及陆面各子模型运行的主要控制因素。对于降水和气温模型,按照穆宏强^[16]综述,目前由仅考虑垂直联系的“集总式”模型向基于 DEM,并综合考虑水平和垂直联系的“分布式”模型发展。模型中的具体数值(插值)计算可采用多元回归、克里金、反距离加权^[17]及数种模型混合的方法,以满

足不同尺度的规划分析需求。大气辐射模型则有较为固定的 OWLS 等公式。在使用工具方面, ArcGIS 和 ENVI 等主流软件均支撑以上模型的常规计算,基本可以满足规划分析工作需求。“双评价”和一些研究者提供了现成数据^[18]以便操作,但需要指出的是,其中降雨数据来源多为市级气象站,精度一般为数公里,比较适合大尺度分析,更小尺度的分析需要结合当地及周边地区的县乡级气象站数据进行细化。

3.2.2 统一陆面模型

降落至陆面的雨水,需要扣除植物截留、生态系统蒸散和土壤下渗才得出地表径流。相应的陆面模型即对应以上 3 类。其中,植物冠层截留目前缺乏较为理想的模型,主要依靠经验或局部实证。生态系统蒸散得益于遥感技术的发展,逐步开发出模拟精度越来越高的模型,包括从早期的简化法模型发展到单源模型(如 SEBAL、SEBI)再到双源模型(如 TSEB、SWH、SVAT)等,也有研究者得出 1 000 m 左右精度数据(如经典的 MODIS 蒸散数据、我国最新发布的全球干旱指数和潜在蒸散数据库^[19]等),可以匹配市级层面的规划分析。如需更细致的数据,则要借助大口径闪烁仪 (LAS) 进行近低空实测。土壤下渗模型经过近百年的发展,理论技术已经较为成熟,在计算公式上有 Kostiaikov、Philip、Green-Ampt、Richards 等方程式,并结合 GIS 技术,发展出 HYDRUS-2D/3D 等可视化工具。其真正的难点在于土壤分类原始数据采集,目前运用最为广泛的土壤数据库 HWSD 精度仅为 1 : 1 000 000,且数据较为陈旧。好在我国已有研究者生成了更高精度 (90 m) 的数据^[20],基本可以匹配市级尺度的规划分析,高精度的数据仍然需要通过实际测绘予以补充。

3.2.3 双向耦合大气和陆面模型

对上述各大气和陆面子模型分项进行计算后,还需要对其进行汇总耦合。由于子模型之间彼此联系复杂,简单的单向

耦合模式(大气模型驱动陆面模型)无法适用,构建复杂的双向耦合模式(大气模型与陆面模型相互嵌套)是研究发展的主要方向^[21]。目前常用的VIC、TOPMODEL等耦合模型提供了一些现成的双向耦合方案,可供中小尺度、要素简单的规划分析场景使用,但该领域仍然存在进一步改进空间,也有学者取得了实质性进展可供参考。耦合模型具体可分为强耦合和弱耦合两种,强耦合是以强大的综合型模型(如MIKE系列)为主体,扩充其分析功能以实现功能集成,如Larsen研发的MIKE-HIRHAM模型^[22],该模型可以充分保留耦合双方各自的优势,分析效率较高(采取同步编译),但会涉及对平台架构和代码的大幅度修改,需要强大的计算机知识支撑。弱耦合则是通过转换工具(如OpenMI),自行将所需的多个单向耦合流程“粘连”至一起,如WRF-HMS模型^[23]、WRF-Hydro模型^[24]等,但不同模型之间的数据转化和公式换算可能会产生一定误差,效率也相对不高。不过无论采取哪种模式,其最终的目标都是要落实至陆面,形成统一的地表径流结果以指导下一步的生态保护专项分析。

3.3 专项分析

3.3.1 灾害防护

(1) 雨洪灾害。

雨洪灾害是最为常见、威胁巨大、生态保护最为关注的流域性自然灾害之一。早期规划分析一般根据当地洪水淹没高程资料,划定相应的高程区域作为生态保护或非建设范围,属于静态方法。若要更加精细、科学地进行动态模拟,则要考虑降雨的时空变化、洪水动力等要素。目前,学界同样按照自然与人工两类地表,相应发展出地表汇流和管网汇流两类计算模型,并形成SWMM、MIKE系列、InfoWorksICM等成熟软件以供使用。其中,SWMM以人工场景为主,MIKE系列、InfoWorksICM两者兼有,涵盖城市内涝、河道行洪、流域洪涝演变

等多种与规划高度相关的具体场景,但由于涉及参数众多,计算难度较大。若能统一设置大气和陆面基础模型,在分析场景较小(县级及以下)的情况下,可以不考虑风应力和地球偏转力等宏观因素,代以使用HEC-RAS等更为简洁、轻量的软件工具。

(2) 土壤侵蚀灾害。

土壤侵蚀灾害虽然没有雨洪灾害突发和直观,但是日积月累造成的损失依然巨大,且会对雨洪灾害起到推波助澜的效果。对于这种长期性的自然灾害,相关模型技术可同样按照静态模型和动态模型进行区分,其中“双评价”推荐的中国水土流失方程CSLE属于经典的静态模型,在其公式 $A=RKLSBET$ 中, R (降雨因子)和 K (土壤可蚀性因子)可以参考基础模拟统一设置, L (坡长因子)、 S (坡度因子)可通过DEM计算识别, E (工程措施因子)和 T (耕作措施因子)取值较为固定,重点需要研究的是 B (植被覆盖度与生物措施因子),该因子无统一标准,地域特征十分明显,一般通过当地反复实验获得。目前有研究者整合既有相关文献,形成中国不同下垫面植被覆盖度遥感估算模型数据集^[25],可供许多地区参考。另外,SWAT模型也提供水文响应单元层面的泥沙含量估算工具以辅助土壤侵蚀分析。至于动态模型,MIKE系列、InfoWorksICM都提供了较为科学的泥沙运输模型,能够动态反映土壤泥沙受水动力的影响而不断堆积、迁徙的情况,运用较为广泛。

3.3.2 安全保障

(1) 水源涵养安全。

经过不断的认知发展,学界对水源涵养的内涵已经形成基本共识,即“在一定时空区域内,森林、草地、湿地等具备涵养水源能力的要素,对当地降雨截留和贮存的能力(水量)”^[26]。该能力是保障下游乃至跨流域供水安全的基础,正需要结合流域进行协调和保护。由此也能看出,截留和贮存水量估算是规划分析的核心内容。对此已经有水量平衡

法、降水储存法、年径流法等公式,公式计算则可引用之前基础模拟的数据成果。此外,也有相应的模型和软件提供不同时空尺度的分析,其中InVEST模型以网格为基础,输入的数据较多,分析时间以年为单位,适宜市级及以上较大尺度的流域分析;SWAT模型以水文响应单元为基础,分析时间包括年、月、日多种,更适合分析尺度较小的流域。其余还有SEBS、SCS和Terrain等模型,但应用推广范围都相对较小。

(2) 水质安全。

现有规划分析往往通过将重要水体纳入蓝线或者生态保护红线等“特殊区划”的方式来保障水体质量。在流域排污权分配、流域生态环境承载力控制等生态保护要求下,生态保护分析还需要对水体本身的净化能力(水质)进行定量研究。水质分析模型按照规划思维(即空间类型),可以分为零维、一维、二维、三维模型^[27]。其中,零维模型的假设条件为污染持续稳定排放、河流充分混合、河水恒定流动,仅适用于分析较小(如镇级)的水库和湖泊等,但计算较为简单,也可作为其他模型分析的初始条件。一维模型的假设条件为污染物排入河流后会立刻进行横向和纵向混合,适合河流长度远大于宽度和深度的场景——市级及以上大尺度规划(在此尺度下河流某种程度可以简化为线状形态),经典的模型及工具包括Streeter—Phelps模型、QUAL系列模型等。二维模型的假设条件为污染物会按照纵向或横向进行变化,适合县级尺度区域(在此尺度下,河流宽度开始成为影响水质变化的重要因素)或者大型湖泊、水库所在地。三维模型能够较真实地反映实际情况,适合河口、海湾等自然条件复杂且生态地位重要的特殊区域。目前,WASP、MIKE系列、EFDC、Delft等主流工具都提供二维和三维模型的动态水质分析模型工具。

3.3.3 生态多样性保护

(1) 水生生物多样性。

除了对水体进行特殊区划, 现有规划和分析还会沿水体外缘划定一定宽度的绿化空间, 其不仅便于保护水体内的生物多样性, 还兼顾水质净化、水源涵养等功能。郑段雅等人^[5]曾总结不同宽度的绿化空间对水体生物多样性的影响。而在流域理念指导下, 还要对水体内具有流域迁徙习惯(如洄游鱼类)或者特殊生存环境要求(如江豚)的重要生物进行生境分析, 并与水体蓝线及绿线划定, 大型水利基础设施、水生态治理工程布局等与规划相关内容进行挂钩等, 才能有效支撑整个流域的水生生物多样性。分析内容和技术路径可参考中国水利水电科学研究院水环境所的相关研究^[28], 如通过观测统计与水动力模型(或是主流水文模型)模拟相结合的方式, 为特定鱼类洄游、繁殖所需的水流环境和鱼类关键生境区(产卵场、索饵场、洄游通道)保护划定、蓝线水位控制等提供支撑。

(2) 陆生生物多样性。

除了对流域水生生态环境进行保护, 相关陆生生态环境保护也逐步受到重视, 同流域内陆生生物的生存繁衍与水生态环境存在密切联系。例如, 研究指出金沙江上游流域的陆生植被因流域水环境变化而出现演替趋势^[29]。在分析模型和工具选取上, 建议可参考景观生态学提出的“源地—廊道”范式分两步开展。第一步, 按照“双评价”建议, 通过物种分布模型确定重要物种分布区域, 常用的模型包括最大熵模型(MaxEnt)、生物气候分析系统模型(BIOCLIM)、生态位因子分析模型(ENFA)、分类与回归树模型(CART)等, 这些模型的基本原理较为类似, 即根据既有物种分布点位所在的地形、气候、土壤、植被等条件, 空间扩样至具有类似条件的其他“源地”地区。第二步, 按照生态网络理论和模型, 构建串联上述“源地”的廊道系统, 其中河流、旱沟等地势低平的区域正是潜在廊道主要选址对象。目前, 主流模型包括最小阻力模型和电路模型两种^[30], 前者属于栅格类模型, 其优点在

于简单直观, 缺点在于形成的单一路径会与实际存在差异, 适宜尺度较大、自然景观占主导的流域; 后者属于栅格/矢量复合模型, 优点在于考虑了网络的重叠性、更符合生物行为特征, 缺点在于对数据类型和精度要求较高, 适宜尺度偏小、自然和人工景观混合的流域。

4 结语

流域视角不能仅流于规划概念, 而是需要全面学习吸收相关的基础理论知识, 并与规划实际工作进行深度融合。本文针对国土空间规划中的生态保护分析要求, 结合具体工作场景, 尝试系统性引入与流域相关的其他学科较为成熟的理论技术、模型工具和数据成果, 构建相对完整的分析技术体系, 形成技术索引, 并由此提出建议:

一是要对应国土空间规划“五级三类”层级体系划定合适的流域单元, 并进行合理的人工/自然单元划分, 以及确定与地下水流域模型的耦合方式, 为后续一系列分析计算奠定基础。

二是统一开展大气、陆面等基础性模拟工作, 以保障流域内各区域、各专项分析之间的数据和标准统一, 并提升分析效率。由于基础模拟的模型和数据发展水平并不一致, 而在分析结果汇总时, 其整体精度将由最低分辨率的数据决定。因此, 需要尽可能补充完善降水、土壤等较低精度的模型数据。

三是除了考虑当地的生态环境特征、空间尺度等客观因素, 还应结合国土空间规划目标要求、规划师自身技术和数据积累等主观因素, 选取适宜的生态保护专项分析工具或数据, 如矢量/栅格模型、静态/动态模型、零维/一维/二维/三维模型等。

本文重点在于构建体系流程, 引入和对比各类模型、数据之间的差异, 以及探讨其相互耦合方式, 对于更具体的技术环节的研究有限。如何保持流域各

模型的整体平衡性、不同尺度的模型数据升降、不同模型之间的参数移植转化等将是下一步研究的重点。

[参考文献]

- [1] 马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统[J]. 生态学报, 1984(1): 1-9.
- [2] Griffith G E, Dmernik J M, Woods A J, 等. 生态区、集水区、流域及水文单元代码(I)——美国各机构进行水质监控的工具[J]. 水土保持科技情报, 2000(3): 27-29.
- [3] 张岚. 美国水资源普查[J]. 水利发展研究, 2010(2): 71-75. doi: 10.13928/j.cnki.wdr.2010.02.006.
- [4] 张敏纯. 澳大利亚墨累—达令流域治理的经验与启示[J]. 国外社会科学, 2022(3): 62-72, 197-198.
- [5] 郑段雅, 周星宇. 区域尺度水体保护线划定的技术方法探索与创新——基于武汉市“三线”概念的基础[J]. 规划师, 2016(6): 118-123.
- [6] 新华社. 中共中央 国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(30): 15-35.
- [7] 朱江, 詹浩, 杨箫丛. 流域治理视角下的国土空间规划探讨——以大理白族自治州国土空间规划为例[J]. 规划师, 2020(19): 34-39.
- [8] 孔凡婕, 刘文平. 流域国土空间生态修复规划编制的思考[J]. 中国土地, 2020(6): 19-22. doi: 10.13816/j.cnki.ISSN1002-9729.2020.06.06.
- [9] 葛梦莹, 高翔和, 隋玉亭. 基于小流域单元的国土空间生态修复体系探索[C]//面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集, 2021.
- [10] 王启轩, 任婕. 我国流域国土空间规划制度构建的若干探讨——基于国际经验的启示[J]. 城市规划, 2021(2): 65-72.
- [11] 刘欢, 杜军凯, 贾仰文, 等. 面向大尺度区域分布式水文模型的子流域划分方法改进[J]. 工程科学与技术, 2019(1): 36-44. doi: 10.15961/j.jsuese.201800224.
- [12] 雷晓辉, 田雨, 白薇, 等. 基于DEM的子流域划分方法改进与应用[J]. 人民黄河, 2011(2): 32-33, 36.
- [13] 杜军凯, 刘欢, 刘佳嘉, 等. 一种大尺

度复杂地形区分布式水文模型的子流域划分方法: CN108399309B[P]. 2019-02-01.

- [14] 李志强, 朱超霞, 刘贵花. SWAT 模型下基于 DEM 的水文响应单元划分——以濂水流域为例 [J]. 江西水利科技, 2017(6): 438-442.
- [15] 李曼曼, 韩会玲, 刘晓英, 等. SWAT 模型最佳子流域划分方案研究——以云南洱海流域为例 [J]. 中国农业气象, 2012(2): 185-189.
- [16] 穆宏强, 夏军, 王中根. 分布式流域水文生态模型的理论框架 [J]. 长江职工大学学报, 2001(1): 1-5.
- [17] 何红艳, 郭志华, 肖文发. 降水空间插值技术的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005(10): 1 187-1 191.
- [18] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, et al. Spatiotemporal Change and Trend Analysis of Potential Evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233, 183-194.
- [19] 赵汉斌. 第三版全球干旱指数和潜在蒸散数据库上线 [N]. 科技日报, 2022-07-21(003). doi: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2022.003863.
- [20] Liu F, Wu H, Zhao Y, et al. Mapping High Resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin,

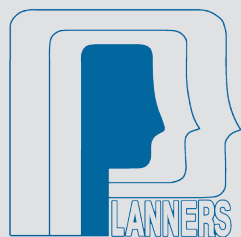
2022(3): 328-340.

- [21] 占车生, 宁理科, 邹靖, 等. 陆面水文—气候耦合模拟研究进展 [J]. 地理学报, 2018(5): 893-905.
- [22] Sven Wagner, Benjamin Fersch, Fei Yuan, et al. Fully Coupled Atmospheric-hydrological Modeling at Regional and Long-term Scales: Development, Application and Analysis of WRF-HMS[J]. Water Resources Research, 2016(4): 3 187-3 211.
- [23] Alfonso S, Giuseppe M, David J, et al. Fully Coupled Atmosphere-hydrology Simulations for the Central Mediterranean: Impact of Enhanced Hydrological Parameterization for Short and Long Time Scales[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015(4): 1 693-1 715.
- [24] Larsen M A D, Refsgaard J C, Drews M, et al. Results from a Full Coupling of the HIRHAM Regional Climate Model and the MIKE SHE Hydrological Model for a Danish Catchment[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014(11): 4 733-4 749.
- [25] 刘二华, 周广胜, 周莉. 基于文献整合的中国不同下垫面植被覆盖度遥感估算模型数据集 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2019(4): 176-184.
- [26] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述 [J]. 南水北调与水利

科技 (中英文), 2021(6): 1 041-1 071. doi: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2021.0109.

- [27] 杨新吉勒图, 尹慧燕, 韩炜宏. 水体自净能力影响因素与水质模型选择的研究综述 [J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2021(1): 21-25. doi: 10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2021.01.005.
- [28] 彭文启, 刘晓波, 王雨春, 等. 流域水环境与生态学研究回顾与展望 [J]. 水利学报, 2018(9): 1 055-1 067. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180651.
- [29] 门宝辉. 南水北调西线一期工程对调出区生物影响的初步分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2007(5): 18-21. doi: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2007.05.028.
- [30] 朱春风, 宋宏利, 张启斌, 等. 景观生态网络国内外研究进展及发展趋势 [J]. 世界生态学, 2022(2): 126-139.

[收稿日期] 2022-09-13



“规划师论坛”栏目 2023 年每期主题

- 第一期: 老年友好型社会的规划应对
- 第二期: 适应气候变化的国土空间规划应对
- 第三期: 数字国土空间规划与智慧治理
- 第四期: 现代都市圈的规划理论与实践
- 第五期: 乡村振兴与国土空间整治
- 第六期: 全域城市设计与制度创新
- 第七期: 新型智能产业发展与规划响应
- 第八期: 生态产品价值实现与生态空间规划
- 第九期: 国土空间规划实施机制与运行体系
- 第十期: 国土空间规划体系下的交通规划与管控
- 第十一期: 耕地保护长效机制与制度保障
- 第十二期: 陆海统筹空间规划与治理