引文格式：梁晓晶,权欣,周林,等. 基于本底—功能—潜力框架的国土空间生态修复分区研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 37-42. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.009

基于本底—功能—潜力框架的国土空间生态修复分区研究

梁晓晶[1]，权　欣[1]，周　林[1]，张堂基[1]，鞠鹏宇[1]
（1. 陕西华地勘察设计咨询有限公司，陕西 西安 710016）

摘　要：针对现有生态修复分区结果单一、精细化指导不足等问题，以汉中市汉台区为研究区，构建了自然资源本底—主导生态功能—生态修复潜力3个维度的生态修复分区模型。首先分析区域地形条件、流域分布、植被类型等自然资源本底，划定生态修复大区；然后基于生物多样性、水源涵养、水土保持、碳汇功能和粮食保障等生态系统服务功能评价结果，划定生态修复亚区；最后结合水土流失、农田治理、河湖湿地、生态退化、生态系统恢复力等修复潜力指标，形成生态修复单元。汉台区被划分为3个生态修复大区、5个生态修复亚区和10个生态修复单元。研究结果可为汉台区生态修复实践提供参考，为其他区域生态修复分区提供技术借鉴。

关键词：国土空间；生态修复分区；主导生态功能；生态修复潜力
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0037-06

Research on Ecological Restoration Zoning of Territorial Space Based on Background-Function-Potential Framework

LIANG Xiaojing[1], QUAN Xin[1], ZHOU Lin[1], ZHANG Tangji[1], JU Pengyu[1]
(1. Shaanxi Huadi Survey and Design Consulting Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: In view of the problems such as the single result of existing ecological restoration zoning and the lack of refined guidance, taking Hantai District in Hanzhong City as the research area, we developed a 3D ecological restoration zoning model based on natural resource background, leading ecological function, and ecological restoration potential. We analyzed the natural resource background such as the regional terrain conditions, basin distribution, and vegetation types to delimit the ecological restoration regions at first. Then, based on the evaluation results of ecosystem service functions such as biodiversity, water conservation, soil and water conservation, carbon sink function and food security, we delimited the ecological restoration sub-regions. Finally, by integrating restoration potential indicators such as soil erosion, farmland management, river and lake wetlands, ecological degradation, and ecosystem resilience, we delimited the ecological restoration units. Hantai District was divided into 3 restoration regions, 5 restoration sub-regions and 10 ecological restoration units with corresponding proposed strategies. The research result can provide reference for ecological restoration practice in Hantai District and technical reference for ecological restoration zoning in other regions.

Key words: territorial space, ecological restoration zoning, dominant ecological function, ecological restoration potential

在新时代背景下，生态保护修复是确保自然生态安全稳固、推动生态功能全面提升的关键防线和重要支撑。与传统生态修复相比，当前的生态修复举措更加注重整体性，寻求山水林田湖草沙一体化修复，强调综合性的生态修复策略，以此更有效地应对复杂的生态环境问题，实现生态系统的健康、稳定和可持续发展。目前关于国土空间生态修复分区的研究，主要聚焦于定量与定性两大分析路径，思路清晰、操作简便；但这些方法多从宏观层面进行分区，导致生态修复分区层级相对单一，且未能充分考虑特定区域环境因素的生态问题和人为因素干扰，缺乏对特定区域或问题的精细化指导。

汉台区坐落于汉江上游，不仅是国家南水北调工程的主要水源地，而且是“引汉济渭”工程的重要水源涵养地，属于秦巴山地生物多样性保护的核心区域。《汉中市国土空间生态修复规划（2021—2035年）》指出，汉台区属于秦岭低山丘陵水源涵养区和汉中盆地生态保护提升区，生态环境脆弱、水源涵养功能受到威胁，水土流失、生态退化等问题严重。基于此，本文以汉中市汉台区为研究区，从自然资源本底、主导生态功能、生态修复潜力3个维度构建生态修复分区模型，选取多种指标评价因子，基于ArcGIS空间分析功能，采用定量与定性相结合的方法划定生态修复大区、修复亚区和修复单元，以期为汉台区生态修复项

第一作者简介：梁晓晶（1995—），硕士，工程师，研究方向为国土空间生态修复规划，E-mail：382332008@qq.com。

目合理布局提供参考，为区县级生态修复分区提供理论借鉴。

1 研究区概况与数据来源

汉台区位于陕西省汉中市中部，北依秦岭、南靠巴山，是国家园林城市、国家生态农业示范区，地理坐标为33°02′~33°22′N、106°51′~107°10′E；下辖7镇8街办，总面积为549.19 km^2；南部为汉江冲积平原，中部为沟壑与山梁交错的丘陵地带，北部为秦岭山脉南坡山地；区内河流均属于汉江流域，其水系主要由汉江和褒河构成。汉江在汉台区的流域长度达27.4 km，褒河作为汉江的重要支流之一，在区内的流域长度为27 km。

本文采用的数据主要包括自然地理数据、生态基础数据、土地基础数据、经济社会数据等，具体数据信息见表1。

表1 数据来源信息

数据类型	数据名称	数据格式	来源
自然地理数据	2020年地理国情监测数据	栅格	汉中市自然资源局汉台分局
	土壤类型数据	.bil/.xls	世界土壤数据库
	碳汇数据	矢量	CMIP6
	归一化植被指数（NDVI）	.tif	Earth Data数据集
	DEM数据	栅格	地理空间数据云
	流域分级数据	矢量	Hydro SHEDS数据
	降雨量数据	栅格	Terra Climate数据集
生态基础数据	汉台区林业一张图数据	矢量	汉台区林业局
	汉台区古树名木及野生动植物调查报告	文本	汉台区林业局
	汉台区“双评价”数据	矢量	汉中市自然资源局汉台分局
土地基础数据	2020年土地利用变更调查数据	矢量、文本	汉中市自然资源局汉台分局
	第三次全国国土调查耕地资源质量分类成果	矢量、文本	汉中市自然资源局汉台分局
经济社会数据	2020年汉台区统计年鉴	文本	汉台区人民政府官网
	全国第七次人口普查统计数据	文本	汉台区人民政府官网
	2016—2020年农业农村局工作报告	文本	汉台区农业农村局

2 分区思路与方法

2.1 分区思路

国土空间生态修复以系统解决区域生态问题、有效提升生态系统功能为目标，统筹山水林田湖草沙一体化修复，通过合理划定修复分区为修复工作的有序开展提供指导。本文构建自然资源本底—主导生态功能—生态修复潜力3个维度的修复分区框架，综合考虑生态修复分区的综合性、系统性和整体性，分别选取代表性指标因子进行系统分析与评估，划定生态修复大区、修复亚区和修复单元。

2.2 分区方法

2.2.1 生态修复大区划分方法

生态修复大区重点关注区域自然本底特征，即构成生态系统的山水林田湖草沙等自然本底要素，旨在突出自然地理格局在国土空间生态修复中的基础作用。地形地貌是影响区域生态保护和社会经济发展的关键因素，能较好地反映区域在空间尺度上的变化；地表植被类型是区域的外在表征，是自然演化和人类活动双重作用下生态系统的具体形态体现。由于流域是地球内力作用下自然形成的完整单元，对于维护生态完整性至关重要，因此在修复分区划分时选取流域分布作为重要指标。本文选取地形地貌、植被类型、流域分布3个指标作为生态修复大区的分区指标。

生态修复大区作为生态修复的基础分区，需全面把握区域的自然地理格局，确保修复区域的完整性。首先依据国家相关标准，结合DEM数据对区域地形地貌进行细致分类；再结合林地、草地、灌木林等主要植被类型，对植被类型进行可视化研究；最后利用流域分割方法对区域内的流域进行划分，从而利用子流域边界划定生态修复大区。为了生态修复区域和工程便于实施和管理，将修复分区与行政村边界进行套合处理，保证一级分区与行政边界一致。

2.2.2 生态修复亚区划分方法

生态修复亚区是整个修复分区划分体系中承上启下的中观分区，主要根据区域主导生态功能进行划分。同一国土空间具有多种生态系统服务功能，识别主导生态功能并划分主导生态功能分区，可明确不同主导生态功能的空间格局，提升区域生态系统服务功能。本文充分衔接修复大区的划分、上位规划等成果，根据省级、市级国土空间生态修复规划，选取生物多样性、水源涵养、水土保持、碳汇功能和粮食保障5个指标作为生态修复亚区的分区指标。

为了较精准地评价不同区域的主导生态功能，本文运用聚类分析方法对上述5个生态系统服务功能进行综合评价，将生态特征相似的网格单元归并为同一类型。为保障研究结果的可靠性和实用性，设置多次迭代和最优聚类数量。在ArcGIS中对评价结果进行可

视化表达，最终形成基于主导生态功能的生态修复亚区。指标具体计算方法见表2。此外，为确保与一级修复分区有效衔接，二级分区边界与行政村边界保持一致，若某一区域同时存在多种主导功能，则以生态功能分布面积占比较大的为主导功能，若分布面积相近，则可对其设置两种或多种主导生态功能。

表2　主导生态功能评价方法

生态服务功能	识别方法	基本原理与方法
水源涵养	水量平衡方程	$Q=\sum_{i=1}^{j}(P_i-G_i-ET_i)A_i\times10^3$，$P_i$为降雨量，$G_i=P_i\times\alpha$，$ET_i$为蒸散发量，$A_i$为生态系统面积
水土保持	RULSE模型	采用修正土壤流失方程，$W=R\times K\times L\times U(1-N)$，$R$为降雨侵蚀性系数，$K$为土壤侵蚀性系数，$L$为坡长，$U$为坡度，$N$为植被覆盖因子，通过NDVI计算
生物多样性	InVest模型	将草地、林地、水域和未利用地定义为生境，将耕地、城镇用地、农村宅基地、其他建设用地定义为威胁源，相关参数设置参考现有研究确定
碳汇功能	观测—多模型模拟	采用NDVI数据，利用随机森林方法构建汉台区陆地植被碳和土壤碳密度的估算模型，计量2000—2020年汉台区陆地生态系统的碳密度
粮食保障	空间插值分配法	通过计算单个耕地栅格NDVI占行政单元（县、市、区）内耕地NDVI之和的比例乘该行政单元粮食总产量，得到栅格尺度上耕地的粮食产量

2.2.3　生态修复单元划分方法

生态修复单元是根据生态修复潜力确定的具体实施单元，重点关注由生态系统的自然演变和人为因素导致的生态问题。本文重点关注汉台区生态系统自然演变出现的生态问题以及人类活动影响产生的生态退化问题，选取水土流失、农田治理、河湖湿地、生态退化、生态系统恢复力5个指标作为生态修复单元的分区指标。

生态修复单元划分重点关注水土流失、农田治理、河湖湿地、生态退化、生态系统恢复力等区域生态修复潜力，对潜力计算结果进行归一化处理和分级，并利用K-means聚类分析识别不同评价单元内的生态修复潜力大小，从而划定生态修复单元。生态修复潜力指标具体计算方法见表3。

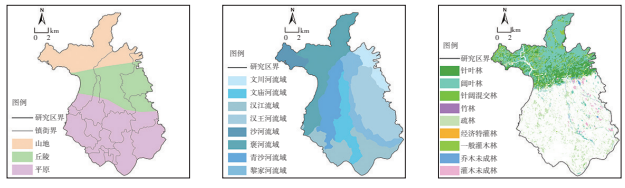
表3　生态修复潜力识别方法

潜力因子	识别方法	基本原理与方法
水土流失	水土流失评价	$D=\sqrt[4]{R\times K\times LS\times C}$，$D$为水土流失敏感性指数，$R$为降雨侵蚀力分级，$K$为土壤侵蚀分级值，$LS$为地形起伏度分级值，$C$为植被覆盖分级值
农田治理	综合指标法	根据汉台区相关单位提供的“双评价”结果，对耕地质量等别、宜耕后备资源等数据进行加权分析
河湖湿地	综合指标法	结合汉台区实际情况，由洪涝灾害风险、水质污染风险、河湖岸线生态修复工程综合加权确定
生态退化	综合指标法	识别区域中生态用地变化斑块，采用核密度差值法分析图斑的中心点，得到区域生态退化潜力分析结果
生态系统恢复力	综合指标法	选取地貌、水文、植被、生物多样性、社会经济、气候6类因子，运用熵权法计算汉台区生态系统恢复潜力

3　研究结果与分析

3.1　生态修复大区分析结果

本文按照地貌分类标准将汉台区的地貌类型划分为平原、丘陵和山地，全区地势北高南低。汉台区境内河流水系发达、河网密集，包括青沙河、汉江、褒河、文庙河等，其中汉江和褒河为主要河流。林区植被覆盖率较高，阔叶林面积最大，主要分布在北部秦岭中低山区域，为汉台区农产品的种植提供了利好条件。综合汉台区地形地貌、流域分布、植被类型（图1），利用行政村边界进行裁剪，将汉台区划分为沙河—褒河流域北部中低山生态修复区、青沙河—汉王河上游中部丘陵生态修复区和汉江流域南部平原生态修复区。



a 地形地貌　b 流域分布　c 植被类型

图1　自然资源本底分析图

审图号：陕S(2021)023号

3.2　生态修复亚区分析结果

5个生态系统服务功能的空间分布见图2。汉台区水源涵养服务呈现北多南少、山区多平原少的特点；水源涵养生态功能极重要区域主要分布在北部秦岭山区，该区域植被覆盖度较高、年降雨量大、水系资源发达、地表水资源较丰富，具有更好的生态系统水源涵养基础。汉台区水土保持生态功能极重要区域主要分布在秦岭山区河东店镇、武乡镇。秦岭山区的山体

多植被覆盖，森林郁闭度较高，且该区域山高坡陡、土层较薄，潜在的水土流失程度较高，是水土保持服务的重点区域。汉台区生物多样性保护功能呈现北高南低的趋势，主要集中在北部秦岭山区，该区域林地类型主要为乔木和灌木，优质的植被为动植物的栖息和生长提供了丰富的资源和优越的环境。碳汇功能极重要区主要分布在河东店镇、武乡镇等丘陵地区，以园地为主，汉王镇、武乡镇的幼龄林、中龄林占比较大，其固碳速率较高。粮食保障功能区域主要分布在汉台区中部平原区域，该区域地势平坦，以农田生态系统为主，也是柑橘杂果等现代特色农业发展的重点区域。

借助ArcGIS平台将5个生态系统服务功能图层进行等权重处理，综合生态修复大区和生态系统服务功能空间分布特征，提取区域主导生态功能，并对细小图斑进行融合，将汉台区划分为北部中低山水源涵养和水土保持提升区、北部中低山生物多样性保护和水源涵养提升区、中部浅山丘陵农田生态提升区、中部平川农田综合治理提升区、南部平川城市生态品质提升区5个生态修复亚区，反映了汉台区主导生态功能的地域分异规律。

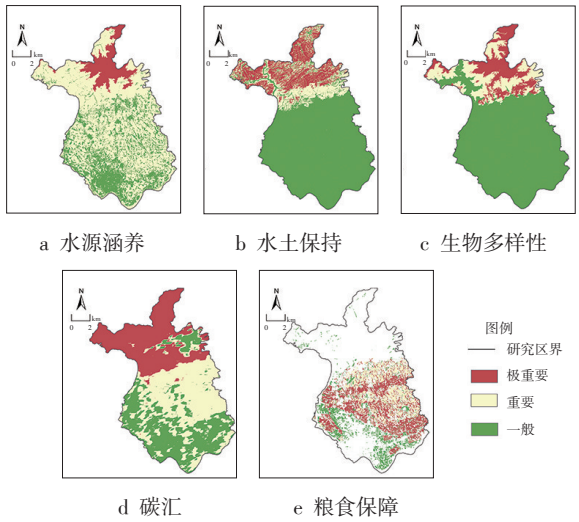


图2 主导生态功能分析图

审图号：陕S(2021)023号

3.3 生态修复单元分析结果

生态修复潜力分布见图3，水土流失修复潜力较大的区域位于河东店镇褒姒村、宗营镇杨家山村、汉王镇群干村，该区域为丘陵与山地接壤区域；农田治理修复潜力较大的区域集中在中东部浅山丘陵区域，包括武乡镇曹党村、崔营村、汉王镇白庙村等；河湖湿地修复潜力较大的区域主要位于汉江、褒河流域，包括汉王镇汉明村、汉王村、河东店镇平安村等；生态退化修复潜力较大的区域位于北部山区和中部浅山丘陵接壤区域，包括武乡镇石堰新村、汉王镇李家营村等。汉台区北部山区的生态系统恢复力较强，南部平原区域的生态系统恢复力较弱，生态系统恢复力潜力较大的区域位于东北部褒河森林自然公园和天台山森林公园。

本文以汉台区自然资源本底为基础，通过分析5大区域主导生态功能，识别5类生态修复潜力，以行政村边界和流域划分为参考，对修复单元的模型进行校核，从而保证流域单元的完整性和后续修复项目的精准落位。本文将汉台区划分为北部中低山碳汇功能和水土保持提升区、北部中低山水源涵养和生物多样性区、北部中低山水土流失防治区、中部浅山丘陵农田生态提升和水土保持提升区、中部浅山丘陵水土流失治理和农田生态提升区、中部浅山丘陵山水林田湖草综合修复区、中部平原农田综合治理和河湖湿地保护提升区、中部平原全域土地综合整治提升区、南部平原生态基础设施提升区、南部平原河湖湿地保护提升区。

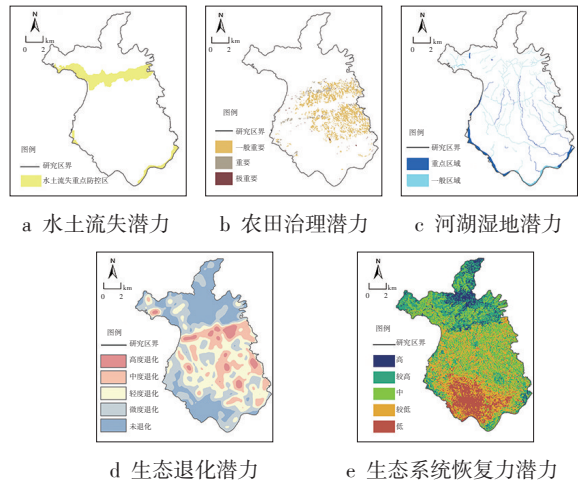


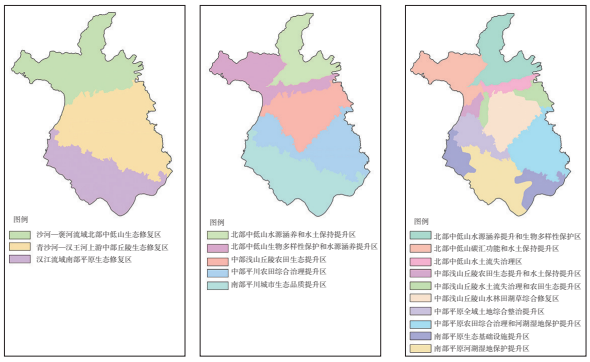
图3 生态修复潜力分析图

审图号：陕S(2021)023号

3.4 修复单元研究结果

国土空间生态修复分区为修复重点区域和工程项目布局提供了空间指引，研究制定的自然资源本底、主导生态功能、生态修复潜力3级分区明确了生态修复的研究本底、目标导向和治理对象。生态修复分区划分结果见图4。本文在修复分区划分的基础上，结合省、市级生态修复规划等相关规划成果，提出各修复单元的生态修复策略：①北部中低山碳汇功能和水土保持提升区，开展水土保持监测、生态清洁小流域建设、重要水源地的水源涵养林保护，持续巩固提升林草碳汇能力；②北部中低山水土流失防治区，以沙

河、褒河流域等上游有中大型水源地的河道为优先修复对象，按照生态清洁小流域标准防治水土流失；③北部中低山水源涵养和生物多样性区，以汉中天台山国家级森林自然公园和陕西褒河省级森林自然公园为建设中心，保护生物多样性，恢复褒河等流域退化湿地生态系统，改善多鳞白甲鱼等珍稀鱼类栖息地生境条件；④中部浅山丘陵农田生态提升和水土保持提升区，重点在宗营镇、武乡镇等地开展农田生态提升工程，加强面源污染治理和提升农田生物多样性，改善农田生态环境；⑤中部浅山丘陵水土流失治理和农田生态提升区，加强青沙河、汉王河等河湖岸线水土流失监测预防，推进流域内水土流失治理，塑造农地生态景观，维护自然山水格局，促进休闲农业和乡村旅游发展；⑥中部浅山丘陵山水林田湖草综合修复区，加大植被保护，通过退化林修复、中幼林抚育，提升林分质量，增强土壤蓄水固化能力，减少水土流失，恢复流域内水生态环境；⑦中部平原全域土地综合整治提升区，开展农村宅基地、工矿废弃地和低效闲置建设用地整理，推进园地和残次林地的整理等；⑧中部平原农田综合治理和河湖湿地保护提升区，通过实施地块归并等工程，促进高标准农田建设，提升粮食保障能力；⑨南部平原河湖湿地保护提升区，加强水生态保护修复，保护和提升汉江流域水功能，强化城区河湖空间管控与修复，促进水网的连通和循环；⑩南部平原生态基础设施提升区，推进蓝绿空间格局优化，填补绿地服务盲区，提高城市韧性水平。



a 修复大区　b 修复亚区　c 修复单元

图4　生态修复分区划分结果图

审图号：陕S(2021)023号

4　结　语

本文综合国土空间生态修复分区的相关理论和实践研究成果，以汉台区为例，构建了国土空间生态修复分区研究框架，提出了基于自然资源本底—主导生态功能—生态修复潜力的生态修复分区模型，科学选取生态修复3级分区指标，完成了汉台区生态修复分区方案，并提出了具有针对性的生态修复策略。

本文选取地形地貌、流域分布、植被类型等指标分析区域自然资源本底，进而划定生态修复大区；评价水源涵养、水土保持、生物多样性、碳汇和粮食保障等主要生态系统服务功能，识别区域主导生态功能，划定生态修复亚区；通过计算区域水土流失、农田治理、河湖湿地、生态退化、生态系统恢复力等指标，识别生态修复潜力区域，并衔接上位规划，结合行政村边界，划定生态修复单元。本文根据自然资源本底、主导生态功能、生态修复潜力等分析结果，将汉台区划分为3个生态修复大区、5个生态修复亚区、10个生态修复单元，为后续生态修复重点项目的空间落位提供清晰的思路和方向。结合相关上位规划，对10个生态修复单元提出具有针对性的修复策略。

本文构建的生态修复分区划定框架不仅突破了以往生态修复分区方法结论较单一、精细化指导不足的局限，而且解决了生态修复潜力的识别难题，实现了分区指导性与针对性的有效结合。此外，在评价生态修复潜力时，纳入了河湖湿地修复、生态退化等人类活动影响较多的指标，充分考虑了人类活动对生态修复分区结果的影响；同时纳入了碳汇功能、生态系统恢复力等指标，全方位地对生态服务功能和生态修复潜力进行分析，对指导区域生态修复工作具有重要的参考价值。本文也存在一定不足，如在生态修复潜力研究方面，仅考虑了水土保持、河湖湿地等常规生态修复潜力，而未考虑矿山地质灾害、多年生态系统功能演变规律等相对复杂的生态修复潜力，未来可考虑将其纳入本文构建的生态修复分区框架，进一步丰富生态修复分区划定的指标因子，更加精确地划定生态修复分区。

参考文献

[1] 王夏晖,何军,饶胜,等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践[J]. 环境保护,2018,46(增刊1):17-20

[2] 唐正宇,冯舒,俞露,等. 城市群国土空间生态修复区域诊断:以粤港澳大湾区为例[J]. 热带地理,2023,43(3):429-442

[3] 蔡海生,陈艺,查东平,等. 基于主导功能的国土空间生态修复分区的原理与方法[J]. 农业工程学报,2020,36(15):261-270

[4] 王鹏,赵微. 典型喀斯特地区国土空间生态修复分区研究:以贵州猫跳河流域为例[J]. 自然资源学报,2022,37(9):2403-2417

[5] 赵月帅,张秀红,范田禾,等. 西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析[J]. 地理空间信息,2024,22(2):30-33

[6] 王韵秋,胡业翠,高梦雯,等. 多维视角下广西喀斯特石漠

化地区国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报,2023,39(1):223-231
[7] 李冰姿,张慧. 国土空间规划视域下综合整治与生态修复路径的思路分析[J]. 城市建设理论研究(电子版),2023(11):34-36
[8] 张亚玲. 国土空间生态修复分区研究:以安阳市为例[D]. 郑州:河南农业大学,2022
[9] 张箫,牟雪洁,王夏晖,等. 国土空间生态修复分区研究:以海南岛为例[J]. 生态经济,2021,37(2):183-189
[10] 刘新卫,黎明,吴悠,等. 国土空间生态修复规划: 内涵体系、编制逻辑与实施路径[J]. 中国土地科学,2023,37(3):11-19
[11] 樊应凭,周寅康,韩博. 国土空间治理视角下苏南地区农用地生态修复分区[J]. 农业工程学报,2022,38(1):287-296
[12] 孙传谆,王梓辰,李景刚,等. 基于生态系统多维特征的粤港澳大湾区国土空间生态保护修复分区研究[J]. 生态学报,2023,43(5):2 061-2 073
[13] 陈媚楠. 基于生态系统服务的资源型城市生态修复分区研究:以徐州市贾汪区为例[D]. 徐州:中国矿业大学,2022
[14] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J]. 应用生态学报,2022,33(1):149-158
[15] 孟凡迪,周智,张贵军,等. 基于生态系统服务供需与生态恢复力的国土空间生态修复分区:以京津冀为例[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(9):1 496-1 510
[16] 曾晨,程轶皎,吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区:以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报,2022,37(12):3 118-3 135
[17] 杨庆媛,张浩哲,唐强. 基于适应性循环模型的重庆市国土空间生态修复分区[J]. 地理学报,2022,77(10):2 583-2 598
[18] 付扬军,师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区:以山西汾河上游为例[J]. 自然资源学报,2023,38(5):1 225-1 239
[19] 魏露露,金莲. 基于生态安全格局的国土空间生态修复分区研究:以贵州省清镇市为例[J]. 环境污染与防治,2022,44(7):966-971
[20] 何庆港. 基于主导生态功能的赣江流域国土空间生态修复分区研究[D]. 南昌:江西农业大学,2022

(上接第12页)

4 结 语

本文基于多源测量数据，提出了基于断面加密和微分插值的水下地形拟合方法，将GIS功能与程序实现相结合进行库区水下地形模拟，融合水下地形模拟结果与陆上地形生成水上水下无缝融合的库区地形成果。本文方法已成功应用于数字孪生万家寨和小浪底建设项目中，为类似的数字孪生水利项目建设提供了技术支撑和解决方案。

参考文献

[1] 刘昌军,吕娟,任明磊,等. 数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(1):47-53
[2] 魏猛,杨柳,张亭. 水陆一体化河道三维模型构建方法研究与应用[J]. 人民长江,2023,54(增刊1):68-71
[3] 黄艳,杨国俊,王勤思,等. 数字孪生三峡建设关键技术难点与解决方案[J]. 中国水利,2023(19):27-34
[4] Klosterman S, Melaas E, Wang J, et al. Fine-scale Perspectives on Landscape Phenology from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photography[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2018,248:397-407
[5] 于海洋,罗玲,杨强,等. 三维激光扫描技术在河道测量中的应用[J]. 测绘学报, 2015, 44(增刊1):49-53
[6] Lin P, Feng D, Gleason C, et al. Inversion of River Discharge from Remotely Sensed River Widths: A Critical Assessment at Three-thousand Global River Gauges[J]. Remote Sensing of Environment,2023,287:113 489
[7] 彭涛,黄会宝,高志良,等. 无人船搭载声呐设备在大岗山水下检测中的试验应用[J]. 四川水力发电,2021,40(4):13-17
[8] 方辉兵. GPS RTK在水文测量中的应用[J]. 地理空间信息,2005,3(2):23-24
[9] 刘伦华,周胜洁,夏袁菡子. 基于三维实景模型的水利工程划界确权研究[J]. 地理空间信息,2023,21(12):89-92
[10] 廖晓玉,高远,金思凡,等. 松辽流域智慧水利建设方案初探[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(2):40-43
[11] 肖婧仪,肖剑平,刘美春. 基于数字孪生的地铁隧道智能监测系统建设探讨[J]. 地理空间信息,2024,22(5):111-115
[12] 孙柏,刘旭,陶为翔,等. 基于三维地理信息的数字孪生化工园区研究[J]. 地理空间信息,2023,21(8):41-44
[13] 张明,郭亮,张蜀军,等. 耦合GIS和游戏引擎的数字孪生系统构建与实现[J]. 地理空间信息,2022,20(5):116-120
[14] 苗正红,宋宝玉,邱中军,等. GIS技术在水利水电工程设计中的应用研究综述[J]. 地理空间信息,2020,18(7):9-12
[15] 杜志彪,石晓春. 珠江水域水下地形测量中时延效应分析[J]. 地理空间信息,2018,16(8):95-96
[16] 陆凤,陈莉,朱相丞. 基于Memoryless算法的河道水下地形模型简化研究[J]. 地理空间信息,2018,16(11):113-117
[17] 李靖涵. 海底地貌自动制图综合算法研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学, 2018