

基于地表径流调控的塌陷区水体系统性保护修复

雷少刚^{1,2}, 徐侯璠¹, 张 免¹, 陈东兴², 华 夏², 郭 栋²

(1. 1 矿山生态修复教育部工程研究中心, 中国矿业大学, 江苏徐州 221116; 2. 山东省采煤塌陷地和采空区治理工程研究中心, 山东济宁, 272000)

摘要: 为解决东部高潜水位矿区地表径流紊乱、水体连通性差、水动力水循环能力弱等问题, 并降低大量塌陷区水体周边的农业、工矿生产空间形成的面源污染、点源污染随地表径流进入塌陷区水体, 引起水质退化与水生态环境风险, 促进采煤塌陷区水体的持续性保护修复和塌陷区生态系统健康, 基于山水林田湖草沙系统性保护修复理念、关键部位景观格局优化和地表径流系统性调控原理, 创新性提出了一种“连通+截污”相组合的塌陷区水体系统性保护修复新技术, 主要技术内容包括: 基于高精度 DEM 的地表径流网络分析、各类水体识别及其水面高程精准监测、水体连通廊道网络构建及水动力提升效果评价、水体植被缓冲带适宜范围计算、缺失植被缓冲带空间识别、水体保护修复效果评价等技术环节。以山东兗州矿区为例, 开展了基于地表径流调控的塌陷区水体系统性保护修复技术应用模拟分析, 研究结果表明: ①通过在关键部位修建水体连通廊道, 基于水体连通的水动力提升技术, 有效连通了 45 个生态源地, 连通后研究区东-西方向上的最大连通距离增加了 5 倍, 流域整体的连通性得到提升, 廊道内平均水速达到 0.067 m/s, 显著改善了矿区的水动力条件; ②通过基于关键部位植被缓冲带空间优化布局的污染物截留技术, 以水体连通廊道和生态源地为关键区域, 利用 Phillips 水文模型计算得出兗州矿区所需的植被缓冲带宽度主要集中在 15~35 m 之间, 面积总计为 5.59 km², 其中已有植被覆盖的面积为 18 km², 缺失待建设的植被缓冲带面积 41 km²; ③SWAT 情景模拟分析结果进一步验证了该模式对矿区水体保护修复具有明显作用, 通过该模式能够至少降低 10.14%~15.5% 的污染, 且对磷元素的去除效果尤为显著。笔者提出的煤矿塌陷区系统性保护修复技术是景观生态学与生态水文学在矿区生态保护修复的典型结合应用, 对于其他类型地区通过地表径流调控实现区域系统性保护修复具有重要参考价值。

关键词: 系统修复; 地表径流; 水体连通; 景观格局; 水生态修复。

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1220-11

Systematic protection and restoration of water bodies in collapse areas based on surface runoff regulation

LEI Shaogang^{1,2}, XU Yufan¹, ZHANG Mian¹, CHEN Dongxing², HUA Xia², GUO Dong²

(1. Mining Ecological Restoration Engineering Research Center of the Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shandong Province Coal Mining Subsidence Land and goaf Management Engineering Research Center, Jining 272000, China)

Abstract: In order to solve the problems of surface runoff disorder, poor water connectivity, and weak hydrodynamic water circulation capacity in high groundwater level mining areas in the east, and to reduce the non-point source pollution and

收稿日期: 2024-12-01 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH24.1498

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3804205)

作者简介: 雷少刚(1981—), 男, 四川南部人, 教授, 博士生导师。Email:lsgang@126.com

引用格式: 雷少刚, 徐侯璠, 张免, 等. 基于地表径流调控的塌陷区水体系统性保护修复[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1220-1230.

LEI Shaogang, XU Yufan, ZHANG Mian, et al. Systematic protection and restoration of water bodies in collapse areas based on surface runoff regulation[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1220-1230.



移动阅读

point source pollution caused by agricultural and industrial production spaces around a large number of collapsed water bodies entering the water bodies of collapsed areas through surface runoff, which leads to water quality degradation and water ecological environment risks, this paper innovatively proposes a new technology for the systematic protection and restoration of water bodies in coal mining collapsed areas and the health of the ecological system in collapsed areas through a systematic protection and restoration approach. Based on the concept of systematic protection and restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasses, and sands, the optimization of landscape patterns in key areas, and the principle of systematic regulation of surface runoff, a new technology for the systematic protection and restoration of water bodies in collapsed areas combining "connectivity+pollution interception" is proposed. The main technical contents include: Analysis of surface runoff network using precision DEM Various water body identification and precise monitoring of water surface elevation, construction of water connected corridor network and evaluation of hydrodynamic enhancement effect, calculation of suitable range of water vegetation buffer zone, spatial identification of missing vegetation buffer zone, evaluation of water protection and restoration effect, and other technical aspects. This article takes the Yanzhou mining area in Shandong Province as an example to conduct simulation analysis on the application of systematic protection and restoration technology for collapsed water bodies based on surface runoff regulation. The results show that: ① by building water connection corridors at key locations and using hydrodynamic enhancement technology based on water connection, 45 ecological source areas were effectively connected. After connection, the maximum connection distance from east to west in the study area increased by 5 times, and the overall connectivity of the watershed was improved. The average water velocity in the corridors reached 0.067 m/s, significantly improving the hydrodynamic conditions in the mining area; ② By using the pollutant interception technology based on the spatial optimization layout of vegetation buffer zones in key areas, with water connected corridors and ecological source areas as key areas, the Phillips hydrological model was used to calculate that the required vegetation buffer zone width in the Yanzhou mining area is mainly concentrated between 15~35 m, with a total area of 5.59 km², of which 18 km² is already covered by vegetation and 41 km² is missing vegetation buffer zone to be constructed; ③ The results of SWAT scenario simulation analysis further verified that the model has a significant effect on the protection and restoration of water bodies in mining areas. Through this model, pollution can be reduced by at least 10.14%~15.5%, and the removal effect of phosphorus element is particularly significant. The systematic protection and restoration technology proposed in this article for coal mine subsidence areas is a typical combination of landscape ecology and ecological hydrology in the ecological protection and restoration of mining areas. It has important reference value for other types of areas to achieve regional systematic protection and restoration through surface runoff regulation.

Key words: system restoration; surface runoff; water connectivity; landscape pattern; water ecological restoration

东部高潜水矿区采煤塌陷后地表易形成大量塌陷积水区,造成耕地减产绝产、建(构)筑物损坏、土壤养分流失、生态环境恶化等一系列问题^[1,2]。相关统计表明^[3],东部高潜水位矿区的塌陷积水率高达20%~40%,常年积水区面积约为2 000 km²。山东、徐州、两淮等东部高潜水位矿区是典型的煤粮复合区,采后矿区原有地表水系被破坏,受农业面源污染等影响,地表水体易受污染,矿区生态功能退化^[4]。

东部高潜水位矿区塌陷区水体与湖泊、河流等自然水体在形成原因以及地表径流规律方面具有较显著的区别,主要体现在以下几个方面:①从形成原因方面看,当地表下沉量超过潜水位时形成地表积水^[5],塌陷区地表积水的形成主要与矿区的地表下沉量、潜水位密切相关。②从水体污染风险来看,塌陷

积水区是塌陷盆地地势较深的区域或挖深垫浅治理后的区域,积水区周边也同样受到了下沉影响,产生了附加坡度,在坡度的影响下周边地表径流更容易汇入塌陷积水区;因此,塌陷区水体附近农田、厂矿、道路等产生的点、线、面源污染容易随地表径流汇入塌陷积水区,导致水体污染风险增大^[6],尤其是水体周边农田的面源污染极易引起水体富营养化。③从与其他水体的连通关系来看,塌陷积水区四周很难像湖泊、河流等自然水体具有较好的连通性、水动力和水循环条件;塌陷积水区往往是独立分布的,主要与地下水联通,属于半封闭水体,水动力、水循环条件差,因此塌陷区水体极易水质退化。④塌陷积水区多是由陆地生态系统转变为次生湿地生态系统,塌陷积水区水生植物多样性不健全,水体生态链缺失,塌陷区水生

态系统难以自我稳定维持,需要人为干预。因此,采煤塌陷积水区的水质、水生态系统的长效保护修复是东部高潜水位矿区面临的主要生态环境问题和生态修复的关键任务之一,对矿区社会经济环境的可持续发展具有重要现实意义。

传统的采煤塌陷积水区治理工程以恢复利用为导向,形成了常年积水区养殖、季节性积水区种植、砾石、粉煤灰充填塌陷地等多种修复方式^[7]。局部原位的水体修复工程具有见效快,但存在过度人工修复、修复成本高、系统性修复不足,尤其是后期持续维护等问题,难以解决东部高潜水位矿区水质退化问题。近年来,“绿水青山就是金山银山”的发展理念深入人心,习近平总书记提出“山水林田湖草沙”是一个生命共同体,要求生态文明建设过程中要实行整体保护、系统修复、综合治理。因此,亟需掌握采煤塌陷区水体与周边生产空间与生活空间之间的生态关系,研究塌陷区水体系统性保护修复的原理与关键技术。

基于上述背景,笔者以位于东部高潜水位矿区的

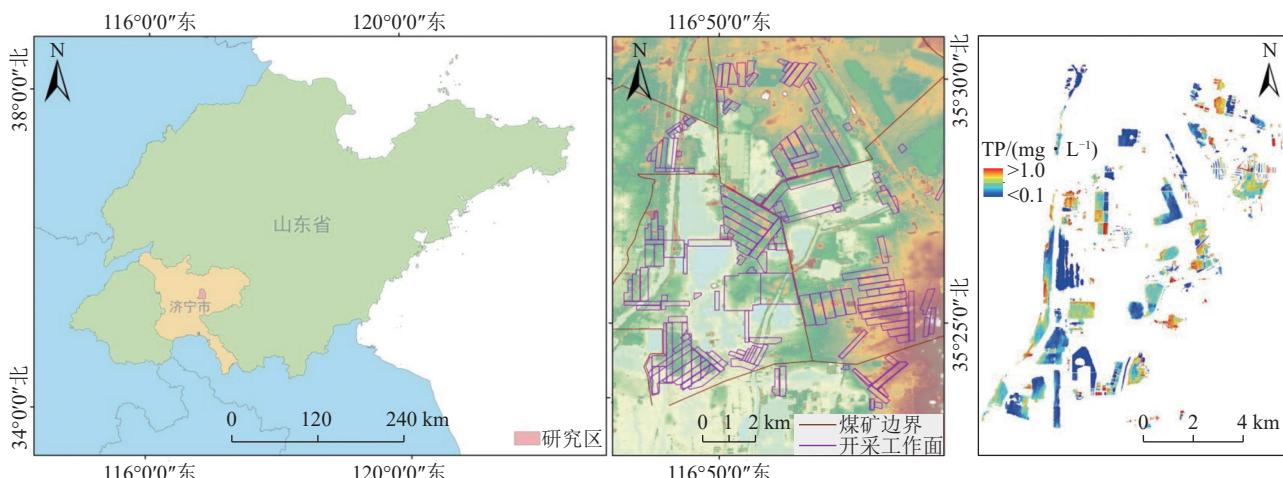


图1 研究区内煤炭开采的工作面分布(中)与塌陷区水体总磷情况(右)

Fig.1 Geographical Location of the Study Area and Distribution of Coal Mining Faces within the Area

矿区境内有泗河、洸府河、白马河和南泉河等重要水系流经,其余水体主要是采煤塌陷积水区。受农业用地和厂矿等污染源的影响,塌陷区水体水质一般,且矿区部分水体水质甚至超过V类水质标准,如图1所示的橙色与红色区域。地表径流模拟分析表明,研究区地表径流比较紊乱,受到耕地和道路的影响,地表径流主要沿着田坎和道路两侧流动,并呈现网格状分布。从径流方向上看,自然河流和北部潜在的地表径流均自北向南流动,而中部及东南部地区的径流方式主要是自陆地流向塌陷积水区。

1.2 数据来源与处理

土地利用数据通过对2021年6月4日的GF-1 PMS影像进行监督分类后得到,在满足Kappa系数大

山东兗州矿区为例,采用系统性思维,以矿区所在小流域为治理范围,分析小流域内各生态单元之间的地表径流与水循环条件,统筹调控塌陷区水生态空间、农业生产空间之间的关系过程,连通塌陷区水体与邻近水体以提升水动力,并与水体周边植被缓冲带识别及构建相结合,形成了一种“连通+截污”相组合的塌陷区水体系统性保护修复技术模式,以促进采煤塌陷区水体水质的系统性持续性保护修复,实现塌陷区水生态系统的健康维持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

兗州矿区位于山东省济宁市,地理坐标为 $116^{\circ}46'58.8''$ — $116^{\circ}54'46.8''$ E, $35^{\circ}23'30.48''$ — $35^{\circ}30'54''$ N为其地理坐标,矿区内的平均海拔为49 m,平均坡降为1/1 500。兗州矿区共有13座煤矿,煤炭年生产量达到2 760万t,如图1所示。研究区总面积116.61 km²,塌陷区水体面积超过13 km²。

116°50'0"E

35°25'0"N

116°50'0"E

35°30'0"N

116°50'0"E

35°25'0"N

116°50'0"E

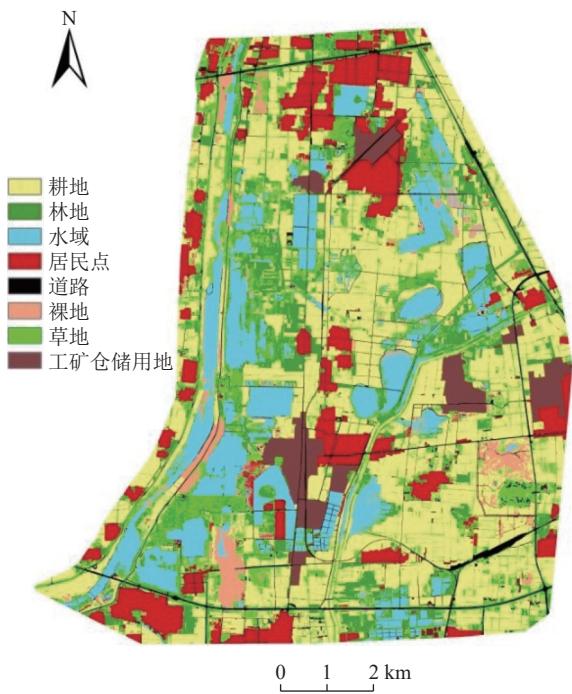


图2 研究区的土地利用类型

Fig.2 Land use types in the study area

量农业生产空间引起的面源污染等显著特点,本文提出了基于地表径流调控的塌陷区水体系统性保护修复技术模式,其主要技术原理过程如图3所示。该模式结合了2项关键技术:①在识别区域水体分布及其水位面高程的基础上,形成基于水体连通的水动力提升技术,即利用矿区各水体之间的水位面高程差特点,通过修建水体连通廊道,提升塌陷区水体的连通性与自然循环过程,进而提升水动力,促进水体循环流动自净;②基于塌陷区水体周边植被缓冲带布局的流动污染物截留技术,即针对塌陷积水区地势较低,且受附加坡度影响,采矿污染、农业废水、生活污水等更容易汇聚至积水区的问题,采用景观格局优化调控污染流的原理,分析地表径流和污染流的路径,通过在关键部位构建水体植被缓冲带,以有效阻断污染物直接流入水体,降低水体污染风险。

2.2 基于水体连通的水动力提升

1) 水体分布识别与水面高程监测

根据得到的矿区土地利用类型栅格分布图,获取塌陷区水体边界的矢量数据,并依据徐俣璠(2024)

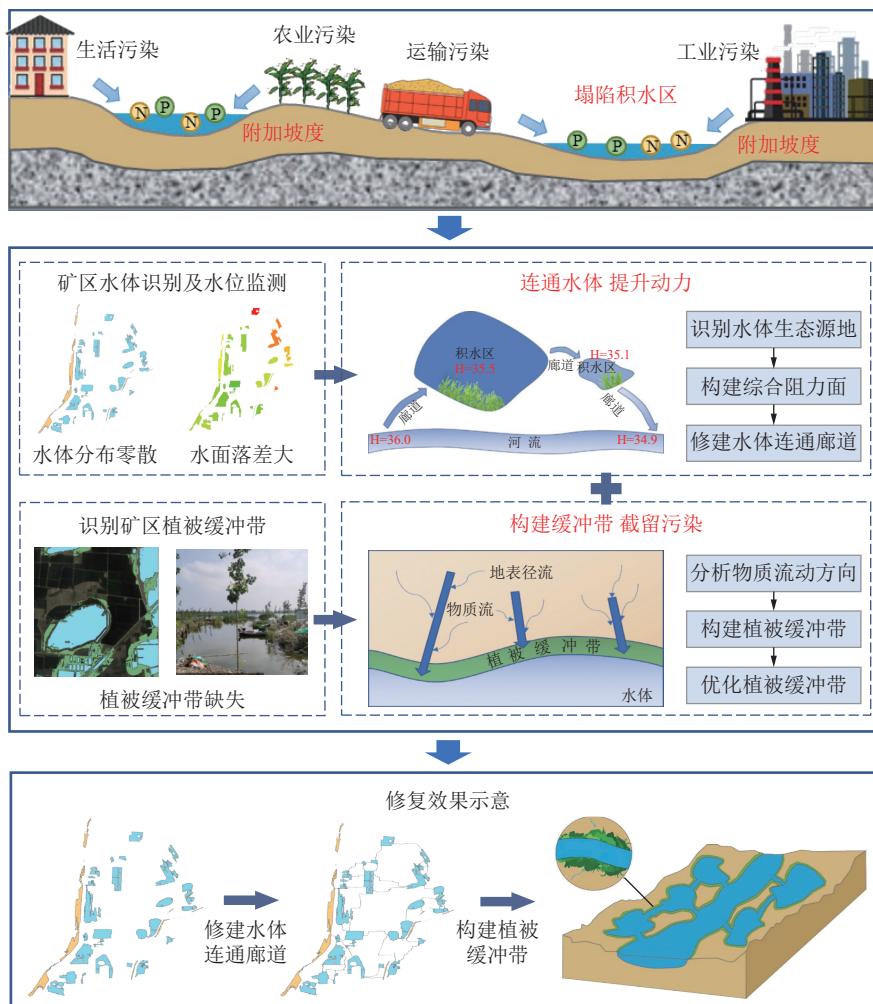


图3 矿区塌陷区水体水质保护与修复技术原理

Fig.3 Flow chart of water quality protection and restoration mode in high-diving mining area

等^[8]提出的基于多源卫星观测的地表水体水面高程监测方法,利用ICESat-2和GEDI数据识别矿区内部自然水体和塌陷区水体的水面高程,为后续的水体连通提供基础数据。

2) 小流域尺度水体连通及廊道识别

本研究将对周围区域地表径流的连通具有重要辐射功能的水体斑块作为生态源地,其可在维持地表径流的稳定性、提高区域水质等方面发挥重要作用。在生态源地选取时,将兖州矿区的河流和塌陷区水体作为前景数据,基于形态学空间格局分析法(Morpho-

logical Spatial Pattern Analysis, MSPA)^[9],得到互不重叠的7类景观要素,并选取景观相合概率(LCP)、整体连通性指数(IIC)和可能连通性指数(PC)3个指标值较高的核心斑块作为生态源地。

阻力面反映了在矿区的不同区域修建水体连通廊道时受到的阻碍程度。本文参考已有研究并结合兖州矿区的自然地理特征,选取土地利用类型、土壤类型、高程、坡度和水面高程5个因子构建阻力面;对阻力值进行分级赋值后(表1),利用主成分分析法(SCPA)^[10]计算得到不同阻力因子的权重。

表1 兖州矿区生态阻力因子等级划分

Table 1 Classification of Ecological Resistance Factors in Yanzhou Mining Area

阻力因子	阻力值					权重
	1	3	5	7	9	
土地利用类型	水体	林地、草地、	裸地、耕地	道路	居民点、工矿仓储用地	0.35
土壤类型	潮土	石灰性砂姜	潮棕壤	潮褐土	—	0.19
高程/m	<33	33~37	37~42	42~56	>56	0.15
坡度/°	<3	3~8	8~16	16~33	>33	0.24
水面高程/m	29.71~31.09	31.09~32.00	32.00~32.83	32.83~34.00	34.00~36.33	0.07

水体连通廊道是水体生态源地间物质交换、能量流动和信息传递的通道。本研究基于最小阻力模型(MCR)^[11]识别兖州矿区潜在的水体连通廊道,若累积阻力值较小,则表示该廊道修建可能性越大。

2.3 基于水体植被缓冲带的污染物截留

1) 植被缓冲带地表径流调控的原理

采煤塌陷造成了积水区地势低于其周边地区,因此塌陷积水区往往是周边地表径流和污染流的汇集

区。农田作为面源污染的“源”与林草作为的“汇”处于不同空间配置方式时会对水体产生不同的影响。若“源”与水体之间存在“汇”,则会有效减少污染物进入水体的风险;若“源”与水体直接相邻,则会大大增加水体受到污染的风险。因此,需要在地表径流的关键区域布设植被缓冲带,以有效阻截地表污染流直接进行水体(图4),以改善矿区水生态空间与农业生产空间之间的生态关系。

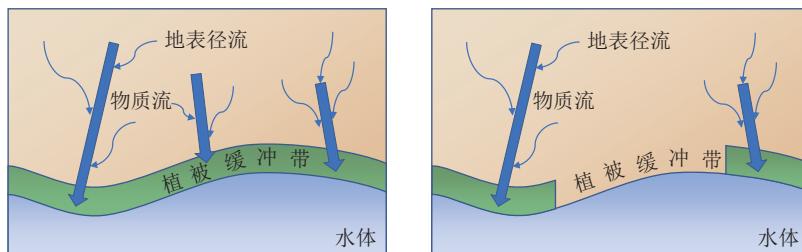


图4 不同地表径流条件下的植被缓冲带布设方法

Fig.4 Different methods for constructing ecological buffer zones

2) 水体植被缓冲带识别与布局

水体植被缓冲带可以视作受陆域和水域生态系统共同影响的生态交错带,具有缓洪护岸、截污净化、保护生物多样性等功能^[12]。本研究基于Phillips水文模型^[13]在水体生态源地、水体连通廊道等关键区域构建水体植被缓冲带,其计算公式如下:

$$\frac{T_b}{T_r} = \frac{B_b}{B_r} = (n_b/n_r)^{0.6} (L_b/L_r)^2 (K_b/K_r)^{0.4} (s_b/s_r)^{-0.7} (C_b/C_r)$$

式中: b、r 分别代表规划的和参考的水体植被缓冲带的相关变量; T_b/T_r 为坡面漫流与地下漫流中污染物在规划水体植被缓冲带与参考水体植被缓冲带的滞留时间之比; B_b/B_r 为规划水体植被缓冲带与参考水体植被缓冲带的除污效率之比; n 为地表曼宁系数; L 为水体植被缓冲带宽度, m; K 为饱和导水率, cm h^{-1} ; S 为坡度, %; C 为土壤储水能力, cm。

利用无人机获取的兖州矿区高程图作为坡度数

据的信息来源;曼宁粗糙系数参考了ENGMAN、PRAKASH等人^[14]对不同土地覆被类型与曼宁系数的总结,并综合考虑了SWMMH模型在用户手册中推荐的地表条件漫流对应的曼宁系数值;土壤保水率和土壤储水能力这2个参数使用山东省1:100万土壤类型分布数据(来自国家地球系统科学数据共享平台)进行计算;水体植被缓冲带参数取自研究区立地条件的平均值,并结合了XIANG^[15]在美国北卡罗来纳州获取的植被缓冲带野外观测数据,见表2。

表2 兖州矿区参考的水体植被缓冲带参数

Table 2 Parameters of reference riparian vegetation buffer zone in Yanzhou mining area

模型参数	美国北卡罗来纳州参考 河岸植被缓冲带	研究区参考水体 植被缓冲带
坡度S/%	6	3.3
曼宁系数/n	0.41	0.189
土壤储水能力C/cm	17.07	34.54
土壤饱和导水率K/cm h ⁻¹	3.30	0.42
水体植被缓冲带宽度L/m	36.27	39.41

2.4 水动力提升效果评估

水体的连通性是影响水体动力的重要因素,连通的水体可以促进水体在不同地区之间自由流动,增加水体的动力和流速。因此,本研究利用地统计学连通性函数^[16]和曼宁方程^[17],分别计算修建水体连通廊道前后矿区水体的连通距离以及廊道内水体的流速,用以表征流域内水动力的提升效果。其中,水体连通廊道内水体流速的计算公式为

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

式中:v为水流速度, m·s⁻¹; n为地表曼宁系数; R为水力半径, m; S为水力梯度。

2.5 水质提升效果评估

本研究使用土壤和水资源评估工具(Soil Water and Assessment Tools, SWAT)^[18]对修建水体连通廊道和水体植被缓冲带前后兖州矿区的水质进行情景模拟,用以量化分析实施“连通+截污”相组合的塌陷区水体系统性保护修复新模式对水体污染的改善程度。实验设置了3类模拟情景:①初始情景,即为未采取任何调控措施的土地利用现状;②连通水体与草地水体缓冲带结合的情景(情景二),该情景下,维持已有植被覆盖的水体缓冲带原状,而将其余区域的水体缓冲带类型设置为草地;③连通水体与林地水体缓冲带结合的情景(情景三),即将情景二中的草地替换为林地。

3 结果与分析

3.1 水体连通结果

通过MSPA方法分析,共提取了45块水体生态源地,如图5a所示。整体而言,研究区的生态源地分布不均,多数源地集中分布在2条河流之间,呈现东部多、西部少的空间格局,各源地间连通性较低。

基于SPCA选取累积贡献率大于95%的变量作为主成分,计算得到5类阻力因子的权重值后,将各阻力面按权重值叠加获得水体连通廊道构建的综合阻力面,如图5c所示。结果表明,研究区北部多为城镇和建设开发类用地,从经济适宜性角度出发,在该区域修建水体连通廊道的成本较高,因而阻力值较大;与之相比,研究区西南侧和河流沿岸的整体阻力值较小,适合建立水体连通廊道。

使用Linkage Mapper工具箱识别出兖州矿区潜在的水体连通廊道共计94条。经统计,廊道的总长度达到4.22 km,平均长度约0.45 km,通过筛选后得到兖州矿区的水体连通廊道80条,兖州矿区水体连通结果如图5d所示,研究区内廊道空间分布差异明显,东西两侧分布的廊道数量较多,且以短距离廊道为主;而西部与东部之间的连通距离较长,廊道数量较少。

采用地统计学连通函数对修建水体连通廊道前后的矿区水体进行连通性评价,量化分析水体连通工程的应用效果。结果显示,在水体连通廊道建设前,东-西方向的最大连通距离约为1.4 km,南-北方向的最大连通距离约为7 km,是东-西方向的6倍。实施水系连通方案后,东-西方向的最大连通距离增至7.0 km,较建设前延长了5倍,南-北方向的最小连通性函数大于0.99。这表明水体连通廊道能够有效地连通兖州矿区零散分布的主要水体,提高了矿区小流域地表径流的连通性,优化研究区的水体生态网络。

3.2 水动力提升结果

基于曼宁方程的计算结果得到80条水体连通廊道内的水体流速数据,如图6所示。统计结果显示,兖州矿区廊道内部的水体流速平均值为0.067 m/s,最快可达到0.142 m/s,表明水体连通后促进了塌陷区水体的水流循环速度,改变了原有的水动力条件。此外,由于研究区整体自然地势差异也较大,矿区内部水体的水面高程值在29.83~35.86 m的范围内,南北落差可达6.03 m,这种地势差为区内各类水体流动提供了天然动力条件。因此,有效利用自然地势以及塌陷区水体水位面高差,合理连通主要水体的措施能整体提升矿区各类水体的流动条件,增强区内地表水体的自

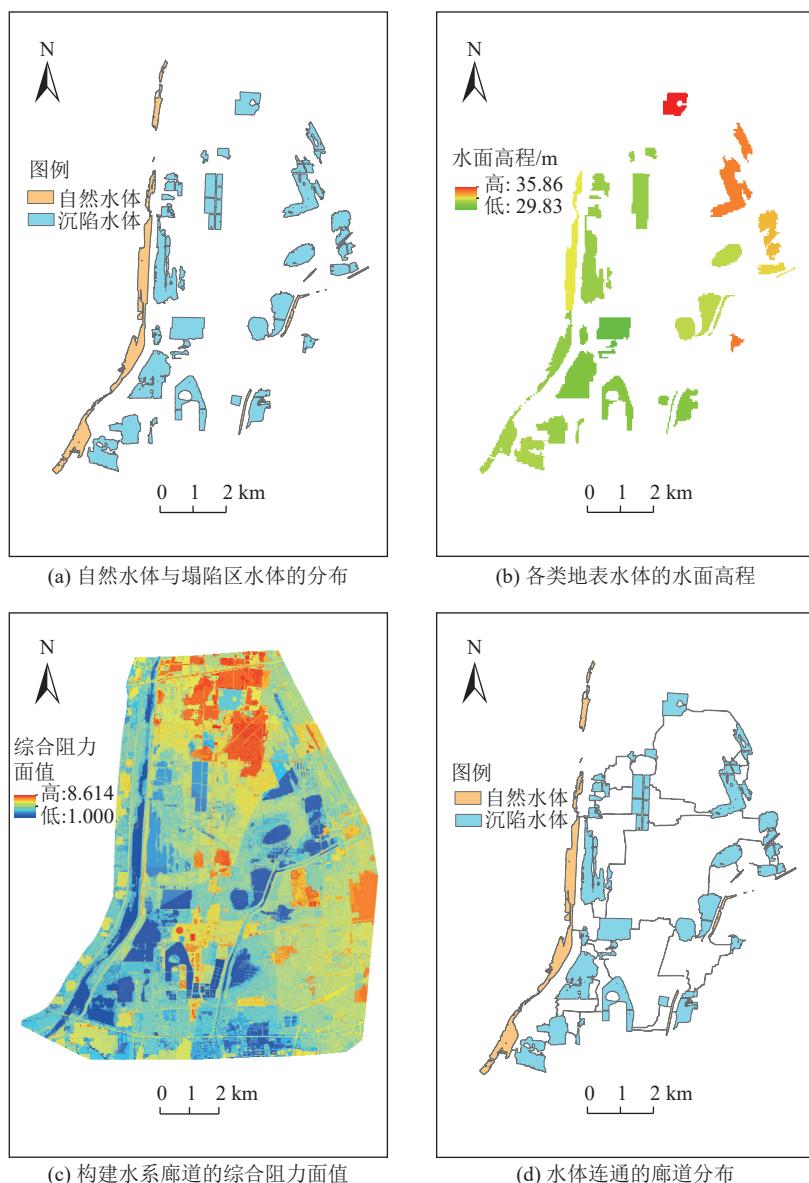


图 5 塌陷区水体和水面高程识别及连通性分析结果

Fig.5 Identification and connectivity analysis results of subsidence water bodies and water surface elevations

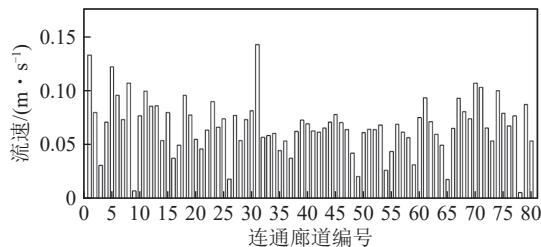


图 6 水体连通廊道内的水体流速

Fig.6 Water flow velocity in the connected corridor of the water system

净能力。

3.3 水体植被缓冲带的模拟计算结果

利用 Phillips 水文模型计算得到兖州矿区的水体植被缓冲带宽度集中分布在 15~35 m, 最窄为 6 m 左右, 最宽能够达到 64 m, 这表明不同用地类型所需的

植被缓冲带的宽度存在较大差异。图 7a 表明了兖州矿区的植被缓冲带模拟计算结果, 不同区位的缓冲带配置差别较大; 部分水体现存缓冲带条件较差, 缺乏必要的植被缓冲带或植被分布的破碎化程度较高(图 7b)的问题, 该地区主要为农业用地或废弃地, 缺乏截留植被缓冲带污染物易直接进入水体; 然而, 部分区域的植被覆盖良好(图 7c), 能够充分发挥拦截径流、去除污染物的作用, 因此需要对其进行重点保护。经统计, 兖州矿区共需要水体植被缓冲带 5.59 km², 其中现存植被面积 18 km², 占总体的 39%, 待补建设面积为 41 km²。

3.4 植被缓冲带水质提升效果

采用 SWAT 模型模拟, 得到 3 种情景下研究区的总氮(TN)、总磷(TP)负荷的空间分布, 如图 8 所示。

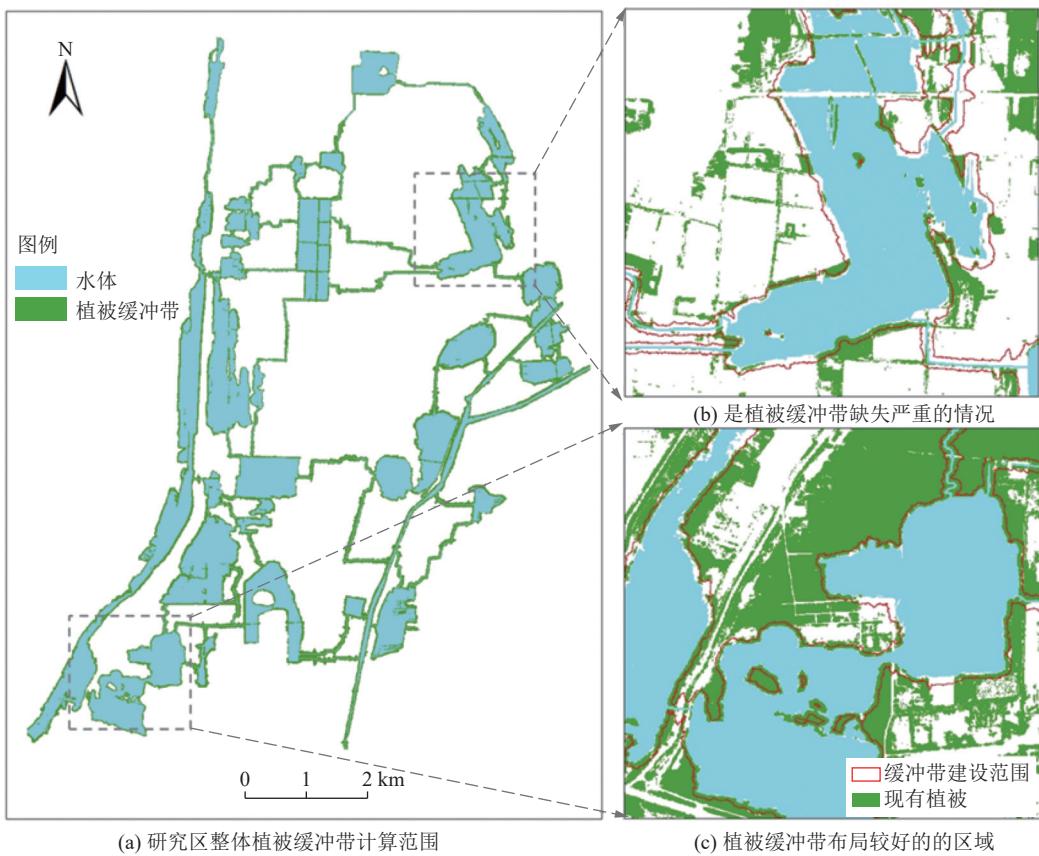


图 7 水体植被缓冲带计算结果范围及待建设区域

Fig.7 Calculation range of vegetation buffer zone in water bodies and areas to be constructed

对比分析表明,不同情景下污染物浓度最高的区域均位于白马河东部,主要是由于该区域的耕地面积占比比较大,造成的氮、磷污染浓度较高;泗河与白马河之间的塌陷积水区污染物浓度较低,这与积水区附近耕地和居民点较少有关;从空间分布上看,总氮和总磷的分布具有一定的相似性。

根据不同情景下总氮、总磷含量的统计结果,定量分析了地表径流调控措施对污染物的削减效果,见表3。经分析,地表径流调控措施至少能够削减10.14%的污染,且对磷污染的治理效果更优,这表明本研究提出的塌陷区水体保护修复新模式能够有效地改善矿区地表水体水质。

4 讨 论

1) 合理选取阻力因子和确定阻力值是科学规划水体连通廊道的前提^[19]。然而,目前学界对阻力面的构建方法以及阻力值的权重和阈值设置尚未有统一的标准,通常情况下需要根据已有研究和研究区的地理环境条件来进行调整^[20]。例如,潘彬等^[21]在选择阻力因子时考虑了自身因素如坡度、土地利用类型和植被覆盖度,以及干扰因素如距离公路、居民点和水域的距离,并通过主观的方法来确定阻力因子的权重值,

构建了矿区生态网络的阻力面;而王琦等^[22]选取了高程、坡度、土壤侵蚀等11个阻力因子,并采用了客观的主成份分析方法来计算这些因子的权重。阻力面的构建对廊道识别结果具有重要影响,因此,在后续研究中应该综合考虑主观和客观的方法,尤其是现实土地利用用途限制的实际情况,建立阻力面构建的标准流程,并提供阻力因子选择和阻力值确定的参考指南,以避免人为因素导致廊道划分不科学情况的发生。

2) 通常地表径流、污染流并不是均匀的从四周汇入水体,而是受到地形地势、用地类型、人类活动等因素的影响而发生变化,地表径流输入较少的部分水体植被缓冲带在拦污截流方面的作用自然较小。因此,为了节约建设成本,可以减少或取消无污染径流汇入地区的植被缓冲带,并增强有污染流汇入地区的缓冲带宽度,如图4所示。此外,各种研究结果表明^[1,23],植被缓冲带的阻污效率受多种因素影响,包括缓冲带植物的配置与选择、研究区地理条件、气候和植被生长阶段等。因此,植被缓冲带的建设需要根据实际情况科学确定设计参数。

3) 由于连通后的矿区水系结构复杂,现有水动力模拟软件难以有效计算矿区整体水动力的提升效果。

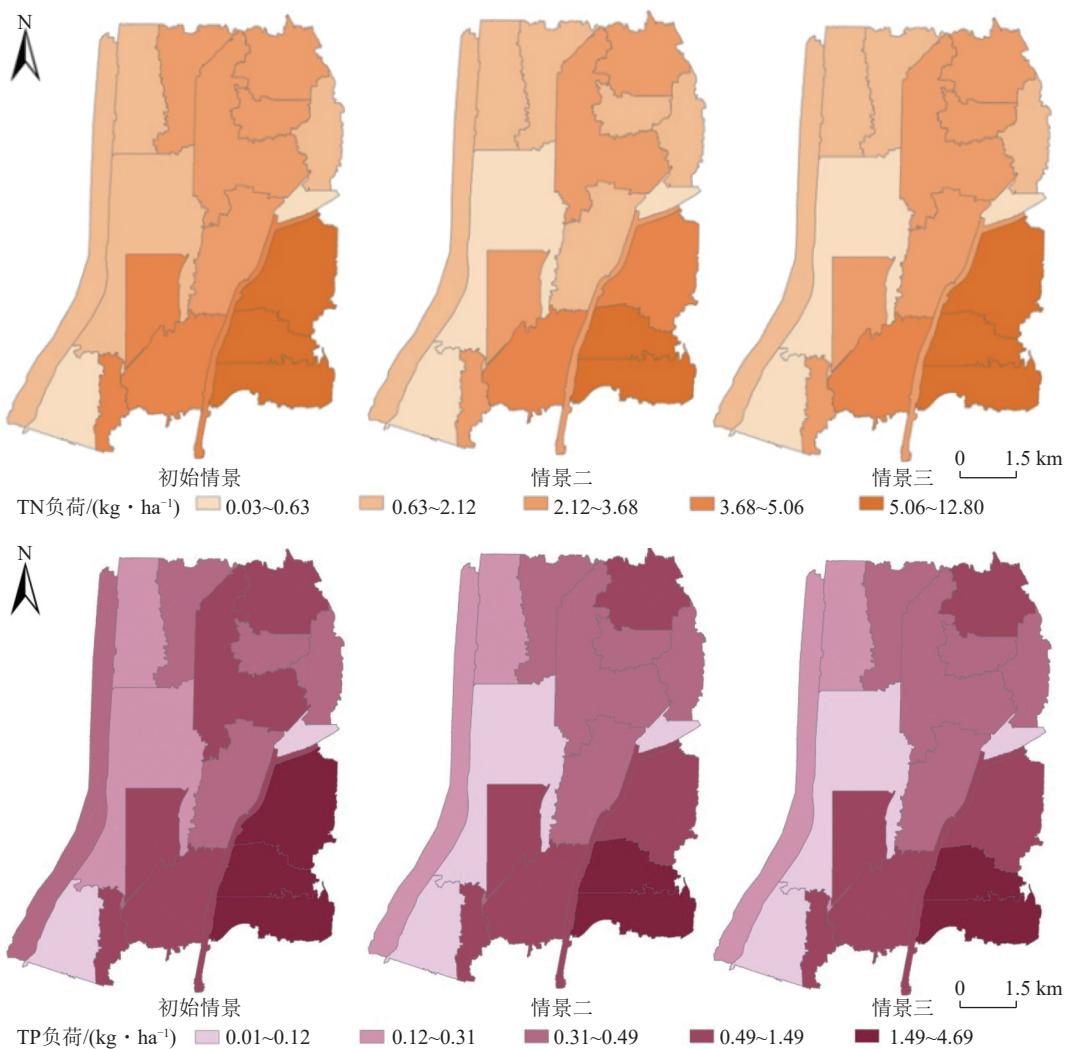


图 8 3 种模拟情境下的 TN、TP 负荷空间分布

Fig.8 Spatial distribution of TN and TP loads under different simulation scenarios

表 3 水体植被缓冲带构建对 TN、TP 的削减效果

Table 3 Reduction effect of riparian vegetation buffer zone on TN and TP

水质指标	情景/kg	情景二/kg	削减率/%	情景三/kg	削减率/%
TN	228.67	19 541.68	14.41	20 517.80	10.14
TP	6 198.21	5 237.59	15.50	55.34	10.90

因此,采用廊道内水流速度作为矿区水动力改善的表征指标。然而,该方法仍存在一定局限性,未来研究应致力于构建一种适用于矿区水系的水动力快速表征计算方法,以便更加全面、精准地评估矿区水动力提升效果。受限于 SWAT 模型的计算原理,无法全面反映修建水体连通廊道后水动力提升对矿区水质污染改善的实际效果。因此,基于该模型的情景模拟结果在一定程度上低估了本方法的水质改善程度。也就是说采用本文提出的“连通+截留”保护修复模式带来的水质提升效果将优于表 3 的结果值。

4) 在本研究中,通过对缺失的 41 km² 关键植被缓冲带建设,可使 116 km² 的范围内水体至少降低

10.14% 的水体污染。这充分体现了基于景观格局优化原理的系统性保护修复模式的优势。采煤塌陷区水体水质的保护修复不能仅靠连通提升水动力和植被缓冲带截留污染 2 种空间优化修复手段,还需进一步在局地尺度采用水下森林、生态浮岛、湿地生态链构建等生态修复手段,多尺度协同实现塌陷区水生态系统的持续性保护修复。

5 结 论

1) 由于受长期大范围开采沉陷影响,矿区地表径流紊乱,塌陷区水体之间的连通性差,水体自净能力差;受塌陷地势低洼影响,农业、工矿生产空间产生的

污染流极易进入塌陷区水体,引发矿区水质与水生态问题。

2) 水体连通实验结果表明,在矿区内修建的水体连通廊道有效连通了45个生态源地,研究区东-西方向上的连通距离增加了5倍,连通后廊道内水体的平均流速达到了0.067 m/s,矿区水体整体的连通性和水动力条件得到了显著改善。

3) 在构建水体连通廊道的基础上,基于 Phillips 水文模型计算出兖州矿区所需的植被缓冲带宽度的分布范围主要集中在15~35 m之间,面积总计为5.59 km²,其中已有植被缓冲带面积为2.18 km²,缺失待建设的植被缓冲带面积为3.41 km²。修建水体植被缓冲带可有效隔离水体与污染源,并改善矿区水生态空间与农业生产空间之间的生态关系。

4) 基于 SWAT 模拟分析表明,采煤塌陷区水体保护修复新模式可以削减至少10.14%~15.5%的污染物,对磷元素的去除效果尤为明显。研究区草地缓冲带的截污效率比林地缓冲带更好。

参考文献(References):

- [1] 刘辉,左建宇,苏丽娟等.巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):49~56.
LIU Hui, ZUO Jianyu, SU Lijuan, et al. Study on surface movement and deformation laws in mining under thick water-bearing loose layer. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 49~56..
- [2] 陈勇,苏勇松.宁乡市采煤沉陷区综合治理模式研究与实践[J].中国资源综合利用,2021,39(6):18~21.
CHEN Yong, SU Yongsong. Research and practice on comprehensive control model of coal mining subsidence area in Ningxiang City[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(6): 18~21.
- [3] 李学良,孙光,闫建成,等.典型高潜水位矿区采煤塌陷地损毁特征及复垦模式分析[J].煤炭技术,2021,40(7):1~4.
LI Xueliang, SUN Guang, YAN Jiancheng, et al. Analysis of damage characteristics and reclamation model of coal mining subsidence land in typical high potential water level mining area[J]. Coal Technology, 2021, 40(7): 1~4.
- [4] 陈浮,朱燕峰,马静,等.东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J].煤炭学报,2023,48(7):2836~2849.
CHEN Fu, ZHU Yanfeng, MA Jing, et al. Cooperative remediation mechanism and key technologies for pollution reduction and carbon sequestration in coal mining subsidence areas of the eastern plain[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2836~2849.
- [5] 胡振琪,袁冬竹.黄河下游平原矿区采煤塌陷地治理的若干基本问题研究[J].煤炭学报,2021,46(5):1392~1403.
HU Zhenqi, YUAN Dongzhu. Research on several fundamental issues of coal mining subsidence control in plain coal mining area of the Lower Yellow River[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1392~1403.
- [6] 李奇超,李新举,闵祥宇.高潜水位煤矿区完整复垦周期的土壤碳演变特征[J].水土保持学报,2018,32(4):204~209,215.
LI Qichao, LI Xinju, MIN Xiangyu. Soil carbon evolution under a complete reclamation cycle in a coal mine area with the high groundwater level[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 204~209,215.
- [7] 李太启,高荣久.采煤塌陷区综合治理问题分析与建议[J].金属矿山,2015(4):169~172.
LI Taiqi, GAO Rongjiu. Analysis and suggestion on the problem of comprehensive treatment in subsidence region induced by coal mining[J]. Metal Mine, 2015(4): 169~172.
- [8] 徐侯璠,雷少刚,孙永桥,等.基于多源卫星观测的矿区沉陷水体水位监测方法[J/OL].煤炭科学技术,1~12[2024~12~01]. Monitoring Method for Water Level in Subsidence Water Bodies in Mining Areas Using Multi-source Satellite Observations. Coal Science and Technology, 1~12[2024~12~01].
- [9] 许峰,尹海伟,孔繁花,等.基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J].生态学报,2015,35(19):6425~6434.
XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Developing ecological networks based on msqa and the least-cost path method: A case study in Bazhong western new district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6425~6434.
- [10] 郭泽呈,魏伟,庞素菲,等.基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析:以石羊河流域为例[J].生态学报,2019,39(7):2558~2572.
GUO Zecheng, WEI Wei, PANG Sufei, et al. Spatio-Temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in Arid Inland River Basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2558~2572.
- [11] 刘孝富,舒俭民,张林波.最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用:以厦门为例[J].生态学报,2010,30(2):421~428.
LIU Xiaofu, SHU Jianmin, ZHANG Linbo. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: As an example of Xiamen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 421~428.
- [12] 胡海波,邓文斌,王霞.长江流域河岸植被缓冲带生态功能及构建技术研究进展[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):214~222.
HU Haibo, DENG Wenbin, WANG Xia. Research progress on ecological function and construction technology of riparian vegetation buffers strips in the Yangtze River Basin. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(1): 214~222.
- [13] 侯利萍,何萍,钱金平等.河岸缓冲带宽度确定方法研究综述[J].湿地科学,201,10(4):500~506.
HOU Liping, HE Ping, QIAN Jinping, et al. A Review on Determination Methods for Width of Riparian Buffer. Wetland Science, 201, 10(4): 500~506.
- [14] 罗坤.崇明岛河岸植被缓冲带宽度规划研究[D].上海:华东师范大学,2009.
LUO Kun. Study on width planning of riparian vegetation buffer zone in Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [15] XIANG W N. GIS-based riparian buffer analysis: Injecting geo-

- graphic information into landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 34(1): 1–10.
- [16] 孙博闻, 陈巍, 李娜等. 生态补水下白洋淀湿地水文连通特性研究[J]. 水利水电技术, 2022, 53 (3): 134–144.
SUN Bowen, CHEN Wei, LI Na, et al. Hydrological connectivity characteristics of baiyangdian wetland under ecological replenishment. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53 (3): 134–144.
- [17] 刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探[J]. *地理学报*, 2008, 63(7): 683–692.
LIU Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river: Essence and indicators[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 683–692.
- [18] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559–1567.
GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1559–1567.
- [19] 赵筱青, 谭琨, 易琦, 等. 典型高原湖泊流域生态安全格局构建: 以杞麓湖流域为例[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 768–777.
ZHAO Xiaoqing, TAN Kun, YI Qi, et al. Construction of ecological security pattern in typical plateau lake basin: A case of the Qilu lake basin[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 768–777.
- [20] 刘瑞宽, 杨林朋, 李同昇等. 基于 ERA 和 MCR 模型的陕西沿黄地区生态安全格局构建[J/OL]. 中国环境科学, 1–13[2024–01–03]
LIU Ruikuan, YANG Linpang, LI Tongsheng, et al. Establishment of ecological security pattern along the Yellow River in Shaanxi Province based on ERA and MCR model. *China Environmental Science*, 1–13[2024–01–03]
- [21] 潘彬, 赵艳玲, 王少卿等. 生态网络构建视角下矿山生态修复重点区域识别——以辽宁省建平县为例 [J/OL]. 金属矿山, 1–17[2024–01–03]
PAN Bin, ZHAO Yanling, WANG Shaoqing, et al. Identification of Key Areas of Mine Ecological Restoration from the Perspective of Ecological Network Construction: A Case Study of Jianping County, Liaoning Province. *Metal Mine*, 1–17[2024–01–03].
- [22] 王琦, 付梦娣, 魏来, 等. 基于源–汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建: 以安徽省宁国市为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4546–4554.
WANG Qi, FU Mengdi, WEI Lai, et al. Urban ecological security pattern based on source-sink landscape theory and MCR model: A case study of Ningguo City, Anhui Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4546–4554.
- [23] 王琼, 范康飞, 范志平, 等. 河岸缓冲带对氮污染物削减作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 665–677.
WANG Qiong, FAN Kangfei, FAN Zhiping, et al. Nitrogen pollutant removal by riparian buffer zone: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 665–677.