

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.007

CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.007

黄愿, 郭梦娜, 罗子瑶, 等. 湖南龙堰流域农业面源污染关键源区解析与治理策略[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 365-374.

HUANG Yuan, GUO Mengna, LUO Ziyao, et al. analysis of critical source areas and management strategies for agricultural non-point source pollution in Longyan watershed, Hunan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 365-374.

湖南龙堰流域农业面源污染关键源区解析与治理策略

黄愿, 郭梦娜, 罗子瑶, 舒胡佳, 郝宗宇, 史志华, 赵劲松

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 旨在识别流域面源污染关键源区并进行针对性治理, 为农业小流域氮、磷流失防治提供理论依据和实践指导。[方法] 以湖南省典型亚热带低山丘陵小流域龙堰流域为研究对象, 基于野外监测和实地调查数据, 结合SWAT模型及K-means聚类识别流域面源污染关键源区, 并根据关键源区特征设计不同管理措施, 评估其应用效果。[结果] 1) 识别了总氮、总磷2类关键源区: 总氮关键源区贡献流域48.9%氮流失量, 主要受施肥强度驱动; 总磷关键源区贡献49.6%磷流失量, 受水文泥沙过程影响较大。2) 化肥减量30%结合少耕措施对氮削减效果最佳, 最高削减率达19.5%; 工程性措施对磷削减效果最优, 最高削减率为35.5%。3) 基于关键源区的精准治理显著提升措施效益($p < 0.05$), 在关键源区尺度下氮、磷的单位面积削减率分别达流域尺度的5.35、6.90倍。[结论] 龙堰流域氮、磷面源污染关键源区的成因与空间分布各异, 差异化治理是实现农业小流域面源污染精准防控的有效路径。

关键词: 氮、磷流失; 关键源区; 最佳管理措施; 小流域

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0365-10

Analysis of Critical Source Areas and Management Strategies for Agricultural Non-Point Source Pollution in Longyan Watershed, Hunan Province

HUANG Yuan, GUO Mengna, LUO Ziyao, SHU Hujia, HAO Zongyu, SHI Zhihua, ZHAO Jingsong

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] This study aims to identify critical source areas (CSAs) of non-point source pollution in watersheds and implement targeted management strategies, thereby providing a theoretical basis and practical guidance for the prevention and control of nitrogen and phosphorus loss in small agricultural watersheds. [Methods] The Longyan watershed, a typical subtropical low-mountain and hilly small watershed in Hunan Province, was selected as the study area. Based on field monitoring and on-site survey data, the SWAT model combined with K-means clustering was used to identify CSAs of non-point source pollution in the watershed. Additionally, according to the characteristics of the CSAs, different management practices were designed, and their application effectiveness was evaluated. [Results] 1) Two types of CSAs were identified: total nitrogen CSAs (TN-CSAs) and total phosphorus CSAs (TP-CSAs). TN-CSAs contributed 48.9% of nitrogen loss in the watershed, primarily driven by fertilizer application intensity. TP-CSAs accounted for 49.6% of phosphorus loss, largely influenced by hydrological and sediment processes. 2) A 30% reduction in chemical fertilizer combined with reduced tillage achieved the best effect on reducing nitrogen loss, with the highest reduction rate reaching 19.5%. Engineering practices had the best effect on reducing phosphorus loss, with the highest reduction rate of 35.5%. 3) Precision management based on CSAs significantly enhanced the benefits of the practices ($p < 0.05$). At the scale of CSAs, the reduction rates per unit area for nitrogen and phosphorus reached 5.35 and 6.90 times those at the watershed scale, respectively. [Conclusion] The causes and spatial distribution of CSAs for

收稿日期: 2025-08-07

修回日期: 2025-09-12

录用日期: 2025-09-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-19

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20611); 国家自然科学基金面上项目(42177318)

第一作者: 黄愿(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: 1957@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 赵劲松(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: jszhao@mail.hzau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

nitrogen and phosphorus non-point source pollution in the Longyan watershed exhibit distinct characteristics. Differentiated management is an effective pathway for achieving precise prevention and control of non-point source pollution in small agricultural watersheds.

Keywords: nitrogen and phosphorus loss; critical source areas; best management practices; small watersheds

Received: 2025-08-07

Revised: 2025-09-12

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

过量氮磷输入造成的水体富营养化已经成为全球性的环境问题,威胁水生生态平衡及人类用水安全^[1]。在我国,农业源的总氮、总磷排放量分别占全国总排放量的47.0%和67.0%,是水环境污染物主要来源之一^[2],因此,农业面源污染治理是水环境改善的重要方面。

最佳管理措施(best management practices, BMPs)是农业面源污染治理的有效手段和策略之一。目前,常见的BMPs包括化肥减量、保护性耕作等非工程性措施及植被过滤带、水道植草等工程性措施^[3],均有较好的应用效果。例如,ISSAKA等^[4]研究发现,保护性耕作可以降低9.4%和19.5%的总氮和总磷流失量,并能有效固持土壤养分;王慧琳等^[5]的研究表明,实施化肥减量后可降低流域16.0%氮素流失量;AHSAN等^[6]在澳大利亚维多利亚州雅拉河流域的研究中发现,水道植草可以降低18.0%~55.0%的氮磷负荷。但BMPs治理效果受土地利用、地形条件等环境因子的限制,并面临实施难度大、经济成本高等问题^[7]。通常非工程性措施成本较低,但见效慢且易受气候、水文等因素制约^[8];而工程性措施虽见效快、效果稳定且受季节和人为干扰较小,但对工程技术依赖性强且成本较高^[9]。

流域面源污染的空间异质性特征是导致治理难度增大和成本攀升的关键因素,凸显了BMPs空间优化配置在提升治理成效中的决定性作用^[10]。鉴于此,研究者们提出关键源区(critical source areas, CSAs)的概念,此区域污染负荷高,生态功能脆弱,是流域氮磷流失及BMPs布设的关键所在^[11]。精准识别关键源区可实现面源污染的高效治理^[12]。总氮、总磷等污染负荷是识别关键源区的重要指标,但水文、地形、土地利用及耕作管理等因素的综合影响也不容忽视^[13],因此需基于多因素耦合来识别关键源区。例如,GIRI等^[14]基于土壤地形指数及流域污染负荷识别内沙尼克流域氮磷流失关键源区显示,至少可减少96.0%的BMPs布设面积。因此,明确污染发生位置,集中资源、靶向施策,可有效降低治理成本。

模型是实现关键源区精准识别、BMPs空间配置优化及治理效果科学预测的重要工具,也是当前农业面源污染研究的核心技术手段^[15]。常用的模型主要有SWAT、AnnAGNPS、HSPF和SWMM等,其中以SWAT模型的应用最为广泛^[16]。SWAT模型(soil and water assessment tool)作为分布式水文模型,能够精准模拟流域水文过程、泥沙运移及污染物迁移过程^[17],且兼具综合性与灵活性,已成为该领域研究的核心工具。例如,DING等^[18]在流域建立SWAT模型,识别流域关键源区,并评估不同BMPs对于氮磷的削减效果;汪栩志等^[19]利用SWAT模型评估不同BMPs在洱海流域的面源污染治理效果显示,污染负荷削减率最高可达61.1%。

龙堰小流域是国家水土保持综合监测的重点区域之一,也是南方低山丘陵区农业流域的典型代表。本研究以龙堰小流域为研究对象,采用“监测-模拟-评估”的研究框架,基于野外监测、实地调查及模型输出数据,通过融合氮磷流失负荷、地理特征、景观格局与农业活动等多源数据,构建多因素关键源区识别方法,同时设计不同的BMPs并系统评估不同措施及其在不同尺度上的削减效果,旨在为农业面源污染精准治理和水生态保护提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

龙堰小流域位于湖南省衡东县西南部(27°02′00″~27°03′46″N, 112°54′43″~115°55′38″E),属湘江二级支流,总面积2.19 km²。流域属中亚热带湿润气候,年平均降水量1 337 mm(集中于4—9月),年平均气温18.3℃。流域海拔高度45~109 m(图1a),平均海拔63 m,东南高、西北低。流域土壤类型(图1b)主要为红壤(面积占比76.0%)、紫色土(14.1%)和水稻土(9.9%),土壤质地为沙壤土;土壤偏酸性,pH平均为4.98。土地利用类型(图1c)包括林地(面积占比49.8%)、耕地(21.4%,包括水田和旱耕地)、荒地(3.8%)、池塘(5.2%)、园地(4.2%)、湿地(5.2%)等农用地及居民地(11.2%)、道路(5.9%)等建设用地。地带性植被为亚热带常绿阔叶林。

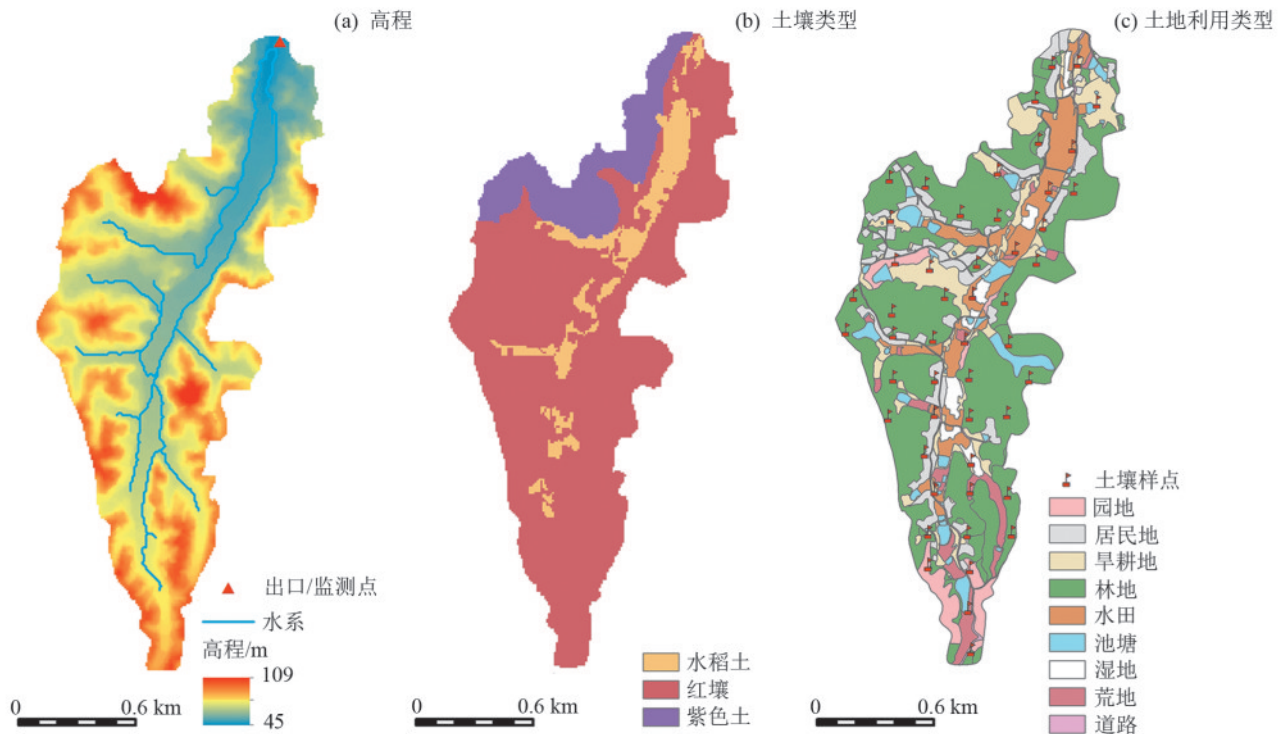


图 1 龙堰流域高程、土壤类型和土地利用类型

Fig.1 Elevation, soil type, and land use of Longyan watershed

1.2 样品采集与调查

1.2.1 流量流速监测 在流域出口布设HOBO自动气象站监测降水量、大气温湿度、大气压和风向风速,并设置流量监测计实时记录流量、流速与水位(图1a)。监测时段为2023年5月至2024年12月,时间间隔为5 min。

1.2.2 样品采集与测定 基流样品在流域出口采集(图1a),雨季(5—9月)每3 d采集1次,旱季(10月至翌年4月)每7 d采集1次,采样时间为2023年5月至2024年7月。样品用500 mL采样瓶收集,标注日期与编号,于-20℃保存。水样总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法测定。结合流量数据计算物质流失量,用于模型校准。

在流域内按网格法布设50个土壤采样点(图1c),于2023年和2024年4—5、9—10月作物收获后,采集0~20 cm耕层土壤样品。首次采样测定土壤总氮、总磷、有机质、体积质量、质地和pH,用于构建SWAT模型土壤数据库;后续采样仅测总氮和总磷。总氮采用元素分析仪(Vario TOC select, Elementar, 德国)测定,总磷采用HClO₄-H₂SO₄消解钼锑抗比色法测定,有机质用总有机碳分析仪测定,土壤体积质量采用环刀法测定,土壤质地采用吸管法测定,土壤pH采用电位法测定。

1.2.3 农业管理调查 通过问卷调查获取流域农业管理信息。该区域的主要作物为水稻和油菜,兼有花生、芝麻、玉米等。实行水稻-油菜轮作,兼有少量花生-油菜和芝麻-油菜轮作。土地耕作以机械和人工翻耕为主,具体管理信息见表1。

表 1 龙堰流域耕作管理情况

Table 1 Cultivation and management practices of Longyan watershed in 2024

作物	生长季(月)	种植面积/hm ²	平均施肥量/(kg·hm ⁻²)		产量/(t·hm ⁻²)
			N	P ₂ O ₅	
水稻	5—9	22.78	193.50	90.00	5.22~9.40
芝麻	5—9	19.80	114.00	45.00	0.97~1.49
花生	4—9	1.80	194.25	56.25	3.36~4.48
油菜	9—翌年5	26.42	193.50	90.00	2.01~2.99

1.3 模型建立

本研究基于SWAT模型开展流域模拟,所需数据见表2。

数字高程模型(DEM)来自无人机遥感影像、气象数据来自中国大气同化驱动数据集(CMADS)、土壤类型及水文数据来自衡东县水土保持中心、土地利用和耕作管理信息通过实地调查获得,水质数据及土壤属性数据通过采样测定得到。通过以上数据构建SWAT模型,并将全流域共划分为19个子流域和225个水文响应单元。

表 2 SWAT 模型输入数据统计
Table 2 Summary of input data for SWAT model

数据类型		描述	数据来源
空间数据	DEM	10 m×10 m 高程数据	无人机遥感影像
	土地利用类型图	10 m×10 m 土地利用二级分类图	实地调查
	土壤类型图	10 m×10 m 土壤类型分布图	衡东县水土保持中心
属性数据	土壤属性数据	土壤粒径、质地、有机质含量等	试验测定
	气象数据	日尺度降雨、温度、相对湿度、太阳辐射、风速	CMADS 网站 https://cmads.org/
	水文数据	2016—2024 年日尺度径流、泥沙、降雨量数据	衡东县水土保持中心
	水质数据	2023—2024 年日尺度水质数据	试验测定
	农业管理	作物类型、种植制度、施肥量等	入户调查

本研究采用水土保持中心提供的流域出口日径流、泥沙及试验测定获得的水质数据对相关参数进行校准验证,以准确模拟流域水文及氮磷流失状况。水文数据采用 2016—2020 年作为校准期,2021—2024 年作为验证期;水质数据采用 2023 年为校准期,2024 年为验证期。

选用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和 Kling-Gupta 效率系数(KGE)评估模型性能,其中 NSE 反映模拟值与观测值的拟合度,KGE 综合考量二者的相关性、均值比和变差比。考虑到小流域空间异质性及数据限制,认为当 NSE、KGE>0.4 时结果仍具决策价值,可支持关键源区识别和 BMPs 效果评估研究^[20]。具体评价结果见表 3。

表 3 SWAT 模型参数校准和验证结果

Table 3 Calibration and validation results of SWAT model parameters

参数类型	校准期		验证期	
	NSE	KGE	NSE	KGE
径流	0.50	0.46	0.50	0.47
泥沙	0.50	0.48	0.51	0.53
总氮	0.52	0.51	0.53	0.63
总磷	0.52	0.46	0.49	0.40

1.4 关键源区识别

本研究基于地形、土壤、土地利用、土壤氮磷含量、氮磷施肥量、高程、K 因子及景观格局指数等 22 个影响因子及景观单元氮磷流失负荷强度,采用 K-means 聚类分析以识别流域氮磷流失的关键源区。通过肘部法则结合轮廓系数初步确定聚类数范围,再利用主成分分析(PCA)进行降维可视化,综合验证最优聚类数(K 值),最终实现景观特征一致性的科学分类。在此基础上,通过对比分析不同聚类区域的氮磷流失负荷特征,识别流域氮磷污染的关键源区。其中,景观格局指数利用 R 的 landscapemetrics 包计算获取,景观单元氮磷流失为模型输出数据,其他数据来源见表 2。各影响因子空间数据均使用流域景观单元矢量边界进行分区提取。

1.5 最佳管理措施方案设计

基于龙堰流域的地形特征、耕作管理现状及现有研究成果,本研究系统设计 16 种面源污染治理措施,涵盖工程措施、非工程措施和综合性措施 3 个大类。具体包括:1)针对流域当前施肥状况,设置化肥减量 10%、20% 和 30% 3 种梯度情景;结合当地耕作习惯,设计免耕、少耕、残茬覆盖和作物覆盖 4 种保护性耕作模式;2)依据景观单元土地利用特征,布设植被缓冲带和水道植草 2 种工程性措施;3)基于单项措施的污染负荷削减效果,优化组合构建多措施协同的综合治理方案。以流域现状为基准情景,从而探究龙堰流域面源污染治理的最佳管理措施,具体情景参数设置见表 4。基于 SWAT 模型模拟 16 种管理措施在龙堰流域全局及关键源区的氮磷流失状况。不同 BMPs 的削减效果差异采用单因素方差分析进行检验;BMPs 在流域尺度与关键源区实施的单位面积削减量差异则采用非参数的威尔科克森秩和检验进行分析。

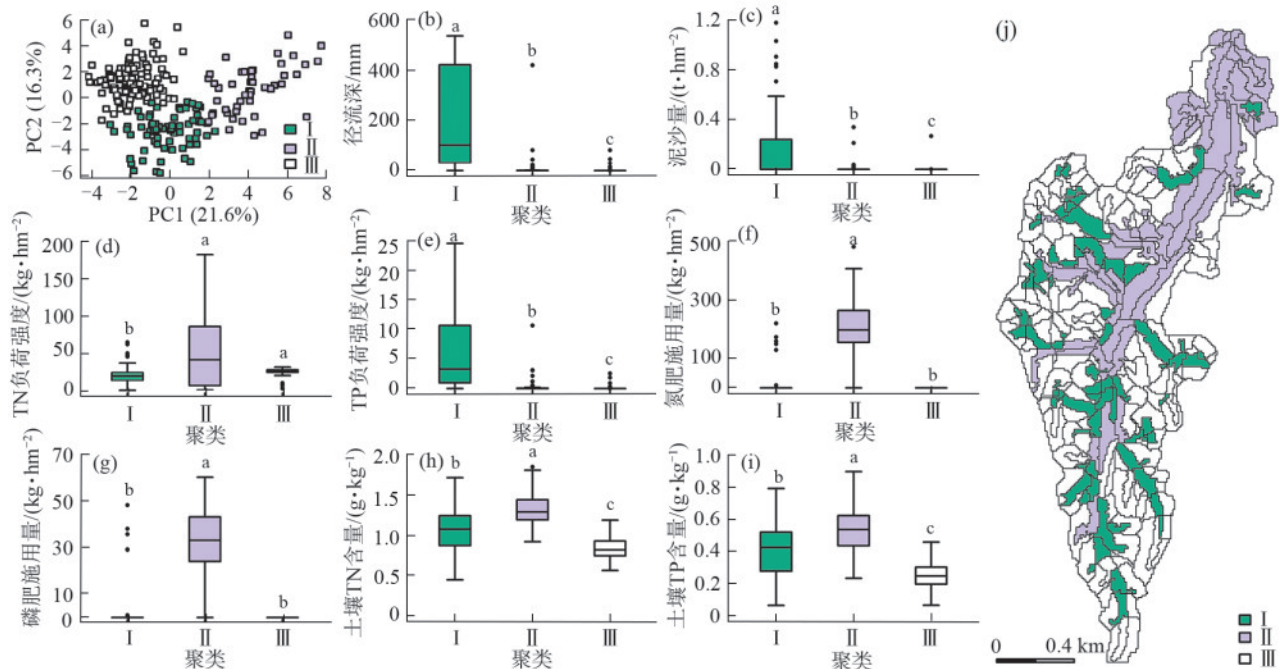
2 结果与分析

2.1 氮磷流失关键源区识别

由图 2 可知,当聚类数设为 3 时,不同景观单元类别间的分离效果最佳,且聚类内部具有较高的同质性,不同类别间则表现出显著的差异性。聚类 I 面积占流域面积的 16.55%,主要分布在流域西北部、南部及东部,以混合用地(居民区、湿地、荒地等)为主,其 TP 流失量占比高达 49.55%,是流域磷流失核心区;聚类 II 面积占比为 27.44%,集中分布于中部(耕地区),贡献 48.90% 的 TN 流失量,且肥料施用强度最高,构成氮流失高风险区;聚类 III 面积占比为 56.01%,作为面积最大的林地区域,地形陡峭,但氮磷流失负荷最低,呈现自然主导特征。基于流域不同区域特征及氮磷流失状况,确定聚类 I 为总磷流失关键源区,聚类 II 为总氮流失关键源区。

表 4 龙堰流域最佳管理措施设计及参数调整
Table 4 Design and parameter adjustment of best management practices in Longyan watershed

类型	编号	情景设计	参数调整	
流域现状	BS0	无	无	
非工程性措施	耕作管理	GZ1	免耕	.sch文件中修改耕作方式为zerotill
		GZ2	少耕	.sch文件中修改耕作方式为constill
		GZ3	残茬覆盖	.sch文件中修改耕作方式为stubmlch
		GZ4	作物覆盖	.sch文件中修改添加覆盖作物(苕子)
	化肥减量	HF1	测土配方,化肥减量10%	.sch文件中op_data3减少10%
		HF2	测土配方,化肥减量20%	.sch文件中op_data3减少20%
		HF3	测土配方,化肥减量30%	.sch文件中op_data3减少30%
工程性措施	GC1	植被缓冲带	filterstrip.str文件中设置fld_vfs为3.0,con_vfs为0.75,cha_q为0.3	
	GC2	水道植草	grassedww.str文件中设置mann为0.5,sed_co为0.6,dp为1.7,wd为1.5,len为3.0,slp为0.02	
综合性措施	ZH1	化肥减量30%+少耕	.sch文件中修改耕作方式为constill;op_data3减少30%	
	ZH2	化肥减量30%+植被缓冲带	op_data3减少30%;修改filterstrip.str文件中参数设置	
	ZH3	化肥减量30%+水道植草	op_data3减少30%;修改grassedww.str文件中参数设置	
	ZH4	化肥减量30%+少耕+植被缓冲带	.sch文件中修改耕作方式为constill;op_data3减少30%;修改filterstrip.str文件中参数设置	
	ZH5	化肥减量30%+少耕+水道植草	.sch文件中修改耕作方式为constill;op_data3减少30%;修改grassedww.str文件中参数设置	
	ZH6	作物覆盖+植被缓冲带	.sch文件中修改添加覆盖作物;修改filterstrip.str文件中参数设置	
	ZH7	作物覆盖+水道植草	.sch文件中修改添加覆盖作物(苕子);修改grassedww.str文件中参数设置	



注:图中不同小写字母表示不同聚类间差异显著($p < 0.05$);箱体表示75%和25%的四分位数;上下须线表示最大值和最小值;横线表示中位数。

图 2 不同聚类区域空间分布和特征及龙堰流域聚类结果

Fig.2 Spatial distribution and characteristics of different clustering regions and clustering results for Longyan watershed

2.2 最佳管理措施效果评估

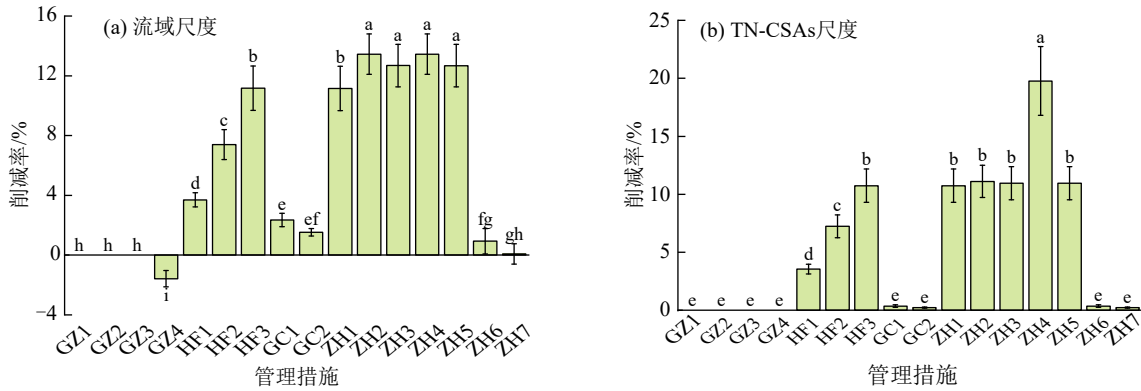
2.2.1 BMPs对流域总氮的削减效果 不同BMPs的实施对流域整体总氮负荷的影响具有一定差异

(图3)。在流域尺度上,非工程措施中,耕作管理措施对流域总氮负荷无削减效果,作物覆盖导致氮流失增加1.54%;化肥减量措施呈显著的剂量效应,减

量 10%~30% 对应削减率从 3.7% 提升至 11.0%。工程性措施中,植被缓冲带(GC1)和水道植草(GC2)分别实现 2.4% 和 1.6% 的削减率。综合性措施效果最为突出,其中化肥减量 30%+植被缓冲带(ZH2)组合削减率达 13.3%,显著优于单一措施。TN-CSAs 尺度上不同 BMPs 对于流域整体总氮削减率与

流域尺度上的基本一致。TN-CSAs 上化肥减量 30%+少耕+植被缓冲带(ZH4)可以减少流域 19.5% 的总氮流失量。

综合不同 BMPs 在流域及 TN-CSAs 尺度上的应用效果来看,整体表现为综合性措施>化肥减量>工程性措施>耕作管理。



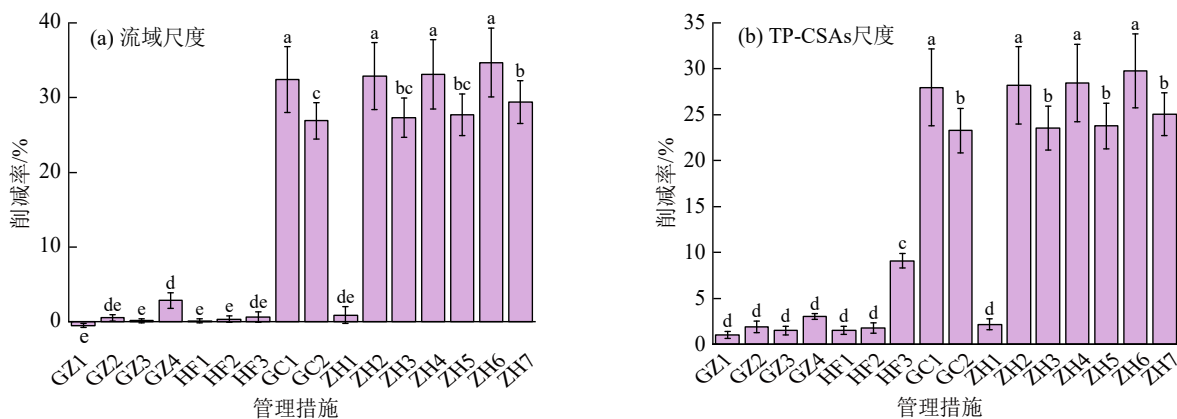
注:图柱上方不同小写字母表示不同 BMPs 对流域 TN 的削减效果存在显著性差异($p < 0.05$)。

图 3 流域和 TN-CSAs 尺度上 BMPs 的 TN 削减率

Fig.3 TN reduction rates of BMPs at watershed scale and TN-CSAs scale

2.2.2 不同 BMPs 措施对流域总磷的削减效果 不同 BMPs 对流域总磷流失的削减效果差异显著(图 4)。在流域尺度上,非工程性措施中耕作管理措施整体效果不佳,仅作物覆盖(GZ4)表现微弱削减效果(2.9%);化肥减量措施在常规减量(10%~20%)时几乎无效,仅当减量达 30% 时才显现 9.0% 的削减效果。相比之下,工程性措施成效突出,植被缓冲带(GC1)和水道植草(GC2)分别实现 33.2% 和 27.1% 的削减率($p < 0.05$)。综合性措施中,含植被缓冲带

的组合表现最优,其中作物覆盖+植被缓冲带(ZH6)削减率达 35.5%,化肥减量 30%+植被缓冲带(ZH2)和化肥减量 30%+少耕+植被缓冲带(ZH4)削减率均超过 33%,充分证实植被缓冲带在磷素截留中的关键作用。在总磷关键源区实施相同措施时,工程性措施和含工程措施的综合性措施削减率为 23.9%~30.6%。整体而言,工程性措施及其组合方案在流域和 TP-CSAs 尺度上均表现出较优的磷素削减效果。



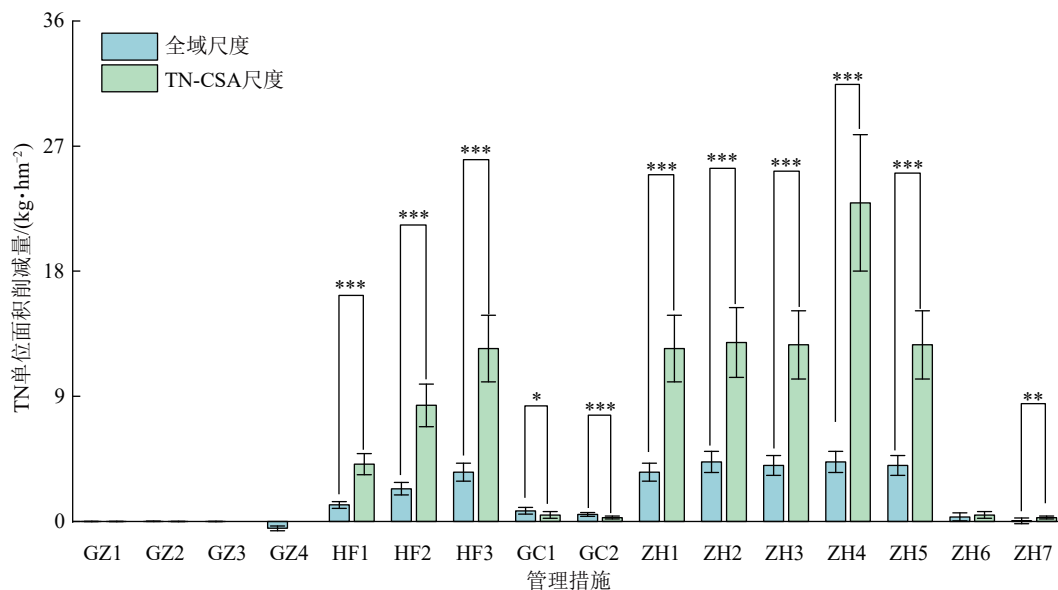
注:图柱上方不同字母表示不同 BMPs 对流域 TP 的削减效果存在显著性差异($p < 0.05$)。

图 4 流域和 TP-CSAs 尺度下不同 BMPs 的 TP 削减率

Fig.4 TP reduction rates of BMPs at watershed scale and TP-CSAs scale

2.2.3 BMPs 在不同尺度下削减效益 BMPs 对流域总氮削减效益存在显著的空间尺度效应(图 5)。在非工程性措施中,化肥减量措施在 TN-CSAs 表现出最优的尺度响应特征,3 种减量方案(HF1-HF3)的单位面积削减量达 4.12~12.43 kg/hm²,较流域尺度

(1.18~3.53 kg/hm²)显著提高 3.50 倍($p < 0.01$),而耕作管理措施则未表现出明显的尺度效应($p > 0.05$)。值得注意的是,工程性措施呈现特殊的空间响应规律,TN-CSAs 区的削减效益(GC1:0.46 kg/hm²;GC2:0.27 kg/hm²)反而较流域尺度降低 40.00%($p < 0.05$)。



注: *、**、***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 显著性水平下 TN 单位面积削减在全局和关键源区尺度下的差异显著性。

图 5 不同尺度下 BMPs 的 TN 单位面积削减量

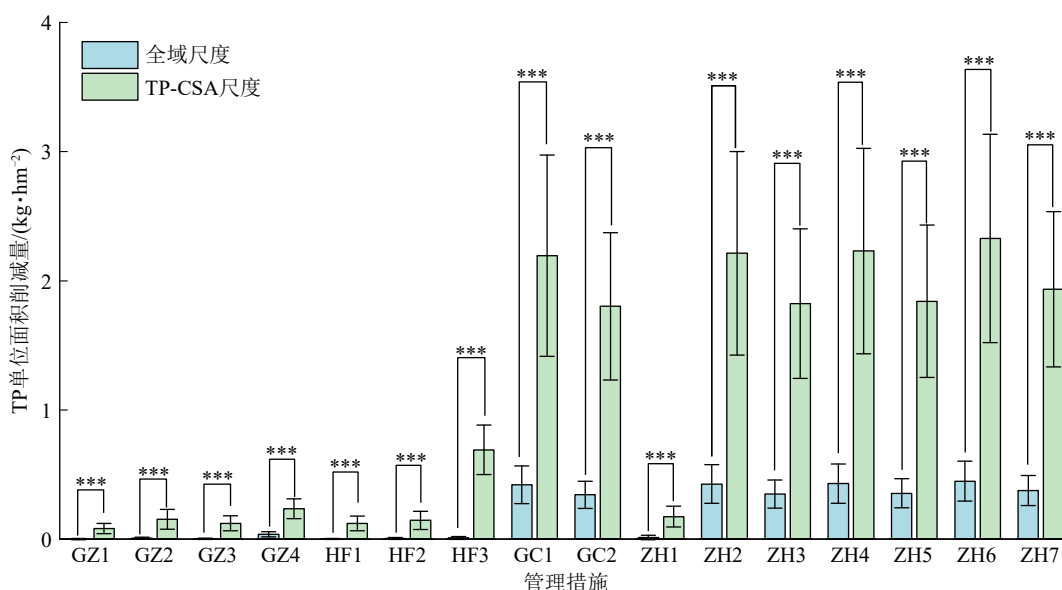
Fig.5 TN reduction per unit area by BMPs at different spatial scales

综合性措施展现出最强的空间增效作用,其中 ZH4 方案在 TN-CSAs 区的单位面积削减量(22.91 kg/hm²)较流域尺度(4.28 kg/hm²)提升达 5.35 倍($p < 0.01$)。证实基于关键源区识别的空间靶向治理策略可显著提升管理措施的实施效率,其中“化肥减量+工程措施”的组合模式在 TN-CSAs 区表现出最优的协同增效效果。

BMPs 对流域总磷的削减效益在不同空间尺度上存在显著差异(图 6)。所有 BMPs 在 TP-CSAs 上均表现出更优的削减效果($p < 0.05$)。化肥减量措施(HF1~HF3)在 TP-CSAs 的单位面积削减量(0.12~

0.69 kg/hm²)较全域尺度(0~0.01 kg/hm²)提升最高达 6.90 倍;工程性措施中,植被缓冲带(GC1)的削减效率从全域尺度的 0.42 kg/hm²提升至 TP-CSAs 的 2.19 kg/hm²(增幅 421%)。

特别值得注意的是,综合性措施展现出最强的空间响应特征,其中 ZH1 方案在 TP-CSAs 的削减效率(0.17 kg/hm²)较全域尺度(0.01 kg/hm²)提升达 17 倍,而含植被缓冲带的组合方案(如 ZH2、ZH4、ZH6)在 TP-CSAs 的平均削减效率达 2.12 kg/hm²,较全域尺度提高 4.70 倍,说明基于关键源区识别的空间靶向治理策略可显著提升各类 BMPs 的实施效率。



注: *、**、***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 显著性水平下 TP 单位面积削减在全局和关键源区尺度下的差异显著性。

图 6 不同尺度下 BMPs 的 TP 单位面积削减量

Fig.6 TP reduction per unit area by BMPs at different spatial scales

3 讨论

3.1 关键源氮磷流失特征

TN-CSAs以农用地(占比87.7%)为主导,总氮流失负荷强度显著高于非TN-CSAs区域(图2),是因为TN-CSAs施肥量及土壤氮素的背景值较高,相较于其他地区氮素盈余量大,而这些盈余的氮素容易通过径流和淋溶进入水体^[21]。虽然TN-CSAs肥料投入量较高,但磷素流失量却相对较低(图2)。首先,是由于该流域磷素主要以颗粒态的形式随径流泥沙流失;其次,该区域海拔坡度以及径流泥沙量较低,限制颗粒态磷的迁移能力^[22]。该地形-水文耦合作用最终导致该区域磷素流失量维持在较低水平。

TP-CSAs总磷流失负荷显著高于其他区域(图2),水文特征因子及地形因子是影响TP-CSAs磷流失的重要因素。在水文特征方面,该区域径流量和泥沙量显著高于其他区域(图2),导致区域累积的磷经径流冲刷随水和泥沙流失的风险增加。已有研究^[23]表明,径流泥沙流失特征与磷素流失存在显著关联,径流和泥沙量流失量直接决定磷的迁移通量。在地形特征上,该区域海拔相对较高也是流域磷流失风险加剧的重要原因之一。

3.2 不同BMPs对氮磷流失削减效应及机制分析

氮磷流失机制的差异决定不同BMPs的适用性。非工程性措施中,耕作管理措施与化肥减量措施对氮、磷流失的削减效果存在显著差异。耕作管理措施主要通过减少土壤侵蚀降低磷的流失风险,在全局和关键源区尺度上对总磷的削减率为-0.5%~3.1%,但对总氮无显著削减效果,甚至作物覆盖因加速氮矿化而增加氮流失^[24]。相比之下,化肥减量措施通过减少源头输入,对总氮的削减效果(3.5%~11.0%)显著优于总磷(1.0%~9.0%),与流域氮磷的流失特征直接相关,流域中氮素主要以溶解态存在易通过地下渗漏等方式淋溶;而磷素以颗粒态为主,磷素流失主要受水文及泥沙迁移过程的驱动^[25-26]。工程性措施对磷流失的拦截效果更为突出,全局和关键源区尺度削减率达23.6%~35.5%,而对氮素的削减率不足3.0%,源于磷主要通过泥沙迁移流失,植被缓冲带和水道植草可有效拦截颗粒态磷;而氮以溶解态随水淋失,工程措施对其控制有限^[27-28]。综合性措施通过源头减量与过程拦截的协同作用,实现氮磷的高效治理,其中ZH4通过化肥减量与植被吸收强化对氮的削减效果,是流域氮流失控制的最优方案。ZH6则结合土壤侵蚀控制与工程拦截对磷的削减达到最佳效果。

综上所述,流域氮流失控制需侧重源头减量与植被吸收,磷流失则依赖侵蚀抑制与物理拦截。未来流域治理需根据污染特征组合应用非工程与工程措施,以实现氮磷流失的协同优化控制。

3.3 关键源区尺度下BMPs的污染削减效应

在不同尺度下,BMPs实施效益具有较大差异。优先在CSAs区域实施BMPs,可以提高氮磷流失的控制效益,同时减少措施应用面积,以达到降本增效的目的。本研究结果显示,在TN-CSAs尺度下,化肥减量及综合性措施(除ZH6外)对于氮的单位面积削减量显著高于全局尺度的(图4)。此差异主要源于TN-CSAs区域内具有更高的初始氮素负荷强度和更集中的农业活动输入(图2)。在TP-CSAs尺度下,所有的管理措施对于磷的单位面积削减量均极显著高于全局尺度(图6),与TP-CSAs特有的水文地貌特征密切相关,该区域径流和泥沙量显著大于非关键源区,导致更强烈的泥沙迁移和磷素流失过程(图2)。同样地,WU等^[29]利用SWAT模型识别流域中的关键源区,并评估不同BMPs措施的效果发现,关键源区的识别和针对性管理可以显著提高污染物削减效率;桑灿等^[30]研究显示,在总磷关键源区实施BMPs,对流域总磷削减效果较好,削减率可达50%。所以,在关键源区针对性的布设BMPs可以有效提升措施对流域氮磷的削减效益。

4 结论

1)总氮和总磷关键源区具有不同的分布特征及驱动机制。总氮关键源区主要分布在农用地,其高流失风险主要源于频繁的农业耕作及高施肥量;总磷关键源区主要分布于湿地和居民区,该区域径流、泥沙量较高,是关键源区磷流失的主要原因。

2)不同管理措施对氮磷流失负荷的削减效果不同。在氮素控制方面,化肥减量30%及其与少耕、植被缓冲带的组合措施表现最优;相比之下,工程性措施及相关综合性措施对磷素的削减效果更为显著。

3)依据氮磷空间分异特征实施差异化管控,是实现面源污染高效治理的关键。在总氮关键源区,化肥减量和综合性措施的单位面积削减量较全域实施提高2~6倍;而在总磷关键源区,所有措施的实施效益均显著优于全域尺度的。

参考文献:

- [1] 杨林章,吴永红.农业面源污染防控与水环境保护[J].中国科学院院刊,2018,33(2):168-176.
YANG L Z, WU Y H. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental protection [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sci-

- ences, 2018, 33(2):168-176.
- [2] 吴一平, 宋燕妮, 张广创, 等. 流域面源污染研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4):711-720.
WU Y P, SONG Y N, ZHANG G C, et al. Progress and prospect of research on watershed nonpoint source pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(4):711-720.
- [3] SHARMA S, BIJUKSHE S, PUPPALA S S. Monitoring, modeling and planning best management practices (BMPs) in the Atwood and Tappan Lake watersheds with stakeholders engagements[J]. Water, 2023, 15(17):e3028.
- [4] ISSAKA F, ZHANG Z, ZHAO Z Q, et al. Sustainable conservation tillage improves soil nutrients and reduces nitrogen and phosphorous losses in maize farmland in southern China[J]. Sustainability, 2019, 11(8):e2397.
- [5] 王慧琳, 邹民忠, 方伟文, 等. 基于SWAT模型的武强河流域非点源污染关键源区界定与控制策略[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2):228-238.
WANG H L, ZOU M Z, FANG W W, et al. Definition and control strategy of the key source areas of non-point source pollution based on SWAT model in Wuqiang River basin, Zhejiang of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2):228-238.
- [6] AHSAN A, DAS S K, KHAN M H R B, et al. Modeling the impacts of best management practices (BMPs) on pollution reduction in the Yarra River catchment, Australia[J]. Applied Water Science, 2023, 13(4):e98.
- [7] 武淑霞, 刘宏斌, 刘申, 等. 农业面源污染现状及防控技术[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5):23-30.
WU S X, LIU H B, LIU S, et al. Review of current situation of agricultural non-point source pollution and its prevention and control technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5):23-30.
- [8] LIU Y Z, WANG R Y, GUO T, et al. Evaluating efficiencies and cost-effectiveness of best management practices in improving agricultural water quality using integrated SWAT and cost evaluation tool [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577:e123965.
- [9] LINTERN A, MCPHILLIPS L, WINFREY B, et al. Best management practices for diffuse nutrient pollution: Wicked problems across urban and agricultural watersheds[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(15):9159-9174.
- [10] WANG H, LIU C, XIONG L C, et al. The spatial spillover effect and impact paths of agricultural industry agglomeration on agricultural non-point source pollution: A case study in Yangtze River delta, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 401:e136600.
- [11] SEMENOV M Y, SILAEV A V, SEMENOV Y M, et al. Identifying and characterizing critical source areas of organic and inorganic pollutants in urban agglomeration in lake Baikal watershed[J]. Sustainability, 2022, 14(22):e14827.
- [12] WANG S H, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Assessment of influencing factors on non-point source pollution critical source areas in an agricultural watershed [J]. Ecological Indicators, 2022, 141:e109084.
- [13] ZHOU Y W, DENG J, LI Z X, et al. Targeting the critical source areas of phosphorus based on hydrological sensitive area delineation to control nonpoint source pollution in watersheds [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:e1020336.
- [14] GIRI S, QIU Z Y, PRATO T, et al. An integrated approach for targeting critical source areas to control non-point source pollution in watersheds[J]. Water Resources Management, 2016, 30(14):5087-5100.
- [15] 李华林, 张守红, 于佩丹, 等. 基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例[J]. 环境科学, 2023, 44(11):6194-6204.
LI H L, ZHANG S H, YU P D, et al. Estimation and critical source area identification of non-point source pollution based on improved export coefficient models: A case study of the upper Beiyun River basin [J]. Environmental Science, 2023, 44(11):6194-6204.
- [16] 易绍荣, 冯雪娇, 王宗伟, 等. 基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11):2550-2559.
YI S R, FENG X J, WANG Z W, et al. Spatial-temporal changes of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Hetao Irrigation District based on SWAT [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(11):2550-2559.
- [17] YAMINI P R, MANJULA R. A review for comparing SWAT and SWAT coupled models and its applications [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45:7190-7194.
- [18] DING W L, XIA J, SHE D X, et al. Assessing multivariate effect of best management practices on non-point source pollution management using the coupled Copula-SWAT model[J]. Ecological Indicators, 2023, 153:e110393.
- [19] 汪栩志, 张克强, 沈修卿, 等. 基于SWAT模型的洱海流域面源污染最佳管理措施研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(2):240-251.
WANG X Z, ZHANG K Q, SHEN X Q, et al. Simulation of the best management practices for agricultural non-point source pollution in the Erhai Lake basin based on SWAT model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(2):240-251.
- [20] KNOBEN W J M, FREER J E, WOODS R A. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(10):4323-4331.
- [21] HU C C, WU Q X, LIU G D, et al. Nitrogen and phospho-

- rus non-point source pollution in the upper Wujiang River karst basin: Critical source areas identification and influencing factors[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: e112989.
- [22] 邱业, 曲芝旭, 韩玉国, 等. 模拟降雨条件下肥料类型对坡面磷素流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 106-112.
- QIU Y, QU Z X, HAN Y G, et al. Effect of fertilizer types on phosphorus loss on slope under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 106-112.
- [23] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 32-39.
- YANG L, MA K M, GUO Q H, et al. Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 32-39.
- [24] ROSENZWEIG S T, SCHIPANSKI M E, KAYE J P. Rhizosphere priming and plant-mediated cover crop decomposition[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1): 127-139.
- [25] GU B J, ZHANG X M, LAM S K, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands[J]. *Nature*, 2023, 613(7942): 77-84.
- [26] YANG C L, HU Y X, LI Z W, et al. Relating rainfall, runoff, and sediment to phosphorus loss in northern rocky mountainous area of China[J]. *Catena*, 2024, 247: e108504.
- [27] CALVO C, RODRÍGUEZ-GALLEGO L, DE LEÓN G, et al. Potential of different buffer zones as nature-based solutions to mitigate agricultural runoff nutrients in the subtropics[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 207: e107354.
- [28] HINA N S. Global meta-analysis of nitrate leaching vulnerability in synthetic and organic fertilizers over the past four decades[J]. *Water*, 2024, 16(3): e457.
- [29] WU H, ZHU A X, LIU J Z, et al. Best management practices optimization at watershed scale: Incorporating spatial topology among fields[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(1): 155-177.
- [30] 桑灿, 李兆华, 冯学高, 等. 白莲河流域总磷关键源区识别与最佳管理措施(BMPs)研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2): 374-386.
- SANG C, LI Z H, FENG X G, et al. Identification of phosphorus emission critical source areas and evaluation of best management practices in Bailian River basin based on SWAT model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2): 374-386.
- (上接第 364 页)
- [24] 郑元铭, 全小龙, 乔有明, 等. 高寒露天煤矿剥离物理化特性及其植物生长适宜性分析[J]. *青海大学学报*, 2019, 37(2): 22-27.
- ZHENG Y M, QUAN X L, QIAO Y M, et al. Physico-chemical characteristics of open pit mining waste and its suitability for plant growth in high altitude area[J]. *Journal of Qinghai University*, 2019, 37(2): 22-27.
- [25] 金立群, 李希来, 孙华方, 等. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 121-128.
- JIN L Q, LI X L, SUN H F, et al. Effects of different years of recovery on vegetation and soil characteristics of open-pit coal mine dumps in alpine region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 121-128.
- [26] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 等. 不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(3): 1-11.
- YANG X G, LI X L, JIN L Q, et al. Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 1-11.
- [27] LI M Y, WANG J L, YAO T, et al. Isolation and characterization of cold-adapted PGPB and their effect on plant growth promotion [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2021, 31(9): 1218-1230.
- [28] 段中华, 全小龙, 乔有明, 等. 高寒草甸植物中正构脂肪酸组成特征研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 393-401.
- DUAN Z H, QUAN X L, QIAO Y M, et al. Characterization of n-fatty acids in alpine meadow plants [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 393-401.
- [29] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 等. 短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究[J]. *草业学报*, 2018, 27(8): 30-38.
- YANG X G, LI X L, JIN L Q, et al. Changes in soil properties of coal mine spoils in an alpine coal mining area after short-term restoration [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8): 30-38.
- [30] 张皓. 基于灰色关联度的矿山生态环境修复效果评价模型[J]. *山东煤炭科技*, 2022, 40(9): 189-191.
- ZHANG H. Evaluation model of mine ecological environment restoration effect based on grey correlation degree [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2022, 40(9): 189-191.