

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

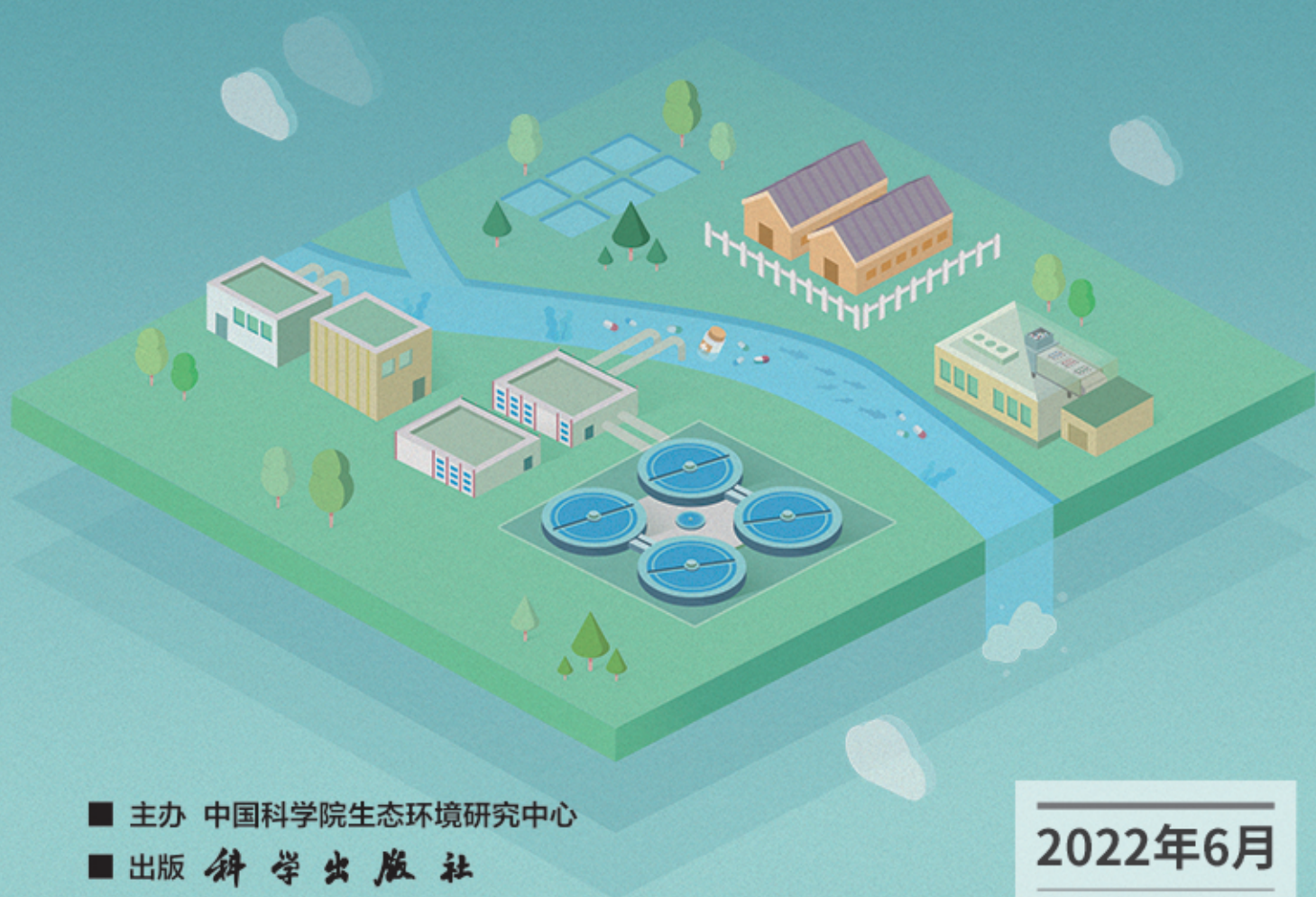
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中铜的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法

顾晶晶^{1,2}, 冶运涛^{2*}, 董甲平², 蒋云钟^{1,2}, 曹引², 赵红莉²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 近年来, 非点源污染已成为我国部分水库水质恶化的主要原因。以潘家口水库流域为例, 引入动态降水因子和地形因子改进经典的输出风险模型, 结合高分辨率的卫星反演降水产品 (GPM) 和高分六号卫星影像, 建立高分辨率数据驱动的非点源污染输出风险评估模型, 开展潘家口水库流域的非点源污染输出风险时空分布特征研究。结果表明, 研究区 2018 年非点源污染输出风险较高, 其中氮元素污染输出高风险和较高风险区约占流域总面积的 70.6%, 磷元素污染输出无高风险区, 较高风险区约占流域总面积的 21.9%。分析流域非点源污染输出风险时空分布特征, 发现 4~9 月潘家口水库流域非点源污染输出风险呈现先增后减趋势, 在 7 月和 8 月最高, 与流域降水时空分布一致; 结合土地利用分布特征分析, 流域上游以耕地为主, 城市集中在流域下游, 受农业生产和人类活动的影响, 这些区域的非点源污染输出风险较高。针对非点源污染输出风险时空分布特征, 应制定合理的农业施肥方式, 规划非点源污染“源-汇”景观布局以及建设植被缓冲带。

关键词: 非点源污染; 输出风险评估; 高分辨率数据驱动; 输出风险模型; 潘家口水库流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3140-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202109237

Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data

GU Jing-jing^{1,2}, YE Yun-tao^{2*}, DONG Jia-ping², JIANG Yun-zhong^{1,2}, CAO Yin², ZHAO Hong-li²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In recent years, non-point source pollution has become the main cause of water quality deterioration in some reservoirs in China. Taking the Panjiakou Reservoir as an example, the classical output risk model was improved by introducing a precipitation factor and terrain factor. Combined with high-resolution satellite precipitation products (GPM) and GF-6 satellite images, a high-resolution data-driven risk assessment method for non-point source pollution output was established to study the temporal and spatial distribution characteristics of non-point source pollution output risk in the Panjiakou Reservoir basin. The results showed that the non-point source pollution output risk was high in the study area in 2018. The areas with higher and highest risk of nitrogen pollution output accounted for approximately 70.6% of the total watershed area, whereas the higher risk of phosphorus pollution output accounted for approximately 21.9%. The temporal and spatial distribution characteristics of non-point source pollution output risk in the Panjiakou Reservoir basin were analyzed. It was found that the non-point source pollution output risk in the Panjiakou Reservoir basin increased first and then decreased from April to September. This was consistent with the spatial and temporal distribution of precipitation in the basin. Combined with the analysis of land use distribution characteristics, the upstream area of the basin was mainly cultivated land, whereas cities were concentrated in the downstream portion of the basin. Affected by agricultural production and human activities, the risk of non-point source pollution output was higher in these regions. In view of the temporal and spatial distribution characteristics of non-point source pollution output risk, it is necessary to formulate a reasonable agricultural fertilization method, plan the landscape layout of source-sinks, and construct vegetation buffer zones.

Key words: non-point source pollution; output risk assessment; high-resolution data-driven; output risk model; Panjiakou Reservoir basin

随着全球经济快速发展, 水环境污染已成为一个亟需解决的全球性问题, 受到学者和管理者关注^[1]。水体污染按污染形式可以分成点源污染和非点源(面源)污染, 近年来, 随着点源污染管控措施逐步完善, 非点源污染已成为全球水环境防治的最大挑战之一^[2~4]。相较于点源污染, 非点源污染具有来源广泛、暴发具有随机性、空间差异明显和监测困难等特点, 使得非点源污染防治难度远远高于点源污染^[5,6]。目前, 国内外非点源污染研究以非点源污染负荷定量估算和非点源污染风险定性评估为主^[7,8], 但有研究认为, 相对于非点源污染负荷的精确估算, 如何准确识别污染输出高风险区域并制定相应防治措施才是非点源污染研究的首要工作^[9,10]。

输出风险模型作为非点源污染输出风险评估常用方法之一, 以输出系数法为基础, 核心思想是根据土地利用类型空间分布特征实现区域非点源污染输出风险评估^[11,12]。该方法不考虑非点源污染形成及迁移转化等复杂物理过程, 模型具有结构简单、基础数据易获取及参数较少等特点, 且模型对时空尺度不敏感, 可移植性好^[13,14]。目前, 基于输出风险模型的非点源污染研究, 大多已考虑降水和地形时空差异影响, 并通过引入新的模型参数, 对经典的输出

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405801); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(资基本科研01882106)

作者简介: 顾晶晶(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水资源保护, E-mail: gji_jg2021@tju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yeyuntao@iwhr.com

风险模型进行改进,模型模拟精度得到了较大改善^[11,15-17].但通过调研,发现目前研究存在以下3点不足之处:①土地利用数据空间分辨率和精度不足,大多数研究以30 m分辨率Landsat系列卫星影像为基础,采用单一分类器提取土地利用数据;②基于气象站点插值的降水数据精度不足,尤其在站点数据稀少区域,这使得降水因子计算存在不确定性;③目前非点源污染风险研究以年尺度为主,但实际上,大多数区域内降水时空分布差异较大,非点源污染风险也存在较大差异.

水库作为人类赖以生存的资源,在防洪、灌溉和城市用水等方面起到重要作用^[18].潘家口水库是“引滦入津”工程主要水库,近年来由于受上游农业和城市排污等影响,水库水质持续恶化^[19,20].本文以潘家口水库流域为研究区,首先以高空间分辨率(16 m)国产GF-6 WFV影像作为土地利用分类基础数据,采用多分类器组合方法,实现研究区土地利用高精度提取;其次以高时空分辨率(时间分辨率0.5 h,空间分辨率0.1°)的卫星反演降水产品GPM(global precipitation measurement mission,GPM)作为

流域降水基础数据,通过 PSO-BP (particle swarm optimization- back propagation, PSO-BP)降尺度方法,得到研究区高精度降水数据;最后构建了考虑流域降水和地形差异的输出风险模型,区别于传统研究,在月尺度上评估潘家口水库流域非点源污染输出风险,并提出针对性的污染防控措施,以期流域非点源污染研究和水环境保护提供科学参考.

1 研究区概况

潘家口水库流域(115°~119°E, 40°~43°N)位于海河之北,滦河中上游,跨内蒙古自治区和河北省,主要面积在承德市、张家口市、赤峰市和锡林郭勒盟,流域控制面积约33 400 km²,分别占滦河流域和海河流域面积的75%和10%.流域海拔147~2 236 m,由西北向东南递减,流域地处亚热带季风区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温9.6℃,年蒸发量400 mm,流域多年平均降水量540 mm.年内降水集中,7月和8月降水量占年降水量的50%以上,且流域降水空间分布不均.研究区地理位置及海拔如图1所示.

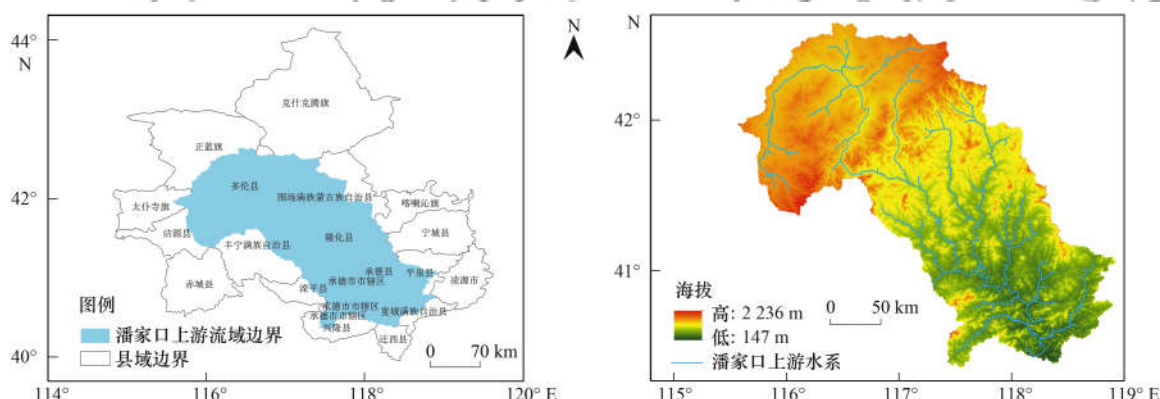


图1 研究区地理位置及高程

Fig. 1 Location and elevation of the study area

2 材料与方法

传统输出风险模型适用于降水均匀和地势平坦区域,而随着模型的广泛应用,降水和地形因子已成为输出风险模型不可忽视的模型参数^[21].因此,本研究综合考虑潘家口水库流域降水时空差异以及地形空间差异,引入动态降水因子和地形因子对模型进行改进,构建输出风险评估模型,识别了潘家口水库流域非点源污染输出风险时空分布特征.本研究技术路线如图2所示.

2.1 数据源与处理

本研究所需数据包括潘家口水库流域DEM、18景GF-6 WFV影像、卫星反演降水产品GPM、降水站点数据和NDVI(normalized difference vegetation

index, NDVI),所有数据时间均为2018年.数据处理包括:①子流域是输出风险模型的最小计算单元,以DEM为基础数据,通过ArcGIS 10.6软件进行填洼、流向计算、汇流量计算、河网水系提取和河网分级等处理,将研究区划分为105个子流域.②土地利用分类是输出风险模型的基础,以18景GF-6 WFV影像为土地利用提取基础数据,采用多分类器组合方法^[22],将研究区土地利用分为水体、草地、耕地、林地、建设用地和未利用地这6类.③降水作为非点源污染产输的主要驱动力,无疑是最重要的参数之一,采用文献[23]的卫星反演降水产品GPM空间降尺度PSO-BP模型,得到研究区高精度降水数据.④土壤侵蚀是非点源污染产输的主要途径之一,一般认为土壤侵蚀强度与坡度正相关,即坡度越大,

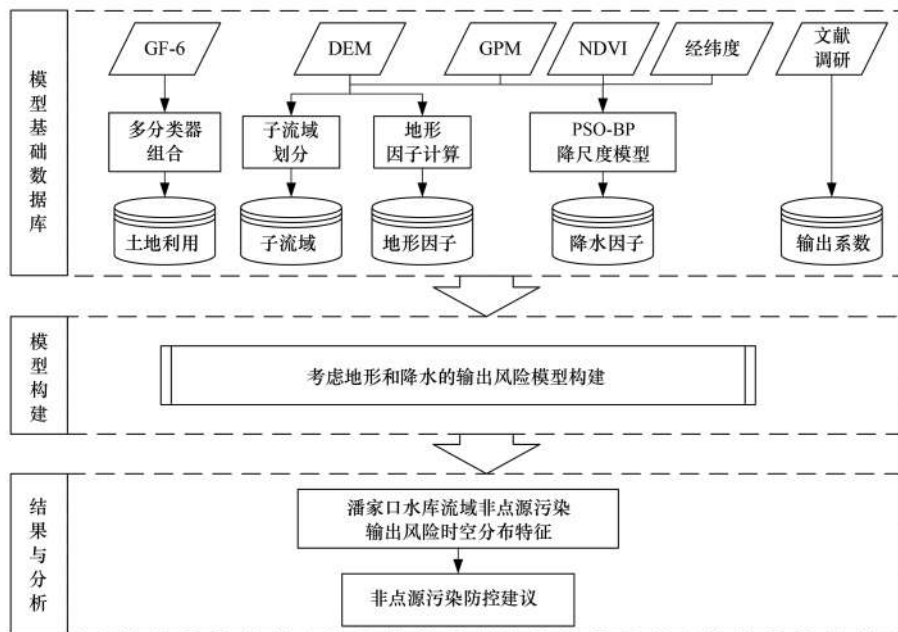


图2 技术路线示意

Fig. 2 Technique flow chart

发生侵蚀的可能性越高^[24]. 以 DEM 为基础, 利用 ArcGIS 10.6 软件中 Spatial Analysis 工具计算研究区坡度, 作为模型地形因子计算的基础数据.

2.2 输出风险模型

输出系数法是输出风险模型的基础, 输出系数法最早由 Frink 提出, 经 Johnes 等改进, 形成经典输出系数模型^[25]. 模型不涉及非点源污染复杂的产输机制, 参数少、计算简单、模拟精度高, 且对监测数据要求不高, 所以在大规模非点源污染研究中应用广泛^[13, 26]. 非点源污染风险评估需要明确的阈值, 有研究表明, 相对于其他土地利用类型, 林地产污少, 且对污染物的迁移有一定抑制, 所以一般认为林地是非点源污染的“汇”, 其他土地利用类型是非点源污染的“源”^[27, 28]. 本文在非点源污染风险计算中, 以林地输出系数作为风险计算阈值, 大于则认为存在输出风险, 反之则不存在输出风险^[13, 29]. 考虑降水动态因子和地形因子的输出风险模型计算公式为:

$$L_k = \sum_{i=1}^n (\alpha_k \times \beta_k \times E_{ij} A_{ik}) \quad (1)$$

$$G_k = (L_k - E_h) / L_k \quad (2)$$

式中, L_k 为第 k 个子流域内污染物 j 带权重的平均输出系数; j 为污染物类型, 本研究为总氮 (total nitrogen, TN) 和总磷 (total phosphorus, TP); i 为流域内土地利用类型; E_{ij} 为污染物 j 在第 i 类土地利用类型的输出系数; A_{ik} 为第 k 个子流域内第 i 种土地利用类型的面积百分比; α_k 和 β_k 分别为第 k 个子流域内降水因子和地形因子; G_k 为第 k 个子流域非

点源污染输出概率; E_h 表示非点源污染输出计算阈值, 即林地的最大输出系数.

2.3 模型参数计算

2.3.1 动态降水因子

降水时空差异对非点源污染形成与迁移影响显著, 本文动态降水因子 (α_k) 计算需要从时间差异 (α_k^t) 和空间差异 (α_k^s) 两个方面进行考虑^[30, 31], 计算公式如式 (3) 所示:

$$\alpha_k = \alpha_k^t \cdot \alpha_k^s = \frac{R_k^{\text{month}}}{\bar{R}_k^{\text{month}}} \times \frac{R_k^{\text{month}}}{\bar{R}^{\text{month}}} \quad (3)$$

式中, α_k 为第 k 个子流域的某月降水因子; α_k^t 和 α_k^s 分别为第 k 个子流域降水因子的时间差异因子和空间差异因子; R_k^{month} 和 $\bar{R}_k^{\text{month}}$ 分别为第 k 个子流域的某月降水侵蚀力和月平均降水侵蚀力; $\bar{R}^{\text{month}}$ 为全流域某月降雨侵蚀力. 降水侵蚀力计算参考徐丽等^[32]降水侵蚀力简易计算方法, 计算公式如式 (4) 所示:

$$R = 0.689 \cdot P^{1.474} \quad (4)$$

式中, R 为降水侵蚀力; P 为月降水量. 计算潘家口水库流域 2018 年降水影响因子如图 3 所示. 从中可以看出, 从 4~9 月, 降水因子整体呈现先增后减趋势, 且降水因子空间差异显著, 其中 7 月和 8 月降水因子相对较高.

2.3.2 地形因子

有研究表明^[33], 地形与非点源污染产输存在显著关系, 并采用坡度因子来表示非点源污染由于下垫面起伏而产生的空间差异, 计算公式如式 (5) 所示:

$$\beta_k = S_k^b / \bar{S}^b \quad (5)$$

式中, β_k 为第 k 个子流域的地形因子; S_k^b 为第 k 个

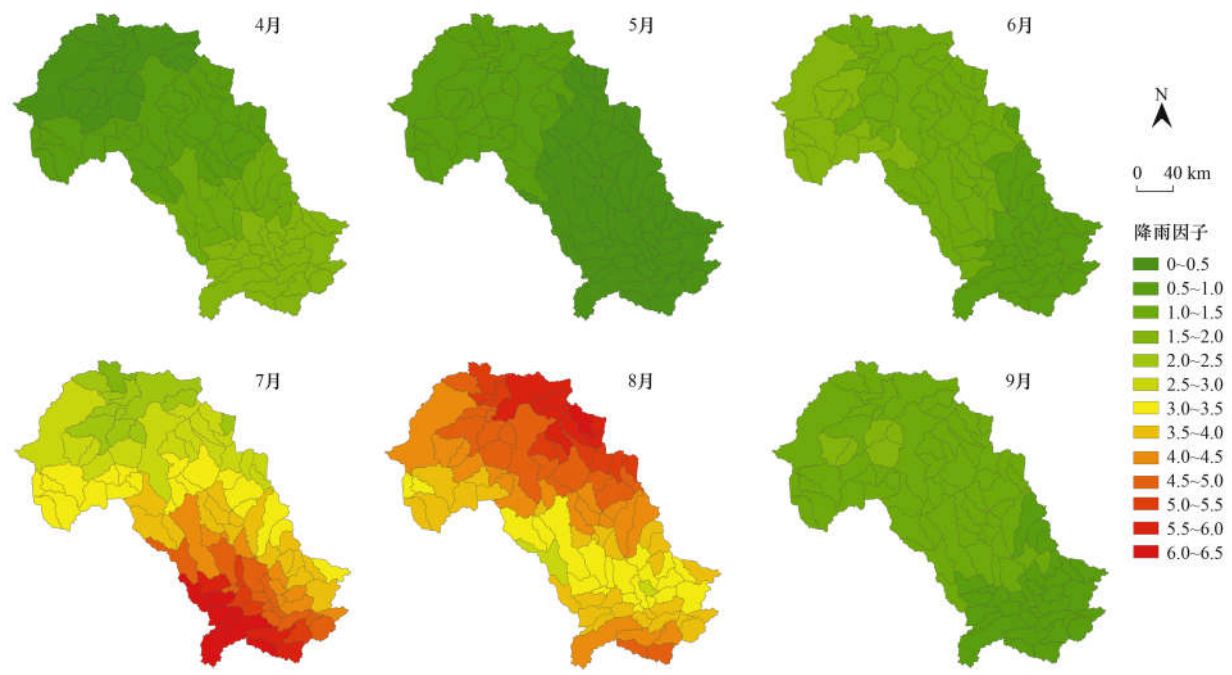


图3 2018年潘家口水库流域降水因子
Fig. 3 Factors of precipitation in Panjiakou Reservoir basin in 2018

子流域的平均坡度; $\bar{S}^b$ 为全流域平均坡度; b 为常数,参考相关非点源污染研究中地形因子计算方法^[34,35],取 $b=0.6104$.计算潘家口水库流域地形因子如图4所示.从中可以看出,潘家口水库流域地形因子取值在0.41~1.50之间,流域上游位于内蒙古坝上高原,地势平坦,所以坡度因子相对较小;中下游以丘陵和山地为主,地貌复杂,坡度因子相对较大.

2.3.3 输出系数

输出系数确定是构建非点源输出风险模型的关键步骤,国内外输出系数确定方法包括野外监测、统计分析和文献查阅.由于研究区监测数据不足,本

文输出系数采用文献查阅方法确定,结合文献^[36]以及国内学者在相似区域的研究成果^[21,37~40],确定非点源污染输出系数(表1).

表1 潘家口水库流域非点源污染输出系数
Table 1 Export coefficients of non-point source pollution in Panjiakou Reservoir basin

项目	土地利用类型				
	耕地	林地	草地	建设用地	未利用土地
TN	29	2.38	10	11	14.9
TP	0.9	0.15	0.2	0.24	0.51

3 结果与分析

目前,非点源污染输出风险并没有明确的等级划分,本文参考方广玲等^[41]对非点源污染输出风险等级划分,以0.2为间隔,将TN和TP污染输出风险概率划分为5个等级,分别为低风险(0~0.2)、较低风险(0.2~0.4)、中风险(0.4~0.6)、较高风险(0.6~0.8)和高风险(0.8~1.0).国内外学者对非点源污染输出风险研究多集中在年尺度,较少对月尺度污染输出风险进行评估,故本文在年尺度和月尺度分别计算了潘家口水库流域非点源污染输出风险,分析研究区非点源污染输出风险时空分布特征.

3.1 年尺度非点源污染风险空间分布

2018年潘家口TN和TP的非点源污染输出风险空间分布如图5所示.总体而言,两种污染物的输出风险均在流域的上游和下游较高,中游较低.结合行政区划和非点源污染输出风险面积统计,从图5(a)可以看出,TN污染输出高风险和较高风险区

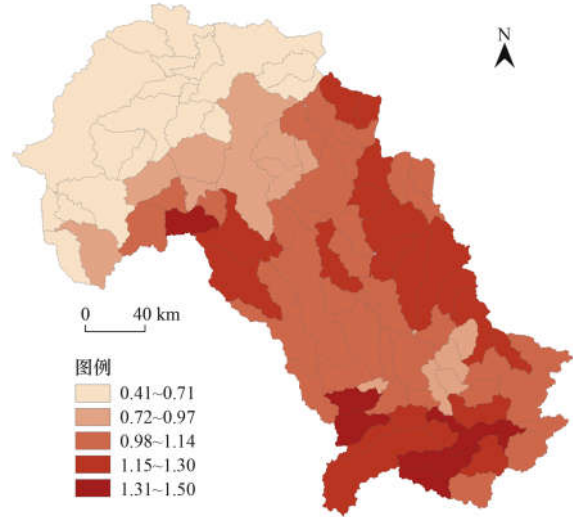


图4 地形因子
Fig. 4 Topographic factor

分别占流域总面积的 23.9% 和 46.7%, 主要分布在流域上游多伦县、围场满族蒙古族自治县西部、沽源县东北部、丰宁满族自治县东部和流域下游的滦平县、鹰手营子矿区、双滦区、宽城满族自治县、兴隆县东北部, 这些区域土地利用方式以产污量较高的耕地和城市为主, 所以非点源污染输出风险相对较高。中风险区主要集中在流域中游, 约占流域总面积的 21.9%, 主要分布在围场满族蒙古族自治县西南部、隆化县、承德县和平泉县西部, 这些区域土地利用方式以林地为主, 村落和耕地分散在整个区域, 虽然林地对污染物有一定拦截能力, 但由于山区坡度较大, 地表径流对污染物迁移能力较高。较低风险和低风险区面积约占流域总面积的 7.5%, 主要集中在流域中游的围场满族蒙古族自治县中部、隆化县东部和承德县东北部, 这些

区域林地占比高, 且多为天然林地, 不需要施肥, 污染物来源较少, 非点源污染风险相应也就较低。

从图 5(b) 可以看出, TP 污染输出无高风险区。较高风险区和中风险区分别占流域面积的 29.4% 和 38.0%, 主要集中在土地利用类型以耕地为主的上游、中游西部和下游城市区, 包括正蓝旗北部、太仆寺旗和沽源县东部、多伦县、围场满族蒙古族自治县西部、丰宁满族自治县、隆化县中部、滦平县东部、兴隆县和宽城满族自治县等。较低风险区主要集中在流域的中游和下游东部区域, 包括围场满族蒙古族自治县中部、隆化县、承德县西部和平泉县西部等, 约占流域总面积的 26.9%。低风险区和无风险区分别占流域总面积的 5.2% 和 0.5%, 集中分布在流域中游东南部, 包括隆化县东部和承德县北部。

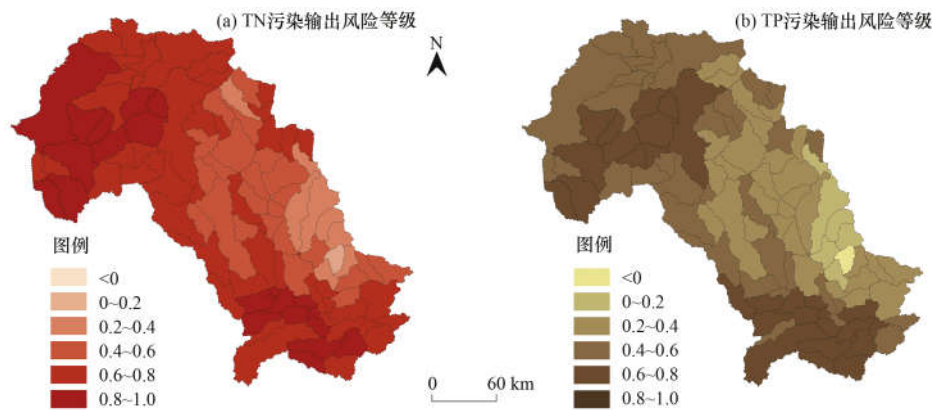


图 5 2018 年潘家口水库流域 TN 和 TP 污染输出风险

Fig. 5 TN and TP pollution output risk of Panjiakou Reservoir basin in 2018

3.2 年内非点源污染风险时空分布

潘家口水库流域 2018 年 4~9 月 TN 和 TP 污染输出风险时空分布如图 6 所示, 污染输出风险等级面积占比统计结果如图 7 所示。结合图 6 和图 7 可以看出, 4 月 TN 和 TP 污染输出的无风险区域均超过全流域面积的一半, 分别达到 60.7% 和 77.9%; 低风险区分别为 9.7% 和 4.2%; 较低风险区和中风险区面积相当, 分别约为 9.1% 和 8.7%; TN 污染输出的较高风险区约为 11.6%, 主要位于流域下游; 两类污染物输出均无高风险区。5 月降水量较小, 污染输出风险相对较低, 流域内污染输出均无较高风险区和高风险区, TP 污染输出仅存在无风险区和低风险区。其中, TN 和 TP 污染输出的无风险区占比分别为 68.4% 和 94.8%, 低风险区占比分别为 5.9% 和 5.2%; TN 污染输出的较低风险区和中风险区分别为 6.6% 和 19.1%。6 月流域汛期开始, 污染输出风险明显高于 4 月和 5 月, 但仍不存在高风险区域。其中, TN 和 TP 污染输出的无风险区域面积明显减少, 分别为 23.4% 和 55.0%; 低风险区、较低风险区、中风险区面积占比分别为

21.2%、16.3%、9.3% 和 14.9%、19.3%、10.8%, TN 污染输出较高风险区约为 29.7%。

潘家口水库流域 2018 年 7 月和 8 月总降水量达到年降水量的 50% 以上, 非点源污染输出风险相应也较高^[38]。其中, 7 月污染输出风险等级均在较低风险以上, TN 和 TP 污染输出的较低风险区、中风险区、较高风险区、高风险区面积占比分别为 0.9%、12.6%、40.0%、46.4% 和 6.0%、36.3%、46.8%、10.9%。流域 TN 污染输出以较高风险和高风险为主, 总面积占比达到 86.4%, TP 污染输出以中风险和较高风险为主, 约占全流域的 83.1%。8 月降水量最大, 相应的污染风险也达到最高, 其中 TN 和 TP 污染输出的中风险、较高风险和高风险区面积占比分别为 3.1%、41.7%、55.2% 和 23.7%、67.4%、7.8%, TP 污染输出的较低风险区约为 1.1%。9 月是流域汛期的最后一个月, 降水量相对于 7 月和 8 月明显下降, 污染输出风险也相应减小, TN 和 TP 污染输出的无风险区、低风险区、较低风险区、中风险区面积占比分别为 17.4%、25.4%、19.1%、10.1% 和 62.8%、7.9%、23.0%、6.2%, TN

污染输出的较高风险区约为 28.0%；其中 TN 各等级污染输出风险面积占比平均为 20%，而 TP 污染输出以无风险区为主，较低风险区次之。

结合图 6 和图 7 分析，总体而言，从 4~9 月 TN 和 TP 污染输出风险呈现先增大后减小，趋势与年内降水量变化一致，这与张婷等^[42]利用 SWAT 模型的模拟结果一致，呈现出“汛期高，非汛期低”的特

点。对比分析不同类型污染物输出风险，发现研究区 TN 污染输出风险均比 TP 高，这与杨金凤等^[43]在海河流域的研究结果一致。分析不同等级污染风险区内主要的土地利用类型，发现以林地为主要土地利用类型的中游，非点源污染输出风险相对较低，而在以耕地和建设用地为主的上游和下游，非点源污染输出风险较高。

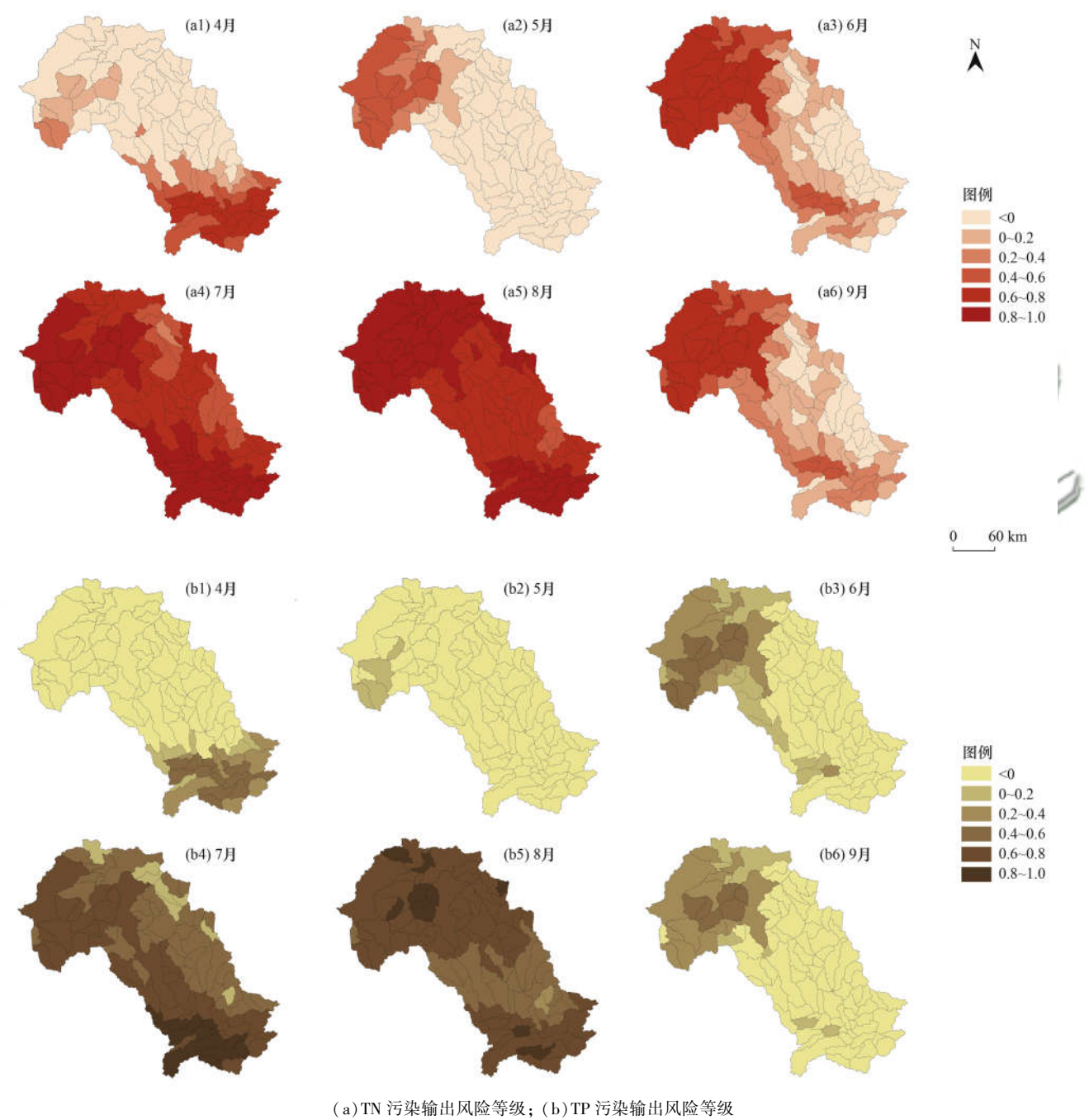


图 6 潘家口水库流域 TN 和 TP 污染输出风险时空分布

Fig. 6 Temporal and spatial distribution of TN and TP pollution output risk of Panjiakou Reservoir basin

4 讨论

充分考虑流域降水和地形的时空差异,运用改进的输出风险模型,评估潘家口水库流域 2018 年非

点源污染输出风险时空分布特征,并结合流域降水分布和农业活动,提出非点源污染防控措施.模型模拟过程中土地利用、降水等数据均来源于高分辨率卫星遥感数据,能够准确得到流域非点源污染风险

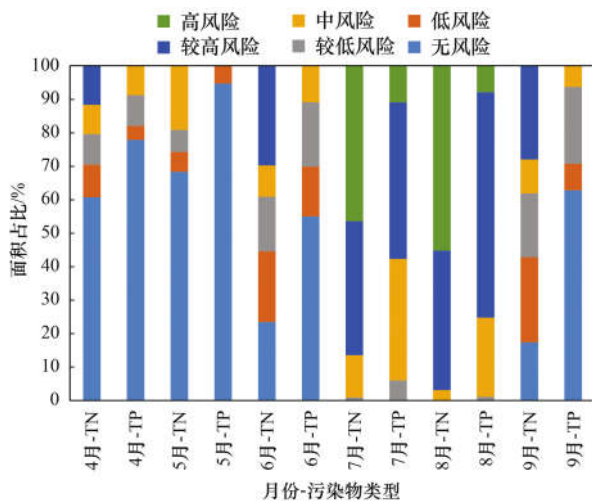


图7 流域非点源污染输出风险等级面积占比

Fig. 7 Proportion of area of non-point source pollution output risk grade in watershed

时空分布特征,合理划分污染风险区.从结果来看,流域内以耕地和建设用地为主的区域污染风险更高,以林地为主的区域风险相对较低,这与大多数流域非点源污染风险评估研究的结论一致^[13,27,40,43].结合潘家口水库流域已有的非点源污染负荷研究,汛期的TN和TP污染负荷输出占到全年的75%以上^[42],相应地在汛期污染输出风险也就越高,这与本文结论中7月和8月污染风险较高一致.

非点源污染受到诸多因素影响,其防控是牵扯到流域综合治理的系统工程,需要根据实际情况,在污染源和污染迁移方面同时进行防控.结合本文和已有潘家口水库流域非点源污染研究^[37,38,44],提出以下非点源污染防控建议:①潘家口水库流域上游非点源污染以农业面源污染为主,污染物来自于农药和化肥流失,所以合理科学的农业管理是非点源污染防治关键.其中,农业化肥流失主要受施肥量、时间和方式等影响,农作物对化肥的吸收能力一般情况下保持不变,所以合理的施肥量可以一定程度上减少污染物的产生量;研究区内年降水集中在6~9月,雨季前的施肥在汛期流失严重,根据已有研究^[45],若将6月底施肥改在月初施用,污染物总量将会下降10%;而深耕施肥相较于播撒施肥方式,也能有效降低化肥等污染物的流失.②合理景观布局,可以一定程度对污染物起到截留作用,在与土地利用规划不冲突的情况下,增加林地和草地等汇景观面积,可以有效降低流域非点源污染^[9].有研究表明,河岸的植被缓冲带可以有效地降低各种污染物进入水体,达到非点源污染防治目的^[46].所以针对流域非点源污染防治,在允许的情况下,合理布局“源”景观和“汇”景观,可提高景观单元内对污染物的消纳和降解能力.考虑到研究区河道周围分布着

大量农田,应避免在河道附近种植化肥施用量较大的农作物,并结合付婧等^[47]对国内外学者关于缓冲带最佳宽度的研究,推荐设置宽度为5m的植被缓冲带,减少近河农田污染物进入水体.

5 结论

(1)潘家口水库流域地形复杂,降水时空差异显著,传统输出风险模型适用性较差,引入降水因子和地形因子对输出风险模型进行改进.研究结果表明,考虑降水和地形的输出风险模型对潘家口水库流域非点源污染输出风险评估更合理.

(2)潘家口水库流域非点源污染输出风险时空差异显著.结合土地利用空间分布分析,以耕地为主的上游和以建设用地为主的下游,非点源污染风险较高;而以林地为主的流域中游,非点源污染风险相对较低.从时间上分析,4~9月非点源污染风险先增后减,在汛期达到最高,与潘家口水库流域年内降水变化趋势相符.

(3)分析潘家口水库流域非点源污染输出风险时空分布特征,可以发现,流域农业非点源污染贡献较高,且在汛期输出风险更高,所以应制定科学的农业管理措施,减少非点源污染物产量.尽可能减少在河道附近种植高污染输出农作物,并设置植被缓冲带.

参考文献:

- [1] 刘庄,晁建颖,张丽,等.中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J].水科学进展,2015,26(3):432-442.
Liu Z, Chao J Y, Zhang L, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 432-442.
- [2] 李华林,张建军,张耀方,等.基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J].环境科学,2021,42(6):2796-2809.
Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, et al. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the upper Beiyun River basin using different weighting methods [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2796-2809.
- [3] 李明龙,贾梦丹,孙天成,等.三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J].环境科学,2021,42(4):1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, et al. Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1839-1846.
- [4] 高晓曦,左德鹏,马广文,等.降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响[J].环境科学,2020,41(10):4564-4571.
Gao X X, Zuo D P, Ma G W, et al. Impact of spatial heterogeneity of precipitation on the area change in critical source area of non-point sources pollution [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4564-4571.
- [5] 王雪蕾,蔡明勇,钟部卿,等.辽河流域非点源污染空间特

- 征遥感解析[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3788-3796.
- Wang X L, Cai M Y, Zhong B Q, *et al.* Research on spatial characteristic of non-point source pollution in Liaohe River basin [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3788-3796.
- [6] Ma X, Li Y, Li B L, *et al.* Evaluation of nitrogen and phosphorus loads from agricultural nonpoint source in relation to water quality in Three Gorges Reservoir area, China [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, **57** (44): 20985-21002.
- [7] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, *et al.* Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978-2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [8] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. 白洋淀流域氮、磷、COD 负荷估算及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 366-376.
- Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Load estimation and source apportionment of nitrogen, phosphorus and COD in the basin of Lake Baiyang[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 366-376.
- [9] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 基于“源-汇”理论的资江下游地区非点源污染风险区划[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(10): 3518-3528.
- Jia Y X, Shuai H, Han L F. Zonation on non-point source pollution risk in the lower reaches of Zijiang River based on the “source-sink” theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(10): 3518-3528.
- [10] 雷能忠, 黄大鹏. 基于 GIS 的农业面源污染风险评估[J]. 中国农学通报, 2007, **23**(12): 381-385.
- Lei N Z, Huang D P. Research on risk assessment of agricultural non-point source pollution with GIS [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, **23**(12): 381-385.
- [11] 张立坤, 香宝, 胡钰, 等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 148-154.
- Zhang L K, Xiang B, Hu Y, *et al.* Risk assessment of non-point source pollution in Hulan River basin using an output coefficient model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 148-154.
- [12] Wu L, Gao J E, Ma X Y, *et al.* Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 10647-10660.
- [13] 荆延德, 张华美, 孙笑笑. 基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(3): 270-274, 278.
- Jing Y D, Zhang H M, Sun X X. Risk assessment of non-point source pollution in Nansihu Lake basin using output coefficient model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(3): 270-274, 278.
- [14] Matias N G, Johnes P J. Catchment phosphorous losses: an export coefficient modelling approach with scenario analysis for water management[J]. Water Resources Management, 2012, **26**(5): 1041-1064.
- [15] Wang G Q, Li J W, Sun W C, *et al.* Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model [J]. Water Research, 2019, **157**: 238-246.
- [16] 刘瑞民, 何孟常, 王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 663-667.
- Liu R M, He M C, Wang X J. Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in upper reach of Daliao River watershed[J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 663-667.
- [17] 田甜, 刘瑞民, 王秀娟, 等. 三峡库区大宁河流域非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(6): 185-190.
- Tian T, Liu R M, Wang X J, *et al.* Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in Daning River of Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(6): 185-190.
- [18] 李子成, 邓义祥, 郑丙辉. 中国湖库水环境质量现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(10): 201-205.
- Li Z C, Deng Y X, Zheng B H. Status quo of aquatic environmental quality of China's lakes and reservoirs: investigation and analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(10): 201-205.
- [19] 李锦时, 李双江, 宋汉卿, 等. 磨盘山水源地污染源解析及防治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2021, **46**(6): 50-55.
- Li J S, Li S J, Song H Q, *et al.* Analysis of pollution sources in Mopanshan water source area and countermeasures [J]. Environmental Science and Management, 2021, **46**(6): 50-55.
- [20] 王洪伟, 王少明, 张敏, 等. 春季潘家口水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及迁移通量[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4284-4293.
- Wang H W, Wang S M, Zhang M, *et al.* Occurrence characteristics and transport fluxes of nitrogen and phosphorus at sediment-water interface of Panjiakou Reservoir in Spring[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(9): 4284-4293.
- [21] 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(4): 265-272.
- Cheng X, Chen L D, Sun R H. Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(4): 265-272.
- [22] 顾晶晶, 冶运涛, 何毅, 等. 河谷盆地型城市扩张的时空与驱动力分析——以兰州市为例[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(19): 8120-8128.
- Gu J J, Ye Y T, He Y, *et al.* Analysis on the spatial-temporal characteristics and driving forces of the expansion of Valley-basin city: takeing Lanzhou as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(19): 8120-8128.
- [23] 顾晶晶, 冶运涛, 董甲平, 等. 滦河流域遥感反演降水产品高精度空间降尺度方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, **19**(5): 862-873.
- Gu J J, Ye Y T, Dong J P, *et al.* A high-precision spatial downscaling method for remotely sensed precipitation data in the Luanhe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, **19**(5): 862-873.
- [24] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 77-88.
- Chen X K, Liu X B, Peng W Q, *et al.* Estimation of and control strategies for pollution loads from non-point sources in the Chenghai watershed[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 77-88.
- [25] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, **183**(3-4): 323-349.
- [26] 张华美. 南四湖流域非点源污染输出风险评估及其对土地利用变化的响应[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2018.
- [27] 许芬, 周小成, 孟庆岩, 等. 基于“源-汇”景观的饮用水源地

- 非点源污染风险遥感识别与评价[J]. 生态学报, 2020, **40**(8): 2609-2620.
- Xu F, Zhou X C, Meng Q Y, *et al.* Remote sensing identification and evaluation of non-point source pollution risk of drinking water source based on "source-sink" landscape [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(8): 2609-2620.
- [28] Cheng X, Chen L D, Sun R H, *et al.* An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(21): 20946-20955.
- [29] 郝桂珍, 宋凤芝, 徐利, 等. 基于输出系数模型的清水河上游农业非点源污染负荷估算[J]. 科学技术与工程, 2020, **20**(33): 13919-13927.
- Hao G Z, Song F Z, Xu L, *et al.* Estimation of pollution loads from agricultural non-point sources in the upstream of Qingshui River based on export coefficient models[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(33): 13919-13927.
- [30] 段扬, 蒋洪强, 吴文俊, 等. 基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算——以嫩江流域为例[J]. 环境保护科学, 2020, **46**(4): 48-55.
- Duan Y, Jiang H Q, Wu W J, *et al.* Estimation of non-point source pollution load based on improved export coefficient model—a case study of Nenjiang watershed[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, **46**(4): 48-55.
- [31] Wang W Z, Chen L, Shen Z Y. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141164.
- [32] 徐丽, 谢云, 符素华, 等. 北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(6): 433-437.
- Xu L, Xie Y, Fu S H, *et al.* Simple method of estimating rainfall erosivity under different rainfall amount of Beijing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, **14**(6): 433-437.
- [33] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, **9**(5): 375-382.
- [34] 胡富昶, 敖天其, 胡正, 等. 改进的输出系数模型在射洪县的非点源污染应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, (6): 78-82, 92.
- Hu F C, Ao T Q, Hu Z, *et al.* Applied research on the improved export coefficient model in non-point source pollution in Shengong County[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (6): 78-82, 92.
- [35] 刘洋, 李丽娟, 李九一. 面向区域管理的非点源污染负荷估算——以浙江省嵊州市为例[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(10): 3938-3946.
- Liu Y, Li L J, Li J Y. Estimation of non-point source pollution load for regional management: a case study of Shengzhou, Zhejiang province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 3938-3946.
- [36] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册-中册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 257-265.
- [37] 王珊. 潘家口水库上游非点源污染输出风险分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, **43**(6): 53-55.
- Wang S. Risk assessment of non-point source pollution export in the upstream of Panjiakou Reservoir[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, **43**(6): 53-55.
- [38] 万超. 潘家口水库上游流域面源污染的模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- Wan C. Study on the simulation of the non-point source pollution in the upstream watershed of the Panjiakou Reservoir [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [39] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(7): 7-12.
- Liu Y Q, Yang Y L, Li F H. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(7): 7-12.
- [40] 时迪迪, 张守红, 王红. 北沙河上游流域潜在非点源污染风险时空变化分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(4): 921-931.
- Shi D D, Zhang S H, Wang H. Risk analysis of spatio-temporal variation of potential non-point source pollution in the upper reaches of the Beisha River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 921-931.
- [41] 方广玲, 香宝, 杜加强, 等. 拉萨河流域非点源污染输出风险评估[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(1): 247-254.
- Fang G L, Xiang B, Du J Q, *et al.* Risk assessment of non-point source pollution export in Lasahe basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(1): 247-254.
- [42] 张婷, 高雅, 李建柱, 等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, **49**(1): 42-49.
- Zhang T, Gao Y, Li J Z, *et al.* Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, **49**(1): 42-49.
- [43] 杨金凤, 冯爱萍, 王雪蕾, 等. 海河流域农业面源污染潜在风险识别方法[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(10): 4782-4791.
- Yang J F, Feng A P, Wang X L, *et al.* An identification method of potential risk for agricultural non-point source pollution in the Haihe River basin [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4782-4791.
- [44] 万超, 张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. 水力发电学报, 2003, (2): 62-68.
- Wan C, Zhang S C. Calculation of non-point source pollution loadings for the Panjiakou reservoir based on GIS [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2003, (2): 62-68.
- [45] Wang W, Xie Y J, Bi M F, *et al.* Effects of best management practices on nitrogen load reduction in tea fields with different slope gradients using the SWAT model [J]. *Applied Geography*, 2018, **90**: 200-213.
- [46] 徐珊珊, 赵清贺, 曹梓豪, 等. 北江干流河岸植被缓冲带景观渗透性时空变化及其影响因素[J]. 资源科学, 2018, **40**(6): 1267-1276.
- Xu S S, Zhao Q H, Cao Z H, *et al.* Spatio-temporal variation in landscape leakiness and the influencing factors in the riparian vegetation buffer zone of the Beijiang River [J]. *Resources Science*, 2018, **40**(6): 1267-1276.
- [47] 付婧, 王云琦, 马超, 等. 植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(2): 1-8.
- Fu J, Wang Y Q, Ma C, *et al.* Research progress on the effects of vegetation buffer zone on reducing agricultural non-point pollution [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(2): 1-8.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)