

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王楠楠 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应

周波^{1,2}, 李晓光², 童思陈¹, 吕旭波², 郭朝臣², 雷坤^{1,2*}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国环境科学研究院水生态环境研究所, 北京 100012)

摘要: 为了制定更有效的氮污染治理措施, 基于辽河流域 2016~2022 年国控断面水质数据, 利用 Spearman 相关性分析和非线性拟合的分析方法并结合 2020 年水文气象和土地利用遥感数据, 对辽河流域的氮素时空分布特征及其对不同尺度下土地利用类型和降雨的响应进行了研究. 结果表明: ①在时间上, 7 年来总氮浓度整体呈上升趋势, 氨氮浓度呈下降趋势. 总氮和氨氮浓度呈明显季节规律, 其中总氮浓度在秋冬季节高, 在春夏季节低; 氨氮浓度在春冬季节高, 在夏秋季节低. ②空间上, 总氮浓度呈西高东低分布; 氨氮浓度呈中间高四周低分布. 汇入支流和上游发源地总氮浓度过高, 可能分别是辽河流域西部小凌河流域和饶阳河流域总氮浓度高的原因. ③农田和城市用地是氮素升高的主要影响因素, 森林对氮素具有净化作用. 土地结构对总氮在小尺度、枯水有更好的解释能力, 而氨氮在大尺度、丰水有更好的解释能力. ④强降雨发生之后, 氮素浓度通常在当天或雨后 1~5 d 内达到峰值. 随着降雨强度的增加, 氮素浓度呈现先增加后减少的趋势.

关键词: 辽河流域; 总氮; 氨氮; 土地利用; 强降雨

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2373-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304262

Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall

ZHOU Bo^{1,2}, LI Xiao-guang², TONG Si-chen¹, LÜ Xu-bo², GUO Chao-chen², LEI Kun^{1,2*}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to develop more effective strategies for controlling nitrogen pollution, this study investigated the spatiotemporal distribution of nitrogen in the Liaohe River Basin and its relationship with land use types and precipitation at various scales. The research was based on water quality data from state-controlled cross-sections within the Liaohe River Basin between 2016 and 2022, employing Spearman correlation analysis and non-linear fitting in conjunction with hydro-meteorological and land use remote sensing data from 2020. Key findings included ① temporal trends: Over the past seven years, there was an overall increase in total nitrogen concentration and a decrease in ammonia nitrogen concentration. Seasonal patterns of total nitrogen and ammonia nitrogen concentrations were evident, with total nitrogen concentrations higher during autumn and winter and lower in spring and summer. However, ammonia nitrogen concentrations were higher in spring and winter and lower in summer and autumn. ② Spatial distribution: Total nitrogen concentrations exhibited a high-to-low gradient from west to east, whereas ammonia concentrations were high in the central region and low in the surrounding areas. Elevated total nitrogen concentrations in the confluences of tributaries and upstream headwaters potentially contributed to the high concentrations of total nitrogen observed in the Xiaoling River Basin and the Rao Yang River Basin. ③ Land use impact: Agricultural and urban land use were significant factors influencing nitrogen concentrations, whereas forests had a mitigating effect on nitrogen levels. The land structure exhibited stronger explanatory power for total nitrogen at smaller scales and under dry conditions, whereas ammonia nitrogen demonstrated better explanatory power at larger scales and in water-rich environments. ④ Precipitation effect: Following intense rainfall events, nitrogen concentrations generally peaked on the same day or within one to five days after the precipitation. As the intensity of rainfall increased, nitrogen concentrations displayed a pattern of increasing before subsequently decreasing.

Key words: Liaohe River Basin; total nitrogen; ammonia nitrogen; land use; heavy rainfall

随着全世界人工氮肥的生产和农田施用, 氮循环加速, 粮食产量大幅增加, 同时也导致陆地和水生系统的富营养化和全球酸化等一系列环境问题^[1]. 水体中的氮以有机态氮、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)以及亚硝态氮(NO₂⁻-N)等多种形式存在, 而 NO₃⁻-N 是最主要的存在形式. 水体中的氮主要来自自然排放和人类活动. 其中自然排放包括大气氮沉降和土壤天然有机氮的矿化^[2], 人类活动排放则包括氮肥的过量生产和使用、畜牧业和污水排放的氨、汽车、飞机和化石燃料发电厂排放的氮氧化物等^[3]. 水体中氮元素的超标会对水环境造成污染, 引发水体赤潮^[4]、大范围的季节性缺氧^[5]、富营养化^[6]和有害藻类大面积暴发等一系列水环境问题, 危害

水生动物和人类健康^[7].

近年来, 随着营养物质排放过多, 水污染加剧, 越来越多的学者开始关注水体中氮污染的影响因素, 并取得了一些研究成果. 例如, Zong 等^[8]利用 SWAT 模型对浑太河流域景观格局对面源污染的影响进行了估算; Jiang 等^[9]定量分析了未来土地利用和气候变化对 NH₄⁺-N 负荷的单独和综合影响; Ebrahimi 等^[10]分析了泥沙浓度对河流氮浓度损失的影响; Liu 等^[11]阐明了氧化/还原条件对水中氮浓度

收稿日期: 2023-04-30; 修订日期: 2023-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101705)

作者简介: 周波(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体氮污染, E-mail: zerob19981001@126.com

* 通信作者, E-mail: leikun@craes.org.cn

的影响; Gao 等^[12]揭示了不同大坝类型在流域水体中对氮转化的影响; 郑淑君等^[13]揭示了水动力扰动对高原山地农村沟渠底泥氮营养盐释放的影响; 林玉清等^[14]对莫愁湖蓝藻暴发对水体中营养盐的浓度的影响进行研究, 发现蓝藻暴发期间总氮(TN)浓度急剧升高; Jiang 等^[15]研究调查了大气沉降对湖泊营养水平的影响; Shou 等^[16]探究了降雨变化对华北半干旱地区河流和水库的 TN 的影响. 除此之外, 施肥强度^[17]、植被^[18]和地貌^[19]等也是影响水体中氮浓度的因素. 基于上述研究成果, 水体中氮浓度的影响因素众多, 其中土地利用和降雨强度是影响水体中氮素污染的主要因素.

自 2016 年以来, 辽河流域水生态环境质量不断改善, 但氮污染仍比较突出. 因此, 探究辽河流域氮污染的分布特征, 揭示流域氮污染变化的主要驱动因素变得十分重要. 本文利用国控断面水质监测数据和自动监测站水质数据, 结合土地利用类型数据和降雨数据, 分析了辽河流域 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的时空分布特征, 探究了不同空间尺度下土地利用类型及降雨强度对氮素浓度的响应关系, 以期为辽河流域土地规划、水质监测和治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与数据处理

研究区域位于辽宁省辽河流域 ($38^\circ 42' \sim 43^\circ 48' \text{N}$, $119^\circ 24' \sim 125^\circ 22' \text{E}$), 流域包括大辽河、浑河、太子河、辽河(辽宁省部分)、大凌河和小凌河等入海河流水系. 研究区域按照三级流域划分, 可划分为沿渤海西部诸河、柳河口以上、柳河口以下、辽东沿黄渤海诸河、太子河及大辽河干流和浑河这六大流域, 见图 1. 辽河流域地势由北向南, 由东西两侧向中部辽河平原倾斜. 此外, 辽河流域重要的气候特征是温带大陆性季风气候, 其降水的时空分布极不均匀. 在本溪和沈阳一带, 年均降雨量高达 700~800 mm, 而往西北因受长白山脉阻隔, 降雨递减, 到西辽河流域的上游地区, 年降水只有 300~350 mm^[20]. 降水主要集中在 7~8 月, 占全年降水量的 50% 以上, 且易以暴雨形式出现, 暴雨历时短, 雨量集中. 此外, 降水的年际变化也较大, 有连续数年多水或少水交替的现象. 该流域的土地利用类型主要包括森林、农田、城市用地、草地和水域等, 而灌木、荒地和湿地面积占比不足 1%.

1.2 数据来源及处理

本研究采用的数据包括氮素浓度监测数据、土地利用类型数据和降雨数据.

本文系统收集了 2016~2022 年辽宁省辽河流域

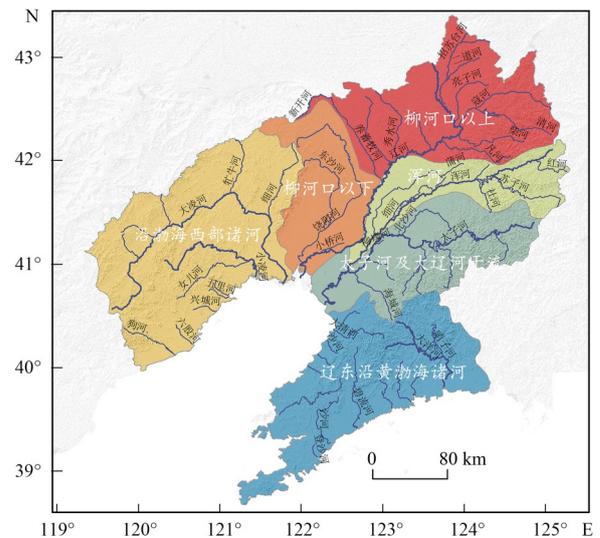


图 1 辽宁省辽河流域水系和各流域分布示意

Fig. 1 Schematic of the water system and distribution of each river basin in the Liaohe River Basin of Liaoning Province

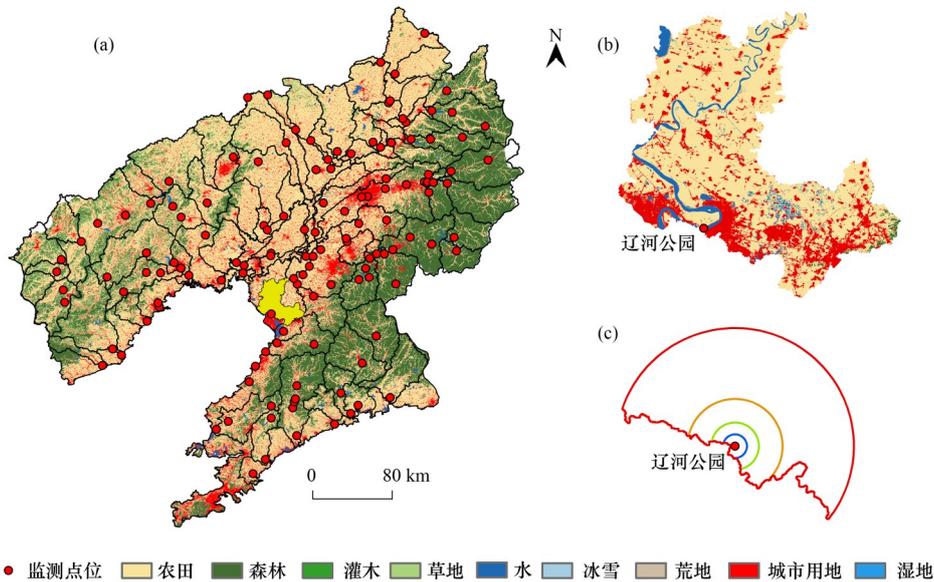
的 133 个国控断面氮素月度浓度及 2020 年 4 个典型断面的自动监测站每 4 h 氮素浓度监测数据, 其中氮素指的是 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 4 个典型断面分别为: 山区支流——南太子河入库口断面、平原支流——凡河一号桥断面、大流域干流, 北杂木断面和小流域干流——麦家断面. 利用 ArcGIS 中的 ArcHydro 模块和 ArcSWAT 插件, 基于地理空间云 (<http://www.gscloud.cn>) 的 30 m DEM 数据进行子流域的划分, 最终将研究区域划分成 107 个子流域, 如图 2(a) 所示.

土地利用类型数据采用 2020 年武汉大学中国土地覆盖数据集 (CLCD) 中 30 m \times 30 m 分辨率的土地利用数据, 该数据基于谷歌地球引擎 (GEE) 上所有可获得的地球卫星数据, 构建时空特征, 结合随机森林分类器得到分类结果. 最终将研究区域划分为农田、森林、草地、水域、城市用地、灌木、荒地和湿地. 同时, 鉴于辽河流域面积过大, 本文在每个监测点位的中心创建了 500 m、1 km、2 km、5 km 和 10 km 的圆形缓冲带, 然后沿着子流域边界进行裁剪. 133 个断面中, 以辽河公园断面为例, 子流域和缓冲带的划分如图 2 所示.

降雨数据从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 获取辽宁省 21 个气象站 2020 年的日降雨量数据. 利用 21 个气象站点生成泰森多边形, 将气象站点的雨量数值赋值到泰森多边形内的水质断面中. 泰森多边形是将所有气象站连成锐角三角形, 并将各边的垂直平分线连接成多边形, 此多边形内的气象站数据代表这个区域内的气象数据^[21]. 根据国家标准降水量等级 (GB/T 28592-2012) 和相关研究, 将降雨按照 12 h 降雨量分为: 小雨 (<5

mm)、中雨(5~15 mm)、大雨(15~30 mm)、暴雨(30~70 mm)和大暴雨(70~140 mm);按照 24 h 降雨量分为:小雨(<10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)、暴雨(50~100 mm)和大暴雨(100~250

mm)^[22]. 本文参考 Zhang 等^[23]研究强降雨对悬浮颗粒物的影响时对强降雨的定义,结合本研究区域的降雨特征,将日降雨量 40 mm 以上的降雨定义为强降雨.



(a)辽河流域子流域,(b)辽河公园断面子流域,(c)缓冲带分区;(c)以辽河公园断面为例,表示 500 m、1 km、2 km、5 km 和 10 km 缓冲带

图 2 以辽河公园断面为例的缓冲带划分

Fig. 2 Buffer zone delineation using the Liaohe Park section as an example

1.3 数据分析

本文对国控监测断面的水质监测数据进行收集、统计和分析,总结研究区域氮素浓度的时空分布特征.通过 Spearman 相关性分析,探究氮素浓度与子流域和缓冲带(500 m、1 km、2 km、5 km 和 10 km)的土地利用类型面积占比之间的相关关系.利用非线性拟合,分析各典型区域在不同降雨强度下 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对降雨的响应关系.采用 ArcGIS 10.6、Microsoft Excel 2019、SPSS 26 和 Origin 2022 等软件完成数据统计与可视化分析.

2 结果与讨论

2.1 流域氮素浓度时空分布特征

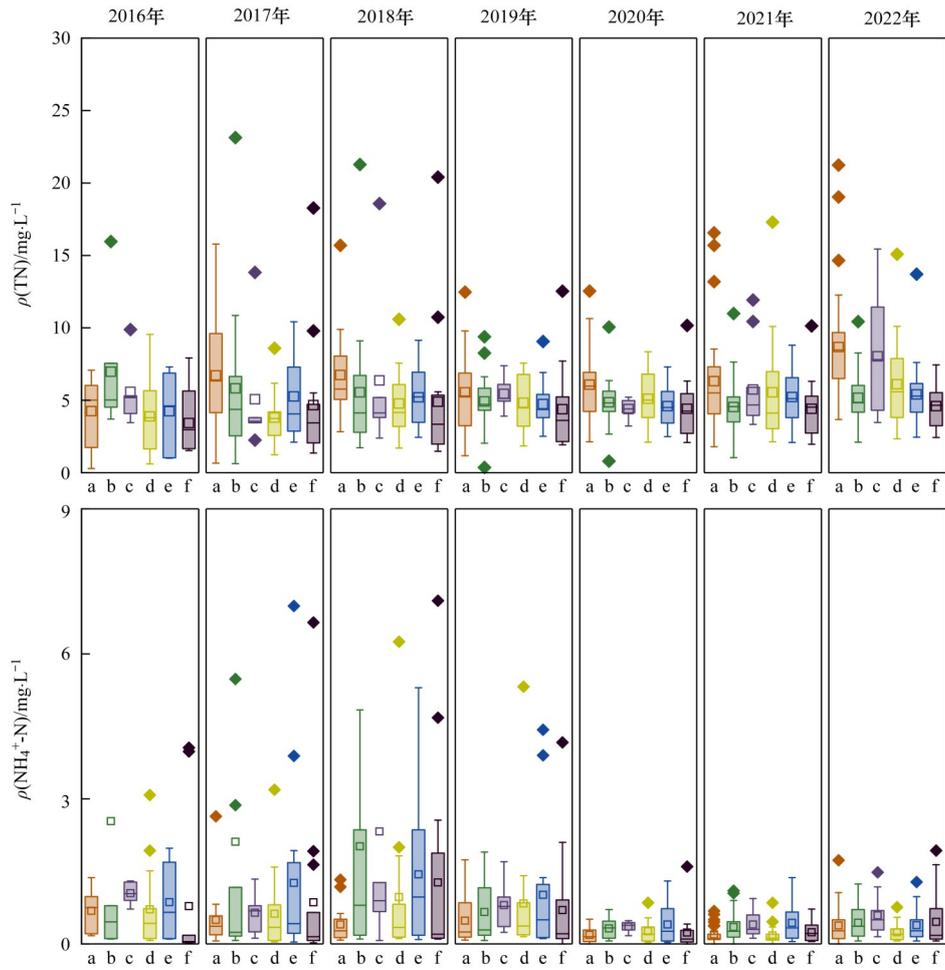
2.1.1 流域氮素浓度年际变化趋势

2016~2022 年辽河流域各三级流域 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度年际变化特征如图 3 所示.结果表明,沿渤海西部诸河、柳河口以上、柳河口以下、辽东沿黄渤海诸河、太子河及大辽河干流和浑河各流域的 TN 浓度整体呈上升趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度先下降后趋于平稳.尤其在 2021~2022 年 TN 浓度上升明显,其中柳河口以下和沿渤海西部诸河流域上升幅度最大,分别为 40% 和 37%,2022 年 $\rho(\text{TN})$ 高达 $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.导致 TN 浓度上升的源头有很多,例如生活污水、农业化肥、工业废水以及畜禽养殖等.如何精准

判定辽河流域 TN 浓度升高的来源,是辽河流域水环境保护关注的重点问题. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度年际变化大体分为两个阶段,2016~2020 年呈大幅下降趋势,2020~2022 年呈平稳趋势.与 2016 年相比,2020 年各流域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均下降了 69%,大幅下降的原因可能与辽河流域高氨氮工业废水处理技术的突破有很大关系.近两年来保持平稳趋势,总体浓度低于地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中河流 III 类限制标准($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).不同流域 TN 浓度中,柳河口以下流域的 TN 浓度均值最高,其次是沿渤海西部诸河、太子河及大辽河干流、辽东沿黄渤海诸河、柳河口以上和浑河.而不同流域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值从高到低分别为:柳河口以上、太子河及大辽河干流、柳河口以下、浑河、辽东沿黄渤海诸河和沿渤海西部诸河.

2.1.2 流域氮素浓度季节性变化特征

为更好地了解辽河流域氮素浓度季节性变化特征,本节分析了 2016~2022 年辽河流域各三级流域的氮素浓度四季变化特征,如图 4 所示.辽河流域各三级流域的 TN 浓度呈现出明显秋冬季节高,春夏季节低的“U”型分布特征. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度亦呈现明显季节性变化,但不同的是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在春冬季节浓度较高,而在夏秋季节浓度较低.TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度都在夏季最低,说明一方面雨季大而频繁的降雨径流在一定程度上对河流水体水质起到了稀释缓解作用,



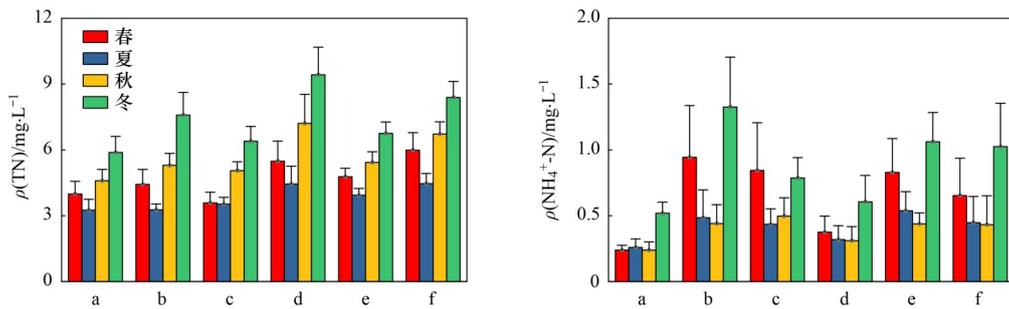
a. 沿渤海西部诸河, b. 柳河口以上, c. 柳河口以下, d. 辽东沿黄渤海诸河, e. 太子河及大辽河干流, f. 浑河

图3 2016~2022年各流域 TN 和 NH₄⁺-N 浓度年际变化

Fig. 3 Interannual variation in TN and NH₄⁺-N concentrations by catchment from 2016 to 2022

另一方面气温升高水体中水生物的繁殖和生长较好, 水体中有机物的氧化分解速度较快, 水体的自净能力较强^[24]. 此外, 有研究表明, 污水处理厂和

工业废水处理池等集中废水处理设施氮处理的效率, 会受春冬季节温度影响, 低温导致 NH₄⁺-N 排放浓度升高^[25].



a. 沿渤海西部诸河, b. 柳河口以上, c. 柳河口以下, d. 辽东沿黄渤海诸河, e. 太子河及大辽河干流, f. 浑河

图4 2016~2022年各流域 TN 和 NH₄⁺-N 浓度季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of TN and NH₄⁺-N concentrations in each watershed from 2016 to 2022

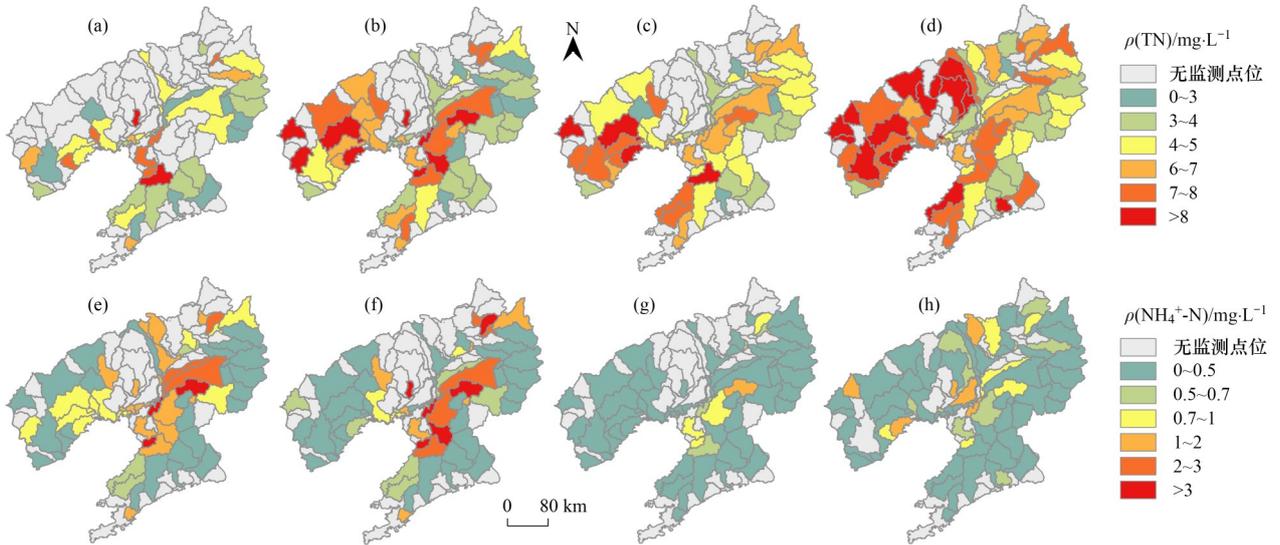
2.1.3 流域氮素浓度空间分布特征

基于 ArcGIS 软件, 将辽河流域 TN 和 NH₄⁺-N 浓度年平均值按照子流域进行可视化(图5). 由图5可知, 4个年份分布特征基本相似, TN 浓度呈现西高东低的空间分布, 且逐年增长; NH₄⁺-N 浓度呈现中

部高、四周低的空间分布, 且逐年减少. TN 浓度高值区主要集中在西部的大凌河和小凌河流域以及辽河平原中部的饶阳河流域; 低值区集中在东部流域. 考虑到不同地区的海拔高度, 可发现平原地区除饶阳河流域外大多为 TN 浓度低值区域. 山区地区

的辽河流域西部多数为 TN 浓度高值区域，但在东部以及辽东湾一带，虽然海拔高度也较高，TN 浓度却偏低，这可能是由于上游地区土壤含氮浓度背景值不同而导致的。2016 年和 2018 年的浑河和太子河

下游流域为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高值区，经过“十三五”的治理，2020 年和 2022 年该区域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降明显，2022 年 70% 断面的 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。



(a)和(e)为2016年,(b)和(f)为2018年,(c)和(g)为2020年,(d)和(h)为2022年

图5 不同年份辽河流域 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the Liaohe River Basin in different years

2022 年辽河流域 25 条河的上游源头和入海(河)口的 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值对比分析结果显示(图 6)，大多数河流的入海(河)口氮素浓度明显高于上游氮素浓度，这与沿程中各种污染源的汇入和闸坝建设等有关。少数河流，如饶阳河和杨柳河上游 TN

浓度明显大于入海(河)口 TN 浓度。女儿河入海(河)口 TN 浓度远远大于上游来水 TN 浓度。蒲河、浑河、北沙河和杨柳河入海(河)口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度远远大于上游 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度，且这 4 条河的入海(河)口断面都集中在农业用水区。

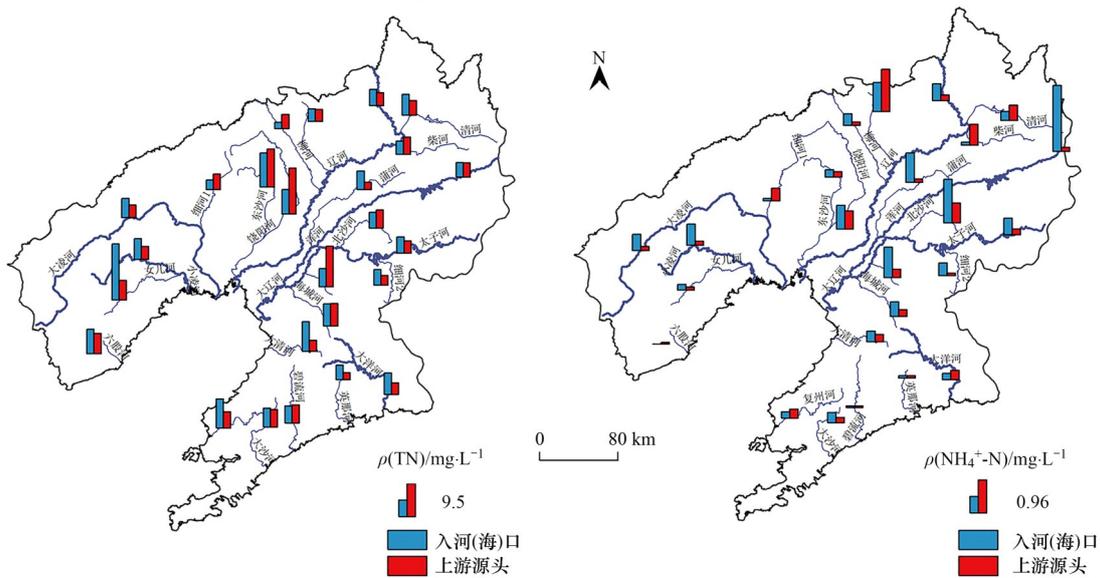


图6 25条河上游源头和入海(河)口 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对比

Fig. 6 Comparison of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations at the headwater sources and sea (river) mouths of 25 rivers

参照上文近年来氮素浓度高值区域，从河流氮素时空分布特征、源头和入海(河)口氮素对比以及水功能区可以合理推断，支流汇入导致近年来小凌

河 TN 浓度升高。女儿河是小凌河最大的支流，在图 6 中显示，女儿河入河口 $\rho(\text{TN})$ 为 $5.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而小凌河的入海口 $\rho(\text{TN})$ 为 $3.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，所以女儿河的

汇入极有可能是小凌河 TN 浓度升高的原因. 饶阳河 TN 浓度过高则是由于上游发源地东白城子断面 TN 浓度过高导致. 这对饶阳河上游源头的氮污染进行来源分析和控制具有重要意义. 蒲河、浑河、北沙河和杨柳河入海(河)口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度过高的原因, 可能是辽宁省农产品肥料主要以铵态氮肥为主. 但本研究只对浓度进行了分析, 后期应结合水量和通量数据, 以及稳定同位素^[26]、三维荧光^[27]和微生物溯源^[28]等其他溯源手段, 对氮负荷的迁移转化特征进行分析, 才能更精准地锁定氮污染的源头.

2.2 不同尺度土地利用结构与氮素浓度的相关性分析

考虑到灌木、荒地和湿地面积在研究区域各类型土地面积中的比重很小, 只占 1% 以下, 故本研究不考虑它们对氮素浓度的影响. 不同尺度的土地利用结构存在较大差异(图 7), 在子流域中, 森林面积占比最大, 达到 32%, 其次是农田面积, 占 30%. 除子流域外, 其他空间尺度下农田面积占比都超过了 50%. 随着缓冲带空间尺度的增大, 森林和草地土地类型的面积比例逐渐增大, 城市用地和水域的面积比例逐渐减小.

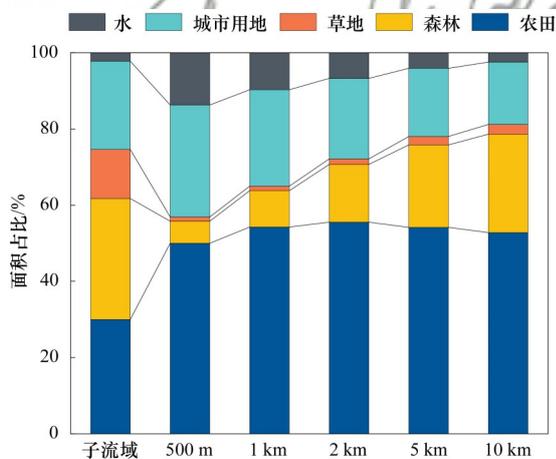


图 7 不同空间尺度土地利用类型面积占比

Fig. 7 Proportion of land use types at different spatial scales

根据辽河流域的水文特征, 将每年分为 5 个时期: 枯水期(1~3月)、春季平水期(4~5月)、丰水期(6~9月)、冬季平水期(10~12月)和全年年均. 图 8 展示了在这 5 个时期内, 不同土地利用类型与 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的相关性.

分析表明, 辽河流域氮素浓度与周边土地利用结构存在较强的相关性, 且在不同空间尺度和不同水期的相关性具有差异性. 农田和城市用地面积占比与氮素浓度呈显著正相关, 而森林和草地面积占比则呈显著负相关, 这与已有研究的结论一致^[29-31]. 对于 TN 浓度而言, 在小尺度缓冲带(500 m 和 1 km)的

枯水期、秋季平水期以及年均时期, 与农田呈显著正相关. 这是由于农业化肥和杀虫剂的广泛使用导致氮的输入增加^[32]. 但丰水期却没有显著相关性, 因为丰水期频繁的降雨和径流会对水质产生稀释作用^[33], 从而减弱了 TN 浓度与农田的相关性. 随着空间尺度的增大, 这种显著正相关性逐渐减小直至消失, 说明在小尺度上农田是导致 TN 浓度升高的主要原因. 森林与 TN 浓度在 500 m、1 km 以及 2 km 缓冲带尺度呈显著的负相关, 说明森林对污染物具有拦截的作用^[34], 是水体污染的“汇”. 但这种相关性随着空间尺度的增大逐渐减弱, 与农田类似. 在该区域, 草地和水域面积占比小, 与 TN 浓度没有显著的相关性. 但与城市用地在 2、5 和 10 km 缓冲带以及子流域尺度呈显著正相关, 这与人类活动排放的生活污水、粪便以及工业废水等有关^[35]. 综上, 土地利用类型大多在小尺度和枯水期对 TN 浓度变化有更好的解释性.

与 TN 浓度相比, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对土地利用类型的响应更为显著. 在除 500 m 缓冲带尺度外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与农田在其它空间尺度都呈显著正相关; 与森林在所有时期、所有空间尺度呈显著负相关; 与草地在 500 m、1 km 和 2 km 缓冲带空间尺度的春季平水期和丰水期呈显著负相关; 与水域没有显著相关性; 与城市用地在 500 m、1 km 和 2 km 缓冲带尺度上没有相关性, 但在大尺度缓冲带(5 km 和 10 km)以及子流域尺度几乎全时期呈显著正相关. 可见, 土地利用类型在大尺度和丰水期对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化有更好的解释性.

综上, 农田和城市用地是辽河流域主要的氮污染源. 相较于其他土地类型, 农田单位面积的污染程度更高. 有研究表明, 农田土壤更容易产生径流, 径流率是其他土地类型的 10 倍, 也更容易产生氮污染, 农田土壤中氮流失量比森林、灌木和植树造林土地的土壤高 3 倍以上^[36]. 此外, 农田种植过程中大量使用的化肥与农药导致辽河流域氮负荷的增加. 城市用地同样是氮污染的主要来源, 生活污水、工业废水和畜禽养殖等点源污染导致河流污染严重. 有关学者在大辽河流域进行了分析, 结果表明, 点源 TN 负荷可占到 68.3%^[37]. 因此, 科学且合理地规划土地和控制城市用地污染排放是改善辽河流域氮污染的关键.

2.3 降雨对氮素浓度的影响

2.3.1 强降雨对氮素浓度的影响

本研究将南太子河入库口断面、凡河一号桥断面、北杂木断面和麦家断面分别代表典型山区支流、平原支流、大流域干流和小流域干流来分析不

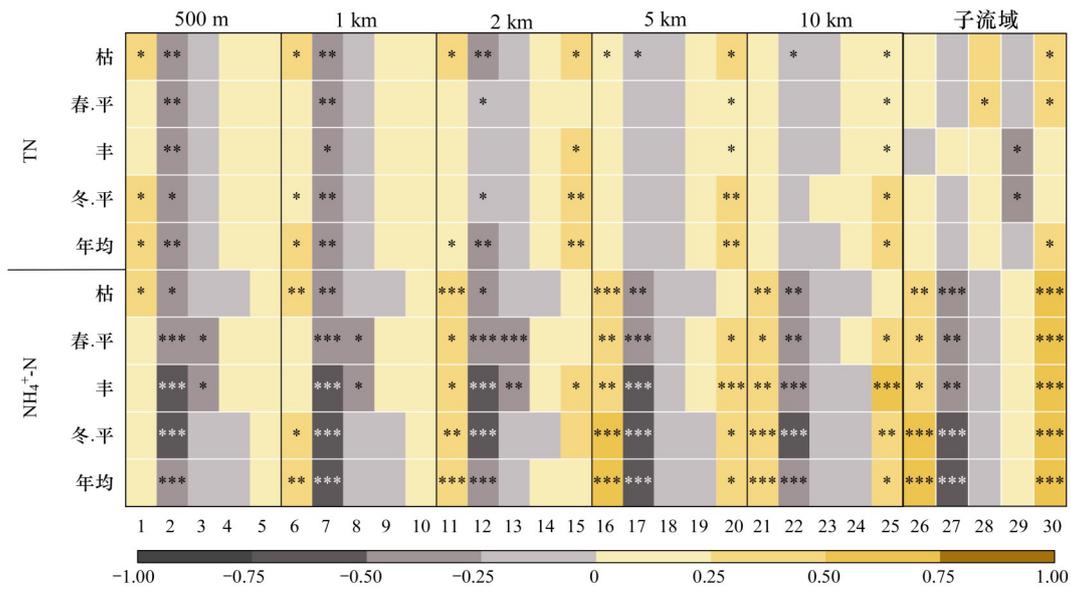


图8 TN和NH₄⁺-N与土地类型相关性
Fig. 8 TN and NH₄⁺-N correlated with land type

同区域对降雨的响应关系. 研究区内山区支流、平原支流、大流域干流和小流域干流这4个典型区域降雨量分布如图9所示. 日降雨量在0.00~165.2 mm波动, 最大值出现在山区支流的2020年8月13日. 2020年, 山区支流、平原支流、大流域干流和小流域干流累计降雨量分别为1505.7、888.7、960.6和854.8 mm. 累计降雨天数分别为118、89、95和

64 d, 其中强降雨分别出现9、5、6和8 d, 分别占降雨天数的7.63%、5.62%、6.32%和12.5%, 累计降雨量分别为703.6、313.3、339.4和416.7 mm, 分别占总雨量的46.73%、35.25%、35.33%和43.38%. 由此可见, 虽然强降雨天数少, 但其降雨量在全年累计降雨量中占比很高, 因此需重视强降雨的影响.

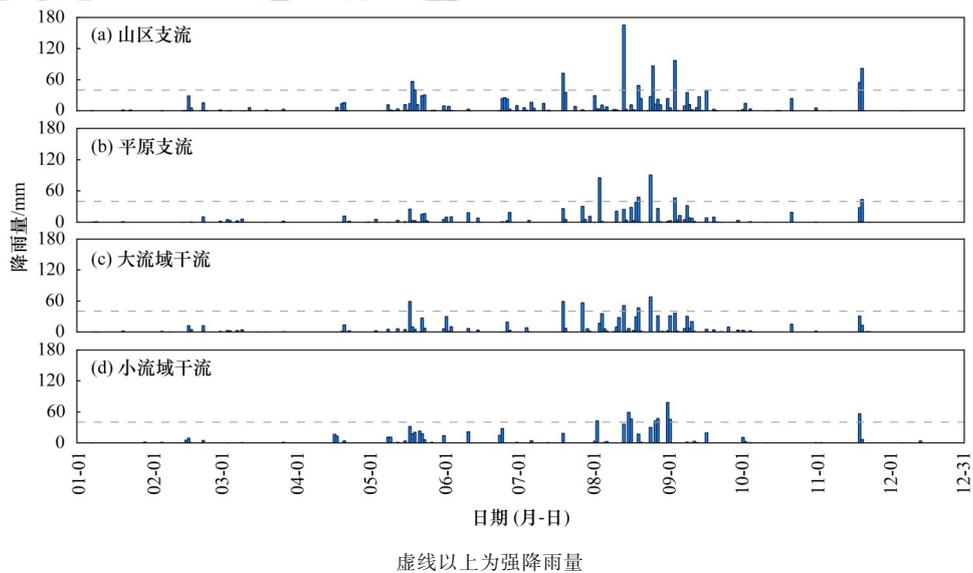


图9 2020年4个典型区域日降雨量分布
Fig. 9 Distribution of daily rainfall in four typical regions in 2020

本研究期间, 由于5场降雨日前后相连, 因此将4个典型区域划分为23场强降雨事件, 其中山区支流发生了7次, 平原支流发生了5次, 大流域干

流发生了6次, 小流域干流发生了5次. 夏季是强降雨最频繁的季节, 占70%, 春季和秋季分别发生了2次和5次强降雨, 冬季没有强降雨事件.

图 10 和图 11 展示了 4 个典型区域水体氮素浓度的日变化情况. 可以发现氮素浓度对强降雨的响应具有一定的滞后性, 往往在强降雨后当日或 1~5 d 内出现峰值, 极少数在强降雨后第 6~9 d 和第 13 d 出现峰值, 大约一周后会恢复到降雨前水平^[38], 这

与太湖平原河网地区的研究结果相似^[39]. 强降雨事件中, 径流中硝态氮主要来自陆地表面径流冲刷和大气沉降, 氮肥是地表径流的主要贡献者^[40]. 降雨在径流初期时氮素浓度会达到峰值, 这与农业面源污染流失程度有关^[41,42].

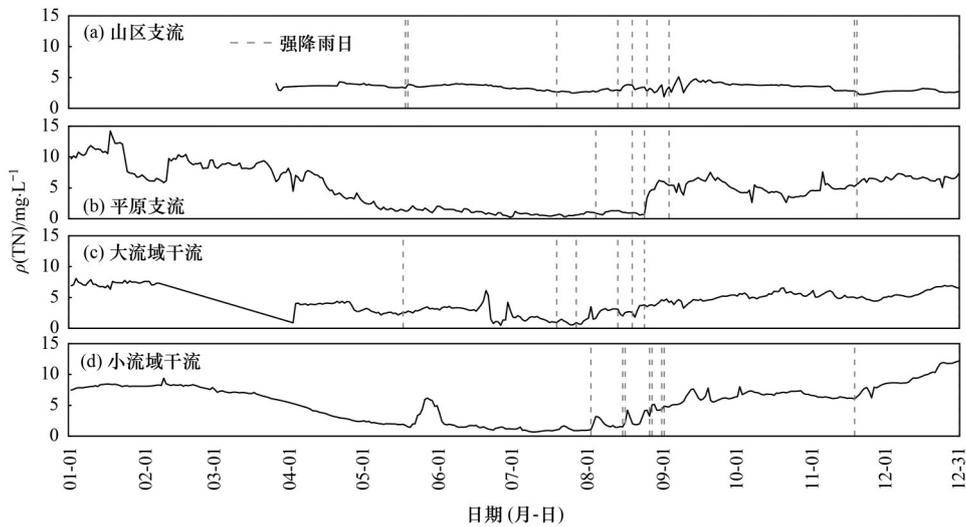


图 10 2020 年典型区域 TN 浓度逐日变化

Fig. 10 Day-to-day variation in TN concentration in a typical region in 2020

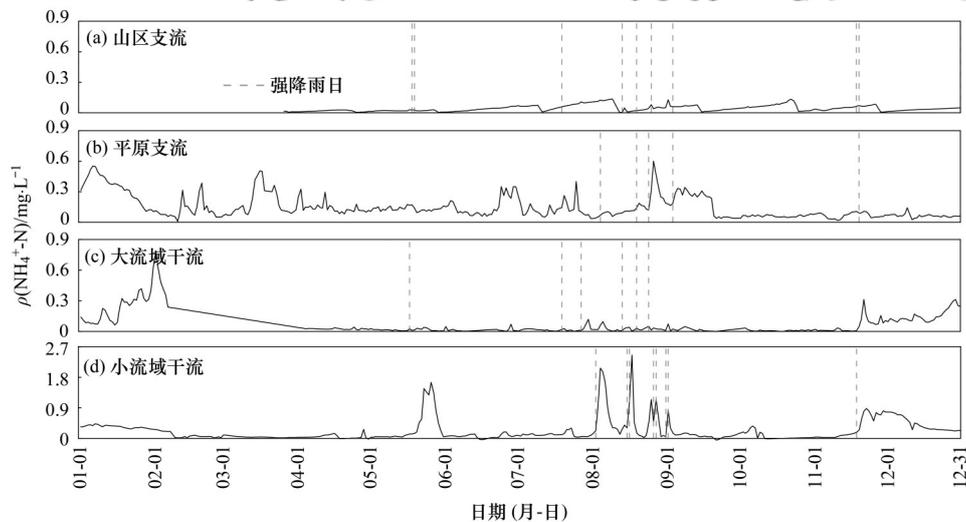


图 11 2020 年典型区域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐日变化

Fig. 11 Day-to-day variation in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in a typical region in 2020

汛期强降雨对氮素浓度的影响大于非汛期, 7~9 月氮素浓度对强降雨的响应程度远远大于 5 月和 11 月. 在氮素浓度对降雨的响应方面, 山区支流比平原支流更加稳定, 这可能与平原地区农耕面积大和氮肥输入量大有关. 强降雨事件中, 山区支流的 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值分别升高了 23.26% 和 117.83%; 而平原支流的 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值分别升高了 188.69% 和 168.65%. 大流域干流比小流域干流在氮素浓度对降雨的响应方面更加稳定, 特别是在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度上表现尤为明显, 这是由于小流域

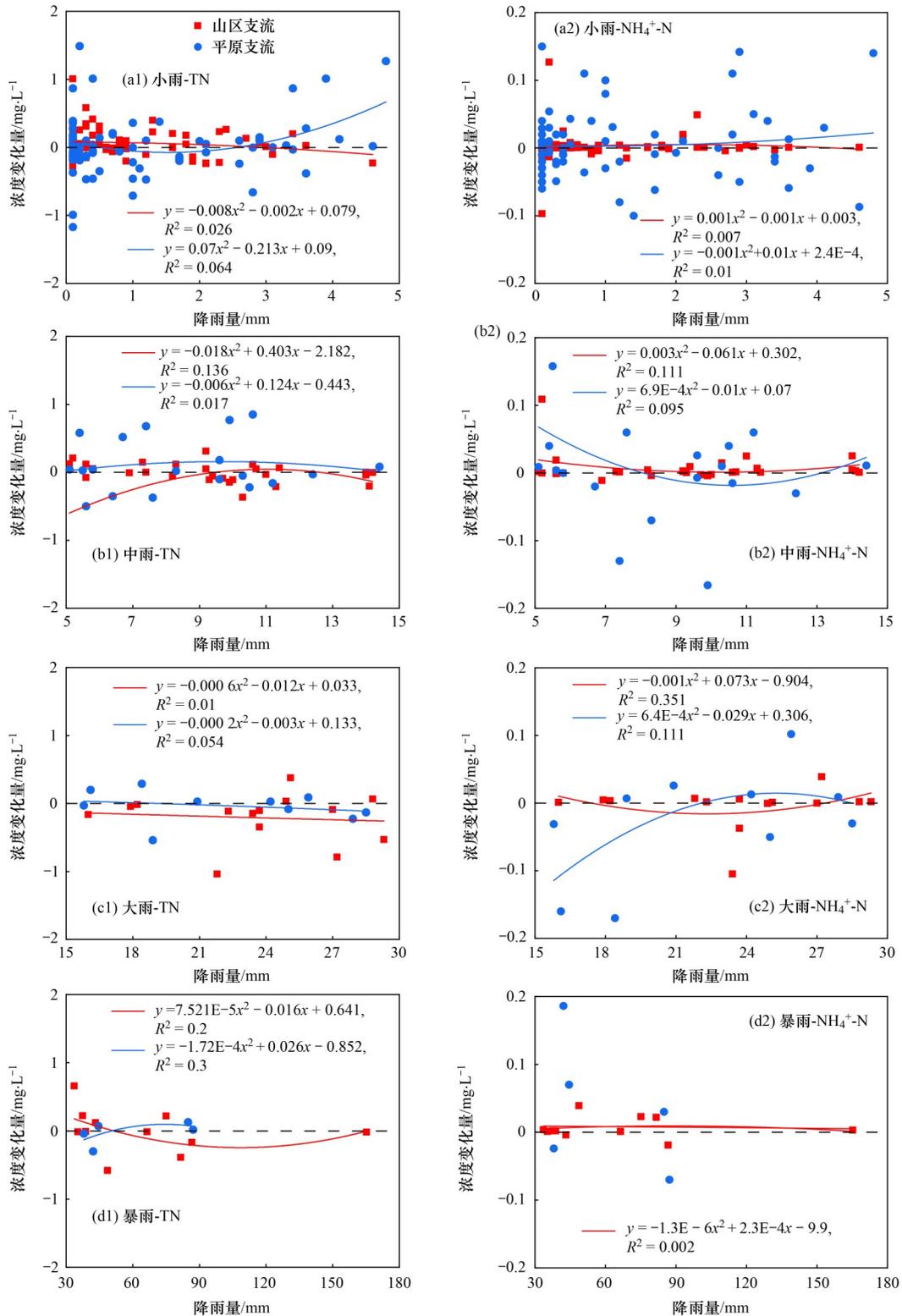
水量小, 氮素浓度容易受到影响. 在强降雨事件中, 大流域干流的 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值分别升高了 65.45% 和 643.18%, 而小流域干流在汛期 5 次强降雨事件中, TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值分别升高了 95.5% 和 788.83%.

2.3.2 不同强度降雨下氮素浓度的变化情况

为了深入探究氮素浓度对不同降雨强度的响应关系, 本节采用半日 (08:00~20:00; 20:00 至翌日 08:00) 水质自动站和气象站监测数据, 以半日为周期, 用降雨后氮素浓度与降雨前氮素浓度的差值表

示氮素浓度在单日降雨内的变化量.以南太子河入库口断面作为山区地区典型断面,凡河一号桥断面

作为平原地区典型断面.如图 12,展示了不同地区在不同降雨强度下氮素浓度的变化情况.



纵坐标为降雨前后浓度变化量

图 12 不同降雨强度下 TN 和 NH₄⁺-N 浓度降雨前后变化量趋势

Fig. 12 Trends in TN and NH₄⁺-N concentrations before and after rainfall at different rainfall intensities

结果表明,小雨强度下,随着降雨量的增加,平原地区的 TN 浓度变化量由负转正并逐渐增加,而 NH₄⁺-N 浓度并无明显规律;山区地区的 TN 和

NH₄⁺-N 浓度变化量大都为正,且随着降雨量的增加,浓度变化量逐渐减少.中雨强度下,平原地区和山区地区的 TN 和 NH₄⁺-N 浓度变化量大多为正.大

雨强度下, 平原地区和山区的 TN 浓度变化量大多为负, 且随着降雨量的增加逐渐增大; 平原地区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化量正负分布分散; 山区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化量基本为 0. 暴雨及以上强度下, 平原地区和山区 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化量大都为正.

综上, 氮素浓度并不是简单地随着降雨强度的增大而增长, 因为降雨对水质的影响不仅有冲刷作用, 还有稀释作用. 小雨强度下, 在雨滴的冲击下, 淹水层被扰动, 导致土壤表层氮被释放并流入水体^[43]. 由于山区地区的土壤表层含氮背景值高, 因此小雨时山区地区的氮素浓度会增大, 但随着降雨量增加, 降雨此时开始稀释氮素浓度. 而在平原地区, 降雨量较小时, 降雨会使 TN 浓度减少, 但随着降雨量继续增大, 径流会将农田和城市中的面源污染冲刷到河流中, 导致浓度增加. 在中雨强度下, 径流携带的氮素负荷增加, 造成氮素浓度持续升高, 此时地表径流以超渗产流为主, 大量溶解态氮被地表径流冲刷流入河道^[44], 因此氮素浓度也随之增加, 此时以冲刷作用为主. 随着降雨强度的增加, 由中雨转为大雨, 表层土壤水分开始饱和, 径流入渗率减小^[45], 冲刷面源污染的能力也降低, 此时氮素浓度开始减少, 且随着降雨量增加氮素浓度减少量增大. 而随着降雨强度的继续增加, 降雨到达暴雨及以上强度, 氮素浓度的增加, 体现了强降雨的短时冲刷作用, 但由于强降雨存在滞后效应, 半日内的氮素浓度变化并没有剧烈增加的现象出现.

3 结论

(1) 2016~2022 年, 辽河流域 TN 浓度整体呈上升趋势, 且近年来迅速增长; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度先下降后趋于平稳. TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现明显的季节规律, 其中 TN 浓度在秋冬季节较高, 在春夏季节较低; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在春冬季节较高, 在夏秋季节较低. 空间分布上, TN 浓度呈现西高东低; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈现中间高四周低的分布特征. 辽宁西部和辽宁中部饶阳河流域是 TN 浓度高值区, 70% 子流域 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 都在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 处于良好水平. 女儿河汇入可能是近年来小凌河 TN 浓度升高的原因. 上游来源污染是饶阳河 TN 浓度过高的主要原因. 蒲河、浑河、北沙河和杨柳河入海(河)口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度过高, 很可能是铵肥使用过度导致.

(2) 辽河流域缓冲带周围土地类型以农田和城镇为主, 这是研究区域氮素升高的主要原因, 而森林、草地对氮污染有净化作用. 因此, 应该采取有效的土地管理措施, 例如限制农田和城市用地的扩张, 增加森林覆盖率等, 以减少氮素的输入, 保护

辽河流域的水资源. 对于 TN, 农田和森林用地在小尺度、枯水期能更好地解释氮素浓度变化; 而对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 农田和城市用地在大尺度、丰水期能更好地解释氮素浓度变化.

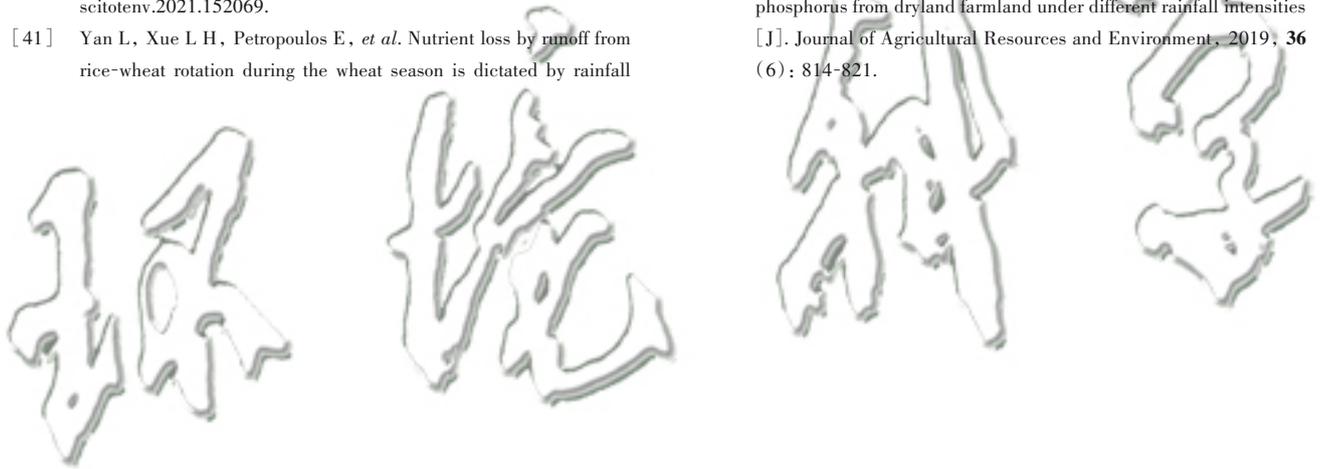
(3) 强降雨会导致氮素浓度在当天或降雨后 1~5 d 内达到峰值, 之后恢复到雨前浓度. 在不同区域、不同降雨强度下, 氮素浓度的响应不同. 降雨带来的冲刷作用和稀释作用共同影响着河流中氮素浓度. 小雨强度时, 降雨对平原地区以稀释为主; 山区以冲刷土壤中的污染物为主. 中雨强度时, 氮素浓度升高, 降雨以冲刷作用为主. 大雨时, 氮素浓度降低, 降雨以稀释作用为主. 暴雨及以上强度下, 氮素浓度有小幅上升.

参考文献:

- [1] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, **451**(7176): 293-296.
- [2] Frick H, Oberson A, Frossard E, *et al.* Leached nitrate under fertilised loamy soil originates mainly from mineralisation of soil organic N[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, **338**, doi: 10.1016/j.agee.2022.108093.
- [3] Boyle E. Nitrogen pollution knows no bounds[J]. *Science*, 2017, **356**(6339): 700-701.
- [4] Medina M, Kaplan D, Milbrandt E C, *et al.* Nitrogen-enriched discharges from a highly managed watershed intensify red tide (*Karenia brevis*) blooms in southwest Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **827**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154149.
- [5] Ji Q X, Frey C, Sun X, *et al.* Nitrogen and oxygen availabilities control water column nitrous oxide production during seasonal anoxia in the Chesapeake Bay[J]. *Biogeosciences*, 2018, **15**(20): 6127-6138.
- [6] Hasler A D, Swenson M E. Eutrophication[J]. *Science*, 1967, **158**(3798): 278-282.
- [7] Zhang W Z, Liu J, Xiao Y X, *et al.* The impact of cyanobacteria blooms on the aquatic environment and human health[J]. *Toxins*, 2022, **14**(10), doi: 10.3390/toxins14100658.
- [8] Zong M, Hu Y M, Liu M, *et al.* Effects of landscape pattern change on water yield and nonpoint source pollution in the Hun-Taizi River watershed, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(9), doi: 10.3390/ijerph17093060.
- [9] Jiang J, Wang Z L, Lai C G, *et al.* Climate and landuse change enhance spatio-temporal variability of Dongjiang River flow and ammonia nitrogen [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, **867**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161483.
- [10] Ebrahimi E, Asadi H, Rahmani M, *et al.* Effect of precipitation and sediment concentration on the loss of nitrogen and phosphorus in the Pasikhan River [J]. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2022, **71**(2): 211-228.
- [11] Liu Z J, Wang X H, Jia S Q, *et al.* Multi-methods to investigate spatiotemporal variations of nitrogen-nitrate and its risks to human health in China's largest fresh water lake (Poyang Lake) [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **863**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160975.
- [12] Gao Y, Zhang W L, Li Y, *et al.* Dams shift microbial community assembly and imprint nitrogen transformation along the Yangtze

- River [J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116579.
- [13] 郑淑君, 王铁运, 刘云根, 等. 水流扰动强度对高原山地农村沟渠底泥氮释放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38** (8): 1076-1083.
- Zheng S J, Wang T Y, Liu Y G, *et al.* Effect of flow disturbance intensity on nitrogen release from bottom muddy of plateau rural ditches [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38** (8): 1076-1083.
- [14] 林玉清, 焦聪聪, 施鸿昊, 等. 蓝藻暴发对莫愁湖水体和沉积物营养盐的影响[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(2): 1-11.
- Lin Y Q, Jiao C C, Shi H H, *et al.* Effects of algae blooms on nutrients in the water and sediments of Mochou Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(2): 1-11.
- [15] Jiang X Y, Gao G, Deng J M, *et al.* Nitrogen concentration response to the decline in atmospheric nitrogen deposition in a hypereutrophic lake [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **300**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118952.
- [16] Shou C Y, Tian Y, Zhou B, *et al.* The effect of rainfall on aquatic nitrogen and phosphorus in a semi-humid area catchment, Northern China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19** (17), doi: 10.3390/ijerph191710962.
- [17] Jayasiri M M J G C N, Yadav S, Dayawansa N D K, *et al.* Spatio-temporal analysis of water quality for pesticides and other agricultural pollutants in *Deduru Oya* River Basin of Sri Lanka [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **330**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129897.
- [18] Hou L C, Kong W B, Qiu Q, *et al.* Dynamics of soil N cycling and its response to vegetation presence in an eroding watershed of the Chinese Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, **336**, doi: 10.1016/j.agee.2022.108020.
- [19] Lin X D, Yu S, Yang D W, *et al.* Discriminating surface soil inorganic nitrogen cycling under various land uses in a watershed with simulations of energy balanced temperature and slope introduced moisture [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **587**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124950.
- [20] 李良冬, 高鹏, 穆兴民, 等. 辽河流域降雨侵蚀力的时空变化分析[J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(2): 69-73.
- Li L D, Gao P, Mu X M, *et al.* Spatial-temporal varieties of rainfall erosivity in the Liaohe River Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, **7**(2): 69-73.
- [21] 杨晓高, 郝虎, 赵传燕, 等. 黑河上游天涝池流域生长季降雨和气温对河川径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(4): 263-269.
- Yang X G, Hao H, Zhao C Y, *et al.* Effects of rainfall and temperature on river runoff during growing season in Tianlaochi catchment in the upper reaches of Heihe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 263-269.
- [22] 白雨诗, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地沟谷不同坡位土壤水分特征及对降雨过程的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29** (10): 2261-2273.
- Bai Y S, Liu M X, Yi J, *et al.* Response of soil moisture to precipitation in different slope areas in typical hill slope of the Three Gorges Mountain area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29** (10): 2261-2273.
- [23] Zhang Y L, Shi K, Zhou Y Q, *et al.* Monitoring the river plume induced by heavy rainfall events in large, shallow, Lake Taihu using MODIS 250m imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 109-121.
- [24] 周溪滢, 冯威, 杨立群, 等. 西干渠水体污染时空分布特征和影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(S1): 82-87.
- Zhou X Y, Feng W, Yang L Q, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of water pollution in the Xigan Canal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(S1): 82-87.
- [25] 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5047-5055.
- Lian H S, Liu H B, Li X D, *et al.* Characteristics of nitrogen variation and its response to rainfall: a case study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 5047-5055.
- [26] 郭文静, 张东, 蒋浩, 等. 氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3206-3216.
- Guo W J, Zhang D, Jiang H, *et al.* Tracking riverine nitrate sources and transformations in the Yiluo River Basin by nitrogen and oxygen isotopes [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (6): 3206-3216.
- [27] Kim M S, Lim B R, Jeon P, *et al.* Innovative approach to reveal source contribution of dissolved organic matter in a complex river watershed using end-member mixing analysis based on spectroscopic proxies and multi-isotopes [J]. *Water research*, 2023, **230**, doi: 10.1016/j.watres.2022.119470.
- [28] 许又分, 李宗, 刘如钢, 等. 水环境微生物溯源技术的研究和应用进展[J]. *生物技术通报*, 2019, **35**(9): 35-44.
- Xu Y F, Li Z, Liu R Y, *et al.* Advances in research and application of microbial source tracking technology in aquatic environment [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, **35**(9): 35-44.
- [29] Camara M, Jamil N R, Abdullah A F B. Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review [J]. *Ecological Processes*, 2019, **8**(1), doi: 10.1186/s13717-019-0164-x.
- [30] Liu J F, Zhang X, Wu B, *et al.* Spatial scale and seasonal dependence of land use impacts on riverine water quality in the Huai River Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(26): 20995-21010.
- [31] Xu J H, Liu R, Ni M F, *et al.* Seasonal variations of water quality response to land use metrics at multi-spatial scales in the Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(28): 37172-37181.
- [32] Li Y, Mi W J, Ji L, *et al.* Urbanization and agriculture intensification jointly enlarge the spatial inequality of river water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **878**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162559.
- [33] 郭羽羽, 李思悦, 刘睿, 等. 黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(3): 737-748.
- Guo Y Y, Li S Y, Liu R, *et al.* Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(3): 737-748.
- [34] 王鹏, 齐述华, 陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(13): 4326-4337.
- Wang P, Qi S H, Chen B. Influence of land use on river water quality in the Ganjiang Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (13): 4326-4337.
- [35] Bu H M, Zhang Y, Meng W, *et al.* Effects of land-use patterns on in-stream nitrogen in a highly-polluted river basin in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 232-242.
- [36] Ramos M C, Lizaga I, Gaspar L, *et al.* Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils

- with different use and soil hydrological properties[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, **226**, doi: 10.1016/j. agwat. 2019. 105789.
- [37] 翁巧然, 吕旭波, 孙明东, 等. 基于控制单元划分的大辽河流域污染物空间分布及来源解析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13**(1): 171-179.
- Weng Q R, Lyu X B, Sun M D, *et al.* Spatial distribution and source analysis of pollutants in Daliao River Basin based on control unit division [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(1): 171-179.
- [38] 夏妍梦, 李彩, 李思亮, 等. 天津海河氮动态变化对夏季强降雨的响应过程[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 743-750.
- Xia Y M, Li C, Li S L, *et al.* Response of nitrogen dynamic change to heavy rainfall events during summer in Haihe River of Tianjin City[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 743-750.
- [39] 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4970-4980.
- Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4970-4980.
- [40] Zhang P, Chen L, Yan T Z, *et al.* Sources of nitrate-nitrogen in urban runoff over and during rainfall events with different grades [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **808**, doi: 10.1016/j. scitotenv.2021.152069.
- [41] Yan L, Xue L H, Petropoulos E, *et al.* Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j. envpol.2021.117382.
- [42] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2732-2740.
- Wang R J, Gao P, Li C, *et al.* Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2732-2740.
- [43] 严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(12): 2761-2769.
- Yan L, Deng X Z, Xue L H, *et al.* Effects of different rainfall intensities and vegetation coverages on runoff and nitrogen loss from rice fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(12): 2761-2769.
- [44] 包鑫, 江燕, 胡羽聪. 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3316-3327.
- Bao X, Jiang Y, Hu Y C. Characteristics of pollutant dynamics under rainfall-runoff events in the Chaohe River watershed [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3316-3327.
- [45] 王月, 房云清, 纪婧, 等. 不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(6): 814-821.
- Wang Y, Fang Y Q, Ji J, *et al.* The loss of nitrogen and phosphorus from dryland farmland under different rainfall intensities [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(6): 814-821.



CONTENTS

| | |
|---|---|
| Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China | YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869) |
| Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency | ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879) |
| Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition | ZHANG Jiang-yan (1888) |
| Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing | LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898) |
| Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University | CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907) |
| Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing | YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917) |
| Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China | WU Xue-ping (1926) |
| Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities | LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938) |
| Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 | CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950) |
| Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period | YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963) |
| PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter | FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975) |
| Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei | LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983) |
| Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region | BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994) |
| Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City | ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003) |
| Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa | GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011) |
| VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries | WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019) |
| Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes | LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028) |
| Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment | GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039) |
| Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River | WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054) |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang | LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067) |
| Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China | ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080) |
| Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes | MENG Ling-hua (2096) |
| Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin | ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107) |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin | WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118) |
| Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City | LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129) |
| Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network | XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142) |
| Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed | WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150) |
| Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus | QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160) |
| Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects | LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171) |
| Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation | SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185) |
| Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism | LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195) |
| Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar | MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203) |
| Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin | GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211) |
| Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake | YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223) |
| Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River | LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233) |
| Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers | GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246) |
| Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process | HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259) |
| Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area | ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268) |
| Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost | YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280) |
| Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field | YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292) |
| Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics | WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304) |
| Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis | HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313) |
| Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area | ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321) |
| Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model | ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332) |
| Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction | XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342) |
| Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning | ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353) |
| Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity | LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363) |
| Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall | ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373) |
| Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity | ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385) |
| Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil | LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394) |
| Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain | MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406) |
| Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites | ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417) |
| Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou | LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428) |
| Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China | ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440) |
| Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing | LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines | WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461) |
| Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil | LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474) |
| Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems | ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480) |