

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

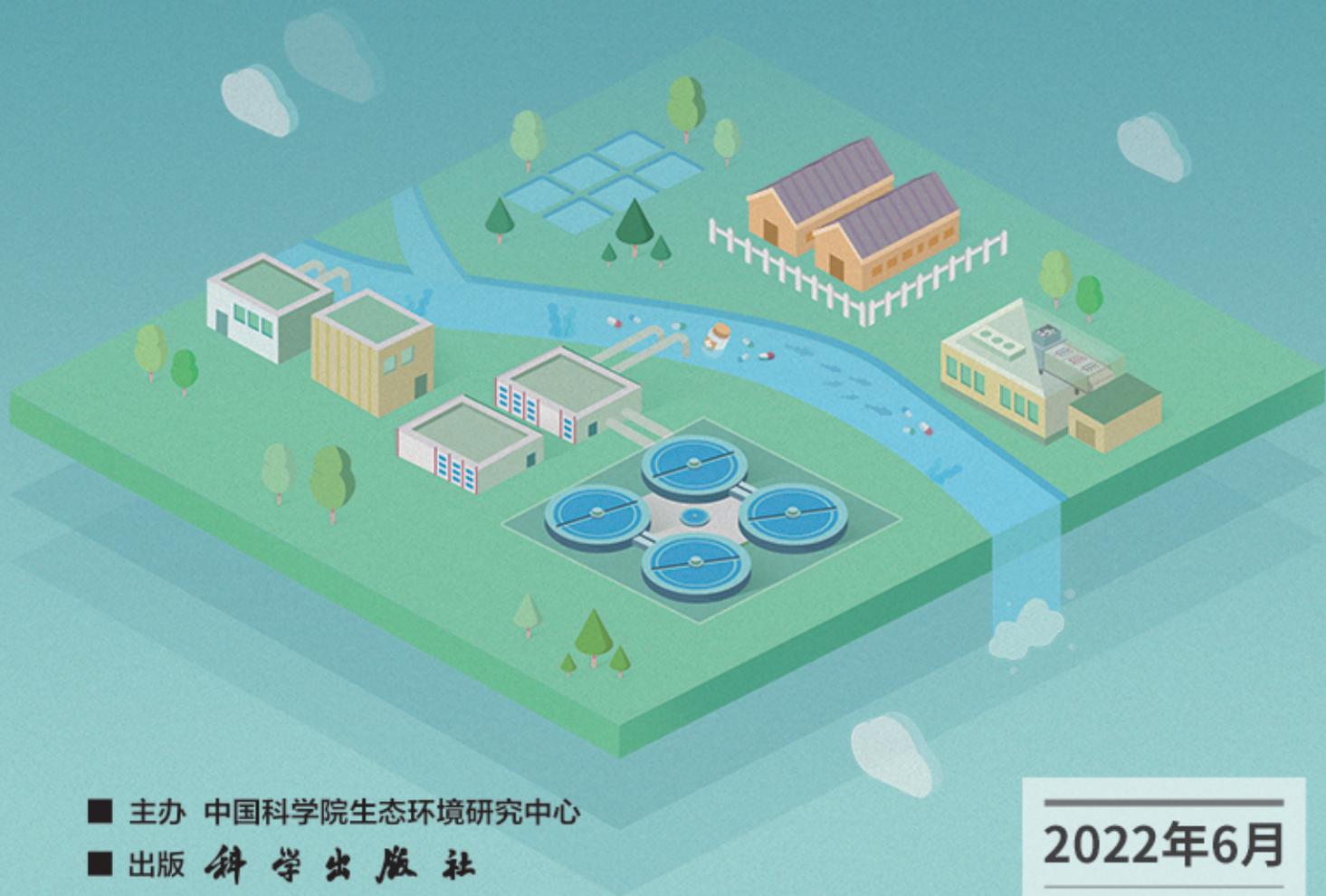
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 ..... 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 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)

运城市区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水-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, 王思璐, 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, 崔景阳, 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, 蒋钟钟, 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, 徐苏士, 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镉的吸附效果与机制 ..... 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化学计量学特征 ..... 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, 田兴鑫, 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)

石灰海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, 杨雪菡, 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)

# 不同尺度土地利用方式对地表水环境的影响及驱动机制

宋静雯<sup>1</sup>, 张学霞<sup>1,2\*</sup>, 姜东旻<sup>1</sup>, 赵丞豪<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 土地利用作为人类活动的重要载体对地表水环境状况有重要影响. 以若尔盖湿地为例, 基于面向对象的土地利用类型遥感解译, 结合水质检测数据, 从小流域和缓冲区尺度, 分析不同尺度土地利用方式对地表水环境的影响及驱动机制. 结果发现: ①若尔盖湿地水质为V类水, 且整体呈现轻度富营养化, 主要污染物为总氮(TN)和总磷(TP), 污染来自生活污水和放牧; ②土地利用方式与地表水环境质量联系紧密, 水体面积占比与化学需氧量(COD)呈现负相关关系、沼泽面积占比与TN呈现正相关关系和TP呈现负相关关系; ③不同尺度土地利用方式与地表水环境存在显著关联性, 1 000 m 缓冲范围内的土地利用方式解释度最高, 200 m 的土地利用方式对COD的解释度最大, 500 m 的土地利用方式对TP和TN的解释度最大, 800 m 的土地利用方式对叶绿素(Chl-a)的解释度最大. 本研究结果表明: 若尔盖湿地对污染物和富营养化有一定的净化作用, 但不同的土地利用方式对不同污染物作用存在差异, 水体对Fe<sup>2+</sup>、COD和Chl-a有净化作用, 沼泽对TP有净化作用但对TN却呈现累积效应. 应控制小尺度(≤1 000 m)的土地利用格局, 对水体和沼泽的面积进行重点管控, 重视提升湿地水域的自净能力, 进一步保护和修复若尔盖湿地地表水环境.

**关键词:** 地表水环境质量; 土地利用; 水体富营养化; 面向对象; 若尔盖湿地

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3016-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108234

## Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism

SONG Jing-wen<sup>1</sup>, ZHANG Xue-xia<sup>1,2\*</sup>, JIANG Dong-yang<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-hao<sup>1</sup>, LI Peng-fei<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory Soil and Water Conservation National Forestry and Grassland Administration Beijing 100083, China)

**Abstract:** As an important carrier of human activities, the spatial type of land use has an important impact on the surface water environment. Taking the Ruogai wetland as an example, based on object-oriented remote sensing interpretation of land use types combined with water quality examination data, this study analyzed the impact and driving mechanism of land use types at different scales on the surface water environment at the small watershed and buffer scale. ① It was found that the water quality of the Ruogai wetland could be classified as water grade V, and it was slightly eutrophic as a whole. The main pollutants were total nitrogen(TN) and phosphorus(TP), and the pollution originated from domestic sewage and grazing. ② The environmental quality of surface water was closely related to land use types. There was a negative correlation between chemical oxygen demand(COD) and the proportion of water area, a positive correlation between TN and the proportion of swamp area, and a negative correlation between total TP. ③ There was a significant correlation between spatial land use types at different scales and surface water environment. The land use type within a buffer of 1000 m had the highest interpretation degree for all factors, the land use type within a buffer of 200 m had the greatest interpretation degree for COD, the land use type within a buffer of 500 m zone had the greatest interpretation degree for TP and TN, and the land use type within a buffer of 800 m had the greatest explanation for Chl-a. The results of this study showed that the Ruogai wetland had a certain purification effect on pollutants and eutrophication. However, different land use types had different effects on different pollutants. The water body had a purification effect on Fe<sup>2+</sup>, COD, and Chl-a, and the swamp had a purification effect on TP but a cumulative effect on TN. Thus, the small-buffer zone(≤1 000 m) land use type should be controlled, the water body and swamp areas should be controlled, the self-purification capacity of wetland waters should be improved, and the surface water environment of the Ruogai wetland should be further protected and repaired.

**Key words:** surface water environment quality; land use; eutrophication of water; body object-oriented; Ruogai wetland

改革开放以来,经济的快速发展和城镇化进程的加快,对中国土地利用空间格局产生了显著影响,成为影响国家生态与环境状况以及区域气候变化的关键原因<sup>[1]</sup>. 基于此,国家提出了黄河流域生态保护和高质量发展等一系列区域发展与生态保护战略措施. 湿地是介于陆地和海洋之间的生态系统,具有涵养水源、调节径流、降解污染、碳储存和保护生物多样性等重要功能<sup>[2,3]</sup>,也是驱动塑造湿地生态系统结构与功能、引起湿地景观动态变化的重要因子<sup>[4]</sup>. 若尔盖湿地处于我国“两屏三带”生态环

境区,每年向黄河源干流补水约 $40 \times 10^8 \sim 50 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,是黄河流域重要的水源涵养区<sup>[5,6]</sup>. 从20世纪中叶开始,人类活动对该区域的干预更为明显,尤其是工业化进程的不断加快,该区域沼泽湿地面积不断下降,水环境也出现明显的污染<sup>[7]</sup>. 针对水源地

收稿日期: 2021-08-22; 修订日期: 2021-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0606100, 2017YFC0504802); 国家自然科学基金项目(52078041)

作者简介: 宋静雯(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为湿地水环境遥感, E-mail: 18222587517@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhangxuexia@bjfu.edu.cn

不同土地利用方式与水质响应关系构建已成研究热点<sup>[8]</sup>。

土地利用方式决定植被类型、农田措施和耕作方式,对水体污染物的输入输出产生影响,进而影响地表水环境。土地利用方式是影响地表水水质的重要变量,了解这些变量与地表水水质之间的关系对于预测污染潜力和发展流域管理实践以消除或减少污染风险至关重要<sup>[9]</sup>。有研究表明,不同尺度下的土地利用类型占比都与地表水环境之间存在一定的响应关系<sup>[10-17]</sup>,但由于各研究区域的地理位置、气候等自然禀赋和人为干扰等因素存在空间异质性,土地利用方式对地表水环境的尺度效应存在很大争议。如:胡琳等<sup>[18]</sup>和项颂等<sup>[19]</sup>的对龙川江和洱海流域的研究认为子流域尺度土地利用对河流水质影响最大,而田皓予等<sup>[20]</sup>和方娜<sup>[21]</sup>等对泰国蒙河和鄱阳湖流域的研究却发现缓冲区尺度的土地利用格局能更好解释水质变化。

湿地水质受到多种土地利用类型和格局的综合影响<sup>[22]</sup>。土地利用方式对地表水环境的影响存在尺度效应,土地利用与生态环境效应的耦合度较低<sup>[23]</sup>是生态环境保护需要重点关注的领域,为保障黄河流域水环境安全,以推动黄河流域生态保护和高质量发展,本研究以若尔盖湿地为例,基于遥感影像解译土地利用类型,结合地表水质检测结果,分析了土地利用方式对若尔盖湿地地表水环境的关系,探究不同尺度土地利用格局对地表水环境的驱动机制,以期为若尔盖湿地地表水环境保护与修复治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

若尔盖湿地位于黄河上游( $E 102.483^{\circ} \sim 102.983^{\circ}$ ,  $N 33.147^{\circ} \sim 34.317^{\circ}$ ),包括黄河两条主要支流黑河和白河<sup>[24]</sup>,属于青藏高原东缘,平均海拔 3 500 m,面积 1 665.70 km<sup>2</sup>。年平均气温为 1.1℃,年降雨量为 630 mm,降水主要集中在 4~6 月<sup>[25]</sup>,蒸发量为 450 mm,为大陆性季风气候<sup>[26]</sup>,地表经常处于过湿状态,气候寒冷湿润,是青藏高原高寒湿地的典型代表<sup>[27]</sup>。地势中间低,四周高,地形以丘状高原和丘间盆地为主<sup>[5]</sup>,若尔盖县独特的地理、地貌和气候条件形成了类型多样和分布复杂的植被群落,以莎草科和禾本科高寒湿生植物为主,是青藏高原重要的优质高寒牧场,同时也是中国青藏高原大型泥炭沼泽地之一,泥炭地分布季节性冻土,每年 9 月中下旬土壤开始冻结,次年 5 月中旬基本解冻,冻土厚度可深至 70 cm<sup>[28]</sup>。主要土地利用类

型有建设用地、水体、沼泽、沼泽化草甸、草甸和零星分布的森林。杜华明<sup>[5]</sup>和田应兵等<sup>[27]</sup>的研究发现:若尔盖境内水体的 pH 值和 Fe<sup>2+</sup> 浓度较高,水体的有机污染较严重,湖泊呈现富营养化趋势。

### 1.2 数据来源及处理

影像数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),包括 ASTER GDEM V2 数字高程数据和 Landsat8 OLI 数据,覆盖研究区域的影像轨道号分别为 130037、131036 和 131037。过境时间为 2020 年 6 月 24 日和 2020 年 8 月 20 日,共 3 期云量低于 10% 的高质量影像。基础地理数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)基于 Arcgis10.6 完成影像预处理工作,并进行土地利用特征提取和空间分析。

依据《国家水质采样技术指导》(HJ 494-2009),于 2020 年 9 月 27 日完成 8 个采样点的水样采集工作(图 1),每个采样点于表层 0.5 m 处取 2 份 500 mL 和 1 份 2 L 的水样,用冷藏保温箱保存带回实验室,PHS-3C 酸度计测定 pH,重铬酸盐法测定 COD,分光光度法测定石油类、Fe<sup>2+</sup>、TN、TP 和 Chl-a 等地表水环境质量指标。

### 1.3 面向对象的土地利用特征提取

参考张雪等<sup>[29]</sup>、甄硕等<sup>[30]</sup>和侯蒙京等<sup>[31]</sup>的地物分类体系,结合若尔盖县湿地分布的具体情况,基于多尺度分割算法,进行影像分割获取对象,结合遥感影像波段合成特征和光谱特征,选择分类样本,采用最近邻分类方法将研究区域的土地利用类型划分为:沼泽、沼泽化草甸、草甸、林地、水体、建设用地和裸地这 7 个地类,本研究分类结果与文献[31, 32]对若尔盖地区的分类结果一致性达到 88.820%。

### 1.4 缓冲区建立及小流域分割

有研究表明,200 m~10 km 缓冲区内不同尺度的土地利用方式对河流和湖泊水环境有显著影响<sup>[19,21,33]</sup>。为探究若尔盖地区不同尺度的土地利用方式对水环境的影响情况,本研究以各个采样点为中心分别提取半径为 200 m、500 m、800 m、1 000 m、1 200 m、1 500 m、2 km、5 km 和 10 km 的缓冲区和 7 个小流域(图 2),并计算不同尺度范围内的土地利用类型的面积占比。

### 1.5 水体富营养化分析

氮磷是藻类生长的主要营养物质,是水体富营养化的显著标志<sup>[34,35]</sup>,同时 Chl-a 也能直接反映水体营养状态水平,是水体富营养化的指示指标<sup>[36]</sup>。COD 是指以化学方法测量水样中能被氧化的还原性物质的量,是一个常用且能较快测定有机物污染

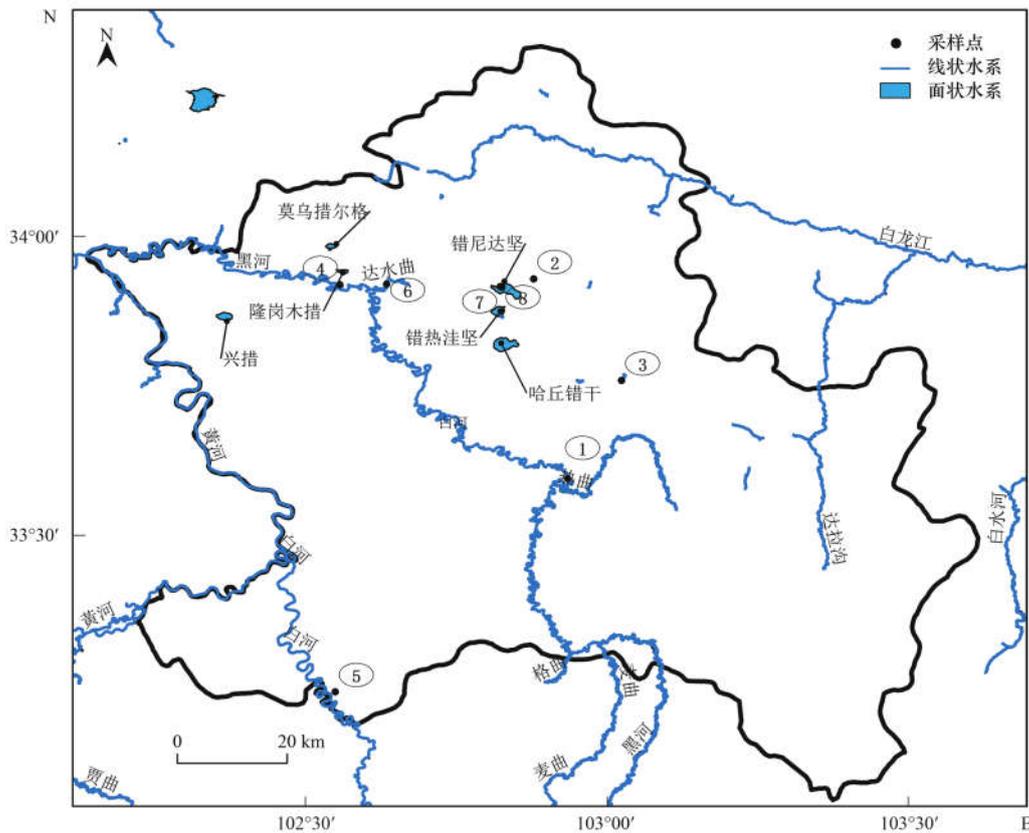


图 1 若尔盖地区水环境采样点空间分布示意  
Fig. 1 Spatial distribution of water environment sampling points in Ruergai area

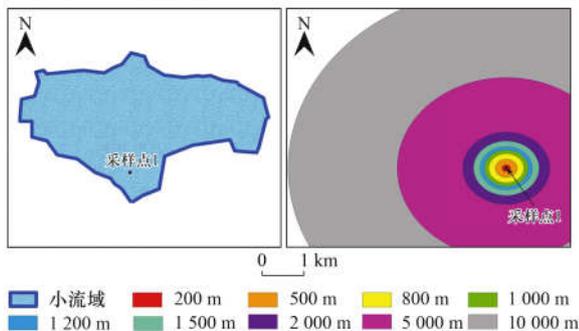


图 2 不同空间尺度示意

Fig. 2 Schematic diagram of buffer zone and small watershed

的参数<sup>[37]</sup>. 目前国内使用较为广泛的富营养化评价方法是中国环境监测总站推荐使用的综合营养状态指数法. 基于 Chl-a、TP、TN 和 COD 等地表水环境质量指标对水体富营养化程度进行评价, 计算公式如下:

$$TLI(\varepsilon) = \sum W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

式中,  $TLI(\varepsilon)$  表示综合营养状态指数;  $W_j$  表示第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重;  $TLI(j)$  表示第  $j$  种参数的营养状态指数;  $r_{ij}^2$  表示第  $j$  中参数与基准参数的相关系数;  $m$  表示评价参数的个数.

营养状态指数公式为:

$$TLI( TP ) = 10 \times ( 9.436 + 1.624 \ln TP ) \quad (3)$$

$$TLI( TN ) = 10 \times ( 5.453 + 1.694 \ln TN ) \quad (4)$$

$$TLI( COD ) = 10 \times [ 5.118 - 1.940 \ln( Chl-a - COD ) ] \quad (5)$$

采用 0 ~ 100 连续数字对水体营养状态进行分级, 指数值越高, 营养程度越高. TLI 指数将水体富营养化分为贫营养、中营养、富营养、轻度富营养、中度富营养和重度富营养这 6 个等级.

### 1.6 统计分析

借助 R 4. 1. 1 对不同空间尺度的土地利用面积占比分别与水环境参数进行冗余分析、多元回归分析和相关性分析. 冗余分析用于表达土地利用方式对多个水环境参数变异的解释能力; 以不同尺度下的土地利用类型面积占比作为解释变量, 各个水环境参数为响应变量构建多元线性回归模型, 模型中的  $R^2$  值代表解释变量对响应变量的解释度; 最后对不同尺度下的土地利用面积占比与各水环境参数进行 Pearson 相关分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用空间格局

基于 2020 年遥感影像, 采用多尺度分割算法和最近邻法结合实现土地利用特征的提取(图 3). 分

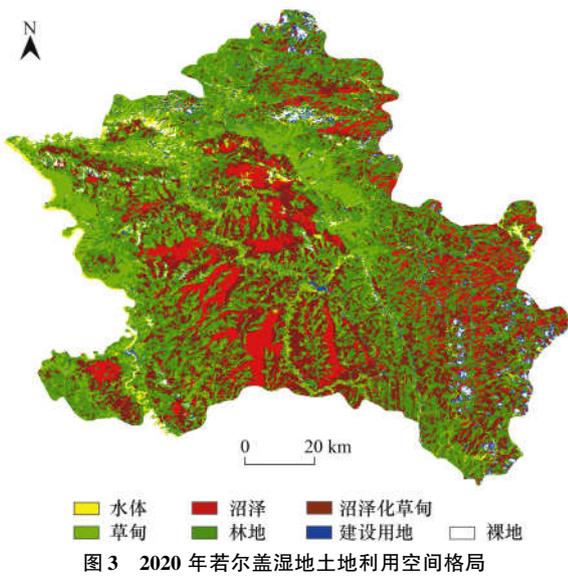


图3 2020年若尔盖湿地土地利用空间格局

析表明在所有的7种地类中,林地在若尔盖地区面积所占比例最大,为42.478%,其次是沼泽化草甸,占比为21.664%,草甸占比为15.604%,沼泽、水体和建设用地占比分别为11.324%、4.335%和2.661%。

缓冲区尺度(图4),随着缓冲范围的增加,林地、草甸、沼泽化草甸和裸地面积占比呈现增加趋势,建设用地、沼泽和水体的面积占比呈现减少态势。

具体地(图5),200 m缓冲范围内,面积占比最大的土地利用类型是水体,占比25.100%,其中在采样点4水体面积占比优势最明显,占该缓冲范围内总面积的54.680%;500~1000 m缓冲范围内,面积占比最大的是草甸,且在采样点4和采样点6占比优势明显;1200~5000 m缓冲范围内,面积占比

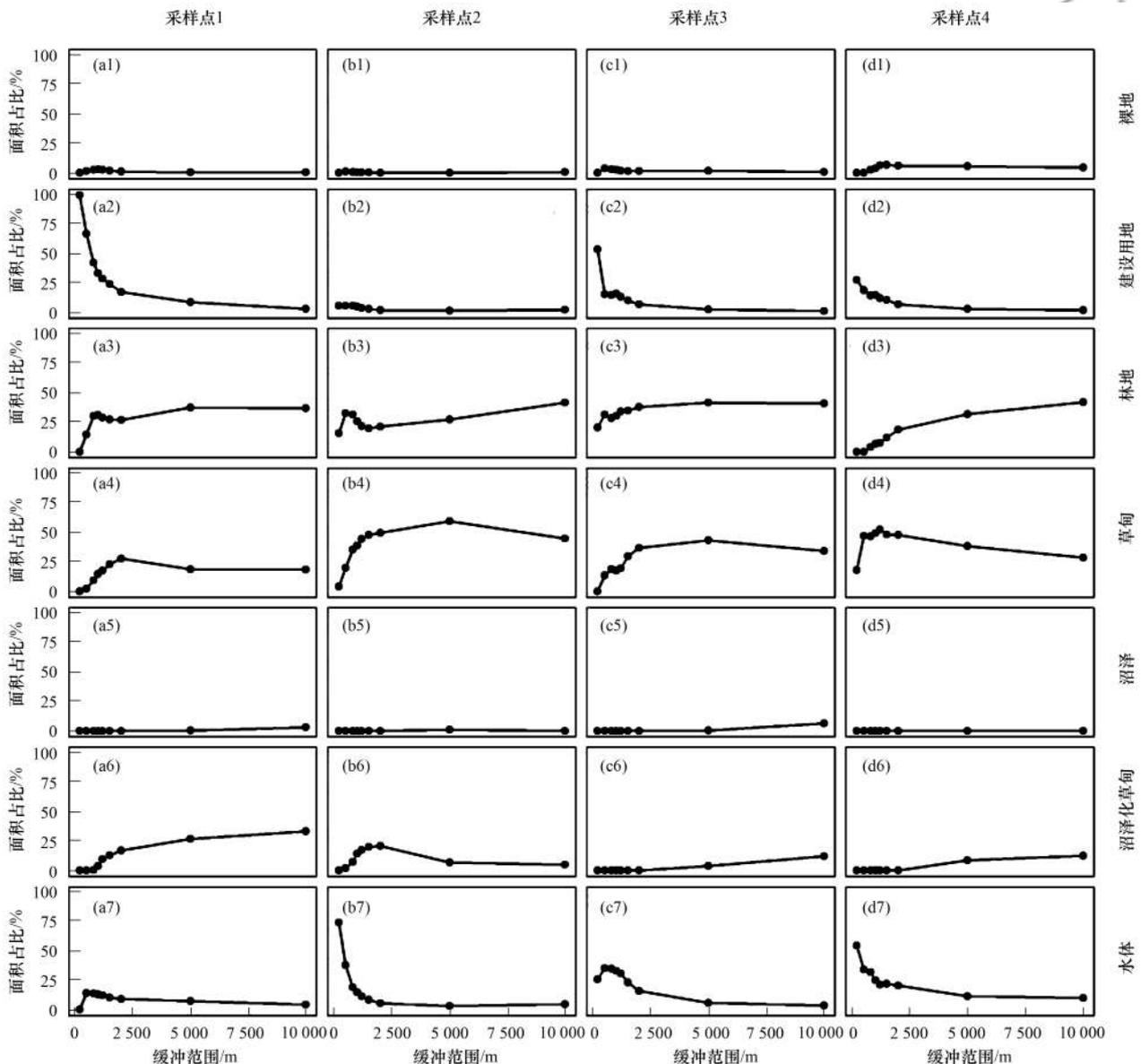
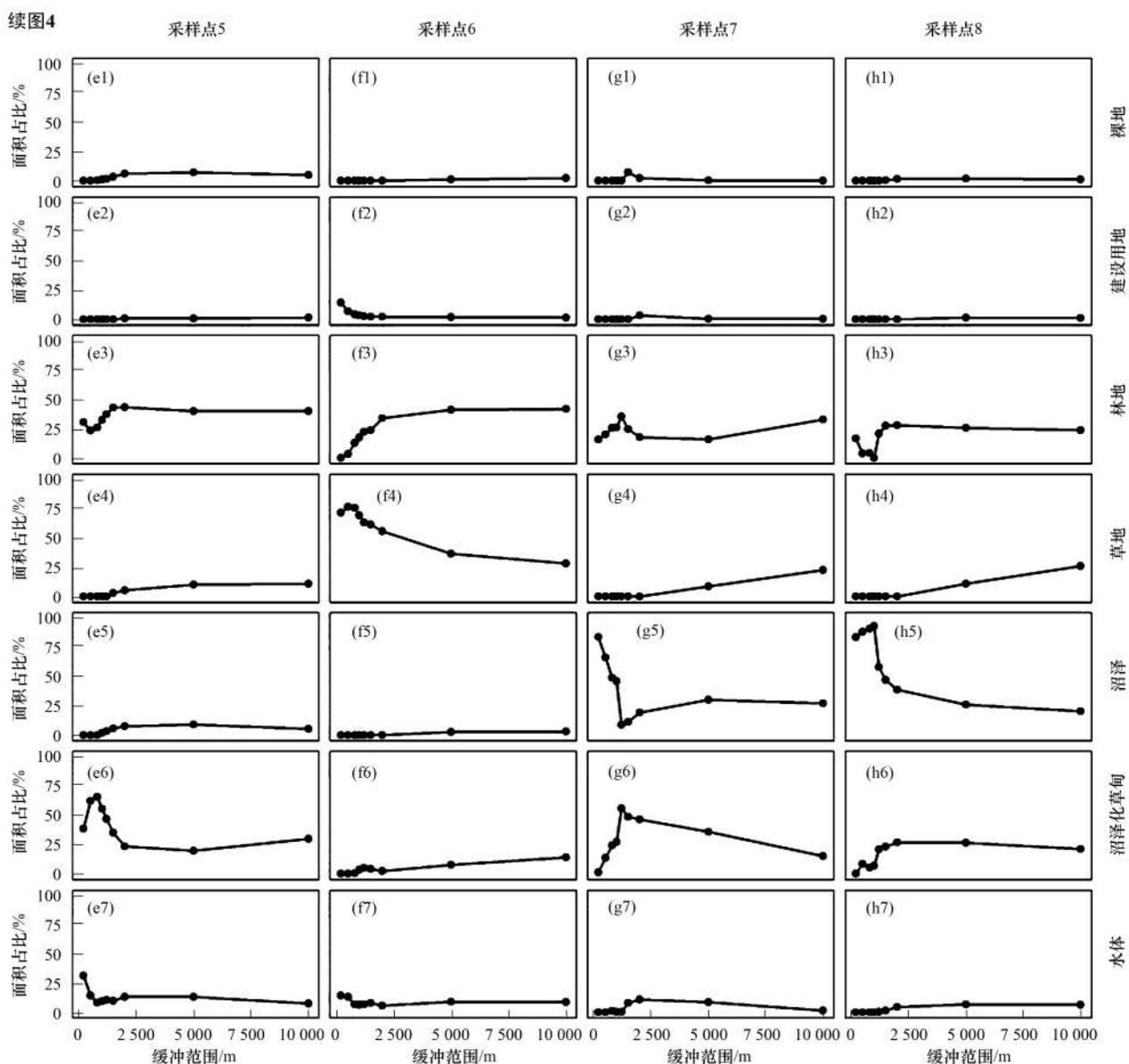


图4 缓冲区尺度土地利用类型趋势分析

Fig. 4 Trend analysis of land use types at buffer zone scale



最大的是林地,且在采样点 3 和采样点 5 有明显比例优势;缓冲范围为 10 000 m 时,林地 在所有采样点中的面积均为最大。

## 2.2 水质特征分析

若尔盖湿地水体中  $\rho(\text{COD})$  范围在  $6.000 \sim 39.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (表 1),有 4 个采样点处于 I 类水标准,一个处于 IV 类,3 个处于 V 类; $\rho(\text{TP})$  范围在

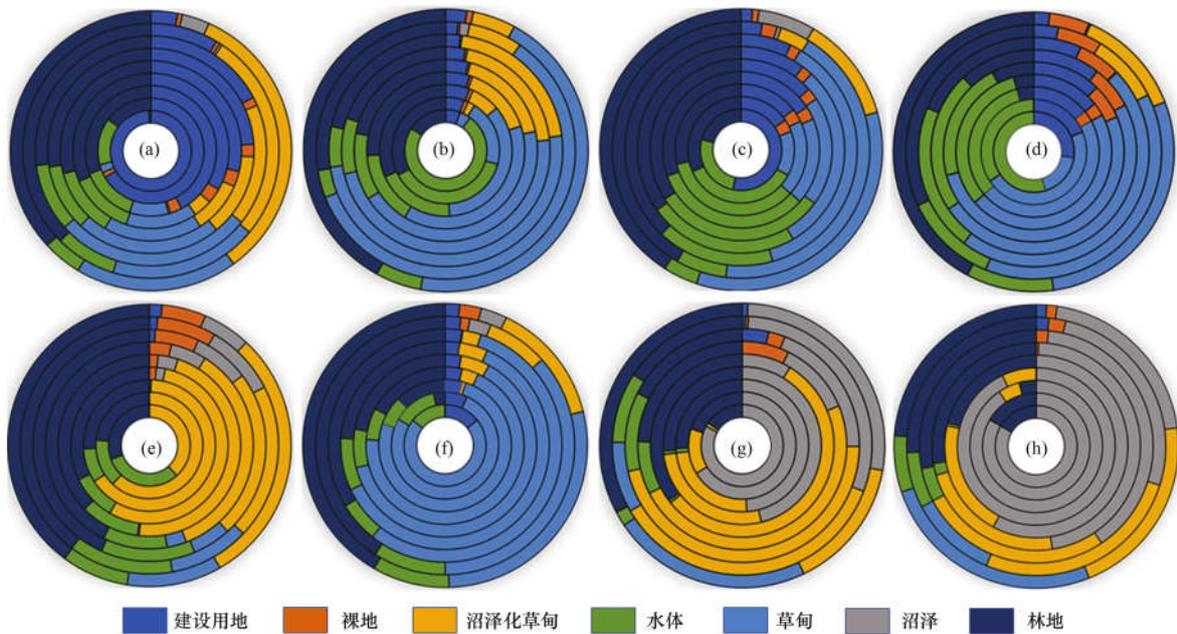
$0.074 \sim 0.304 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,有 2 个采样点处于 III 类水标准,5 个处于 IV 类,一个处于 V 类; $\rho(\text{TN})$  范围在  $2.860 \sim 6.660 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,所有采样点均处于 V 类水标准; $\rho(\text{Fe}^{2+})$  在  $0.030 \sim 0.860 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围,有 2 个采样点超过地表水环境标准;pH 和石油类都符合国家地表水 I 类标准; $\rho(\text{Chl-a})$  范围在  $0.388 \sim 1.690 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;单因子评价结果显示<sup>[38]</sup>:2020 年采

表 1 采样点水环境质量<sup>1)</sup>

Table 1 Water environment test at sampling points

水环境质量指标	采样点							
	1	2	3	4	5	6	7	8
COD	I	I	I	I	IV	V	V	V
TP	IV	IV	III	V	IV	III	IV	IV
TN	V	V	V	V	V	V	V	V
$\text{Fe}^{2+}$	超标	未超标	未超标	超标	未超标	未超标	未超标	未超标
石油类	I	I	I	I	I	I	I	I
pH	I	I	I	I	I	I	I	I
水环境分类	V	V	V	V	V	V	V	V

1) 超标表示超过集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值



(a) 采样点 1, (b) 采样点 2, (c) 采样点 3, (d) 采样点 4, (e) 采样点 5, (f) 采样点 6, (g) 采样点 7, (h) 采样点 8

图 5 缓冲区尺度土地利用类型面积占比

Fig. 5 Proportion analysis of land use types at buffer zone scale

样点水环境整体处于 V 类水标准, 且主要污染物为 TN 和 TP, 较田应兵等<sup>[27]</sup>于 2004 年的水环境检测结果有明显改善. 进一步通过综合营养状态指数法进行水体富营养化评价, 结果表明(图 6): 若尔盖湿地 8 个采样点中有 5 个处于中度富营养状态, 1 个中营养, 2 个轻度富营养, 水体整体处于轻度富营养化状态, 与文献<sup>[7]</sup>检测结果一致.

### 2.3 土地利用与水环境参数关系分析

RDA 分析结果表明(表 2): 建设用地和水质在 200 ~ 1 500 m 范围内相关性一样, 裸地和水质在 800 ~ 1 200 m 范围内相关性比较大, 沼泽和水质在 1 000 ~ 2 000 m 范围内相关性比较大, 沼泽化草甸和水质在 500 m 时相关性最大, 水体和水质在 200 ~ 500 m 范围内相关性最大, 林地和水质在 1 200 m 范围时相关性最大. 总体而言, 相比小流域, 缓冲区尺度土

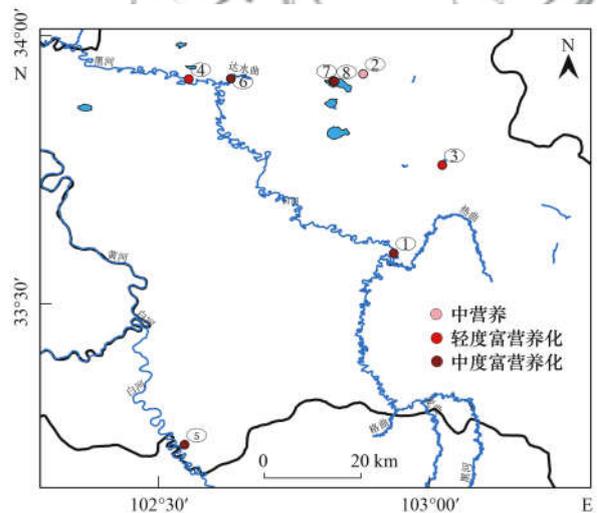


图 6 采样点水体富营养化程度

Fig. 6 Water eutrophication degree of sampling points

表 2 多尺度土地利用类型对水环境空间分异的解释结果

Table 2 Interpretation results of multi-scale land use types on spatial differentiation of water environment

空间 尺度/m	土地利用类型							整体
	建设用地	裸地	沼泽	沼泽化草甸	草甸	水体	林地	
200	0.250	0.000	0.209	0.139	0.136	0.209	0.246	0.533
500	0.250	0.207	0.209	0.261	0.250	0.209	0.078	0.442
800	0.250	0.258	0.209	0.143	0.250	0.059	0.000	0.388
1 000	0.250	0.258	0.250	0.143	0.250	0.059	0.059	0.369
1 200	0.250	0.258	0.250	0.143	0.209	0.000	0.250	0.274
1 500	0.250	0.098	0.250	0.143	0.209	0.000	0.000	0.232
2 000	0.059	0.000	0.250	0.112	0.209	0.000	0.000	0.208
5 000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.102
10 000	0.000	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053
缓冲区	0.173	0.142	0.190	0.121	0.189	0.060	0.070	0.289
小流域	0.138	0.115	0.259	0.115	0.137	0.000	0.000	0.159

地利用方式对水环境参数的解释度更高,在 200 m 时相关性最大,且随着缓冲范围的增大土地利用方式对水环境参数的解释度呈现减小的趋势,当缓冲范围为 1 200 m 时开始出现土地利用类型冗余分析结果为 0 的情况,且随缓冲范围的逐渐扩大,此类情况越显著。

不同尺度下的土地利用类型面积占比作为解释变量,各水环境参数作为响应变量构建多元线性回

归模型并筛选出每个水环境参数的最优模型,模型的  $R^2$  代表土地利用方式对水环境参数的解释度. 结果表明(表 3):土地利用方式的尺度效应对 TP 的解释度最大,缓冲范围为 200 m 的土地利用方式对 COD 的解释度最大,缓冲范围为 500 m 的土地利用方式对 TP 和 TN 的解释度最大,800 m 的土地利用方式对 Chl-a 的解释度最大. 小流域尺度的土地利用方式解释度与缓冲范围为 200 m 相同。

表 3 不同缓冲尺度下的土地利用方式多元线性回归模型对水环境参数的解释度

空间尺度 /m	$R^2$ 值				
	COD	TP	TN	Fe	Chl-a
200	0.932	0.983	0.769	0.345	0.471
500	0.865	0.998	0.993	—	0.377
800	0.908	0.728	0.880	—	0.969
1 000	—	0.535	0.990	0.853	—
1 200	0.243	—	—	0.857	—
1 500	—	—	—	0.471	0.135
2 000	—	0.840	0.095	0.780	—
5 000	0.692	0.740	0.885	1.000	0.945
10 000	0.932	0.983	0.769	0.345	0.471
小流域	0.175	0.837	0.908	—	—

1) “—”表示土地利用方式多元线性回归模型对水环境参数无解释度

将 COD、TN、TP 和 Chl-a 与不同空间尺度下各种土地利用类型所占面积占比进行相关性分析. 结果表明(表 4),整体来看,小流域尺度土地利用方式对水环境参数的相关性并不显著. 缓冲区尺度, COD 与水体所占比例呈现负相关关系,其中与 500 m 的水体占比相关性最大最显著,相关系数为  $-0.894$ ; Chl-a 与建设用地面积占比呈正相关关系且与 200 m 的水体面积占比呈显著负相关,相关系数为  $-0.664$ ; TN 与沼泽和沼泽化草甸面积占比呈现正相关关系,与 5 000 m 的裸地呈现显著的负相关关系,相关系数为  $-0.779$ ; TP 与沼泽面积比例整体呈现负相关关系,且在 10 000 m 的缓冲范围时相关性最大最显著,相关系数为  $-0.772$ .

### 3 讨论

本研究表明:缓冲区尺度,随着缓冲范围的增加,林地、草甸、沼泽化草甸和裸地面积占比呈现增加趋势,建设用地、沼泽和水体的面积占比呈现减少态势. 与缓冲区整体土地利用方式趋势存在差异的是:随着缓冲区范围的增加,沼泽在采样点 1 和采样点 6,建设用地在采样点 8 呈现增加态势. 采样点 1 和采样点 6 属于黑河,黑河水系发达,地面平坦低洼,地下水位持续高于表层土壤<sup>[39]</sup>,同时由于湿地退化湖泊干涸,使浅水区的沼泽裸露出来<sup>[40]</sup>,沼泽面积呈增加现象,采样点 8 位于花湖生态旅游区,为

促进旅游产业又好又快发展,加强了高速公路、景区公路等配套基础设施的建设<sup>[41]</sup>,是建设用地面积占比增加的重要原因。

若尔盖湿地水质整体处于 V 类水标准,整体呈现轻度富营养化状态,主要污染物为 TN 和 TP,本区域主要为泥炭沼泽,  $\omega$ (有机质)高达 500 ~ 600  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\omega$ (TN)也在 20 ~ 25  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[42]</sup>, TN 超标主要是由于泥炭沼泽原生环境以及生活污水的排放. 其次该地区畜牧业较为发达,动物排泄物和植物的腐烂也是造成 TN 超标的原因之一<sup>[43]</sup>. TP 超标可能是由于湖泊中生物生长茂盛,死亡后在低温高湿条件下分解缓慢,以有机残体的形式累积,成为有机物的重要来源,湖泊排水不畅导致有机物排除困难<sup>[44]</sup>,对水体富营养化的治理要严格把控水体附近的点源以及农业面源,并结合引清调度、底泥疏浚和物理除藻等方式进行治理<sup>[45]</sup>.  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度在采样点 1、4 和 6 存在明显差异. 黑河从采样点 1 途经若尔盖湿地流至采样点 6,  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度由 0.560  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至 0.140  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明若尔盖湿地对黑河水体中的  $\text{Fe}^{2+}$  有一定的净化作用,但在采样点 4 出现升高的现象,这是由于采样点 4 为畜牧业发达的黑河牧场,受牛羊和人为活动干扰较强,人类活动产生的废水和牛羊的排泄物等导致了  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的复高<sup>[46]</sup>.

冗余分析表明,在若尔盖地区,1 200 m 为土地

表 4 不同尺度下土地利用类型与水环境参数之间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson correlation coefficients between land use types and water environment parameters at different scales

水环境参数	空间尺度 /m	土地利用类型						
		建设用地	裸地	沼泽	沼泽化草甸	草甸	水体	林地
COD	200	-0.524	—	0.685	0.200	0.260	-0.680	0.142
	500	-0.471	-0.622	0.653	0.340	-0.034	-0.894**	-0.369
	800	-0.556	-0.790*	0.600	0.369	-0.182	-0.844**	-0.309
	1 000	-0.620	-0.698	0.591	0.383	-0.271	-0.820*	-0.220
	1 200	-0.611	-0.570	0.441	0.627	-0.380	-0.774*	0.295
	1 500	-0.599	0.155	0.505	0.602	-0.480	-0.612	0.220
	2 000	-0.461	0.009	0.631	0.560	-0.596	-0.367	0.069
	5 000	-0.461	-0.018	0.785*	0.617	-0.722*	0.343	-0.358
	10 000	-0.667	-0.013	0.737*	0.233	-0.515	-0.101	-0.556
	小流域	0.433	0.172	-0.599	0.158	0.221	-0.191	-0.170
TN	200	-0.203	—	0.708*	-0.650	0.219	-0.520	-0.220
	500	-0.209	-0.116	0.689	-0.513	0.055	-0.534	-0.190
	800	-0.239	-0.472	0.649	-0.449	0.037	-0.519	-0.171
	1 000	-0.279	-0.663	0.627	-0.363	-0.008	-0.539	-0.323
	1 200	-0.275	-0.636	0.461	0.106	-0.060	-0.565	0.001
	1 500	-0.280	-0.167	0.471	0.218	-0.095	-0.509	-0.278
	2 000	-0.181	-0.704	0.521	0.392	-0.162	-0.601	-0.405
	5 000	-0.207	-0.779*	0.600	0.365	-0.130	-0.507	-0.556
	10 000	-0.355	-0.727*	0.663	-0.302	0.278	-0.454	-0.573
	小流域	-0.189	-0.480	0.542	-0.175	0.195	-0.221	-0.395
TP	200	0.429	—	-0.723*	0.202	0.055	0.485	-0.412
	500	0.571	-0.098	-0.724*	0.061	0.225	0.480	-0.118
	800	0.569	0.487	-0.705	0.037	0.280	0.414	0.104
	1 000	0.558	0.674	-0.696	0.012	0.364	0.370	0.192
	1 200	0.555	0.700	-0.584	-0.295	0.427	0.342	-0.357
	1 500	0.577	0.181	-0.612	-0.327	0.421	0.344	-0.265
	2 000	0.507	0.404	-0.669	-0.382	0.452	0.378	-0.097
	5 000	0.560	0.378	-0.701	-0.254	0.254	0.344	0.369
	10 000	0.754*	0.514	-0.772*	0.248	-0.137	0.482	0.606
	小流域	0.433	0.172	-0.599	-0.158	0.221	-0.191	-0.171
Chl-a	200	0.616	—	0.042	-0.232	0.189	-0.664	-0.584
	500	0.613	-0.026	0.048	-0.260	0.125	-0.352	-0.619
	800	0.580	0.379	0.053	-0.317	0.016	-0.007	-0.327
	1 000	0.577	0.441	0.050	-0.403	0.011	0.026	-0.175
	1 200	0.582	0.395	0.045	-0.301	-0.038	0.066	-0.101
	1 500	0.595	0.207	0.031	-0.313	-0.063	0.184	-0.053
	2 000	0.634	0.096	0.010	-0.246	-0.069	0.265	0.011
	5 000	0.631	0.009	-0.028	0.293	-0.442	0.395	0.253
	10 000	0.114	0.036	0.082	0.543	-0.516	0.114	-0.189
	小流域	0.621	0.130	-0.155	-0.104	0.007	0.162	-0.124
Fe <sup>2+</sup>	200	0.392	—	-0.127	-0.135	-0.037	0.023	-0.599
	500	0.517	-0.277	-0.136	-0.177	0.137	0.079	-0.590
	800	0.505	0.493	-0.142	-0.201	0.081	0.292	-0.400
	1 000	0.525	0.712*	-0.145	-0.259	0.145	0.222	-0.306
	1 200	0.523	0.852**	-0.149	-0.249	0.178	0.190	-0.540
	1 500	0.555	0.607	-0.160	-0.261	0.103	0.392	-0.505
	2 000	0.538	0.545	-0.171	-0.219	0.100	0.594	-0.443
	5 000	0.508	0.344	-0.193	0.145	-0.152	0.521	-0.034
	10 000	0.294	0.392	-0.199	0.266	-0.306	0.382	0.085
	小流域	0.589	0.585	-0.201	-0.051	0.130	0.197	-0.454

1) \*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示在 0.1、0.05 和 0.01 的显著性水平下显著相关; “—” 表示没有相关性

利用方式对水环境尺度效应解释度的分界线,说明 1 000 m 以内尺度的土地利用方式对地表水环境的影响更显著。其中 200 m 缓冲范围的解释度最大,

200 m 范围内的土地利用方式中占比最大的是水体,同时根据多元回归模型分析,缓冲范围为 200 m 的土地利用方式对 COD 的解释度也最大, COD 又

和水体面积占比呈现负相关关系,河流的水动力条件不仅影响化学需氧量的降解<sup>[47]</sup>,也加快了溶解氧的补充从而制约了浮游植物的生长<sup>[48]</sup>,湿地水体对污染物和富营养化有一定的净化作用<sup>[49]</sup>;若尔盖沼泽面积占比与 TN 呈正相关与 TP 呈负相关,可能是因为若尔盖高原湿地水体中的 N 与植被 N 累积量存在显著的线性关系,且与植被多样性呈极显著正相关,而植被 P 累积量与水环境 P 之间的相关关系存在明显的季节性差异,P 与植被多样性之间相关性不显著有关<sup>[7]</sup>.

#### 4 结论

(1)若尔盖湿地水质整体处于 V 类水标准,整体呈现轻度富营养化状态,主要污染物为 TN 和 TP.这不仅与若尔盖湿地特殊的泥炭沼泽原生环境有关也与排放污水和放牧等活动有关.要严格管控水体附近生活污水的排放和放牧活动,以改善水体质量.

(2)地表水环境质量与土地利用方式联系紧密. COD 与水体面积占比呈现负相关关系、沼泽面积占比与 TN 呈现正相关关系、TP 呈现负相关关系.缓冲区尺度土地利用方式对地表水环境参数的相关性和解释度比小流域尺度都更大,且在 1 000 m 范围内更为显著.

(3)对地表水环境影响最大的是水体面积占比.若尔盖湿地水体对  $\text{Fe}^{2+}$ 、COD 和 Chl-a 等和富营养化有一定的净化作用.沼泽对 TN 有净化作用但对 TP 却呈现聚积作用.若尔盖湿地的管理应重点控制小尺度( $\leq 1\ 000\ \text{m}$ )的土地利用格局,对水体和沼泽的面积进行重点管控,重视提升湿地水域的自净能力,同时加强旅游和畜牧业管理,降低人类活动对环境的干扰,进一步保护若尔盖湿地地表水环境.

致谢:感谢水土保持国家林业和草原局重点实验室(北京)和若尔盖湿地国家级自然保护区管理局对本研究的大力支持!

#### 参考文献:

- [ 1 ] 刘纪远,张增祥,张树文,等.中国土地利用变化遥感研究的回顾与展望——基于陈述彭学术思想的引领[J].地球信息科学学报,2020,22(4):680-687.  
Liu J Y, Zhang Z X, Zhang S W, et al. Innovation and development of remote sensing-based land use change studies based on Shupeng Chen's academic thoughts[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(4): 680-687.
- [ 2 ] 林春英,李希来,张玉欣,等.黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应[J].环境科学,2021,42(8):3971-3984.  
Lin C Y, Li X L, Zhang Y X, et al. Responses of different degradation stages of alpine wetland on soil microbial community in the Yellow river source zone[J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3971-3984.
- [ 3 ] 尹小娟,宋晓谕,蔡国英.湿地生态系统服务估值研究进展[J].冰川冻土,2014,36(3):759-766.  
Yin X J, Song X Y, Cai G Y. Valuation of wetland ecosystem services: progress and perspectives[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 759-766.
- [ 4 ] 王志强,崔爱花,缪建群,等.淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J].生态学报,2017,37(18):6253-6264.  
Wang Z Q, Cui A H, Miu J Q, et al. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6253-6264.
- [ 5 ] 杜华明.若尔盖湿地水资源水环境问题研究[D].成都:四川师范大学,2007.  
Du H M. Study on water resource and water environment problem of Ruergai wetland[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2007.
- [ 6 ] 方宇,张学霞,郭长庆.若尔盖湿地黑颈鹤生境适宜性[J].生态学报,2020,39(9):3021-3031.  
Fang Y, Zhang X X, Guo C Q. Habitat suitability of black-necked cranes (*Grus nigricollis*) in Zoige wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3021-3031.
- [ 7 ] 顾城天,罗彬,王恒,等.若尔盖高原湿地水质演变特征及氮磷累积效应[J].水土保持研究,2020,27(4):47-53.  
Gu C T, Luo B, Wang H, et al. Water quality evolution and effect of nitrogen and phosphorus accumulation in wetland of Ruergai Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 47-53.
- [ 8 ] 易玉敏,祝家能,刘鹏.湖库型水源地富营养状况及土地利用对水质的影响[J].西南林业大学学报,2021,41(5):139-148.  
Yi Y M, Zhu J N, Liu P. Effects of eutrophic status and land-use types on water quality in Lake and reservoir water source reserves[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2021, 41(5): 139-148.
- [ 9 ] Xiao H G, Ji W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82(1): 111-119.
- [ 10 ] 胡和兵.城市化背景下流域土地利用变化及其对河流水质影响研究[D].南京:南京师范大学,2013.  
Hu H B. Study on land use change and impact on river water quality in the context of urbanization[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.
- [ 11 ] Zhang W S, Chen D Q, Li H P. Spatio-temporal dynamics of water quality and their linkages with the watershed landscape in highly disturbed headwater watersheds in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(35): 35287-35300.
- [ 12 ] Zhang X, Liu Y Q, Zhou L. Correlation analysis between landscape metrics and water quality under multiple scales[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(8), doi: 10.3390/ijerph15081606.
- [ 13 ] Uriarte M, Yackulic C B, Lim Y, et al. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis[J]. Landscape Ecology, 2011, 26(8): 1151-1164.
- [ 14 ] Amiri B J, Nakane K. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku district of Japan[J]. Water Resources Management, 2009, 23(5): 931-956.

- [15] Lv H H, Xu Y P, Han L F, *et al.* Scale-dependence effects of landscape on seasonal water quality in Xitiaoxi catchment of Taihu Basin, China[J]. *Water Science & Technology*, 2015, **71**(1): 59-66.
- [16] 张微微, 李晓娜, 王超, 等. 密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4895-4904.  
Zhang W W, Li X N, Wang C, *et al.* Water quality response to landscape pattern at different spatial scales in Baihe river in the upper reaches of the Miyun reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4895-4904.
- [17] 王鹏, 齐述华, 袁瑞强. 赣江流域土地利用方式对无机氮的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 826-835.  
Wang P, Qi S H, Yuan R Q. Investigation of the impacts of land use on inorganic nitrogen in the Ganjiang river [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(3): 826-835.
- [18] 胡琳, 李思悦. 不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(7): 1470-1481.  
Hu L, Li S Y. Scale effects of land use structure and landscape pattern on water quality in the Longchuan river basin [J]. *Ecological Environment Sciences*, 2021, **30**(7): 1470-1481.
- [19] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 等. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(3): 876-885.  
Xiang S, Pang Y, Dou J S, *et al.* Impact of land use on the water quality of inflow river to Erhai Lake at different temporal and spatial scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 876-885.
- [20] 田皓予, 佟玲, 余国安, 等. 不同空间尺度河流水质与土地利用关系分析——以泰国蒙河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(9): 2036-2047.  
Tian H Y, Tong L, Yu G A, *et al.* Relationship between water quality and land use at different spatial scales: a case study of the Mun River basin, Thailand [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(9): 2036-2047.
- [21] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5348-5357.  
Fang N, Liu L L, You Q H, *et al.* Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang lake wetland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- [22] 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 等. 南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2920-2927.  
Cai C X, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Research on the influence of urban land use structure and pattern on nitrogen, phosphorus of wetland water environment in Xianlin new town of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2920-2927.
- [23] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究[J]. *地理科学进展*, 2021, **40**(2): 220-231.  
Yang Q K, Duan X J, Wang L, *et al.* Mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects in the Yangtze River Delta [J]. *Progress of Geograpy*, 2021, **40**(2): 220-231.
- [24] Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, *et al.* A method for alpine wetland delineation and features of border: Zoigê Plateau, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27**(5): 784-799.
- [25] Xiang S, Guo R Q, Wu N, *et al.* Current status and future prospects of Zoige Marsh in Eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(4): 553-562.
- [26] Zhang X Y, Li Q W, Gao J Q, *et al.* Effects of rainfall amount and frequency on soil nitrogen mineralization in Zoigê alpine wetland [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, **97**, doi: 10.1016/j.ejsobi.2020.103170.
- [27] 田应兵, 熊明标. 若尔盖湿地国家级自然保护区水质评价 [J]. *湖北农学院学报*, 2004, **24**(3): 161-165.  
Tian Y B, Xiong M B. Water quality assessment of national nature reserve in Ruoergai wetland, Sichuan, China [J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2004, **24**(3): 161-165.
- [28] 王姝, 秦纪洪, 谢冰心, 等. 水分梯度下若尔盖高寒泥炭地土壤可溶性有机质光谱特征 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(4): 676-685.  
Wang S, Qin J H, Xie B X, *et al.* Spectroscopic characteristics of dissolved organic matter (DOM) in Zoige alpine peatland soils along a soil moisture gradient [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, **29**(4): 676-685.
- [29] 张雪, 张学霞, 余新晓, 等. 基于图谱的4个时期若尔盖县湿地演变分区 [J]. *湿地科学*, 2019, **17**(6): 623-630.  
Zhang X, Zhang X X, Yu X X, *et al.* Zoning of wetlands evolution in Zoigê county based on graphs for 4 periods [J]. *Wetland Science*, 2019, **17**(6): 623-630.
- [30] 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 等. 2007年和2016年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化 [J]. *湿地科学*, 2017, **15**(4): 522-525.  
Zhen S, Dong L Q, Zheng R M, *et al.* Landscape patterns of marsh wetlands in Zoigê plateau in 2007 and 2016 and change [J]. *Wetland Science*, 2017, **15**(4): 522-525.
- [31] 侯蒙京, 高金龙, 葛静, 等. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究 [J]. *草业学报*, 2020, **29**(1): 13-27.  
Hou M J, Gao J L, Ge J, *et al.* An analysis of dynamic changes and their driving factors in marsh wetlands in the eastern Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29**(1): 13-27.
- [32] Hou M J, Ge J, Gao J L, *et al.* Ecological risk assessment and impact factor analysis of alpine wetland ecosystem based on LUCC and boosted regression tree on the Zoige plateau, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/rs12030368.
- [33] 乔悦, 国巧真, 吴欢欢, 等. 地表水水质时空变化及其与土地利用响应研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, **32**(6): 23-27, 71.  
Qiao Y, Guo Q Z, Wu H H, *et al.* Study on temporal and spatial variation of surface water quality and its response to land use [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2020, **32**(6): 23-27, 71.
- [34] 彭园睿, 何兴华, 杨春灿, 等. 大理西湖湿地景观中水体富营养化及截留功能的季节变化 [J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(12): 4078-4089.  
Peng Y R, He X H, Yang C C, *et al.* Seasonal changes of eutrophication and retention effect in wetland of Dali Xihu lake [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(12): 4078-4089.
- [35] 查智琴. 哈尼梯田湿地水体氮磷时空盈亏及其关键汇景观识别研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2019.  
Zha Z Q. Temporal and spatial balance of water nutrients import-export and identification of key sink landscape in Hani Rice Terrace wetlands [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019.
- [36] 何为媛, 王莉玮, 王春丽. 不同水体中叶绿素 a 与氮磷浓度关系及富营养化研究 [J]. *安徽农学通报*, 2019, **25**(14): 121-123.

- [37] 潘扬航, 梁洲, 王浩男, 等. 长江口邻近海域化学需氧量的分布特征及影响因素分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, **59**(S1): 63-68.  
Pan Y H, Liang Z, Wang H N, *et al.* The distribution and influence factors of COD in the Yangtze river estuary adjacent sea area [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, **59**(S1): 63-68.
- [38] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, **31**(5): 617-624.  
Li M S, Zhang J H, Liang N, *et al.* Comparisons of some common methods for water environmental quality assessment [J]. Progress in Geography, 2012, **31**(5): 617-624.
- [39] 崔焱, 张学霞, 张雪, 等. 若尔盖县湿地稳态转换的水文地貌生态阈值[J]. 生态学报, 2020, **40**(23): 8794-8804.  
Cui Y, Zhang X X, Zhang X, *et al.* Hydrological and geomorphologic ecological threshold of steady-state transformation of wetland in Zoige county, Sichuan province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(23): 8794-8804.
- [40] 高跃鹏, 张学霞, 方宇, 等. 若尔盖县景观破碎化及湿地恢复优先性[J]. 中国农业大学学报, 2019, **24**(12): 145-158.  
Gao Y P, Zhang X X, Fang Y, *et al.* Landscape fragmentation and wetland restoration priority in Zoige County of Sichuan Province of China [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, **24**(12): 145-158.
- [41] 马晓龙, 金远亮. 城市土地利用变化与旅游发展的作用机制研究[J]. 旅游学刊, 2014, **29**(4): 87-96.  
Ma X L, Jin Y L. Study on counteractive mechanism between urban land use change and tourism development [J]. Tourism Tribune, 2014, **29**(4): 87-96.
- [42] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(4): 490-495.  
Tian Y B, Xiong M B, Xiong X S, *et al.* The organic carbon distribution and flow in wetland soil-plant system in Ruoergai plateau [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, **27**(4): 490-495.
- [43] 刘灏, 梁明. 红原—若尔盖草原地下水水质评价[J]. 地下水, 2021, **43**(2): 48-49, 95.  
Liu H, Liang M. Evaluation of groundwater quality in the Hongyuan-Zoige grassland [J]. Ground Water, 2021, **43**(2): 48-49, 95.
- [44] 陈曦, 刘如钢, 王艳芬, 等. 若尔盖高原湿地藻类多样性研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 979-986.  
Chen X, Liu R Y, Wang Y F, *et al.* Research on algal diversity in Zoige alpine wetland [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 979-986.
- [45] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4030-4041.  
Ji P F, Xu H, Zhan X, *et al.* Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4030-4041.
- [46] 徐超. 水中铁对水环境的影响[J]. 环境与发展, 2018, **30**(11): 98-99, 101.  
Xu C. Influence of iron in water on water environment [J]. Environment and Development, 2018, **30**(11): 98-99, 101.
- [47] Tang L, Pan X D, Feng J J, *et al.* Experimental investigation on the relationship between COD degradation and hydrodynamic conditions in urban rivers [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(18), doi: 10.3390/ijerph16183447.
- [48] 吴怡, 郭亚飞, 曹旭, 等. 成都府南河叶绿素 a 和氮、磷的分布特征与富营养化研究[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(4): 43-49.  
Wu Y, Guo Y F, Cao X, *et al.* Eutrophication and spatial distribution of chlorophyll-a, nitrogen and phosphorus in Fu-Nan river, Chengdu city [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, **29**(4): 43-49.
- [49] 姚鑫, 杨桂山. 自然湿地水质净化研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, **28**(5): 825-832.  
Yao X, Yang G S. Progress on the study of water purification ability of natural wetlands [J]. Progress in Geography, 2009, **28**(5): 825-832.

## CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 Transport 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 <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> 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-ji, <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)