

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析

魏俊伟^{1,2}, 李鸿然^{3,4}, 汪兴中⁵, 齐文华^{3,4}, 汪洋^{3,4}, 赵彬洁^{3,4}, 谭香^{3*}, 张全发³

(1. 西藏大学青藏高原生态与环境研究中心, 拉萨 850000; 2. 西藏大学理学院, 拉萨 850000; 3. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 湖州师范学院水生生物资源养护与开发技术研究浙江省重点实验室, 湖州 313000)

摘要: 为探究拉萨河中下游流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子, 于2019年9月采集并鉴定附石藻类, 分析了附石藻类物种组成及空间分布状况, 并采用冗余分析识别了影响附石藻类群落的关键环境因子。结果表明, 共计鉴定出附石藻类6门31属, 附石藻类平均细胞密度为 $1.92 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中硅藻门种类数和细胞密度在各采样点均最大; 干、支流附石藻类种类数和细胞密度差异显著。干、支流的优势藻属差异较小, 干流的主要优势属有硅藻门异极藻 (*Gomphonema*)、脆杆藻 (*Fragilaria*)、桥弯藻 (*Cymbella*) 和蓝藻门浮鞘丝藻 (*Planktolyngbya*), 支流的主要优势属有硅藻门异极藻 (*Gomphonema*)、脆杆藻 (*Fragilaria*)、桥弯藻 (*Cymbella*) 和蓝藻门颤藻 (*Oscillatoria*)。冗余分析表明, 温度、pH 和溶解氧是影响干流附石藻类优势属群落结构的主要驱动因子, HCO_3^- 和流速是影响支流附石藻类优势属群落结构的主要驱动因子。本研究为拉萨河中下游流域水生生态系统保护及水质管理提供基础资料和理论依据。

关键词: 拉萨河流域; 附石藻类; 群落组成; 空间分布; 驱动因子

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1879-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008142

Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau

WEI Jun-wei^{1,2}, LI Hong-ran^{3,4}, WANG Xing-zhong⁵, QI Wen-hua^{3,4}, WANG Yang^{3,4}, ZHAO Bin-jie^{3,4}, TAN Xiang^{3*}, ZHANG Quan-fa³

(1. Research Center for Ecology and Environment of Qinghai-Tibetan Plateau, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China; 3. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Aquatic Resources Conservation and Development, Huzhou Normal University, Huzhou 313000, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and driving factors of the epilithic algae community in the middle and lower reaches of the Lhasa River, epilithic algae was collected and identified in September 2019, the species composition and spatial distribution were analyzed, and the key environmental factors affecting the epilithic algae community were identified through redundancy analysis. The results indicated that 31 genera of epilithic algae belonging to six phyla were identified, and the average cell density of the epilithic algae was $1.92 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$. The number of species and cell density of the diatom phylum were the largest at each sampling point. The species number and cell density of the epilithic algae were significantly different between the main stream and tributaries. The main stream and tributaries contained relatively small differences in the dominant algae genera, which were *Gomphonema*, *Fragilaria*, *Cymbella*, and *Planktolyngbya* in the main stream and *Gomphonema*, *Fragilaria*, *Cymbella*, and *Oscillatoria* in the tributaries. The redundancy analysis revealed that temperature, pH, and dissolved oxygen were the main driving factors affecting the community structure of the dominant genus in the main stream, while HCO_3^- and flow velocity controlled the community structure of the dominant genus in the tributaries. This study provides basic data and the theoretical basis for the conservation of aquatic ecosystems and water quality management in the middle and lower reaches of the Lhasa River.

Key words: Lhasa River basin; epilithic algae; community composition; spatial distribution; driving variables

底栖藻类 (benthic algae) 是河流生态系统中重要的初级生产者, 在食物链中承担着将能量和碳转移至更高级水生消费者的任务, 是河流能量流动和物质循环的重要组成部分^[1,2]。同时底栖藻类在河流中分布广泛、生长位置相对固定, 并具有较高的物种丰富度, 不同物种对环境因子的耐受范围差异较大, 且生活史较短^[2,3], 因此它们的空间分布和群落

结构对一系列环境变量反应灵敏, 如温度、营养、水文状况、河流底质, 甚至地质和土地利用等^[4~6]。底栖藻类根据附着基质类型的不同, 可分为附泥型、附

收稿日期: 2020-08-13; 修订日期: 2020-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31720103905)

作者简介: 魏俊伟 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为河流生态学, E-mail: weijunwei@wbcas.cn

* 通信作者, E-mail: xtan@wbcas.cn

砂型、附石型、附植型和附动型,其中附石藻类(epilithic algae)是指生长在水体石头表面的藻类。附石藻类具有标本采集方便、响应水体环境变化敏感的特点^[7,8]。因此,近年来国内外学者在附石藻类群落结构的时空动态^[9,10]、附石藻类群落结构及其与环境因子关系^[11,12]和利用附石藻类生物指数评价水质^[13,14]等方面进行了大量研究。然而关于附石藻类群落结构及其环境驱动因子的研究大部分集中在低海拔地区,在高海拔地区开展的较少。

青藏高原平均海拔超过4 000 m,拥有独特的高原气候,对全球气候变化和人类活动非常敏感,长期以来一直都是国际学术界关注的焦点^[15]。拉萨河流域位于青藏高原东南部,是雅鲁藏布江最大支流,中下游流域地势平缓,水资源丰富,是整个西藏自治区工、农、牧业最为集中区域^[16],其特殊的地理位置及社会经济发展状况,注定拉萨河中下游流域的生态状况研究有着重要意义。目前对拉萨河河流藻类的研究主要集中在浮游植物群落结构^[17,18],而河流底栖藻类群落结构的研究未见报道。为填补该流域在这一方面的空白,本研究通过对拉萨河中下游流域的附石藻类物种进行鉴定并测定水体理化指标,分析该区域附石藻类组成的空间分布特征及其与环境因子的关系,以期对拉萨河中下游流域水环境保护及河流管理提供理论依据。

1 材料与方法

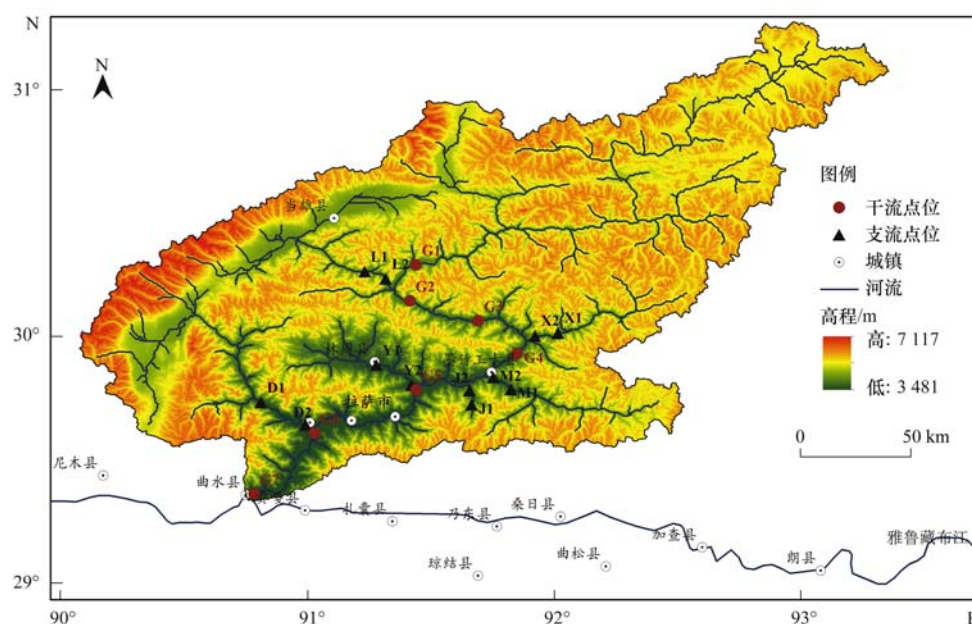
1.1 研究区域概况

拉萨河是雅鲁藏布江最大支流,发源于念青

唐古拉山脉中段北侧的罗布如拉,位于雅鲁藏布江中游的左岸(29°20'~30°15'N, 90°05'~93°20'E),流域面积32 471 km²,全长551 km,干流呈一个巨大的“S”型。河源海拔约5 200 m,汇入口海拔3 580 m,平均海拔在4 000 m以上^[19]。拉萨河流域属高原温带半干旱季风气候区,光照充足,平均日照持续时间为2 973 h·a⁻¹;温度较低,年平均气温在-1.7~9.7℃之间^[20];水流湍急,年平均地表径流约为9×10¹⁰ m³,年平均流量为300 m³·s⁻¹^[21,22]。根据河谷形态和地质状况,拉萨河大致分为上、中、下游3段。上游河段自河源到桑曲汇入口,长约250 km,河床平均坡降3.7‰;中游河段自桑曲汇入口到扒曲汇入口,长约60 km,河床平均坡降2.6‰;下游河段自扒曲汇入口以下至雅鲁藏布江汇入口,长约240 km,河床平均坡降1.9‰。拉萨河支流众多,主要支流有麦曲、桑曲、拉曲、扒曲、雪绒藏布、玛曲、玉年曲和堆龙曲等^[23]。

1.2 样点设置

根据拉萨河流域的自然地理区域特征及研究目的,2019年9月在拉萨河中下游设置19个采样点(图1),采样点位于拉萨河干流、重要支流及湿地保护区。其中,干流7个采样点,分别位于旁多乡上下游(G1、G2)、尼玛江热乡上下游(G3、G4)、帕热湿地(G5)、拉萨市下游(G6)和才纳(G7);支流12个采样点,分别位于拉曲、雪绒藏布、玛曲、甲玛沟、玉年曲及堆龙曲上下游。



G1~G7 位于拉萨河干流; L1~L2 位于拉曲; X1~X2 位于雪绒藏布; 玛曲位于 M1~M2; J1~J2 位于甲玛沟; Y1~Y2 位于玉年曲; D1~D2 位于堆龙曲

图1 拉萨河中下游流域采样点示意

Fig. 1 Sampling site locations in the middle and lower reaches of the Lhasa River

1.3 样本采集及鉴定

附石藻类采用美国环保署(EPA)的采集方法^[24],在每个采样点沿河的上、中、下游随机选取3~5块直径约为10~20 cm的石头,并在石头上选取直径为7 cm的固定面积,共随机取5个圆形样方,现场用尼龙刷或硬毛牙刷将藻类刷下,并用无藻水冲洗石块多次,以保证藻类尽量被刷下来。记录含有藻类液体的总体积,然后取100 mL藻液,混合均匀分装至2个50 mL标本瓶中,并立即用鲁哥氏固定液进行固定,带回实验室参照文献进行分类、鉴定^[25~28]。藻类定量分析采用Sedgewick Rafter计数框(Pyser-SGI, Kent, UK)来计数,获得各样点藻类细胞总数,并换算为单位面积石块上的藻类细胞密度。

1.4 理化指标

水温(water temperature, WT)、电导率(electrical conductivity, EC)、pH和溶解氧(dissolved oxygen, DO)采用便携式多参数水质分析仪(YSI, Professional Plus, USA)现场测定。水体流速(velocity, v)使用便携式流速仪LS1206B测定。在实验室内使用全自动化学分析仪(AMS westco, Smartchem200, Italy)测定水体硝氮(NO_3^- -N)和氨氮(NH_4^+ -N),使用总有机碳/总氮分析仪(Elementar, vario TOC cube, Germany)测定水体总有机碳(total organic carbon, TOC)和总氮(total nitrogen, TN),使用电感耦合等离子体质谱仪(Thermo fisher, X Series 2, USA)测定水体总磷(total phosphorus, TP),使用离子色谱仪(Metrohm, 940 Professional, Switzerland)测定水体正磷酸盐(PO_4^{3-} -P),高锰酸盐指数参照文献[29]采用酸性法进行测定。碳酸氢根离子(HCO_3^-)浓度于采样当天使用 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸进行滴定。采样点坐标及海拔高度用GPS仪现场测量。

1.5 数据处理及分析

对附石藻类物种数据进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)选择排序模型。如果4个排序轴中梯度最大值大于4,则选择单峰模型(unimodal model)比较合适;小于3则选择线性模型(linear model)比较合适;介于3~4之间,两种模型均合适^[30]。干、支流附石藻类物种数据DCA分析显示最大梯度长分别为0.967和1.381,故本研究选择RDA(redundancy analysis)分析干、支流附石藻类群落与环境因子的关系。在对附石藻类与环境因子进行RDA分析之前,使用以下公式选取优势属: $Y = (n_i/N) \times f_i$,式中, n_i 为藻液中*i*种藻数量, N 为藻液中总藻数量, f_i 为*i*种藻在采样点中出现的频率,取 $Y \geq 0.02$ 的藻属作为优势属;对水环

境理化数据进行Spearman相关分析,相关性较强的两个水环境理化因子仅保留其一。RDA分析过程中,每个变量的贡献程度通过计算方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)判断,VIF值超过10则可能存在共线问题。附石藻类物种数据经过hellinger转化,环境因子数据(pH除外)经过 $\lg(x+1)$ 转化^[30]。DCA、Spearman相关分析和RDA均在R软件(R Version 3.4.3)下完成。应用SPSS 20.0中的单因素方差分析(one-way ANOVA)检验拉萨河中下游流域干流和各支流环境因子以及附石藻类种类数和细胞密度在空间上差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 拉萨河中下游流域附石藻类群落特征

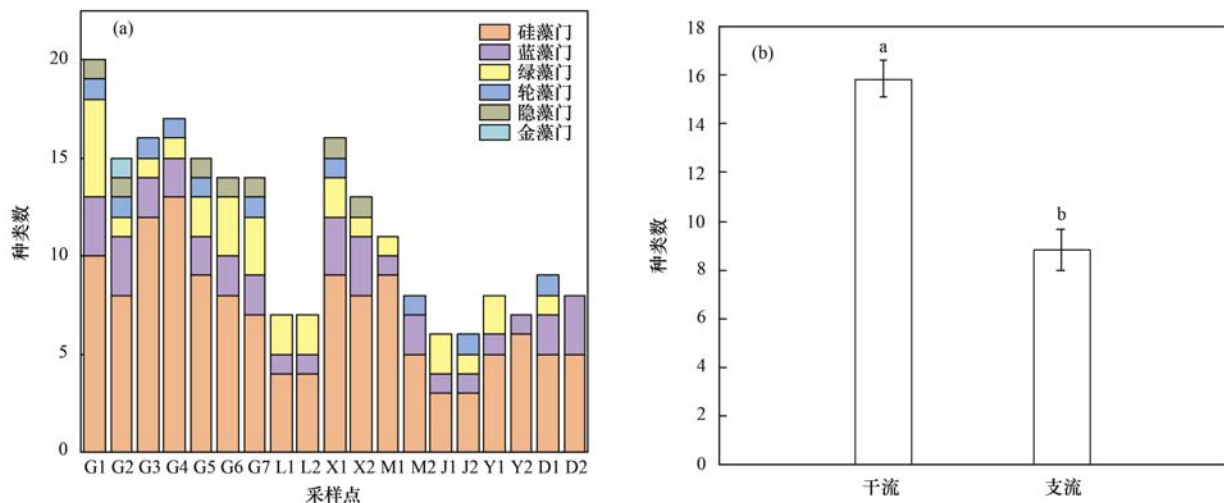
2.1.1 附石藻类物种组成

在拉萨河中下游所有干、支流19个采样点中,共鉴定出附石藻类6门31属,分别包括硅藻门(Bacillariophyta)17属、绿藻门(Chlorophyta)7属、蓝藻门(Cyanophyta)3属、轮藻门(Charophyta)2属、隐藻门(Cryptophyta)1属和金藻门(Chrysophyta)1属。其中干流共鉴定出附石藻类6门31属,支流共鉴定出5门22属。

附石藻类种类数的空间分布分析结果表明,干流的附石藻类种类数量趋于稳定,且较支流丰富($P < 0.05$,图2)。干流的7个采样点物种平均数为16种,最高点为旁多乡上游G1位点,20个种类;6条支流的上、下游物种数差异不显著($P > 0.05$),物种数最高点为雪绒藏布上游X1位点,16个种类,最小值为甲玛沟J1和J2位点,均仅采集到6个种类[图2(a)]。在干流中,除G1和G7采样点外,其他采样点硅藻门种类数目所占比例均超过50%,蓝绿藻种类数目所占比例在18%~35%之间,其他门的种类数目低于8%;在6条支流中,除甲玛沟J1和J2采样点外,其他支流种类数目均以硅藻门占优势,所占比例均超过50%[图2(a)]。

2.1.2 附石藻类细胞密度

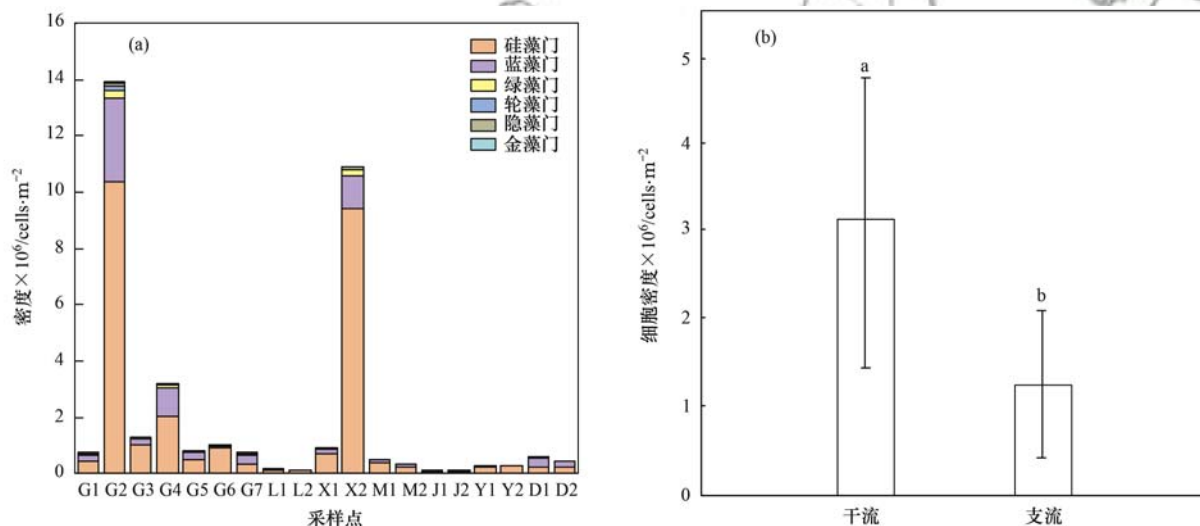
拉萨河中下游流域附石藻类的平均细胞密度为 $1.92 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$,其中硅藻门细胞密度最大,为 $1.46 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$,占总细胞密度的76.12%;其次蓝藻门细胞密度为 $3.80 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$,占总细胞密度的19.78%。各采样点间的附石藻类细胞密度存在一定差异,最大值出现在G2采样点,该点位于旁多乡下游,海拔4022 m,人类干扰少,生态环境状况较好,附石藻类细胞密度为 $1.39 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$;最小值出现在甲玛沟J2位点,附石藻类细胞密度为 $1.22 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$ [图3(a)]。干支流



误差棒上小写字母表示干、支流附石藻类种类数在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性

图2 拉萨河中下游附石藻类种类组成及干支流种类数比较

Fig. 2 Species composition of epilithic algae in the middle and lower reaches of the Lhasa River and comparison of species number between the main stream and tributaries



误差棒上小写字母表示干、支流附石藻类细胞密度在 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性

图3 拉萨河中下游附石藻类细胞密度及干支流细胞密度比较

Fig. 3 Cell density of epilithic algae in the middle and lower reaches of the Lhasa River and comparison of cell density between the main stream and tributaries

附石藻类细胞密度差异显著 ($P < 0.05$), 干流的附石藻类细胞密度均值为 $3.11 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于支流 [$1.23 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, 图 3(b)]。

2.1.3 附石藻类优势种属组成

各采样点共出现 10 种优势类群(表 1), 分别为硅藻门异极藻 (*Gomphonema*)、舟形藻 (*Navicula*)、脆杆藻 (*Fragilaria*)、桥弯藻 (*Cymbella*)、曲壳藻 (*Achnanthes*)、蓝藻门颤藻 (*Oscillatoria*)、鱼腥藻 (*Anabaena*)、浮鞘丝藻 (*Planktolyngbya*)、绿藻门纤维藻 (*Ackistrodesmus*) 以及轮藻门鼓藻 (*Cosmarium*)。干、支流的主要优势藻属差异较小, 干流的主要优势属有异极藻、脆杆藻、桥弯藻和浮鞘丝藻, 支流的主要优势属有异极藻、脆杆藻、桥弯藻和颤藻。优势属异极藻、

脆杆藻和桥弯藻在各采样点均有出现, 舟形藻和鼓藻分别仅在玉年曲 Y2 采样点和甲玛沟 J2 样点出现。

2.2 拉萨河中下游流域环境特征

本研究期间, 水温在 $9.4 \sim 16.3^\circ\text{C}$ 之间, 平均温度 13.0°C 。电导率除甲玛沟 J1 ($635.5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) 和 J2 ($608.4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) 采样点外, 在 $121.3 \sim 227.2 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化(表 2)。水体呈碱性, 平均 pH 值为 8.91。溶解氧的浓度均值为 $6.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 6 条支流的上游溶解氧浓度均大于下游, 但无显著性差异 ($P > 0.05$)。流速变化范围大, 为 $0.14 \sim 1.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 单因素方差分析结果表明流速在干流与各支流之间无显著差异 ($P > 0.05$)。干流各样点 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 等氮磷营养盐平均

浓度均低于支流,而 TOC 和 HCO_3^- 平均浓度则表现为干流高于支流. 根据《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),除甲玛沟 J1 和 J2 采样点总氮、总磷浓度超过 II 类水质标准外,拉萨河中下游流域其他采样点水体环境因子均符合国家地表水 II 类水质标准,表明拉萨河中下游整体水质状况良好.

表 1 拉萨河中下游流域附石藻类优势属及优势度¹⁾
Table 1 Dominant genera and dominance of epilithic algae in the middle and lower reaches of the Lhasa River

优势属	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	I1	I2	X1
异极藻 <i>Gomphonema</i>	0.167	0.116	0.287	0.122	0.099	0.075	0.078	0.303	0.250	0.201
脆杆藻 <i>Fragilaria</i>	0.201	0.418	0.291	0.260	0.353	0.706	0.251	0.394	0.292	0.356
桥弯藻 <i>Cymbella</i>	0.069	0.168	0.142	0.122	0.092	0.050	0.099	0.152	0.167	0.144
曲壳藻 <i>Achnanthydium</i>	0.036								0.048	
颤藻 <i>Oscillatoria</i>			0.047		0.094	0.038	0.131	0.051	0.105	0.048
鱼腥藻 <i>Anabaena</i>	0.022	0.024		0.026						
浮鞘丝藻 <i>Planktolynghya</i>	0.128	0.096	0.088	0.180	0.170		0.182			0.021
纤维藻 <i>Ackistrodesmus</i>	0.053		0.020	0.027				0.026	0.035	0.024
优势属	X2	M1	M2	J1	J2	Y1	Y2	D1	D2	
异极藻 <i>Gomphonema</i>	0.224	0.240	0.230	0.208	0.213	0.277	0.293	0.063	0.200	
舟形藻 <i>Navicula</i>							0.022			
脆杆藻 <i>Fragilaria</i>	0.312	0.230	0.230	0.292	0.298	0.307	0.276	0.196	0.213	
桥弯藻 <i>Cymbella</i>	0.240	0.190	0.164	0.208	0.234	0.257	0.293	0.089	0.063	
曲壳藻 <i>Achnanthydium</i>	0.025	0.023				0.034	0.030			
颤藻 <i>Oscillatoria</i> 0.032		0.055		0.072	0.033		0.120	0.147		
鱼腥藻 <i>Anabaena</i>										0.039
浮鞘丝藻 <i>Planktolynghya</i>	0.035	0.147	0.181	0.154				0.329	0.138	
纤维藻 <i>Ackistrodesmus</i>		0.025		0.035	0.036			0.023		
鼓藻 <i>Cosmarium</i>					0.060					

1) 数值为优势属的优势度,未列数值表示优势度 < 0.02

表 2 拉萨河中下游流域水质理化因子¹⁾
Table 2 Physical and chemical variables of water quality in the middle and lower reaches of the Lhasa River

环境因子	干流	支流	F	P
WT/℃	13.69 ± 1.52 (11.5 ~ 15.5)	12.65 ± 2.14 (9.4 ~ 16.3)	1.252	0.279
EC/μS·cm ⁻¹	162.06 ± 23.13 (122.7 ~ 193.7)	236.09 ± 182.86 (121.3 ~ 635.5)	0.835	0.374
pH	9.01 ± 0.44 (8.31 ~ 9.74)	8.85 ± 0.58 (7.68 ~ 9.65)	0.394	0.539
DO/mg·L ⁻¹	6.92 ± 0.15 (6.80 ~ 7.24)	6.89 ± 0.32 (6.26 ~ 7.40)	0.065	0.801
v/m·s ⁻¹	0.67 ± 0.42 (0.29 ~ 1.39)	0.59 ± 0.31 (0.14 ~ 1.06)	0.215	0.649
TN/mg·L ⁻¹	0.76 ± 0.06 (0.66 ~ 0.82)	0.97 ± 0.38 (0.60 ~ 1.71)	2.016	0.174
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.32 ± 0.19 (0.06 ~ 0.60)	0.48 ± 0.43 (0.09 ~ 1.52)	0.880	0.361
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.04 ± 0.01 (0.03 ~ 0.05)	0.05 ± 0.03 (0.03 ~ 0.11)	0.720	0.408
TP/mg·L ⁻¹	0.07 ± 0.01 (0.06 ~ 0.08)	0.09 ± 0.08 (0.05 ~ 0.33)	0.350	0.562
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0.005 ± 0.004 (0.003 ~ 0.014)	0.012 ± 0.013 (0.003 ~ 0.036)	2.088	0.167
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	1.25 ± 0.36 (0.67 ~ 1.68)	1.40 ± 0.43 (0.83 ~ 2.20)	0.553	0.467
TOC/mg·L ⁻¹	2.07 ± 0.30 (1.79 ~ 2.64)	1.82 ± 0.32 (1.01 ~ 2.20)	2.778	0.114
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	51.12 ± 5.69 (48.80 ~ 65.07)	50.16 ± 16.21 (32.53 ~ 81.33)	0.028	0.870

1) 括号外的数值为平均值 ± 标准差,括号内的数值为各参数的变化范围; P < 0.05 表示干、支流环境因子差异显著

2.3 附石藻类与环境因子关系

对拉萨河中下游干流 13 个环境因子进行 Spearman 相关分析,相关性较强 ($r \geq 0.70$, $P < 0.05$) 的两个指标仅保留一个. EC 同时与 TN、 NH_4^+ -N 和高锰酸盐指数显著相关, TN 同时与 WT、EC、 NO_3^- -N 和高锰酸盐指数显著相关, NO_3^- -N 同时与 WT、TN 和 TOC 显著相关, TOC 同时与 WT、 NO_3^- -N 和 TP 显著相关,剔除 EC、TN、 NO_3^- -N 和 TOC (表 3). 根据剩余 9 个环境因子 VIF 计算结果,

依次剔除 VIF 值大于 10 的 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 和高锰酸盐指数,保留 WT、pH、DO、 v 、TP 和 HCO_3^- 进行后续分析. 剩余 6 个环境因子的 VIF 最大值为 4.27,不存在明显的共线关系. 同样对拉萨河中下游支流 13 个环境因子进行 Spearman 相关分析,相关性较强 ($r \geq 0.70$, $P < 0.05$) 的两个指标仅保留一个. 根据相关性分析结果 (表 4),剔除 EC、 NH_4^+ -N、TOC 和 NO_3^- -N. 根据剩余 9 个环境因子 VIF 计算结果,剔除 VIF 值大于 10 的 PO_4^{3-} -P,保留 WT、pH、

DO、 v 、TN、TP、高锰酸盐指数和 HCO_3^- 进行后续分析. 剩余8个环境因子的VIF最大值为8.02,不存在明显的共线性问题.

干流附石藻类优势属与环境因子的冗余分析结果显示,前两个排序轴分别解释了49.70%和32.48%的物种-环境关系变异. 温度和pH与轴1(RDA1)的相关性较高,相关系数分别为0.65和-0.62;溶解氧和流速与轴2(RDA2)的相关性较高,相关系数分别为-0.57和-0.44(图4). 鱼腥藻(*Anabaena*)、浮鞘丝藻(*Planktolyngbya*)、异极藻(*Gomphonema*)、桥弯藻(*Cymbella*)和纤维藻(*Ackistrodesmus*)位于排序图的左侧,与温度和流速呈负相关,而与pH和总磷呈正相关. 脆杆藻(*Fragilaria*)对流速响应显著,与温度和溶解氧呈正相关,而与pH和总磷呈负相关. 颤藻(*Oscillatoria*)受流速影响较小,仅与温度呈正相关,而与其他环境

因子呈负相关.

支流附石藻类优势属与环境因子的冗余分析结果显示,前两个排序轴分别解释了40.71%和12.10%的物种-环境关系变异. HCO_3^- 、流速和pH与轴1(RDA1)的相关性较高,总磷和流速与轴2(RDA2)的相关性较高. HCO_3^- 和pH沿着RDA第1轴从左至右逐渐降低,而流速沿着RDA第1轴从左至右逐渐降低;沿RDA第2轴从下向上,总磷和流速逐渐增加(图5). 浮鞘丝藻(*Planktolyngbya*)与轴1(RDA1)的相关性较高,相关系数为0.64,与流速呈正相关,而与 HCO_3^- 和pH呈负相关. 异极藻(*Gomphonema*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、桥弯藻(*Cymbella*)、曲壳藻(*Achnanthisidium*)和纤维藻(*Ackistrodesmus*)分布在排序的左侧,与 HCO_3^- 、高锰酸盐指数和温度呈正相关,而与流速、总磷和溶解氧呈负相关.

表3 干流13个环境因子的Spearman相关系数¹⁾
Table 3 Spearman correlation coefficient of 13 environmental factors in the main stream

	WT	EC	pH	DO	v	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	高锰酸盐指数	TOC
EC	-0.57											
pH	-0.35	-0.10										
DO	0.29	-0.62	-0.17									
v	-0.15	0.69	-0.06	-0.07								
TN	0.79 *	-0.90 **	0.11	0.47	-0.46							
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.96 ***	-0.62	-0.37	0.33	-0.23	0.77 *						
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.28	-0.83 *	0.57	0.33	-0.64	0.72	0.35					
TP	-0.56	0.58	0.60	-0.55	0.36	-0.57	-0.54	-0.04				
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	-0.34	0.17	-0.11	-0.02	0.20	-0.24	-0.20	-0.26	-0.07			
高锰酸盐指数	-0.71	0.91 **	0.15	-0.60	0.64	-0.85 *	-0.71	-0.65	0.66	0.47		
TOC	-0.81 *	0.66	0.55	-0.37	0.42	-0.73	-0.83 *	-0.20	0.88 **	-0.04	0.72	
HCO_3^-	-0.57	0.07	0.00	0.38	0.12	-0.37	-0.39	-0.05	0.10	0.68	0.30	0.27

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$,下同

表4 支流13个环境因子的Spearman相关系数
Table 4 Spearman correlation coefficient of 13 environmental factors in the tributaries

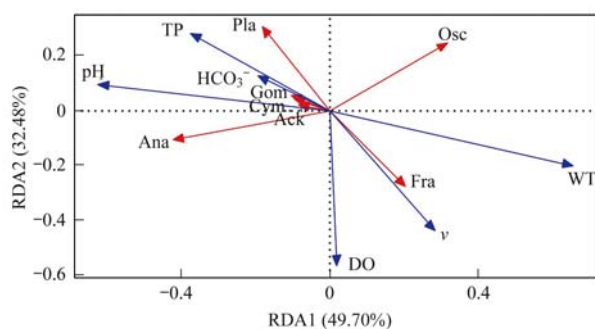
	WT	EC	pH	DO	v	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	高锰酸盐指数	TOC
EC	-0.15											
pH	-0.17	-0.79 **										
DO	-0.83 ***	0.07	0.16									
v	-0.23	0.45	-0.63 *	0.25								
TN	0.07	0.92 ***	-0.70 *	-0.06	0.20							
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.05	0.91 ***	-0.69 *	-0.01	0.20	0.95 ***						
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	-0.10	0.95 ***	-0.83 ***	-0.03	0.46	0.82 ***	0.78 **					
TP	-0.31	0.75 **	-0.67 *	0.12	0.39	0.62 *	0.80 **	0.67 *				
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	-0.03	-0.39	0.19	-0.21	0.06	-0.35	-0.34	-0.34	-0.22			
高锰酸盐指数	0.20	0.40	-0.41	-0.48	0.21	0.33	0.28	0.44	0.26	0.25		
TOC	0.28	-0.77 **	0.78 **	-0.19	-0.57	-0.56	-0.62 *	-0.82 **	-0.82 **	0.36	-0.19	
HCO_3^-	0.13	-0.40	0.60 *	-0.05	-0.72 **	-0.18	-0.14	-0.56	-0.35	-0.14	-0.18	0.71 **

3 讨论

3.1 拉萨河中下游流域附石藻类群落特征

本研究发现,除干流G1和G7采样点与甲玛沟

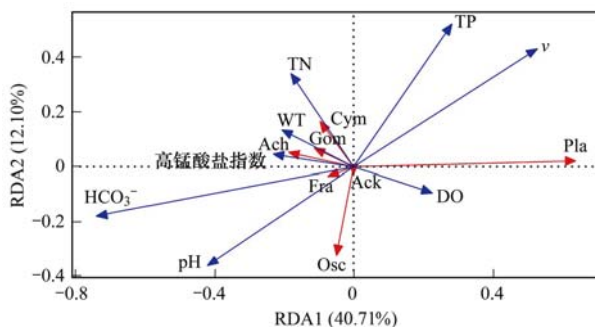
J1和J2采样点外,拉萨河中下游流域附石藻类种类组成均以硅藻为主,比例达到50%以上. 在自然的、未受人类干扰的河流中,藻类群落的种类组成以硅藻为主,同时兼有少量蓝藻和绿藻. 当河流受到一定



Ack: 纤维藻 (*Ackistrodesmus*); Osc: 颤藻 (*Oscillatoria*); Ana: 鱼腥藻 (*Anabaena*); Pla: 浮鞘丝藻 (*Planktolingbya*); Gom: 异极藻 (*Gomphonema*); Fra: 脆杆藻 (*Fragilaria*); Cym: 桥弯藻 (*Cymbella*)

图4 干流附石藻类优势属与环境因子的 RDA 排序

Fig. 4 RDA ordination diagram between the dominant genera of epilithic algae and environmental variables in the main stream



Ack: 纤维藻 (*Ackistrodesmus*); Osc: 颤藻 (*Oscillatoria*); Pla: 浮鞘丝藻 (*Planktolingbya*); Gom: 异极藻 (*Gomphonema*); Fra: 脆杆藻 (*Fragilaria*); Cym: 桥弯藻 (*Cymbella*); Ach: 曲壳藻 (*Achnanthes*)

图5 支流附石藻类优势属与环境因子的 RDA 排序

Fig. 5 RDA ordination diagram between the dominant genera of epilithic algae and environmental variables in the tributaries

的污染以后,藻类物种的丰富度将降低,其中一些藻类物种变成罕见种,同时藻类群落的种类组成从以硅藻占优势转变为以蓝绿藻占优势^[31, 32]. 因此,拉萨河中下游流域大多数采样点附石藻类群落组成仍保持自然河流状态. 而 G1 采样点上游存在河沙开采, G7 采样点附近存在农业灌溉, J1 采样点上游存在矿产资源开发,分别导致了水体泥沙含量的增加及采样点周边农业、工业面源污染的产生,从而对底栖生物种类组成及数量产生直接或间接的影响^[12].

拉萨河中下游流域附石藻类的群落结构组成具有一定的独特性,物种丰富度及细胞密度均较低,共采集到附石藻类 6 门 31 属,平均密度为 $1.92 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$,显著低于同纬度低海拔地区河流. 比如,梅溪河流域鉴定出附石藻类 5 门 47 属 106 种(含变种),平均密度 $2.29 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[12],香溪河流域鉴定出附石藻类 4 门 218 种(含变种),平均密度 $8.75 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[33],苕溪(临安段)鉴定出附石

藻类 6 门 71 属 240 种(包括变种),全年平均密度 $2.28 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[34]. 海拔作为决定全球生物格局的宏观环境因子,不会对河流生物产生直接影响,而是通过影响一个地区的温度、光照和降水等环境因素,间接作用于河流生态系统^[35, 36]. 通常情况下,随着海拔的升高,水温降低,河流冰冻期延长,物种的丰富度随之降低,藻类细胞密度呈现下降趋势^[18, 37];同时不同的生境环境造成了藻类对营养物质及环境因子的需求也不相同,这就决定了不同地理位置各种类群的消长^[38].

3.2 拉萨河中下游流域附石藻类群落特征与环境因子的关系

已有研究发现附石藻类的组成和生长受众多水环境因素的影响,包括温度、营养盐浓度、流速、流量的季节变化和 pH 等^[39~42],不同因素的相对重要性随时间和空间而变化^[43]. 本研究发现拉萨河中下游干支流附石藻类丰富度、细胞密度差异显著,可能与影响干支流群落结构的环境因子有关. RDA 分析结果表明,干流附石藻类群落结构受温度、pH 和溶解氧影响较大,支流附石藻类群落结构受 HCO_3^- 和流速影响较大.

拉萨河属高原河流,水温比低海拔地区低,低温可能使得某些藻类(如喜高温的蓝藻、绿藻^[12])不宜生存,从而导致整个附石藻类群落物种丰富度和细胞密度发生改变. 水温作为大多数藻类自生特性如酶活性、光合作用、生长速率、物种间相互作用等的重要驱动力^[44],是影响附石藻类物种组成和生物量的关键因子^[45]. 温度可通过控制底栖藻类光合作用的酶促反应或者呼吸作用的强度,直接影响藻类的增殖,也可通过控制水体中各类营养物的溶解、分解或解离等理化过程间接影响藻类的生长^[12]. 有研究发现,当水温在 $18.70 \sim 27.50^\circ\text{C}$ 之间,底栖藻类叶绿素 a 含量与水温呈正相关,水温显著影响藻类生物量;温度适宜时藻类生长急剧增加^[46]. 同样有学者认为,河流藻类丰富度和密度在适宜温度范围内与水温呈正相关,但当温度超过某些藻类的生态幅时,耐受性差的藻类物种会消失^[18]. 本研究发现,绿藻门纤维藻、蓝藻门鱼腥藻和浮鞘丝藻细胞密度与水温呈负相关,为上述分析提供了验证.

pH 是重要的水体环境因子,对底栖藻类群落组成和物种分布影响较大^[47]. pH 不仅可以直接影响藻类的生理生化活动^[48],还可以与水体中其他理化因子共同作用于藻类^[42, 49]. 有研究发现,不同污染性硅藻与 pH 呈现不同相关性,比如,α-中污染性硅藻如变异直链藻、双尖棱板藻的细胞密度与 pH 呈正相关;β-中污染性硅藻如近缘桥弯藻、扁圆卵形

藻、肋缝菱形藻细胞密度与 pH 呈负相关,喜雪曲壳藻细胞密度与 pH 呈正相关; β -中高污染性硅藻如小型异极藻、梅尼小环藻与 pH 呈负相关^[32,50]. 本研究发现,硅藻门优势藻如异极藻和桥弯藻的细胞密度与 pH 呈正相关,而脆杆藻细胞密度与 pH 呈负相关,产生差异的原因可能是藻类对水体酸碱度的耐受范围不同^[51].

溶解氧是藻类进行生理生化活动的重要条件,藻类需要氧气进行生长繁殖,完成新陈代谢. 由于底栖藻类与空气之间隔着水层,因此水体中的溶解氧浓度对底栖藻类的生长发育起着重要作用^[52]. 本研究发现,干流大部分优势藻属细胞密度与溶解氧浓度呈负相关. 这可能与拉萨河的低溶解氧环境有关. 同一温度下,溶解氧与空气中的氧分压呈正相关,随着海拔的上升,溶解氧含量逐步下降,同时有研究表明,相同水质条件下,高海拔地区河流溶解氧含量低于低海拔地区^[53]. 这也很好地解释了拉萨河流域附石藻类物种丰富度和细胞密度低于平原地区河流.

水体 HCO_3^- 含量几乎不受人类活动影响^[54],其与水体其他环境因子相互作用于藻类群落结构. 附石藻类进行光合作用吸收二氧化碳,影响水体中碳酸、碳酸根和碳酸氢根之间的电离水解平衡,导致水体 pH 偏碱性,若水体碳酸、碳酸根和碳酸氢根离子浓度高,则 pH 变化小;若水体碳酸、碳酸根和碳酸氢根离子浓度低,则 pH 变化大^[55]. 本研究发现,硅藻门优势藻细胞密度均与碳酸氢根呈正相关,而硅藻门优势藻如异极藻、脆杆藻和曲壳藻的细胞密度与 pH 呈正相关,曲壳藻细胞密度几乎不受 pH 影响,说明拉萨河中下游碳酸氢根离子浓度有利于硅藻生长;低浓度的碳酸、碳酸根和碳酸氢根离子导致 pH 的变化范围大,而藻类可能对水体酸碱度的耐受范围不同^[51],从而对 pH 做出不同反应.

水流速度同样是影响着生藻类生长的重要驱动力,在较高的流速下,藻类生物量较低^[56]. 有研究报道,高流速水体产生剪切应力,破坏藻类垫层并移动基质(如沙子和淤泥),防止藻类定植^[57],不仅直接影响藻类的定居和迁出速率,还间接地影响河流基质稳定性^[39]. 在太子河流域和雅砻江(锦屏段)底栖藻类群落的研究中,均发现较大的流速不利于底栖藻类的生长繁殖,水流湍急的干流的藻类细胞密度、丰富度及优势种属与水流平缓的支流差异较大^[37,38]. 拉萨河全长 551 km,总落差 1 620 m,平均坡降 2.9‰. 本研究发现,拉萨河中下游支流水体流速范围为 $0.14 \sim 1.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均流速为 $0.59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此单从水体流速来看,拉萨河中下游流域水体流速较为湍急,将在一定程度上影响附石藻类

组成及细胞密度. 同时 RDA 分析结果表明,大部分优势藻属细胞密度与流速呈负相关,支持了上述分析.

4 结论

(1) 拉萨河中下游流域共计鉴定出附石藻类 6 门 31 属,附石藻类平均细胞密度为 $1.92 \times 10^6 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-2}$,其中硅藻门种类数和细胞密度在各采样点均最大;干、支流附石藻类种类数和细胞密度差异显著.

(2) 干、支流优势藻属差异较小,干流的主要优势属有硅藻门异极藻、脆杆藻、桥弯藻和蓝藻门浮鞘丝藻,支流的主要优势属有硅藻门异极藻、脆杆藻、桥弯藻和蓝藻门颤藻.

(3) 拉萨河中下游流域干流附石藻类群落结构主要受温度、pH 和溶解氧影响,支流附石藻类群落结构主要受 HCO_3^- 和流速影响.

致谢:感谢中国科学院水生生物研究所程飞老师在野外采样过程中提供的帮助以及呼伦贝尔市环境监测中心站君珊老师提供的拉萨河流域矢量边界图,特此一并致谢.

参考文献:

- [1] Hauer F R, Lamberti G A. *Methods in stream ecology* [M]. Amsterdam: Academic Press, 2006. 107-119.
- [2] 谭香, 张全发. 底栖硅藻应用于河流生态系统健康评价的研究进展[J]. 水生生物学报, 2018, 42(1): 212-220.
Tan X, Zhang Q F. A review of diatoms in biomonitoring and ecosystem health assessment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(1): 212-220.
- [3] Stevenson R J. An Introduction to algal ecology in freshwater benthic habitats [A]. In: Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L (Eds.). *Algal Ecology* [M]. Amsterdam: Academic Press, 1996. 3-30.
- [4] Leland H V, Brown L R, Mueller D K. Distribution of algae in the San Joaquin River, California, in relation to nutrient supply, salinity and other environmental factors [J]. Freshwater Biology, 2001, 46(9): 1139-1167.
- [5] Potapova M, Charles D F. Distribution of benthic diatoms in U. S. rivers in relation to conductivity and ionic composition [J]. Freshwater Biology, 2003, 48(8): 1311-1328.
- [6] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River Basin in relation to geology and land Use [J]. Freshwater Biology, 2000, 44(2): 279-301.
- [7] Smucker N J, Becker M, Detenbeck N E, et al. Using algal metrics and biomass to evaluate multiple ways of defining concentration-based nutrient criteria in streams and their ecological relevance [J]. Ecological Indicators, 2013, 32: 51-61.
- [8] 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 等. 三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3099-3107.
Fu J K, Liu L, He X Y, et al. Dynamics of epilithic algae communities and their relationship with environmental factors during storage and non-storage periods in the Three Gorges

- Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3099-3107.
- [9] Werner P, Köhler J. Seasonal dynamics of benthic and planktonic algae in a nutrient - rich lowland river (Spree, Germany)[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2005, **90**(1): 1-20.
- [10] Tan X, Xia X L, Zhao Q L, *et al.* Temporal variations of benthic diatom community and its main influencing factors in a subtropical river, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(1): 434-444.
- [11] Öterler B. A short-term study on the phytoplanktonic and epilithic algae of Arda River (Edirne, Turkey)[J]. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, **33**(3): 299-306.
- [12] 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 等. 三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1636-1647.
- Mi W M, Shi J Q, Yang Y J, *et al.* Changes in epilithic algae community and its relationship with environmental factors in the Meixi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1636-1647.
- [13] Temizel B, Soyulu E, Maraştoğlu F. Water quality assessment of the Pazarsuyu Stream based on epilithic diatom communities[J]. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 2017, **190**(3): 189-197.
- [14] Tan X, Ma P M, Xia X L, *et al.* Spatial pattern of benthic diatoms and water quality assessment using diatom indices in a subtropical river, China [J]. *Clean-Soil Air Water*, 2014, **42**(1): 20-28.
- [15] Yao Z J, Liu J, Huang H Q, *et al.* Characteristics of isotope in precipitation, river water and lake water in the Manasarovar basin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Geology*, 2009, **57**(3): 551-556.
- [16] 陈歆, 靳甜甜, 苏辉东, 等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 799-809.
- Chen X, Jin T T, Su H D, *et al.* Construction and application of health assessment index system for Lhasa River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 799-809.
- [17] 张军燕, 高志, 沈红保, 等. 拉萨河春季浮游生物群落结构特征研究[J]. *淡水渔业*, 2017, **47**(4): 23-28, 62.
- Zhang J Y, Gao Z, Shen H B, *et al.* Community structure characteristics of plankton in Lhasa River in spring [J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, **47**(4): 23-28, 62.
- [18] 君珊, 王东波, 周健华, 等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 787-798.
- Jun S, Wang D B, Zhou H J, *et al.* Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 787-798.
- [19] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [20] Qin H H, Gao B, He L, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of the Lhasa River under the influence of anthropogenic activities[J]. *Water*, 2019, **11**(5): 948.
- [21] Huang X, Sillanpää M, Duo B, *et al.* Water quality in the Tibetan Plateau: metal contents of four selected rivers [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 270-277.
- [22] Mao G Z, Zhao Y S, Zhang F R, *et al.* Spatiotemporal variability of heavy metals and identification of potential source tracers in the surface water of the Lhasa River basin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(8): 7442-7452.
- [23] 陈丽, 王东波, 君珊. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 757-769.
- Chen L, Wang D B, Jun S. Macroinvertebrate community structure and relationships with environmental factors in the Lhasa River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 757-769.
- [24] Lazorchak J M, Klemm D J, Peck D V. Environmental monitoring and assessment program-surface waters: field operations and methods for measuring the ecological condition of wadeable streams[R]. Washington: EPA, 1998. 119-132.
- [25] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏藻类[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [26] 朱惠忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [27] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 300-416.
- [28] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(第一至二十卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2016.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [30] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R [M]. New York: Springer, 2011.
- [31] 冯天翼, 宋超, 陈家长. 水生藻类的环境指示作用[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(32): 257-265.
- Feng T Y, Song C, Chen J Z. Environmental indication function of aquatic algae [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(32): 257-265.
- [32] 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 等. 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3577-3587.
- Liu L, He X Y, Fu J K, *et al.* Benthic diatom communities in the main stream of Three Gorges Reservoir Area and its relationship with environmental factors [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3577-3587.
- [33] 贾兴焕, 吴乃成, 唐涛, 等. 香溪河水系附石藻类的时空动态[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(4): 881-886.
- Jia X H, Wu N C, Tang T, *et al.* Spatiotemporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(4): 881-886.
- [34] 徐玉萍, 张玮, 王丽卿. 苕溪临安段底栖藻类群落结构特征研究[A]. 见: 第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集[C]. 武汉: 中国科协, 湖北省科协, 中国环境科学学会, 2013. 292-302.
- [35] Tonkin J D, Shah R D T, Shah D N, *et al.* Metacommunity structuring in Himalayan streams over large elevational gradients: the role of dispersal routes and niche characteristics [J]. *Journal of Biogeography*, 2017, **44**(1): 62-74.
- [36] Mao S X, Guo S H, Deng H B, *et al.* Recognition of patterns of benthic diatom assemblages within a river system to aid bioassessment [J]. *Water*, 2018, **10**(11), doi: 10.3390/w10111559.
- [37] 吴乃成, 唐涛, 黎道丰, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类群落与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 1697-1703.
- Wu N C, Tang T, Li D F, *et al.* Benthic algal communities in Jinping reach of Yalong River and its main tributaries in relation to environmental variables [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 1697-1703.
- [38] 王丽, 丛玉婷, 卢亚楠, 等. 太子河流域及其主要支流底栖

- 藻类群落与环境因子的关系[J]. 水产养殖, 2018, **39**(7): 6-10.
- Wang L, Cong Y T, Lu Y N, *et al.* Benthic algal communities of Taizi River and its main tributaries in relation to environmental variables[J]. Journal of Aquaculture, 2018, **39**(7): 6-10.
- [39] Soininen J. Assessing the current related heterogeneity and diversity patterns of benthic diatom communities in a turbid and a clear water river[J]. Aquatic Ecology, 2004, **38**(4): 495-501.
- [40] Myrstener M, Rocher-Ros G, Burrows R M, *et al.* Persistent nitrogen limitation of stream biofilm communities along climate gradients in the Arctic[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(8): 3680-3691.
- [41] Taniwaki R H, Matthaei C D, Cardoso T K M, *et al.* The effect of agriculture on the seasonal dynamics and functional diversity of benthic biofilm in tropical headwater streams[J]. Biotropica, 2019, **51**(1): 18-27.
- [42] Schneider S C, Kahlert M, Kelly M G. Interactions between pH and nutrients on benthic algae in streams and consequences for ecological status assessment and species richness patterns[J]. Science of the Total Environment, 2013, **444**: 73-84.
- [43] Stevenson R J. Scale-dependent determinants and consequences of benthic algal heterogeneity[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1997, **16**(1): 248-262.
- [44] Tang T, Jia X H, Jiang W X, *et al.* Multi-scale temporal dynamics of epilithic algal assemblages: evidence from a Chinese subtropical mountain river network[J]. Hydrobiologia, 2016, **770**(1): 289-299.
- [45] Oliveira M A, Goulder R. The effects of sewage-treatment-works effluent on epilithic bacterial and algal communities of three streams in Northern England[J]. Hydrobiologia, 2006, **568**(1): 29-42.
- [46] Ge J W, Wu S Y, Touré D, *et al.* Analysis on biomass and productivity of epilithic algae and their relations to environmental factors in the Gufu River basin, Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(35): 26881-26892.
- [47] Mirzahasanlou J P, Ramezanpour Z, Nejadstari T, *et al.* Temporal and spatial distribution of diatom assemblages and their relationship with environmental factors in Balikhli River (NW Iran)[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2020, **20**(1): 102-111.
- [48] Dixit S S, Cumming B F, Birks H J B, *et al.* Diatom assemblages from Adirondack lakes (New York, USA) and the development of inference models for retrospective environmental assessment[J]. Journal of Paleolimnology, 1993, **8**: 27-47.
- [49] Chen X, Qin Y M, Stevenson M A, *et al.* Diatom communities along pH and hydrological gradients in three montane mires, central China[J]. Ecological Indicators, 2014, **45**: 123-129.
- [50] Dalu T, Wasserman R J, Magoro M L, *et al.* Variation partitioning of benthic diatom community matrices: Effects of multiple variables on benthic diatom communities in an Austral temperate river system[J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 73-82.
- [51] Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands[J]. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 1994, **28**(1): 117-133.
- [52] 刘奕伶, 葛继稳, 李艳元, 等. 古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2182-2191.
- Liu Y L, Ge J W, Li Y Y, *et al.* Correlations between the volume of dominant periphytic algae species and the water quality parameters in Gufu River[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2182-2191.
- [53] 简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 拉萨河中下游底栖动物群落结构特征分析[J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(1): 40-46.
- Jian D, Huang D M, Chang X L, *et al.* Zoobenthos community structure in the middle and lower reaches of Lhasa River[J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(1): 40-46.
- [54] 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉, 等. 控制湖泊水体化学组成的地球化学原理研究[J]. 水科学进展, 1997, **8**(2): 169-175.
- Wu F C, Wan G J, Cai Y R, *et al.* Geochemical mechanisms controlling basic chemical compositions of lake water mass[J]. Advances in Water Science, 1997, **8**(2): 169-175.
- [55] 王自业, 葛继稳, 李建峰, 等. 三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系[J]. 植物科学学报, 2013, **31**(3): 219-227.
- Wang Z Y, Ge J W, Li J F, *et al.* Relationship between periphyton distribution and water quality of Gufu River of Three Gorges Reservoir Area[J]. Plant Science Journal, 2013, **31**(3): 219-227.
- [56] Burrows R M, Beesley L, Douglas M M, *et al.* Water velocity and groundwater upwelling influence benthic algal biomass in a sandy tropical river: implications for water-resource development[J]. Hydrobiologia, 2020, **847**(5): 1207-1219.
- [57] Townsend S A, Douglas M M. Benthic algal resilience to frequent wet-season storm flows in low-order streams in the Australian Tropical Savanna[J]. Freshwater Science, 2014, **33**(4): 1030-1042.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)