

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘奎, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997~2017年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事(1024) 《环境科学》征稿简则(1092) 信息(1226, 1264, 1417)

## 汤旺河着生硅藻群落及其与环境因子的关系

薛浩<sup>1,2</sup>, 王业耀<sup>1,3</sup>, 孟凡生<sup>2\*</sup>, 郑丙辉<sup>1,2</sup>, 张铃松<sup>2</sup>, 程佩璋<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012)

**摘要:** 2018年8月(丰水期),在松花江支流汤旺河,调查了24个点位的着生硅藻群落结构和水环境特征.使用聚类分析、Mcnaughton优势度分析和生态型分析3种方法研究了汤旺河着生硅藻群落结构和清洁度,使用主成分分析、Spearman相关分析和冗余分析等方法研究了汤旺河着生硅藻群落和环境因子的响应关系.结果表明,汤旺河共鉴定出着生硅藻99种(变种),物种丰富.汤旺河丰水期水生态环境质量状况较为健康,着生硅藻主要由清洁种构成,其中 *Achnanthes minutissima* 优势度为0.32,为绝对优势种.聚类分析结果表明,汤旺河采样点位可分为3组;其中组1和组2健康程度较高,优势种均为清洁种,组3健康程度较其余两组偏低, *Nitzschia palea* 和 *Ulnaria ulna* 等耐污种在组3的优势度增加.与组1相比,组2中-高度腐生型和中-富营养型硅藻比例有所增加,极度需氧型硅藻比例有所下降,影响组2硅藻群落结构变化的主要水质因子为高锰酸盐指数.与其他两组相比,组3富营养型硅藻和极度富营养型硅藻比例显著上升,影响组3硅藻群落结构变化的主要水质因子为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN.由此可见,着生硅藻群落可以有效地指示汤旺河水体腐生状况和营养状况.

**关键词:** 汤旺河; 着生硅藻; *Achnanthes minutissima*; 生态型; 腐生状况

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1256-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907182

## Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China

XUE Hao<sup>1,2</sup>, WANG Ye-yao<sup>1,3</sup>, MENG Fan-sheng<sup>2\*</sup>, ZHENG Bing-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ling-song<sup>2</sup>, CHENG Pei-xuan<sup>2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To reasonably evaluate the eco-environmental health of the Tangwang River, which is a tributary of the Songhua River in China, community structures of periphyton and cleanliness of the benthic diatom at 24 sampling sites were investigated using McNaughton's dominance index, clustering, and ecotype analysis, while the relationship between the environmental factors and the diatom communities were studied by principal component analysis, Spearman correlation test, and redundancy analysis, in August 2018 (flood season). A total of 99 species or variants of benthic diatoms have been identified, indicating that there were abundant diatoms in the Tangwang River. *Achnanthes minutissima* and other diatoms that can be used as clean water indicators were dominant species in the Tangwang River, which indicates that the eco-environmental quality of the Tangwang River was relatively healthy in the flood season. Of these, the dominant degree of *A. minutissima* was 0.32, making it the absolute dominant species in Tangwang River. Sampling sites can be divided into three groups based on clustering analysis. The dominant species of group 1 and group 2 were mainly clean species, indicating that the two groups were in a relatively healthy state. *Nitzschia palea*, *Ulnaria ulna*, and other diatoms that can be used as eutrophication indicators were the dominant species of group 3, indicating that group 3 was less healthy than the other two groups. From groups 1 and 2, the results from ecotype analysis showed a decrease in the proportion of polyoxybiontic diatoms and an increase in the proportion of  $\alpha$ -mesosaprobe diatoms, polysaprobe diatoms, oligo-mesotrophic diatoms, mesotrophic diatoms, meso-eutrophic diatoms, and eutrophic diatoms. Compared to the other two groups, the results from ecotype analysis showed a significant increase in the proportion of  $\alpha$ -mesosaprobe diatoms, polysaprobe diatoms, eutrophic diatoms and hyper-eutrophic diatoms in group 3. The predominant aquatic influencing factors of diatom community structures for the Tangwang River were permanganate index, total nitrogen (TN), and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), of which permanganate index was the main factor for group 2, while TN and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  were the main factors for group 3. As a result, the eco-environmental quality of the Tangwang River was good, and the benthic diatom was found to be an effective indicator of the nutritional conditions and saprophytic status.

**Key words:** Tangwang River; benthic diatom; *Achnanthes minutissima*; ecological type; saprobic

着生硅藻是一种细胞壁由二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )组成的单细胞微藻类,通常附着在水中的石头和植物上,它们对水环境因子非常敏感<sup>[1]</sup>,对环境变化特别是有机污染和富营养化反应迅速.由于硅藻具有从贫营养化到富营养化的广谱耐受性,并且在世界范围内均有分布<sup>[2]</sup>,已被广泛应用于监测河流水质的变

化<sup>[3-5]</sup>.有研究表明,与蓝绿藻相比,硅藻能够更快

收稿日期: 2019-07-21; 修订日期: 2019-10-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2017ZX07302-002)

作者简介: 薛浩(1989~),男,博士研究生,主要研究方向为流域水生态环境监测与评价, E-mail: xh715810629@163.com

\* 通信作者, E-mail: mengfs@caes.org.cn

地反映环境变化<sup>[6,7]</sup>,更适合作为水生态健康评价的生物指标<sup>[8]</sup>.目前,利用硅藻进行河流水质评价的方法较多,包括多样性指数、生态位<sup>[9]</sup>、硅藻生物指数<sup>[10]</sup>、生物完整性指数<sup>[11]</sup>和硅藻生态偏好<sup>[12,13]</sup>等.

国外关于着生硅藻水质评价的研究起步较早,20世纪50年代,就已经有学者研究了污染对淡水藻类群落的影响<sup>[4]</sup>.20世纪70年代至今,国外学者进行了大量的研究工作,包括着生硅藻物种对有机污染<sup>[14,15]</sup>、富营养化<sup>[3]</sup>和腐生程度<sup>[16]</sup>等不同水体污染类型的耐受程度研究,以及不同着生硅藻物种的生态偏好研究<sup>[13]</sup>.近年来,国内关于着生硅藻的相关研究也逐渐增多,有学者调查了抚仙湖<sup>[17]</sup>、浑太河<sup>[18]</sup>和太子河<sup>[19]</sup>等流域的着生硅藻群落结构,并研究了硅藻群落与水环境因子间的响应关系.也有学者使用着生硅藻指数,对东江<sup>[20]</sup>、渭河<sup>[21]</sup>和梧桐河<sup>[22]</sup>等流域的水生态环境质量进行了评价,结果表明,在我国广泛应用着生硅藻群落进行生物监测与评价是可行的.但是,目前国内关于着生硅藻物种清洁度及生态型的相关研究和分析较少.

汤旺河流域森林资源丰富,有众多国家级自然保护区,人类活动强度较松花江其他支流偏低,河流自然状况良好.对汤旺河着生硅藻群落开展研究,可以更科学地反映较低强度人类活动下松花江流域的水质状况.本研究调查了汤旺河着生硅藻群落和环境因子,综合运用聚类分析、Mcnaughton 优势度分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)、Spearman 相关分析、除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)和冗余分析(redundancy analysis, RDA)等分析方法,研究了汤旺河流域丰水期着生硅藻群落结构差异,优势种差异以及优势种清洁度和生态型变化,探讨了着生硅藻作为汤旺河水环境质量的指示物种的可行性,以期为我国着生硅藻的河流水环境质量监测与评价工作提供基础数据与研究案例.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与点位设置

汤旺河发源于伊春市乌伊岭区所辖的小兴安岭中北部,是松花江下游的一条主要支流,被誉为松花江干流的北岸第一河.汤旺河流经伊春和汤原两市县,河流全长509 km,流域面积21 245 km<sup>2</sup>,多年平均径流量55.2亿 m<sup>3</sup>.本研究共设置24个采样点(见图1),于2018年8月对汤旺河干流及其主要支流如东汤旺河、西汤旺河、二青河、五道库河和伊春河等进行了采样调查.

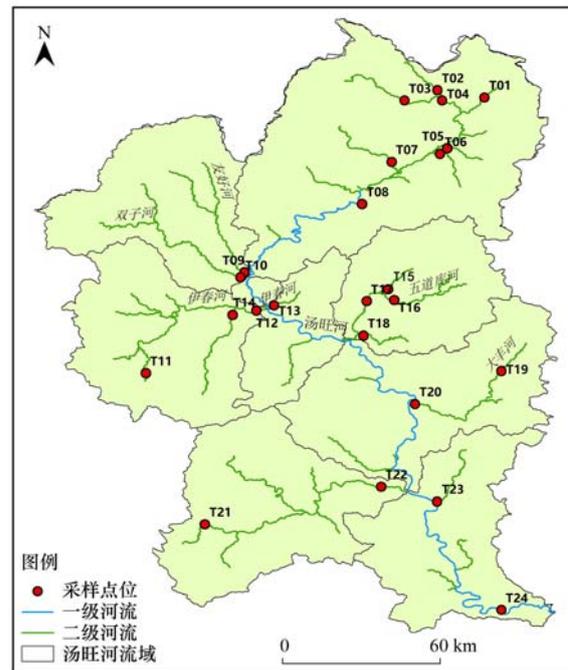


图1 汤旺河采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Tangwang River

### 1.2 着生藻类样品采集、处理与分析

在采样点河流上下游100 m范围内,依据河流生境的不同(流速、水深和透明度),在不同位置挑选3个石块(石块上表面积<200 cm<sup>2</sup>),其中可涉水河流左、右岸至少各采集1个,不可涉水河流沿一侧采集.用底面直径2.8 cm钟形塑料盖划定取样范围,用硬毛刷刮取该范围内着生藻,用纯净水冲刷至不锈钢托盘中,加5%甲醛溶液固定后转移到广口塑料瓶中保存,作为着生藻类的定量样品.对于没有石头的点位,刷取枯枝、落叶等基质的着生藻类样品<sup>[22]</sup>.

样品运回实验室后,静置沉淀48 h后,取0.1 mL均匀样品于400倍显微镜(OLMPUS BX51)下进行种类鉴定和细胞计数<sup>[23]</sup>.取部分样品进行酸化处理(浓硝酸和浓硫酸),并制成硅藻封片,在1 000倍光学显微镜(OLMPUS BX51)下进行鉴定计数,每张封片观察到的硅藻细胞个数不少于400个<sup>[24]</sup>.400倍视野下样品鉴定到属,1 000倍视野下硅藻样品鉴定到种.

### 1.3 水质、水文和生境指标测定

使用便携式水质分析仪(YSI Professional Plus, Yellow Springs, OH, USA)现场测定水温( $T$ )、电导率(Cond)、溶解氧(DO)和pH.同步采集各采样点河水样品,预处理后带回实验室,测定高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝氮( $\text{NO}_3^-$ -N)和氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N),水样采集、预处理、保存以及测定参照文献<sup>[25]</sup>;现场打分按照文献<sup>[26]</sup>,获取生境得分(QHEI)和底质得分(Bott).

#### 1.4 数据分析

根据着生硅藻多度数据计算各采样点香农多样性指数  $H$  和 Pielou 均匀度指数  $J$ , 计算公式分别如下:

$$H = - \sum (n_i/N) \times \ln(n_i/N) \quad (1)$$

$$J = H/\ln S \quad (2)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  种藻类的个体数;  $N$  为样品中藻类总个体数;  $S$  是藻类总物种数.

对着生硅藻物种多度数据进行弦转化后计算欧氏距离矩阵, 基于簇内误差平方和, 使用肘方法确定最佳分类数, 使用 Ward 最小方差法对所有采样点位进行聚类分析. 本文采用 Mcnaughton 优势度指数来判定优势种的组成, 选取 Mcnaughton 优势度指数 ( $Y$ ) > 0.02 的藻类为优势种. 公式如下:

$$Y = (n_i/N)f_i \quad (3)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  种藻类的细胞总数;  $N$  为所有藻类的总细胞数;  $n_i/N$  为第  $i$  种藻类的细胞数占所有藻类总细胞数的比值;  $f_i$  为第  $i$  种藻类在样点中出现的频率.

对生境质量数据和水环境理化数据, 首先进行 PCA, 判断影响汤旺河水环境的主要环境因子, 对筛选出的主要环境因子进行 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. 对着生硅藻相对多度数据进行 DCA, 如果 DCA 排序前 4 个轴中最大值超过 4, 选择单峰模型排序更合适; 如果是小于 3, 则选择线性模型更好. 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. 进行 PCA、Spearman 相关分

析和 RDA 时, 除 pH 以外的所有水理化数据和着生硅藻相对多度数据均进行数据转换 [ $\lg(x+1)$ ] [22]. 以上分析均通过 R 3.5.2 完成, 聚类分析、PCA、DCA 和 RDA 通过“vegan”程序包实现, 聚类最佳分类数确定通过“factoextra”程序包实现, VIF 通过“car”程序包计算.

## 2 结果与分析

### 2.1 着生硅藻群落结构分析

汤旺河共鉴定出着生藻类 6 门 49 属 107 种 (属) 6 变种, 其中硅藻门 35 属 93 种 6 变种, 绿藻门 6 属, 蓝藻门 5 属, 裸藻门、隐藻门和黄藻门各 1 属. 硅藻群落中, 舟形藻属 (*Navicula*)、菱形藻属 (*Nitzschia*) 和异极藻属 (*Gomphonema*) 鉴定出的分类单元最多, 分别为 19 种、13 种和 10 种. 所有采样点位中, T04 点位物种丰富度最高, 共鉴定出着生硅藻 30 种; T12 点位物种丰富度最低, 共鉴定出着生硅藻 11 种; 汤旺河各点位着生硅藻平均物种数为 20 种, 各点位间物种丰富度差别较小.

汤旺河丰水期香农多样性指数平均得分 2.81, Pielou 均匀度指数平均得分 0.65. 其中 T04 点位香农多样性指数 4.29, 得分最高, T24 点位 Pielou 均匀度指数 0.91, 得分最高. T09 点位香农多样性指数与 Pielou 均匀度指数得分均最低, 分别为 0.96 和 0.25, 导致 T09 点位均匀度过低的主要原因是 *Achnantheidium minutissimum* 在该点位相对丰度接近 90%.

使用肘方法确定最佳分类数, 结果表明, 汤旺河最佳分组数为 3 组. 使用 Ward 最小方差法对所有采样点位进行聚类分析, 聚类分析结果见图 2. 组 1

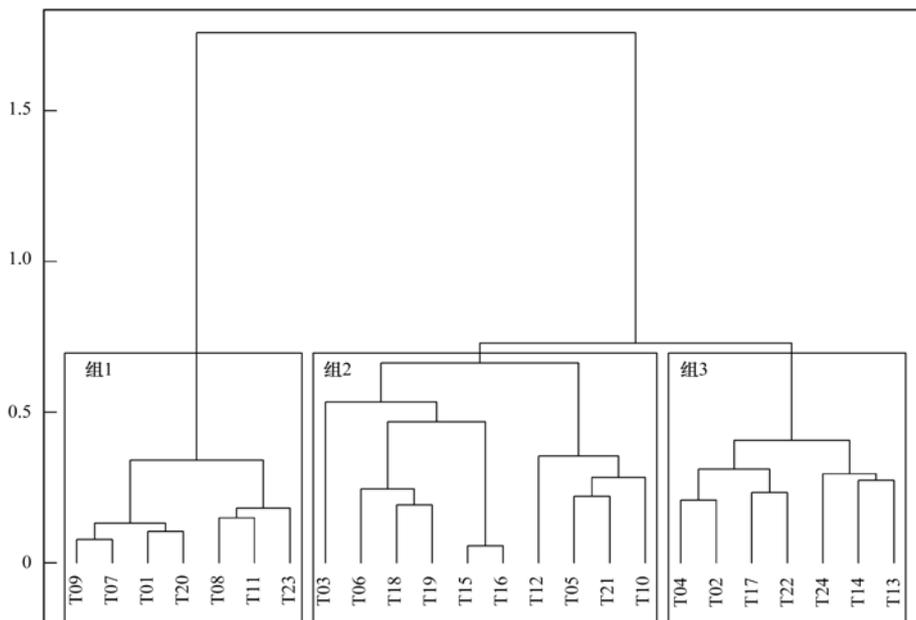


图 2 三组分类的聚类树状图

Fig. 2 Dendrogram with boxes around the three selected groups

包含 7 个点位,组 2 包含 10 个点位,组 3 包含 7 个点位。

选取 Menaughton 优势度指数 ( $Y$ ) > 0.02 为优势种,汤旺河全流域以及各分组的优势种和优势度

结果见表 1。结果表明, *Achnantheidium minutissimum* 为汤旺河着生硅藻绝对优势种,其在全流域优势度为 0.32, *A. minutissimum* 在组 1 的优势度最高,达到了 0.5。

表 1 汤旺河着生硅藻优势种

Table 1 Dominant species of benthic diatom in the Tangwang River

代码	拉丁文名称	优势度	代码	拉丁文名称	优势度
全流域			组 2		
ADMI	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	0.32	ADMI	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	0.25
ENMI	<i>Encyonema minutum</i>	0.09	ENMI	<i>Encyonema minutum</i>	0.12
GPRO	<i>Gomphonema productum</i>	0.06	GPRO	<i>Gomphonema productum</i>	0.10
RSIN	<i>Reimeria sinuata</i>	0.04	RSIN	<i>Reimeria sinuata</i>	0.07
ESLE	<i>Encyonema silesiacum</i>	0.02	ABIA	<i>Achnanthes biasolettiana</i>	0.05
ABIA	<i>Achnanthes biasolettiana</i>	0.02	GMIN	<i>Gomphonema minutum</i>	0.03
NCRY	<i>Navicula cryptocephala</i>	0.02	组 3		
组 1			NCRY	<i>Navicula cryptocephala</i>	0.12
ADMI	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	0.50	ADMI	<i>Achnantheidium minutissimum</i>	0.11
ABIA	<i>Achnanthes biasolettiana</i>	0.07	NPAL	<i>Nitzschia palea</i>	0.07
FCAP	<i>Fragilaria capucina</i>	0.05	ENMI	<i>Encyonema minutum</i>	0.05
GMIN	<i>Gomphonema minutum</i>	0.02	UULN	<i>Ulnaria ulna</i>	0.03
ESLE	<i>Encyonema silesiacum</i>	0.02	MVAR	<i>Melosira varians</i>	0.02

对不同分组的着生硅藻生物多样性进行了分析,结果表明(见表 2),从组 1 至组 3,硅藻物种平均数量和硅藻属平均数量呈现先降低后上升的趋势,各组香农多样性指数和 Pielou 均匀性指数平均值则呈现升高的趋势。

2.2 着生硅藻清洁度及生态指示型分析

图 3 展示了汤旺河全流域及 3 个分组的着生硅

表 2 各分组着生硅藻多样性

Table 2 Benthic diatom diversities in different groups

多样性状况	组 1	组 2	组 3	总体趋势
物种丰富度	19.43	18.30	22.71	—
属丰富度	14.57	12.80	15.57	—
香农多样性指数	1.60	2.86	3.95	上升
Pielou 均匀性指数	0.37	0.69	0.88	上升

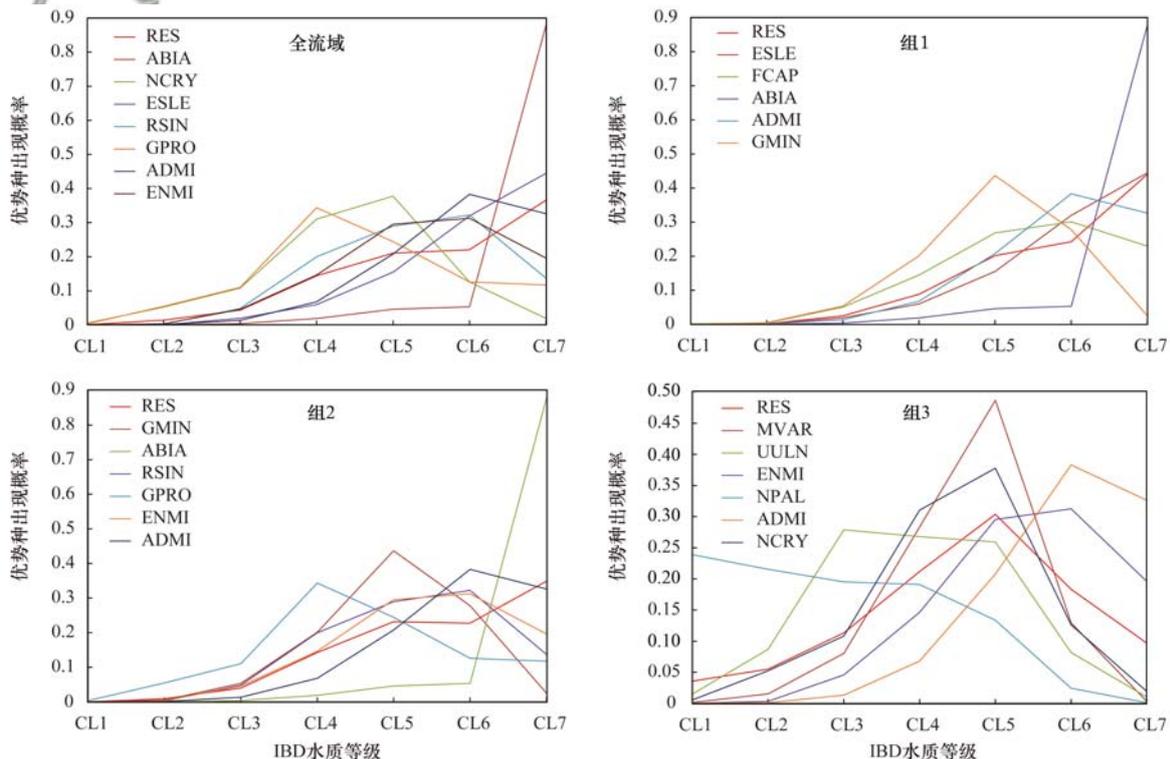


图 3 汤旺河全流域及各分组优势种在不同水质类别中出现概率

Fig. 3 Dominant species presence probability for water quality class

藻优势种在硅藻生物指数 (biological diatom index, IBD)<sup>[27]</sup>划分的 7 类水质 (CL1 ~ CL7) 中出现的概率,水质等级越低代表水质越差. 其中,RES 代表该组所有优势种在 7 类水质中出现的平均概率. 可以看出,汤旺河全流域优势种在 CL5 和 CL6 两类水质条件下出现的平均概率均大于 20%,在 CL7 水质条件下出现的平均概率最高,大于 35%. 汤旺河着生硅藻优势种在 CL5 及更高水质条件下出现的平均概率接近 80%,说明该流域着生硅藻群落主要由较清洁的物种构成.

组 1 和组 2 优势种均以清洁种为主,其中组 1 优势种清洁度最高,在 CL6 及更高水质条件下出现的平均概率约 80%;组 2 优势种清洁度较组 1 有所

降低,在 CL6 及更高水质条件下出现的平均概率约 55%. 组 3 优势种清洁度最差,在 CL6 及更高水质条件下出现的平均概率不足 30%.

根据 Van Dam 等<sup>[13]</sup>建立的淡水硅藻生态指示值清单,分析了所有采样点位硅藻群落需氧量、水生环境腐殖度和营养状况这 3 个生态指示类型所占比例,计算了各分组不同生态类型物种的平均占比情况. 结果表明(表 3),从组 1 至组 3,极度需氧型硅藻比例明显降低,中、低度需氧型硅藻比例明显升高; $\beta$ -中度腐生型硅藻比例明显降低, $\alpha$ -中度腐生型及更高腐生型硅藻比例明显升高;富营养型和极度富营养型硅藻比例明显升高,对营养物质不敏感的类群比例明显下降.

表 3 各分组着生硅藻生态型  
Table 3 Ecological types of benthic diatom in different groups

项目	生态型	比例/%			总体趋势
		组 1	组 2	组 3	
需氧量	极度需氧型	80.84	53.22	19.89	下降
	需氧型	1.99	3.01	8.94	上升
	中度需氧型	14.93	19.47	31.46	上升
	低度需氧型	1.33	2.25	17.11	上升
	极低度需氧型	0.00	0.13	0.00	—
水生环境腐殖度	寡污型	1.16	2.82	2.50	—
	$\beta$ -中度腐生型	87.44	63.34	36.56	下降
	$\alpha$ -中度腐生型	5.40	9.85	26.79	上升
	$\alpha$ 中腐-高度腐生型	1.03	4.38	10.81	上升
	高度腐生型	0.66	0.63	11.17	上升
营养状况	寡营养型	0.00	0.64	0.00	—
	寡-中营养型	1.73	11.09	2.46	—
	中营养型	6.74	13.92	8.29	—
	中-富营养型	1.54	4.36	4.19	上升
	富营养型	7.34	17.79	27.26	上升
	极度富营养型	0.70	0.63	11.17	上升
	中立型	79.37	36.02	34.26	下降

### 2.3 环境因子与藻类群落分析

#### 2.3.1 环境因子分析

对汤旺河 12 项环境因子执行 PCA 分析,结果表明,第一主成分和第二主成解释率分别为 0.35 和 0.22,第一、第二主成分累积解释率接近 60%,因此保留第一、第二主成分轴绘制排序图. PCA 结果(见图 4)表明,共有 7 个环境变量贡献率高于所有变量的平均贡献,分别为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、TN、DO、QHEI、COD 和高锰酸盐指数. 其余 5 项环境因子的贡献率低于所有变量的平均贡献,予以剔除,对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  等 7 个指标进行相关分析.

根据 Spearman 相关分析结果(见表 4),COD 和高锰酸盐指数相关性极强,保留高锰酸盐指数进行后续分析. DO 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  显著负相关,且和 QHEI 相关度较高,予以剔除.  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  显著负相关,和 TN 显著正相关,予以剔除. 保留高锰酸盐指数、QHEI、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 这 4 项环境因子进行后续分析.

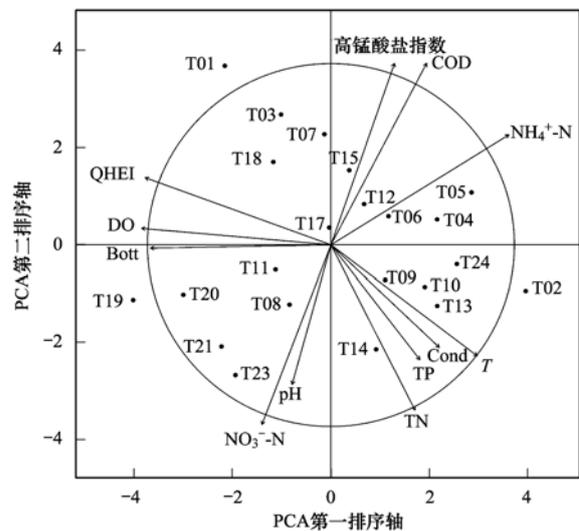


图 4 汤旺河环境数据 PCA 分析排序图  
Fig. 4 PCA ordination diagram of the Tangwang River environmental data

表 4 7 个环境因子的 Spearman 相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Spearman correlation coefficient of seven environmental factors

	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	COD	高锰酸盐指数	QHEI	DO	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
COD	0.429 *					
高锰酸盐指数	0.249	0.944 ***				
QHEI	-0.491 *	-0.337	-0.220			
DO	-0.709 ***	-0.175	-0.079	0.597 **		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.640 ***	-0.255	-0.148	0.011	0.386	
TN	-0.110	-0.110	-0.189	-0.410	-0.092	0.782 ***

1) \* 表示  $P < 0.1$ , \*\* 表示  $P < 0.05$ , \*\*\* 表示  $P < 0.01$

### 2.3.2 着生硅藻与水环境因子的关系分析

根据 DCA 分析结果, DCA 排序前 4 轴最大值为 2.37, 小于 3, 因此选择 RDA 分析环境因子、藻类群落及采样点位间的关系. VIF 计算结果表明, 4 个变量的最大 VIF 值为 1.69, 说明各变量间线性关系较弱, 不存在共线性问题. RDA 排序图(见图 5)体现了从左到右的水质、生境和硅藻群落结构变化梯度. 沿第一排序轴从左往右, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和高锰酸盐指数浓度逐渐升高, QHEI 逐渐降低.

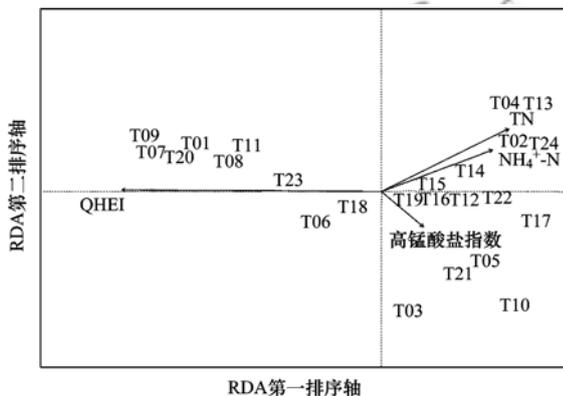


图 5 RDA 分析排序图

Fig. 5 Ordination diagram of RDA

### 3 讨论

根据硅藻群落聚类分析结果(见图 2), 汤旺河 24 个采样点位可分为 3 组. 从组 1 至组 3, 生境质量和水环境质量呈现下降的趋势, 但香农多样性指数与 Pielou 均匀度指数结果表明, 从组 1 至组 3, 物种多样性和均匀度呈现明显的上升趋势. 这是因为在群落演替过程中, 物种多样性的增加通常是生态系统对外界轻度干扰的一种良性适应<sup>[28]</sup>. 大量研究表明<sup>[29-31]</sup>, 群落演替过程中, 物种多样性会随外界干扰强度的增加先升高后下降, 即驼峰效应(hump-shaped effect). 汤旺河硅藻物种多样性并未呈现出随外界干扰下降的趋势, 因此可以推断, 汤旺河流域受到的外界干扰强度较低, 并未达到驼峰效应的临界值, 环境质量整体较好.

*Achnantheidium minutissimum* 等 7 个物种为汤旺

河丰水期着生硅藻优势种, 其中 *A. minutissimum* 在 24 个采样点位中均有出现, 且相对丰度较高, 为绝对优势种. *A. minutissimum* 是很多地区的常见种, 广泛分布于世界各地<sup>[32]</sup>. 根据 IBD 硅藻物种清单<sup>[27]</sup>, 汤旺河流域优势种大部分为相对清洁的物种, 主要分布在 CL5 ~ CL7 这 3 类水质等级中(见图 3). 根据 Muscio<sup>[33]</sup> 建立的美国硅藻耐污指数(pollution tolerance index, PTI), *A. minutissimum*、*Encyonema minutum*、*Reimeria sinuata*、*Achnanthes biasolettiana* 和 *Navicula cryptocephala* 耐污值均为 3 (最高分为 4), 为相对清洁种. 此外, 澳大利亚河流硅藻指数(diatom species index for Australian rivers, DSIAR)<sup>[34]</sup> 和南美大草原硅藻指数(Pampean diatom index, IDP)<sup>[14]</sup> 物种清单中, 汤旺河优势种耐污值得分均较高. 由此可见, 汤旺河丰水期着生硅藻主要由清洁种构成, 说明汤旺河丰水期污染较少, 水生态环境质量状况较为健康.

与全流域相比, 组 1 优势种变化主要体现在 *A. minutissimum* 优势度的增加, 达到了 0.5. 这可能是因为汤旺河丰水期水量较大, 相关研究表明, *A. minutissimum* 通常在水量较大时达到较高的优势度<sup>[35]</sup>. 此外, *Fragilaria capucina* 和 *Gomphonema minutum* 两个清洁物种在组 1 优势度较高, 组 1 优势种也均为清洁种, 在 CL6 及更高水质条件下出现的平均概率约 80%. 组 2 优势种与全流域优势种相似度较高, 从图 3 可以看出, 组 2 优势种清洁度低于组 1, 但也处于较高的水平, 约 55% 的物种主要分布在 CL6 及更高水质条件下. 与其他两组相比, 组 3 主要变化表现为耐污种优势度的增加, *Nitzschia palea* 和 *Ulnaria ulna* 主要分布在 CL4 及更差的水质条件下. 相关研究表明, 菱形藻主要生活在水质较差的水体中<sup>[36]</sup>, 其中 *N. palea* 常被认为是富营养指示种<sup>[37]</sup>, 主要生活在 TP 浓度较高<sup>[38]</sup> 以及农业活动影响较大<sup>[39]</sup> 的区域, *U. ulna* 则被普遍认为是对水体有机污染具有耐受性和抵抗力的物种<sup>[40]</sup>. 生态型分析结果(见表 3)与优势种清洁度分析结果一致, 从组 1 至组 3, 着生硅藻需氧程度逐渐降低, 腐殖度和

富营养程度逐渐升高. 因此可以推断, 从组 1 至组 3, 水体健康程度逐渐降低, 富营养化和有机污染的趋势逐渐增加.

根据 PCA 分析和 Spearman 相关分析, 汤旺河流域主要水环境因子包括高锰酸盐指数、QHEI、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN. 水质分析结果表明, 汤旺河水质总体偏好, 主要的超标因子为高锰酸盐指数和 TN. 其中高锰酸盐指数浓度超标的点位主要集中于组 2, TN 和  $\text{NH}_4^+$ -N 较高点位主要集中在组 3. 汤旺河高锰酸盐指数浓度偏高可能是本底值较高所导致, 相关研究表明<sup>[41]</sup>, 松花江流域土壤有机质及腐殖质含量较高, 各支流源头属于高高锰酸盐指数河段. RDA 分析结果(图 5)可以看出, 汤旺河水质、生境和硅藻群落结构均体现了从左到右的梯度变化, 沿 RDA 第一排序轴从左向右, 生境质量逐渐降低,  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和高锰酸盐指数浓度逐渐升高. 组 1 点位全部分布在排序图左侧, 说明组 1 点位生境质量较好, 营养盐及有机质含量偏低; 组 2 点位主要分布在排序图中部及右下部, 说明影响组 2 硅藻群落结构的主要环境因子为高锰酸盐指数, 该组浓度高锰酸盐指数比其他两组高; 组 3 点位主要分布在排序图右上部, 说明影响组 3 硅藻群落结构的主要环境因子为  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN.

结合 RDA 分析结果可以看出, 导致组 2 硅藻群落结构变化的主要水环境因子为高锰酸盐指数,  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 对组 2 硅藻群落结构也有影响但影响程度低于高锰酸盐指数. 随着高锰酸盐指数浓度的增加以及 DO 浓度的降低, 组 2 中-高度腐生型和中-富营养型硅藻比例有所增加, 极度需氧型硅藻比例有所下降, 说明组 2 点位水生环境腐殖度变高, 硅藻群落结构可以指示汤旺河水体腐生状况的变化. 水生环境腐殖度的概念是 Kolkwitz 和 Marsson 于 1908 年提出的, 用来测量河流中有机物的污染程度, 以及由此导致的溶解氧的减少. 国外相关研究也表明, 硅藻群落可以有效地指示河流有机污染<sup>[14]</sup> 和河流腐生状况<sup>[16]</sup>. 导致组 3 硅藻群落结构变化的主要水环境因子为  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN, 随着  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 浓度的增加, *N. palea* 和 *U. ulna* 等耐污种在组 3 的优势度开始增加, 富营养型硅藻和极度富营养型硅藻比例显著上升. 因此可以判断, 着生硅藻群落结构可以有效地指示汤旺河营养梯度的变化. 国外许多研究也表明, 着生硅藻群落可以有效地评估低水平的营养富集<sup>[42]</sup> 和水体富营养化<sup>[43, 44]</sup>.

#### 4 结论

(1) 汤旺河丰水期共鉴定出着生硅藻 35 属 93

种 6 变种, 各点位平均物种数 20 种, 物种丰富度较好. 汤旺河丰水期污染较少, 水生态环境质量状况较为健康, 着生硅藻主要由 *Achnanthes minutissimum* 等 7 种清洁种构成, 其中 *A. minutissimum* 优势度 0.32, 为绝对优势种.

(2) 汤旺河 24 个采样点位可分为 3 组, 组 1 和组 2 健康程度较高, 优势种均为清洁种, 组 3 健康程度较其余两组偏低, *Nitzschia palea* 和 *Ulnaria ulna* 等耐污种优势度增高.

(3) 影响组 2 硅藻群落结构变化的主要水质因子为高锰酸盐指数, 影响组 3 硅藻群落结构变化的主要水质因子为  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN, 硅藻群落结构可以有效地指示汤旺河水体腐生状况和营养状况.

#### 参考文献:

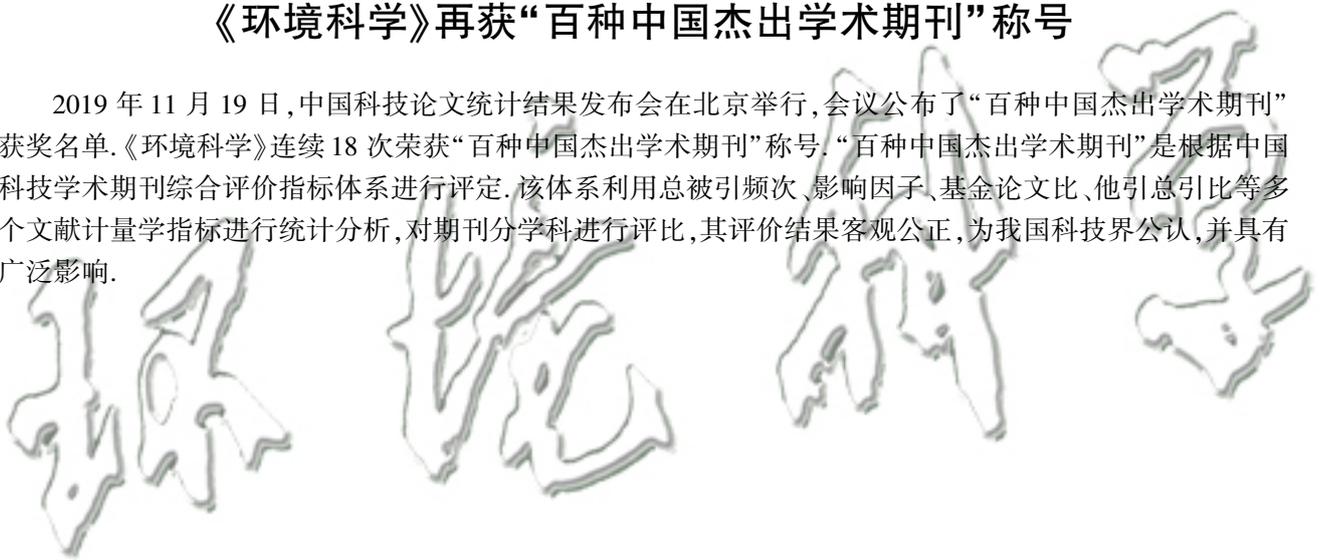
- [1] Venkatachalapathy R, Karthikeyan P. Application of diatom-based indices for monitoring environmental quality of riverine ecosystems: a review [A]. In: Ramkumar M, Kumaraswamy K, Mohanraj R (Eds.). Environmental Management of River Basin Ecosystems [C]. Cham: Springer International Publishing, 2015. 593-619.
- [2] Taylor J G, Prygiel J, Vosloo A, et al. Can diatom-based pollution indices be used for biomonitoring in South Africa? A case study of the Crocodile West and Marico water management area [J]. Hydrobiologia, 2007, **592**(1): 455-464.
- [3] Lavoie I, Campeau S, Zugic-Drakulic N, et al. Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: an overview of 10 years of index development and ongoing challenges [J]. Science of the Total Environment, 2014, **475**: 187-200.
- [4] Rimet F. Recent views on river pollution and diatoms [J]. Hydrobiologia, 2012, **683**(1): 1-24.
- [5] Lobo E A, Heinrich C G, Schuch M, et al. Diatoms as bioindicators in rivers [A]. In: Necchi Jr O (Ed.). River Algae [M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [6] Kelly M G, King L, Jones R I, et al. Validation of diatoms as proxies for phytoplankton when assessing ecological status in lakes [J]. Hydrobiologia, 2008, **610**(1): 125-129.
- [7] Schneider S C, Lawniczak A E, Picińska-faltnowicz J, et al. Do macrophytes, diatoms and non-diatom benthic algae give redundant information? Results from a case study in Poland [J]. Limnologia, 2012, **42**(3): 204-211.
- [8] Fetscher A E, Stancheva R, Kocielek J P, et al. Development and comparison of stream indices of biotic integrity using diatoms vs. non-diatom algae vs. a combination [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, **26**(1): 433-450.
- [9] 谷金普, 葛继稳, 唐佳, 等. 古夫河着生藻类优势种生态位研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(10): 1456-1463.
- [10] Gu J P, Ge J W, Tang J, et al. Niche analysis of dominant species of periphytic algae in Gufu River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(10): 1456-1463.
- [11] Oeding S, Taffs K H. Developing a regional diatom index for assessment and monitoring of freshwater streams in sub-tropical Australia [J]. Ecological Indicators, 2017, **80**: 135-146.
- [12] Wang Y K, Stevenson R J, Metzmeier L. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the interior plateau ecoregion, USA [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, **24**(4): 990-1008.

- [12] Wu N C, Cai Q H, Fohrer N. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity (D-IBI) for rivers impacted by run-of-river dams[J]. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 108-117.
- [13] 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.
- [14] Gómez N, Licursi M. The Pampean Diatom Index (IDP) for assessment of rivers and streams in Argentina [J]. *Aquatic Ecology*, 2001, **35**(2): 173-181.
- [15] Watanabe T, Asai K, Houki A. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage—diatom assemblage index (DAI<sub>po</sub>)—[J]. *Science of the Total Environment*, 1986, **55**: 209-218.
- [16] Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution [J]. *CLEAN - Soil Air Water*, 1986, **14**(5): 555-566.
- [17] 李蕊, 陈光杰, 康文刚, 等. 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- Li R, Chen G J, Kang W G, *et al.* Spatio-temporal variations of diatom community and their relationship with water environment in Fuxian Lake [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- [18] 张莉, 林佳宁, 张远, 等. 浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4570-4579.
- Zhang L, Lin J N, Zhang Y, *et al.* Responses of the benthic diatom community to nutrients and the identification of nutrient thresholds in three aquatic ecoregions of the Huntai River, Northeast China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4570-4579.
- [19] 臧小苗, 张远, 林佳宁, 等. 滑石矿开采对着生硅藻群落结构和水环境的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3721-3730.
- Zang X M, Zhang Y, Lin J N, *et al.* Impact of talc ore mining on periphyton community structure and water environment [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3721-3730.
- [20] 邓培雁, 雷远达, 刘威, 等. 七项河流附着硅藻指数在东亚的适用性评估[J]. *生态学报*, 2012, **32**(16): 5014-5024.
- Deng P Y, Lei Y D, Liu W, *et al.* Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(16): 5014-5024.
- [21] 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 应用硅藻指数评价渭河流域水生态健康状况[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, **52**(3): 317-321.
- Liu L F, Xu Z X, Yin X W, *et al.* Assessing water quality with diatom indices in the Wei River basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, **52**(3): 317-321.
- [22] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 基于着生硅藻指数的梧桐河水生态健康评价[J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(4): 83-90.
- Xue H, Zheng B H, Meng F S, *et al.* Health assessment on aquatic ecosystem in Wutong River using benthic diatom indexes [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(4): 83-90.
- [23] 刘奕伶, 葛继稳, 李艳元, 等. 古夫河着生硅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.
- [24] Xue H, Zheng B H, Meng F S, *et al.* Assessment of aquatic ecosystem health of the Wutong River based on benthic diatoms [J]. *Water*, 2019, **11**(4): 727.
- [25] 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.
- [26] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 928-936.
- Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928-936.
- [27] Coste M, Boutry S, Tison-Rosebery J, *et al.* Improvements of the biological diatom index (BDI): description and efficiency of the new version (BDI-2006) [J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(4): 621-650.
- [28] 石娟, 骆有庆, 严晓素, 等. 不同干扰措施对松材线虫入侵松林内物种多样性的影响[J]. *生态科学*, 2007, **26**(4): 289-292.
- Shi J, Luo Y Q, Yan X S, *et al.* Effects of different disturbance ways on the diversity of pine forest invaded by pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) [J]. *Ecological Science*, 2007, **26**(4): 289-292.
- [29] Clauson-Kaas S, Richardson K, Rahbek C, *et al.* Species-specific environmental preferences associated with a hump-shaped diversity/temperature relationship across tropical marine fish assemblages [J]. *Journal of Biogeography*, 2017, **44**(10): 2343-2353.
- [30] Simões N R, Colares M A M, Lansac-Tôha F A, *et al.* Zooplankton species richness-productivity relationship: confronting monotonic positive and hump-shaped models from a local perspective [J]. *Austral Ecology*, 2013, **38**(8): 952-958.
- [31] Espinar J L. Sample size and the detection of a hump-shaped relationship between biomass and species richness in Mediterranean wetlands [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2006, **17**(2): 227-232.
- [32] Potapova M, Hamilton P B. Morphological and ecological variation within the *Achnanidium minutissimum* (Bacillariophyceae) species complex [J]. *Journal of Phycology*, 2007, **43**(3): 561-575.
- [33] Muscio C. The diatom pollution tolerance index: assigning tolerance values [R]. City of Austin: Watershed Protection and Development Review Department, Environmental Resource Management, 2002. 1-17
- [34] Chessman B C, Bate N, Gell P A, *et al.* A diatom species index for bioassessment of Australian rivers [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2007, **58**(6): 542-557.
- [35] Stenger-Kovács C, Padišák J, Bíró P. Temporal variability of *Achnanidium minutissimum* (Kützting) Czarnecki and its relationship to chemical and hydrological features of the Torna-stream, Hungary [A]. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Use of Algae for monitoring Rivers* [C]. Hungary, Balatonfüred: Magyar Algológiai Társaság, 2006. 133-138.
- [36] Wu J T. A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **397**: 79-87.
- [37] Besse-Lototskaya A, Verdonschot P F M, Coste M, *et al.* Evaluation of European diatom trophic indices [J]. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(2): 456-467.
- [38] 薛浩, 姚志鹏, 孟凡生, 等. 倭肯河着生硅藻群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(12): 4096-4105.
- Xue H, Yao Z P, Meng F S, *et al.* Community structures of periphyton and their relationship with aquatic environmental

- factors in the Woken River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(12): 4096-4105.
- [39] Lavoie I, Campeau S, Grenier M, *et al.* A diatom-based index for the biological assessment of eastern Canadian rivers: an application of correspondence analysis (CA) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, **63**(8): 1793-1811.
- [40] Szczepocka E, Szulc B. The use of benthic diatoms in estimating water quality of variously polluted rivers [J]. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2009, **38**(1): 17-26.
- [41] 陈家厚, 杨林, 周爱申, 等. 黑龙江省松花江流域河流中高锰酸盐指数非点源污染负荷分析 [J]. *中国环境监测*, 2010, **26**(6): 53-55.
- Chen J H, Yang L, Zhou A S, *et al.* Contributions of non-point pollution of  $COD_{Mn}$  to rivers in Songhua River basin in Heilongjiang province [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2010, **26**(6): 53-55.
- [42] Lavoie I, Campeau S, Darchambeau F, *et al.* Are diatoms good integrators of temporal variability in stream water quality? [J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(4): 827-841.
- [43] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States [J]. *Ecological Indicators*, 2007, **7**(1): 48-70.
- [44] Passy S I, Pan Y D, Lowe R L. Ecology of the major periphytic diatom communities from the Mesta River, Bulgaria [J]. *International Review of Hydrobiology*, 1999, **84**(2): 129-174.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019年11月19日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续18次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定,该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。



## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)