

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)	
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)	
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)	
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)	
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)	
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)	
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)	
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)	
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)	
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)	
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)	
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)	
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)	
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)	
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)	
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根氮磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)	
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)	
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)	
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)	
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)	
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)	
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)	
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)	
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)	
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)	
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)	
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)	
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)	
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)	
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)	
硫酸盐和Fe(Ⅱ)EDTA-NO ₃ /Fe(Ⅲ)EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)	
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)	
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)	
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)	
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)	
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)	
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)	
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)	
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)	
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)	
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)	
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)	
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)	
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)	
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)	
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)	
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)	
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)	
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)	
农业废物堆肥化中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)	
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)	
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)	
《环境科学》征稿简则 (4462)	《环境科学》征订启事 (4672)	信息 (4647, 4705, 4789)

浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值

张莉^{1,2}, 林佳宁², 张远^{2*}, 王书平², 臧小苗^{1,2}, 张晓娇^{2,3}

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 中国环境科学研究院流域水生态保护技术研究室, 北京 100012; 3. 大连海洋大学水产与生命学院, 大连 116023)

摘要: 为全面了解浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响状况及进行底栖硅藻群落的保护, 本研究对3个水生态区共287个采样点的营养盐因子(NH_4^+ -N、TP)及底栖硅藻群落进行调查分析, 并通过局部加权回归散点修匀法(locally weighted scatterplot smoothing, LOWESS)探究了底栖硅藻群落的 NH_4^+ -N、TP保护阈值。结果表明: ① 浑太河3个水生态区 NH_4^+ -N、TP浓度差异性显著并呈现出水生态I区<水生态II区<水生态III区的趋势。② 底栖硅藻特征指标[运动性硅藻百分比、敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比、Pielou均匀度指数、特定污染敏感指数(specific polluosity index, IPS)、硅藻生物指数(biological diatom index, IBD)、硅藻属指数(generic diatom index, IDG)]均在3个水生态区间存在差异, 运动性硅藻百分比呈现出水生态I区<水生态II区<水生态III区的变化, 而其余6个生物参数的变化与之相反, 表明水生态III区底栖硅藻受到的干扰最大, 水生态I区最小。③ 经LOWESS拟合和独立样本T检验, 发现3个水生态区底栖硅藻的 NH_4^+ -N、TP保护阈值不同, 水生态I区、II区、III区的 NH_4^+ -N阈值分别为0.13、0.30、1.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP阈值分别为0.04、0.06、0.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究可为浑太河3个水生态区底栖硅藻群落的保护和水生态区管理提供理论依据。

关键词: 浑太河; 水生态区; 底栖硅藻; LOWESS; 阈值

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4570-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704207

Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China

ZHANG Li^{1,2}, LIN Jia-ning², ZHANG Yuan^{2*}, WANG Shu-ping², ZANG Xiao-miao^{1,2}, ZHANG Xiao-jiao^{2,3}

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Benthic diatom communities and nutrient gradients were investigated from 287 sampling sites in three aquatic ecoregions (AE) of the Huntai River to characterize the spatial distribution of nutrients and the benthic diatom communities. Locally weighted scatterplot smoothing (LOWESS) was used to analyze the thresholds for nitrogen and phosphorus. The results showed that: ① The concentration of ammonia nitrogen and total phosphorus significantly differs in the three AEs, and shows a tendency of AE I < AE II < AE III. ② To reveal the structure of benthic diatom communities, various benthic diatom indexes, including the sportive diatom percentage, sensitive diatom percentage, stipitate diatom percentage, Pielou evenness index, specific polluosity index (IPS), biological diatom index (IBD), and generic diatom index (IDG) were analyzed. The sportive diatom percentage varied significantly in AE I, AE II, and AE III, with the highest percentage observed in AE III and the lowest in AE I. However, the other six indexes exhibited an opposite trend. All revealed that AE III has been seriously damaged, while AE I is less disturbed than AE II and AE III. ③ LOWESS fitting curves show thresholds for ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) in the three aquatic ecoregions as 0.13, 0.30, and 1.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively and for total phosphorous (TP) were 0.04, 0.06, and 0.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. All results were tested by independent-sample T tests. This study will provide assistance for effectively protecting the benthic diatom community in different aquatic ecoregions and also provide a theoretical basis for water management.

Key words: Huntai River; aquatic ecoregion; benthic diatom; LOWESS; threshold

浑太河流域是辽宁省重要的经济和工业发展区域, 近年来面临着严重的河流生态系统结构和功能退化的威胁^[1]。由于人类活动的干扰, 工业废水、生活污水的大量排放以及农业面源的污染使得该区域的营养盐污染严重^[2], 以氨氮为例, 点源及面源的入河排放量达到 $2.1 \times 10^5 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[3]。US EPA^[4]认为氮磷营养盐过高是导致河流水环境恶化的重要因

素, 其过量输入会引起底栖硅藻群落结构及生态系统机能发生改变, 严重影响水生态系统健康。底栖

收稿日期: 2017-04-20; 修订日期: 2017-05-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501001); 国家自然科学基金项目(41571050)

作者简介: 张莉(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水生态保护技术, E-mail: zhangli_03_18@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangyuan@cras.org.cn

硅藻作为河流生态系统中重要的初级生产者,对水环境中的营养盐非常敏感^[5],其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 作为底栖硅藻最易吸收的氮素形态^[6],对底栖硅藻的影响尤为显著. 通过墨西哥湾北部的密西西比河、美国佛罗里达州的阿波普卡湖、纽约州的乔治湖的水生态修复^[7],发现同时控制水生态系统 N、P 浓度,可以在一定程度上抑制底栖硅藻的过度繁殖,有效保护水生态系统健康.

生态阈值是指生态系统中某一个或多个关键生态因子微弱的附加改变导致其从一种状态快速转变为另一种状态的某个点或一段区间^[8]. 合理确定水生态系统的营养盐阈值,对于保护底栖硅藻群落的多样性及提高生态系统的稳定性,尤为重要^[9,10]. 目前针对生态阈值的研究,多集中于整个流域^[11~14],然而不同的生境条件下底栖硅藻的耐受性是不同的^[15~17],在更小的区域范围内研究该阈值更具有适用性. 水生态分区是水环境管理及水生生物多样性保护的重要单元,广泛应用于淡水水体的生态管理^[18]. 有研究表明,太子河不同水生态区 EPT (ephemeropter、plecoptera、trichoptera)^[19]、鱼类^[20]的群落结构,及对其产生显著影响的环境因子均存在差异性,因此,在水生态区内开展水生生物对环境干扰的响应研究,更为必要.

LOWESS 是在回归树模型 (regression tree, RT) 基础上发展起来的一种稳健的非参数模型,由于可以很好地描述变量之间的细微关系,且不需要确定的函数关系^[21],在生态系统的阈值研究中得到了广泛的应用^[22~24]. Chambers^[22]为了解底栖硅藻在加拿大 4 个不同生态区中的 TN、TP 阈值,利用 LOWESS 对富营养化硅藻指数 (trophic diatom index, TDI)、加拿大硅藻指数 (eastern Canadian diatom index, IDEC)、香农多样性指数 (shannon diversity index) 进行阈值估算,研究结果表明 3 个生物参数的 TN、TP 阈值不同,而且在不同的生态区中,河流的 TN、TP 阈值也存在差异. 本研究拟通过上述方法,利用综合反映底栖硅藻群落结构与功能的硅藻生物完整性指数 (diatom index of biotic integrity, D-IBI)^[25,26],确立 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 的阈值,以期水生态区的管理提供基础数据与技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

浑太河位于我国东北部 ($122^\circ 05' \sim 125^\circ 17' \text{E}$ 、

$40^\circ 40' \sim 42^\circ 10' \text{N}$), 由浑河、太子河两条独立的水系构成. 其中浑河发源于清原县湾甸子镇滚马岭西侧,全长 415.4 km,流域面积 12 216 km^2 ; 太子河发源于辽宁省新宾满族自治县境内的长白山脉,全长 413 km,流域面积 13 883 km^2 . 两条水系在三岔河汇合入大辽河. 属温带湿润-半湿润季风气候,年内温差大,最高气温出现在 7~8 月,最低气温出现在 1~2 月,降水多集中于夏季. 流经抚顺、辽阳、鞍山、本溪等主要工业城市,受人类活动的干扰严重,以山区为主,约占全流域面积的 70%.

浑太河流域包括 3 个水生态二级区^[27],分别是水生态 I 区 (太子河上游-中起伏山地森林-多水区)、水生态 II 区 (辽河东部-低起伏山地森林-多水区)、水生态 III 区 (下辽河-平原农作物-少水区). 水生态 I 区由长白山脉组成,是太子河支流水系的发源地,多为中起伏山地;水生态 II 区是浑河、太子河的主要产流区,建有多座水库 (大伙房水库、观音阁水库等),植被覆盖率高,多为小起伏山地;水生态 III 区为平原,分布有沈阳、鞍山等工业城市,城市化严重,受人类干扰最为严重,面临着严峻的水生态安全问题.

1.2 采样点设置

为了解浑太河底栖硅藻的群落结构及分布特征,调查区域共设置 287 个采样点,其中太子河干流 (T) 70 个,浑河 (H) 62 个,太子河支流 (北沙 BS、南沙 NS、汤河 TH、小汤河 XTH、海城河 HCH、细河 XH、兰河 LH) 共 122 个,以及太子河南支 15 个、北支 18 个. 调查于 2009 年 5 月至 2010 年 5 月进行. 水生态 I 区包括采样点 122 个,II 区 86 个,III 区 79 个. 采样点分布详见图 1.

1.3 样品的采集与分析

依据欧盟标准方法 EN 13946^[28] 和 EN 14407^[29],在地势开阔且无树荫的河流中,根据河流生境 (流速、水深、透明度等) 的不同,在 100 m 范围内选取 9 块天然石头,用干净毛刷刷取向阳面硅藻 15.2 cm^2 (直径 4.4 cm 的圆形塑胶环),置于干净的白瓷盘中,纯净水冲刷至广口塑料瓶,加入 5% (体积分数) 的甲醛进行固定后,带回实验室进行分类鉴定. 底栖硅藻的鉴定参照文献 [30,31].

采用多参数水质分析仪 (YSI Incorporated, Yellow Spring, Ohio, 美国) 现场测定水温、pH、DO、浊度、TDS、电导率等,其他指标如 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、 BOD_5 、COD、高锰酸盐指数等在 48 h 带回实验室,参照文献 [32] 测定.

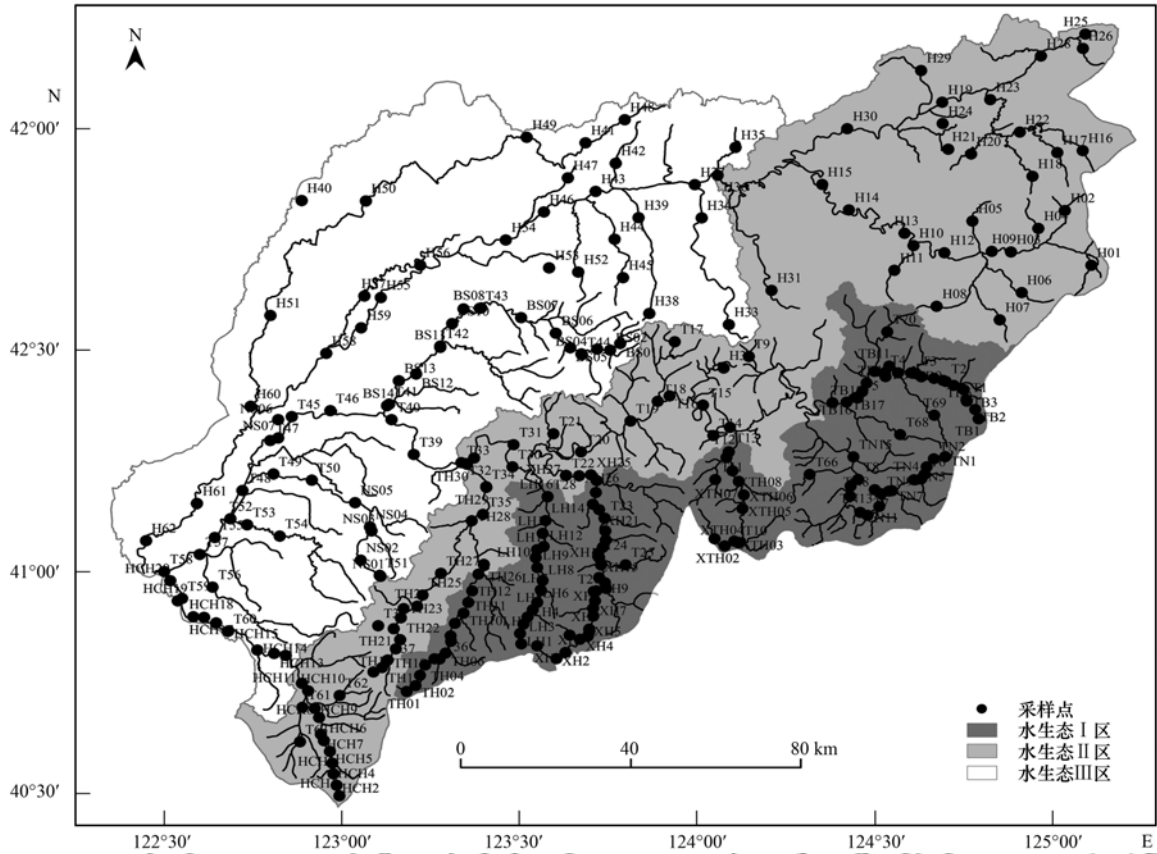


图 1 浑太河底栖硅藻采样点及水生态区分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites and aquatic ecoregions in the Huntai River

1.4 数据处理

营养盐数据满足方差齐性与正态分布。为研究不同水生态区营养盐因子($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP)的分布特征,首先利用箱体图分析 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP在不同水生态区的分布范围,其次对各水生态区的营养盐因子进行单因素方差分析(one-way ANOVA),研究其浓度在3个水生态区间的差异性。为分析不同水生态区生物参数的分布情况,箱体图分析各生物参数在3个水生态区的分布特征,K-W非参数检验各生物参数在不同水生态区间的差异性。为研究不同生物参数对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP作出的响应关系,将各生物参数与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP进行Pearson相关性分析。为确定3个水生态区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的阈值,利用LOWESS分别以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP为横坐标,以D-IBI为纵坐标,进行曲线拟合。

其中,生物参数的选择,参考周莹等^[33]采取的综合法选择参照点位与受损点位,通过分布范围、判别能力、相关性分析筛选生物参数(表1),确定构成硅藻生物完整性指数的生物参数;采用比值法^[34]计算各采样点位的D-IBI值,计算过程如下:

(1)生物参数标准化

①随干扰增强而增大的参数:

$$P_{ij} = (\max O_{ij} - O_{ij}) / (\max O_{ij} - S_{i5}) \times 100$$

式中, P_{ij} 表示第*i*个参数在第*j*个采样点的标准化参数值, O_{ij} 表示第*i*个参数在第*j*个采样点的原始观测值, $\max O_{ij}$ 表示第*i*个参数在*m*个采样点中的最大值, S_{i5} 表示第*i*个参数的标准化阈值,取全部采样点中第*i*个参数5%分位数的原始观测值; $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$ 。

②随干扰增强而变小的参数:

$$P_{ij} = O_{ij} / S_{i95} \times 100$$

式中, P_{ij} 表示第*i*个参数在第*j*个采样点的标准化参数值, O_{ij} 表示第*i*个参数在第*j*个采样点的原始观测值, S_{i95} 表示第*i*个参数的标准化阈值,取全部采样点中第*i*个参数95%分位数的原始观测值; $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$ 。

(2) D-IBI 值计算

各点位的D-IBI值即该点位各标准化参数的均值:

$$I_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ij}$$

式中, I_j 表示各点位D-IBI值。

表 1 浑太河硅藻完整性指数 (D-IBI) 构成体系候选参数及计算方法
Table 1 Description and calculation of candidate metrics for D-IBI in the Huntai River

编号	生物参数	计算方法	对干扰的响应
M1	运动性硅藻百分比	运动性硅藻百分比 = 舟形藻属 (<i>Navicula</i> sp.) + 菱形藻属 (<i>Nitzschia</i> sp.) + 双菱藻属 (<i>Surirella</i> sp.) 的相对丰度	上升
M2	敏感性硅藻百分比	敏感性硅藻百分比 = $\sum (\text{敏感性硅藻细胞数} / \text{藻类总细胞数}) \times 100\%$, 其中硅藻耐污值 (1~4) 大于等于 3 的是敏感性硅藻	下降
M3	具柄硅藻百分比	具柄硅藻百分比 = (异极藻属 (<i>Gomphonema</i> sp.) + 楔形藻属 (<i>Licmophora</i> sp.) + 曲壳藻属 (<i>Achnanthes</i> sp.)) 的相对丰度	下降
M4	Shannon-Wiener 指数 (H')	$H' = -\sum (n_i/N) \ln(n_i/N)$, 式中, n_i 为种 i 的细胞数量, N 为细胞总数	下降
M5	属的总数量	属的总数量 = 所鉴定到属的总数	下降
M6	硅藻总分类单元数	种水平上的硅藻物种数量	下降
M7	硅藻商	硅藻商 = 硅藻中心纲个体总数 / 硅藻羽纹纲个体总数	下降
M8	硅藻营养化指数 (TDI)	$TDI = (WMS \times 25) - 25$, $WMS = \sum a_j v_{ij} / \sum a_j$, 式中, a_j 为种 j 的丰度, v_{ij} 为种 j 的富营养化敏感指示值, 在 1~3 间变化, i_j 为种 j 的污染敏感度, 在 1~5 间变化	上升
M9	IDP 硅藻指数 (pampean diatom index, IDP)	$IDP = \sum I_{idp} A_j / \sum A_j$, 式中, I_{idp} 为种 j 的特定值: 0~4, A_j 为种 j 的相对丰度	下降
M10	Pielou 均匀度指数 (J')	$J' = H' / \ln S$, 式中, H' 为 Shannon-Wiener 指数, S 为硅藻总种 (属) 数	下降
M11	特定污染敏感指数 (IPS)	Omnidia 7.0	下降
M12	硅藻生物指数 (IBD)	Omnidia 7.0	下降
M13	硅藻属指数 (IDG)	Omnidia 7.0	下降

单因素方差分析、K-W 非参数检验、Pearson 相关性分析均在 SPSS 19.0 上进行, 箱体图在 Origin 8.0 中进行, LOWESS 在 R. 3. 1. 2 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同水生态区营养盐因子特征分析

由图 2 可知, 水生态 I 区、II 区、III 区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度依次为 0.19、0.37、1.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 呈现出水生态 I 区 < 水生态 II 区 < 水生态 III 区的趋势, 单因素方差分析表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 3 个水生态区间差异显著 ($P <$

0.05)。TP 呈现出与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一致的变化趋势, 水生态 I 区的浓度最低, 水生态 II 区次之, 水生态 III 区最高, 且在 3 个水生态区间差异性显著 ($P < 0.05$); 平均浓度分别为 0.03、0.07、0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2 底栖硅藻群落结构特征及与营养盐因子的关系分析

2.2.1 底栖硅藻的群落结构特征

浑太河共采集并鉴定出底栖硅藻 233 种, 隶属于 2 纲 5 目 10 科 22 属。其中, 水生态 I 区 159 种, 以等片藻属 (*Diatoma* sp.)、桥弯藻属 (*Cymbella*

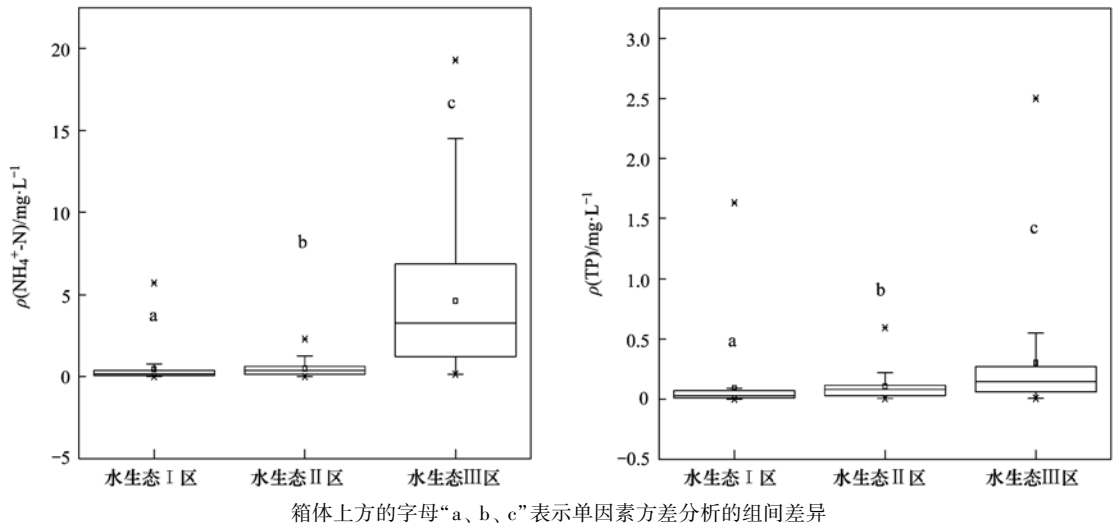


图 2 浑太河 3 个水生态区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 分布箱体图

Fig. 2 Box-whisker plot of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in different AEs of the Huntai River

sp.)、脆杆藻属(*Fragilaria* sp.)为主(图3),分别占水生态 I 区总个体数的 29.89%、18.24%、17.80%;优势种为扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)、扁圆卵形藻线性变种(*Cocconeis placentula* var. *linearis*)、偏肿桥弯藻(*Cymbella ventricosa*)、近缘桥弯藻(*Cymbella affinis*)、霍克曲壳藻(*Achnanthes hauckiana*)、小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)、缠结异极藻矮小变种(*Gomphonema intricatum* var. *pumila*)、汉式桥弯藻(*Cymbella hantzschiana*)、钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)、肘状针杆藻缢缩变种(*Synedra ulna* var. *contracta*)。水生态 II 区 210 种,以舟形藻属(*Navicula* sp.)、等片藻属(*Diatoma* sp.)、桥弯藻属(*Cymbella* sp.)为主,各占 33.98%、23.23%、14.89%,优势种为简单舟形藻(*Navicula simplex*)、沃切里脆杆藻(*Fragilaria vaucheriae*)、普通等片藻(*Diatoma vulgaris*)、胡斯特桥弯藻(*Cymbella hustedtii*)、扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)。水生态 III 区共采集到底栖硅藻物种数为 180 种,等片藻属(*Diatoma* sp.)、舟形藻属(*Navicula* sp.)和针杆藻属(*Synedra* sp.)相对丰度较高,分别占据的比例为 29.95%、18.86%、17.09%;优势种为梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)、简单舟形藻(*Navicula simplex*)、小片菱形藻(*Nitzschia frustulum*)。

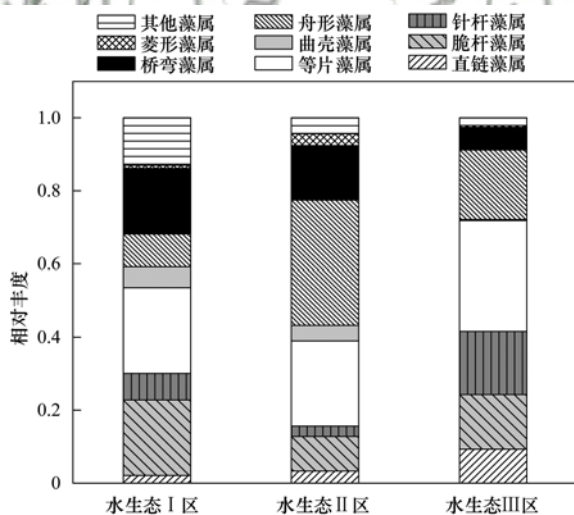


图3 浑太河不同水生态区底栖硅藻群落结构

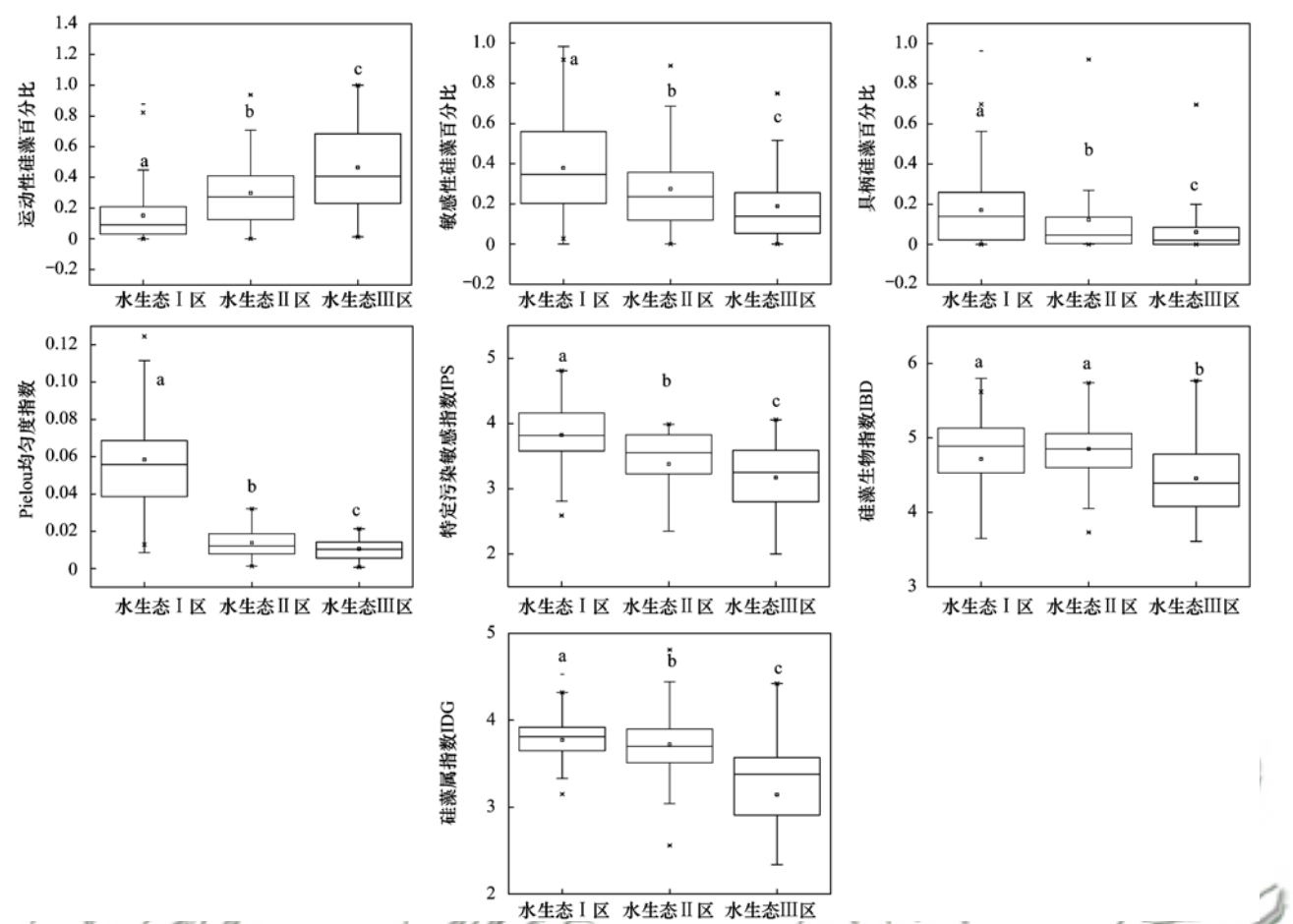
Fig. 3 Benthic diatom community structure in different AEs of the Huntai River

2.2.2 营养盐对底栖硅藻群落的影响

将 13 个底栖硅藻候选生物参数进行分布范围、辨别能力及相关性分析,共筛选出 7 个生物参数,分

别为 M1(运动性硅藻百分比)、M2(敏感性硅藻百分比)、M3(具柄硅藻百分比)、M10(Pielou 均匀度指数)、M11(特定污染敏感指数 IPS)、M12(硅藻生物指数 IBD)、M13(硅藻属指数 IDG)。由图 4 可见,7 个生物参数在不同水生态区之间存在差异。除硅藻生物指数 IBD 以外,其余 6 个生物参数在 3 个水生态区间均差异显著。运动性硅藻百分比在 3 个水生态区中逐渐升高,水生态 III 区的运动性硅藻百分比显著高于水生态 I 区、II 区。敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比、特定污染敏感指数 IPS、Pielou 均匀度指数、硅藻属指数 IDG 在水生态 I 区均显著高于水生态 II 区、III 区。上述 7 个生物参数在 3 个水生态区的变化趋势与该参数对干扰的响应均是一致的,说明水生态 III 区受到的干扰程度高于水生态 I 区、II 区,水生态 I 区受到的干扰相对较小。

Pearson 相关性分析可知,不同生物参数在同一水生态区受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的影响程度不同,而同一生物参数在不同的水生态区受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的影响程度也是不同的(表 2)。对于水生态 I 区, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著影响敏感性硅藻百分比($P < 0.05$)、具柄硅藻百分比($P < 0.05$)、Pielou 均匀度指数($P < 0.01$)的变化,随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的升高,敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比显著下降,而 Pielou 均匀度指数显著上升; TP 显著影响运动性硅藻百分比的变化($P < 0.05$),运动性硅藻百分比随着 TP 浓度的升高而显著上升。水生态 II 区中,运动性硅藻百分比及特定污染敏感指数 IPS 受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度的共同影响,随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度的上升,运动性硅藻百分比与特定污染敏感指数 IPS 表现出相反的变化,运动性硅藻百分比显著增加($P < 0.05$),而特定污染敏感指数 IPS 显著下降($P < 0.01$);具柄硅藻百分比仅与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著负相关($P < 0.05$);敏感性硅藻百分比与硅藻生物指数 IBD 仅与 TP 显著相关,并随着 TP 浓度的升高,敏感性硅藻百分比与硅藻生物指数 IBD 均显著下降($P < 0.05$)。对于水生态 III 区,运动性硅藻百分比及硅藻属指数 IDG 受 TP 浓度影响显著($P < 0.05$),随着 TP 浓度的升高,运动性硅藻百分比显著上升($P < 0.05$),硅藻属指数 IDG 显著下降($P < 0.01$);Pielou 均匀度指数同时受到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的影响,并随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度的升高而显著下降($P < 0.05$),值得注意的是,该指数受 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响在水生态 I 区与 III 区间是相反的,这可能与水生态 I 区、水生态 III 区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度范围不同有关。



箱体上方的字母“a”“b”“c”表示 K-W 非参数检验的组间差异
图 4 浑太河 7 个生物参数在 3 个水生态区的分布特征及差异显著性比较

Fig. 4 Characteristics of the seven diatom metrics and a comparison of the significance in the three AEs of the Huntai River

表 2 浑太河 3 个水生态区 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 浓度与 7 个生物参数之间的 Pearson 相关性¹⁾

项目	水生态 I 区		水生态 II 区		水生态 III 区	
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP
运动性硅藻百分比	-0.054	0.278 *	0.288 *	0.269 *	0.023	0.258 *
敏感性硅藻百分比	-0.243 *	-0.035	-0.099	-0.231 *	-0.157	-0.122
具柄硅藻百分比	-0.244 *	-0.128	-0.267 *	-0.134	0.036	0.087
Pielou 均匀度指数	0.419 **	0.071	0.062	-0.059	-0.304 *	-0.324 **
特定污染敏感指数 IPS	0.116	0.042	-0.319 **	-0.364 **	-0.082	-0.203
硅藻生物指数 IBD	0.129	-0.011	-0.192	-0.253 *	-0.068	-0.130
硅藻属指数 IDG	0.150	-0.124	-0.209	-0.141	-0.071	-0.379 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.3 不同水生态区营养盐阈值分析

LOWESS 拟合曲线表明浑太河 3 个水生态区的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 拐点存在差异(图 5). $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在水生态 I 区、II 区、III 区的拐点值分别为 0.13、0.30、1.98 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经独立样本 T 检验可知以上拐点两侧 D-IBI 值差异性显著($P < 0.05$). TP 在 3 个水生态区的拐点分别为 0.04、0.06、0.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,独立样本 T 检验结果表明,上述拐点两侧 D-IBI 值存在显

著性差异($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 浑太河不同水生态区营养盐特征

本研究表明,浑太河 3 个水生态区 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 浓度表现为水生态 I 区 < 水生态 II 区 < 水生态 III 区. 水生态 I 区以中起伏的山地森林为主,植被覆盖率较高;水生态 II 区以低起伏的山地为主,开发

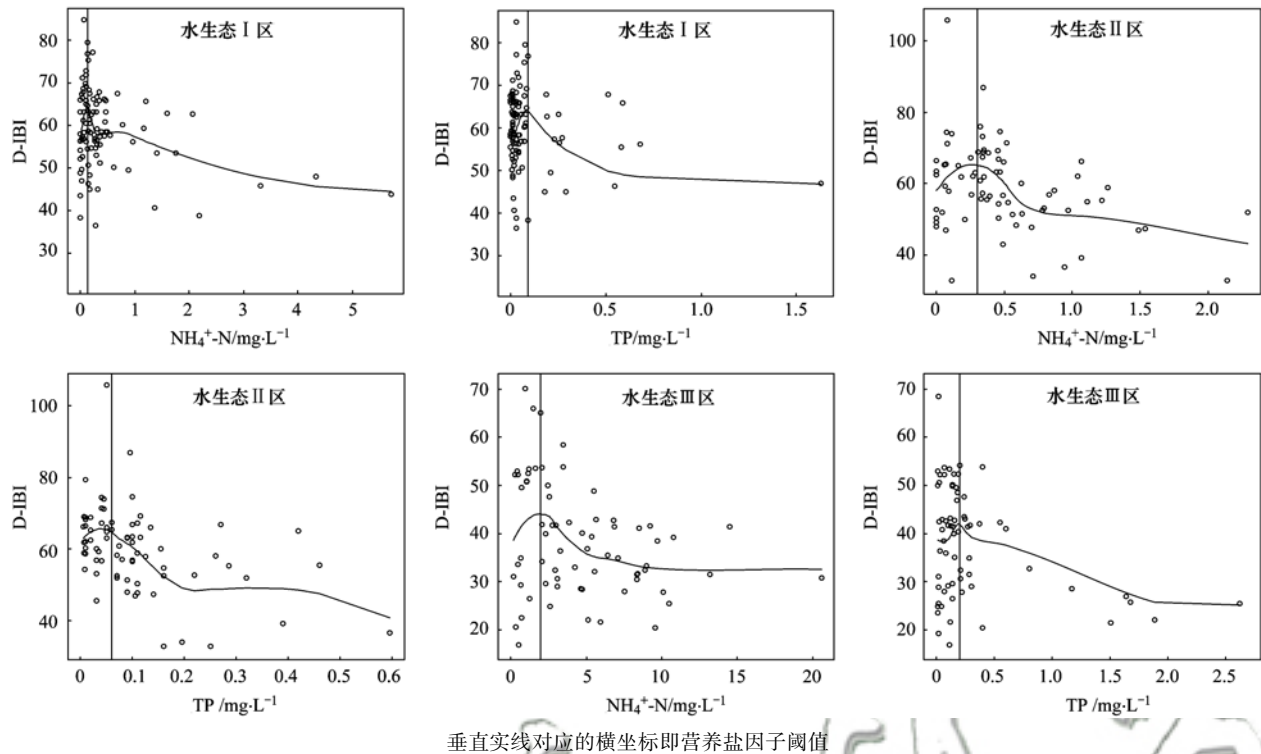


图 5 浑太河不同水生态区营养盐因子的 LOWESS 曲线及阈值

Fig. 5 LOWESS fitting curves and nutrient thresholds for different AEs of the Hantai River

明显且土地利用以农业用地为主;而水生态Ⅲ区以平原为主,人口密度较高,工业污染严重,城镇化严重.与水生态Ⅰ区、Ⅱ区相比较,水生态Ⅲ区受到的人类干扰更为严重,营养盐浓度也较高,该水生态区的河流属于典型的城镇化河流^[35].通过研究重庆两江新区城镇化严重区域与未经历大规模城镇化地区河流水质的差异,Luo等^[36]发现城镇化严重区域水体的营养盐浓度显著高于未经历大规模城镇化区域营养盐浓度,前者的 NH_4^+-N 浓度高达后者的10倍,TP浓度是后者的3倍左右,而且城镇化是导致营养盐浓度显著升高的重要原因.另外,建筑活动可能会降低土壤的蓄水能力,大量污水直接随着地表径流排入河流,导致水体的营养盐负荷增加^[37].

3.2 浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响

运动性硅藻百分比、敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比、Pielou均匀度指数、特定污染敏感指数IPS、硅藻生物指数IBD、硅藻属指数IDG这7个生物参数较全面地反映了底栖硅藻的群落结构特征,本研究发现,随着干扰程度的增大,敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比、Pielou均匀度指数、特定污染敏感指数IPS、硅藻生物指数IBD、硅藻属指数IDG均呈现出下降的趋势,而运动性硅藻百分比显著增大.

运动性硅藻百分比、敏感性硅藻百分比和具柄硅藻百分比均在属的水平上反映了水体中底栖硅藻对污染物和生境扰动性作出的不同响应^[38].运动性硅藻百分比反映的是舟形藻属、菱形藻属与双菱藻属的相对丰度,该指数在水生态Ⅲ区中最大,说明水生态Ⅲ区受到人类的干扰程度最大,而且在3个水生态区中该指数均与TP显著正相关,由此TP是影响运动性硅藻百分比的一个重要因素.具柄硅藻百分比显示了异极藻属、楔形藻属、曲壳藻属的相对丰度状况,敏感性硅藻百分比是基于底栖硅藻的耐污值($\text{PTI} \geq 3$)计算得出的硅藻相对丰度,这两个指数越低,说明该水生态区受人类的干扰越大.特定污染敏感指数IPS、硅藻生物指数IBD、硅藻属指数IDG是在河流健康评价中应用较为广泛的硅藻指数.硅藻生物指数IBD对水体的富营养状况、有机污染物浓度变化状况及水体酸化程度具有较好的指示作用^[39];硅藻属指数IDG以属水平的底栖硅藻指示河流的水生态健康状况,该值越高,水体的受污染程度越轻^[40];特定污染敏感指数IPS基于底栖硅藻特殊污染敏感种的耐污值^[41],从敏感种的角度指示水体的受污染状况.上述3个指数均在水生态Ⅲ区最低,说明水生态Ⅲ区水质状况相对较差.

在不同的水生态区中, NH_4^+-N 、TP对底栖硅藻特征指标的影响程度是不同的,如敏感性硅藻百分

比在水生态 I 区仅受到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的显著负影响, 在水生态 II 区中仅受 TP 的显著负影响; 硅藻属指数 IDG 仅在水生态 III 区受到 TP 的显著负影响. 因此针对不同的水生态区分别建立 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的生态阈值可以更有效地保护底栖硅藻群落及多样性, 达到保护河流水生态系统健康的目的.

3.3 不同水生态区底栖硅藻的营养盐阈值分析

D-IBI 在水质生物学评价中应用较为广泛^[25,26], 综合多个生物参数, 系统地反映了底栖硅藻群落对环境变化作出的响应, 通过推导该指数的营养盐阈值可起到预警和保护底栖硅藻群落的作用. 本研究以底栖硅藻为研究对象, 利用 LOWESS 研究 D-IBI 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 阈值, 发现浑太河 3 个水生态区的生态阈值存在差异, D-IBI 在水生态 I 区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 阈值远低于水生态 III 区. 水生态 I 区、II 区的 TP 阈值分别为 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远低于 Cao 等^[13]利用 TITAN 推导出的滇池浮游植物的 TP 负响应阈值 ($131.5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 而水生态 III 区 TP 阈值 ($0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 要高于该负响应阈值. Black 等^[12]通过 RF 对美国农业流域溪流的多个硅藻指数进行 TP 阈值计算, 发现 TP 阈值范围为 $0.03 \sim 0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这与浑太河 3 个水生态区 D-IBI 的 TP 阈值范围 ($0.04 \sim 0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 是相似的. 有关 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值的研究相对较少, 学者更多地关注于 TN 阈值的确立^[14,22,24], 但是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为底栖硅藻最容易吸收的氮素形态^[6], 对底栖硅藻的生长繁殖起着更重要的作用, 因此有必要更多地关注于底栖硅藻 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值的制定. 本课题组在研究浑河底栖硅藻的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值时发现 (未发表), 该河流的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 该值介于本研究的水生态 II 区与水生态 III 区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值之间, 远高于水生态 I 区. 由于浑太河流域底栖硅藻群落具有空间异质性, 采取统一的保护阈值, 不足以起到真正保护底栖硅藻群落的目的, 因此在水生态区内研究营养盐阈值, 可以有针对性地治理和保护河流水生态系统.

4 结论

(1) 浑太河 3 个水生态区间营养盐浓度存在显著差异, 且呈现出水生态 I 区 < 水生态 II 区 < 水生态 III 区的变化趋势.

(2) 底栖硅藻特征指标 (运动性硅藻百分比、敏感性硅藻百分比、具柄硅藻百分比、Pielou 均匀

度指数、特定污染敏感指数 IPS、硅藻生物指数 IBD、硅藻属指数 IDG) 均在 3 个水生态区间存在差异, 运动性硅藻百分比呈现出水生态 I 区 < 水生态 II 区 < 水生态 III 区的变化, 而其余 6 个生物参数的变化与之相反.

(3) 经 LOWESS 拟合和独立样本 T 检验, 发现 3 个水生态区底栖硅藻的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 保护阈值不同, 水生态 I 区、II 区、III 区的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阈值分别为 0.13 、 0.30 、 $1.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 阈值分别为 0.04 、 0.06 、 $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

致谢: 本研究在 GIS 图的绘制中得到了北京林业大学林学院夏会娟博士的指导与帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Zhang Y, Guo F, Meng W, *et al.* Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **152**(1-4): 105-121.
- [2] Bu H M, Meng W, Zhang Y, *et al.* Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197.
- [3] 付意成, 魏传江, 臧文斌, 等. 浑太河污染物入河控制量研究 [J]. *水电能源科学*, 2010, **28**(12): 21-25.
- [4] Fu Y C, Wei C J, Zang W B, *et al.* Research on contaminant control quantity of entering into Huntai River [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2010, **28**(12): 21-25.
- [5] US Environmental Protection Agency. National water quality inventory: 2000 report [R]. EPA-841-R-02-001. Washington: US Environmental Protection Agency, 2002.
- [6] John J. Assessment of river health in Australia by diatom assemblages: a review [J]. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2004, **33**(2): 95-104.
- [7] 史乾. 多种硅藻营养盐结构的初步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012. 1-9.
- [8] Shi Q. Research on nutrient structure of multiple diatoms [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. 1-9.
- [9] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [10] Groffman P M, Baron J S, Blett T, *et al.* Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application? [J]. *Ecosystems*, 2006, **9**(1): 1-13.
- [11] Smith A J, Tran C P. A weight-of-evidence approach to define nutrient criteria protective of aquatic life in large rivers [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, **29**(3): 875-891.
- [12] Zheng L, Gerritsen J, Beckman J, *et al.* Land use, geology, enrichment, and stream biota in the Eastern Ridge and Valley Ecoregion: implications for nutrient criteria development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, **44**(6): 1521-1536.
- [13] Chušev R, Nygård H, Vaičiūtė D, *et al.* Application of signal

- detection theory approach for setting thresholds in benthic quality assessments[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **60**: 420-427.
- [12] Black R W, Moran P W, Frankforter J D. Response of algal metrics to nutrients and physical factors and identification of nutrient thresholds in agricultural streams[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2011, **175**(1-4): 397-417.
- [13] Cao X F, Wang J, Liao J Q, *et al.* The threshold responses of phytoplankton community to nutrient gradient in a shallow eutrophic Chinese lake[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 258-267.
- [14] 汤婷, 任泽, 唐涛, 等. 基于附石硅藻的三峡水库入库支流氮、磷阈值[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(8): 2670-2678.
Tang T, Ren Z, Tang T, *et al.* Total nitrogen and total phosphorus thresholds for epilithic diatom assemblages in inflow tributaries of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(8): 2670-2678.
- [15] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 873-883.
Zhou C, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 873-883.
- [16] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1742-1753.
Ren J, Zhou T, Zhu G W, *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- [17] 臧小苗, 张远, 林佳宁, 等. 滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**, doi: 10.13227/j.hjxx.201701124.
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**, doi: 10.13227/j.hjxx.201701124.
- [18] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States[J]. *Annals of the Association of American geographers*, 1987, **77**(1): 118-125.
- [19] 李飞龙, 丁森, 张远, 等. 太子河流域不同水生生态区 EPT 群落时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(12): 1833-1842.
Li F L, Ding S, Zhang Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of EPT community in different freshwater ecoregions in Taizi River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(12): 1833-1842.
- [20] 王云涛, 张远, 高欣, 等. 太子河流域不同水生生态区鱼类群落分布与环境因子的关联性[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(2): 192-201.
Wang Y T, Zhang Y, Gao X, *et al.* Analysis of fish community distribution and its relationship with environmental factors in different freshwater eco-regions of Taizi River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 192-201.
- [21] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, **74**(368): 829-836.
- [22] Chambers P A, McGoldrick D J, Brua R B, *et al.* Development of environmental thresholds for nitrogen and phosphorus in streams[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(1): 7-20.
- [23] 张浩, 丁森, 张远, 等. 西辽河流域鱼类生物完整性指数评价及与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 829-839.
Zhang H, Ding S, Zhang Y, *et al.* Assessment of the fish index of biotic integrity and its relationship with environmental factors in the Xiliao River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 829-839.
- [24] 吴东浩, 于海燕, 王海燕, 等. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(2): 483-488.
Wu D H, Yu H Y, Wang H Y, *et al.* Estimation of river nutrients thresholds based on benthic macroinvertebrate assemblages: a case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 483-488.
- [25] 李国忱, 汪星, 刘录三, 等. 基于硅藻完整性指数的辽河上游水质生物学评价[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(8): 852-858.
Li G C, Wang X, Liu L S, *et al.* Bioassessment of water quality based on diatom index of biotic integrity in the upstream of Liaohe River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 852-858.
- [26] Fore L S, Grafe C. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (U. S. A.) [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(10): 2015-2037.
- [27] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生生态分区研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 911-918.
Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 911-918.
- [28] EN 13946-2004 Water quality-Guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers[S].
- [29] EN 14407-2004 Water quality-Guidance standard for the identification, enumeration and interpretation of benthic diatom samples from running waters[S].
- [30] 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第四卷-硅藻门(中心纲)[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [31] 齐雨藻, 李家英. 中国淡水藻志: 第十卷-硅藻门(羽纹纲)[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [32] 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. 12.
- [33] 周莹, 渠晓东, 赵瑞, 等. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(4): 410-417.
Zhou Y, Qu X D, Zhao R, *et al.* Standardized methods for selecting reference and impaired sites to evaluate river health[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(4): 410-417.
- [34] 裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 等. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康[J]. *生态学报*, 2010, **30**(21): 5736-5746.
Pei X J, Niu C J, Gao X, *et al.* The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(21): 5736-5746.
- [35] Gu Q W, Wang H Q, Zheng Y N, *et al.* Ecological footprint analysis for urban agglomeration sustainability in the middle stream of the Yangtze River[J]. *Ecological Modelling*, 2015,

- 318: 86-99.
- [36] Luo K, Hu X B, He Q, *et al.* Using multivariate techniques to assess the effects of urbanization on surface water quality: a case study in the Liangjiang New Area, China [J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2017, **189**(4): 174.
- [37] Bellinger B J, Cocquyt C, O'Reilly C M. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **573**(1): 75-87.
- [38] Shi D M, Wang W L, Jiang G Y, *et al.* Effects of disturbed landforms on the soil water retention function during urbanization process in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Catena*, 2016, **144**: 84-93.
- [39] Coste M, Boutry S, Tison-Rosebery R 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.
- [40] 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.
- [41] Kelly M G, Ector L. Effect of streamlining taxa lists on diatom-based indices: implications for intercalibrating ecological status [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **695**(1): 253-263.

环境科学

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)