

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳	(2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊	(2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳	(2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏	(2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝	(2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺	(2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君	(2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌	(2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷	(2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁	(2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕	(2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞	(2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛	(2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园	(2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨	(2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红	(2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪	(2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟	(2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德	(2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟	(2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康	(2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆	(2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕	(2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波	(2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪	(2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏	(2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干	(2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯	(2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟	(2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕	(2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟	(2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文	(2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民	(2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏	(2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博	(2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨	(2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟	(2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体	(2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴	(2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄	(2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学	(2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松	(2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟	(2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博	(2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲	(2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康	(2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛	(2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高	(2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波	(2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江	(2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯	(2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静	(2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥	(2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳	(2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军	(2528)
《环境科学》征稿简则 (2431)		
《环境科学》征订启事 (2532)		
信息 (2157, 2271, 2367, 2418)		

大型底栖动物生物评价指标比较与应用

耿世伟¹, 渠晓东², 张远^{2*}, 林坤德¹

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012)

摘要: 采用不同生物指数评价河流健康, 结果往往有差异, 如何识别各种生物指数的关系和适用性成为亟待解决的问题。基于太子河流域大型底栖动物群落研究, 比较了 5 种大型底栖动物生物指数评价结果的差异。结果表明, 5 种指数具有极显著的相关性, 但由于健康等级划分标准差异, 造成不同指数的健康评价等级存在一定差异。同时分析了不同指数对不同类型人为活动影响的敏感性, 研究其在河流健康评价中的适用性。结果表明在太子河流域中, BI 指数与土地利用类型和溶氧具有较好的相关关系, 对这两类的干扰具有较好的指示作用; FBI 指数对酸污染和氨氮污染具有较强的指示作用; ASPT 指数与耗氧相关的水质指标有较强的负相关; B-IBI 指数与总氮呈显著的负相关关系, 可较好指示氮污染, 而且 B-IBI 指数与其他类型人为干扰活动均呈显著的相关关系, 对土地利用和水质污染也具有较好的指示作用。综上所述, 大型底栖动物 BI 指数和 ASPT 指数应该分别适用于评价流域土地利用和水化学指标对河流生态系统的影响, 而 B-IBI 可用于评估多种类型人为干扰活动。

关键词: 大型底栖动物; BMWP 指数; ASPT 指数; BI 指数; FBI 指数; B-IBI 指数; 河流健康

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2281-07

Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment

GENG Shi-wei¹, QU Xiao-dong², ZHANG Yuan², LIN Kun-de¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Laboratory of Riverine Ecological Conservation & Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The different biological indices usually result in different results in the river health assessment. It is imperative and valuable to identify the correlation among different indices and their applicability for assessing stream health. In this study, totally five biological indices were selected and compared in the investigation of macroinvertebrate communities in the Taizi river. The results showed significant correlations among the five indices. However, due to the difference in health rating criteria for each biological index, different results of health ratings were obtained when different indices were used. The responding sensitivities to disturbance caused by different types of human activities were studied for each index to determine their applicability in assessment of river health. The data indicated that the BI index had significant correlations with land use and dissolved oxygen and was a good indicator for these two types of disturbance. The FBI index could well reflect the acid and ammonia contamination of the investigated stream. Strong negative correlation was found between the ASPT index and several water quality parameters concerning oxygen consumption. The B-IBI index had a significant negative correlation with the total nitrogen concentration, being a good indicator for nitrogen contamination. Besides, the B-IBI index was also significantly correlated to disturbance caused by other types of human activities and can be used as an indicator for both land use and aquatic pollution. To be concluded, the BI index and ASPT index can be individually used to assess the land use of a riverine and the impact of hydrochemical index on the ecosystems, whereas the B-IBI index could be a suitable indicator for evaluating the stream health correlated with various human activities.

Key words: macroinvertebrates; biological monitoring working party (BMWP); average score per taxon (ASPT); biotic index (BI); family biotic index (FBI); benthic index of biological integrity (B-IBI); stream health

利用水生生物评价河流健康的指标颇多, 其中大型底栖动物评价指标的使用最广泛, 目前已统计的指标达 50 多种, 大约是其水生生物评价指标数量的 5 倍, 其中基于耐污值构建的大型底栖动物评价指标目前使用最普遍^[1]。依据长期对大型底栖动物生活史和生活特征的研究与观测, 发现不同类型的大型底栖动物对人为活动和污染的耐受性具有极高的差异性, 从最敏感类群到最耐污类群均有分

布^[2~4]。根据群落的耐污特征构建大型底栖动物评价指标, 不同的学者提出了两类不同的方法^[5]: ①基于敏感种和耐污种的出现与否构建的指标, 典型

收稿日期: 2011-09-18; 修订日期: 2011-11-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07526-001-02); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2010KYYW06)

作者简介: 耿世伟 (1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生生物学与河流生态学, E-mail: shuibaoqingtian@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangyuan@crase.org.cn

代表如 BMWP (Biological Monitoring Working Party) 指数^[6]; ②基于物种的耐污值和其在群落中的重要性构建的指标, 典型代表如 FBI (family biotic index) 指数^[7]. 以上两类方法在河流健康评价中均有较广泛的应用, 但不同评价指标间的比较研究, 尤其是不同评价方法在我国河流健康评价中的适用性研究目前尚不多见^[8~10].

Hellawell^[6]于 1978 年基于英国河流中大型底栖动物敏感值构建 BMWP 指数, 被广泛应用于河流健康评价^[11~13]. 考虑到不同类群的耐污值受总物种数的影响, Armitage 等^[14]提出使用 ASPT (average score per taxon) 指数, 并得到广泛应用^[12,13,15]. 基于物种丰富度与耐污值构建的评价指标的典型代表为 BI (biotic index) 指数. Chutter^[16]于 1972 年首次发表了在专家经验的基础上构建的 BI 指数, 并进行河流水质评价. 1982 年, 美国学者 Hilsenhoff^[17]基于威斯康辛州 1 000 多条河流的数据对州内大型底栖动物耐污值进行了全面修订, 更新和提高了 BI 指数在北美地区使用的科学性. 为降低物种鉴定的难度与时间, 便于实现河流健康的快速评价, Hilsenhoff 在 BI 指数的思想上, 提出基于科级鉴定水平的生物评价指标 FBI 指数^[18], 并在其后将这一指数进行了更新和推广. 目前, 以上 4 种评价指数在河流健康评价中使用的频率较高^[1,18].

基于以上 4 种河流健康评价指标和大型底栖动物生物完整性 (B-IBI) 在实际应用中存在的适用性, 以及不同指标所反映环境影响的灵敏性问题, 本研究选取 2009 年太子河流域大型底栖动物监测数据, 开展 BMWP、ASPT、FBI、BI 和 B-IBI 评价指数的对比分析. 拟通过太子河的案例研究, 探讨以下科学问题: ①5 种评价指数在河流健康评价中的实际应用效果及其相互关系; ②不同指数对不同类型的人为干扰活动响应的灵敏性.

1 材料与方法

1.1 研究区域

太子河流域位于我国辽宁省东南部 (东经 $122^{\circ}18' \sim 124^{\circ}47'$, 北纬 $40^{\circ}37' \sim 41^{\circ}36'$), 是大辽河水系两条主要支流之一. 河流全长 413 km, 流域面积 $1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$. 太子河流域属大陆性季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季较长且寒, 春秋季节短暂, 全年平均降水量 655 ~ 954 mm, 东部较多, 西部很少^[19].

太子河流域地处辽宁重要的工业产区, 流域内分布有重要工业城市如本溪、辽阳和鞍山市, 同时太

子河下游还是辽宁省重要的农业生产区, 并为农业生产提供重要水源. 受流域内工、农业点源和非点源污染的影响, 太子河中、下游流域污染严重.

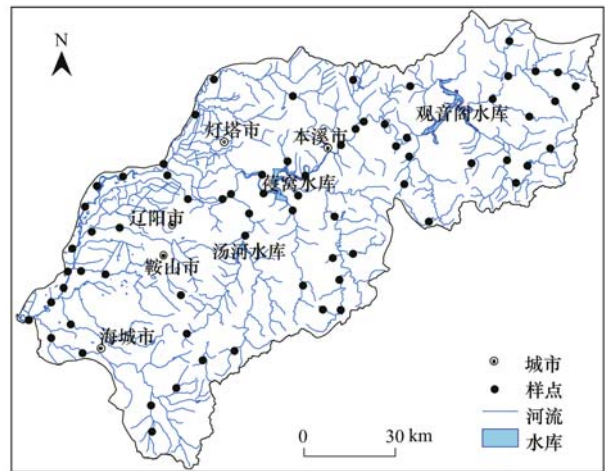


图 1 太子河水系及其大型底栖动物样点示意

Fig. 1 Sketch map of Taizi River system and specific location of the sampling sites

1.2 大型底栖动物采样方法

由于 2009 年夏季太子河流域降雨量极少, 因此选择 2009 年 8 月开展太子河大型底栖动物生物群落监测. 全流域内流量较为稳定, 为大型底栖动物提供了较好的生境条件, 同时群落发育较为充分, 为大型底栖动物群落的调查提供了较好的样本. 依据流域水系分布特征, 全流域共设置监测河段 68 个 (见图 1). 每一监测河段选择约 100 m 的采样区, 利用索伯网 (30 cm $\times$ 30 cm, 60 目) 采集大型底栖动物标本, 选择不同类型生境设置 3 个平行样以减小采样误差. 将索伯网内采集的所有大型底栖动物样品过 40 目筛网进行粗挑选, 用酒精 (70%) 保存后带回实验室进行鉴定. 绝大多数物种鉴定到属或种, 摇蚊鉴定至亚科, 寡毛类和线虫鉴定到纲^[20~23].

1.3 土地利用

利用 2007 年 TM 影像解译获取太子河流域土地利用特征. 根据采样河段所在区域, 分别从样点所属的小流域尺度 (样点上游所有集水区域) 和河岸带尺度 (样点两侧各 1 km 宽至采样区上游 10 km 长作为缓冲区) 提取 10 种土地类型: 森林 (包括各种针叶、落叶和阔叶林以及乔木灌丛等)、旱田 (主要为玉米种植)、城镇 (包括城市或工业区的用地和各类村镇用地)、水田 (主要为水稻)、水库、草地、河道 (包括自然河道与人工修筑的引水河道)、冲积平原、湿地 (主要为人工湿地, 偶为自然湿地) 和裸地 (未使用或未开发的土地).

太子河流域的土地利用以森林为主(57.2%),其中自然和原始森林所占的比例极小,主要为次生林;其次为农业用地,主要是旱田以耕作玉米为主,占全流域土地利用面积的31.9%;再次为城市用地,占6.9%。通过以上分析可知,太子河流域的土地利用开发强度总体上较高,除太子河南支源头河流受人为活动的影响相对较轻外,流域内其他区域受到的人为活动干扰总体上较高。

1.4 水化学指标测定

依据太子河流域水污染特征,在大型底栖动物样品采集的同时,对采样河段的水质指标进行分析,指标分为现场监测和实验室分析指标。利用 Hach 仪器(sensiION™156)和 YSI 仪器(YSI ProPlus),对 pH、溶解氧(DO)和电导率(EC)进行现场监测。实验室分析指标包括总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数、化学需氧量(COD)、5 日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₄⁺-N)和溶解性磷酸盐(PO₄³⁻)7 项水质指标。水样采集、保存和检测均按照文献[24]中的要求进行。

1.5 大型底栖动物生物评价指数计算及其等级标准

BMWP 指数和 ASPT 指数以大型底栖动物敏感值进行计算,FBI 指数和 BI 指数的计算均基于以大型底栖动物耐污值作为基础,4 类指数的计算公式、原理和说明见表 1。依据我国在大型底栖动物耐污值和参考标准制定研究中的成果和国外研究进展^[15, 25, 26],对大型底栖动物生物指数的健康等级标准进行划分,为方便不同方法间的比较,将 FBI 指数和 BI 指数的 7 等级合并调整为 5 个等级(见表 2)。由于 BMWP 指数和 ASPT 指数基于敏感值的计算,其值越高代表河流的健康状况越佳;FBI 指数和 BI 指数的计算基于耐污值构建,其值越高代表河流的健康状况越差(见表 1)。

为比较 4 种单因子评价指数与生物完整性评价指数的差异,同时计算了该研究区域内的大型底栖动物生物完整性指数。太子河流域大型底栖动物的生物完整性指数的指标构建及其指数计算依据本地区其他相关研究^[27]。

表 1 大型底栖动物单因子评价指数计算方法、原理及其发展和应用说明

Table 1 Calculation methods, principles, and related developing processes for various biological indices of macroinvertebrates			
大型底栖动物生物评价指数	计算方法	原理	说明
BMWP 指数	$BMWP = \sum t_i$ t_i 是科 i 的 BMWP 的分数,通过比较检测值与预期值	基于科一级分类阶元上各物种的出现与否,考虑出现物种的敏感值,以所有出现物种敏感值之和代表环境的清洁	BMWP 指数基于英国地区河流的研究,现已在西班牙 ^[11] 、希腊 ^[28] 、意大利 ^[29] 、波兰 ^[30] 、美国 ^[31] 、泰国 ^[32] 、马来西亚 ^[33] 、和埃及 ^[34] 等地区广泛使用,但不同地区需要对 BMWP 分值进行重新修订
ASPT 指数	$ASPT = \sum t_i/n$ t_i 是每个类群的敏感值, n 为总的科级分类单元数	基于 BMWP 指数,降低总物种数中偶见种的出现对评价结果的影响	基于 BMWP 指数结果上计算得到,且计算方法简单,且故在 BMWP 指数使用的地区,ASPT 也得到广泛使用
BI 指数	$BI = \sum N_i t_i / N$ N_i 是物种 i 的个体数, t_i 是物种 i 的耐污值, N 是总个体数	计算不同类群的相对丰度以及类群的耐污值乘积,既反映了群落的耐污特征,也反映了不同耐污类群的丰度	BI 指数最早由南非的研究发展而来,其后在北美得到主要应用
FBI 指数	$FBI = \sum n_i t_i / N$ n_i 是科 i 的个体数, t_i 是科 i 的耐污值, N 是总个体数	原理与 BI 指数一致,但主要考虑类群科级的耐污值,极大地提高了指数计算的效率,广泛应用于快速生物评价	FBI 指数目前主要应用于快速生物评价,在北美应用最广泛,我国在此方面也有研究案例

表 2 生物评价指标等级划分标准

Table 2 Classification standards for various biological indices					
大型底栖动物生物评价指数	健康	良好	一般	较差	极差
BMWP 指数	≥81	51~80	25~50	10~24	0~9
ASPT 指数	≥4.1	3.6~4.0	3.1~3.5	2.1~3.0	0.0~2.0
BI 指数	0.00~3.50	3.51~5.50	5.51~6.50	6.51~8.50	8.51~10.00
FBI 指数	0.00~3.75	3.51~5.00	5.01~5.75	5.76~7.25	7.26~10.00
B-IBI	>6.18	4.64~6.18	3.10~4.64	1.57~3.10	<1.57

1.6 统计分析

5 种大型底栖动物生物评价指数的正态性检验利用 K-S 检验,因 5 种评价指数不符合正态分布,故采用 Spearman 等级相关分析方法分析评价指数间的相关性.为评估 5 种评价指数对环境压力响应的敏感性,利用直线线性回归分析(基于最小二乘法)对环境压力和 5 种评估指数进行线性拟合,利用线性拟合的 R^2 代表拟合度, R^2 越高代表线性拟合的效果越好.所有分析方法均利用 SPSS 17.0 软件进行.

2 结果与分析

2.1 不同评价指数的评估差异

根据选取的 4 种大型底栖动物生物评价指数和大型底栖动物生物完整性指数,对太子河流域河流健康进行评估.结果表明,5 种指数的健康评价等级总体上存在较大差异(见图 2).

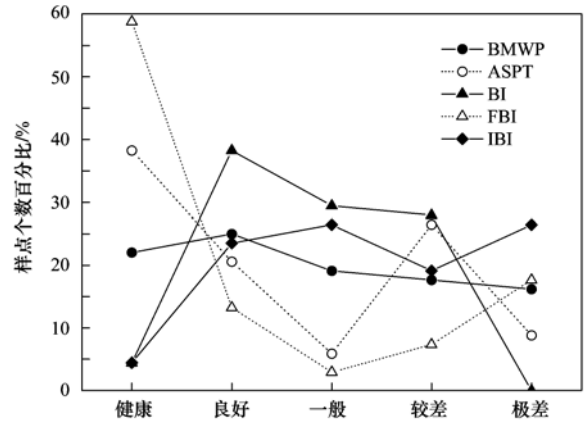


图 2 大型底栖动物生物指数的评价结果分布

Fig. 2 Distribution of evaluation results for the biological index of macroinvertebrates

利用 FBI 指数评价河流健康等级所得结果总体上偏高,全流域中达到“健康”的样点数占总体的 58.8%,其次为“极差”的样点;ASPT 指数表现出相似的趋势,“健康”的样点占总样点数的 38.2%,其次为“较差”样点,占总体的 26.5%.2 种评价方法总体上呈现为“U”型的曲线,即对“健康”和“较差”(或“极差”)的评价比例较高.

与以上 2 种方法相反,BI 指数和 IBI 指数的评价结果中,“健康”的样点所占的比例较低,均为 4.4%.而 BI 指数的评价结果中,“极差”的样点为 0%.因此,BI 指数总体上呈现为倒“U”型.相对而言,IBI 评价结果的中其他等级的比例相对较为平均(27.9%~38.2%).与其他指数相比,BMWP 指数

评价结果在各等级间的比例最平均(16.2%~25.0%).

2.2 不同评价指数的相关性分析

利用 Spearman 等级相关分析,探讨不同评价指数间的相关性.结果表明,除了 B-IBI 指数和 FBI 指数无显著的相关性外,指数间的相关性均达到极显著水平(r 为 0.340~0.864, $P<0.01$) 在 5 种评价指数间 ASPT 指数和 BMWP 指数的相关性最高($r=0.864$),其次为 BMWP 指数和 B-IBI 指数($r=0.837$),再次为 BI 指数和 B-IBI 指数($r=0.814$).由于 BMWP 指数和 ASPT 指数使用敏感值,而 BI 指数和 FBI 指数使用耐污值,因此这两类指数总体上为负相关关系. ASPT 指数降低了 BMWP 指数受总物种数的影响,二者表现出极高的一致性,在评价应用中具有较高的一致性. BI 指数和 FBI 指数虽然分别使用的是种(属)一级和科一级的耐污值,但绝大多数情况下其耐污性是同一的,即科级耐污值与属和种的耐污值具有一致性,因此二者也具有较高的正相关性.除 FBI 指数外,B-IBI 指数和其他生物指数均具有较高的相关性(见表 3).

表 3 评价指数之间的斯皮尔曼等级相关系数¹⁾

Table 3 Spearman rank correlation coefficients among various assessment indices

	BMWP 指数	ASPT 指数	BI 指数	FBI 指数	B-IBI
BMWP 指数	1.000				
ASPT 指数	0.864 **	1.000			
BI 指数	-0.748 **	-0.601 **	1.000		
FBI 指数	-0.356 **	-0.340 **	0.501 **	1.000	
B-IBI	0.837 **	0.697 **	-0.814 **	-0.179	1.000

1) ** 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$

2.3 不同评价指数对不同类型人为干扰活动的响应分析

不同类型大型底栖动物评价指数间具有较高的一致性(见表 3),但不同指数反映的是大型底栖动物群落对不同类型和不同程度干扰的响应,因此指数间存在对不同类型人为活动干扰响应敏感性的差异.选择土地利用和水质指标指示不同类型人为活动,其中土地利用又按照流域的特征,分为小流域尺度和河岸带尺度.在小流域尺度和河岸带尺度上,森林覆盖率和旱田面积均呈显著的负相关关系($r=-0.906$ 和 $r=-0.680$, $P<0.01$),因此仅保留旱田开展进一步分析.

结果表明,5 种大型底栖动物生物评价指数在不同程度上均可以较显著的反映人为活动的影响,表现出较高的线性拟合度(表 4).在小流

域尺度上,旱田和城镇对 5 种评价指数均具有显著的影响($P < 0.01$),其中 BI 指数与旱田和城镇面积的线性相关性最高($R^2 = 0.402$ 和 $R^2 = 0.452$);水田对 5 种评价指数也具有较显著的影响($P < 0.05$),其中 B-IBI 指数与水田面积的线性相关性最高($R^2 = 0.158$);小流域内水库的面积比,可以在某种程度上表征小流域内水文水动力特征受大坝的影响程度,大型底栖动物指数中 BMWP 指数、BI 指数和 B-IBI 指数表现出对其具有显著的响应,其中 BI 指数的线性相关性最高($R^2 = 0.172$)(表 4)。

在河岸带尺度上,5 种大型底栖动物评价指数与城镇面积之间具有显著的相关关系($P < 0.01$),其中 BI 指数的线性相关性最高($R^2 = 0.465$),同时 BI 指数与旱田的相关性也最高($R^2 = 0.176$, $P < 0.01$),但在河岸带尺度上 ASPT 和 FBI 指数与旱田的面积没有直接的相关性(见表 4);5 种指数与水田的面积也有较好指示作用($P < 0.05$),其中 FBI

指数的线性相关性最高($R^2 = 0.263$),5 种指数与水库均不存在显著的相关性($P > 0.05$)。

总体上 5 种大型底栖动物评价指数对水化指标具有较好的指示作用。FBI 指数对酸污染的指示作用最佳($R^2 = 0.183$, $P < 0.01$),BMWP 和 ASPT 指数的指示作用相对弱于其他 3 个指数;对 DO 和与耗氧相关的生化需氧量(BOD_5)、化学耗氧量(COD)以及高锰酸盐指数,ASPT 指数表现出较高的线性相关性,除对 DO 的相关性弱于 BI 和 FBI 指数外,与其他水质指标的相关性均为最高(R^2 为 $0.254 \sim 0.429$, $P < 0.01$)。5 种大型底栖动物指数与正磷酸盐(PO_4^{3-})均没有显著的相关关系,但 BMWP、ASPT 和 B-IBI 指数与总磷(TP)具有显著的相关性,其中 ASPT 指数的相关性最高($R^2 = 0.223$, $P < 0.01$)。5 种指数与总氮(TN)和氨氮($NH_4^+ - N$)的相关性均较高,其中 B-IBI 指数与 TN 的线性相关性最高($R^2 = 0.364$, $P < 0.01$),FBI 指数与氨氮的线性相关性最高($R^2 = 0.371$, $P < 0.01$)。

表 4 生物评价指数与环境因子间线性回归分析 R^2 结果¹⁾

Table 4 Linear regression analysis between biological indices and environmental variables, and the corresponding R^2 data						
项目	环境因子	BMWP 指数	ASPT 指数	BI 指数	FBI 指数	B-IBI
土地利用(小流域尺度)	旱地	0.206 ** (-)	0.287 ** (-)	0.402 ** (+)	0.308 ** (+)	0.279 ** (-)
	水田	0.108 ** (-)	0.072 * (-)	0.124 ** (+)	0.064 * (+)	0.158 ** (-)
	城镇	0.321 ** (-)	0.336 ** (-)	0.452 ** (+)	0.375 ** (+)	0.411 ** (-)
	水库	0.058 * (-)	0.016 (-)	0.172 ** (+)	0.006 (+)	0.161 ** (-)
土地利用(河岸带尺度)	旱地	0.103 ** (-)	0.048 (-)	0.167 ** (+)	0.020 (+)	0.142 ** (-)
	水田	0.085 * (-)	0.096 * (-)	0.230 ** (+)	0.263 ** (+)	0.179 ** (-)
	城镇	0.295 ** (-)	0.291 ** (-)	0.465 ** (+)	0.387 ** (+)	0.404 ** (-)
	水库	0.000 (-)	0.006 (-)	0.004 (+)	0.000 (+)	0.002 (-)
水化指标	pH	0.078 * (+)	0.061 * (+)	0.123 ** (-)	0.183 ** (-)	0.100 ** (+)
	EC	0.445 ** (-)	0.401 ** (-)	0.584 ** (+)	0.403 ** (+)	0.551 ** (-)
	DO	0.214 ** (+)	0.300 ** (+)	0.342 ** (-)	0.306 ** (-)	0.226 ** (+)
	BOD_5	0.116 ** (-)	0.254 ** (-)	0.144 ** (+)	0.141 ** (+)	0.135 ** (-)
	COD	0.252 ** (-)	0.321 ** (-)	0.281 ** (+)	0.226 ** (+)	0.274 ** (-)
	高锰酸盐指数	0.292 ** (-)	0.429 ** (-)	0.297 ** (+)	0.223 ** (+)	0.299 ** (-)
	TP	0.130 ** (-)	0.223 ** (-)	0.048 (+)	0.055 (+)	0.081 * (-)
	TN	0.320 ** (-)	0.305 ** (-)	0.325 ** (+)	0.284 ** (+)	0.364 ** (-)
	$NH_4^+ - N$	0.242 ** (-)	0.299 ** (-)	0.350 ** (+)	0.371 ** (+)	0.352 ** (-)

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

3 讨论

3.1 大型底栖动物评价指数比较

大型底栖动物作为河流中主要的生物类群,其群落结构反映长期和短期的各类型人为活动影响,大型底栖动物评价指数均基于此原理构建^[4, 35]。因此,虽然生物指标的使用存在差异,但不同评价结果之间具有较高的相似性,与本研究结果一致,认为在使用不同评价指数评价河流健康时,除 FBI 指数和

B-IBI 指数间的差异显著外,其他指数间具有较好的一致性(见表 3)。

但不同的大型底栖动物生物指数评价结果在一定程度上存在差异性^[36],造成评价结果差异性的因素主要为以下 3 个方面。首先,在计算大型底栖动物指数过程中所使用敏感值和耐污值参考标准存在一定的地区差异。BMWP、ASPT 和 FBI 指数均使用的是科一级的敏感值和耐污值,其在不同区域往往具有很高的差异性,而且同一科内大型底栖动物的敏

感和耐污特征有时往往差异很大(如摇蚊科)。其次,我国的敏感值和耐污值研究相对落后。国内目前仅见刘玉等^[15]对 BMWP 指数和 ASPT 指数针对国内水质做过修正,王备新等^[25]和王建国等^[26]等对大型底栖动物耐污值的研究,使得指数的应用往往需要引用国外的标准。最后,绝大多数的健康评价,均使用等级方式来判断河流的健康与否^[1,27,37,38],本研究结果表明,采用等级法确定河流健康,不同评价方法间往往存在较大差异(见图2),与Cao等^[36]的研究结果一致。这是因为在确定健康等级时,由于研究区域的时空差异造成的水生生物群落的差异,以及不同学者对于健康标准的认识存在分歧,造成不同指数的健康评价结果不尽相同,因此不同地区在使用生物评价指数时,对不同指数的健康等级和健康标准的划分和制定,应当给予充分的考虑。

3.2 大型底栖动物评价指数对不同类型人为活动压力的响应

不同类型大型底栖动物评价指数与不同的环境压力之间的相关性存在差异,这就为评价某种特定的环境干扰压力选择合适的大型底栖动物评价指数提供了依据^[39]。如Hering等^[39]针对德国河流比较了79种大型底栖动物评价指数的适用性,为德国河流评价选择合适的生物评价指数提供了依据。

本研究的结果表明,BI指数可极好地表征流域土地利用对河流生态系统健康和大型底栖动物群落的影响,尤其是太子河流域主要的土地开发影响,包括旱田、水田、城市化和水库(表4),因此选用大型底栖动物BI指数应该可以很准确的评估太子河土地利用对河流生态系统的干扰状况;在水质方面,ASPT指数可极好地表征与耗氧类物质相关的水质污染状况,B-IBI可表征流域内总氮的污染,FBI可指示流域内酸污染和氨氮污染等。依据Cao等^[36]提出通关相关性分析可以选择不同的生物指数评估不同的生态状况,本研究结果为太子河流域主要的人为活动及其影响筛选了合适的评估指数。

由于我国地域辽阔,河流类型繁多,不同河流因地理位置、污染来源的不同,使河流的水质、生态状况存在着较大差异,因而迄今为止,我国还没有制定出全国河流生态健康评价技术标准和相应的生物评价指标体系^[40]。在选取不同生物评价指数评价河流生态状况中应着重考虑生物指数所花费的成本和时间以及其适用性^[9]。

4 结论

大型底栖动物不同生物评价指数间具有较高的一致性,但评价等级和评价标准划分的差异会造成不同指数评价结果的差异。不同评价指数对不同类型的人为活动响应的敏感性具有差异,总体分析认为在太子河流域,大型底栖动物BI指数比较适合评估流域土地利用对河流生态系统的影响,ASPT指数比较适用于评估与耗氧相关的水质指标以及磷污染对河流生态系统的影响,FBI应该可以有效指示酸污染与氨氮污染,B-IBI应该可较好地指示氮污染,并可用于多种类型人为干扰活动对河流健康的影响。

致谢:在本研究中,中国环境科学研究院陈立斌、郑文浩等为大型底栖动物数据的采集与鉴定做出了巨大的贡献,以及孔维静博士为此提取土地利用数据,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Mandaville S M. Benthic macroinvertebrates in freshwaters-taxa tolerance values, metrics, and protocols[M]. Halifax, Canada: Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax, 2002.
- [2] Bode R W, Novak M A, Abele L E. Quality assurance work plan for biological stream monitoring in New York State[R]. Albany: NYS Department of Environmental Conservation Technical Report, 1996.
- [3] Hilsenhoff W L. An improved biotic index of organic stream pollution[J]. Great Lakes Entomologist, 1987, 20(1): 31-40.
- [4] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers [M]. Washington: USEPA, 1999.
- [5] Dolédec S, Statzner B. Responses of freshwater biota to human disturbances: contribution of J-NABS to developments in ecological integrity assessments [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1): 286-311.
- [6] Hellawell J M. Biological surveillance of rivers: a biological monitoring handbook [M]. Stevenage UK: Water Research Centre, 1978.
- [7] Hilsenhoff W L. Use of arthropods to evaluate water quality of streams[A]. In: Technical bulletin wisconsin department of natural resources No. 100. Madison, WI: Dept. of Natural Resources, 1977.
- [8] Blanco S, Bécares E. Are biotic indices sensitive to river toxicants? A comparison of metrics based on diatoms and macro-invertebrates[J]. Chemosphere, 2010, 79(1): 18-25.
- [9] Dos Santos D A, Molineri C, Reynaga M C, et al. Which index is the best to assess stream health? [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 582-589.
- [10] 吴东浩,王备新,张咏,等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34

- (2): 129-134.
- [11] Zamora-Muñoz C, Sáinz-Cantero C E, Sánchez-Ortega A, *et al.* Are biological indices BMPW* and ASPT* and their significance regarding water quality seasonally dependent? Factors explaining their variations[J]. *Water Research*, 1995, **29**(1): 285-290.
- [12] Walley W J, Hawkes H A. A computer-based reappraisal of the Biological Monitoring Working Party scores using data from the 1990 river quality survey of England and Wales [J]. *Water Research*, 1996, **30**(9): 2086-2094.
- [13] Varnosfaderany M N, Ebrahimi E, Mirghaffary N, *et al.* Biological assessment of the Zayandeh Rud River, Iran, using benthic macroinvertebrates [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, **40**(3): 226-232.
- [14] Armitage P D, Moss D, Wright J F, *et al.* The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites[J]. *Water Research*, 1983, **17**(3): 333-347.
- [15] 刘玉, Vermaat J E, de Ruyter E D, *et al.* ISO-BMWP 底栖动物监测法在中国河流有机污染评价中的修正及应用[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2004, **43**(4): 102-105.
- [16] Chutter F M. An empirical biotic index of the quality of water in south African streams and rivers[J]. *Water Research*, 1972, **6**(1): 19-30.
- [17] Hilsenhoff W L. Using a biotic index to evaluate water quality in streams[A]. In: Technical bulletin wisconsin department of natural resources No. 132[M]. Madison, WI: Dept. of Natural Resources, 1982.
- [18] Hilsenhoff W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, **7**(1): 65-68.
- [19] 海河志编撰委员会. 辽河志[M]. 石家庄: 河北人民出版社, 1994.
- [20] 尤大寿, 归鸿. 中国经济昆虫志-第四十八册[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [21] 田立新, 杨连芳, 李佑文. 中国经济昆虫志-第四十九册[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [22] Wiggins G B. Larvae of the North American caddisfly genera [M]. (2nd ed.). Toronto: University of Toronto Press Inc, 1996.
- [23] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. An introduction to the aquatic insects of North America[M]. (4th ed.). Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 2008.
- [24] 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.
- [25] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 等. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, **9**(3): 279-284.
- [26] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J]. *生态学报*, 2004, **24**(12): 2768-2755.
- [27] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 919-927.
- [28] Artemiadou V, Lazaridou M. Evaluation score and interpretation index for the ecological quality of running waters in central and northern hellas[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **110**(1-3): 1-40.
- [29] Solimini A G, Gulia P, Monfrinotti M, *et al.* Performance of different biotic indices and sampling methods in assessing water quality in the lowland stretch of the Tiber River [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **422-423**(0): 197-208.
- [30] Czerniawska-Kusza I. Comparing modified biological monitoring working party score system and several biological indices based on macroinvertebrates for water-quality assessment[J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2005, **35**(3): 169-176.
- [31] Chapman D V. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring [M]. 2nd ed. New York: E & FN Spon, 1996.
- [32] Mustow S E. Biological monitoring of rivers in Thailand: use and adaptation of the BMWP score[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **479**(1-3): 191-229.
- [33] Azrina M Z, Yap C K, Rahim Ismail A, *et al.* Anthropogenic impacts on the distribution and biodiversity of benthic macroinvertebrates and water quality of the Langat River, Peninsular Malaysia [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **64**(3): 337-347.
- [34] Fishar M, Williams W P. The development of a biotic pollution index for the River Nile in Egypt[J]. *Hydrobiologia*, 2008, **598**(1): 17-34.
- [35] Dahl Lücke J, Johnson R K. Detection of ecological change in stream macroinvertebrate assemblages using single metric, multimetric or multivariate approaches[J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(4): 659-669.
- [36] Cao Y, Hawkins C P. The comparability of bioassessments: a review of conceptual and methodological issues[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, **30**(3): 680-701.
- [37] 曹艳霞, 张杰, 蔡德所, 等. 应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况[J]. *水资源保护*, 2010, **26**(2): 13-17.
- [38] 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.
- [39] Hering D, Meier C, Rawer-Jost C, *et al.* Assessing streams in Germany with benthic invertebrates: selection of candidate metrics[J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2004, **34**(4): 398-415.
- [40] 张晶, 董哲仁, 孔东亚, 等. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J]. *水利学报*, 2010, **41**(8): 883-892.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-ying, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人