

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析

李艳利^{1,2}, 李艳粉^{3*}, 徐宗学²

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000; 2. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 焦作大学化工与环境工程学院, 焦作 454000)

摘要: 于2012年5~6月对浑太河流域66个采样点的大型底栖动物进行调查采样。共采集到大型底栖动物72(属)种, 其中水生昆虫51(属)种, 占70.83%, 环节动物7(属)种, 占9.72%; 节肢动物(属)4种, 占5.56%; 软体动物(属)10种, 占13.89%。首先, 采用相关分析从6类28个候选指标中筛选出EPT分类单元数、优势分类单元个体相对丰度、蜉蝣目相对丰度、毛翅目相对丰度、软体动物相对丰度、扁蜉科/蜉蝣目相对丰度、纹石蛾科/毛翅目相对丰度、寡毛类动物相对丰度、敏感类群相对丰度、耐污类群相对丰度、收集者相对丰度、黏附者相对丰度、香农-威纳多样性指数共13个指标用于表征浑太河流域大型底栖动物群落结构特征。然后, 利用RDA方法分析了自然环境因子和反映人类活动压力的环境因子对大型底栖动物空间分异的影响。利用偏冗余分析(pRDA)比较了自然环境因子与人类活动压力因子对底栖动物群落结构影响的大小, 以及流域、河岸缓冲区和河段尺度人类活动压力因子对大型底栖动物的影响。结果表明, 所有环境因子可解释底栖动物群落结构空间变异的72.23%。纳入分析的人类活动压力因子解释了底栖动物群落结构空间变异的48.9%, 纳入分析的自然环境因子解释了底栖动物群落结构空间变异的11.8%。河段尺度人类活动压力因子对底栖动物群落结构空间分异影响最显著。河段尺度人类活动压力因子可解释底栖动物群落结构空间分异的35.3%, 其中, 显著环境因子pH、栖息地质量、总氮、高锰酸盐指数、硬度、电导率、总溶解颗粒物 and 氨氮分别解释了4%、3.6%、1.8%、1.7%、1.7%、0.9%、0.9%和0.9%的底栖动物群落结构空间分异。河岸缓冲区和流域尺度土地利用对大型底栖动物空间分异的贡献分别为10%和7%。最后, 采用相关分析比较了流域和河岸缓冲区尺度土地利用与水质、水文、栖息地质量以及底质的关系, 结果表明流域尺度土地利用能更好地表征河流水质、水文、栖息地质量以及底质状况, 也说明不同尺度环境因子对大型底栖动物群落结构的影响有联合效应。

关键词: 浑太河; 底栖动物; 环境因子; 不同尺度

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0094-13 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2015. 01. 013

Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin

LI Yan-li^{1,2}, LI Yan-fen^{3*}, XU Zong-xue²

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Chemical and Environment Engineering, Jiaozuo College, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In May-June 2012, macroinvertebrates were investigated at 66 sampling sites in the Huntai River basin in Northeast of China. A total of 72 macrobenthos species were collected, of which, 51 species (70.83%) were aquatic insects, 10 species (13.89%) were mollusks, 7 species (9.72%) were annelids, and 4 species (5.56%) were arthropods. First, 13 candidate metrics (EPT taxa, Dominant taxon%, Ephemeroptera%, Trichoptera%, mollusks%, Heptageniidae/Ephemeroptera; Hydropsychidae/Trichoptera, Oligochaeta%, intolerant taxon%, tolerant taxon%, Collector%, Clingers%, Shannon-wiener index.) which belonged to six types were chosen to represent macroinvertebrate community structure by correlation analysis. Then, relationships between anthropogenic and physiography pressures and macroinvertebrate community structure variables were measured using redundancy analysis. Then, this study compared the relative influences of anthropogenic and physiographic pressures on macroinvertebrate community structure and the relative influences of anthropogenic pressures at reach, riparian and catchment scales by pRDA. The results showed all environmental factors explained 72.23% of the variation of macroinvertebrate community structure. In addition, a large proportion of the explained variability in macroinvertebrate community structure was related to anthropogenic pressures (48.9%) and to physiographic variables (11.8%), anthropogenic pressures at reach scale influenced most significantly macroinvertebrate community structure which explained 35.3% of the variation of macroinvertebrate community structure. pH, habitat, TN, CODMn, hardness, conductivity, total dissolved particle and ammonia influenced respectively explained 4%, 3.6%, 1.8%, 1.7%, 1.7%, 0.9%, 0.9% and 0.9% of the variation of macroinvertebrate community structure. The land use at riparian and catchment scale

收稿日期: 2014-05-23; 修订日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401029); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B170015); 河南理工大学博士基金项目(72103/001/009)

作者简介: 李艳利(1979~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为生态水文, E-mail: liyanli@hpu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yy16036551@163.com

respectively explained 10% and 7% of the variation of macroinvertebrate community structure. Finally, the relationships of land use at catchment and riparian scales and water quality factors, hydrological indicators, habitat, substrate types were analyzed. This study supports the idea that human pressures effects on river macroinvertebrate communities are linked at spatial scales and must be considered jointly.

Key words: Huntai River; macroinvertebrate; environmental factors; different scales

水生生物群落结构在不同河流有较大差异. 不同空间尺度的各种生态过程会形成相应的群落结构, 某物种的出现是局地环境特征和大尺度地理因素综合影响的结果^[1], 可以根据环境变化有效预测各种生物指标的功能. 大型底栖动物生存在河流及湖泊的水底, 移动能力较差, 生活史较长, 优势类群主要包括寡毛类、软体动物和水生昆虫等^[2], 其丰度和群落结构与河道的物理化学条件紧密相关, 河道的物理条件如底质类型、河道形态、碎屑和水生植被的类型等对大型底栖动物有直接影响, 而河流初级生产力和营养物浓度的变化对其有间接影响. 而河道的物理化学条件、水质状况以及栖息地质量又被较大尺度环境因子影响, 如河岸带和流域土地利用^[3~6]. 有研究发现林地面积的减少、农业用地和城镇建设用地的增加与河道生境以及生物群落的退化相关^[7,8], 农业用地的增加时常会引起营养物浓度增加和沉积物淤积^[9].

一些研究发现较大尺度的因素例如地质、气候和景观水平因子(如土地利用和植被格局)对区域生境特征和底栖动物组成、特性有重要影响^[10~12]. 也有一些研究发现局部尺度特征例如生态水力学或生境质量影响着大型底栖无脊椎动物丰度、功能摄食类群等指标^[13,14].

尽管不同尺度环境因子均会影响水生生物群落结构, 但它们的贡献是不同的^[1]. Li 等^[15]采用偏CCA 研究发现大尺度环境因子(地质、气候和土地利用)可解释大型底栖动物空间变异的 17% ~ 22%, 而局部空间尺度环境因子(底质类型、水文和物理化学条件)可解释大型底栖动物空间变异的 15% ~ 18%. Johnson 等^[16]研究发现生境尺度的环境因子对大型底栖动物的影响更大. 生境指标解释了底栖动物类群组成变异的 23%, 解释了功能变异的 11%. 河岸缓冲区和流域尺度环境因子解释了大型底栖动物类群组成和功能变异的 24% 和 11%. Feld 等^[17]发现流域尺度景观特征和水文因子在流域、河段以及点位尺度分别解释了底栖动物群落空间变异的 11.4%、22.1% 和 15.8%. 张勇等^[18]以钱塘江中游流域为例, 分析了影响大型底栖动物变异的主要环境因子及有效尺度, 发现流域尺度较河

段尺度的环境因子更为重要.

本文以浑太河流域为研究区域, 通过比较分析不同尺度环境因子对底栖动物群落结构的影响, 解析不同空间尺度环境因子影响底栖动物群落结构的相对重要性, 以期为浑太河流域底栖动物保护提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

浑太河流域位于辽宁省境内, 面积为 $2.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 全河流经抚顺、沈阳、鞍山、营口、盘锦等地区(图 1). 其水系发源于长白山脉, 形成浑河和太子河两条河流. 其中, 浑河全长 415 km, 流域面积为 $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$. 太子河长 413 km, 流域面积 $1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$. 两条河流在三岔河附近交汇, 称为大辽河. 大辽河长 96 km, 在辽宁营口市汇入渤海. 太子河观音阁水库以上为上游地区, 多为山地森林多水区, 植被保护较好, 占全流域面积的 69%, 观音阁水库至葭窝水库段为中游地区, 低山丘陵为主, 占全流域面积的 6.1%, 葭窝水库以下为下游地区, 处于平原农作物少水区, 占全流域面积的 24.9%^[19]. 浑河流域大伙房水库以上为低山丘陵区, 林地较多, 植被保护较好, 覆盖率达到 50% 以上. 中下游为平原地区, 土地开发程度高, 水田和旱地较多. 浑河流域林

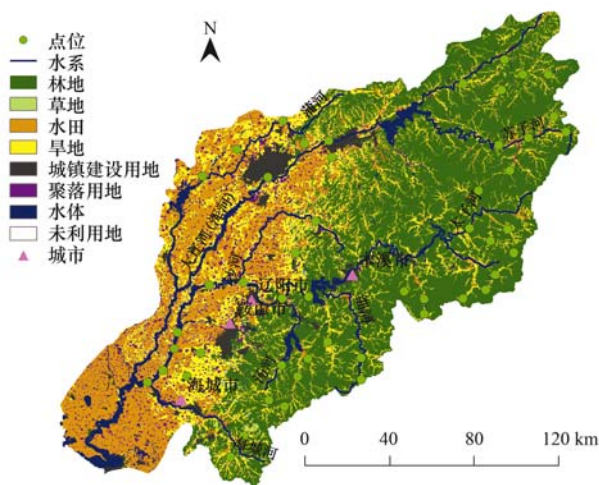


图 1 浑太河流域位置、水质采样点和土地利用类型

Fig. 1 Location of the Huntai River basin, sampling sites and land types

地、旱地、水田、城镇建设用地分别占流域面积的 46.26%、22.54%、10.84% 和 15.45%^[20]。浑河中下游流经东北平原,多年平均降雨量约为 718.3 mm,年平均径流量 $37.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 样点设置

2012 年 5~6 月,根据浑太河流域不同用地类型,在浑太河干、支流共选择了 68 个样点进行了底栖动物采集(见图 1)。其中,浑河及其支流共设置了 23 个(H1~H23);其中干流设置了 6 个样点(H18~H23),支流设置了 17 个(H1~H17)。太子河及其支流共设置了 43 个(T1~T43),其中干流设置了 10 个样点(T24~T30,T41~T43),支流设置了 33 个样点(T1~T23,T31~T40)。大辽河设置了 2 个样点(H24~H25)。由于浑河流域的小细河(H17)和浑河干流下游(H23)共 2 个点位未采集到大型底栖动物,因此,实际仅 66 个点位捕获到了大型底栖动物。

1.2.2 大型底栖动物采集及分类鉴定方法

在所选定样点的 100 m 范围之内,使用索伯网(surber,网口为 30 cm × 30 cm,网孔径为 500 μm)随机采集 2 个平行样本。水深较大的样点于近岸处取样。将网内所有采集物经过 60 目网筛转入 300 mL 塑料瓶中,并加入 90% 的酒精溶液保存。在实验室内采用人工挑拣的方法将底栖动物样品转入 100 mL 的塑料瓶中,同时加入 95% 的酒精溶液保存待检。在显微镜或解剖镜下分类、计数,利用解剖镜和显微镜对底栖动物进行分类鉴定,样品尽量鉴定到属或者种。

1.2.3 不同环境因子数据的获取

环境因子包括自然环境因子和人类活动压力两类(表 1)。自然环境因子包括流域尺度的海拔和流域面积,河段尺度的河宽、水深、流量、流速;微生境尺度的底质类型;人类活动压力包括流域和河岸

缓冲区的土地利用状况,河段尺度的水质参数以及栖息地质量。

本研究中的土地利用数据来源于“国家科学数据共享工程——地球系统科学共享网”2005 年数据,土地利用类型划分为林地、草地、水田、旱地、城镇建设用地、聚落用地、水体、未利用地 8 个一级类型(图 1)。在 ArcGIS 环境中,基于 DEM 和水系分布图,以各监测点为流域出口进行子流域的划分。将流域土地利用数据与子流域边界进行叠加分析,获得子流域尺度土地利用数据。在 ArcGIS 环境中,以 68 个采样点上游水系为中心进行各河岸缓冲区操作,宽度为 300m 的缓冲区。在此基础上,将获得的缓冲区边界与流域土地利用数据进行剪切操作获得距河岸 300 m 缓冲区的土地利用数据。2012 年 5~6 月分别对浑太河流域的水体理化参数、大型底栖动物及生境特征进行了调查。水温(T)、电导率(Cond)、溶解氧(DO)、总溶解颗粒物(TDS)、饱和度(DO%)及 pH 采用便携式水质分析仪(YSI-85)测定。水深(Depth)、流速(Velocity)使用流速仪(FP111)现场测定,河宽(Width)采用皮尺测量,流量(Flow)根据水深、流速以及河宽计算。不同底质含量采用底质分样筛网(孔径分别为 1、2、4、8 和 16 mm)测定。在各个采样点采集 2 个平行水样(各 2 L),置于低温保温箱中,于 48 h 内带回实验室,参照中华人民共和国国家标准——地面水环境质量标准(GB 3838-2002)测定以下水化学指标:总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐(NO_3^--N)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、悬浮物(SS)、高锰酸盐指数、硬度(Hardness)等。

对各采样点的栖息地质量进行了评价,选取了 10 个指标(底质类型比例、栖境复杂性、速度和深度、堤岸稳定性、渠道化程度、河水水量变化、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土壤利用类型)^[21],每项 20 分,总分 200 分。所有点位的

表 1 不同尺度环境因子

Table 1 Environmental variables in multiple scales

项目	尺度等级	环境因子
人类活动压力	流域尺度	林地面积比例(Forest, %); 水田面积比例(Paddy, %); 旱地面积比(Dryland, %); 城镇建设用地面积比例(Urban, %); 聚落用地面积比例(Rural, %);
	河岸缓冲区	林地面积比例(Forest, %); 水田面积比例(Paddy, %); 旱地面积比(Dryland, %); 城镇建设用地面积比例(Urban, %); 聚落用地面积比例(Rural, %)
	河段尺度	水温(T); pH; ρ (Hardness); ρ (高锰酸盐指数); ρ (COND); ρ (DO); ρ (SS); ρ (TDS); ρ (Cl^-); ρ (TN); ρ (NH_4^+-N); ρ (NO_3^--N); ρ (TP); ρ ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$); 栖息地质量(Habitat)
自然环境因子	流域尺度	海拔(Elevation); 流域面积(Catchment area)
	河段尺度	河宽(Width); 水深(Depth); 流速(Velocity); 流量(Flow)
	微生境尺度	卵石 + 砾石(cobble + boulder); 小卵石 + 碎石(pebble + gravel); 底质含沙量(sand)

栖息地评分均由同一人调查完成,以消除由于人为误差导致的评价结果不一致. 现场用 MAGELLAN 全球定位系统(eXplorist-200)测定海拔及经纬度.

1.2.4 数据处理与统计

本研究从群落丰富度、种类个体数量比例、生物耐受能力、营养级组成、反映小生境质量以及生物多样性 6 个方面共 28 个指标分析大型底栖动物群落结构特征(表 2)^[22]. 进一步分析前,首先排除仅有一类物种出现的点位,共有 51 个点位的数据用以支撑本研究分析. 首先,采用相关性分析,筛选出用于进一步分析的表征底栖动物群落结构特征的指标,共选择了 M4、M6、M8、M9、M11、M13、M14、M17、M20、M21、M22、M27、M28 共 13 个参数进入下一步分析. 其中,敏感类群和耐污类群是根据大型底栖动物的耐污值确定,耐污值通常以 0~10 表示,耐污值小于等于 3,为敏感类群;在 3~7 之间,为中间类群;大于 7,为耐污类群. 借鉴以往研究^[23,24],确定此次生态调查不同物种的耐污值.

表 2 浑太河底栖动物群落结构指标

Table 2 Macroinvertebrate community structure factors in Huntai River basin

属性归类	候选参数	缩写
群落丰富度	总分类单元数	M1
	蜉蝣目分类单元数	M2
	毛翅目分类单元数	M3
	EPT 分类单元数	M4
	甲壳动物 + 软体动物分类单元数	M5
	优势分类单元个体相对丰度	M6
	前三位优势分类单元个体相对丰度	M7
	蜉蝣目相对丰度	M8
	毛翅目相对丰度	M9
	双翅目相对丰度	M10
反映种类个体数量比例	软体动物相对丰度	M11
	甲壳动物 + 软体动物相对丰度	M12
	扁蜉科/蜉蝣目相对丰度	M13
	纹石蛾科/毛翅目相对丰度	M14
	四节蜉科相对丰度	M15
	摇蚊科/双翅目相对丰度	M16
	寡毛类动物相对丰度	M17
	敏感类群分类单元数	M18
	耐污类群分类单元数	M19
	敏感类群相对丰度	M20
反映生物耐受能力	耐污类群相对丰度	M21
	收集者(GC)相对丰度	M22
	滤食者(FC)相对丰度	M23
	捕食者(PR)相对丰度	M24
反映营养级组成	撕食者(SH)相对丰度	M25
	刮食者(SC)相对丰度	M26
反映小生境质量	黏附者相对丰度	M27
反映多样性	香农-威纳多样性指数	M28

对各样点表征大型底栖动物群落结构的指标进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)后发现,底栖动物数据的梯度值为 2.093,小于 3,故选择冗余分析(RDA)^[25]. 将物种数据矩阵的总变异分解成不同部分:①将不同尺度的环境因子相结合,利用向前引入法以环境因子及物种数据为基础 RDA 分析,筛选出关键环境因子;②排除自然环境因子,采用偏 RDA 分析,分别计算流域尺度、河岸缓冲区尺度、河段尺度和微生境尺度反映人类活动压力的环境因子对底栖动物群落结构空间分异影响. RDA 和偏 RDA 分析采用 CANOCO 4.5 进行.

2 结果与讨论

2.1 底栖动物群落结构特征

2012 年浑太河流域采集鉴定的大型底栖动物共 72(属)种,隶属于 7 纲 13 目 36 科. 其中水生昆虫 51 种,占 70.83%,环节动物 7 种,占 9.72%;节肢动物 4 种,占 5.56%;软体动物 10 种,占 13.89%. 其中水生昆虫主要由 EPT 类(E:蜉蝣目;P:襁翅目;T:毛翅目)和双翅目的摇蚊幼虫组成. 属于 EPT 类的主要水生昆虫共 19(属)种,最为常见种为韦氏四节蜉 3 种(*Baetis vaillanti*、*Acentrella* sp.、*Heterocleon amplum*)、锯形蜉属 2 种(*Serratella* sp.、*Ephemerella septentrionalis*)、细裳蜉属 1 种(*Leptophlebia* sp.)、动蜉属 1 种(*Cinygma* sp.)、黑翅蜉 1 种(*Ephemerella nigroptera*)、生米蜉 1 种(*Ephemerella shengmi*)、细蜉科 1 种(*Brachycercus* sp.)、网襁科 1 种(*Osobenus* sp.)、大襁科 1 种(*Pteronarcella* sp.)、纹石蛾科 2 种(*Hydropsyche* sp.、*Cheumatopsyche* sp.)、原石蛾科 1 种(*Brunnea larva*)、等翅石蛾科 1 种(*Dolophilodes*)、长角石蛾科 1 种(*Oecetis* sp.)、多距石蛾科 2 种(*Polycentropus* sp.、*Neuroclipsis* sp.)、稻田蛆 2 种(*Tipula*、*Dicranota* sp.)、虻科 1 种(*Tabanus* sp.)、摇蚊幼虫共 19(属)种. 常见的软体动物包括卵萝卜螺(*Radix ovata*)、膀胱螺(*Physa acuta*)、中国圆田螺(*Cipangopaludina chinensis*),主要的环节动物包括霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、克拉伯水丝蚓(*L. clapedianus*).

EPT 种类数较多的点位分布在兰河(T9)、小汤河上游(T12、T13)、小汤河支流源头(T14)、太子河南支支流(T18)、太子河北支(T19、T20、T23),EPT 种类多为 4 或 5 种(图 2). 浑河流域上游苏子

河支流(H1)、红河源头(H6)、洪河支流(H9、H10),EPT种类为3种(图2),且EPT主要为韦氏四节蜉、扁蜉科、蜉蝣科、细蜉科、纹石蛾科、网襁科、长角石蛾科的物种。就全流域看,太子河干流的中下游区域、海城河以及浑河干流、蒲河等EPT种类数较少,多为0或1种(图2)。

全流域来看,太子河流域蜉蝣目物种相对密度高于浑太河流域,太子河主要支流细河、小汤河、兰河、细河、太子河南支和北支中上游蜉蝣目相对丰度最高。毛翅目相对丰度较蜉蝣目低,太子河流域细河、小汤河、太子河南支中上游、浑河流域支流洪河的毛翅目相对丰度较高。这可能是因为太子河主要支流细河、小汤河、太子河南支等采样点位于海拔较高的山区,且林地比例极高,河流栖境复杂性相对较高,这些区域常见慢-深、慢-浅、快-深、快-浅等多种水文特征,并伴随有倒木、枯枝落叶、巨石等小栖境。

软体动物相对丰度高的点位集中在浑河干流中下游以及流经鞍山、海城的太子河支流杨柳河和甘巴河。寡毛类动物相对丰度较低,仅有11个点位捕获到寡毛类动物(H3, H13, H15, H18, T2, T9, T17, T18, T22, T33, T36),其中T36(杨柳河)寡毛类的相对丰度为70.18%,H18(浑河干流中游)为17.58%,其余点位寡毛类相对丰度均低于6%。这可能与寡毛类和软体动物喜生存于淤泥和泥沙类底质中相关。太子河支流杨柳河和甘巴河为城市河流,分别位于海城、鞍山和沈阳市内,河道中没有石块,多是泥土,生境异质性不高。采样点T25~T30、T36、T39、H14、H15、H16底质含沙量比例为100%,采样点T33、T35底质中小卵石和碎石的比均高于70%。H18采样点所在河道位于沈阳市区,河道上有一大桥,是交通要道,水体发黑,有腥臭味。

多样性指数较高的点位主要分布在太子河支流下达河(T2)、二道河支流(T7)、兰河(T9)、小汤河源头(T13)、太子河南支(T15、T16、T17、T18),这些点位主要浑河支流蒲河(H15)、新开河(H13)和浑河干流(H18)。

敏感类群比例高的点位主要集中在太子河流域,包括太子河支流岔沟河源头T4(23.89%)、二道河支流T7(19.66%)、太子河南支T17(47.69%)、太子河北支T22(32.71%)、T23(34.22%)、太子河干流下游T28(100%),T29(50%),T30(66.66%),T33(23.56%)、北沙河(T39 100%)。T28~T30、T33、T36、T39采样点均

位于海拔较低的平原区,且农田和城镇用地面积较高,其敏感类群比例较高的原因可能是这些点位捕获的底栖动物种类较少,且生物量也较低。其中,T28点位仅捕获了分属长臂虾科1种(*E. modestus*)和匙指虾科1种(*Neocaridina denticulata sinensis*),其耐污值为3,属于敏感种。T29点位捕获了锯形蜉属1种和椎实螺科1种(*Radix ovata*),其耐污值分别为2.7和8。T30点位捕获了网襁科1种(*Osobenus* sp.)、摇蚊亚科1种(*Microspectra* sp.)和匙指虾科1种(*Neocaridina denticulata sinensis*),其耐污值分别为2、9.8和3。T39点位捕获了网襁科1种(*Osobenus* sp.)和匙指虾科1种(*Neocaridina denticulata sinensis*),其耐污值分别为2和3。

耐污类群比例高的点位主要集中在太子河支流下达河下游T1(75.08%)、下达河上游T2(69.19%)、接文河T3(88.39%)、岔沟河源头T4(76.11%)、二道河源头T5(82.72%)、太子河南支下游T16(56.86%)、太子河干流下游T27(66.67%)、太子河干流下游T29(50%)、五道里河T32(100%)、杨柳河T36(70.18%)。T1~T5、T16采样点位于太子河海拔较高的山区,林地为主导用地类型,耐污类群比例较高的原因是这些点位捕获到的摇蚊科物种的生物量较高。

2.2 水环境特征分析

表3是对51个采样点的水体理化指标浓度、水文指标、底质类型比例的平均值、方差和变异系数进行常规统计分析的结果。pH和水温相对其他水环境质量指标空间变异较小,变异系数分别为7.08%和17.76%。悬浮物、氨氮、硝酸盐、总氮、磷酸盐、总磷、河宽、水深、流速、流量、底质含沙量以及卵石和砾石的空间变异较大,均大于100%,变异系数分别为352.15%、167.86%、111.63%、110.28%、243.39%、162.15%、152.64%、145.96%、125.54%、225.67%、151.12%和95.13%。其中,硝酸盐、总氮浓度较高的点位主要集中在浑河支流蒲河(H15、H14)理石河(H12)、太子河侵窝水库下游(T24~T43)。磷酸盐和总磷浓度高的点位包括浑河支流蒲河(H15、H16、H14),太子河干流下游(T27、T28、T29、T30),太子河支流甘巴河(T33),杨柳河(T36),北沙河(T39)。采样点T25~T30、T36、T39、H14、H15、H16底质含沙量比例为100%,采样点T33、T35底质中小卵石和碎石的比均高于70%。现场调查中发现采样点H14位于沈阳的沈北新区,主要是景观用

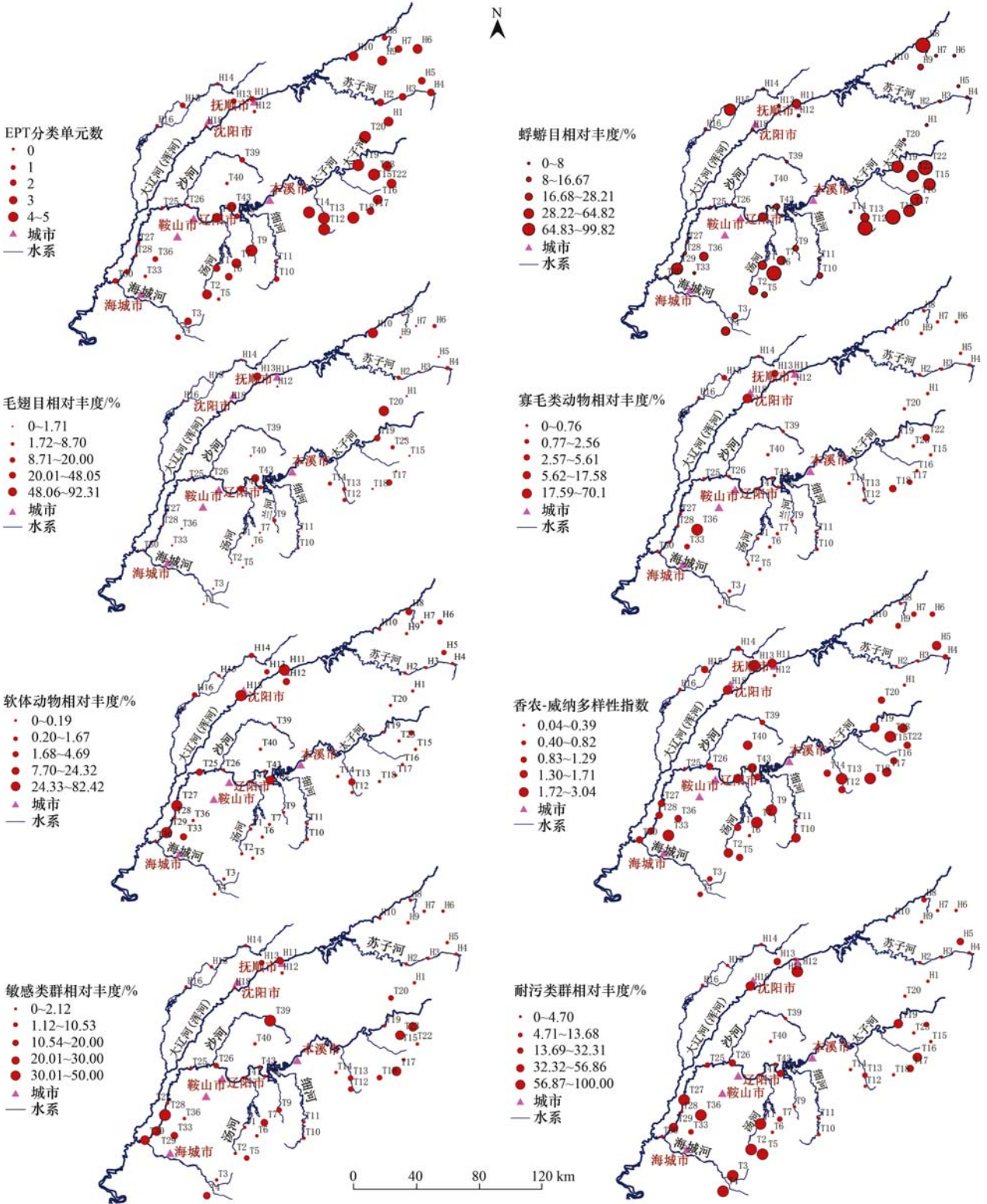


图 2 浑太河流域底栖动物群落结构指标空间分布

Fig. 2 Distribution of macroinvertebrate community structure factors in the Huntai River basin

水,水体中漂浮有绿色的浮萍等,河流两侧机动车流量较大,水体底质为黑色的底泥. 采样点 H15 属于城市河道生境,河道两侧车流量大,水体浑浊. 太子河干流下游采样点 T27、T28、T29、T30 均位于农业

和城镇区,河岸两侧均为农田,且左右岸堤疏松. 采样点 T33、T36 和 T39 均为城市河流,分别位于海城、鞍山和沈阳市内,河道中没有石块,多是泥土,生境异质性不高.

表 3 不同水环境质量因子的描述性统计分析¹⁾
Table 3 Statistical values of water quality factors

环境指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
T/℃	7.3	24.7	19.09	3.39	17.76
pH	7.22	9.87	8.61	0.61	7.08
COND/mg·L ⁻¹	58.30	1 260.00	360.19	241.55	67.06
TDS/mg·L ⁻¹	52.65	845.00	257.07	164.12	62.68
SS/mg·L ⁻¹	0.00	0.95	0.04	0.14	352.15
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	0.02	0.21	0.05	0.04	77.22
NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	0.01	5.31	0.68	1.13	167.86
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.09	6.82	1.75	1.95	111.63
TN/mg·L ⁻¹	0.31	13.80	2.75	3.03	110.28
PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	0.003	1.43	0.10	0.24	243.39
TP/mg·L ⁻¹	0.01	1.44	0.16	0.26	162.15
Hardness/mg·L ⁻¹	261.00	2 083.00	907.80	394.28	43.43
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	0.36	7.36	1.87	1.33	71.11
Width/m	2.50	361.60	51.00	77.84	152.64
Depth/m	2.00	500.00	61.58	89.88	145.96
Velocity/m·s ⁻¹	0.10	5.50	0.61	0.76	125.54
Flow/m ³ ·s ⁻¹	0.26	215.04	18.10	40.86	225.67
Sand/%	0	1	0.28	0.42	151.12
cobble + boulder	0	0.87	0.30	0.28	95.13
pebble + gravel	0	0.99	0.42	0.31	74.60

1) 黑体字表示变异系数超过 100% 的指标

2.3 底栖动物群落结构与环境因子之间的关系

2.3.1 影响底栖动物群落结构显著的关键环境因子

所有环境因子与底栖动物群落结构指标进行 RDA 分析,前两轴特征值分别为 0.179 和 0.091. 物种与环境因子排序轴的相关系数达到 0.853 和 0.664,环境-物种关系的累积比率为 79.4%. 说明排序图可较好地反映环境因子和底栖动物群落结构指标之间的关系(见表 4). 通过对所有环境因子的全模型 RDA 分析表明,环境因子可解释底栖动物群落结构空间变异的 72.23%. 研究结果表明纳入分析的环境因子能够解释大部分的底栖动物群落结构空间分异状况. 在进行 RDA 分析时,还检测了各环

境因子的独立效应,每个因子的重要性和显著性采用 Monte-Carlo 假设检验,以 $P < 0.05$ 作为显著性标准排除贡献较小的因子. 卵石和砾石比例、底质含沙量比例、海拔、流量、流域林地面积比例、流域聚落用地比例、流域旱地比例、流域水田面积比例、流域城镇建设用地面积比例、电导率、栖息地质量、总溶解颗粒物、硬度、水深、高锰酸盐指数、河宽、河岸缓冲区建设用地面积比例、河岸缓冲区林地面积比例、河岸缓冲区聚落用地面积比例、总氮、氨氮、pH 共 22 个变量为影响底栖动物群落结构的主要环境因子,上述 22 个环境因子可解释底栖动物群落结构空间分异的 48.2%.

表 4 基于 RDA 的多尺度环境因子对底栖动物群落结构空间变异的解释结果

Table 4 Percentage variance in macroinvertebrate accounted for all environmental factors at multiple spatial scales by RDA

变异指标	AX1	AX2	AX3	AX4	总解释变异/%
排序轴特征值	0.179	0.091	0.073	0.040	48.2
生物与环境相关性	0.853	0.664	0.687	0.589	
生物数据累积变化百分率/%	17.9	27.0	34.3	38.3	
生物与环境相关关系累积/%	37.2	56.0	71.1	79.4	

2.3.2 自然环境因子与人类活动压力因子对底栖动物群落结构影响

虽然上述 RDA 分析结果能识别影响底栖动物群落结构的主要环境因子,但难以从整体上区分反

映人类压力因子与自然环境因子对底栖动物群落结构空间变异贡献的大小. 本研究采用偏 RDA 方法辨析人类活动压力因子与自然因子对底栖动物群落结构变异的解释能力. 以自然因子为协变量,对人

类活动压力因子对底栖动物群落结构的影响进行 RDA 分析表明,人类活动压力因子与底栖动物群落结构因子的第一、第二排序轴相关系数分别达到 0.743 和 0.560,生物与环境相关关系累积比率为

79.8%。纳入分析的人类活动压力因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 48.9%,通过显著性检验的人类活动压力因子解释了底栖动物群落结构的 25.9% (见表 5)。

表 5 基于偏 RDA 的人类活动压力因子对底栖动物群落结构空间变异的解释结果
Table 5 Percentage variance in macroinvertebrate accounted for anthropogenic variables by pRDA

变异指标	AX1	AX2	AX3	AX4	总解释变异/%
排序轴特征值	0.084	0.057	0.036	0.030	25.9
生物与环境相关性	0.743	0.560	0.612	0.559	
生物数据累积变化百分率/%	11.2	18.8	23.7	27.6	
生物与环境相关关系累积/%	32.3	54.3	68.4	79.8	

以人类活动压力因子为协变量,自然环境因子与底栖动物群落结构因子的第一、第二排序轴的相关系数分别为 0.642 和 0.580,生物与环境相关关系累积比率为 94.4%。纳入分析的自然环境因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 11.8%,通过显著性检验的自然环境因子解释了

底栖动物群落结构空间变异的 9.3%。人类活动压力因子的影响明显大于自然因子。通过显著性检验的人类活动压力因子与自然环境因子共同解释了底栖动物群落结构空间变异的 48.2% (见表 6),说明人类活动压力因子与自然环境因子对底栖动物群落结构的影响存在协变现象。

表 6 基于偏 RDA 的自然环境因子对底栖动物群落结构空间变异的解释结果
Table 6 Percentage variance in macroinvertebrate accounted for physiography variables by pRDA

变异指标	AX1	AX2	AX3	AX4	总解释变异/%
排序轴特征值	0.040	0.025	0.017	0.006	9.3
生物与环境相关性	0.642	0.580	0.646	0.414	
生物数据累积变化百分率/%	10.3	16.6	21.1	22.7	
生物与环境相关关系累积/%	42.7	69.1	87.8	94.4	

2.3.3 不同尺度人类活动压力因子对底栖动物群落结构的影响

通过偏 RDA 分析发现,河段尺度、河岸缓冲区尺度和流域尺度第一排序轴可分别解释底栖动物群落结构的 42.3%、48.8% 和 41.1%。第二排序轴可分别解释底栖动物群落结构的 24.8%、27.6% 和 36.9%。河段尺度,与第一排序轴相关系数最高的环境因子分别是 pH 和栖息地质量(相关系数分别为 -0.366 0 和 -0.454 2),与第二排序轴相关系数最高的环境因子是 pH 和总氮(相关系数分别为 -0.307 4 和 -0.230 6)。河岸缓冲区,与第一排序轴相关系数最高的环境因子分别是城镇建设用地面积比例和林地面积比例(相关系数分别为 0.320 3 和 -0.169 8),与第二排序轴相关系数最高的环境因子分别是水田和旱地(相关系数分别为 0.301 1 和 0.220 3)。流域尺度,与第一排序轴相关系数最高的环境因子是城镇建设用地面积比例(相关系数分别为 0.471 6),与第二排序轴相关系数最高的环境因子是旱地、林地和聚落用地面积比例(相关系数

分别为 0.460 4、-0.438 4 和 0.360 8)。

河段尺度,与 pH 相关关系最强的底栖动物指标是 M4(EPT 分类单元数),与栖息地质量相关关系最强的是 M8(蜉蝣目相对丰度)和 M27(黏附者相对丰度),与氨氮相关关系最强的是 M20(敏感类群相对丰度)。与电导率、总溶解颗粒物相关关系最强的是 M21(耐污类群相对丰度)。总氮相关关系最强的是 M9(毛翅目相对丰度)和 M14(纹石蛾科/毛翅目相对丰度)(图 3)。

河岸缓冲区,聚落用地和林地面积比例与 M22(收集者相对丰度)、M27(黏附者相对丰度)、M4(EPT 分类单元数)、M20(敏感类群相对丰度)和 M9(毛翅目相对丰度)相关性较强。城镇建设用地面积比例与 M11(软体动物相对丰度)、M21(耐污类群相对丰度)相关性较强。旱地面积比例与 M20(敏感类群相对丰度)和 M28(香农-威纳多样性指数)相关性较强(图 4)。

流域尺度,林地、旱地和聚落用地面积比例与 M4(EPT 分类单元数)、M8(蜉蝣目相对丰度)、M6

(优势分类单元个体相对丰度)和 M14(纹石蛾科/毛翅目相对丰度)相关性较强. 城镇建设用地面积比例与 M11(软体动物相对丰度)、M17(寡毛类动物相对丰度)和 M6(优势分类单元个体相对丰度)相关性较强(图 5).

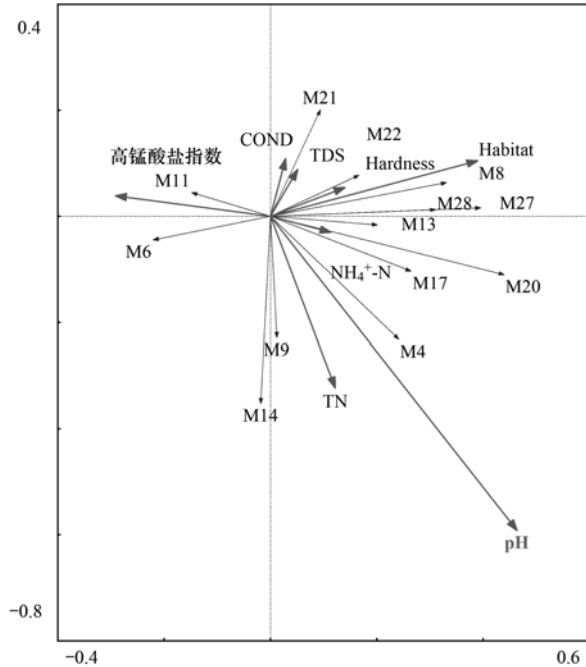


图 3 河段尺度环境因子与底栖动物群落结构的偏 RDA 分析图
Fig. 3 The pRDA biplot of anthropogenic variables and macroinvertebrate species community structure in reach scale

2.3.4 不同尺度人类活动压力因子的相对重要性

底栖动物受到不同空间尺度人类活动压力因子的影响,尽管大、中尺度(如土地利用)、中、小尺度(河段尺度的水体理化参数)环境因子影响着河流底栖动物群落结构,但不同尺度环境因子对底栖动物群落结构的影响大小是不同的.

本研究以自然环境因子为协变量,采用偏 RDA 方法辨析不同尺度人类活动压力因子对底栖动物群落结构的解释能力. 结果发现,河岸缓冲区尺度,土地利用可解释底栖动物群落结构空间分异的 10%,其中林地、水田、旱地、城镇建设用地和聚落用地分别可解释 2%、3%、2%、2% 和 1% 的底栖动物群落结构空间分异状况(表 7). 河段尺度,水质因子、栖息地质量可解释底栖动物群落结构空间分异的 35.3%,其中,显著环境因子 pH、栖息地质量、总氮、高锰酸盐指数、硬度、电导率、总溶解颗粒物和氨氮分别解释了 4%、3.6%、1.8%、1.7%、1.7%、0.9%、0.9% 和 0.9% 的底栖动物群落结构空间分异(表 7). 流域尺度,土地利用解释了 7% 底

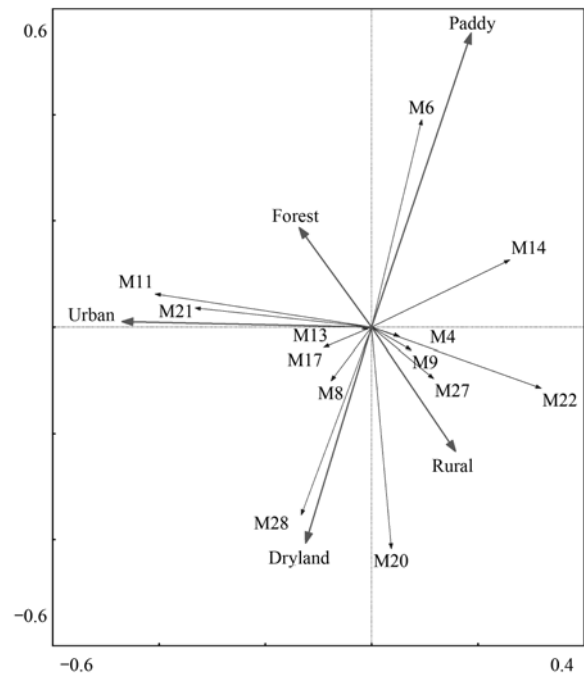


图 4 河岸缓冲区尺度环境因子与底栖动物群落结构的偏 RDA 分析图

Fig. 4 The pRDA biplot of anthropogenic variables and macroinvertebrate species community structure in riparian scale

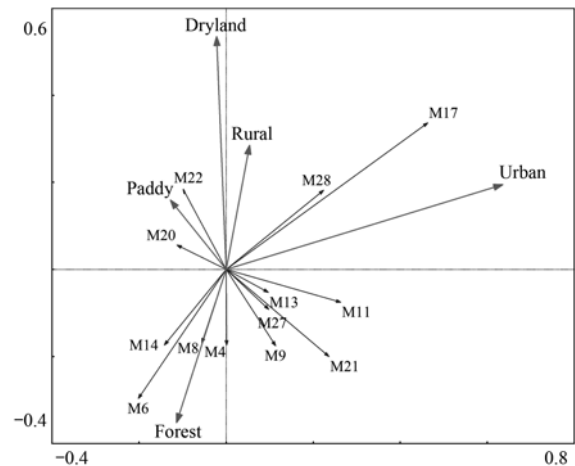


图 5 流域尺度环境因子与底栖动物群落结构的偏 RDA 分析图

Fig. 5 The pRDA biplot of anthropogenic variables and macroinvertebrate species community structure in catchment scale

栖动物群落结构空间分异状况,其中林地、水田、旱地、城镇建设用地和聚落用地对底栖动物的解释能力分别为 2.3%、0.7%、2.2%、2.4% 和 1.7% (表 7). 综上,河段尺度环境因子对底栖动物群落结构空间分异影响最显著.

2.3.5 河段尺度环境因子与土地利用相关关系

流域尺度和河岸缓冲区尺度林地与栖息地质

表 7 不同环境变量对底栖动物群落结构空间分异解释能力的分解与比较

Table 7 Comparison and decomposition of percentage variance in macroinvertebrates accounting different environmental factors			
尺度等级	显著变量(显著性 <i>P</i>)	变异解释(总变异)	占总变异比例/%
河岸缓冲区	聚落用地面积比例(0.018)	0.02(1)	2.0
	林地面积比例(0.001)	0.02(1)	2.0
	城镇建设用地面积比例(0.027)	0.01(1)	1.0
河段尺度	电导率(0.002)	0.009(1)	0.9
	栖息地质量(0.001)	0.036(1)	3.6
	氨氮(0.034)	0.009(1)	0.9
	高锰酸盐指数(0.016)	0.017(1)	1.7
	硬度(0.007)	0.017(1)	1.7
	总氮(0.024)	0.018(1)	1.8
	总溶解颗粒物(0.001)	0.009(1)	0.9
	pH(0.001)	0.040(1)	4.0
	林地面积比例(0.001)	0.023(1)	2.3
流域尺度	城镇建设用地面积比例(0.003)	0.024(1)	2.4
	旱地比例(0.001)	0.022(1)	2.2
	水田比例(0.004)	0.007(1)	0.7
	聚落用地比例(0.001)	0.017(1)	1.7

量、电导率、总溶解颗粒物、氨氮、总氮、硬度、高锰酸盐指数、河宽、水深、流量、底质含沙量比例以及卵石和砾石比例均显著相关,其中,除了栖息地质量、卵石和砾石比例及硬度、流域尺度,林地与河段尺度环境因子的相关性更强。城镇建设用地比例、聚落用地、旱地和水田均是在流域尺度与河段尺度环境因子相关性更强。其中,流域尺度聚落用

地与水质变量、水文变量、底质含沙量均呈极显著正相关,与栖息地质量和底质中卵石和砾石比例呈极显著负相关。旱地与水质变量、水深、底质含沙量比例呈极显著正相关,与栖息地质量和底质中卵石和砾石比例呈极显著负相关。城镇建设用地与水质变量呈显著正相关,与栖息地质量、卵石和砾石比例呈显著负相关(表 8)。

表 8 河段尺度环境因子与土地利用的关系¹⁾

Table 8 Relationships between reach-scale environmental factors and land use stressors										
河段尺度 环境因子	河岸缓冲区土地利用					流域尺度土地利用				
	Forest	Paddy	Dryland	Urban	Rural	Forest	Paddy	Dryland	Urban	Rural
pH	0.097	-0.032	0.016	-0.174	0.016	0.129	0.058	-0.199	-0.148	-0.150
Habitat	0.616**	-0.223	-0.175	-0.393**	-0.410**	0.587**	-0.260	-0.629**	-0.325*	-0.555**
COND	-0.612**	0.092	0.401**	0.278*	0.389**	-0.656**	0.182	0.785**	0.382**	0.635**
TDS	-0.624**	0.072	0.430**	0.194	0.416**	-0.659**	0.192	0.779**	0.369**	0.644**
Width	-0.475**	0.388**	-0.168	0.307*	0.184	-0.478**	0.397**	0.193	0.559**	0.446**
Depth	-0.537**	0.375**	-0.026	0.021	0.468**	-0.698**	0.792**	0.386**	0.126	0.709**
flow	-0.554**	0.206	-0.212	-0.062	0.528**	-0.624**	0.798**	0.227	0.148	0.706**
NH ₄ ⁺	-0.456**	0.173	0.091	0.222	0.356*	-0.584**	0.317*	0.572**	0.299*	0.620**
TN	-0.566**	0.140	0.006	0.101	0.535**	-0.654**	0.454**	0.525**	0.283*	0.728**
Hardness	-0.660**	0.058	0.429**	0.274	0.435**	-0.611**	0.173	0.729**	0.330*	0.589**
高锰酸盐指数	-0.427**	0.360**	0.274	0.265	0.256	-0.507**	0.147	0.640**	0.353*	0.456**
Sand	-0.643**	0.296*	0.014	0.190	0.562**	-0.767**	0.627**	0.631**	0.226	0.811**
cobble + boulder	0.751**	-0.280*	-0.242	-0.326*	-0.547**	0.737**	-0.434**	-0.682**	-0.403**	-0.703**

1) 黑体字表示相关性达到显著水平

3 讨论

3.1 不同属性环境因子与底栖动物群落结构的关系

本研究从 5 类 13 个指标表征大型底栖动物群落结构特征,分析了不同属性的环境因子对底栖动

物群落结构空间分异的影响。纳入分析的环境因子可解释底栖动物群落结构空间变异的 72.23%。通过显著性检验的环境因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 48.2%。将环境因子划分为两种类型,包括人类活动压力因子与自然环境因子,其中人类

活动压力因子由水质指标、土地利用指标构成,自然环境因子包括海拔、流域面积、水文指标、底质类型构成.采用偏 RDA 方法辨析人类活动压力因子与自然因子对底栖动物群落结构变异的解释能力.纳入分析的人类活动压力因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 48.9%,通过显著性检验的人类活动压力因子解释了底栖动物群落结构的 25.9%.纳入分析的自然环境因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 11.8%,通过显著性检验的自然环境因子解释了底栖动物群落结构空间变异的 9.3%.人类活动压力因子的影响明显大于自然因子. RDA 全模型分析表明人类活动压力因子与自然环境因子共同解释了底栖动物群落结构空间变异的 48.2%,偏 RDA 分析结果自然因子和人类活动压力因子对底栖动物群落结构的解释能力之和为 35.2%.充分说明人类活动压力因子与自然环境因子对底栖动物群落结构的影响存在协变现象.

3.2 不同尺度环境因子对底栖动物群落结构的影响

河段尺度环境因子对底栖动物群落结构空间分异影响最显著.其中,pH、栖息地质量对底栖动物群落结构的影响最为显著.其中,栖息地质量与蜉蝣目相对丰度、黏附者相对丰度呈正相关.黏附者属底栖动物的一种生活型,对环境比较敏感,多生活于栖境复杂的环境中.此次调查中,韦氏四节蜉、锯形蜉属、细裳蜉属、动蜉属、黑翅蜉和生米蜉的物种均有发现,且这些物种主要分布在太子河茆窝水库上游和太子河主要支流的源头以及浑河大伙房水库上游.另有研究表明,河流底质类型影响着大型底栖动物的群落分布^[26~28],本研究发现卵石和砾石、沙子底质对底栖动物空间分布起到了重要的影响作用.水生昆虫幼虫(蜉蝣目、毛翅目和襁翅目)主要分布在多石的底质类型及河流流速较快的点位,寡毛类及软体动物则多出现在淤泥和泥沙类底质中.这些底质类型的点位的主要特征是电导率高(高于 $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),河水较深.说明电导率可显著影响上述类群的空间分布^[29].如采样点 T25 ~ T30、T36、T39、H14、H15、H16 底质含沙量比例为 100%,采样点 T33、T35 底质中小卵石和碎石的比均高于 70%,这些点位寡毛类和软体动物相对丰度较高,软体动物相对丰度最高达 82.42%,寡毛类动物相对丰度最高达 70.18%.卵石和砾石底质由于其大量的空隙,成为底栖动物抗干扰的缓冲场所,因此其对底栖动物空间分布有重要影响.氮作为河流水环境质量的指标,其浓度影响着底栖动物空

间分布,总氮和氨氮在河流中作为重要的营养盐指标显著影响着大型底栖动物的物种组成及分布,这之前研究结论一致^[19].高锰酸盐指数是评定水质污染程度的重要综合指标之一,高锰酸盐指数的数值越大,水体污染越严重.许多研究表明,高锰酸盐指数是影响鱼类和大型底栖动物等水生生物空间分布的主要因子^[2,30],这与本研究的结论一致.

较大尺度(河岸缓冲区和流域)土地利用变化梯度对大型底栖动物群落空间分布有重要影响.例如,霍甫水丝蚓、克拉伯水丝蚓随林地比例减少、农田和城镇建设用地比例的增加密度增加.梯形多足摇蚊属(*Polypedilum scalaenum*)、等叶裸须摇蚊(*Procladius paradouxus*)、裸须摇蚊属 A 种(*Procladius* sp. A)随农田和城镇建设用地比例的增加密度也出现增加.海拔较高(>200 m)的区域,底栖动物群落空间分异主要受林地影响,上述点位河岸缓冲区林地比例均高于 45%,最高达 100%,且所在流域林地比例均高于 75%,林地对河流大型底栖动物 EPT 种类有显著影响.浑太河中下游旱地和城镇建设用地比例增加,城镇建设用地面积比例与软体动物相对丰度和寡毛类动物相对丰度呈正相关.可能因建设用地比例较高的点位,底质类型主要为泥沙,适宜寡毛类动物和软体动物存活.

3.3 不同尺度环境因子的联合效应分析

本研究发现,水质、水文、栖息地质量以及底质变量与土地利用有较强的相关性,表明土地利用变化可以指示河段尺度水环境质量以及微生物底质粗糙度的变化.河岸缓冲区尺度和流域尺度土地利用与河段尺度因子的相关性不尽相同,流域尺度土地利用与水质、底质、栖息地质量以及水文变量的相关性更强.该结论与之前一些研究结论一致^[31].该结论表明流域尺度土地利用可更好表征河流水环境质量以及底质粗糙度.

流域尺度和河岸缓冲区尺度,林地面积比例与营养物浓度(总氮、氨氮)、有机物浓度(高锰酸盐指数)、电导率、总溶解颗粒物、硬度、河宽、水深、流量和底质含沙量比例有较强的负相关,与栖息地质量、(卵石+砾石)比例有较强的正相关.农田、城镇建设用地和聚落用地与河段尺度环境因子的相关性则相反.土地利用与河段尺度因子有显著相关性,说明土地利用可能通过影响栖息地质量、营养物浓度、底质类型而对大型底栖动物产生影响,这也说明不同尺度环境因子对大型底栖动物群落结构的影响分析有联合效应.

小型的活动力差的生物如大型底栖动物对小尺度的人类活动压力指标反映更敏感,而大型的活动力强的生物如鱼类对大尺度的人类活动压力反映更敏感^[31]。可能是因为研究中大型底栖动物分类较粗糙。本研究表明土地利用可以反映水环境质量,大型底栖动物群落结构对水环境质量的反映较敏感。

4 结论

(1)浑太河流域大型底栖动物群落结构受到自然环境因子和人类活动的综合影响。反映人类活动的环境因子包括河段尺度的水质指标电导率、总溶解颗粒物、硬度、高锰酸盐指数、总氮、氨氮、pH、栖息地质量;流域尺度的林地、聚落用地、旱地、水田、城镇建设用地;河岸缓冲区的聚落用地、建设用地、林地。自然环境因子包括流域尺度的海拔、微生境尺度的卵石+砾石比例、底质含沙量比例,河段尺度的水深、河宽、流量。

(2)以自然环境因子为协变量,采用 pRDA 分析表明,河段尺度人类活动压力因子对底栖动物群落结构空间分异影响最显著。河段尺度,水质因子、栖息地质量可解释底栖动物群落结构空间分异的 35.3%,其中,显著环境因子 pH、栖息地质量、总氮、高锰酸盐指数、硬度、电导率、总溶解颗粒物和氨氮分别解释了 4%、3.6%、1.8%、1.7%、1.7%、0.9%、0.9% 和 0.9% 的底栖动物群落结构空间分异。河岸缓冲区和流域尺度土地利用可分别解释 10% 和 7% 的底栖动物空间分异。

(3)水质、水文、栖息地质量以及底质变量与不同尺度土地利用有较强的相关性。其中,流域尺度土地利用与水质、底质、栖息地质量以及水文变量的相关性更强。说明不同尺度环境因子对大型底栖动物群落结构的影响有联合效应。

参考文献:

- [1] Townsend C R, Doledec S, Norris R, *et al.* The influence of scale and geography on relationships between stream community composition and landscape variables: description and prediction [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(5): 768-785.
- [2] 高欣,牛翠娟,胡忠军. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(12): 3329-3336.
- [3] Frissell C A, Liss W J, Warren C E, *et al.* A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context [J]. *Environmental Management*, 1986, **10**(2): 199-214.
- [4] Poff N L. Landscape filters and species traits: Towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, **16**(2): 391-409.
- [5] Bedoya D, Manolagos E S, Novotny V. Characterization of biological responses under different environmental conditions: a hierarchical modeling approach [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(3): 532-545.
- [6] Angermeier P L, Winston M R. Local vs. regional influences on local diversity in stream fish communities of Virginia [J]. *Ecology*, 1998, **79**(3): 911-927.
- [7] Buck O, Niyogi D K, Townsend C R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 287-299.
- [8] Kroll S A, Llacer C N, de La Cruz Cano M, *et al.* The influence of land use on water quality and macroinvertebrate biotic indices in rivers within Castilla-La Mancha (Spain) [J]. *Limnetica*, 2009, **28**(2): 203-214.
- [9] Snyder C D, Young J A, Vilella R, *et al.* Influences of upland and riparian land use patterns on stream biotic integrity [J]. *Landscape Ecology*, 2003, **18**(7): 647-664.
- [10] Lammert M, Allan J D. Assessing biotic integrity of streams: Effects of scale in measuring the influence of land use/cover and habitat structure on fish and macroinvertebrates [J]. *Environmental Management*, 1999, **23**(2): 257-270.
- [11] Joy M K, Death R G. Predictive modelling and spatial mapping of freshwater fish and decapod assemblages using GIS and neural networks[J]. *Freshwater Biology*, 2004, **49**(8): 1036-1052.
- [12] Hughes S J, Ferreira M T, Cortes R M V. Hierarchical spatial patterns and drivers of change in benthic macroinvertebrate communities in an intermittent Mediterranean river[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2008, **18**(5): 742-760.
- [13] Boyero L. Multiscale patterns of spatial variation in stream macroinvertebrate communities[J]. *Ecological Research*, 2003, **18**(4): 365-379.
- [14] Sandin L, Johnson R K. Local, landscape and regional factors structuring benthic macroinvertebrate assemblages in Swedish streams[J]. *Landscape Ecology*, 2004, **19**(5): 501-514.
- [15] Li F Q, Chung N, Bae M J, *et al.* Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales[J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(10): 2107-2124.
- [16] Johnson L B, Breneman D, Richards C. Macroinvertebrate community structure and function associated with large wood in low gradient streams [J]. *River Research and Applications*, 2003, **19**(3): 199-218.
- [17] Feld C K, Hering D. Community structure or function: Effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales [J]. *Freshwater Biology*, 2007, **52**(7): 1380-1399.
- [18] 张勇,刘朔儒,于海燕,等. 钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32**(14): 4309-4317.

- [19] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 218-226.
- [20] 张亚丽, 张依章, 张远, 等. 浑河流域地表水和地下水氮污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 170-177.
- [21] 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.
- [22] 高欣. 辽河、太湖流域大型底栖动物群落结构空间异质性及生物完整性研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [23] 邢树威, 王俊才, 丁振军, 等. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值及水质评价[J]. 环境保护科学, **39**(3): 29-33.
- [24] 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.
- [25] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation[J]. Ecology, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [26] Jiang X M, Xiong J, Qiu J W, *et al.* Structure of macroinvertebrate communities in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system[J]. International Review of Hydrobiology, 2010, **95**(1): 42-57.
- [27] Ormerod S J, Edwards R W. The ordination and classification of macroinvertebrate assemblages in the catchment of the River Wye in relation to environmental factors[J]. Freshwater Biology, 1987, **17**(3): 533-546.
- [28] Buss D F, Baptista D F, Nessimian J L, *et al.* Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in Neotropical streams[J]. Hydrobiologia, 2004, **518**(1-3): 179-188.
- [29] Miserendino M L. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian rivers and streams: Environmental relationships[J]. Hydrobiologia, 2001, **444**(1-3): 147-158.
- [30] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4661-4672.
- [31] Marzin A, Verdonschot P F M, Pont D. The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers[J]. Hydrobiologia, 2013, **704**(1): 375-388.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行