

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析

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月对浑太河流域65个采样点的鱼类进行调查采样。共采集到鱼类40种, 分属9目14个科33属。其中鳅科鱼类占13.21%, 鲤科占65.83%, 构成了浑太河鱼类群落的主要部分。不同河流鱼类群落也有所不同, 浑太河流域鱼类可分为2种分布类型, 即上游林地为主的区域及支流源头区和中下游平原区。太子河侵窝水库上游和浑河大伙房水库上游区域的优势种类为北方条鳅(*Nemachilus nudus*)、北方花鳅(*Cobitis granoei*)和洛氏鲃(*Phoxinus lagowskii*), 浑河和太子河平原区的优势种类为鲫(*Carassius auratus*)和餐条(*Hemiculter leucisculus*)。采用典范对应分析(CCA)方法定量分析流域、河段和微生境尺度环境因子对鱼类空间分布的影响。结果表明, 浑太河流域鱼类空间分布主要受到流域和河段这2种尺度上环境因子的影响。在流域尺度上, 林地、城镇建设用地、海拔对鱼类空间分布表现出显著影响, 在河段尺度上, 溶解氧、总氮、pH和栖息地质量对鱼类空间分布表现出显著影响。而微生境尺度上的底质类型则未对鱼类空间分布产生显著影响。流域尺度环境因子对鱼类群落结构变异的解释率为7.66%, 河段尺度环境因子对鱼类群落结构变异的解释率为10.57%。河段尺度环境因子对鱼类群落结构的影响更为显著。

关键词: 浑太河; 鱼类; 环境因子; 不同尺度; 典范对应分析

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3504-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.037

Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales

LI Yan-li^{1,2}, LI Yan-fen³, XU Zong-xue²

(1. Institute of Resources & 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 June 2012, fishes were investigated at 65 sampling sites in the Huntai River basin in Northeast of China. Forty species were collected, belonging to 9 orders, 14 families, 33 genera. *Cobitidae* and *Cyprinidae* were the dominant fishes in the community structure in the Huntai River basin, accounting for 13.21% and 65.83% of the fish community, respectively. There were two types of spatial distribution of fish community, one was distributed in the head water and tributaries in the upstream, and the other was in the plain rivers. *Nemachilus nudus*, *Cobitis granoei* and *Phoxinus lagowskii* dominated the local community in the upper reaches of the Dahuofo Reservoir and Shenwo River, while *Carassius auratus* and *Hemiculter leucisculus* dominated the local community in the plain rivers. CCA (canonical correspondence analysis) was used to distinguish the primary environmental variables that affected the fish community structure. The results indicated fish community was mainly affected by environment factors at watershed and reach scales. Proportions of woodland and urban land, and altitude were three important environmental factors affecting the fish community at the watershed scale. Dissolved oxygen, total nitrogen, pH and habitat inhomogeneity significantly affected the fish community at the reach scale, whereas substrate didn't show significant influence at the microhabitat scale. Environmental factors at watershed scale explained 7.66% of the variation of fish community structure, environmental factors at reach scale explained 10.57% of the variation of fish community structure. Environmental factors at reach scale influenced the fish community more significantly.

Key words: Huntai River; fish; environmental factors; different scales; canonical correspondence analysis

鱼类占据河流生态系统食物链的顶端, 在河流生态系统中具有重要的地位与功能, 对河流生态系统的稳定十分关键。近年来, 随着水体污染、水利工程、农业灌溉以及挖沙等人类干扰活动的影响^[1], 辽河流域生态环境质量不断恶化, 极大地改变了水生生物群落特征^[2,3]。

河流生态系统中, 鱼类群落受到不同尺度环境因子的影响^[4,5]。其中, 大、中尺度上的土地利用/

覆被变化及由此导致的景观格局变化, 是影响鱼类群落组成、结构和功能的关键因素^[6~13]。目前城市化、农业耕作、林木砍伐等人类活动是造成流域土

收稿日期: 2014-02-06; 修订日期: 2014-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41105074); 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

地利用变化的主要驱动力^[14]。土地利用方式的变化会引起水生态系统结构以及功能的变化,间接地影响鱼类种群结构特征^[15]。

中小尺度上的水文^[16,17]、水质^[18~20]等环境因子以及水利工程^[21,22]建设等,也会直接或间接影响水生生物的生存。例如河流营养物浓度的增加会引起自养生物量和初级生产力的增加,最终导致生物物种组成的改变。产生的大量凋落物和提高的分解速率可以引起溶解氧浓度的降低,也会导致物种组成的改变以及敏感物种的下降和耐污种的增加^[23~25]。大坝不仅导致河流生态系统破碎化,还改变了河流水文及水环境特征。从而,导致水生生物多样性的变化。其中,鱼类种群的变化与水文的改变密切相关^[26]。

尽管不同尺度环境因子影响着鱼类的群落结构特征,但鱼类群落结构对不同环境因子变化的敏感性不尽相同^[27]。如,一些研究发现流域尺度土地利用/覆被状况对河道生境^[7,28]和鱼类群落特征^[29,30]影响更为显著。Pease 等^[31]和 Esselman 等^[32]研究发现流域土地利用和河道生境对鱼类空间分布特征有强烈影响。而一些研究发现河段尺度的栖息地生境和水质等环境因子^[33,34]对鱼类群落特征的影响更为显著。

针对上述问题,本文选取浑太河流域为研究区域,基于 2012 年 5~6 月进行的 65 个采样点位鱼类资源进行分析,以明确浑太河流域鱼类群落结构特征,识别影响浑太河流域鱼类群落结构的主要环境因子,以期对浑太河流域鱼类保护提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浑太河流域是辽河的子流域(40.45°N~42.30°N,122.00°E~125.30°E),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^[35],流域面积 $1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。多年平均降雨量约为 718.3 mm,年平均径流量 $37.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,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。浑太河流域内山地占 69%,丘陵占 6.1%,平原占 24.9%。流域内多年平均地表水资源量为 $24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

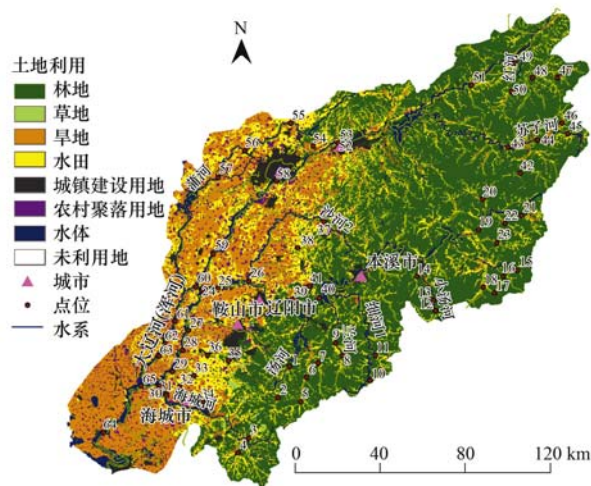


图 1 浑太河流域采样点和土地利用类型

Fig. 1 Sampling sites and land use type of HunTai River basin

1.2 研究方法

1.2.1 鱼类采集及分类鉴定方法

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 个样点进行鱼类采集(见图 1),由于太子河流域的运梁河、南沙河下游和浑河流域的小细河下游共 3 个点位未采集到鱼类,因此,实际仅 65 个点位捕获到了鱼。鱼类采样方法:在采样点河流上下游 100 m 范围内,分别在不同类型生境(深潭、浅滩和急流)采集鱼类。在可涉水的点位采用电鱼法,在不可涉水的点位采用乘船挂网法,采集时间控制在 30 min。捕获的体长大于 20 mm 的鱼鉴别物种(或亚种),计数、称质量。对捕获 30 条以上的广布种进行生物学特征(例如体长)的记录。大部分鱼类标本现场进行种类鉴定和计数后放归河流中,对于那些不能立刻准确鉴定的样品,用 10% 福尔马林溶液的纱布包裹样本,置于密闭的样品保存盒中,带回实验室进一步鉴定。依据东北地区的淡水鱼类进行鉴定^[36]。

1.2.2 环境因子数据的获取

不同尺度环境因子包括流域尺度的海拔、不同用地面积比例;河段尺度的水质参数、栖息地质量、河宽、水深;微生境尺度的底质类型(见表 1)。

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、农村聚落地、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. 2012 年 5 月分别对浑太河流域的水体理化参数、鱼类、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) 和流速 (Velocity) 使用流速仪现场测定; 河宽采用皮尺测量. 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 ($PO_4^{3-}-P$)、悬浮物 (SS)、高锰酸盐指数、总有机碳 (TOC) 等.

对浑太河流域各采样点的栖息地质量进行评价时, 选取了 10 个评价指标 (底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型)^[37], 每项 20 分, 总分 200 分. 所有点位的栖息地评分均由同一位调查者完成, 以消除由于人为误差导致的评价结果不一致. 用全球定位系统记录采样点的经纬度和海拔 (Elev).

表 1 不同尺度环境因子

Table 1 Environmental variables at multiple scales

尺度等级	环境因子
流域尺度	海拔 (Elev); 林地面积比例 (Forest); 水田面积比例 (Paddy); 旱地面积比 (Dryland); 草地面积比例 (Grass); 城镇建设用地面积比例 (Urban); 农村居民用地面积比例 (Rural)
河段尺度	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 ($PO_4^{3-}-P$); 栖息地质量 (habitat); 水深 (depth); 流速 (velocity); 流量 (flow)
微生境尺度	(卵石 + 砾石)%; (小卵石 + 碎石)%; 底质含沙量%

1.2.3 数据处理与统计

采用物种多度、杂食性鱼类比例、昆虫食性鱼类比例和敏感性鱼类比例作为鱼类特征参数, 分析流域鱼类群落结构特征. 借鉴以往研究^[38], 结合浑太河流域鱼类现状, 选取洛氏鲮、池沼公鱼 (*Hypomesus olidus*)、葛氏鲈塘鳢 (*Perccottus glehni*)、北方花鳅及花杜父 (*Cottus poecilopus*) 为敏感鱼类, 鲫、泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*)、大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryyanus*)、鲤 (*Cyprinus carpio*)、乌鳢 (*Channa argus*)、餐条作为耐污鱼类.

对各样点鱼类不同物种的相对丰度数据进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 后发现, 鱼类数据的梯度值为 9.381, 大于 4, 故选择典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)^[39]. 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进行 CCA 分析, 筛选出关键环境因子; ②采用偏 CCA 分析, 以流域尺度的环境因子为解释变量, 河段尺度的环境因子为协变量, 计算流域尺度环境因子的独立解释量; 以河段尺度的环境因子为解释变量, 流域尺度的环境因子为协变量, 计算河段尺度环境因子的独立解释量. CCA 和偏 CCA 分析采用 CANOCO 4.5 进行.

2 结果与讨论

2.1 浑太河鱼类群落结构特征分析

浑太河流域共采集到鱼类 11 920 尾 40 种, 分属 9 目 14 个科 33 属 (见表 2). 其中鳅科鱼类共 1 575 尾, 占 13.21%, 鲤科 7 847 尾, 占 65.83%, 构成了浑太河鱼类群落的主要部分. 采集到的鱼类包括杂食性、肉食性、植食性和昆虫食性 4 种. 其中杂食性鱼类最多. 出现频次最多的鱼类为鲫, 共计出现在 37 个点位, 洛氏鲮、棒花鱼 (*Abbottina rivularis*)、北方条鳅、北方花鳅、宽鳍鱮 (*Zacco platypus*)、泥鳅、麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*) 出现频次也较多.

总体上来看浑太河流域鱼类的广布种以洛氏鲮、鲫、北方条鳅、北方花鳅、棒花鱼、泥鳅为代表 (见表 2). 麦穗鱼和宽鳍鱮分布也较为广泛, 均占采样点位的 46.15%. 麦穗鱼主要集中在浑太河的平原河段, 而宽鳍鱮则主要集中在浑太河的源头和太子河干流.

不同点位的鱼类组成也有所不同, 太子河蓼窝水库上游 (细河上游、小汤河上游、兰河上游、南支、北支) 河段和浑河大伙房水库上游河段的优势种类为北方条鳅、北方花鳅和洛氏鲮, 它们分别占采样点位的 87.88%、84.85% 和 93.9%. 浑河和太子河中下游 (城镇建设用地、农业用地为主要用地

表 2 浑太河鱼类名录

Table 2 Fish species in the Huntai River basin

科	种	出现频数	科	种	出现频数
鲤科	棒花鲃(<i>Gobio rivuloides</i>)	18	鳅科	北方条鳅(<i>Nemachilus nudus</i>)	34
	棒花鱼(<i>Abbottina rivularis</i>)	36		大鳞副泥鳅(<i>Paramisgurnus dabryanus</i>)	9
	彩鲫鲃(<i>Rhodeus lighti</i>)	13		泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	37
	餐条(<i>Hemiculter leucisculus</i>)	18		纵纹北鳅(<i>Lefua costata</i>)	5
	点纹银鲃(<i>Squalidus wolterstorffi</i>)	1		北方花鳅(<i>Cobitis granoei</i>)	33
	东北雅罗鱼(<i>Leuciscus Waleckii</i>)	4	鰕虎鱼科	波氏栉鰕虎鱼(<i>Ctenogobius cliffordpopei</i>)	13
	黑龙江鲫鲃(<i>Rhodeus sericeus</i>)	1		裸项栉鰕虎鱼(<i>Ctenogobius gymnauchen</i>)	3
	鲫(<i>Carassius auratus</i>)	37		子陵栉鰕虎鱼(<i>Ctenogobius giurinus</i>)	5
	宽鳍鱮(<i>Zacco Platypus</i>)	30	胡瓜鱼科	池沼公鱼(<i>Hypomesus olidus</i>)	1
	鲤(<i>Cyprinus carpio</i>)	1	七鳃鳗科	东北七鳃鳗(<i>Lampetra morii</i>)	8
	镜鲤(<i>Cyprinus carpio var</i>)	1		雷氏七鳃鳗(<i>Lampetra reissneri</i>)	4
	洛氏鲮(<i>Phoxinus lagowskii</i>)	36	塘鳢科	葛氏鲈塘鳢(<i>Perccottus glehni</i>)	13
	马口鱼(<i>Opsariichthys bidens</i>)	2		黄鱼幼(<i>Hypseleotris swinhonis</i>)	8
	麦穗鱼(<i>Pseudorasbora parva</i>)	30	青鲈科	青鲈(<i>Oryzias latipes</i>)	5
	清徐胡鲃(<i>Huigobio chinssuensis</i>)	22	杜父鱼科	花杜父(<i>Cottus poecilopus</i>)	7
	犬首鲃(<i>Gobio cynocephalus</i>)	6	鲇科	鲃(<i>Liza haematocheila</i>)	1
	兴凯银鲃(<i>Aceilognathus chankaensis</i>)	1	鳊科	乌鳊(<i>Channa argus</i>)	2
	兴凯鲮(<i>Acheilognathus chankaensis</i>)	8	斗鱼科	圆尾斗鱼(<i>Macropodus chinensis</i>)	1
	中华鲫鲃(<i>Rhodeus sinensis</i>)	12	鱖科	鱖(<i>Hemirhamphus sajori</i>)	7
鲶科	大口鲶(<i>Silurus meridionalis</i>)	1	刺鱼科	中华多刺鱼(<i>Pungitius sinensis</i>)	1

类型)河段的优势种类是鲫和餐条,分别占采样点位的 90.6% 和 56.3%。鲫从上游至下游的优势越来越明显,占采样点的比例由 0 增加至 94.20%。

敏感性鱼类比例和昆虫食性鱼类比例空间分布完全一致,和杂食性鱼类比例空间分布规律完全相反。整体上来说,浑太河上游河流敏感性鱼类和昆虫食性鱼类比例较高,尤其是太子河流域南支和北支,敏感性鱼类的比例最高。其次为太子河流域的小汤河、二道河、兰河等支流源头以及浑河的源头(见图 2)。这些点位均位于林地为主要用地类型的区域及支流的源头区。浑河和太子河中下游平原区的敏感性和昆虫食性鱼类比例大多为 0,只有太子河干流辽阳段(39 和 41)相应点位捕获到敏感性和昆虫食性鱼类,比例在 20% 左右。整体来讲,农业用地为主的河流杂食性鱼类比例明显高于林地为主的河流。

表 3 基于 CCA 的多尺度环境因子对鱼类空间变异的解释结果

变异指标	AX1	AX2	AX3	AX4	总解释变异
排序轴特征值	0.758	0.343	0.237	0.161	32.43%
生物与环境相关性	0.963	0.775	0.757	0.660	
生物数据累积变化百分率/%	13.8	20.1	24.4	27.3	
生物与环境相关关系累积/%	42.6	61.9	75.2	84.3	

与物种第一排序轴相关系数较高的是林地、海拔、 ρ (TN)和栖息地质量(见表 4)。其值分别为

2.2 鱼类相对丰度与环境因子之间的关系

不同环境因子与鱼类的相对丰度进行 CCA 分析,前两轴特征值分别为 0.758 和 0.343,物种与环境因子排序轴的相关系数达到 0.963 和 0.775,环境-物种关系的累积比率为 84.3%。说明排序图可较好地反映环境因子和鱼类相对丰度之间的关系(见表 3)。通过对所有环境因子的全模型 CCA 分析表明,环境因子对鱼类相对丰度空间变异的解释率达到 59.98%。研究结果表明纳入分析的环境因子能够解释大部分的鱼类空间分异状况。在进行 CCA 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。林地、海拔高度、 ρ (DO)、城镇建设用地面积比例、 ρ (TN)、栖息地质量和 pH 值共 7 个变量为影响鱼类空间分布的主要环境因子。

-0.943 2、-0.854 6、0.713 0 和 -0.658 1。环境因子与第二排序轴相关系数相对较低, ρ (DO)、城

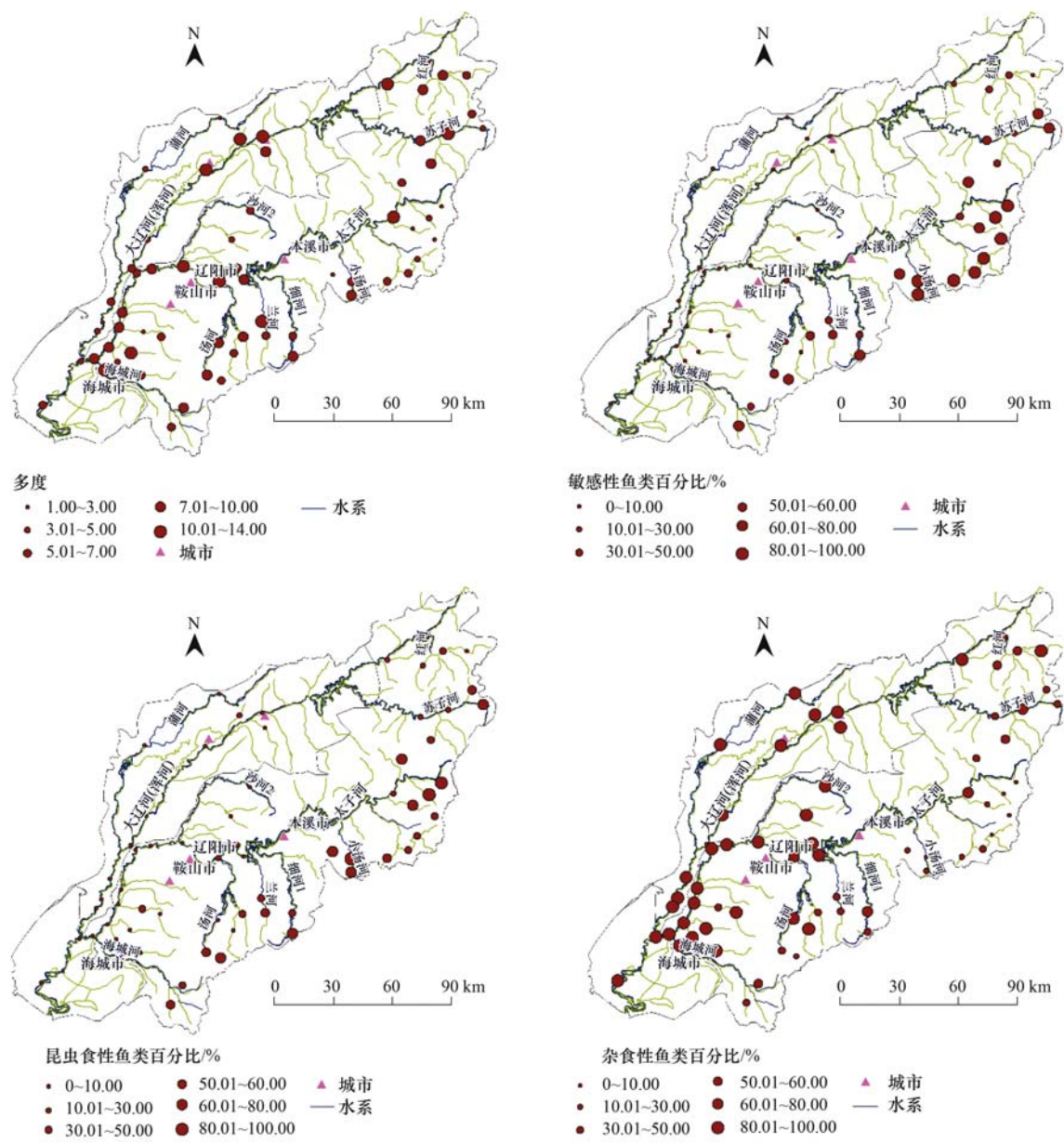


图 2 浑太河流域鱼类群落结构特征分布

Fig. 2 Characteristic distribution of fish community structure in Huntai River basin

表 4 环境因子与前两个排序轴的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between environmental factors and the first two axes of CCA ordination

	SP1	SP2	EN1	EN2
SP2	0.007 3	1	0	0.774 9
EN1	0.963 1	0	1	0
EN2	0	0.774 9	0	1
Elev	-0.854 6	-0.302 0	-0.887 3	-0.389 7
pH	-0.249 9	-0.108 5	-0.259 4	-0.140 0
$\rho(\text{DO})$	-0.469 0	0.263 0	-0.486 9	0.339 4
$\rho(\text{TN})$	0.713 0	-0.030 4	0.740 3	-0.039 3
Habitat	-0.658 1	-0.255 9	-0.683 3	-0.330 2
forest	-0.943 2	0.067 4	-0.979 2	0.086 9
urban	0.383 0	0.215 8	0.397 6	0.278 4

镇建设用地、pH 与第二排序轴的相关系数分别为 0.263 0、0.215 8 和 -0.108 5。说明影响鱼类空间分布的主要环境因子为林地、海拔、 $\rho(\text{TN})$ 以及栖息地质量。其中, $\rho(\text{TN})$ 位于第一排序轴右侧, 呈正相关; 林地、高程、栖息地质量位于左侧, 呈负相关。 $\rho(\text{DO})$ 和城镇建设用地位于坐标轴上方, 呈正相关, pH 位于坐标轴下方, 呈负相关 (见图 3 和图 4)。

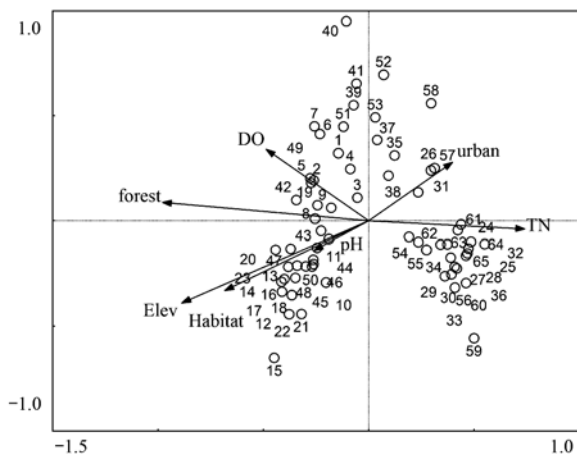


图 3 浑太河流域采样点与环境因子的 CCA 分析

Fig. 3 CCA biplot of environmental variables and sample sites in the Huntai River basin

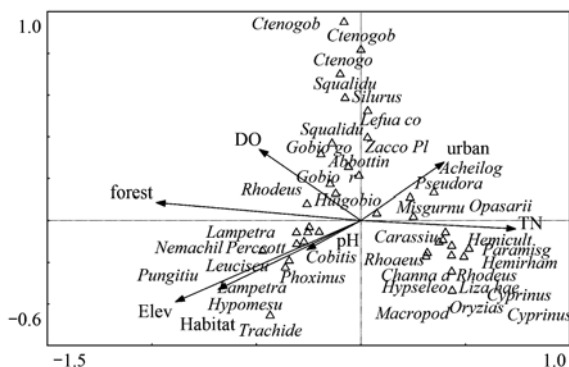


图 4 浑太河流域环境因子与鱼类物种组成的 CCA 分析

Fig. 4 CCA biplot of environmental variables and species composition in the Huntai River basin

通过采样点与环境因子之间的相关关系 (见图 3) 发现, 分布在排序图左侧的点位主要分布在浑太河流域上游林地为主的河段和支流源头, 包括太子河流域的太子河南支、北支以及小汤河上游, 汤河的支流、兰河、二道河和细河的上游以及浑河流域的苏子河、洪河等源头。而分布在排序图右侧的点位主要浑太河流域干流中下游、蒲河、海城河的主要支流 (五道里河、甘巴河、杨柳河、北沙河) 等平原区。林地面积比例、海拔高度、

$\rho(\text{DO})$ 、栖息地质量、pH 值影响排序图左侧点位, 而城镇建设用地面积比例和 $\rho(\text{TN})$ 影响排序图右侧点位。

通过鱼类相对丰度与环境因子的相关关系排序图发现 (见图 4), 宽鳍鱮、棒花鱼的相对丰度与溶解氧呈显著正相关, 即这些鱼类的相对丰度会随水体溶解氧浓度的增加而增加。洛氏鱮、池沼公鱼、花杜父、北方条鳅、葛氏鲈塘鳢及北方花鳅的相对丰度与林地面积比例、栖息地质量、海拔高度呈显著正相关, 即这些鱼类会随林地面积比例、栖息地质量、海拔高度的增加而增加。麦穗鱼、泥鳅、大鳞副泥鳅、乌鳢、鲫、餐条、中华鲢、彩鲢、黄鱼幼的相对丰度与总氮浓度和城镇建设用地面积比例呈显著正相关, 即这些鱼类会随着总氮浓度和城镇建设用地面积比例的增加而增加。

2.3 不同空间尺度环境因子的相对重要性

河流生物受到不同空间尺度环境因子的影响, 尽管大、中尺度 (如流域尺度的海拔、气候、流域尺度的土地利用)、中、小尺度 (河段尺度的水体理化参数和微生物尺度的底质类型等) 环境因子影响着河流鱼类群落组成, 但不同尺度环境因子对鱼类影响的大小是不同的。

虽然 CCA 分析结果能识别影响鱼类空间分布的主要环境因子, 但却难以从整体上区分流域尺度和河段尺度环境因子对鱼类空间变异影响的大小。本文采用偏 CCA 分析方法辨析流域尺度和河段尺度环境因子对鱼类空间变异的解释能力。

研究发现, 流域尺度上, 林地面积比例、城镇建设用地面积比例、海拔对鱼类群落结构影响显著 ($P < 0.05$)。其中林地面积比例影响最为显著, 其对鱼类空间分异的解释率为 3.28%, 其次为海拔, 对鱼类的解释率为 3.10%, 城镇建设用地面积比例对鱼类的解释率为 1.28% (见表 5)。

河段尺度上, 溶解氧浓度、总氮浓度、pH 和栖息地质量 4 个参数对鱼类空间分异影响显著。其中溶解氧浓度影响最为显著, 其对鱼类空间分异的解释率为 3.46%。其次为总氮浓度、pH、栖息地质量, 对鱼类的解释率分别为 2.55%、2.37% 和 2.19% (见表 5)。

综上, 河段尺度环境因子对鱼类空间分布影响更为显著。河段尺度环境因子对鱼类空间分布变异的解释率为 10.57%。而流域尺度环境因子对鱼类空间分布变异的解释率为 7.66%。

表 5 不同环境变量对鱼类群落结构空间分异解释能力的分解与比较

Table 5 Comparison and decomposition of percentage variance in fishes explained by different environmental factors

尺度等级	显著变量(显著性 <i>P</i>)	变异的解释(总变异)	占总变异比例/%
流域尺度	林地面积比例(0.001)	0.18(5.485)	3.28
	海拔(0.001)	0.17(5.485)	3.10
	城镇建设用地面积比例(0.037)	0.07(5.485)	1.28
河段尺度	溶解氧(0.001)	0.19(5.485)	3.46
	总氮(0.011)	0.14(5.485)	2.55
	栖息地质量(0.014)	0.12(5.485)	2.19
	pH(0.03)	0.13(5.485)	2.37

3 讨论

环境因子在很大程度上影响着鱼类的物种丰度,包括水体污染物、富营养化、土地利用、栖息复杂性、地形地貌等都是至关重要的因子. 如 Yao 等^[40]研究发现河床底质、溶解氧、河岸覆盖率、河宽、水深、流速这 6 个因子是影响鱼类分布的环境因子. 而 Brown^[41]认为电导率、坡度以及河流的平均宽度是影响鱼类群落分布的关键因子. Kadye 等^[42]认为深度、水温、河床底质是影响鱼类组成的重要因子. 丁森等^[43]研究发现流域尺度土地利用、海拔及河流等级对鱼类空间分布有显著影响,而河段尺度的水质、水文以及栖息地质量对鱼类空间分布产生显著影响,而微生物尺度的底质等级对鱼类空间分布产生显著影响. 李捷等^[44]根据目前鱼类群落数据,通过典型对应分析发现河宽、水温、海拔、pH 值、水坝之间的距离 5 个因子与鱼类群落结构存在较强的相关性. 本研究通过分析不同尺度环境因子对鱼类物种相对丰度的影响发现,鱼类群落结构特征主要受流域和河段尺度环境因子影响,针对两种尺度环境因子的影响开展如下讨论.

3.1 流域尺度环境因子的影响分析

对浑太河流域调查研究发现,洛氏鲮、池沼公鱼、花杜父、北方条鳅、葛氏鲈塘鳢及北方花鳅主要分布在海拔高度高于 100 m 的林地为主要用地类型的区域. 而中华鲮、乌鳢、鲫、黄鱼幼、大鳞副泥鳅、餐条主要分布在海拔高度低于 100 m 城镇建设用地和农田为主要用地类型的区域. 对于浑太河流域来说,海拔低于 100 m 的区域主要为人类活动频繁的平原区,海拔高于 100 m 的区域包括林地为主的山地区和部分支流的源头区. 这两类区域自然地理的差异,造成了鱼类群落组成的差异性. 另外,宽鳍鱮和棒花鱼有较大的分布区域,在浑太河流域主要支流和干流均有分布,其分布的采样点分别占 46.15% 和 55.39%,说明这两种鱼也是较为明显的

优势类群.

人类在流域的活动可反映为土地利用状况的变化,主要表现在城镇建设用地、农业用地等人类开发土地类型的变化. 而有关土地利用对水生生态影响的研究多集中于底栖动物^[45,46],而针对鱼类的研究相对较少. 有研究指出随着流域开发土地比例的增加,鱼类多样性和相对丰度水平随之下降,而耐污鱼类的相对丰度则有所上升. Wang 等^[8,10]对美国威斯康辛州流域的研究发现,流域城市用地比例达到 10%~20%,鱼类完整性指数开始显著降低,而农业用地比例超过 50%,鱼类完整性指数才开始显著降低. Fitzpatrick 等^[11]以威斯康辛州东部的农业型河流为例,当农业用地面积比例超过 30%,鱼类完整性指数开始显著下降. 说明流域范围内,农业用地比例超过 30%,河流生态系统完整性才开始发生显著变化. 根据美国 Ohio 环境保护署的数据,建设用地比例介于 0~5%,某些敏感种鱼类会消失;当升至 5%~15%,栖息会出现退化且功能摄食类群数量下降;当超过 15%时,鱼类种群遭到严重破坏. 本次调查研究发现建设用地比例小于 15%和高于 15%的点位,农业用地比例小于 25%和高于 25%的点位鱼类群落结构存在显著差异. 建设用地面积比例低于 15%,农业用地面积比例低于 25%的点位主要是以北方花鳅、棒花鱼、洛氏鲮等鱼类为优势种类. 建设用地面积比例高于 15%,农业用地面积比例高于 25%的点位主要以鲫、餐条和泥鳅等耐污种为优势种类. 可能是因为在用地的强度以及管理方式上存在差异. 但实际中农业用地包括了旱地和水田两种类型,农田和城镇建设用地交错连接,二者共同作用方式比单一用地类型对鱼类的影响大得多.

3.2 河段尺度环境因子对鱼类空间分布的影响分析

洛氏鲮、池沼公鱼、花杜父、北方条鳅、葛氏鲈塘鳢及北方花鳅等主要分布在高海拔林地为主要用地类型的区域. 在水生态调查研究中,发现这些区域常见慢-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,栖境复杂性相对较高。而鲫、泥鳅、餐条属耐污性鱼类,是浑太河平原区(城镇建设用、农业用地为主要用地类型)的优势种类。水生态调查中发现,这些点位栖境复杂性相对较低。说明栖境复杂程度显著影响着鱼类的空间分布。

本次调查研究发现,宽鳍鱮、棒花鱼的相对丰度与溶解氧浓度呈显著正相关,说明宽鳍鱮和棒花鱼受水体溶解氧浓度的影响。在调查中发现,溶解氧浓度高于 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的点位均有宽鳍鱮和棒花鱼的分布,且溶解氧浓度为 $17.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的点位棒花鱼和宽鳍鱮的捕获量分别为 163 和 101 尾。说明溶解氧浓度可能是造成浑太河流域宽鳍鱮和棒花鱼分布特征的主要原因之一。高于和低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸盐指数的点位,鱼类群落组成存在显著差异,高于和低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵盐的点位,鱼类群落组成也存在显著差异。这些充分说明水质状况对鱼类空间分布有显著影响。且通过 CCA 分析发现,鲫、餐条的分布与总氮浓度呈显著正相关,说明总氮作为重要的营养盐指标也显著地影响着鲫和餐条的分布。本研究未评价降雨量、河流等级对鱼类群落结构的影响。而河流等级一直是鱼类生态学家描述鱼类群落分布的一个重要空间尺度^[17]。

而微生物尺度上的底质类型则没有对鱼类相对丰度产生显著影响,但有相关研究发现底质类型对底栖动物空间分布可产生显著影响^[47~49]。

4 结论

(1)浑太河流域的调查共采集到鱼类11 920尾。共计 40 种,分属 11 目 14 个科。其中鲤科物种数占鱼类总物种数的 65.83%。二者构成浑太河鱼类群落的主要结构。

(2)浑太河流域鱼类受到不同尺度环境因子的影响,包括流域尺度、河段尺度。流域尺度上,林地、城镇建设用、海拔对鱼类分布存在显著影响,在河段尺度上,溶解氧、总氮、pH 和栖息地质量是影响鱼类分布的主要环境因子。而微生物尺度上的底质类型则没有对鱼类空间分布产生显著影响。对于不同物种,影响其分布的环境因子也各有不同。

(3)流域尺度环境因子对鱼类群落结构分异的解释率为 7.66%,河段尺度环境因子对鱼类群落结构分异的解释率为 10.57%。因此,河段尺度环境因子对鱼类群落结构的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 刘斌,张远,渠晓东,等. 辽河干流自然保护区鱼类群落结构及其多样性变化[J]. 淡水渔业, 2013, **43**(3): 49-55.
- [2] 黄翠霞,王明艳. 辽河铁岭段水生生物和微生物状况、评价及变化趋势[J]. 微生物杂志, 2010, **30**(1): 88-92.
- [3] 徐成斌. 辽河流域河流水质生物评价研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2006. 3-14.
- [4] Sutherland A B, Meyer J L, Gardiner E P. Effects of land cover on sediment regime and fish assemblage structure in four southern Appalachian streams[J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(9): 1791-1805.
- [5] Walters D M, Roy A H, Leigh D S. Environmental indicators of macroinvertebrate and fish assemblage integrity in urbanizing watersheds[J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(6): 1222-1233.
- [6] Klein R D. Urbanization and stream quality impairment[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1979, **15**(4): 948-963.
- [7] Roth N E, Allan J D, Erickson D L. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales[J]. *Landscape Ecology*, 1996, **11**(3): 141-156.
- [8] Wang L Z, Lyons J, Kanehl P, et al. Influences of watershed land use on habitat quality and biotic integrity in Wisconsin streams[J]. *Fisheries*, 1997, **22**(6): 6-12.
- [9] Wang L Z, Lyons J, Kanehl P, et al. Watershed urbanization and changes in fish communities in southeastern Wisconsin streams[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, **36**(5): 1173-1189.
- [10] Wang L Z, Lyons J, Kanehl P. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales[J]. *Environmental Management*, 2001, **28**(2): 255-266.
- [11] Fitzpatrick F A, Scudder B C, Lenz B N, et al. Effects of multi-scale environmental characteristics on agricultural stream biota in eastern Wisconsin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(6): 1489-1507.
- [12] Saalfeld D T, Reutebuch E M, Dickey R J, et al. Effects of landscape characteristics on water quality and fish assemblages in the Tallapoosa River Basin, Alabama[J]. *Southeastern Naturalist*, 2012, **11**(2): 239-252.
- [13] Weijters M J, Janse J H, Alkemade R, et al. Quantifying the effect of catchment land use and water nutrient concentrations on freshwater river and stream biodiversity[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2009, **19**(1): 104-112.
- [14] 赵彦伟,汪思慧,于磊,等. 流域景观格局变化的河流生物响应研究进展[J]. 生态学报, 2010, **29**(6): 1229-1234.
- [15] Maloney K O, Feminella J W, Mitchell R M, et al. Landuse legacies and small streams: Identifying relationships between historical land use and contemporary stream conditions[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2008, **27**(2): 280-294.
- [16] 朱国清,赵瑞亮,胡振平,等. 小浪底水库调水调沙对黄河中游鱼类及生态敏感区的影响[J]. 水生态学杂志, 2012,

- 33(5): 7-12.
- [17] 严志云, 占姚军, 储玲, 等. 溪流大小及其空间位置对鱼类群落结构的影响[J]. 水生生物学报, 2010, **34**(5): 1022-1030.
- [18] 白音包力皋, 许凤冉, 陈兴茹, 等. 小浪底水库排沙对下游鱼类的影响研究[J]. 水利学报, 2012, **43**(10): 1146-1153.
- [19] Furlan N, Esteves K E, Quinágua G A, *et al.* Environmental factors associated with fish distribution in an urban Neotropical river (Upper Tietê River Basin, São Paulo Brazil) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2013, **96**(1): 77-92.
- [20] 王伟, 王冰, 何旭颖, 等. 太子河鱼类群落结构空间分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(5): 494-501.
- [21] Li J P, Dong S K, Peng M C, *et al.* Effects of damming on the biological integrity of fish assemblages in the middle Lancang-Mekong River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2013, **34**: 94-102.
- [22] Van Looy K, Tormos T, Souchon Y. Disentangling dam impacts in river networks [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **37**: 10-20.
- [23] Nijboer R C, Verdonschot P F M, Johnson R K, *et al.* Establishing reference conditions for European streams [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **516**(1): 91-105.
- [24] Nijboer R C, Verdonschot P F M. Variable selection for modelling effects of eutrophication on stream and river ecosystems [J]. *Ecological Modelling*, 2004, **177**(1-2): 17-39.
- [25] Mainstone C P, Parr W. Phosphorus in rivers-ecology and management [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **282-283**: 25-47.
- [26] 李小艳, 彭明春, 董世魁, 等. 基于 ESHIPPO 模型的澜沧江中游大坝水生生物生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(2): 517-526.
- [27] 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.
- [28] Johnson L B, Richards C, Host G E, *et al.* Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems [J]. *Freshwater Biology*, 1997, **37**(1): 193-208.
- [29] Jones J A, Grant G E. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon [J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(4): 959-974.
- [30] Richards C, Johnson L B, Host G E. Landscape-scale influence on stream habitats and biota [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, **53**(S1): 295-311.
- [31] Pease A A, Taylor J M, Winemiller K O, *et al.* Multiscale environmental influences on fish assemblage structure in central Texas streams [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2011, **140**(5): 1409-1427.
- [32] Esselman P C, Allan J D. Relative influences of catchment-and reach-scale abiotic factors on freshwater fish communities in rivers of northeastern Meaoamerica [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2010, **19**(3): 439-454.
- [33] Rowe D C, Pierce C L, Wilton T F. Fish assemblage relationships with physical habitat in wadeable Iowa streams [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2009, **29**(5): 1314-1332.
- [34] Meador M R, Goldstein R M. Assessing water quality at large geographic scales: Relations among land use, water physicochemistry, riparian condition, and fish community structure [J]. *Environmental Management*, 2003, **31**(4): 504-517.
- [35] 朱君君, 胡远满, 刘森, 等. 浑河太子河流域景观变化及其驱动力 [J]. 生态学报, 2011, **30**(1): 112-118.
- [36] 解玉浩. 东北地区淡水鱼类 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [37] 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.
- [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] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. *Ecology*, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [40] Yao S S, Kouamélan E P, Koné T, *et al.* Fish communities along environmental gradients within the Comoé River basin, Côte d'Ivoire [J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2005, **30**(2): 185-194.
- [41] Brown L R. Fish communities and their associations with environmental variables, lower San Joaquin River drainage, California [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2000, **57**(3): 251-269.
- [42] Kadye W T, Magadza C H D, Moyo N A G, *et al.* Stream fish assemblages in relation to environmental factors on a montane plateau (Nyika Plateau, Malawi) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2008, **83**(4): 417-428.
- [43] 丁森, 张远, 渠晓东, 等. 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 [J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2272-2280.
- [44] 李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2012, **32**(18): 5795-5805.
- [45] Neff M R, Jackson D A. Effects of broad-scale geological changes on patterns in macroinvertebrate assemblages [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, **30**(2): 459-473.
- [46] 吴璟, 杨莲芳, 姜小三, 等. 浙江西苕溪土地利用变化对溪流大型底栖无脊椎动物完整性的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 1183-1191.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2013, **33**(9): 2803-2815.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人