

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第34卷第5期 2014年3月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据..... 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析..... 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....
..... 陈旭飞,张池,戴军,等 (1114)

个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李勇,袁玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡婷,谷洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响..... 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响..... 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李西,王丽华,刘尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....
..... 李倩倩,赵旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周蓉,邓自发 (1224)

种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓异,蔡立哲,郭涛,等 (1244)

不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响..... 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)

呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子..... 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)

江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价..... 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

景观、区域和全球生态

中国自然保护综合地理区划..... 郭子良,崔国发 (1284)

近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)

人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)

2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 谈永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

资源与产业生态

三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布..... 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人 and 大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210181448

张海萍, 武大勇, 王赵明, 孙然好, 陈利顶. 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响. 生态学报, 2014, 34(5): 1253-1263.

Zhang H P, Wu D Y, Wang Z M, Sun R H, Chen L D. The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1253-1263.

不同尺度因子对滦河流域大型底栖 无脊椎动物群落的影响

张海萍^{1,2}, 武大勇³, 王赵明^{1,2}, 孙然好¹, 陈利顶^{1,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 衡水学院生命科学系, 衡水 530000)

摘要: 通过 2011 年滦河流域 38 个河段大型底栖无脊椎动物采集, 探讨了河段尺度和流域尺度环境因子对大型底栖无脊椎动物分布的影响。其中, 河段尺度因子包括水体/底质特征、河岸带特征和水质, 流域尺度因子包括采样位置、流域土地利用结构和缓冲区土地利用结构。RDA(冗余分析)结果表明, 河段尺度影响大型底栖无脊椎动物分布的关键因子为: 细颗粒物比例、河岸带植被盖度、河岸带人类干扰程度、河岸带农田比例、水面宽度和河道改造程度, 总解释量为 42%; 流域尺度影响大型底栖无脊椎动物分布的关键因子为: 纬度、海拔、流域内耕地面积百分比和流域面积, 总解释量为 32%。研究结果表明, 河段尺度因子比流域尺度因子对于指示大型底栖无脊椎动物分布更为重要, 在环境因子监测中应给以更多的重视。

关键词: 大型底栖无脊椎动物; 流域尺度; 环境因子; 滦河流域

The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin

ZHANG Haiping^{1,2}, WU Dayong³, WANG Zhaoming^{1,2}, SUN Ranhao¹, CHEN Liding^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Life Sciences, Hengshui University, Hengshui 530000, China

Abstract: In the context of climate change and human-induced habitat destruction, biodiversity is being destroyed at an unprecedented rate. Moreover, the biodiversities in freshwater ecosystems are decreasing faster than those in terrestrial ecosystems. Less attention, however, has been paid to this issue. Compared with fish and algae, benthic macroinvertebrates, which have more advantages, become the most popular biological indicators of river health. Early studies were mostly focused on the influence of small-scale indicators on macroinvertebrates assemblages. Since the 1990s, some researchers started to pay attention to the impact of large-scale factors. Factors at landscape and watershed scale began to be treated equally or were given more concern. Understanding the relative influence of environmental variables at different scales is important in the distribution of large-scale monitoring points and river restoration.

Based on environmental and biotic data of 38 sites within the Luan River Basin, the aims of the study were to identify the key factors related to macroinvertebrates at reach and catchment scales, and to determine which scale is more important in explaining the variation of macroinvertebrates assemblages in this region. Macroinvertebrate assemblages were collected by D-frame net and described by using community structure index and biotic attributes. Such methods were commonly used to

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501002002)

收稿日期: 2012-10-18; 修订日期: 2013-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

describe ecological condition of streams (e.g., richness, feeding type). Water chemistry and physical indicators were involved at reach scale. A majority of reach-scale physical indicators were measured using the method in reference to rapid biological assessment programs in the United States and the Australian community monitoring manual. The covered ratio of forest (%), grassland (%), arable land (%) and construction land (%) in each catchment and buffer zone were summarized as catchment-scale indicators. Redundancy analyses (RDA) was used to quantify macroinvertebrate-reach relationships. Key variables for each ordination at reach scale were selected using the manual forward-selection procedure provided in CANOCO 4.5. The selection was based on Monte Carlo permutation test. Then, the RDA was performed to test for the significance of the first RDA axis and all axes, only by the selected reach-scale variables.

The following results were captured as follows. First, 117 macroinvertebrate taxa were collected. The dominant population community was aquatic insects which included 107 generas. Second, RDA results showed that the selected reach-scale variables related to macroinvertebrates were %fine sediments, riparian vegetation cover, riparian human disturbance, % cropland in riparian, water width and river transformation. The first axis and all axes explained 0.307 and 0.42, respectively. Both reached a significant level. The first axis and riparian vegetation cover had a highest correlation coefficient. Third, the selected catchment-scale variables were latitude, attitude, % cropland in the whole catchment and catchment area. The first axis and all axes explained 0.234 and 0.32, respectively. Both of them also reached a significant level. The first axis and catchment area had a highest correlation coefficient. The results showed that benthic macroinvertebrate communities in Luanhe River Basin were affected by the combined effects of natural and human factors at both scales. However, variables at reach scale played a more important role in stream macroinvertebrates distribution, rather than catchment scale. It was suggested that more attention should be paid to reach-scale factors in river ecosystem management and restoration in Luanhe River Basin.

Key Words: benthic macroinvertebrates; scale; environmental variables; Luan River

随着气候变化和生境破坏,生物多样性以前所未有的速度遭到破坏^[1]。相比于陆地生态系统,淡水生态系统的生物多样性降低速度更快,但得到的关注却相对较少^[2-3]。与鱼类、藻类相比,河流底栖动物具有种类多、分布广、能够对多种人为干扰作出响应等优势,成为河流健康评价中应用最为广泛的生物指标^[4]。

早期研究主要集中于小尺度分析,多数研究认为,河岸带和河道内生境特征是影响大型无脊椎动物分布的主要因素^[5-6]。20 世纪 90 年代以来,一些学者开始关注更大尺度范围的影响因子,认为景观尺度和流域尺度因子对于河流底栖动物群落具有重要的作用^[7-8]。目前研究中,大多数学者认为河流生物多样性受到多尺度因子的影响,而识别关键影响因素是生态学研究的核心目标之一^[8]。因此,了解不同尺度因子对于河流生物的影响,对于大尺度监测点布设、保护河流生物多样性和河流生态恢复具有重要的意义。

随着滦河流域内社会经济发展和人类活动强度的增加,滦河也出现了一系列生态环境问题,对此国内学者展开了大量的研究,主要集中于以下 4 个方面:1)水质恶化,包括有机物污染^[9]、重金属污染^[10]和面源污染^[11]等;2)水量下降,包括流域水资源总量下降^[12]、年径流量减少^[13]、河道内生态用水量减少^[14]等;3)河流形态变化,由于河流水沙平衡遭到破坏,河道内底质组成及下游河道形态均发生了改变^[15];4)河流生物多样性下降,鱼类较 20a 前物种数量大为减少(实地调查),底栖动物多样性降低^[16]。相比于水质、水量方面的研究,滦河流域河流生物多样性相关研究较少。本文以滦河流域河流大型底栖无脊椎动物为研究对象,从河段尺度和流域尺度分析不同尺度因子对大型底栖无脊椎动物的影响,识别影响滦河流域河流大型底栖无脊椎动物分布的关键尺度及尺度因子,以期为滦河流域更好地进行河流生物监测、生物多样性保护和恢复措施等方面提供参考意见。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

滦河发源于内蒙古高原,中游经燕山地区,下游主要为平原,最后流入渤海湾,全长 885km,途中有多条支流汇入(图 1),主要大型干、支流均常年有水。滦河流域总面积为 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,地处温带大陆

性季风区,多年平均气温约为 7.6°C ,多年平均降水量约为 520mm,降雨主要集中在 6—8 月份。流域内地形多样,人类活动强度呈现梯度特征,上游高原地区人口密度较小,人类活动强度较弱,中游丘陵地区人口密度增大,人类活动强度增加,下游平原地区人口密度最大,人类活动强度最强。

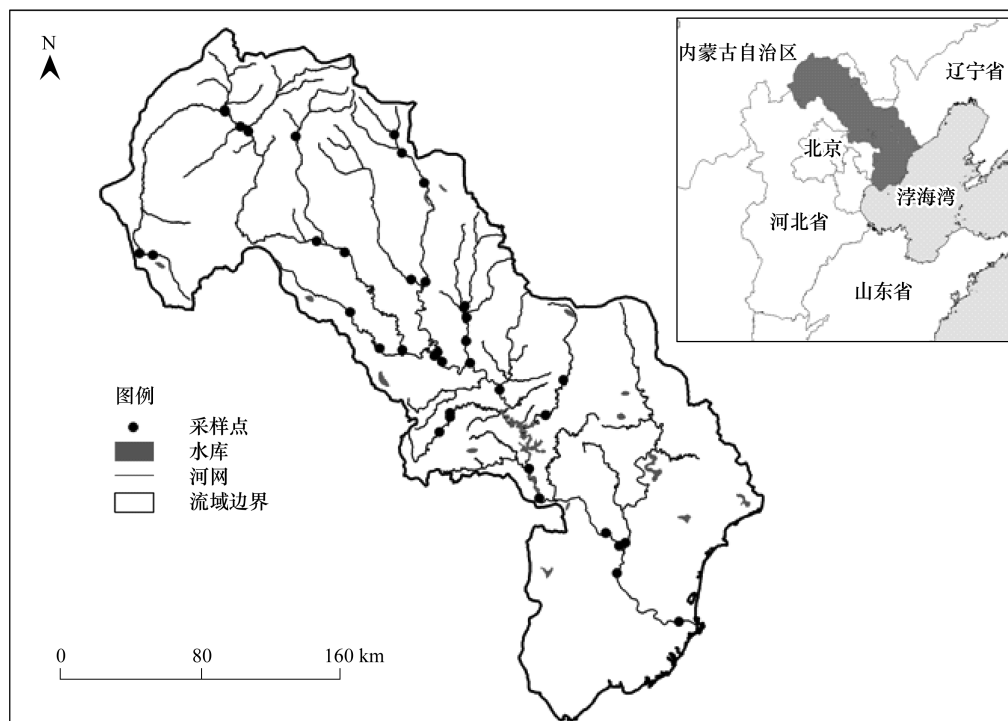


图 1 滦河流域 38 个采样断面分布

Fig.1 The distribution of 38 sampling sites in Luan River Basin

1.2 大型底栖无脊椎动物采集

根据不同的人类活动强度特征,本研究在滦河干流及其主要支流选取了 38 个采样点(图 1),于 2011 年 7 月对这些采样点所在河段物理特征、化学特征和大型底栖无脊椎动物进行了实地调查。大型底栖无脊椎动物采用踢网法沿河流断面(水深处无法覆盖整个断面时,以采集到最大深度为准)采集,采集范围尽可能覆盖该河段所有的生境类型(如激流、缓流、静水等)。所有采集到的生物及其它杂物综合为一个样品,现场采用 60 目网筛进行洗涤和筛洗,最后用 75%酒精保存带回实验室分拣(经现场初步检查如有环节动物,用 10%福尔马林处理)。送回实验室后,依据 Merritt^[17]、刘月英^[18]、Morse^[19]等文献,将所采集的大型底栖无脊椎动物鉴定到最可能

小的分类单元,大部分鉴定到种或者属,摇蚊类和一些环节动物和软体动物仅鉴定到科或者目。

本研究采用的大型底栖无脊椎动物指标主要为群落结构、运动习性和摄食类型,具体见表 1。

1.3 河段尺度因子测量

在每个河段采集底栖动物时,对其采样断面设定 100 m 河段,在参考美国快速生物评价方案^[20]和澳大利亚社区监测手册^[21]的基础上,根据滦河实际情况对河段尺度物理和化学指标进行测量(表 2)。水体物理指标(pH 值、电导率、溶氧)采用 YSI Proplus(便携式水质分析仪)现场测定;同时采集水样,进行冰冻保存,并在 24h 之内采用 WTW Photolab S12(滤色光度计)测定硝酸盐、总氮、总磷、COD 和氨氮指标。

表 1 大型底栖无脊椎动物群落结构及其它特征

Table 1 Description of biotic attributes used to describe macroinvertebrate assemblages at all sites

变量 Variables	代码 Code	定义/描述 Definition/Description	平均值(最小值,最大值) Mean(minimum , maximum)
总分类单元数 Total taxa	R_taxa	鉴定出的所有分类单元总数	13(3,29)
EPT 分类单元数 EPT taxa	R_EPT	浮游目、襀翅目和毛翅目分类单元总数	5(1,13)
水生昆虫分类单元数 Aquatic insect taxa	R_insect	所有水生昆虫的分类单元总数	9.6(2,24)
优势分类单元的个体相对多度 Relative abundance of Dominant taxa	R_domin	个体数量最多的 1 个分类单元的个体 数/样点总个体数	0.56(0.24,0.90)
TOP3 分类单元的个体相对多度 Relative abundance of TOP3 taxa	TOP3	个体数量最多的 3 个分类单元的个体 总数/样点总个体数	0.85(0.58,1)
EPT/%	EPT/%	浮游目、襀翅目和毛翅目个体总数/样 点总个体数	0.57(0.01,0.98)
Margalef	Margalef	Margalef 多样性指数	1.95(0.61,3.4)
Simpson	Simpson	Simpson 多样性指数	0.41(0.16,0.82)
摇蚊 Chironomidae/%	Chironomidae/%	摇蚊科个体总数/样点总个体数	0.20(0.0,0.9)
穴居者 burrower/%	burrower/%	穴居者个体数/样点总个体数	0.28(0.01,0.98)
粘附者 clinger/%	clinger/%	粘附者个体数/样点总个体数	0.36(0.01,0.97)
攀爬者 climber/%	climber/%	攀爬者个体数/样点总个体数	0.02(0,0.26)
爬行者 sprawler/%	sprawler/%	爬行者个体数/样点总个体数	0.02(0,0.28)
游泳者 swimmer/%	swimmer/%	游泳者个体数/样点总个体数	0.32(0,0.86)
收集者 collector/%	collector/%	收集者个体数/样点总个体数	0.70(0.13,0.99)
捕食者 predator/%	predator/%	捕食者个体数/样点总个体数	0.04(0,0.35)
刮食者 scraper/%	scraper/%	刮食者个体数/样点总个体数	0.26(0,0.84)
撕食者 shredder/%	shredder/%	撕食者个体数/样点总个体数	0.0(0,0.03)

表 2 流域尺度和河段尺度环境因子描述

Table 2 Description of catchment-scale and reach-scale variables at all sites

变量 Variables	代码 Code	定义/方法/单位 Definition/Method/Unit	平均值(最小值,最大值) Mean(minimum , maximum)
流域尺度 Watershed scale			
位置 Location			
经度 Longitude	Longitude		117.7(115.8,119.1)
纬度 Latitude	Latitude		41.1(39.5,42.3)
海拔 Altitude	Altitude		565.2(11,1429)
流域面积 Watershed area	Area	采样点所控制的流域面积 /(1×10 ⁴ km ²)	1.11(0.029,4.57)
土地利用结构 Land use			
建设用地 urban/%	urban/%	建设用地在流域中面积比例	2(0—6)
耕地 cropland/%	cropland/%	耕地在流域中面积比例	23(5,47)
林地 forest/%	forest/%	林地 in 流域中面积比例	42(0,78)
草地 grassland/%	grassland/%	草地在流域中面积比例	29(0,76)
缓冲区建设用地 urban in buffer/%	B_urban/%	建设用地在缓冲区中面积比例	10(0,53)
缓冲区耕地 cropland in buffer/%	B_cropland/%	耕地在缓冲区中面积比例	38(4,78)
缓冲区林地 forest in buffer/%	B_forest/%	林地在缓冲区中面积比例	19(0,70)
缓冲区草地 grassland in buffer/%	B_grassland/%	草地在缓冲区中面积比例	20(0,92)
河段尺度 Reach scale			
水体/底质 Water body/Substrate			
水面宽度 Width	Width	采样时水面平均宽度/m	24.3(2,200)

续表

变量 Variables	代码 Code	定义/方法/单位 Definition/Method/Unit	平均值(最小值,最大值) Mean(minimum, maximum)
水流形态数量 Flow types	Flow	流速形态类型计数(每种形态计1分): 快-深、快-浅、慢-深、慢-浅	3.2(1,4)
快速流态 Quick type	Quick	流速形态类型计数(每种形态计1分): 快-深、快-浅	1.3(0,2)
气味 Odour	Odour	5个等级(分别计分1—5):正常、微弱、 弱、明显、强	1.3(1,4)
浑浊度 Turbidity	Turbidity	3个等级(分别计分1—3):清澈、有点 浑浊、浑浊	2.3(1,3)
细粒物质比例 fine sediment/% 河岸带 Riparian	Fine/%	粒径<2mm,主要包括沙和泥	0.47(0,1)
河岸稳定性 Bank stability	Bank	(左岸植被盖度+右岸植被盖度)/2 注:如果河岸有开裂现象,分值减半	0.77(0,1)
河道改造程度 The degree of river transformation	Channel	计分:开挖现象(1,分左右岸)+护岸措 施(1,分左右岸)+河道拓宽(2)	0.66(0,4)
河岸带植被盖度 Riparian vegetation cover	Riparian	(左岸河岸带植被盖度+右岸河岸带植 被盖度)/2	0.9(0,1)
河岸带农田比例 cropland in riparian/%	R_cropland	(左岸河岸带农田比例+右岸河岸带农 田比例)/2	0.19(0,1)
河岸带人类干扰 Human interference in riparian	R_stress	计分:农田(1)+农村居民点(1)+放牧 (1)+道路(1)+城市化建设(2)	1.2(0,4)
500m以内人类干扰程度 Human interference (<500m)	500_stress	计分:农田(1)+农村居民点(1)+放牧 (1)+道路(1)+城市化建设(2)+水库 (2)+点源(5)	3.1(1,11)
水质 Water quality			
COD	COD	mg/L	81.6(17,242)
氨氮 Ammonian	NH ₄	mg/L	0.39(0.09,0.95)
硝酸盐 Nitrate	NO ₃	mg/L	2.52(0.1,7.5)
总氮 Total nitrogen	TN	mg/L	3.58(0.7,8)
总磷 Total phosphorus	TP	mg/L	0.64(0.03,5)
溶氧 Dissolved oxygen	DO	mg/L	8.18(4.75,11.8)
电导率 Electrical conductivity	Con	(ms/cm)	0.54(0.11,1.61)
pH	pH		8.2(7.68,8.82)

1.4 流域尺度因子提取

本研究基于 1:250000DEM 数据与数字河网,采用 ARCSWAT 根据采样断面划分子流域,由于同一段河流可能存在选取多个采样点的情况,所以上游采样点控制子流域包含于下游采样点控制子流域中。流域尺度因子主要基于流域土地利用方式组成与空间配置提取,土地利用方式组成主要包括林地、草地、耕地和建设用地所占流域百分比。其中空间配置选取缓冲带土地利用方式组成来表征,本研究中,缓冲区选取垂直于流域出口点沿上游 10 km 河段的河道两侧各 1 km 范围。土地利用数据来源于 2005 年 1:100000 土地利用数据(空间数据来源于国家基础地理信息中心)。

1.5 统计分析方法

本文采用冗余分析(RDA)对不同尺度的环境因

子和生物指标之间的关系进行分析,探讨环境指标对生物物种的影响。冗余分析基于 Canoco 4.5 完成,在分析前对于全部物种数据进行中心化和标准化处理。具体分析步骤如下:首先,采用手动选择和蒙特卡罗置换检验分别筛选出和生物指标显著相关的河段尺度、流域尺度环境因子;在此基础上对筛选出来的流域尺度因子和河段尺度因子分别与生物因子做冗余分析。

2 结果

2.1 大型底栖无脊椎动物

滦河流域 38 个采样点采集到节肢动物门、环节动物门和软体动物门共 117 个大型底栖无脊椎动物分类单元。优势类群为节肢动物门的昆虫纲,共 59 科 107 属。水生昆虫中 EPT(E:蜉蝣目,P:襁翅目,

T:毛翅目)种类占有所有种类的 36%,蜉蝣目 9 科 23 属,襁翅目 3 科 4 属,毛翅目 5 科 13 属。样点间的多个大型底栖无脊椎动物指标差异较大(表 1),比如总分类单元数最少为 3,最大为 29。

2.2 河段尺度和流域尺度因子

河段尺度上,水体/底质特征中,水流形态在滦河中上游大多数河段存在 4 种,因此平均值较高,下游河段经过潘家口和大黑汀水库之后,水流减缓或静止,上下游差异较大;从细粒物质组成看,整个滦河流域河床底质含沙量较高,平均值为 47%。河岸带特征主要体现了植被盖度和人类干扰程度的差异,大部分河段河道形态保留自然状态,因此河道改造程度均值较小,但下游及邻近城市河段因被改造程度较高,为高值区;大部分河段人类干扰类型包括农田和农村居民点,均值较低,但在邻近城市河段基本包括了所有的类型,为高值区,因此整个流域具有较大差异。水质指标部分,由于影响机制复杂,不同区域差异较大。

流域尺度上,每个流域都包括林地、草地、耕地

和建设用地,但由于自然条件和人类干扰程度不同,整个流域土地利用结构差别较大。草地多分布在内蒙古高原,林地多分布在燕山地带,耕地在每个流域都有分布,但在下游平原区密度最高。缓冲区土地利用结构和整个流域相比较,建设用地和耕地比例有所提高,林地和草地比例相对降低,说明相比于远离河岸带地区,河岸带较近地区人类活动强度更高。

2.3 河段尺度因子与生物因子的关系

通过手动选择和蒙特卡罗置换检验,被筛选出来的河段尺度因子为水面宽度、细粒物质比例、河道改造程度、河岸带植被盖度、河岸带农田盖度和河岸带人类干扰程度(表 3),RDA 分析结果如图 2。第一轴解释度 0.307,这 6 个因子与第一轴的相关性绝对值均大于 0.3,最高值河岸带植被盖度为-0.55,其次为细粒物质组成 0.53;第二轴解释度仅为 0.07,河岸带人类干扰程度与第二轴相关系数为 0.37,其余因子相关系数绝对值均小于 0.3。所有轴的解釋度为 0.42,且达到极显著水平(表 3)。

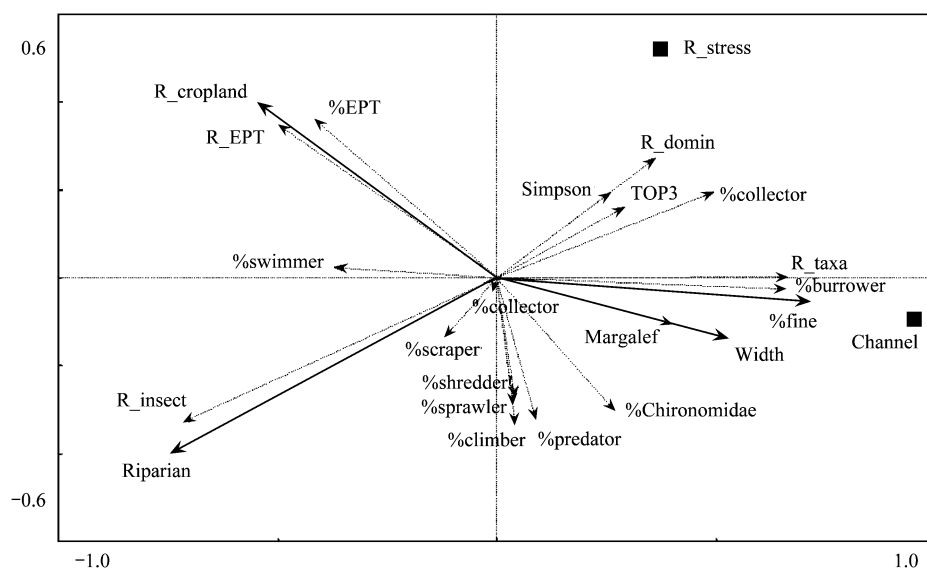


图 2 河段尺度因子和生物因子 RDA 分析结果(代码含义见表 1 和表 2)

Fig.2 Redundancy analysis (RDA) plot relating reach-scale variables (solid lines) and macroinvertebrate attributes (dotted lines) (The meaning of the code shown in Table 1 and Table 2)

2.4 流域尺度因子与生物因子的关系

通过手动选择和蒙特卡罗置换检验,被筛选出来的流域尺度因子为流域面积、耕地(%)、纬度和海拔(表 3),RDA 分析结果如图 3。第一轴解释度 0.234,与第一轴的相关系数最高值为流域面积

0.4145,其次为纬度-0.1860;第二轴解释度仅为 0.07,4 个流域因子与第二轴相关系数绝对值均大于 0.3,最大值为海拔 0.7466,其次为纬度 0.6268。所有轴的解釋度为 0.32,且达到极显著水平(表 3)。

表 3 大型底栖无脊椎动物分别于河段尺度因子、流域尺度因子 RDA 结果

	河段尺度 Reach Scale	流域尺度 Watershed Scale
第一轴解释度/%		
Variance explained by 1st axis	0.307	0.234
第一轴 F 值 F-value of 1st axis	13.703 **	10.107 *
所有轴解释度/%		
Variance explained by all axes	0.42	0.32
所有轴 F 值 F-value of all axes	3.738 **	3.874 **
被选择的变量 Selected variables	水面宽度、细粒物质比例、河道改造程度、河岸带植被盖度、河岸带农田比例、河岸带人类干扰程度	
	流域面积、%耕地、纬度、海拔	

* $P<0.5$; ** $P<0.005$

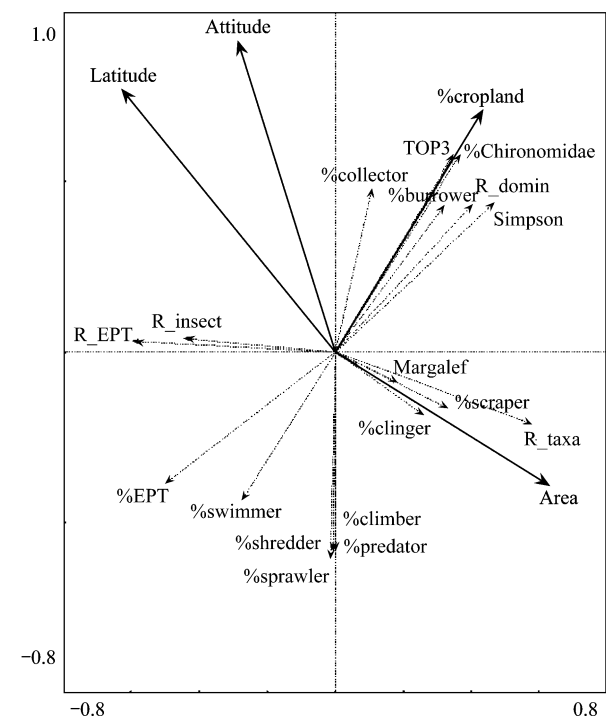


图 3 流域尺度因子和生物因子 RDA 分析结果(代码含义见表 1 和表 2)

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) plot relating catchment-scale variables (solid lines) and macroinvertebrate attributes (dotted lines) (The meaning of the code shown in Table 1 and Table 2)

3 讨论

3.1 大型底栖无脊椎动物与河段尺度因子

本研究结果表明,河段尺度中影响滦河大型底栖无脊椎动物分布的最重要的 6 个因子分别为:细粒物质比例、河岸带植被盖度、河岸带人类干扰程度、河岸带农田比例、水面宽度和河道改造程度。

河床底质和水文特征构成了底栖生物的生存空

间,大量研究表明河流底质是影响底栖动物分布的重要因子,底栖动物的群落组成和分布很大程度上取决于底质类型结构^[22-23]。较高的河床泥沙含量会导致生境多样性降低、食物来源减少和食物质量下降等,从而导致大型底栖无脊椎动物多样性减少^[24],因此一般情况下,巨砾和鹅卵石居多的河床比砾石和细沙居多的河床具有更高的生物多样性^[6]。在国内相关研究中,张勇^[25]和邵卫伟^[26]在钱塘江中游地区研究表明,平均底质得分是河段尺度上底栖动物分布的重要影响因子。段学花^[27]对全国不同纬度的河流研究表明,河床底质多样性和稳定性与底栖动物多样性呈正相关,沙质河床由于生物栖息空间小且不稳定,生物密度和多样性均较低。本研究表明,在滦河流域大型底栖无脊椎动物多样性最高的 3 个样点中,总分类单元数平均值为 26.3,细粒物质比例平均值仅为 6.7% (流域平均值为 47%)。

河岸带植被盖度、河岸带人类干扰程度和河岸带农田比例 3 项指标均表征了河岸带人类干扰程度。河岸带为河流提供了稳定的河岸,可以调节河流水温和光通量,为河道提供粗木质残体以维持生境多样性。河流生态系统依赖来自于河岸带的能量输入,包括植物和陆地无脊椎动物,这些重要的能量输入为河流生物提供了食物来源^[28]。而现今在发展中国家或地区,流域部分自然植被被转换成耕地或建设用地,加大了流域水土流失程度,作为陆地和河流之间的重要连接地带,河岸带缓冲带可以有效地截留泥沙和水体营养物质,从而减轻水体污染^[29]。因此在河岸带管理方面,应及时有效地采取河岸带管理和恢复措施,可以有效地提高河流底栖

动物的多样性^[30],尤其是农业地区^[31]。本研究区大型底栖无脊椎动物多样性最高的3个样点中,河岸带植被盖度平均值为1(流域平均值为0.9),河岸带农田比例平均值为0(流域平均值为0.19),河岸带人类干扰程度为0.67(流域平均值为1.2)。

水面平均宽度在河流物理生境测量中是一个较常规的“中生境”指标,但在大多数研究结果中,水面平均宽度不是生物多样性的关键性影响因子,原因可能如下:水面平均宽度本身不是一个关键性生境指标(如温度、流速、底质等),和关键性生境指标没有绝对的相关性;流域面积较大时,由于局部地形地貌复杂性,尤其是在人类干扰下(如采样点上游存在水库等),局部水面宽度(如本文采取100m河段)存在不可预测性,相比较无人干扰流域河流,其随机性较大。在上述情况下,水面宽度一般不会单独对河流生物多样性产生影响,可能会和其他指标共同作用,进而对河流底栖动物分布产生影响。如Heino^[32]研究表明水面宽度、底质组成、水体颜色和流速在浮游目的分布中有重要影响,而对于毛翅目,水面宽度、大型植物盖度和水体颜色具有重要的影响。本研究中,经Pearson相关分析表明,水面宽度和大型底栖无脊椎动物总分类单元数相关系数为0.03,未达到显著水平。虽然水面宽度在一定程度上影响了全流域大型底栖无脊椎动物分布,但和生物指标以及其他环境指标的相互作用还需要进一步分析。

滦河流域采样点中,河道改造类型主要包括护岸措施、河道挖沙和由于引滦工程引起的河道拓宽现象^[15]。河道改造对于防洪、跨区域引水及城市化建设具有重要作用,但同时破坏了河流生物栖息的物理生境。河流“物理生境”是指河流水生生物生存所依赖的物理环境,由河道结构特征和水文特征共同作用形成^[33],因此河道结构是物理生境中的关键因子。河道改造活动直接或间接作用于河流底质、河流形态、水文特征及河岸带结构变化等河流物理生境特征的退化^[34],而这些变化除了直接作用于生物多样性的结构和变化^[35],还可能通过影响食物供给、生存竞争或捕食关系等途径对其产生间接作用^[36]。由于城市所在地区人为干扰偶然因素较大,本文选择样点尽量分布在城市建成区之外,但河道改造现象在滦河流域仍存在较广。在改造程度最严

重的13个样点中,大型底栖无脊椎动物总分类单元数平均值为11.6,而无河道改造现象的25个样点中,大型底栖无脊椎动物总分类单元数平均值为13.6,经方差分析结果表明,有改造现象和无改造现象的河道中,大型底栖无脊椎动物总分类单元数差异并不显著($P=0.461$)。该研究结果表明,在滦河流域,河道改造在一定程度上能够影响河流底栖动物群落,但其影响程度还需要针对不同的改造方式做进一步的分析。

3.2 大型底栖无脊椎动物与流域尺度因子

本研究结果表明,对大型底栖无脊椎动物影响的流域尺度因子主要为纬度、海拔、%耕地和流域面积。

纬度和海拔因子本身对河流生物不会产生直接影响,而一般是通过温度和降水等因素间接作用于河流生态系统^[37-38]。在热带^[39]和温带^[40]的研究表明,随着海拔升高,生物群落结构会发生明显的变化,生物多样性降低,温度被认为是主要的影响因子。Jacobsen^[41]针对纬度、海拔与河流无脊椎动物的关系做了研究,结果表明随着纬度增加和海拔升高,河流无脊椎动物多样性会降低。本研究中,经过Pearson相关分析,大型底栖无脊椎动物总分类单元数与纬度的相关系数为 -0.341 ($P=0.036$),与海拔的相关系数为 -0.394 ($P=0.014$),均达到了显著水平,表明大型底栖无脊椎动物多样性随着海拔升高和纬度增加,多样性呈下降趋势。

不同的土地利用方式组成通过影响径流量、水质和河床底质组成从而影响河流生物,流域内耕地最终通过影响水体、底质中泥沙含量和营养物质浓度从而影响大型底栖无脊椎动物群落结构^[42]。Jun^[24]通过对比两条河流(一个流域植被为原始森林,一个流域内耕地密度较高)大型底栖无脊椎动物群落,发现耕地密度较高的流域主要通过水土流失的方式对河流底质产生影响,从而降低了大型底栖无脊椎动物多样性。邵卫伟^[26]研究表明耕地比例是影响底栖动物分布的关键环境胁迫因子。也有学者观点相反,Moore^[43]研究发现农业地区河流大型无脊椎动物多样性较高,认为如果管理合理,农业地区有助于保护河流无脊椎动物多样性。本研究中,耕地主要分布在下游平原地区,流域耕地面积比例较高的6个样点中,大型底栖无脊椎动物总分类单元

数平均值为 8.7,而在流域耕地面积比例较低的 6 个样点中,大型底栖无脊椎动物总分类单元数平均值为 17.8,表明在滦河流域,流域内自然植被转换成农业用地,如果没有采取相应的管理措施,可能会导致水土流失等问题,将不利于河流生物多样性的保护。

在本研究采样中,下游干流采样点所控制的流域面积最大,其次为中游采样点,上游采样点所控制流域面积最小。通常情况下,河流等级越高的河段拥有的流域面积越大,而河流等级本身会对河流生物多样性产生影响,Minshall^[44]研究表明中等级河流底栖动物多样性最高,而低等级和高等级河流底栖动物多样性较低。此外,本研究区下游主要属于平原地区,人类活动强度较上游山区更为强烈,河流生态系统也可能更易受到人类活动干扰^[25]。

3.3 大型底栖无脊椎动物与多尺度因子

本文探讨了两个尺度因子对于大型底栖无脊椎动物分布的影响。究竟哪个尺度因子影响更大,国内外学者进行了一系列研究,但尺度划分标准有所不同。如 Tornblom^[45]将尺度划分为土地利用尺度、河岸带尺度和河道内生境尺度;Feld^[46]将尺度划分为生态区尺度、流域尺度、河段尺度和点位尺度;Sandin^[47]将尺度划分为区域尺度、景观尺度和局地尺度。

如果将“流域尺度”、“区域尺度”划分为较大尺度,而“河段尺度”和“点位尺度”为较小尺度,总结国内外研究,发现有 3 种不同的结论:小尺度因子解释度更高^[8, 25, 47-48]、大尺度因子解释度更高^[45, 49-50]以及两者解释度较为相近^[51]。相比于其它两种结论,大多数研究认为小尺度因子解释度较高。为什么不同尺度因子的解释度在不同的研究区表现出不一致?关于这个问题,Gombeer^[52]认为这和研究区面积有关,随着研究区面积减小,小尺度因子会变得更加重要。Li^[50]认为,流域内自然条件和人为干扰程度也会对关键尺度因子产生影响。

本研究结果与大多数研究结果相似,小尺度因子解释度更高,表现为河段尺度因子(0.42)比流域尺度因子(0.32)解释度高。这可能与研究区中大部分区域人类活动强度较高、河岸带遭到严重破坏有关。在滦河流域,河流水体和底质特征除了受到气候、地质条件等大尺度因子影响之外,更容易受到与河流距离较近的河流洪泛区内人类活动的影响。

4 结论

由于滦河流域内自然条件和人类活动强度存在空间差异,河流大型底栖无脊椎动物群落受到多种因素的综合影响。本文主要研究了流域尺度因子和河段尺度因子对大型底栖无脊椎动物的影响,结果表明相比较流域尺度,大型底栖无脊椎动物更容易受到河段尺度因子的影响,在河流大型底栖无脊椎动物多样性监测和保护中,可能更应该注重河段尺度因子的空间变化和管理。

References:

- [1] Travis J M J. Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2003, 270(1514): 467-473.
- [2] Strayer D L, Dudgeon D. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1): 344-358.
- [3] Clausnitzer V, Kalkman V J, Ram M, Collen B, Baillie J E M, Bedjanič M, Darwall W R T, Dijkstra K D B, Dow R, Hawking J, Karube H, Malikova E, Paulson D, Schütte K, Suhling F, Villanueva R J, Von Ellenrieder N, Wilson K. Odonata enter the biodiversity crisis debate: The first global assessment of an insect group. *Biological Conservation*, 2009, 142(8): 1864-1869.
- [4] Li Z, Zhang Y, Yuan J P, Lu L. Review of the role of benthic Macro-invertebrates as indicators on river health assessment. *South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology*, 2011, 9(4): 96-101.
- [5] Statzner B, Higl B. Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns. *Freshwater Biology*, 1986, 16(1): 127-139.
- [6] Cobb D G, Galloway T D, Flannagan J F. Effects of discharge and substrate stability on density and species composition of *Stream Insects*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, 49(9): 1788-1795.
- [7] Allan J D, Johnson L B. Catchment-scale analysis of aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 107-111.
- [8] Johnson R K, Furse M T, Hering D, Sandin L. Ecological relationships between stream communities and spatial scale: implications for designing catchment-level monitoring programmes. *Freshwater Biology*, 2007, 52(5): 939-958.
- [9] Cao Z G, Liu J L, Luan Y, Li Y L, Han S L, Liu B Y, Wang S M. Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments and water of the Luan River, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 246-253.
- [10] Li Y L, Liu J L. Health risk assessment on heavy metal pollution

- in the water environment of Luan River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1177-1184.
- [11] Xie Y, Li X Y, Wang H L, Li W Z. Stream pollution analysis and hydrochemical assessment of the upper Luanhe River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3): 645-653.
- [12] Wang Q P, Liu J Y. Analyzing the impact of climate change and human activity on the water resources change in the lower reach of Luan River. *China Water Resources*, 2010, (15): 41-44.
- [13] Yuan Z, Yang Z Y, Dong G Q. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff in the Luanhe River basin during recent 47 years. *South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology*, 2012, 10(4): 66-69.
- [14] Xu Z M, Hu Z Y, Lin L. Ecological and environmental water safety analysis in Luanhe River Basin. *Yellow River*, 2010, 32(7): 44-46.
- [15] Qian C L. Effects of the water conservancy projects on river course at the lower reaches of the Luanhe River. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1995, 7(2): 80-84.
- [16] Wang L, Gan H, Fu X C, Wang F. Species and distribution of macrozoobenthos in the main stream of middle reaches of Luanhe River. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(4): 671-676.
- [17] Merritt R W, Cummins K W. An introduction to the aquatic insects of North America. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 1996:50-754.
- [18] Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, Wang E Y. Economic Fauna of China—Freshwater Mollusca. Beijing: Science Press, 1979: 74-126
- [19] More J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [20] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish-Second Edition. Washington: Environmental Protection Agency, 1996: 51-535.
- [21] Department of Environment and Resource Management. Queensland community waterway monitoring manual, Queensland Government, Brisbane, 2007.
- [22] Buss D F, Baptista D F, Nessimian J L, Egler M. Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 2004, 518(1/3): 179-188.
- [23] Beauger A, Lair N, Reyes-Marchant P, Peiry J L. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics. *Hydrobiologia*, 2006, 571(1): 63-76.
- [24] Jun Y C, Kim N Y, Kwon S J, Han S C, Hwang I C, Park J H, Won D H, Byun M S, Kong H Y, Lee J E, Hwang S J. Effects of land use on benthic macroinvertebrate communities; Comparison of two mountain streams in Korea. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2011, 47(S1): S35-S49.
- [25] Zhang Y, Liu S R, Yu H Y, Liu D X, Wang B X. Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4309-4317.
- [26] Shao W W, Zhang Y, Yu H Y, Han M C, Wang B X. Impacts of different land use on stream macroinvertebrate communities. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24(3): 18-23.
- [27] Duan X H, Wang Z Y, Cheng D S. Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [28] Hoover S E R, Shannon L G W, Ackerman J D. The effect of riparian condition on invertebrate drift in mountain streams. *Aquatic Sciences*, 2007, 69(4): 544-553.
- [29] Broadmeadow S, Nisbet T R. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(3): 286-305.
- [30] Clews E, Ormerod S J. Appraising riparian management effects on benthic macroinvertebrates in the Wye River system. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2010, 20(S1): S73-S81.
- [31] Greenwood M J, Harding J S, Niyogi D K, McIntosh A R. Improving the effectiveness of riparian management for aquatic invertebrates in a degraded agricultural landscape: stream size and land-use legacies. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(1): 213-222.
- [32] Heino J, Mykrä H. Control of stream insect assemblages: roles of spatial configuration and local environmental factors. *Ecological Entomology*, 2008, 33(5): 614-622.
- [33] Maddock I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 373-391.
- [34] Sear D A, Wilcock D, Robinson M R, Fisher K R. Channel modifications and impacts//Acreman M, ed. *The Changing Hydrology of the UK*. London: Routledge, 2000: 55-81.
- [35] Elosegi A, Díez J, Mutz M. Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems. *Hydrobiologia*, 2010, 657(1): 199-215.
- [36] Frissell C A, Liss W J, Warren C E, Hurley M D. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 1986, 10(2): 199-214.
- [37] Mori T, Murakami M, Saitoh T. Latitudinal gradients in stream invertebrate assemblages at a regional scale on Hokkaido Island, Japan. *Freshwater Biology*, 2010, 55(7): 1520-1532.
- [38] Dudgeon D. Responses of benthic macroinvertebrate communities

- to altitude and geology in tributaries of the Sepik River (Papua New Guinea): the influence of taxonomic resolution on the detection of environmental gradients. *Freshwater Biology*, 2012, 57(9): 1794-1812.
- [39] Williams T R, Hynes H B N. A survey of the fauna of streams on Mount Elgon, East Africa, with special reference to the Simuliidae (Diptera). *Freshwater Biology*, 1971, 1(3): 227-248.
- [40] Ward J V. Altitudinal zonation of plecoptera in a Rocky Mountain stream. *Aquatic Insects: International Journal of Freshwater Entomology*, 1982, 4(2): 105-110.
- [41] Jacobsen D, Schultz R, Encalada A. Structure and diversity of stream invertebrate assemblages; the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology*, 1997, 38(2): 247-261.
- [42] Quinn J M, Stroud M J. Water quality and sediment and nutrient export from New Zealand hill-land catchments of contrasting land use. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2002, 36(2): 409-429.
- [43] Moore A A, Palmer M A. Invertebrate biodiversity in agricultural and urban headwater streams; Implications for conservation and management. *Ecological Applications*, 2005, 15(4): 1169-1177.
- [44] Minshall G W, Peterson R C Jr, Nimz C F. Species richness in streams of different size from the same drainage basin. *The American Naturalist*, 1985, 125(1): 16-38.
- [45] Törnblom J, Angelstam P, Degerman E, Henrikson L, Edman T, Temnerud J. Catchment land cover as a proxy for macroinvertebrate assemblage structure in Carpathian Mountain streams. *Hydrobiologia*, 2011, 673(1): 153-168.
- [46] Feld C K, Hering D. Community structure or function; Effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales. *Freshwater Biology*, 2007, 52(7): 1380-1399.
- [47] Sandin L, Johnson R K. Local, landscape and regional factors structuring benthic macroinvertebrate assemblages in Swedish streams. *Landscape Ecology*, 2004, 19(5): 501-514.
- [48] Brosse S, Arbuckle C J, Townsend C R. Habitat scale and biodiversity: influence of catchment, stream reach and bedform scales on local invertebrate diversity. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12(10): 2057-2075.
- [49] Galbraith H S, Vaughn C C, Meier C K. Environmental variables interact across spatial scales to structure trichopteran assemblages in Ouachita Mountain rivers. *Hydrobiologia*, 2008, 596(1): 401-411.
- [50] Li F Q, Chung N, Bae M J, Kwon Y S, Park Y S. Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 2012, 57(10): 2107-2124.
- [51] Johnson R K, Goedkoop W, Sandin L. Spatial scale and ecological relationships between the macroinvertebrate communities of stony habitats of streams and lakes. *Freshwater Biology*, 2004, 49(9): 1179-1194.
- [52] Gombeer S C, Knapen D, Bervoets L. The influence of different spatial-scale variables on caddisfly assemblages in Flemish lowland streams. *Ecological Entomology*, 2011, 36(3): 355-368.
- 参考文献:**
- [4] 李镇, 张岩, 袁建平, 卢路. 大型底栖无脊椎动物在河流健康评价中的发展趋势. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(4): 96-101.
- [9] 曹治国, 刘静玲, 栾芸, 李永丽, 韩守亮, 刘宝艳, 王少明. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 246-253.
- [10] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1177-1184.
- [11] 解莹, 李叙勇, 王慧亮, 李文赞. 滦河流域上游地区主要河流污水污染特征及评价. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 645-653.
- [12] 王庆平, 刘金艳. 气候变化和人类活动对滦河下游地区水资源变化影响分析. *中国水利*, 2010, (15): 41-44.
- [13] 袁喆, 杨志勇, 董国强. 近 47 年来降水变化和人类活动对滦河流域年径流量的影响. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 66-69.
- [14] 许拯民, 胡志杨, 林丽. 滦河下游区域生态环境用水安全分析. *人民黄河*, 2010, 32(7): 44-46.
- [15] 钱春林. 引滦工程对滦河下游河道的影响. *云南地理环境研究*, 1995, 7(2): 80-84.
- [16] 王琳, 甘泓, 傅小城, 王芳. 滦河中游干流底栖动物种类及分布. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 671-676.
- [18] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. *中国经济动物志-淡水软体动物*. 北京: 科学出版社, 1979: 74-126.
- [25] 张勇, 刘朔孺, 于海燕, 刘东晓, 王备新. 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. *生态学报*, 2012, 32(14): 4309-4317.
- [26] 邵卫伟, 张勇, 于海燕, 韩明春, 王备新. 不同土地利用对溪流大型底栖无脊椎动物群落的影响. *环境监测管理与技术*, 2012, 24(3): 18-23.
- [27] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. *生态学报*, 2007, 27(4): 1664-1672.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill
sludge CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant
plants and soil in alpine meadow LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 象伟宁

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元