

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

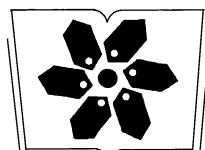
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第21期 Vol.32 No.21 2012

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 (SHENTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 21 期 2012 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允, 祝贵兵, 曲冬梅, 等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧, 苗颖, 陆兆华, 等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红, 郭艳丽, 孙鹏, 等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈展, 林波, 尚鹤, 等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁婕, 蔡青, 郭生练, 等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚, 丁陈利, 肖明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云, 李宝惠, 王建, 等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元, 赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应 .....	谭波, 吴福忠, 杨万勤, 等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫, 布仁仓, 刘晓梅, 等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全, 赵晨霞, 张显川, 等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏, 戴传超, 戴志东, 等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系 .....	苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽, 陶冶, 刘会良, 等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王强, 袁兴中, 刘红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系 .....	吴忠鑫, 张磊, 张秀梅, 等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化 .....	杨青, 王真良, 樊景凤, 等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配 .....	高虹, 陈圣宾, 欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例 .....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张霞, 李占斌, 张振文, 等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征 .....	黄宝强, 寇勇, 安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨扬, 孟德龙, 秦红灵, 等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟, 娄恺, 曾军, 等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟, 李凤超, 张强, 等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响 .....	陆正和, 赵宝坤, 杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁, 祝思, 蔡若茹, 等 (6836)
黄码草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应 .....	李水泉, 黄寿山, 韩诗畴, 等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性 .....	高磊, 杨燕, 贺军州, 等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进, 吴海, 刘富林, 等 (6856)
<b>专论与综述</b>	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈浩, 莫江明, 张炜, 等 (6864)
全球 $\text{CO}_2$ 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展 .....	赵旭辉, 孔繁翔, 谢薇薇, 等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇, 李杜, 陈蕾, 等 (6892)
<b>研究简报</b>	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配 .....	康文星, 熊振湘, 何介南, 等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局 .....	任珩, 赵成章, 高福元, 等 (6909)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-11	



**封面图说:** 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落, 村庄、苇地、园田星罗棋布, 在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面, 具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污水、农田径流进入水域, 淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性, 使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

彩图提供: 王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI:10.5846/stxb201109161357

王强,袁兴中,刘红.山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.生态学报,2012,32(21):6726-6736.  
Wang Q, Yuan X Z, Liu H. Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21):6726-6736.

## 山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究 ——以重庆开县东河为例

王 强<sup>1,2,3</sup>,袁兴中<sup>1,2,4,\*</sup>,刘 红<sup>1</sup>

(1. 重庆大学资源及环境科学学院,重庆 400030; 2. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030;  
3. 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室 水产科学重庆市市级重点实验室 西南大学生命科学学院,重庆 400715;  
4. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**浅滩和深潭是山地河流中常见的河流生境结构。2011年7月,在重庆开县东河上游双河口-杉木桥河段,选择21个浅滩和深潭,调查大型底栖动物,研究影响不同生境中底栖动物组成、分布和多样性的生态机理。结果表明:调查河段浅滩和深潭中大型底栖动物分别为31种和24种,密度分别为450.62个/m<sup>2</sup>和86.24个/m<sup>2</sup>,生物量分别为2.88 g/m<sup>2</sup>和0.55 g/m<sup>2</sup>。浅滩有指示种11种,即纹石蛾(*Hydropsyche* sp.)、假蜉(*Isonychia* sp.)、假二翅蜉(*Pseudocloeon* sp.)、舌石蛾(*Glossosoma* sp.)、高翔蜉(*Epeorus* sp. 1)、背刺蜉(*Notacanthurus* sp.)、*Heterocloeon* sp.、锯形蜉(*Serratella* sp.)、朝大蚊(*Antocha* sp.)、等蜉(*Isonychia* sp.)、溪颈蜉(*Rhithrogena* sp.)。深潭指示种仅蜉蝣(*Ephemera* sp.)和黑大蚊(*Hexatoma* sp.)两种。刮食者为两类生境的优势功能摄食类群。浅滩中滤食者和刮食者比例显著高于深潭,而收集者和捕食者显著低于深潭。两类生境中大型底栖动物群落结构差异显著。浅滩中大型底栖动物的密度、生物量、丰富度指数、Shannon-Wiener指数、改进的Shannon-Wiener指数均明显高于深潭。受地貌形态、水力特征和冲淤变化规律影响的生境稳定性和异质性差异是导致大型底栖动物群落差异的主要原因。

**关键词:**大型底栖动物;浅滩;深潭;生境;除趋势对应分析(DCA);功能摄食类群;山地河流;指示种分析

## Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China

WANG Qiang<sup>1,2,3</sup>, YUAN Xingzhong<sup>1,2,4,\*</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>

1 College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2 Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

3 Key Laboratory of Aquatic Organism Reproduction and Development of Ministry of Education, Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, School of Life Science Southwest University, Chongqing, 400715, China

4 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China

**Abstract:** Riffle and pool, which exhibit very different physical characteristics (such as depth, velocity, substrate), are basic and common habitat units in mountain rivers. The benthic macroinvertebrate is an important connector among the different trophic levels of stream ecosystem and its community could be easily affected by variation of physical characteristics of microhabitat. However, previous researches did not always demonstrate a clear difference of community structure and diversity between riffle and pool macroinvertebrate. Dong River is a typical mountain stream which is located in a karst area of southwestern China, namely Kaixian County of Chongqing. In order to study variations in structure, composition and

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51179214)资助;重庆市环保局河流健康评估重大科技项目资助(20111131)

**收稿日期:**2011-09-16; **修订日期:**2012-02-07

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail:xzyuan63@yahoo.com.cn

diversity between riffle and pool macroinvertebrate assemblage, we chose twenty one pairs of riffles and pools to investigate benthic macroinvertebrate species in upstream of Dong River in July 2011. Our results indicated that the difference of water quality was not significant between the two habitats. However, the riffle habitat not only had a wider water surface and faster flow velocity, but also contained bigger substrate than those of the pool habitat. The number of species was thirty one in riffles and twenty four in pools. Density and wet biomass of macroinvertebrate assemblage in riffles were 450.62 ind/m<sup>2</sup> and 2.88 g/m<sup>2</sup>, respectively, comparing to 86.24 ind/m<sup>2</sup> and 0.55 g/m<sup>2</sup> in pools. Mayfly was the group with the highest density, abundance and species richness in both habitats. Virtually all species were more abundant in riffles than those in pools, except chironomids, *Ephemera* sp and *Hexatoma* sp which were more abundant in pools. Indicator Species Analysis indicated that a greater number of taxa, including *Hydropsyche* sp, *Iron* sp, *Pseudocloeon* sp, *Glossosoma* sp, *Epeorus* sp2, *Notacanthurus* sp, *Heterocloeon* sp, *Serratella* sp, *Antocha* sp, *Isonychia* sp and *Rhithrogena* sp, were restricted to riffles, while only two species, *Ephemera* sp and *Hexatoma* sp, were indicator species of pools. Kruskal-Wallis Test indicated that relative abundance of each functional feeding group was significantly different between the two habitats. Scraper was the dominant functional feeding group in both habitats, while shredder had the lowest relative abundance. Relative abundance of functional feeding groups between riffle and pool were significantly different except that of shredder. Riffles exhibited significantly higher percentage of collector-filterer and scraper, while percentage of collector-gatherer and predator in pools were significantly higher than that of riffles. Detrended Correspondence Analysis indicated that the difference of macroinvertebrate community structure was obvious between the two habitats. Density, wet biomass, species richness, Shannon-Wiener index and Improved Shannon-Wiener index of riffles were significantly higher than those of pools, which was similar with former researches conducted in mountain stream with stony substrate. Pool characterized by small and loose substrate is unstable and vulnerable habitat for benthic macroinvertebrate to resist fast flow during the flooding period. However, bigger substrate of riffle as a result of erosion creates a much more diverse and stable for macroinvertebrate to escape predators and disturbance of scouring. Therefore, habitat stability and heterogeneity affected by habitat morphology, hydraulic characteristics and erosion/deposition pattern may be the major explanation.

**Key Words:** macroinvertebrate; riffle; pool; habitat; detrended correspondence analysis (DCA); functional feeding groups; upland stream; indicator species analysis

自然河道中紊乱的水流对河床的不均匀作用常使河床发育出凹凸不平的起伏<sup>[1]</sup>。河流地貌学中,一般将河床中凸起的区域称为浅滩,将河床中凹陷的区域称为深潭或深槽<sup>[2]</sup>。浅滩和深潭是在山地河流河段尺度上最常见生境结构类型<sup>[3]</sup>,在河道中常交替出现,形成浅滩-深潭序列。浅滩-深潭序列可明显增大河床阻力,消耗水流能量,改善水生生物栖息条件,对保持河床稳定,维持水生生物多样性,保持河流生态系统健康具有积极作用<sup>[4-7]</sup>。

大型底栖动物是河流生态系统中最常见的水生生物类群,对河流生态系统的物质循环、能量流动具有不可替代的作用和意义<sup>[8]</sup>。大型底栖动物群落结构和分布对河流的级别、营养动态、生境的物理结构等环境因素相当敏感<sup>[9-10]</sup>。浅滩和深潭的水力条件、底质组成等差异较大<sup>[11]</sup>,因此多数研究发现两类生境中的底栖动物群落差异明显<sup>[12]</sup>。但是由于不同的研究区域在自然环境条件和物种组成上的差异,一些研究发现浅滩中具有较高的多样性和较多的特征种<sup>[13-15]</sup>,而另外一些研究却发现正好相反的规律<sup>[16-17]</sup>。国内河流大型底栖动物群落生态学的研究主要集中在应用大型底栖动物进行河流环境评估和研究流域尺度上水文特征、水体理化指标、土地利用等环境因素的空间异质性对群落的影响两个方面。国内仅李金国等<sup>[18]</sup>对凉水、帽儿山溪流急流区(浅滩)和稳水区(深潭)中的水生昆虫进行了一些比较。目前对河段尺度上河流大型底栖动物的空间分布规律及生态影响机制尚不清晰。

为此,本文以典型的山地河流—重庆开县东河上游河段为研究区域,比较了浅滩深潭中大型底栖动物群

落,探讨了影响不同生境中底栖动物组成、分布和多样性的生态机理,以期为山地河流河段尺度的生境恢复和科学管理提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

东河系长江干流左岸一级支流澎溪河的正源,发源于重庆市开县白泉乡一字梁。东河干流全长 96.7 km,流域面积 1426.6 km<sup>2</sup>,海拔高程 160—2626 m,河道平均比降 7.9‰。东河源头在位于大巴山南坡的雪宝山国家级自然保护区内,是秦巴山区生物多样性关键区域的组成部分。流域属中山地貌,总体地势北高南低,尤其上游河段,山高谷深,河段侵蚀溶蚀强烈,多呈 V 型峡谷。流域内多年平均降雨量 1530 mm,雨季长,洪旱交替出现。

本次调查区域为位于东河上游的双河口(N31°33'.51' E108°36.64',海拔 445 m)-杉木桥(N31°32.07' E108°44.40',海拔 756 m)河段(图 1)。该河段河流级别为 4 级(Strahler 河流分级法,即同等级别河流汇合后河流级别提高<sup>[19]</sup>),河段全长 17.8 km,平均比降 17.4‰。调查区域人口密度低,人为干扰较小,河流水质洁净,河岸植物茂密,河道形态完整,生境状况较好。

### 1.2 采样方法

2011 年 7 月中旬,在调查河段选择 21 个自然的浅滩-深潭序列,进行调查。采样工具为索伯网(底面边长 30 cm×30 cm,面积 0.09 m<sup>2</sup>,网径 40 目(0.5 mm))。将索伯网放入河床后,用毛刷清洗大型石块,使附着在石块上的底栖动物流入网中。然后用铁铲搅动石块下面的底质,搅动深度大于 10 cm<sup>[20]</sup>。深潭生境水深大,流速一般较低,底栖动物定量调查不宜选择索伯网、踢网等适用于浅滩的采样工具<sup>[21]</sup>,一般选择赫斯采样器(Hess sampler)、采泥器等<sup>[16,22]</sup>。但不同采样器在采样面积、采集效率上的差异将影响结果的可比性。为此,在索伯网前端添加金属支架,并用帆布将前面和左右两侧面连接(防止网内底栖动物逃逸),形成类似于赫斯采样器的方框,采样面积、网径保持不变。将改装后的索伯网放入深潭后,挖掘网内深度 10 cm 内的河床底

质,用 40 目(孔径 0.5 mm)铜筛筛选底栖动物。每个生境采集 3 网(样方),采样点尽可能靠近河床深泓线。75% 酒精保存样品,带回室内镜检。物种尽可能鉴定至最低的分类单元。用万分之一电子天平称重,称重前先用滤纸吸干标本体表液体。

水体理化指标(pH 值、温度、溶解氧、电导率、总固体溶解度)采用便携式多参数测量仪(美国哈希 sension156)测量。水面宽度用激光测距仪测量(美国博士能 ELITE 1500)。水深用直尺测量。流速用旋杯式流速仪(重庆华正 LS45A)测定 0.6 倍水深处的流速。底质类型按照 Cummins 的划分方法<sup>[23]</sup>记录。

### 1.3 功能摄食类群的划分

底栖动物功能摄食类群一般可以根据底栖动物摄食对象和摄食方法的差异划分为 5 大类:滤食者(Collector-filterer, CF),收集者(Collector-gatherer, CG),捕食者(Predator, PR),SC 刮食者(Scraper, SC),撕食者(Shredder, SH)。参照段学花对中国常见科的功能摄食群类群的整理以及美国环保署对全美大型底栖动物

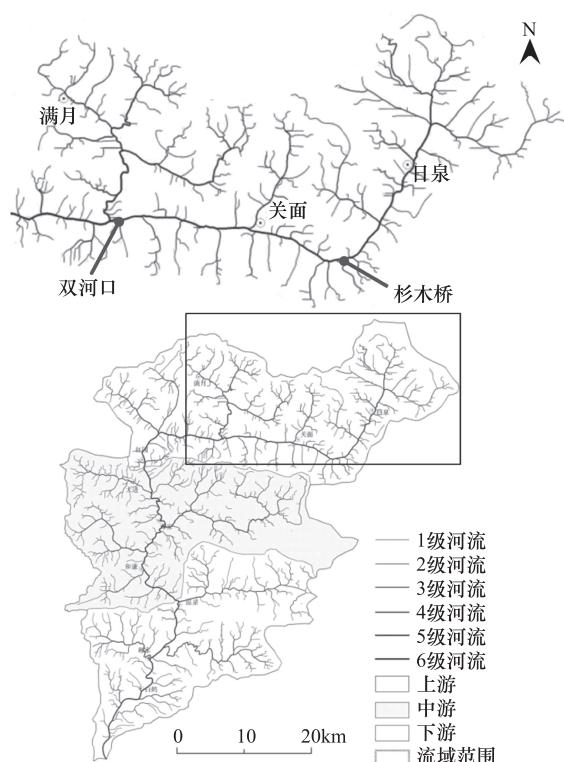


图 1 东河水系图与调查河段(双河口-杉木桥)启始位置

Fig. 1 Drainage map of Dong River. Sampling river reach ranges from Shuanghekou to Shamuqiao

功能摄食群的划分等资料<sup>[24-25]</sup>确定本次调查采集的底栖动物的功能摄食类群。

#### 1.4 数据处理

采用丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和改进的 Shannon-Wiener 指数<sup>[26]</sup>评价底栖动物群落多样性。

选用 SPSS 15.0 中的 One-way ANOVA 对两类生境的水体理化指标、大型底栖动物密度、生物量、物种多样性指标、功能摄食群比例等数据进行差异显著性检验。若方差不齐,选用非参数检验的 Kruskal-Wallis H 检验差异显著性。显著性水平取 0.05。

选用指示种分析(ISA)确定浅滩深潭生境的指示物种。ISA 中用结合物种相对多度(RA)和相对频度(RF)信息的指示值(IV)来反映物种对环境的指示作用强度<sup>[27]</sup>。IV 计算公式为:IV=100×RA×RF。其中 RA 指的是某类环境中某物种多度占所有环境类型中该物种总多度的比率,不同于群落结构分析中常用的相对多度;RF 指的是某物种在某类环境的样方中出现的频率。IV 变化范围为 0—100。当某物种的所有个体只在某类环境中出现,且在该类环境的所有样方中均有分布,则该物种在该类环境中的 IV 值为 100。某物种在各环境类型中的 IV 值差异显著性用 Monte Carlo test 检验确定。

以 21 个浅滩和 21 个深潭中 33 个物种的多度数据为基础,构建 33×42 维矩阵进行除趋势对应分析(DCA),分析两类生境中底栖动物群落的差异。浅滩和深潭生境分别按照海拔从低到高依次编号。DCA 分析及制图用 CANOCO4.5 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体理化性质

两类生境水质的 pH 值平均值略高于 8,平均溶解氧浓度较高,约 7 mg/L(表 1)。电导率和总固体溶解度与水样中离子浓度、矿物质含量等因素有关。这两个指标越高,表明水样的纯度就越低。两类生境水质电导率和总固体溶解度偏低,表明水质纯度较好,水质洁净。方差分析(ANOVA)表明两类生境的 pH 值、溶解氧、电导率和总固体溶解度差异不明显( $P>0.05$ )。浅滩与深潭生境的水面平均宽度差异不明显( $P=0.05$ ),但在水深和流速方面具有极显著的差异( $P<0.01$ )。绝大多数浅滩的河床底质以漂砾、圆石为主,而深潭的河床底质偏小,以小圆石为主(表 1)。

表 1 调查河段浅滩·深潭生境物理特征与水体理化性质性(平均值±标准差)

Table 1 Physical features and water physicochemical parameters of riffles and pools in sampling river reaches (mean±SD)

参数 Parameters	浅滩 Riffles	深潭 Pools	ANOVA		Kruskal-Wallis Test	
			F	P	H	P
pH	8.17±0.82	8.27±0.81	0.16	0.694		
温度 T/℃	19.93±1.53	20.02±1.56	0.04	0.850		
溶解氧 DO /( mg/L)	7.00±0.72	6.92±0.47	0.21	0.652		
电导率 Cond /( μS/cm)	203.48±25.38	197.95±29.62	0.42	0.519		
总固体溶解度 TDS/( mg/L)	107.69±15.86	105.38±16.85	0.21	0.651		
水面宽度 Mean width /m	14.1±6.6	10.2±5.9	4.10	0.050		
水深 Mean depth/cm	29.11±6.75	46.22±9.48			22.15	<0.01
流速 Flow velocity /( m/s)	0.59±0.12	0.26±0.11	86.30	<0.01		
优势河床底质类型出现频次 <sup>*</sup> Frequency of dominated substrate						
漂砾 Boulder( >256 mm)	9	1	—	—	—	—
圆石 Cobble (64—256 mm)	9	2	—	—	—	—
小圆石 Pebble (16—64 mm)	3	16	—	—	—	—
粗砂 Gravel (2—16 mm)	0	2	—	—	—	—

\* 底质类型按照 Cummins 的方法<sup>[23]</sup>划分:砂砾 gravel (2—16 mm),卵石 pebble (16—64 mm),圆石 cobble (64—256 mm),漂砾 boulder (>256 mm),基岩 bedrock

## 2.2 群落结构

本次调查共采集到3044头大型底栖动物,隶属于2门,3纲,8目,20科33种(表2)。在浅滩生境中共采集到底栖动物2555头31种,在深潭生境中采集到489头24种。大型底栖动物物种丰富度从高到低的顺序依次为:蜉蝣目(17种)、双翅目(6种)、毛翅目(3种)、𫌀翅目(2种)、鞘翅目(2种)、软体动物(2种)、蜻蜓目(1种)。

蜉蝣目底栖动物的密度和相对多度在两类生境中均为最高。浅滩中,毛翅目底栖动物密度为151.85个/ $m^2$ ,相对多度为33.70% (表2),而在深潭中毛翅目的密度和相对多度大大降低,分别为3.54个/ $m^2$ 和4.09%。深潭中软体动物、双翅目的密度明显低于浅滩,而相对多度却正好相反。

表2 浅滩-深潭生境中大型底栖动物的指示值与群落结构

Table 2 Indicator value and community structure for benthic macroinvertebrate in riffles and pools

类群 Taxon	FFG <sup>a</sup>	指示值 <sup>b</sup> Indicator value	出现频次 Frequency		密度 Density (个/ $m^2$ )		相对多度 Relative abundance/%	
			浅滩 Riffles	深潭 Pools	浅滩 Riffles	深潭 Pools	浅滩 Riffles	深潭 Pools
节肢动物门 Arthropoda								
双翅目 Diptera								
蚋科 Simuliidae	CF	14.3	3		0.88		0.20	
大蚊科 Tipulidae								
朝大蚊属 <i>Antocha</i> sp.	CG	36.2(R*)	9	3	4.76	0.88	1.06	1.02
黑大蚊属 <i>Hexatoma</i> sp.	PR	47.5(P*)	4	13	1.23	4.06	0.27	4.70
摇蚊科 Chironomidae								
长足摇蚊属 <i>Tanypodinae</i> sp.	PR	21.4	6	9	2.12	2.12	0.47	2.45
摇蚊属 <i>Camptochironomus</i> sp.	CG	27.5	2	7	0.53	2.47	0.12	2.86
蠓科 Ceratopogonidae	PR	2.4	1	1	0.18	0.18	0.04	0.20
小计 Subtotal		—	—	—	9.70	9.71	2.15	11.25
蜉蝣目 Ephemeroptera								
等蜉科 Isonychiidae								
等蜉属 <i>Isonychia</i> sp.	CF	28.6(R*)	6		1.59		0.35	
四节蜉科 Baetidae								
假二翅蜉属 <i>Pseudocloeon</i> sp.	SC	87.4(R**)	21	18	104.23	14.99	23.13	17.38
四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	CG	52.5	18	14	19.75	12.52	4.38	14.52
<i>Acentrella</i> sp. 1	CG	20.4	5	1	1.06	0.18	0.23	0.20
<i>Acentrella</i> sp. 2	CG	23.8	5		2.12		0.47	
<i>Heterocloeon</i> sp.	SC	57.6(R**)	15	2	8.82	2.12	1.96	2.45
蜉蝣科 Ephemeridae								
蜉蝣属 <i>Ephemera</i> sp.	CG	73.4(P**)	2	16	0.35	9.35	0.08	10.84
小蜉科 Ephemerellidae								
弯握蜉属 <i>Runella</i> sp.	PR	19.8	5	1	0.88	0.18	0.20	0.20
带肋蜉属 <i>Cincticostella</i> sp.	CG	4.8	1		0.18		0.04	
锯形蜉属 <i>Serratella</i> sp.	CG	55.0(R*)	16	7	4.59	1.76	1.02	2.04
细裳蜉科 Ephemeroptera								
似宽基蜉属 <i>Choroterpides</i> sp.	CG	14.3		3		0.88		1.02
扁蜉科 Heptageniidae								
高翔蜉属 <i>Epeorus</i> sp. 1	SC	19.0	4		0.71		0.16	
高翔蜉属 <i>Epeorus</i> sp. 2	SC	66.7(R**)	14		18.87		4.19	
假蜉属 <i>Itron</i> sp.	SC	95.4(R**)	21	11	69.31	3.35	15.38	3.89
背刺蜉属 <i>Notacanthurus</i> sp.	SC	60.0(R**)	14	3	7.94	0.88	1.76	1.02

续表

类群 Taxon	FFG <sup>a</sup>	指示值 <sup>b</sup> Indicator value	出现频次 Frequency		密度 Density /(个/m <sup>2</sup> )		相对多度 Relative abundance/%	
			浅滩 Riffles	深潭 Pools	浅滩 Riffles	深潭 Pools	浅滩 Riffles	深潭 Pools
动蜉属 <i>Cinygmina</i> sp.	SC	34.1	12	13	9.35	11.46	2.07	13.29
溪颈蜉属 <i>Rhithrogena</i> sp.	SC	27.3(R <sup>*</sup> )	6	2	7.41	0.35	1.64	0.41
小计 Subtotal		—	—	—	257.16	58.02	57.06	67.28
毛翅目 Trichoptera								
纹石蛾科 Hydropsychidae								
纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> sp.	CF	97.3(R <sup>**</sup> )	21	10	95.77	2.65	21.25	3.07
舌石蛾科 Glossosomatidae								
舌石蛾属 <i>Glossosoma</i> sp.	SC	75.2(R <sup>**</sup> )	16	3	56.08	0.71	12.45	0.82
沼石蛾科 Limnephilidae	SH	4.8		1		0.18		0.20
小计 Subtotal		—	—	—	151.85	3.54	33.70	4.09
𫌀翅目 Plecoptera								
石蝇科 Perlidae	PR	4.8	1		0.18		0.04	
短尾石蝇科 Nemouridae	SH	4.8	1		0.18		0.04	
小计 Subtotal		—	—	—	0.36		0.08	
鞘翅目 Coleoptera								
扁泥甲科 Psephenidae	SC	2.4	1	1	0.18	0.18	0.04	0.20
长角泥甲科 Elmidae								
狭溪泥甲属 <i>Stenelmis</i> sp.	SC	34.1	10	8	6.70	2.65	1.49	3.07
小计 Subtotal	—	—	—	—	6.88	2.83	1.53	3.27
蜻蜓目 Odonata								
箭蜓科 Gomphidae	PR	9.5	2		0.35		0.08	
软体动物门 Mollusca								
涡虫纲 Turbellaria	PR	40.9	14	14	18.17	11.46	4.03	13.29
腹足纲 Gastropoda								
椎实螺科 Lymnaeidae								
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	SC	8.5	2	3	6.17	0.71	1.37	0.82
小计 Subtotal	—	—	—	—	24.34	12.17	5.40	14.11

a:FFG 功能摄食群 Functional feeding group, CF 滤食者 Collector-filterer, CG 收集者 Collector-gatherer, PR 捕食者 Predator, SC 刮食者 Scraper, SH 撕食者 Shredder; b:特征值选用蒙特卡罗检验, 置换次数 9999; \* 表示差异显著( $0.01 < P < 0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $P < 0.01$ ); 括号内字母表示物种所指示生境类型, R 为浅滩, P 为深潭

浅滩生境中, 出现频率>30% 的物种包括: 假二翅蜉 *Pseudocloeon* sp、假蜉 *Iron* sp、纹石蛾 *Hydropsyche* sp、四节蜉 *Baetis* sp、锯形蜉 *Serratella* sp、舌石蛾 *Glossosoma* sp、*Heterocloeon* sp、涡虫 Turbellaria、背刺蜉 *Notacanthurus* sp、高翔蜉 *Epeorus* sp 2、动蜉 *Cinygmina* sp、狭溪泥甲 *Stenelmis* sp、朝大蚊 *Antocha* sp; 相对多度大于>5% 的物种包括: 假二翅蜉、纹石蛾、假蜉、舌石蛾。深潭生境中, 出现频率>30% 的物种包括: 假二翅蜉、蜉蝣 *Ephemera* sp、四节蜉、涡虫、动蜉、黑大蚊 *Hexatoma* sp、假蜉、纹石蛾、长足摇蚊 *Tanypodinae* sp、狭溪泥甲、锯形蜉、摇蚊 *Camptochironomus* sp; 相对多度大于>5% 的物种包括: 假二翅蜉、四节蜉、涡虫、动蜉、蜉蝣(表 2)。

比较两类生境中物种密度数据(表 2), 可以发现: 大多数物种在浅滩中的密度高于深潭中的密度, 仅摇蚊、黑大蚊、蜉蝣 3 物种在深潭中的密度高于浅滩。从物种相对多度上来看, 18 个物种在浅滩中的相对多度高于深潭中的相对多度, 14 个物种在深潭中的相对多度高于浅滩中的相对多度。两类生境中弯握蜉的相对多度相等。

指示种分析表明, 浅滩生境的指示种有 11 种(表 2)。按照指示作用从大到小依次为: 纹石蛾、假蜉、假二

翅蜉、舌石蛾、高翔蜉 *Epeorus* sp 2、背刺蜉、*Heterocloeon* sp、锯形蜉、朝大蚊、等蜉 *Isonychia* sp、溪颓蜉 *Rhithrogena* sp。深潭生境的指示种仅有蜉蝣和黑大蚊两种。

### 2.3 功能摄食类群组成

对两类生境内大型底栖动物功能摄食类群相对多度分别进行 Kruskal-Wallis Test,结果表明(表3):两类生境内各功能摄食类群相对多度差异极显著( $P<0.01$ )。两类生境内,刮食者相对多度均显著高于其他类群( $P<0.05$ ),撕食者相对多度均显著低于其他类群( $P<0.05$ )。

两类生境在功能摄食群组成上存在较大差异(表3)。统计分析表明:两类生境之间,除撕食者外的其他功能摄食类群的相对多度均差异极显著( $P<0.01$ )。浅滩中滤食者和刮食者比例显著高于深潭,而收集者和捕食者显著低于深潭。

表3 浅滩-深潭生境内大型底栖动物功能摄食群相对多度(平均值±标准差)

Table 3 Relative abundance of macroinvertebrate functional feeding groups in riffles vs. pools (mean±SD)

功能摄食群 Functional feeding group	浅滩 Riffles	深潭 Pools	ANOVA		Kruskal-Wallis Test	
			F	P	H	P
滤食者 Collector-filterer	23.50±15.98c	3.14±4.73 a			24.755	<0.001
收集者 Collector-gatherer	6.70±4.73b	34.59±17.12b c			28.850	<0.001
捕食者 Predator	7.92±11.15b	21.88±14.21b	12.556	<0.001		
刮食者 Scraper	61.84±17.86d	40.23±20.44c	13.319	<0.001		
撕食者 Shredder	0.03±0.16a	0.16±0.73 a	0.582	0.450		

同一列中,不同字母代表差异达5%显著水平

### 2.4 密度、生物量与物种多样性

对两类生境之间的大型底栖动物的密度、生物量与物种多样性数据进行统计分析,结果表明(表4):各指标均存在极显著的差异( $P<0.01$ )。浅滩生境内大型底栖动物群落的密度、生物量、丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和改进的 Shannon-Wiener 指数显著高于深潭。深潭生境的 Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数显著高于浅滩生境,这可能与深潭生境内物种丰富度和多度偏低有关。

表4 浅滩-深潭生境内大型底栖动物生物量、密度与物种多样性指标(平均值±标准误)

Table 4 Biomass, density and biodiversity index for benthic macroinvertebrate in riffles vs. pools (mean±SE)

指数 Index	浅滩 Riffles	深潭 Pools	ANOVA		Kruskal-Wallis Test	
			F	P	H	P
密度 Density (个/ $m^2$ )	450.62±65.86	86.24±11.13			27.927	<0.001
生物量 Biomass (g/ $m^2$ )	2.88±0.80	0.55±0.11	8.229	0.007		
丰富度指数 Richness	7.67±0.46	3.90±0.25			25.935	<0.001
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	1.54±0.04	1.12±0.07	27.285	<0.001		
Pielou 均匀度指数 Pielou index	0.79±0.01	0.83±0.04			8.174	0.004
Simpson 优势度指数 Simpson index	0.29±0.01	0.40±0.03			9.549	0.002
改进的 Shannon-Wiener 指数 Improved Shannon-Wiener index	5.40±0.31	2.27±0.20	70.206	<0.001		

### 2.5 DCA 分析

排序轴能够反映一定的环境梯度,通过环境因子与排序轴的相关分析,可以找出与排序轴显著相关的环境因子,反映群落分布与环境因子之间的关系<sup>[28]</sup>。图2为浅滩深潭两类生境内大型底栖动物的DCA二维排序图。可见,浅滩中的底栖动物群落主要分布在图的右侧,而深潭中的底栖动物群落主要分布在图的左侧,二者之间具有明显的差异。第一排序轴由左至右基本上反映了生境水力条件、河床底质等生境物理结构的变

化,即由左至右水深降低,流速增加、底质颗粒变大。第一排序轴特征值分为 0.447,解释了 18.7% 的底栖动物群落变化。第二排序轴由下至上基本反映了海拔由高到低的变化趋势。第二排序轴特征值分为 0.263,解释了 12.0% 的底栖动物群落变化。

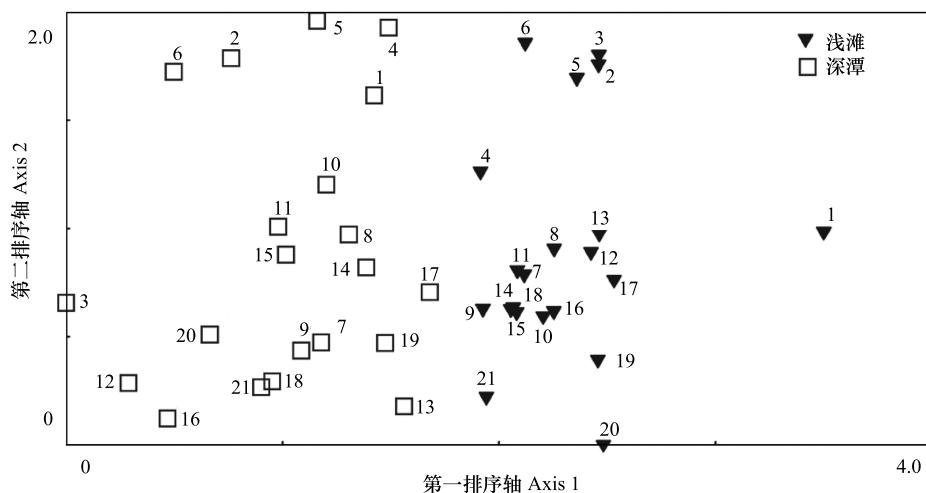


图 2 浅滩-深潭生境中大型底栖动物 DCA 二维排序图

Fig. 2 Detrended correspondence analysis ordination of 21 riffles and 21 pools based on 33 macroinvertebrate taxa

### 3 讨论

#### 3.1 群落组成与功能摄食类群

调查河段大型底栖动物主要由水生昆虫构成,浅滩和深潭中相对丰度均在 85% 以上,与同纬度的香溪河类似<sup>[29]</sup>。调查河段蜉蝣目昆虫多为取食周丛藻类的刮食者或为收集有机颗粒的收集者。这些昆虫大多身体扁平(如扁蜉科)或呈小鱼状(如四节蜉科),适应浅滩的流水环境。蜉蝣目昆虫表现出较强的生境选择性。17 种蜉蝣目昆虫中有 8 种为浅滩生境的指示种,7 种在浅滩中的出现频次和密度均高于深潭。蜉蝣为大型的穴居性水生昆虫,喜沙质或淤泥质河床<sup>[30]</sup>,为蜉蝣目昆虫中深潭生境的唯一指示种。调查河段毛翅目昆虫种类不多,仅 3 种。其中沼石蛾为偶见种类,仅在深潭生境中出现 1 次,数量较少。纹石蛾营防网型巢,收集水体中的有机物颗粒为食;舌石蛾筑马鞍型可携带巢,取食底质表面的硅藻和有机颗粒<sup>[31]</sup>。浅滩生境水流快(表 1),有机物颗粒收集效率高。硅藻受底质颗粒大小、稳定性和流速影响,主要分布在浅滩生境的底质表面<sup>[32-33]</sup>。因此舌石蛾和纹石蛾表现出极显著的生境选择性(Monte Carlo 检验,  $P<0.01$ ),为浅滩生境的指示种。双翅目昆虫在生境选择上表现出较大的差异。蚋、朝大蚊在浅滩中的密度和出现频次最高,黑大蚊、长足摇蚊和摇蚊在深潭中密度和出现频次最高,而蠓科在两类生境中的丰富度却没有明显差异。涡虫对浅滩和深潭没有表现出明显的选择,两类生境中的密度和出现频次差异不大。

中等级别的河流中,由于光照条件改善,周丛藻类等自养生物成为河流主要的物质能量来源,而枯枝落叶等异源有机物则相对减少<sup>[34]</sup>。调查河段为 4 级河流,河宽在 15 m 以上,河床光照条件好,周丛藻类丰富。因此调查河段的浅滩和深潭生境中刮食者比例均为最高,而取食枯枝落叶的撕食者比例均为最低。纹石蛾是滤食者的主要组成部分;假二翅蜉、假蜉、舌石蛾是刮食者的主要组成部分。这些种类均为浅滩生境的特征种,对周丛藻类丰度和流速敏感,因此两类生境中滤食者和刮食者比率差异显著。收集者和捕食者密度在两类生境中差异不大(5 个/ $m^2$  左右),但由于深潭中总物种丰度的降低,因此收集者和捕食者比率显著增加。

#### 3.2 密度和多样性差异的原因

Henry 和 Mackay 对苏格兰高原上 3 条河流的调查表明:浅滩和深潭中大型底栖动物的种数分别为 22 种和 23 种,浅滩中大型底栖动物的生物量略高于深潭,密度显著高于深潭<sup>[35]</sup>。Richard 在 Otter 河干流的浅滩和深潭中分别采集到 69 种和 70 种大型底栖动物,浅滩中大型底栖动物的密度为深潭的 6.8 倍<sup>[36]</sup>。Armitage

等对 Tees 河的调查表明,浅滩中大型底栖动物总物种数和多度均高于深潭<sup>[37]</sup>。Kobayashi 和 Kagaya 在 Kudonosawa 河滩和深潭的有机碎屑中各采集到 20 种大型底栖动物,其中 5 种大型底栖动物的密度差异不显著,10 种大型底栖动物在浅滩中的密度显著高于深潭<sup>[38]</sup>。浅滩与深潭中大型底栖动物的密度比率约为 1.5。李金国等研究表明:急流区(浅滩)水生昆虫的个体数量要远多于稳水区(深潭),一般在 2 倍以上<sup>[18]</sup>。本研究表明东河浅滩生境中大型底栖动物群落的总物种数、密度、生物量、丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、改进的 Shannon-Wiener 指数均明显高于深潭。东河与上述研究所涉及的河流均为石质河床的山地河流,河流生境特征类似。由此可见:在石质河床的山地河流中,浅滩与深潭中大型底栖动物群落结构差异明显;浅滩中大型底栖动物密度、多样性一般高于深潭。

河流的水质状况和生境的物理结构是影响水生生物群落最重要的两类环境因素<sup>[16,39]</sup>。山地河流河床窄,水深浅,水流急,水体在河道中的滞留时间短,浅滩和深潭的水质无明显差别(表 1)。因此在同一自然河段内水质对山地河流浅滩和深潭中大型底栖动物群落的影响不明显,而两类生境物理结构上的差异对大型底栖动物群落的影响显得尤为重要。

山地河流的浅滩和深潭具有不同的地貌形态、水沙特征和冲淤变化规律。浅滩的水面比降大,流速高,小圆石、粗砂容易被侵蚀,床面底质以漂砾、圆石等为主,底质间孔隙度大,生境异质性高。同时浅滩中底质颗粒常成鱼鳞状排列,抗冲击性强<sup>[40]</sup>,稳定性好。稳定而多孔隙的河床底质结构可以降低河床扰动对大型底栖动物造成的伤害<sup>[41-42]</sup>,为大型底栖动物提供躲避捕食的庇护所<sup>[43]</sup>,并且滞留更多的有机碎屑,附生更多的藻类和水生植物,保持较高的大型底栖动物密度和多样性。山地河流的深潭多分布在有弯道段靠凹岸的一侧,河宽较窄<sup>[2]</sup>。枯水期,河流水深浅,河床的凹凸起伏对水面比降影响大。受下游浅滩的阻碍作用影响,深潭水面比降减小,流速降低,细颗粒的泥沙在深潭中沉积。细颗粒的泥沙抗冲刷能力弱,颗粒排列紧密,底栖动物可附着面积小,孔隙度低,生境稳定性和异质性不高。段学花等发现细颗粒底质河床中底栖动物的多样性明显低于粗颗粒底质河床<sup>[22]</sup>。洪水期,河流水深增加,河床的凹凸起伏对水面比降影响减小,河宽对水面的比降影响增加。河宽较窄的深潭比浅滩水位增加更大,水流更急,水流对河床底质产生的侵蚀更强烈<sup>[2]</sup>,对底栖动物的扰动更剧烈。Cobb 等发现洪水扰动可使不稳定河床中水生昆虫密度降低 94%<sup>[44]</sup>,而受洪水强烈干扰后的底栖动物群落的恢复却要经历很长时间<sup>[45]</sup>。可见,由于地貌形态、水力特征和冲淤变化规律上的差异,山地河流的浅滩比深潭具有更高的生境的稳定性和异质性,因而浅滩中大型底栖动物密度和多样性一般高于深潭。

#### References:

- [1] East China Institute of Water Resources, Chongqing Jiaotong University. Waterway Regulation. Beijing: China Communications Press, 1980: 13-13.
- [2] Lin C K. Sediment and Fluvial Geomorphology. Nanjing: Nanjing University Press, 1992;212-212.
- [3] Bisson P A, Montgomery D R, Buffington J M. Valley segments, stream reaches, and channel units // Hauer F R, Lamberti G A, eds. Methods in Stream Ecology. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2007;24-24.
- [4] Yang C T. Formation of riffles and pools. Water Resource Research, 1971, 7(6):1567-1574.
- [5] Lofthouse C, Robert A. Riffle-pool sequences and meander morphology. Geomorphology, 2008, 99(1/4):214-223.
- [6] Wohl E E, Vincent K R, Merritts D J. Pool and riffle characteristics in relation to channel gradient. Geomorphology, 1993, 6(2):99-110.
- [7] Carling P A, Orr G H. Morphology of riffle-pool sequences in the River Severn, England. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(4): 369-384.
- [8] Wallace J B, Webster J R. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. Annual Review of Entomology, 1996, 4(1):115-139.
- [9] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, Sedell J R, Cushing C E. The river continuum concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(1):130-137.
- [10] Ward J V. Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. Biological Conservation, 1998, 83(3): 269-278.
- [11] Jowett I G. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. New Zealand Journal of Marine and

- Freshwater Research, 1993, 27(2):241-248.
- [12] Bonada N, Rieradevall M, Prat N, Resh V H. Benthic macroinvertebrate assemblages and macrohabitat connectivity in Mediterranean-climate streams of northern California. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(1):32-43.
- [13] Brown K M. Resource overlap and competition in pond snails:an experimental analysis. *Ecology*, 1982, 63(2):412-422.
- [14] Carter J L, Fend S V. Inter-annual changes in the benthic community structure of riffles and pools in reaches of contrasting gradient. *Hydrobiologia*, 2001, 459(1/3):187-200.
- [15] Scullion J, Parish C A, Morgan N, Edwards R W. Comparison of benthic macroinvertebrate fauna and substratum composition in riffles and pools in the impounded River Elan and the unregulated River Wye, mid-Wales. *Freshwater Biology*, 1982, 12(6):579-595.
- [16] McCulloch D L. Benthic macroinvertebrate distributions in the riffle-pool communities of two east Texas streams. *Hydrobiologia*, 1986, 135(1/2):61-70.
- [17] Boulton A J, Lake P S. The ecology of two intermittent streams in Victoria, Australia. II. Comparisons of faunal composition between habitats, rivers and years. *Freshwater Biology*, 1992, 27(1):99-121.
- [18] Li J G, Wang Q C, Yan S C, Yao Q, Qiao S L, Lü Y D, Han Z X. Community characteristics of aquatic insects and bioassessment for water quality in lower order streams in Liangshui and Maoershan watersheds, Heilongjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5008-5018.
- [19] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of American Geophysical Union*, 1957, 38(6):913-920.
- [20] Jiang W X, Cai Q H, Tang T, Qu X D. The functional feeding group ecology of macroinvertebrate in Xiangxi River system. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5207-5218.
- [21] Resh V H. Sampling variability and life history features: basic considerations in the design of aquatic insect studies. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1979, 36(3):290-311.
- [22] Duan X H, Wang Z Y, Cheng D S. Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 24(4):1664-1672.
- [23] Cummins K W. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *American Midland Naturalist*, 1962, 67(2):477-504.
- [24] Duan X H. Ecological Impacts of Water and Sediment Transportation on Macroinvertebrate Community in Rivers [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [25] 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. 2nd ed. Washington: Environmental Protection Agency, 1999:B5-B50.
- [26] Wang S B. A question on the traditional biodiversity index. *Journal of Fudan University:Natural Science*, 2003, 42(6):867-868, 874-874.
- [27] Ou Y D, Su Z Y, Xie D D, Ke X D, Li Z K. Dynamics of dominant tree seedlings in montane evergreen broadleaved forest following a snow disaster in North Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10):2708-2715.
- [28] Suriguga, Zhang J T, Zhang B, Cheng J J, Tian S G, Zhang Q D, Liu S J. Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10):2621-2629.
- [29] Jiang W X, Cai Q H, Tang T, Wu N C, Fu X C, Li F Q, Liu R Q. Spatial distribution of macroinvertebrates in Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11):2443-2448.
- [30] Zhou C F. A Taxonomic Study on Mayflies from Mainland China [D]. Tianjin:Nankai University, 2002.
- [31] Tian L X, Yang L F, Li Y W. Economic Entomology of China-Trichoptera(1): Hydroptilidae, Stenopsychidae, Hydropsychidae, Leptoceridae. Beijing: Science Press, 1996:20-20.
- [32] Stevenson R J. The stimulation and drag of current // Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L, eds. Algal Ecology-Freshwater Benthic Ecosystems. San Diego: Academic Press, 1996:321-340.
- [33] McIntire C D. Structural characteristics of benthic algal communities in laboratory streams. *Ecology*, 1968, 49(3):520-537.
- [34] Yan L, Zhao Y, Han C X, Tong X L. Litter decomposition and associated macro-invertebrate functional feeding groups in a third-order stream of northern Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2573-2579.
- [35] Egglishaw H J, Mackay D W. A survey of the bottom fauna of streams in the Scottish Highlands part III seasonal changes in the fauna of three streams. *Hydrobiologia*, 1967, 30(3/4):305-334.
- [36] Harrel R C. Benthic macroinvertebrates of the Otter Creek drainage basin, Northcentral, Oklahoma. *The Southwestern Naturalist*, 1969, 14(2):231-248.
- [37] Armitage P D, MacHale A M, Crisp D C. A survey of stream invertebrates in the Cow Green basin (Upper Teesdale) before inundation. *Freshwater Biology*, 1974, 4(4):369-398.
- [38] Kobayashi S, Kagaya T. Differences in litter characteristics and macroinvertebrate assemblages between litter patches in pools and riffles in a

- headwater stream. *Limnology*, 2002, 3(1):37-42.
- [39] Brussock P, Brown A V. Riffle-pool geomorphology disrupts longitudinal patterns of stream benthos. *Hydrobiologia*, 1991, 220(2):109-117.
- [40] Wuhan University of Hydrulic and Electroc Engineering. *Engineering River Sediment*. Beijing:Hydraulic and Power Press, 1980;55-60.
- [41] Lake P S, Doeg T J, Marchant R. Effects of multiple disturbance on macroinvertebrate communities in the Acheron River, Victoria. *Australian Journal of Ecology*, 1989, 14(4):507-514.
- [42] Beisel J N, Usseglio-Polatera P, Thomas S, Moreteau J C. Stream community structure in relation to spatial variation;the influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, 389(1/3):73-88.
- [43] Brown A V, Brussock P P. Comparisons of benthic invertebrates between riffles and pools. *Hydrobiologia*, 1991, 220(2):99-108.
- [44] 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.
- [45] Hoopes R L. Flooding, as the result of Hurricane Agnes, and its effect on a macrobenthic community in an infertile headwater stream in central Pennsylvania. *Limnology and Oceanography*, 1974, 19(5):853-857.

#### 参考文献:

- [1] 华东水利学院,重庆交通学院. 航道整治. 北京:人民交通出版社, 1980:13-13.
- [2] 林承坤. 泥沙与河流地貌学. 南京:南京大学出版社, 1992:212-212.
- [18] 李金国, 王庆成, 严善春, 姚琴, 乔树亮, 吕跃东, 韩壮行. 凉水、帽儿山低级溪流中水生昆虫的群落特征及水质生物评价. *生态学报*, 2007, 27(12):5008-5018.
- [20] 蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 渠晓东. 香溪河水系大型底栖动物功能摄食类群生态学. *生态学报*, 2009, 29(10):5207-5218.
- [22] 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, 24(4):1664-1672.
- [24] 段学花. 河流水沙对底栖动物的生态影响研究 [D]. 北京:清华大学, 2009.
- [26] 王寿兵. 对传统生物多样性指数的质疑. *复旦学报:自然科学版*, 2003, 42(6):867-868, 874-874.
- [27] 区余端, 苏志尧, 解丹丹, 柯娴氡, 李镇魁. 雪灾后粤北山地常绿阔叶林优势树种幼苗更新动态. *生态学报*, 2011, 31(10):2708-2715.
- [28] 苏日古嘎, 张金屯, 张斌, 程佳佳, 田世广, 张钦弟, 刘素军. 松山自然保护区森林群落的数量分类和排序. *生态学报*, 2010, 30(10):2621-2629.
- [29] 蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 吴乃成, 傅小城, 李凤清, 刘瑞秋. 香溪河大型底栖无脊椎动物空间分布. *应用生态学报*, 2008, 19(11):2443-2448.
- [30] 周长发. 中国大陆蜉蝣目分类研究 [D]. 天津:南开大学, 2002.
- [31] 田立新, 杨莲芳, 李佑文. 中国经济昆虫志第四十九册-毛翅目(一):小石蛾科、角石蛾科、纹石蛾科、长角石蛾科. 北京:科学出版社, 1996:20-20.
- [34] 颜玲, 赵颖, 韩翠香, 童晓立. 粤北地区溪流中的树叶分解及大型底栖动物功能摄食群. *应用生态学报*, 2007, 18(11):2573-2579.
- [40] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学. 北京:水利电力出版社, 1980:55-60.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 21 November, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle .....	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responds of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent .....	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaohua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream .....	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland .....	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake .....	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary .....	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis .....	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species .....	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan .....	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains .....	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree .....	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry ( <i>Fragaria ananassa</i> Duch) .....	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties .....	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China .....	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools:a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China .....	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng .....	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009 .....	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use;a case study of Ordos, Northern China .....	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests .....	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies: a case of Gannan Plateau .....	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics .....	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan .....	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil .....	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang .....	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors .....	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i> .....	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i> .....	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Corypha cephalonica</i> eggs .....	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system .....	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishusan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice .....	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
<b>Review and Monograph</b>	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration:a review .....	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO <sub>2</sub> level on the physiology and ecology of phytoplankton .....	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation .....	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
<b>Scientific Note</b>	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting .....	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland .....	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

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

主 编 冯宗炜  
主 管 中国科学技术协会  
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

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:1000717

印 刷 北京北林印刷厂  
行 销 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

订 购 全国各地邮局  
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

广 告 经 营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010) 64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q  
2.1>  
  
9 771000093125