

# 滇池流域入湖河流水文形貌特征对丰水期大型底栖动物群落结构的影响

高喆<sup>1</sup>, 曹晓峰<sup>1, 2\*</sup>, 樊灏<sup>1</sup>, 蒋大林<sup>3</sup>, 黄艺<sup>1</sup>

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 北京大学环境与能源学院, 广东 深圳 518055; 3. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

**摘要:** 河流水文形貌特征, 作为决定物理生境的重要因子, 与大型底栖动物群落关系密切。了解水文形貌特征对大型底栖动物的影响, 对于完善环境因子对大型底栖动物群落影响研究具有重要意义。论文以滇池流域大型底栖动物群落为研究对象, 旨在识别与流域大型底栖动物群落结构变化密切相关的河道水文形貌因子和河岸带水文形貌因子, 并解析两类因子对底栖群落的相对影响。基于 2012—2013 年滇池流域 55 个河段大型底栖动物群落和水文形貌变量数据, 利用典范对应分析 (Canonical correspondence analysis, CCA) 和偏典范对应分析 (Partial canonical correspondence analysis, pCCA) 识别影响大型底栖动物群落结构的关键因子并探讨河道水文形貌和河岸带水文形貌因子的相对重要性。结果显示, 影响大型底栖动物群落结构的关键河道水文形貌因子为底质组成、河道人工化情况、河道坡降和水温, 总解释量为 21.6%; 影响大型底栖动物群落结构的关键河岸带水文形貌因子为林地比例和其它用地比例, 总解释量为 9.2%。研究表明, 河道水文形貌因子比河岸带水文形貌因子对于大型底栖动物群落结构特征的影响更为重要, 这对于提高湖泊流域生物监测水平、优化水生态系统健康评价和保护底栖动物多样性具有重要意义。

**关键词:** 大型底栖动物群落; 水文形貌; 丰水期; 滇池流域

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.020

**中图分类号:** X17

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2015) 07-1209-07

**引用格式:** 高喆, 曹晓峰, 樊灏, 蒋大林, 黄艺. 滇池流域入湖河流水文形貌特征对丰水期大型底栖动物群落结构的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1209-1215.

GAO Zhe, CAO Xiaofeng, FAN Hao, JIANG Dalin, HUANG Yi. Influence of Hydromorphological Factors on Macrozoobenthic Communities in Streams of Lake Dianchi Basin in the Wet Season [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1209-1215.

大型底栖动物是淡水生态系统极其重要的组成部分, 作为碎屑食物链的重要一环, 在水生态系统物质循环和能量流动中起着重要作用, 对生态系统结构和功能的健康发展具有深远的影响 (李良, 2013)。与其它水生生物相比, 大型底栖动物具有区域性、迁移能力弱、生活周期长、反应敏感等优势, 因此广泛地应用于生态监测和生态系统状态评价。为了更好地表征和评价水生态系统结构、功能和状态, 大型底栖动物群落特征与环境因子的关系得到了越来越多的关注, 成为生态学研究热点之一。

在河流底栖动物与环境因子关系的研究中发现, 河流的水文形貌条件所形成的物理生境, 对于大型底栖动物的群落结构具有直接影响 (Karr et al., 1991), 而河流的水质条件对其具有间接影响 (李艳利等, 2015)。由于多数河流具有长期水质监

测的基础, 早期的研究更多地关注水质对于大型底栖动物群落特征的影响, 大量的研究分析了水体富营养化 (戴友芝等, 2000; 姜莘红等, 2012; 王备新, 2003)、盐碱度 (谢祚浑等, 2002) 以及水体理化性质 (陈小华等, 2013) 与底栖动物群落的关系, 而关于水文形貌特征对底栖动物群落组成影响的研究相对较少。水文形貌特征是水生物群落生境特征的重要组成部分, 是水生态系统物理完整性的集中体现。欧洲水框架指令认为, 水文形貌特征是决定流域状态的重要因素之一, 水生生物对其存在直接的生态响应 (Friberg et al., 2010)。构成水文形貌特征的底质 (Buss et al., 2004)、水流条件 (Statzner et al., 1982; Statzner et al., 1988; Barmuta, 1990)、水深 (陆强等, 2013)、水温 (陆强等, 2013) 以及河岸带地貌类型 (Allan et al., 1997; Pedersen et al., 2007), 对底栖动物群落结构、组成或分布

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501002-006)

**作者简介:** 高喆 (1990 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与环境微生物。Email: gigi@pku.edu.cn

\*通信作者。

**收稿日期:** 2015-03-27

特征的形成,发挥着关键作用。进一步研究表明,河流的河岸带和河道的地理生态作用,形成了河流的水文形貌条件,构成了河流内水生生物群落的栖息地(Muneepeerakul et al., 2008),其特征是影响大型无脊椎动物分布的主要因素(Statzner et al., 1986; Cobb et al., 1992)。量化河道和河岸带水文形貌条件的相对重要性,对于以恢复生物完整性为目的的流域栖息地分类管理具有重要意义。而目前关于此类研究,尚未有明确的结果。Sandin et al. (2004)的研究表明,在瑞典南部的Emå流域,对大型底栖动物群落影响更为显著的是河岸带水文形貌特征,而另有部分学者认为河道生境的水文形貌因子对大型底栖动物变化起着更为重要的作用(Statzner et al., 1986; Cobb et al., 1992)。国内目前关于底栖动物群落特征与水文形貌特征关系的研究开展得相对较少,仅有的部分研究往往只考虑河道水文形貌特征对于大型底栖动物群落的影响,较少考虑河岸带水文形貌特征对生物群落的作用。底栖动物作为水生生态系统的表征群落,分析和识别影响其群落结构的关键水文形貌因子,探究河道和河岸带水文形貌特征的相对重要性,对于完善和深入底栖动物群落与环境因子关系研究,预测流域底栖动物分布格局,提高生物监测水平、优化生态健康评价以及保护底栖动物,具有重要的科学意义。

滇池流域地处云贵高原,作为云南省最大的湖泊,是高原浅水湖泊的典型代表。针对大型底栖动物与环境因子关系的相关研究表明,水质因子总氮、氨氮、总磷和溶解氧对大型底栖动物群落影响显著,是决定其分布和多样性的关键因子(蔡佳亮等, 2011)。但水文形貌特征,尤其是入湖河流的水文相貌特征,对于大型底栖动物群落的影响仍不清楚。作为高原湖泊流域,滇池入湖河流的水文形貌具有空间尺度小、河道坡降大、河道人工化程度高等特点,使其水文形貌条件复杂多样且空间异质性显著。因此,本文以滇池流域为研究区域,基于2012—2013的丰水期大型底栖动物调查资料,分析生境尺度上水文形貌因子对大型底栖动物群落结构的影响,探索不同类型生境对于底栖动物群落结构的相对重要性,以期为滇池流域底栖动物的保护和生物监测应用提供相关依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区域和采样点设置

滇池流域地处云贵高原中部(24°29′~25°28′N, 102°29′~103°01′E),流域面积为2920 km<sup>2</sup>,是我国重点湖泊流域之一。滇池流域为南北长、东西窄的湖盆地,西有横断山脉,东临滇东高原,北临乌蒙山、梁王山。滇池属于长江流域金沙水系,为断陷

湖泊构造,湖面面积约为300 km<sup>2</sup>,是云贵高原湖面最大的淡水湖泊。入滇水系有12个,主要入湖河流有29条,呈向心状流入滇池。

采样点的设置如下:选择覆盖全流域29条主要入湖河流,样点间隔约5~10 km均匀布点(图1),共获得55个样点。样点所对应的河段为该采样点到其上游5 km处所构成的河段。

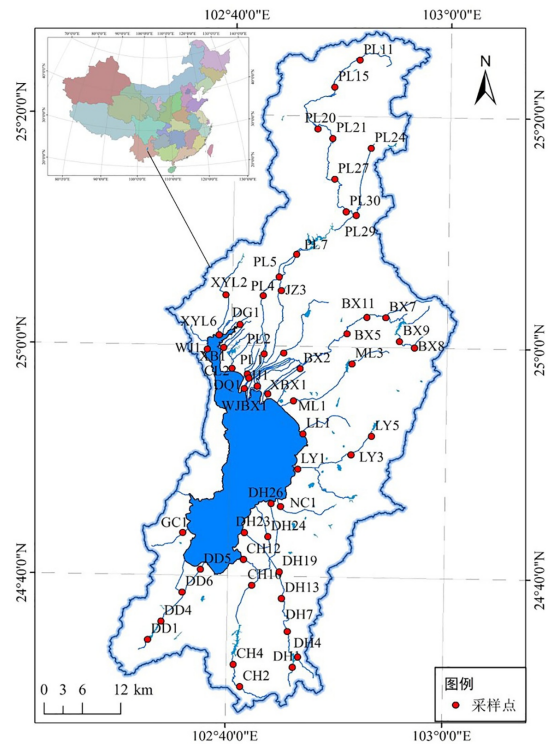


图1 滇池流域采样点布设图

Fig. 1 The distribution of sampling sites in Lake Dianchi Basin

### 1.2 样品采集与处理

水生态调查选择于2012与2013年7—8月在滇池流域进行,其中2012年在盘龙江、柴河、大河和宝象河调查41个样点,2013年在其余25条小河流调查14个样点。大型底栖动物的采集选用面积为1/16 m<sup>2</sup>的彼得森采泥器。每个样点采集3次底泥,采泥器在样点中采得的样品为底栖动物与底泥、腐屑等混合体,采用孔径为40目的金属筛对混合体进行筛选,将筛选出的底栖动物放入装有7%甲醛溶液的30 mL塑料瓶中。把每个样点所采集的底栖动物按不同种类准确地统计个体数,根据采样器开口面积计算出1 m<sup>2</sup>内的数量(包括每种的数量和总数量),再用滤纸吸去底栖动物体表固定液,置于电子天平上称量,底栖动物的种类鉴定到属。

水文形貌特征的调查主要是针对河道和河岸带。河道水文形貌特征,调查底质组成、河道人工化情况、河宽、蜿蜒度、河道坡降、河岸坡度和水温。其中,蜿蜒度、河道坡降和河岸坡度的获取,

基于流域 1:50 000 DEM 数据。河岸带水文形貌特征,调查河岸带缓冲区土地利用结构。土地利用结构的获取与河岸带缓冲区的宽度具有紧密联系。根据澳大利亚维多利亚州环境保护部门的建议 (Barling et al., 1994),确定滇池流域入湖河流的河岸带缓冲区宽度为 30 m。通过在 ArcGIS10.1 中建立缓冲带,通过缓冲带和土地利用数据(2007 年)的 Intersect 分析,利用 Summary 进行统计,得到各个缓冲区的土地利用比例。其中,缓冲区定义为采样点所对应的上游河段两侧各 30 m 的范围。各物理生境指标如表 1 所示。

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 Shannon-Wiener 多样性指数

大型底栖动物群落的生物多样性分析采用 Shannon-Wiener 多样性指数,其计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left( \frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right)$$

式中,  $H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数,  $S$  为物种总数,  $N$  为所有物种的个体数,  $n_i$  为第  $i$  种物种的个体数。

#### 1.3.2 数理统计方法

在分析前,需对原始数据进行优化,即将物种数据和环境数据采用标准化的方法进行数据转换,在此基础上,同时物种数据中去除总体中相对丰度低于 1% 的属,保留其中在任一样点相对丰度 > 3% 的属。针对滇池流域物理生境特征,本文采用等级聚类分析(基于 Bray-Curtis 相似性,在 Primer5.0 软件中完成)和方差分析(利用 SPSS19.0 软件完成)进行分析不同河段水文形貌的差异性;针对大型底栖动物群落与水文形貌因子关系的探究,首先通过 Spearman 相关性分析保证各因子之间的独立性,再利用典范对应分析(CCA)和偏典范对应分

析(pCCA)识别与大型底栖动物群落关系密切的关键河道水文形貌因子和河岸带水文形貌因子,并量化两者的相对重要性,该过程可在 CANOCO4.5 中进行。

## 2 结果和讨论

### 2.1 水文形貌特征

从底质组成来看,仅有 7.2% 的河段底质组成得分高于 4 (满分为 8),多处河段的底质多为泥、砂等细粒物质组成,底栖动物生境多样性降低。河道硬化程度高,高达 62% 的采样点河道都经过人工整治,呈现出“二面光”或“三面光”的特征。

滇池入湖河流水文形貌特征的聚类分析表明,基于 72% 的相似性,可以将 55 个河段分为 3 类,如图 2 所示。方差分析的结果表明,第 I 类的河段主要分布在受人类干扰少的上游区域,其第 I 类的河道坡降 ( $F=5.957$ ,  $P=0.005$ ) 和河岸坡度 ( $F=14.677$ ,  $P=0.000$ ) 明显高于第 II 类和第 III 类。第 II 二类的河段主要分布在受人类干扰较大的区域,其河宽要明显高于其它两类 ( $F=60.133$ ,  $P=0.000$ ),蜿蜒度要显著低于其它两类 ( $F=5.373$ ,  $P=0.008$ ),水温要显著高于其它两类 ( $F=18.703$ ,  $P=0.000$ )。第 III 三类的河段主要分布在受到一定干扰的下游区域,其河宽、水温和蜿蜒度特征介于其它两类之间。通过聚类分析发现,不同采样点的物理生境 Bray-Curtis 相似性都在 41%~96% 之间,相似性低于 50% 的河段的距离较大。

### 2.2 群落结构特征

#### 2.2.1 群落组成

滇池流域入湖河流 2012 年和 2013 年 7—8 月共检出大型底栖动物 3 门 13 科 15 属,其中环节动物门 3 科 4 属,占总属数的 26.67%;其次为软体动物门 4 科 5 属,占 33.33%;再次为节肢动物门 6 科 6 属,占 40%。基于物种鉴定结果,滇池流域入

表 1 滇池流域水文形貌特征指标  
Table 1 Hydromorphological indexes in Lake Dianchi Basin

变量	代码	定义/方法/单位	平均值(最小值,最大值)
河道物理生境因子			
底质特征	Substrate	根据粒径及重要性对底质组成进行专家赋值打分,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	1.5(0, 6)
河道人工化情况	Channelization	根据河道硬化的程度,进行专家赋值打分	1.5(0, 3)
河宽	Width	垂直于河流中心线河流两岸的距离,现场实测数据得到	9.3(0.4, 38.6)
蜿蜒度	Sinuosity	由河流中心线与河流流域中心线的比值决定,在 ArcGIS10.1 计算得到	1.2(1.0, 1.6)
河道坡降	Slope	河道纵向坡度的变化,为河段上断面到下断面的距离和高程差的比值在 ArcGIS10.1 计算得到	0.01(0.001, 0.06)
河岸坡度	Gradient	河道横向坡度的变化,为河岸带宽度和高程差的比值在 ArcGIS10.1 计算得到	4.05(0.09, 23.29)
水温	Temperature	水体的温度(°C),现场实测数据得到	22.3(13.4, 29)
河岸带物理生境因子			
林地百分比	Forest	林地和草地在河岸带缓冲带面积中的百分比(%)	21(0, 68)
城镇百分比	Urban	城镇用地在河岸带缓冲带面积中的百分比(%)	16(0, 96)
农田百分比	Farmland	农田用地在河岸带缓冲带面积中的百分比(%)	50(0, 100)
其它用地百分比	Others	其它种类用地在河岸带缓冲带面积中的百分比(%)	12(0, 53)

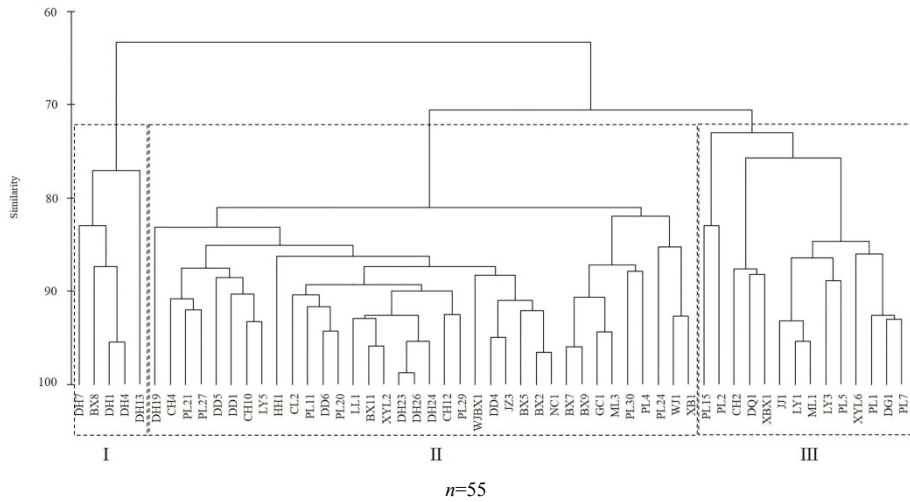


图2 滇池流域水文形貌因子聚类分析

Fig. 2 Clustering analysis of hydromorphological factors in Lake Dianchi Basin

湖河流丰水期大型底栖动物群落结构以环节动物门的尾鳃蚓属 (*Branchiura*) 为优势属, 而其它出现频率较高的常见属类包括: 环节动物门的水丝蚓属 (*Limnodrilus*) 和红蛭属 (*Dina Blanchard*), 以及节肢动物门的摇蚊属 (*Chironomoustentans*)。

2.2.2 Shannon-Wiener 多样性指数

滇池流域大型底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数在0~1.19之间, 多样性极低, 如表2所示。55

表2 滇池流域大型底栖动物群落多样性指数

Table 2 The diversity index of macrozoobenthic communities in Lake Dianchi Basin

样点	H'	substrate	样点	H'	substrate
BX11	0.39	1	JZ3	0.42	0.5
BX2	0.73	2	LL1	0	3
BX5	1.19	2	LY1	0	2
BX7	0.69	3.5	LY3	0	1
BX8	0	3	LY5	0	3
CH1	0.23	4	ML1	0	1
CH10	0	4	ML3	0.59	1
CH12	0	1.5	NC1	0	2.5
CH2	0	4	PL1	0	0
CH4	0	5	PL11	0.64	3.5
CL2	0	1	PL15	0.45	5
DD1	0	4	PL2	0	0
DD4	0.64	0	PL20	0.95	3.5
DD5	0.75	1	PL21	1.08	4
DD6	0	4	PL24	0.87	2
DG1	0	3	PL27	1.17	4
DH1	0.29	3	PL29	0	3
DH13	0	3	PL30	0.59	3.5
DH19	0	2	PL4	0.23	6
DH23	1.04	1	PL5	0	3
DH24	0	1	PL7	1.04	1
DH26	0	1	WJ1	0	1
DH4	1.04	3	WJBX1	0	0
DH7	0	5	XB1	0	0
DQ1	0.36	1	XBX1	0.27	0
GC1	0	1	XYL2	0.56	1
HH1	0.05	0.5	XYL6	0	0
JJ1	0	0.5			

个采样点中有16个样点未采集到底栖动物, 31个采样点物种单元数小于4, 表明整个流域的大型底栖动物群落构成较为单一, 优势种的优势度较高。

2.2.3 生物密度

滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物生物密度在 0~18 752 ind·m<sup>-2</sup> 之间。在同一入湖河流的不同河段, 生物密度的差异性较大, 其相似性在 0%~96% 之间。在 55 个河段中, 高达 16 个河段的底栖动物生物密度为 0。在采集到底栖动物的河段中, 滇池流域的多数大型底栖动物的密度都在 2 000 ind·m<sup>-2</sup> 以下, 仅有摇蚊属、萝卜螺属 (*Radix*) 分别在 XYL2 和 BX11 的生物密度超过 10 000 ind·m<sup>-2</sup>。根据大型底栖动物物理生境分组, 不同分组具有不同的群落组成特征, 如图 3 所示, I 组以红蛭属和水丝蚓属为优势属, 环节动物门的比例高达 84.6%, 软体动物门的比例为 15.4%, 不存在节

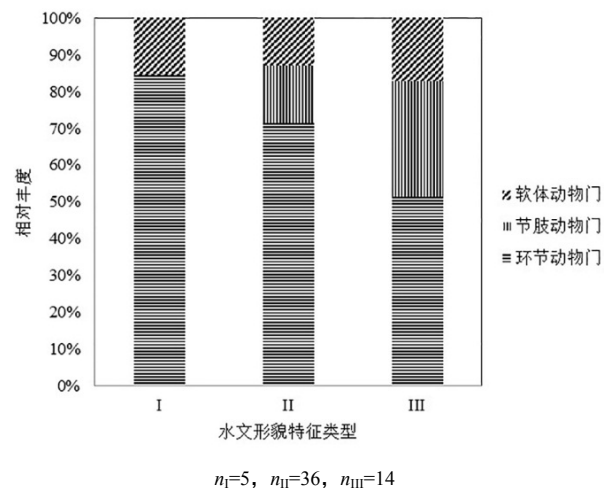


图3 不同类型水文形貌条件的大型底栖动物相对丰度分布

Fig. 3 The distribution of relative abundance of macrozoobenthos in different types of hydromorphological conditions

肢动物门; 2 组以尾鳃蚓属和水丝蚓属为优势属, 群落中节肢动物门的比例为 71.5%, 环节动物门的比例为 12.9%, 软体动物门的比例仅为 15.6%; I、II、III 组以尾鳃蚓属和摇蚊属为优势属, 环节动物门的比例为 51.5%, 软体动物门和节肢动物门的比例分别为 17.0%和 31.5%。

### 2.3 水文形貌特征和群落结构的关系

对底栖动物群落生物密度进行去趋势分析 (Detrended correspondence analysis, DCA), 得到特征值为  $5.566 > 4$ , 因此采用典范对应分析 (CCA) 探究底栖动物群落生物密度和水文形貌特征的关系, 辨识滇池流域入湖河流中对底栖动物产生显著影响的环境因子。水文形貌因子包括以下指标: 底质组成、河道人工化情况、农田土地利用百分比、城镇用地百分比、林地百分比、其它用地百分比、蜿蜒度、河道坡降、河岸坡度。Mantel Carlo 分析表明, 底质组成、林地百分比、其它用地百分比、水温、河道坡降和河道人工化情况对于底栖动物群落的影响显著 ( $F=4.316, P=0.002$ ), 对于底栖动物群落变化的贡献率为 36.2%, 如图 4 所示。

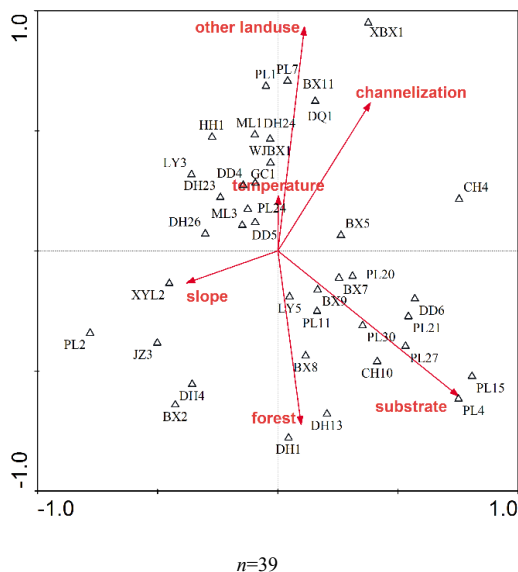


图 4 水文形貌因子和大型底栖动物群落 CCA 分析结果  
Fig. 4 CCA results of hydromorphological factors and macrozoobenthic communities

河岸带水文形貌和河道水文形貌对大型底栖动物群落的影响有所不同。为了分析两者的相对重要性, 采用偏 CCA 分析进行方差分解。结果表明, 河道水文形貌因子对于大型底栖动物群落的贡献率是 21.6%, 河岸带水文形貌因子对于大型底栖动物群落的贡献率仅为 9.2%, 两者的交互作用贡献率为 5.4%, 河道水文形貌因子对于大型底栖动物群落的影响更为显著。

### 3 讨论

流域水文形貌由河道水文形貌和河岸带水文形貌两个部分构成。目前较多研究认为, 河岸带水文形貌条件通过影响河道水质条件间接地影响大型底栖动物群落, 因而比河道水文形貌条件对底栖动物的影响更为重要。在本研究中, 滇池流域的河道水文形貌对于大型底栖动物群落的影响更大, 其贡献率是河岸带水文形貌条件的 2.35 倍。这个结论与部分研究相似 (Kail, 2003; Statzner et al., 1986; Cobb et al., 1992)。对于滇池流域来说, 水质条件 (如总氮、总磷、氨氮等) 是影响大型底栖动物群落结构的重要因素之一 (蔡佳亮等, 2011), 而河岸带土地利用方式对于入湖河流的水质起着决定性的作用 (孙金华等, 2011), 表明河岸带水文形貌条件对于底栖动物群落的影响理论上应该较高 (Marzinelli et al., 2009)。但在滇池流域, 由于人为工程的干扰, 河道的硬化程度高, 直接阻断了河岸带流向河道的物质循环和能量流动, 导致河岸带的净化过滤作用无法得到发挥, 从而导致滇池流域的河岸带水文形貌条件对于大型底栖动物群落结构的影响甚微。

进一步分析河道不同组份对大型底栖动物群落的影响可以看出, 河道作为大型底栖动物的生存和活动场所, 其水文形貌条件构成了大型底栖动物群落的栖息地物理环境。构成河道物理生境的不同组成成份, 都与底栖动物群落具有一定的相关性 (图 4)。其中, 河道渠道化特征通过影响河道生境和陆地生境之间的物质循环和能量流动, 改变了河道基本生境因子和食物的可获性, 导致底栖动物群落结构的变化 (Klein, 1979)。河道坡降对于流速大小影响较大, 而流速通过影响底泥的沉积量和稳定性影响底栖动物的组成和多样性 (Wallace et al., 1996)。温度除了影响不同适温类型的底栖动物组成, 还通过影响细胞代谢速度, 影响生物的数量和个体生长发育 (Johnson et al., 1971)。而底质对于大型底栖动物的分布有着最为重要的影响 (图 4), 其单个因子的解释率为 7.9%, 成为影响大型底栖动物群落最大的因子。

底质是底栖动物的直接接触面, 部分底栖动物甚至直接以底泥为食物, 使得底质成为河流生态系统中影响大型底栖动物群落结构最重要的环境因素之一 (Arunachalam et al., 1991; Beisel et al., 1998; Reice, 1985; 刘宝兴, 2007), 底质的粒径大小、异质性、密实性和稳定性等对底栖动物的组成造成显著影响 (Buss et al., 2004; Beauger et al., 2006)。与组成均匀的河床底质相比, 底质粒径组成范围广泛的河床可以形成多样性的生物栖息地, 而生物栖息

地的多样性愈高,底栖动物的生物多样性就愈高。粒径范围较广的卵石河床不仅为附生动物提供了很大的附着面积,其缝隙也为底栖动物提供了大量的生存空间和避难场所,有利于底栖动物的生存(段学花等,2007)。底质的密实性对于溶解氧和有机质碎屑含量影响显著,通常松散底质溶解氧含量高、有机质含量丰富,形成多样性更高的底栖生物群落(Cobb et al., 1992; Flecker et al., 1984)。底质任何形式的不稳定,都会导致底栖动物密度、生物量和丰度度的降低(Beisel et al., 1998)。滇池流域入湖河流的底质量化结果所展示的河段总体底质得分都偏低,底质状况较差,其底栖生物多样性呈现较低的结果(表2),证明了河流底质质量是保障河流底栖动物生物多样性的关键因子。

在影响底质的各种因素中,河道人工化是对河道底质最彻底的颠覆。在该研究中,通过 Spearman 分析证实了滇池入湖河流的底质质量与河道硬化的关系,研究结果证明,河道渠道化与底质平均得分的相关性为-0.374 ( $P=0.001$ ),表明河道硬化工程是导致底质质量下降的主要原因之一。随着河道人工化程度的增高,底质平均得分有下降的趋势。但在河道人工化程度相似的河段,其底质平均得分有一定的差别,这与河道硬化工程实施时间密切相关,表明底质在河道硬化工程后能够向着自然状态进行自我恢复,但自我恢复作用有限(朱国平等,2004)。

近年来,为恢复流域生态健康,滇池流域实施了大量河道渠道化的生态修复工程(张慧,2014)。虽然硬化河道在一定程度上促进了水质状态的好转,但对底质的剧烈扰动,导致底栖动物群落呈现出多样性较低、稳定性较差的状态,生态修复工程成为了破坏河道水文形貌、降低水生态系统物理完整性和水生生物多样性的生态破坏工程。因此,为了恢复滇池流域大型底栖动物群落的多样性和完整性,建议主要开展以河道为主要对象的生态修复。在对河道的利用过程中,对自然河道的改变控制在最小限度内,尽可能利用现有有利地形,最大限度地保留河道自然形态(陈婉,2008)。对于河岸侵蚀严重的河段,采用生态化的护岸措施,减少对河道的干扰和破坏(陈明曦等,2007)。对于已经被人工破坏了的河道,要遵循自然原则,修复硬化的河道,尽量将河道恢复到未受人类干扰的自然状态,保持河道横向上的连通性和完整性,从而保证河道和河岸带之间正常的物质循环和能量流动,提高河道生境的自我恢复和自我净化能力。针对河流底质,减少对底泥的异位修复,避免扰动底栖动物群落的生境。污染严重的底泥则可采用投放微生物

分解污染物等原位修复方法进行修复(李铁等,2008;黄廷林等,2012)。在此基础上,加强对河岸带植被的保护管理,退耕还林还草,避免人为用地比例的增加,保证河岸带净化过滤作用的正常发挥,促进生态系统健康的恢复。

#### 4 结论

(1) 滇池流域大型底栖动物群落和水文形貌特征关系密切,其中,底质组成、林地百分比、其它用地百分比、水温、河道坡降和河道人工化情况对于底栖动物群落的影响显著。

(2) 与河岸带水文形貌特征相比,河道水文形貌特征对于大型底栖动物的影响更大,在未来大型底栖动物多样性监测和保护中,应该更注重河道水文形貌条件的空间变化和管理。

#### 参考文献:

- ALLAN J, JOHNSON L. 1997. Catchment-scale analysis of aquatic ecosystems [J]. *Freshwater Biology*, 37(1): 107-111.
- ARUNACHALAM M, NAIR K M, VIJVERBERG J, et al. 1991. Substrate selection and seasonal variation in densities of invertebrates in stream pools of a tropical river [J]. *Hydrobiologia*, 213(2): 141-148.
- BARLING R D, MOORE I D. 1994. Role of buffer strips in management of waterway pollution: A review [J]. *Environmental Management*, 18(4): 543-558.
- BARMUTA L A. 1990. Interaction between the effects of Substratum, Velocity and location on Stream Benthos: and experiment [J]. *Marine and Freshwater Research*, 41(5): 557-573.
- BEAUGER A, LAIR N, REYES-MARCHANT P, et al. 2006. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics [J]. *Hydrobiologia*, 571(1): 63-76.
- BEISEL J, USSEGLIO-POLATERA P, THOMAS S, et al. 1998. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics [J]. *Hydrobiologia*, 389(1-3): 73-88.
- BUSS D F, BAPTISTA D F, NESSIMIAN J L, et al. 2004. Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams [J]. *Hydrobiologia*, 518(1-3): 179-188.
- COBB D G, GALLOWAY T D, FLANNAGAN J F. 1992. Effects of discharge and substrate stability on density and species composition of stream insects [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(9): 1788-1795.
- FLECKER A S, ALLAN J D. 1984. The importance of predation, substrate and spatial refugia in determining lotic insect distributions [J]. *Oecologia*, 64(3): 306-313.
- FRIBERG N, SKRIVER J, LARSEN S E, et al. 2010. Stream macroinvertebrate occurrence along gradients in organic pollution and eutrophication [J]. *Freshwater Biology*, 55(7): 1405-1419.
- JOHNSON M G, BRINKHURST R O. 1971. Production of benthic macroinvertebrates of Bay of Quinte and Lake Ontario [J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 28(11): 1699-1714.
- KAIL J. 2003. Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams [J]. *Geomorphology*, 51(1): 207-223.
- KARR J R. 1991. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management [J]. *Ecological Applications*, 1(1): 66-84.
- KLEIN R D. 1979. Urbanization and stream quality impairment [J]. *Water resources bulletin*, 15(4): 948-963.
- MARZINELLI E M, ZAGAL C J, CHAPMAN M G, et al. 2009. Do modified habitats have direct or indirect effects on epifauna? [J]. *Ecology*, 90(10): 2948-2955.

- MUNEEPEERAKUL R, BERTUZZO E, LYNCH H J, et al. 2008. Neutral metacommunity models predict fish diversity patterns in Mississippi-Missouri basin [J]. *Nature*, 453(7192): 220-222.
- PEDERSEN M L, FRIBERG N, SKRIVER J, et al. 2007. Restoration of Skjern River and its valley—short-term effects on river habitats, macrophytes and macroinvertebrates [J]. *Ecological Engineering*, 30(2): 145-156.
- REICE S R. 1985. Experimental disturbance and the maintenance of species diversity in a stream community [J]. *Oecologia*, 67(1): 90-97.
- SANDIN L, JOHNSON R K. 2004. Local, landscape and regional factors structuring benthic macroinvertebrate assemblages in Swedish streams [J]. *Landscape Ecology*, 19(5): 501-514.
- STATZNER B, GORE J A, RESH V H. 1988. Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4): 307-360.
- STATZNER B, HIGLER B. 1986. Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns [J]. *Freshwater biology*, 16(1): 127-139.
- STATZNER B, HOLM T F. 1982. Morphological adaptations of benthic invertebrates to stream flow—an old question studied by means of a new technique (Laser Doppler Anemometry) [J]. *Oecologia*, 53(3): 290-292.
- WALLACE J B, WEBSTER J R. 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function [J]. *Annual Review of Entomology*, 41(1): 115-139.
- 蔡佳亮, 苏玉, 文航, 等. 2011. 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征及其与水环境因子的关系[J]. *环境科学*, 32(4): 982-989.
- 陈明曦, 陈芳清, 刘德富. 2007. 应用景观生态学原理构建城市河道生态护岸[J]. *长江流域资源与环境*, 16(1): 97-101.
- 陈婉. 2008. 城市河道生态修复初探[D]. 北京: 北京林业大学: 1-91.
- 陈小华, 高伟, 刘文亮, 等. 2013. 平原河网地区大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 22(8): 1310-1316.
- 戴友芝, 唐受印, 张建波. 2000. 洞庭湖底栖动物种类分布及水质生物学评价[J]. *生态学报*, 20(2): 277-282.
- 段学花, 王兆印, 田世民. 2007. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 47(9): 1553-1556.
- 黄廷林, 杨凤英, 柴蓓蓓, 等. 2012. 水源水库污染底泥不同修复方法脱氮效果对比实验研究[J]. *中国环境科学*, 32(11): 2032-2038.
- 姜莘红, 周易勇, 纪磊, 等. 2012. 月湖底泥疏浚后底栖动物群落的恢复及其与环境的关系[J]. *生态环境学报*, 21(6): 1088-1095.
- 李良. 2013. 东江大型底栖动物群落结构时空分布特征与环境指示作用[D]. 广州: 暨南大学: 1-62.
- 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 2015. 影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析[J]. *环境科学*, 35(9): 3504-3512.
- 李轶, 李晶, 胡洪营, 等. 2008. 难降解有机物污染底质原位修复技术研究进展[J]. *生态环境*, 17(6): 2482-2487.
- 刘宝兴. 2007. 苏州河生态恢复过程中底栖动物的研究[D]. 上海: 华东师范大学: 1-70.
- 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等. 2013. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 33(9): 2803-2815.
- 孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 2011. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. *中国环境科学*, 31(12): 2052-2057.
- 王备新. 2003. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学: 1-128.
- 谢祚浑, 周一兵. 2002. 中国北方盐碱水域中的底栖动物[J]. *大连水产学院学报*, 17(3): 176-186.
- 张慧. 2014. 滇池流域综合治理对水质的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学: 1-97.
- 朱国平, 徐伟, 齐实, 等. 2004. 山东省招远市城东河河道近自然治理设计初探[J]. *水土保持研究*, 11(1): 160-162.

## Influence of Hydromorphological Factors on Macrozoobenthic Communities in Streams of Lake Dianchi Basin in the Wet Season

GAO Zhe<sup>1</sup>, CAO Xiaofeng<sup>1,2\*</sup>, FAN Hao<sup>1</sup>, JIANG Dalin<sup>3</sup>, HUANG Yi<sup>1</sup>

1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Environment and Energy, Peking University, Shenzhen 518055, China;

3. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** The structure of macrozoobenthic communities was shaped by multiple types of environmental factors. The hydromorphological factors, determining the physical habitats, were closely related with macrozoobenthic communities. In the context of lack of corresponding researches, understanding hydromorphological influences on macrozoobenthic communities was valuable for extending our knowledge concerning relationships between macrozoobenthic communities and environmental factors. Based on the ecological investigation in the wet season from 2012 to 2013, the aims of our study were to identify the key factors in channel and riparian habitats related to macrozoobenthic communities and determine which type of factors were more important in explaining the variation of macrozoobenthic communities. Canonical correspondence analysis was used to identify the key factors influencing the whole communities. Partial canonical correspondence analysis was also applied to compare the relative importance of the hydromorphological factors in channels and those in riparian zones in structuring macrozoobenthic communities. The Canonical Correspondence Analysis (CCA) results showed that the key hydromorphological variables related to substrate, channelization, slope, water temperature, forest percentage and other landuse percentage, which explained 36.2% of the variance of the macrozoobenthic communities in total. Forest percentage and other landuse percentage represented the selected riparian variables and contributed only 9.2% to the changes of macrozoobenthic communities while the other four factors explained 21.6%. It was concluded that the hydromorphological factors in channel environments played a more important part in structuring macrozoobenthic communities than those in riparian environments, which will be of great importance to biological monitoring, ecosystem health assessment and diversity conservation for macrozoobenthos.

**Key words:** macrozoobenthic community; hydromorphological factors; wet season; Lake Dianchi Basin