

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

蔡佳亮, 苏玉, 文航, 王东伟, 黄艺*

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要:研究了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. 在滇池流域 29 条入湖河流 2009 年 7~8 月进行大型底栖动物群落调查, 并在 2008 年 9 月~2009 年 8 月进行逐月 17 项水环境指标监测, 目的是阐明滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征, 识别影响大型底栖动物群落特征的主要水环境因子, 比较大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数与水环境质量评价空间分布格局的特点. 滇池流域入湖河流丰水期共检出大型底栖动物 3 门 7 科 8 属(其中环节动物门 4 科 5 属, 软体动物门 2 科 2 属, 节肢动物门 1 科 1 属), 群落结构以环节动物门的水丝蚓属(耐污生物)为优势属; TN、NH₄⁺-N、TP 和 DO 是影响大型底栖动物群落特征的主要水环境因子, 分别为 2.03~32.00、0.34~26.66、0.09~3.20、0.10~6.80 mg/L; 大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数与水环境质量评价的空间分布格局一致, 均为流域北部入湖河流(王家堆渠、新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河、船房河、采莲河、金家河、盘龙江、大清河、海河、六甲宝象河、小清河、五甲宝象河、虾坝河、老宝象河、新宝象河和马料河)污染状况严重程度>流域南部入湖河流(淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河)>流域东部入湖河流(洛龙河、捞鱼河和南冲河).

关键词:滇池流域; 大型底栖动物群落; 水环境因子; 空间分布格局; 丰水期

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-0982-08

Characteristics of Macrozoobenthic Assemblages and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in Streams of Lake Dianchi Watershed in the Wet Season

CAI Jia-liang, SU Yu, WEN Hang, WANG Dong-wei, HUANG Yi

(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The characteristics of macrozoobenthic assemblages and their relationship with aquatic environmental factors in the 29 streams of the Lake Dianchi (LD) watershed in the wet season were studied. Biosurveys of macrozoobenthic assemblages during July and August 2009, as well as 17 mensal aquatic physicochemical parameters from September 2008 to August 2009 were carried out at 29 sampling sites. The objectives were to demonstrate the characteristics of macrozoobenthic assemblages in streams of the LD watershed in the wet season, to identify the key aquatic environmental factors affecting these assemblages, and to investigate the relationship of spatial patterns between the Shannon-Weaver diversity index of the assemblages and the assessment of aquatic environmental quality. Results identified 3 divisions, 7 families, and 8 genera of macrozoobenthos, including 4 families and 5 genera of Annelida, 2 families and 2 genera of Mollusca, and 1 family and 1 genus of Arthropoda. Among these, *Limnodrilus* (Annelida), a tolerant species, was the dominant genus. TN, NH₄⁺-N, TP, and DO were the key aquatic environmental factors affecting the macrozoobenthic assemblages, respectively 2.03-32.00, 0.34-26.66, 0.09-3.20, and 0.10-6.80 mg/L. The spatial patterns of the Shannon-Weaver diversity index of macrozoobenthic assemblages and the assessments of aquatic environmental quality were both greatest in the streams flowing into the east LD (Luolonghe, Laoyuhe, and Nanchonghe rivers), followed by those flowing into the south LD (Yunihe, Laochaihe, Baiyuhe, Cixianghe, Dongdahe, Zhonghe and Guchenghe rivers), and least in those flowing into the north LD (Wangjiadiqu, Xinyunlianghe, Laoyunlianghe, Wulonghe, Daguanhe, Xibahe, Chuanfanghe, Cailianhe, Jinjiahe, Panlongjiang, Daqinghe, Haihe, Liujiabaoxianghe, Xiaoqinghe, Wujiabaoxianghe, Xiabahe, Laobaoxianghe, Xinbaoxianghe, and Maliaohe rivers).

Key words: Lake Dianchi watershed; macrozoobenthic assemblages; aquatic environmental factors; spatial pattern; wet season

大型底栖动物群落通常包括了各个营养级和不同耐污能力的种类, 因而能够较真实地反映水环境污染状况的累积效应; 同时, 大型底栖动物的固定生活模式和长于 1 a 的复杂生命周期, 又使其能够较全面地表征某个具体区域水环境变化的短期影响^[1]. 因此, 研究大型底栖动物群落特征与水环境

因子的关系, 对于以恢复生态系统健康为目标的水

收稿日期: 2010-05-08; 修订日期: 2010-06-09
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07526-002-06)
作者简介: 蔡佳亮 (1983~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水污染控制与环境生物技术, E-mail: caijiali-ang-bj@163.com
* 通讯联系人, E-mail: yhuang@pku.edu.cn

环境质量评价和水污染控制,具有重要价值. 国内外许多研究报道了利用大型底栖动物群落特征作为水生生物指标来评价海洋与河口区的生态系统健康和水环境质量状况,包括 AZTI 海洋生物指数 (AMBI)^[2]、Bentix 指数^[3]和大型底栖动物污染指数 (MPI)^[4],而对河流或湖泊等淡水生态系统中大型底栖动物群落特征与水环境因子关系的研究相对缺乏.

近年来,滇池流域生态系统健康和水环境质量评价以及水污染控制的研究主要集中在滇池湖体^[5-9],而入湖河流则相对较少^[10]. 其中,有关大型底栖动物群落特征与水环境因子关系的研究鲜见报道.

本研究主要目标是阐明滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征,识别影响大型底栖动物群落特征的主要水环境因子,比较大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数与水环境质量评价

空间分布格局的特点.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

滇池流域是我国典型的高原淡水湖泊流域,位于云贵高原中部 (24°29' ~ 25°28' N, 102°29' ~ 103°01' E),流域总面积为2 920 km². 流域内共有 29 条河流呈辐射状汇入滇池 (由北至南依次为王家堆渠、新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河、船房河、采莲河、金家河、盘龙江、大清河、海河、六甲宝象河、小清河、五甲宝象河、虾坝河、老宝象河、新宝象河、马料河、洛龙河、捞鱼河、南冲河、淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河),而流域西部的海口河是滇池唯一的出水口. 滇池流域 29 条入湖河流大型底栖动物群落调查和水环境指标监测的采样点布设一致,如图 1 所示,其布设原则主要依据湖泊流域生态水文过程的完整性,即采样点布

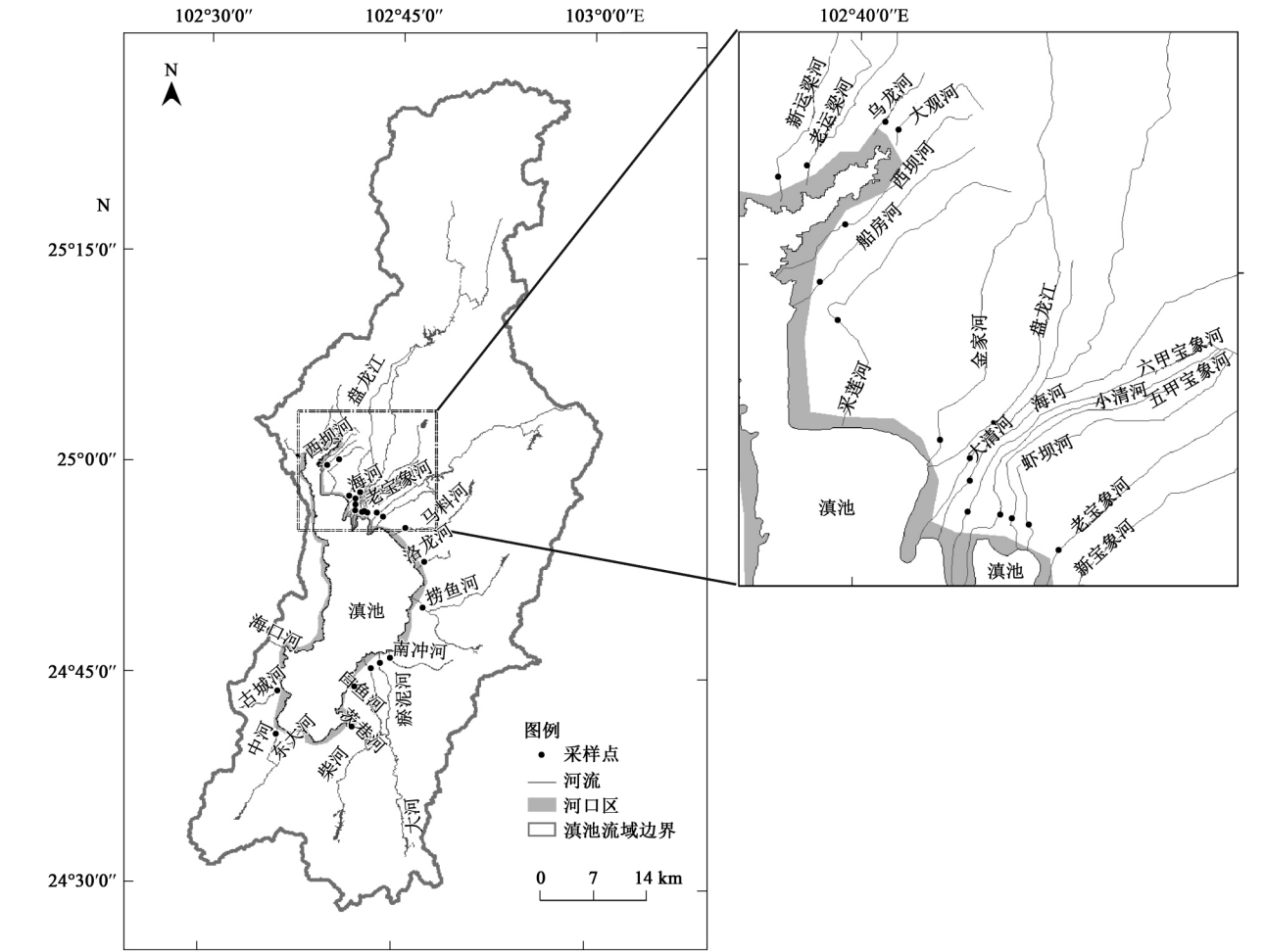


图 1 滇池流域入湖河流各采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in streams of Lake Dianchi watershed

设在入湖河流下游,且避开滇池回水 15 ~ 20 m 的区域内.

1.2 样品采集与处理

滇池流域具有干湿分明的低纬度高原季风气候特征,其降水量主要集中在每年 5 ~ 10 月的丰水期,约占全年总量的 80%;而在 11 月 ~ 次年 4 月的枯水期,流域 29 条入湖河流中的 20 条水库下游河流会出现 3 ~ 6 个月不同程度的断流. 因此,本研究选择 2009 年 7 ~ 8 月进行大型底栖动物群落调查,并根据大型底栖动物生命周期的特点,在 2008 年 9 月 ~ 2009 年 8 月进行逐月水环境指标监测.

大型底栖动物群落调查:选用面积为 1/16 m² 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 m² 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^[11,12].

水环境指标监测:共 17 项,包括水温(WT)、酸碱度(pH)、径流量(R)、总悬浮物(TSS)和溶解氧(DO)等 5 项物理指标,以及氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、生化需氧量(BOD)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、总有机碳(TOC)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)和六价铬(Cr)等 12 项化学指标;样品采集和保存依据参考文献[13]进行,样品测定依据参考文献[14]进行,并均由云南省昆明市环境监测中心完成.

1.3 数据分析方法

1.3.1 Shannon-Weaver 多样性指数

大型底栖动物群落的生物多样性分析采用 Shannon-Weaver 多样性指数^[15],即:

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

式中, H 为 Shannon-Weaver 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. 当 $H \geq 3$ 时,表示水环境清洁;当 $3 > H \geq 2$ 时,表示水环境轻度污染;当 $2 > H \geq 1$ 时,表示水环境中度污染;当 $1 > H \geq 0$ 时,表示水环境重度污染.

1.3.2 等级聚类分析

等级聚类分析是一种无固定模式的探索性识别技术,揭示样品彼此间的相似性. 其实质是基于每对

样品间的某种相似性定义(例如,Btay-Curtisx 相似性系数)的亲疏程度,将性质最接近的样品逐级连接成组,并通过 1 个树枝图来表示群落结构^[16,17]. 在分析前,需对原始数据进行优化,即将大型底栖动物生物密度数据标准化,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.

1.3.3 因子分析

因子分析是一种常用的多变量统计分析方法. 其实质是在众多初始变量中提取若干均受某个共同因素(又称公共因子)影响而彼此之间相关性较高的变量,将它们归为同一类别,而不同类别的变量之间相关性则较低,以此达到变量降维的目的. 因子分析已广泛应用于地表水水质评估、地下水水位曲线识别以及重金属和有机农药时空特征分析等方面^[18,19]. 本研究为使具有较大因子荷载量的变量个数减少到最低限度,采用方差最大正交旋转.

1.3.4 典型对应分析

典型对应分析是一种基于对应分析发展而来的一种排序方法. 其实质是在对应分析的迭代过程中,将每次得到的样方排序坐标值与所选取的环境因子进行多元线性回归. 典型对应分析多被用来探讨生物物种与所处环境(例如,气候、理化特征等)之间的相互关系^[20,21]. 本研究通过构建大型底栖动物属种数据矩阵与水环境指标数据矩阵,进而分析水环境因子对大型底栖动物属种分布的影响. 大型底栖动物属种数据为其主要属种的生物密度(ind/m²),而主要属种的判断依据为该属种至少出现在 2 个采样点,并且在一个样品中生物密度 > 1%^[22,23]. 在典型对应分析双轴图中,水环境指标用箭头表示,箭头连线的长度表示大型底栖动物属种分布与该水环境指标相关性的 大小,箭头连线与排序轴的角度表示该指标与水环境状况相关性的 大小,箭头所处的象限则表示该指标与水环境状况相关性的正负.

1.3.5 数理统计方法

采用 SPSS17.0、CANOCO for Windows 4.5 和 Primer 5.0 软件进行数据分析与检验.

2 结果与分析

2.1 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征

2.1.1 群落结构

滇池流域入湖河流 2009 年 7 ~ 8 月共检出大型底栖动物 3 门 7 科 8 属. 其中环节动物门 4 科 5 属,

占总属数的 57.14% ;其次为软体动物门 2 科 2 属,占 28.57% ;再次为节肢动物门 1 科 1 属,占 14.29% . 基于上述检出结果可得,滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落结构以环节动物门的水丝蚓属 (*Limnodrilus*) 为优势属,而其它出现频率较高的常见属类包括:环节动物门的舌蛭属 (*Glossiphonia*) 和尾鳃蚓属 (*Branchiura*),以及节肢动物门的前突摇蚊属 (*Procladius*) (表 1).

表 1 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物名录
Table 1 List of macrozoobenthos in streams of Lake Dianchi watershed in the wet season

门名	科名	属名
节肢动物门 Arthropoda	摇蚊科 Chironomidae	前突摇蚊属 <i>Procladius</i>
环节动物门 Annelida	石蛭科 Erpobdellidae	红蛭属 <i>Dina</i>
	黄蛭科 Haemopidae	金线蛭属 <i>Whitmania</i>
	舌蛭科 Glossiphoniidae	舌蛭属 <i>Glossiphonia</i>
	颤蚓科 Tubificidae	尾鳃蚓属 <i>Branchiura</i>
		水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i>
软体动物门 Mollusca	田螺科 Viviparidae	圆田螺属 <i>Cipangopaludina</i>
	珠蚌科 Unionidae	珠蚌属 <i>Unio</i>

2.1.2 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 16 ~ 21 296 ind/m²之间. 在 50% 的相似性水平上^[24],大型底栖动物生物密度的等级聚类分析可将 29 条入湖河流分成 3 组(图 2). A 组共 3 条,均位于流域东部,包括洛龙河、捞鱼河和南冲河; B 组共 19 条,均位于流域北部,包括王家堆渠、新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河、船房河、采莲河、金家河、盘龙江、大青河、海河、六甲宝象河、小清河、五甲宝象河、虾坝河、老宝象河、新宝象河和马料河; C 组共 7 条,均位于流域南部,包括淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河.

从空间分布格局来看,流域北部入湖河流丰水期大型底栖动物生物密度最大,为 2 430 ind/m²;流域南部入湖河流次之,为 583 ind/m²;流域东部入湖河流最小,为 164 ind/m². 流域北部入湖河流丰水期大型底栖动物多度以环节动物门(62.50%)最多,节肢动物门(37.50%)次之,无软体动物门;流域东部入湖河流以环节动物门(83.97%)最多,软体动物门(14.95%)次之,节肢动物门(1.09%)最少;而流域南部入湖河流则以环节动物门(85.24%)最多,软体动物门(14.76%)次之,无节肢动物门(图 3).

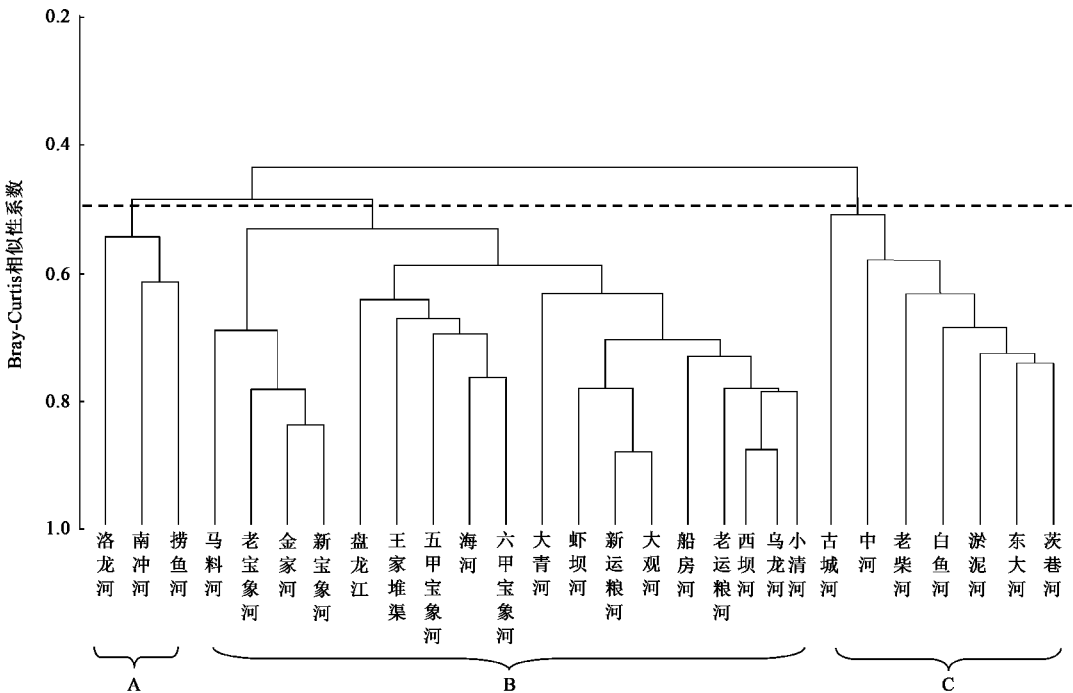


图 2 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物生物密度 Bray-Curtis 相似性系数的等级聚类分析树状图
Fig. 2 Dendrogram of hierarchical cluster analysis for macrozoobenthic density in streams of Lake Dianchi watershed in the wet season based on Bray-Curtis similarity coefficients

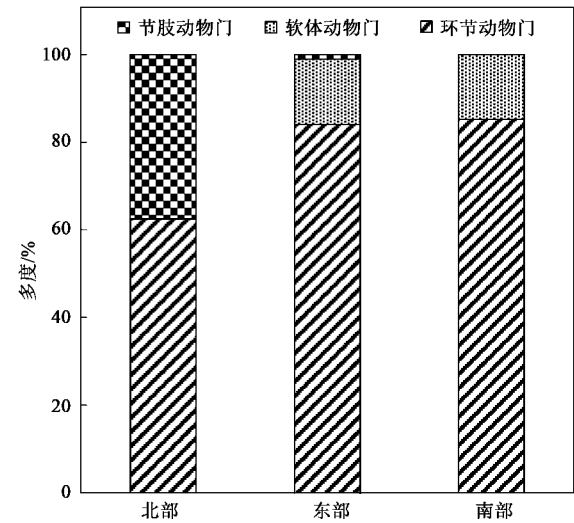


图3 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物多度空间分布格局

Fig.3 Spatial pattern of macrozoobenthic abundance in streams of Lake Dianchi watershed in the wet season

滇池流域入湖河流丰水期水丝蚓属生物密度和生物密度百分比分别在 0 ~ 19 552 ind/m² 和 0 ~ 100% 之间.从空间分布格局来看,流域北部入湖河流丰水期水丝蚓属生物密度和生物密度百分比最大,分别为 3 395 ind/m² 和 73.43%;流域南部入湖

河流次之,分别为 603 ind/m² 和 60.58%;流域东部入湖河流最小,分别为 60 ind/cm² 和 45.87%.

2.1.3 Shannon-Weaver 多样性指数

滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数 (*H*) 在 0 ~ 2.28 之间.从空间分布格局来看,流域东部入湖河流丰水期大型底栖动物群落 *H* 最大,为 1.04;流域南部入湖河流次之,为 0.86;流域北部入湖河流最小,为 0.26.

2.2 影响滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征的主要水环境因子

滇池流域入湖河流 2008 年 9 月 ~ 2009 年 8 月 17 项逐月水环境指标的年均值范围分别是:WT 为 14.90 ~ 18.50 ℃,pH 为 7.10 ~ 8.10,*R* 为 0.10 ~ 9.30 m³/s,TSS 为 5.50 ~ 1 691.50 mg/L,DO 为 0.10 ~ 6.84 mg/L,NH₄⁺-N 为 0.34 ~ 26.66 mg/L,TN 为 2.03 ~ 32.00 mg/L,TP 为 0.09 ~ 3.20 mg/L,高锰酸盐指数为 2.20 ~ 96.60 mg/L,BOD 为 1.90 ~ 91.10 mg/L,NO₃⁻-N 为 0.24 ~ 6.17 mg/L,TOC 为 7.40 ~ 39.00 mg/L,Cu 为 0.000 ~ 0.185 mg/L,Pb 为 0.000 ~ 0.081 mg/L,Zn 为 0.000 ~ 1.405 mg/L,Cd 为 0.000 ~ 0.085 mg/L 和 Cr 为 0.000 ~ 0.003 mg/L (表 2).

表 2 滇池流域北部、东部和南部入湖河流水环境指标年均值及其范围

Table 2 Annual average of aquatic environmental indicators in streams of north, east, and south Lake Dianchi watershed

入湖河流		WT /℃	pH	<i>R</i> /m ³ ·s ⁻¹	TSS /mg·L ⁻¹	DO /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹
北部	最大值	18.50	8.10	9.30	118.85	6.11	26.66	32.00	3.20	27.26
	平均值	16.88	7.62	1.99	31.18	2.51	11.46	16.22	1.27	14.77
	最小值	14.90	7.29	0.10	5.50	0.10	1.90	3.05	0.35	5.94
东部	最大值	18.08	7.85	1.67	86.82	6.22	0.80	11.16	0.19	5.60
	平均值	17.19	7.78	0.88	49.66	5.49	0.54	7.78	0.11	3.81
	最小值	16.62	7.67	0.46	20.27	4.49	0.34	5.29	0.09	2.20
南部	最大值	17.94	7.63	1.19	1 691.50	6.84	0.82	12.08	5.98	96.60
	平均值	16.98	7.39	0.50	283.09	5.99	0.39	6.45	2.78	17.89
	最小值	15.50	7.10	0.23	30.70	3.52	0.08	2.03	0.36	3.54
入湖河流		BOD /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TOC /mg·L ⁻¹	Cu /mg·L ⁻¹	Pb /mg·L ⁻¹	Zn /mg·L ⁻¹	Cd /mg·L ⁻¹	Cr /mg·L ⁻¹	
北部	最大值	91.10	4.71	39.00	0.185	0.081	1.405	0.085	0.003	
	平均值	21.94	1.24	21.94	0.044	0.004	0.159	0.008	0.000	
	最小值	4.56	0.24	11.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
东部	最大值	3.40	6.17	12.90	0.050	0.000	0.216	0.000	0.002	
	平均值	2.74	4.18	9.27	0.020	0.000	0.092	0.000	0.001	
	最小值	1.90	1.88	7.40	0.003	0.000	0.008	0.000	0.001	
南部	最大值	7.71	3.59	18.50	0.075	0.080	0.373	0.002	0.000	
	平均值	4.27	1.76	12.63	0.022	0.023	0.180	0.001	0.000	
	最小值	2.96	0.47	7.60	0.000	0.000	0.064	0.000	0.000	

对上述 17 项指标进行因子分析,以辨识表征滇池流域入湖河流水环境状况的主导因子. 由表 3 可得,选取特征值 > 1 的第一主成分(F1)、第二主成分(F2)、第三主成分(F3)、第四主成分(F4)和第五主成分(F5)作为主成分因子,其累积方差贡献率达 80.825%,说明能够反映这些指标整体的水环境状况,并且 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 系数为 0.612 > 0.600,说明其适合进行因子分析. 同时,旋转后的因子载荷率能够说明主成分因子与水环境状况之间

的相关性大小,即|因子载荷率| > 0.750,表示两者的相关性好;0.750 ≥ |因子载荷率| > 0.500,表示两者的相关性一般;0.500 ≥ |因子载荷率| > 0.300,表示两者的相关性差;|因子载荷率| ≤ 0.300,表示两者无相关性^[25]. 由表 4 可得,BOD、TOC、Pb、Cu 和 TSS 的|因子载荷率|均小于 0.750 且大于 0.500,说明其与水环境状况的相关性一般. 因此,这 5 项指标不是表征滇池流域入湖河流水环境状况的主导因子.

表 3 滇池流域入湖河流水环境指标的因子特征值						
Table 3 Eigenvalues of aquatic environmental indicators in streams of Lake Dianchi watershed						
因子	因子旋转前			因子旋转后		
	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
F1	6.176	36.332	36.332	5.435	31.968	31.968
F2	2.776	16.332	52.664	2.974	17.495	49.463
F3	2.032	11.955	64.619	2.076	12.214	61.677
F4	1.481	8.710	73.330	1.880	11.057	72.735
F5	1.182	6.955	80.285	1.284	7.550	80.285
F6	0.931	5.474	85.759			
F7	0.882	5.188	90.947			
F8	0.425	2.502	93.449			
F9	0.325	1.912	95.362			
F10	0.306	1.802	97.164			
F11	0.169	0.997	98.160			
F12	0.134	0.789	98.949			
F13	0.078	0.461	99.411			
F14	0.063	0.371	99.781			
F15	0.024	0.143	99.924			
F16	0.010	0.058	99.982			
F17	0.003	0.018	100.000			

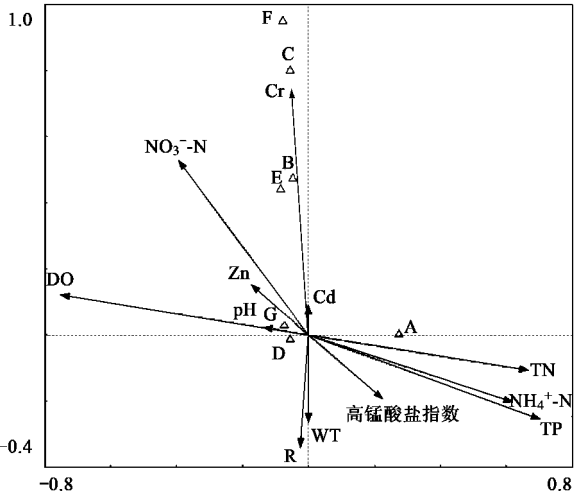
表 4 滇池流域入湖河流水环境指标旋转后的因子载荷率												
Table 4 Loadings of rotated aquatic environmental indicators in streams of Lake Dianchi watershed												
因子	旋转后的因子载荷率											
	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN	高锰酸盐指数	DO	BOD	TOC	Zn	Cd	Pb	Cu	Cr
F1	0.940	0.913	0.901	0.890	-0.816	0.723	0.656	0.213	0.239	-0.135	0.181	-0.127
F2	0.215	0.124	0.249	0.029	0.009	0.544	-0.096	0.944	0.907	0.690	0.504	-0.155
F3	-0.034	-0.028	0.102	-0.189	0.064	-0.140	-0.243	0.086	0.076	-0.142	-0.126	0.867
F4	-0.058	-0.007	-0.095	-0.164	-0.230	-0.188	0.548	-0.049	0.032	-0.142	0.006	-0.059
F5	-0.121	-0.193	-0.169	0.195	-0.061	0.116	-0.008	-0.099	-0.034	-0.228	0.415	0.287

对余下 12 项水环境状况主导因子与丰水期大型底栖动物属种进行典型对应分析,以辨识影响滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征的主

要水环境因子. 由图 4 可得,第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为 0.867 和 0.426,它们共解释了丰水期大型底栖动物属种数据累积方差值的

72.700%,由此表明第一排序轴和第二排序轴能够真实反映水环境状况主导因子对丰水期大型底栖动物属种分布的影响程度,并且第一排序轴较第二排序轴与主导因子的相关性更好;同时2个物种排序轴近似垂直,相关系数为0.016,2个环境排序轴的相关系数为0,说明排序结果是可靠的.从箭头的连线长度可以看出,主导因子对丰水期大型底栖动物属种分布的相关性大小为 $TP > DO > Cr > NO_3^- - N > NH_4^+ - N > TN > R > \text{高锰酸盐指数} > WT > Zn > pH > Cd$;从箭头与第一排序轴的夹角可以看出,主导因子与水环境状况相关性的大小为 $TN > DO > pH > NH_4^+ - N > TP > \text{高锰酸盐指数} > Zn > NO_3^- - N > Cr > R > WT > Cd$,并且 R 、 pH 、 $NO_3^- - N$ 、 Zn 、 Cr 和 DO 与水环境状况呈负相关.因此,滇池流域入湖河流水环境状况主导因子对丰水期大型底栖动物属种分布的影响程度为 $TN > DO > pH > NH_4^+ - N > TP > \text{高锰酸盐指数} > Zn > NO_3^- - N > Cr > R > WT > Cd$.再通过典型对应分析中的蒙特卡罗检验对其影响程度的显著性进行检验.由表5可得, TN 、 $NH_4^+ - N$ 、 TP 和 DO 这4项水环境状况主导因子对丰水期大型底栖动物属种分布的影响程度显著.因此, TN 、 $NH_4^+ - N$ 、 TP 和 DO 是影响滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物

群落特征的主要水环境因子.



A. 摇蚊属 (*Chironomus*)、B. 石蛭属 (*Erpobdella*)、
C. 舌蛭属 (*Glossiphonia*)、D. 尾塞蚓属 (*Branchiura*)、
E. 水丝蚓属 (*Limnodrilus*)、F. 珠蚌属 (*Unio*)、
G. 圆田螺属 (*Cipangopaludina*)

图4 滇池流域入湖河流水环境状况主导因子与丰水期大型底栖动物属种的典型对应分析双轴图

Fig.4 Result of canonical correspondence analysis for aquatic environmental factors and macrozoobenthic assemblages in the wet season in streams of Lake Dianchi watershed

表5 滇池流域入湖河流水环境状况主导因子与丰水期大型底栖动物属种的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between aquatic environmental factors and macrozoobenthic assemblages in the wet season in streams of Lake Dianchi watershed

项目	WT	R	pH	高锰酸盐指数	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN	NO ₃ ⁻ -N	Zn	Cd	Cr	DO
丰水期大型底栖动物属种	0.001	-0.024	-0.136	0.222	0.616 ¹⁾	0.648 ²⁾	0.699 ²⁾	-0.391	-0.172	0.000	-0.050	-0.748 ²⁾

1) $p < 0.05$; 2) $p < 0.01$

3 讨论

依据参考文献[14],对 TN 、 $NH_4^+ - N$ 、 TP 和 DO 进行水环境质量评价的归一化赋值,即Ⅰ类水~劣Ⅴ类水依次赋值为1~6,以判断滇池流域入湖河流水环境污染状况.从空间分布格局来看,全流域入湖河流 TN 和 $NH_4^+ - N$ 的污染状况均最为严重(劣Ⅴ类水);对于 TP 和 DO 而言,流域北部入湖河流污染状况最严重,分别为劣Ⅴ类水和Ⅴ类水;流域南部入湖河流次之,分别为Ⅴ类水和Ⅳ类水;流域东部入湖河流最小,均为Ⅲ类水(图5).因此,滇池流域入湖河流水环境污染状况严重程度的空间分布格局为北部>南部>东部.

滇池流域入湖河流丰水期水丝蚓属生物密度和

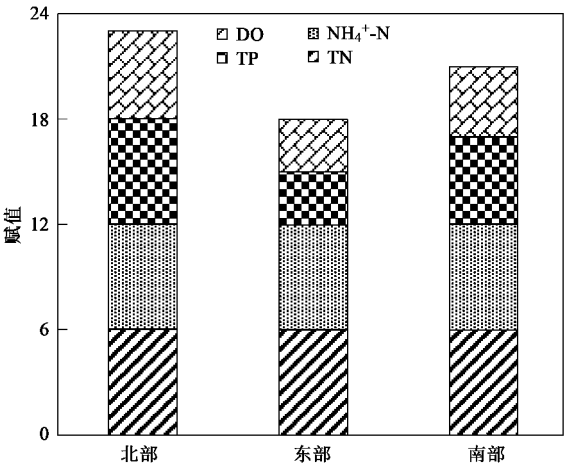


图5 滇池流域入湖河流水环境质量评价空间分布格局
Fig.5 Spatial pattern of water quality assessments in streams of Lake Dianchi watershed

生物密度百分比的空间分布格局均为北部 > 南部 > 东部,而大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数的空间分布格局为东部(水环境中度污染) > 南部(水环境重度污染) > 北部(水环境重度污染);同时众多研究结果^[26,27]已表明,水丝蚓属是典型的耐污生物。因此,滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数与水环境质量评价的空间分布格局是一致的,并且也反映了在水质处于高污染水平(V类水~劣V类水)时,滇池流域入湖河流之间生态系统健康状况的相对好坏程度。

4 结论

(1) 滇池流域入湖河流丰水期共检出大型底栖动物 3 门 7 科 8 属(其中环节动物门 4 科 5 属,软体动物门 2 科 2 属,节肢动物门 1 科 1 属),群落结构以环节动物门的水丝蚓属(耐污生物)为优势属。

(2) TN、NH₄⁺-N、TP 和 DO 是影响滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征的主要水环境因子,分别为 2.03 ~ 32.00、0.34 ~ 26.66、0.09 ~ 3.20 和 0.10 ~ 6.80 mg/L。

(3) 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落 Shannon-Weaver 多样性指数与水环境质量评价的空间分布格局一致,均为流域北部入湖河流(王家堆渠、新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河、船房河、采莲河、金家河、盘龙江、大青河、海河、六甲宝象河、小清河、五甲宝象河、虾坝河、老宝象河、新宝象河和马料河)污染状况严重程度 > 流域南部入湖河流(淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河) > 流域东部入湖河流(洛龙河、捞鱼河和南冲河)。

参考文献:

- [1] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish, second edition (EPA 841-B-99-002) [R]. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [2] Borja A, Franco J, Perez V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**(12): 1100-1114.
- [3] Simboura N, Reizopoulou S. A comparative approach of assessing ecological status in two coastal areas of Eastern Mediterranean [J]. *Ecological Indicators*, 2007, **7**: 455-468.
- [4] 蔡立哲. 大型底栖动物污染指数(MPI) [J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(5): 625-629.
- [5] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 114-120.
- [6] 王智, 涂新海, 肖邦定, 等. LAS 在滇池典型入湖河口缺氧水体中的生物降解[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2189-2194.
- [7] 郑苗壮, 卢少勇, 金相灿, 等. 温度对钝化抑制滇池底泥磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2465-2469.
- [8] 陈晓国, 杨霞, 陈锦, 等. 滇池沉积物菌群对微囊藻毒素的厌氧生物降解[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2527-2531.
- [9] 冯宁, 毛锋, 李晓阳, 等. 滇池生态安全综合评估研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 282-286.
- [10] 谭颢, 陈求稳, 朱传保, 等. 滇池大清河河口二维水环境模型研究与应用[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 634-640.
- [11] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志·淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [12] 王洪铸. 中国小蛭类研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] GB 3838-2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S].
- [15] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. California: University of California Press, 1958. 323-347.
- [16] Singh K P, Malik A, Mohan D, *et al.* Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti Stream (India) - a case study [J]. *Water Research*, 2004, **38**(18): 3980-3992.
- [17] Wang X L, Lu Y L, Lu Y L, *et al.* Identification of anthropogenic influences on water quality of streams in Taihu watershed [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2007, **19**(4): 475-481.
- [18] Ying O Y. Evaluation of stream water quality monitoring stations by principal component analysis [J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2621-2635.
- [19] Luss R, d'Aspremont A. Clustering and feature selection using sparse principal component analysis [J]. *Optimization and Engineering*, 2010, **11**(1): 145-157.
- [20] Erbraak C J F. Canonical correspondence analysis - a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, **65**(5): 1167-1179.
- [21] Dodkins I, Rippey B, Hale P. An application of canonical correspondence analysis for developing ecological quality assessment metrics for river macrophytes [J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(5): 891-904.
- [22] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其环境因子的典范分析[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 773-779.
- [23] 邓建民, 蔡永久, 陈宇炜. 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 70-78.
- [24] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *生物多样性*, 2010, **18**(1): 50-59.
- [25] Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **313**(1-3): 77-89.
- [26] 许木启, 张知彬. 我国无脊椎动物生态学研究[J]. *动物学报*, 2002, **48**(5): 689-694.
- [27] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 等. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污性与水质生物学评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, **9**(3): 279-284.