

滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征及其与水环境因子的关系*

文 航, 蔡佳亮, 苏 玉, 王东伟, 黄 艺**
(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘 要: 着生藻类是重要的水环境指示生物, 其物种组成、生物密度以及多样性指数等群落特征被广泛用于监测和评价人为活动干扰对水生生态系统所造成的影响. 本文根据滇池流域 29 条入湖河流 2009 年 7-8 月着生藻类调查数据, 以及 2008 年 9 月至 2009 年 8 月逐月水环境指标监测数据, 通过运用等级聚类分析、因子分析和典型对应分析, 来探讨滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征与水环境因子的关系及其空间分布格局, 以为滇池流域水环境质量评价和流域综合管理提供基础. 结果表明, 滇池流域入湖河流在调查期间共检出着生藻类 5 门 18 科 24 属, 其中硅藻门 7 科 10 属, 绿藻门 6 科 7 属, 蓝藻门 2 科 4 属, 金藻门 2 科 2 属, 裸藻门 1 科 1 属, 丰水期着生藻类的群落结构以硅藻门的舟型藻属为优势属; 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类生物密度、舟型藻属生物密度及其百分比的空间分布格局均为流域北部入湖河流 > 南部 > 东部; TN、NH₃-N 和 TP 等无机营养盐指标是影响滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征的主要水环境因子, 其综合污染状况的空间分布格局也为流域北部入湖河流 > 南部 > 东部.

关键词: 滇池流域; 着生藻类; 水环境因子; 空间分布格局; 丰水期

Characteristics of periphytic algal community and its relationship with aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed in wet season

WEN Hang, CAI Jialiang, SU Yu, WANG Dongwei & HUANG Yi
(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China)

Abstract: Periphytic algae are important biological indicators in the water environment. Their species composition, density, and diversity are widely used for monitoring and evaluating the impact of human activities on the aquatic ecosystem. The survey data of periphytic algae during July and August of 2009 and monthly physical-chemical parameters of the 29 streams of Lake Dianchi (LD) watershed from September 2008 to August 2009 were analyzed. Hierarchical cluster analysis, factor analysis, and canonical correspondence analysis were used to relate the characteristics of periphytic algal community to aquatic environmental factors and their spatial pattern in order to provide controlling objectives for integrated LD watershed management. A total of 5 phylum, 18 families, and 24 genera of periphytic algae were identified, including 10 genera in 7 families of Bacillariophyta, 7 genera in 6 families of Chlorophyta, 4 genera in 2 families of Cyanophyta, 2 genera in 2 families of Chrysophyta, and 1 genus in 1 family of Euglenophyta. Among them, *Navicula* (Bacillariophyta) was the dominant genus. The spatial patterns of periphytic algal density, and *Navicula* density and abundance in the wet season were greatest in streams flowing to north LD, followed by those flowing to south LD, and then by those to east LD. TN, NH₃-N, and TP were the key aquatic environmental factors affecting the characteristics of periphytic algal community in the wet season. The spatial pattern of integrated pollution of TN, NH₃-N, and TP was also the greatest in streams flowing to north LD, followed by those flowing to south LD, and then by those to east LD.

Keywords: Lake Dianchi watershed; periphytic algae; aquatic environmental factor; spatial pattern; wet season

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项“流域水生生态功能分区与质量目标管理技术”项目(2008ZX07526-002-06)资助. 2010-03-17 收稿; 2010-06-12 收修改稿. 文航, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: wenhangstar@163.com.

** 通讯作者; E-mail: yhuang@pku.edu.cn.

着生藻类,又称为周丛藻类,是一种生活在水体基质上的附着生物^[1].与鱼类和大型无脊椎动物相比,着生藻类位于水生生态系统食物链的低端,分布范围广,并且能够敏感响应水环境状况的变化,尤其是在N、P等无机营养盐浓度方面^[2-5].因此,着生藻类已成为重要的水环境指示生物^[6-7],其物种组成、生物密度以及多样性指数等群落特征被广泛用于监测和评价人为活动干扰对水生生态系统(例如,海洋、河流、湖泊和水库等)所造成的影响^[8-11].

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2920km².流域内共有29条河流从北部、东部和南部辐射状汇入滇池,而与此同时,只有西部1条河流(海口河)作为滇池出水口.滇池流域具有干湿分明的低纬度季风气候特征,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月至次年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.近年来,有关滇池流域水环境状况的研究还主要集中在滇池湖体^[12-14],对于入湖河流而言则相对较少^[15-16],其中基于着生藻类等水生生物群落特征来分析滇池流域入湖流水环境状况的研究更是鲜有报道.

因此,本研究根据滇池流域29条入湖河流2009年7-8月着生藻类调查数据,以及2008年9月至2009年8月逐月水环境指标监测数据,通过运用等级聚类分析、因子分析和典型对应分析,来探讨滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征与水环境因子的关系及其空间分布格局,以期为滇池流域水环境质量评价和流域综合管理提供基础.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

滇池流域29条入湖河流(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)着生藻类调查和水环境指标监测的采样点布设一致(图1),其布设原则主要依据湖泊流域生态水文过程的完整性,即采样点布设在入湖河流下游,且避开滇池回水15-20m的区域内.

1.2 样品采集与处理

着生藻类调查:选取15cm×15cm瓷砖作为人工基质,用铁丝将瓷砖垂直悬挂于入湖河流中,控制瓷砖离水面5-10cm的距离,每个样点挂置3块.培养14d后取回.用毛刷将瓷砖上的着生藻类,刮到盛有蒸馏水的玻璃瓶中,并用蒸馏水将基质冲洗多次,其后用鲁哥氏液固定.置沉淀器内经24h沉淀,定容至30ml,静置24h后,加入1.2ml(4%)福尔马林液保存.将处理好的样品在显微镜下观察,选择面积20mm×20mm、容量0.1ml的计数框,密度计数为每平方米着生藻类细胞数.着生藻类的种类鉴定到属^[17-18].

水环境指标监测:共17项,包括酸碱度(pH)、总悬浮物浓度(TSS)、径流量(R)、水温(WT)和溶解氧(DO)等5项物理指标,以及氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD₅)、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



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

学指标;样品采集和保存依据《水和废水监测分析方法(第四版)》^[19]进行,样品测定依据《中华人民共和国地表水环境质量标准》^[20]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 着生藻类群落特征的生物多样性分析采用 Shannon-Weaver 多样性指数^[21],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。

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,Bray-Curtis 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^[22-23].在分析前,需对原始数据进行优化,即将着生藻类生物密度数据标准化,去除总体中相对丰度低于 1% 的属,保留其中在任一采样点相对丰度大于 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^[24-25].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^[26-27].本研究通过构建着生藻类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着生藻类属种分布的影响.着生藻类属种数据为其主要属种的生物密度(cells/cm^2),而着生藻类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 1 个样品中生物密度大于 1%^[28-29].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着生藻类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 丰水期着生藻类群落特征及其空间分布格局

2.1.1 群落结构 滇池流域 29 条入湖河流 2009 年 7-8 月共检出着生藻类 5 门 18 科 24 属.其中硅藻门 7 科 10 属,占总属数的 41.67%;其次为绿藻门 6 科 7 属,占 29.17%;再次为蓝藻门 2 科 4 属,占 16.67%;金藻门 2 科 2 属,占 8.33%;裸藻门 1 科 1 属,占 4.17%(表 1).基于上述检出结果可得,滇池流域入湖河流丰水期着生藻类的群落结构以硅藻门的舟型藻属(*Navicula*)为优势属,而其它出现频率较高的常见属类包括:硅藻门的羽纹藻属(*Pinnularia*)、针杆藻属(*Synedra*)和异极藻属(*Gomphonema*);绿藻门的小球藻属(*Chlorella*)、丝藻属(*Ulothrix*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、弓形藻属(*Schroederia*)和鼓藻属(*Cosmarium*);以及蓝藻门的颤藻属(*Oscillatoria*)。

2.1.2 生物密度 滇池流域 29 条入湖河流丰水期着生藻类生物密度在 69-90766 cells/cm^2 之间.在 50% 的相似性水平上^[23],丰水期着生藻类生物密度的等级聚类分析可将滇池流域 29 条入湖河流分成 3 组(图 2)。

表 1 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类名录

Tab. 1 List of periphytic algae in streams of Lake Dianchi watershed in wet season

门名	科名	属名
蓝藻门 Cyanophyta	颤藻科 Oscillatoriaceae	颤藻属 <i>Oscillatoria</i> (a)
		螺旋藻属 <i>Spirulina</i>
硅藻门 Bacillariophyta	色球藻科 Chroococcaceae	腔球藻属 <i>Goelosphaerium</i> (b)
	舟型藻科 Naviculaceae	平裂藻属 <i>Merismopedia</i> (c)
		舟型藻属 <i>Navicula</i> (d)
	羽纹藻属 <i>Pinnularia</i> (e)	
	曲壳藻科 Achnanthaceae	卵型藻属 <i>Cocconeis</i> (f)
	异极藻科 Gomphonemaceae	异极藻属 <i>Gomphonema</i> (g)
	圆筛藻科 Coscinodiscaceae	直链藻属 <i>Melosira</i> (h)
	脆杆藻科 Fragilariaceae	小环藻属 <i>Cyclotella</i> (i)
		脆杆藻属 <i>Fragilaria</i> (j)
		针杆藻属 <i>Synedra</i> (k)
桥弯藻属 <i>Cymbellaceae</i>	桥弯藻科 <i>Cymbella</i> (l)	
管形藻科 Solenicaceae	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i> (m)	
绿藻门 Chlorophyta	丝藻科 Ulotrichineae	丝藻属 <i>Ulothrix</i> (n)
	小球藻科 Chlorellaceae	小球藻属 <i>Chlorella</i> (o)
	栅藻科 Scenedsmaceae	栅藻属 <i>Scenedesmus</i> (p)
	水网藻科 Hydrodictyaceae	盘星藻属 <i>Hydrodictyon</i>
	小椿藻科 Characiaceae	弓形藻属 <i>Schroederia</i> (q)
		角星鼓藻属 <i>Staurastrum</i>
	鼓藻科 Desmidiaceae	鼓藻属 <i>Cosmarium</i> (r)
金藻门 Chrysophyta	金囊藻科 Chrysocapsaceae	金囊藻属 <i>Chrysocapsa</i> (s)
	金枝藻科 Phaeothamniaceae	金枝藻属 <i>Phaeothamnia</i> (t)
裸藻门 Euglenophyta	裸藻科 Euglenaceae	裸藻属 <i>Euglena</i> (u)

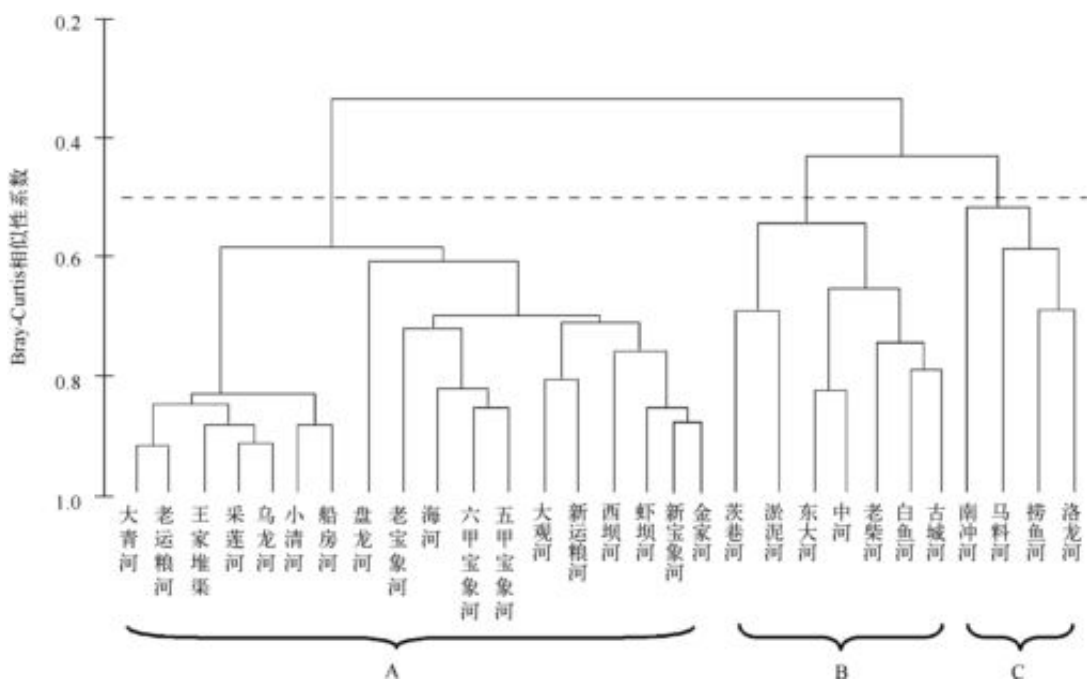


图 2 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类生物密度 Bray-Curtis 相似性系数的等级聚类分析树状图

Fig. 2 Dendrogram of hierarchical cluster analysis for periphytic algal density in streams of Lake Dianchi watershed in wet season based on Bray-Curtis similarity coefficients

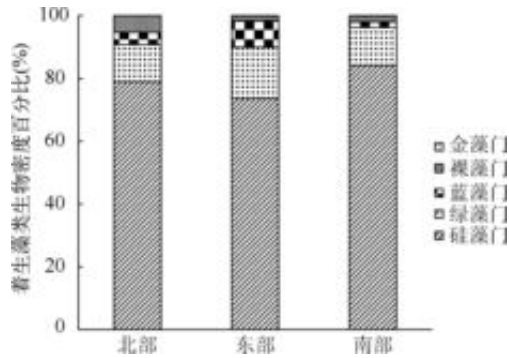


图3 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类生物密度百分比空间分布格局

Fig. 3 Spatial pattern of periphytic algal abundance in streams of Lake Dianchi watershed in wet season

组 A 共 18 条入湖河流,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、老宝象河和新宝象河;组 B 共 7 条入湖河流,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;组 C 共 4 条入湖河流,均位于流域东部,包括马料河、洛龙河、捞鱼河和南冲河。

从空间分布格局来看,流域北部入湖河流丰水期着生藻类生物密度最大,为 19876 cells/cm^2 ;南部次之,为 1451 cells/cm^2 ;东部最小,为 777 cells/cm^2 (表 2)。流域北部、东部和南部入湖河流丰水期着生藻类生物密度百分比均以硅藻门最多,绿藻门次之,蓝藻门、裸藻门和金藻门最少(图 3)。其中,流域北部入湖河流分别为硅藻门 78.94%,绿藻门 11.83%,蓝藻门 3.86%,裸藻门 5.34% 和金藻门 0.00%;东部分别为硅藻门 73.63%,绿藻门 16.35%,蓝藻门 9.24%,裸藻门 0.52% 和金藻门 0.26%;以及南部分别为硅藻门 84.18%,绿藻门 12.01%,蓝藻门 1.68%,裸藻门 1.84% 和金藻门 0.30%。

表 2 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类生物密度、舟型藻属生物密度及其百分比以及着生藻类 Shannon-Weaver 多样性指数的空间分布格局

Tab. 2 Spatial pattern of periphytic algal density, *Navicula* density and abundance, and periphytic algal Shannon-Weaver diversity index in streams of Lake Dianchi watershed in wet season

空间	着生藻类生物密度 (cells/cm ²)	舟型藻属生物密度 (cells/cm ²)	舟型藻属生物密度百分比 (%)	着生藻类 Shannon-Weaver 多样性指数
北部	19876 ± 15440	11610 ± 9004	48.83 ± 24.49	2.02 ± 0.75
东部	777 ± 358	391 ± 148	36.30 ± 26.88	1.96 ± 0.39
南部	1451 ± 815	465 ± 219	40.43 ± 26.71	2.61 ± 0.24

滇池流域 29 条入湖河流丰水期舟型藻属生物密度及其百分比分别在 $0 - 72043 \text{ cells/cm}^2$ 和 $0 - 98.04\%$ 之间。从空间分布格局来看,流域北部入湖河流丰水期舟型藻属生物密度及其百分比最大,分别为 11610 cells/cm^2 和 48.83% ;南部次之,分别为 465 cells/cm^2 和 40.43% ;东部最小,分别为 391 cells/cm^2 和 36.30% (表 2)。

2.1.3 Shannon-Weaver 多样性指数 滇池流域 29 条入湖河流丰水期着生藻类 Shannon-Weaver 多样性指数 H' 在 $0.14 - 3.29$ 之间。从空间分布格局来看,流域南部入湖河流丰水期着生藻类 H' 最大,为 2.61 ;北部次之,为 2.02 ;东部最小,为 1.96 (表 2)。

2.2 影响丰水期着生藻类群落特征的主要水环境因子及其空间分布格局

滇池流域入湖河流 2008 年 9 月至 2009 年 8 月 17 项逐月水环境指标的年均值范围分别是: pH 为 $7.1 - 8.1$, TSS 为 $3.4 - 93.0 \text{ mg/L}$, R 为 $0.1 - 9.3 \text{ m}^3/\text{s}$, WT 为 $14.9 - 18.5^\circ\text{C}$, DO 为 $0.10 - 6.80 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $0.34 - 26.66 \text{ mg/L}$, TN 为 $2.03 - 32.00 \text{ mg/L}$, TP 为 $0.09 - 3.20 \text{ mg/L}$, COD_{Mn} 为 $2.2 - 96.6 \text{ mg/L}$, BOD_5 为 $1.9 - 91.1 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 $0.24 - 6.17 \text{ mg/L}$, TOC 为 $7.4 - 39.0 \text{ mg/L}$, Cu 为 $0.000 - 0.185 \text{ mg/L}$, Pb 为 $0.000 - 0.081 \text{ mg/L}$, Zn 为 $0.000 - 1.405 \text{ mg/L}$, Cd 为 $0.000 - 0.085 \text{ mg/L}$ 和 Cr 为 $0.000 - 0.003 \text{ mg/L}$ (表 3)。

对上述 17 项指标进行因子分析,以辨识表征滇池流域入湖流水环境状况的主导因子。选取特征值大于 1 的第一主成分 (F_1)、第二主成分 (F_2)、第三主成分 (F_3)、第四主成分 (F_4) 和第五主成分 (F_5) 作为主成

表3 滇池流域入湖河流水质环境评价百分比(%)

Tab. 3 Results of water quality assessment in percent of streams of Lake Dianchi watershed

水质	DO	NH ₃ -N	TN	TP	COD _{Mn}	BOD ₅	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
劣V类	20.8	69.0	96.6	62.1	41.5	51.7	0.0	0.0	93.2	0.0	0.0
V类	10.3	6.9	3.4	6.9	17.2	17.4	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0
IV类	31.0	6.9	0.0	10.3	10.3	3.4	0.0	0.0	3.4	6.9	0.0
III类	13.8	6.9	0.0	13.8	17.2	24.1	0.0	6.9	0.0	0.0	0.0
II类	24.1	10.3	0.0	6.9	13.8	0.0	48.3	17.2	0.0	0.0	0.0
I类	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	51.7	75.9	0.0	93.1	100.0

分因子,其累积方差贡献率达 80.285% (表 4),说明其能够反映 17 项指标的整体水环境状况,并且 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 系数为 0.612 > 0.60,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| > 0.75,表示两者的相关性好;0.75 ≥ |因子载荷率| > 0.50,表示两者的相关性一般;0.50 ≥ |因子载荷率| > 0.30,表示两者的相关性差;|因子载荷率| ≤ 0.30,表示两者无相关性^[30]. BOD₅、TOC、Pb、Cu 和 TSS 的|因子载荷率|均小于 0.75 且大于 0.50(表 5),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质环境状况的主导因子.

表4 滇池流域入湖河流水质环境指标的因子特征值

Tab. 4 Eigenvalues of aquatic environmental factors 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			

对滇池流域 29 条入湖河流 12 项水环境状况主导因子与丰水期着生藻类属种进行典型对应分析,以辨识影响丰水期着生藻类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

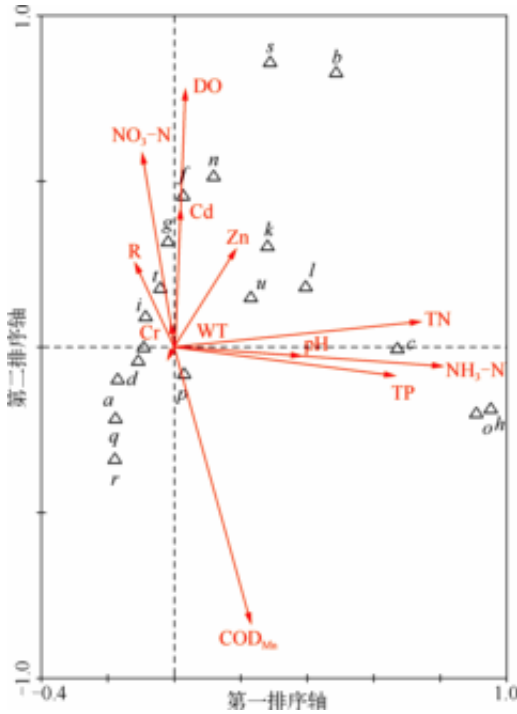


图4 滇池流域入湖河流环境状况主导因子与丰水期着生藻类属种的典型对应分析(a-u 见表1)

Fig. 4 Results of canonical correspondence analysis for aquatic environmental factors and periphytic algal assemblages in wet season in streams of Lake Dianchi watershed

为 0.399 和 0.122, 它们共解释了丰水期着生藻类属种数据累积方差值的 52.5%, 由此表明第一排序轴和第二排序轴能够真实反映主导因子对丰水期着生藻类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; 同时两个物种排序轴近似垂直, 相关系数为 0.0341, 两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, 主导因子对丰水期着生藻类属种分布的相关性大小为 $NH_3-N > TN > pH > TP > COD_{Mn} > Zn > R > NO_3-N > DO > Cr > Cd > WT$ (水温); 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为 $NH_3-N > TN > pH > TP > Zn > COD_{Mn} > R > NO_3-N > Cr > DO > Cd > WT$, 并且 R 和 NO_3-N 与水环境状况呈负相关. 因此, 滇池流域入湖河流环境状况主导因子对丰水期着生藻类属种分布的影响程度为 $NH_3-N > TN > TP > pH > COD_{Mn} > Zn > R > NO_3-N > DO > Cd > Cr > WT$. 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. 滇池流域入湖河流环境状况主导因子与丰水期着生藻类属种的相关系数分别为: WT 0.0136, R -0.1112, pH 0.3459, COD_{Mn} 0.2134, NH_3-N 0.7574⁽¹⁾, TP 0.6326⁽²⁾, TN 0.6988⁽¹⁾, NO_3-N -0.0913, Zn 0.1764, Cd 0.0201, Cr -0.0124, DO 0.0312 (1) $P < 0.01$, 2) $P < 0.05$). TN、 NH_3-N 和 TP 这三项主导因子对丰水期着生藻类属种分布的影响程度显著. 因此, TN、 NH_3-N 和 TP 等无机营养盐指标是影响滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征的主要水环境因子.

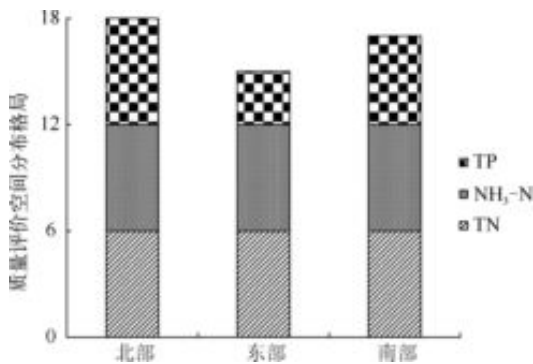


图5 滇池流域入湖河流 TN、 NH_3-N 和 TP 质量评价空间分布格局

Fig. 5 Spatial pattern of TN, NH_3-N and TP assessments in streams of Lake Dianchi watershed

依据《中华人民共和国地表水环境质量标准 (GB3838-2002)》^[20], 对滇池流域 29 条入湖河流 TN、 NH_3-N 和 TP 年均值进行归一化赋值, 即 I 类水、II 类水、III 类水、IV 类水、V 类水和劣 V 类水分别赋值为 1-6, 以判断滇池流域入湖河流 TN、 NH_3-N 和 TP 的污染状况. 从空间分布格局来看, 全流域入湖河流 TN 和 NH_3-N 的污染状况均最为严重 (劣 V 类水); 就 TP 而言, 流域北部入湖河流污染状况最严重 (劣 V 类水), 流域南部入湖河流次之 (V 类水), 流域东部入湖河流最小 (III 类水) (图 5). 因此, 滇池流域入湖河流环境污染状况的空间分布格局为流域北部入湖河流 > 南部 > 东部.

3 讨论

Shannon-Weaver 多样性指数 H' 可用于评价水环境污染状况, 即当 $H' \geq 3$ 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^[31]. 因此,滇池流域北部和南部入湖河流为轻度污染,东部入湖河流为中度污染,但这一评价结果有悖于前文滇池流域入湖河流水环境污染状况空间分布格局的分析结果. 再结合表 2 可以发现,滇池流域入湖河流丰水期着生藻类生物密度、舟型藻属生物密度及其百分比的空间分布格局与水环境污染状况是一致的. 同时,舟型藻属的生态幅又很广,既包括了水环境清洁的指示种放射舟形藻 (*N. radiosa*) 及寡污带和贫营养的指示种微绿舟形藻 (*N. viridula*)^[32],也包括了主要分布在 α -中污带和 β -中污带、耐污力强的适宜舟形藻 (*N. accomda*)^[11]. 因此,本研究认为,舟型藻属中的耐污种是滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落结构的优势种(其定性分析有待进一步研究),同时也是在高污染浓度(即 V 类水或劣 V 类水)下,造成无法运用 Shannon-Weaver 多样性指数来进行水环境质量评价的主要原因.

滇池流域入湖河流水环境污染状况的空间分布格局与入湖河流所流经汇水区的自然地理环境和社会经济布局是息息相关的^[12]. 因此,对滇池流域水环境污染总量控制因针对入湖河流汇水区的水环境污染状况采取相应的措施. 例如,在滇池北岸,

全面截留昆明市主城区的污染负荷,根本改变部分污水不经处理直接排入滇池的局面;在滇池南岸,研发针对农业非点源污染的全流域共性技术. 与此同时,将入湖河流水环境管理作为滇池流域综合管理的基本单元,这不仅有助于推动入湖河流水环境污染总量控制,同时也能实现汇区内土地利用变化的监督,进而贯彻“控源-减排-截污-治污-生态修复”的管理思想,实现“分类、分区、分级、分期”的管理模式.

4 参考文献

- [1] 王朝晖,胡 韧,谷阳光等. 珠江广州河段着生藻类的群落结构及其与水质的关系. 环境科学学报,2009,29(7): 1510-1516.
- [2] Dick SS, Smol JP, Kingston JC *et al.* Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environmental Science & Technology*, 1992, 26(1): 22-23.
- [3] Steven TR, Stevenson RJ. Response of periphytic algae to gradients in nitrogen and phosphorus in streamside mesocosms. *Hydrobiologia*, 2006, 561: 131-147.
- [4] Whitton BA, Kelly MG. Use of algae and other plants for monitoring rivers. *Australian Journal of Ecology*, 1995, 20(1): 45-46.
- [5] Euan DR, Terri MJ, Ted RA *et al.* Algal assemblages for large river monitoring: comparison among biovolume, absolute and relative abundance metrics. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 167-177.
- [6] Sabater S. Diatom communities as indicators of environmental stress in the Guadiamar River, S-W Spain, following a major mine tailing spill. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 12(2): 113-124.
- [7] Mihalic KC, Vilicic D, Ahel M *et al.* Periphytic algae development in the upper reach of the zrnjanja estuary (estern adriatic coast). *Vie Et Milieu-Life and Environment*, 2008, 58(3-4): 203-213.
- [8] Nayar S, Goh BPL, Chou LM. Settlement of marine periphytic algae in a tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64: 241-248.
- [9] Baffico GD. Variations in the periphytic community structure and dynamics of Lake Nahuel Huapi (Patagonia, Argentina).

表 5 滇池流域入湖河流环境指标旋转后的因子载荷率

Tab. 5 Loadings of rotated aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed

环境因子	旋转后的因子载荷率				
	F1	F2	F3	F4	F5
NH ₃ -N	0.940	0.215	-0.034	-0.058	-0.121
TP	0.913	0.124	-0.028	-0.007	-0.193
TN	0.901	0.249	0.102	-0.095	-0.169
COD _{Mn}	0.890	0.029	-0.189	-0.164	0.195
DO	-0.816	0.009	0.064	-0.230	-0.061
BOD ₅	0.723	0.544	-0.140	-0.188	0.116
TOC	0.656	-0.096	-0.243	0.548	-0.008
Zn	0.213	0.944	0.086	-0.049	-0.099
Cd	0.239	0.907	0.076	0.032	-0.034
Pb	-0.135	0.690	-0.142	-0.142	-0.228
Cu	0.181	0.504	-0.126	0.006	0.415
Cr	-0.127	-0.155	0.867	-0.059	0.287
NO ₃ -N	-0.390	0.141	0.769	0.003	0.020
TSS	0.186	-0.042	0.718	-0.201	-0.195
R	0.155	-0.024	-0.166	0.860	-0.015
WT	-0.304	-0.097	0.003	0.801	0.079
pH	-0.151	-0.212	0.102	0.046	0.886

- Hydrobiologia*, 2001, **455**:79-85.
- [10] Guasch H, Admiraal W, Sabater S. Contrasting effects of organic and inorganic toxicants on freshwater periphyton. *Aquatic Toxicology*, 2003, **64**(2):165-175.
- [11] 王翠红, 张金屯. 汾河水库水源河着生藻类群落的 DCCA 研究. *中国环境科学*, 2004, **24**(1):28-31.
- [12] Liu ZH, Liu XH, He B *et al.* Spatio-temporal change of water chemical elements in Lake Dianchi, China. *Water and Environment Journal*, 2009, **23**(3):235-244.
- [13] Lu JJ, Yang H, Gao L *et al.* Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China. *Pedosphere*, 2005, **15**(1):78-83.
- [14] 高丽, 杨浩, 周健民等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究. *环境科学学报*, 2004, **24**(5):776-781.
- [15] 杨逢乐, 金竹静. 滇池北岸河流水环境污染现状及防治对策研究. *环境科学导刊*, 2008, **27**(6):43-46.
- [16] 谭夔, 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. *环境科学学报*, 2009, **29**(3):634-640.
- [17] 福迪 B. 著. 罗迪安译. 藻类学. 上海:上海科学技术出版社, 1980:1-350.
- [18] 中国科学院水生生物研究所. 中国淡水藻类. 上海:上海科学技术出版社, 1980:1-300.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 国家环境保护总局. 中华人民共和国地表水环境质量标准. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [21] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Univ. Calif. Press, 1958:323-347.
- [22] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报*, 2003, **33**(1):58-64.
- [23] 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. *生物多样性*, 2010, **18**(1):50-59.
- [24] Ying OY. Evaluation of stream water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 2005, **39**(12):2621-2635.
- [25] Luss R, d'Aspremont A. Clustering and feature selection using sparse principal component analysis. *Optimization and Engineering*, 2010, **11**(1):145-157.
- [26] Terbraak CJF. Canonical correspondence analysis—a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **65**(5):1167-1179.
- [27] Dodkins I, Rippey B, Hale P. An application of canonical correspondence analysis for developing ecological quality assessment metrics for river macrophytes. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(5):891-904.
- [28] 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. *湖泊科学*, 2008, **20**(6):773-779.
- [29] 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. *湖泊科学*, 2010, **22**(1):70-78.
- [30] Liu CW, Lin KH, Kuo YM. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 2003, **313**(1-3):77-89.
- [31] 周谐, 郑坚, 黄书铭等. 三峡库区重庆段浮游藻类调查及水质评价. *中国环境监测*, 2006, **22**(4):70-73.
- [32] 孙春梅, 范亚文. 黑龙江黑河段水域藻类植物群落结构及其环境相关性的初步分析. *海洋与湖沼*, 2010, **41**(1):126-132.