

文航, 蔡佳亮, 苏玉, 等. 2011 利用水生生物指标识别滇池流域入湖河流水质污染因子及其空间分布特征 [J]. 环境科学学报, 31(1): 69–80

Wen H, Cai J L, Su Y, *et al*. 2011. Identification of water pollution factors and their spatial distribution with aquatic bioindicators in streams of Lake Dianchi watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(1): 69–80

利用水生生物指标识别滇池流域入湖河流水质污染因子及其空间分布特征

文航¹, 蔡佳亮¹, 苏玉¹, 孙金华¹, 黄艺^{1,*}, 张远²

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

2. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境创新基地, 北京 100012

收稿日期: 2010-04-18

修回日期: 2010-05-12

录用日期: 2010-05-13

摘要: 入湖河流作为连接湖泊流域“源”(陆地)–“汇”(湖体)的廊道, 其水生态系统健康状态是对流域上游陆地生态系统土地利用/覆被变化的响应, 而其下游水质污染因子则因流域分水线的封闭性, 可以表征上游土地利用/覆被变化对入湖河流水生态系统健康的影响。因此, 利用水生生物指标识别入湖河流水质污染因子及其空间分布特征, 对于整个湖泊流域的水生态系统健康恢复和水环境污染总量控制就显得尤为必要。本文基于滇池流域 29 条入湖河流 2009 年 7~8 月丰水期着生藻类和底栖动物调查数据与 2009 年逐月水质监测数据, 通过运用因子分析、典型对应分析和等级聚类分析, 来探讨入湖河流水生生物群落结构与水质污染因子及其空间分布特征, 以期为流域综合管理提供基础。结果表明, 滇池流域入湖河流在水生生物调查期间共检出着生藻类 5 门 18 科 24 属, 以硅藻门的舟型藻属 (*Navicula*) 为优势属, 底栖动物 3 门 7 科 8 属, 以环节动物门的水丝蚓属 (*L. nodrilius*) 为优势属; TN 、 NH_4^+-N 和 TP 是滇池流域入湖河流的水质污染因子; 滇池流域入湖河流水质污染状况的空间分布特征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) 污染程度大于南部入湖河流 (南冲河、淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河) 大于东部入湖河流 (洛龙河和捞鱼河)。

关键词: 滇池流域; 水质污染因子; 着生藻类; 底栖动物; 空间分布特征

文章编号: 0253-2468(2011) 01-69-12

中图分类号: X522

文献标识码: A

Identification of water pollution factors and their spatial distribution with aquatic bioindicators in streams of Lake Dianchi watershed

WEN H ang¹, CAI Jialiang¹, SU Yu¹, SUN Jinhua¹, HUANG Yi^{1,*}, Zhang Yuan²

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

2. River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Received 18 April 2010;

received in revised form 12 May 2010;

accepted 13 May 2010

Abstract In the lake watershed, streams are important landscape corridors that link the source (land) and the sink (lake). The ecosystem health of streams is usually used to indicate the aquatic biodiversity of the lake ecosystem, as well as being affected by water pollution factors in response to changes in land use cover of the terrestrial ecosystem due to natural geographic characteristics of the watershed with the closure of ridge lines. Therefore, identification of the water pollution factors with aquatic bioindicators has a good effect on the restoration of aquatic ecosystem health and the control of the total water pollution in the lake watershed. Using mensural physical-chemical parameters of the 29 streams of Lake Dianchi watershed in 2009 and the survey data of periphytic algae and macrozoobenthos during July and August 2009, factor analysis, canonical correspondence analysis and hierarchical cluster analysis were used to identify the community of aquatic bioindicators and the key water pollution factors and their spatial distribution. The results identified 5 divisions, 18 families and 24 genera of periphytic algae. Among these, *Navicula* (Bacillariophyta) was the dominant genus. Additionally, 3 divisions, 7 families and 8 genera of macrozoobenthos were identified. *L. nodrilius* (Annelida) was the dominant genus. TN , NH_4^+-N and TP were the key water pollution factors and were significantly correlated with the aquatic bioindicators. The spatial distribution of density of aquatic bioindicators and water pollution was both greatest in the streams flowing into the north lake (River Wangjiaduqi, River Xinyunlianghe, River Laoyunlianghe, River Wubanghe, River Daguanhe, River Xibahe, River Chuanfanghe, River Cailianhe, River Jinjiahe, River Panlongjiang, River Daqinghe, River Hahe, River Linjiabaoxianghe, River Xiqiaoghe, River Wujiaobaoxianghe, River Xiaobaohe, River Laobaoxianghe, River Xinbaoxianghe, and River Maliaohe),

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2008ZX07526-002-06)

Supported by the National Key Technologies R & D Program on Water Pollution Control and Management of China (No. 2008ZX07526-002-06)

作者简介: 文航 (1986—), 男, E-mail: wenhangsa@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: yhuang@pku.edu.cn

Biography: WEN H ang (1986—), male, E-mail: wenhangsa@163.com; * **Corresponding author:** E-mail: yhuang@pku.edu.cn

followed by those flowing into the south lake (River Nanchonghe, River Yunhe, River Laochahe, River Baiyuhe, River Cixianghe, River Dongdage, River Zhonghe and River Guchenghe), and least in those flowing into the east lake (River Luolonghe and River Laoyuhe).

Keywords Lake Dianchi watershed, water pollution factors, periphytic algae, macrozoobenthos, spatial distribution

1 引言 (Introduction)

湖泊流域是湖泊水体及其汇水区所构成的相对封闭的景观异质镶嵌体,是人和生物圈营养循环和物质迁移的主要通道之一 (Daily, 1997; Fakemmark *et al.*, 2000). 入湖河流作为连接湖泊流域“源”(陆地)–“汇”(湖体)的廊道,其水生生态系统健康状态(主要表现为水生生物的物种多样性)是对流域上游陆地生态系统土地利用/覆被变化的响应,而其下游水质污染因子则因流域分水线的封闭性,可以表征上游土地利用/覆被变化对入湖河流水生生态系统健康的影响 (Sigua & Tweedale, 2003). 因此,流域水文过程是对湖泊水生生态系统施加外部污染负荷的最主要途径 (黄艺等, 2009),而利用水生生物指标识别入湖河流水质污染因子及其空间分布特征,对于整个湖泊流域的水生生态系统健康恢复和水环境污染总量控制就显得尤为必要.

水生生物指标一般包括浮游动植物、着生藻类、底栖动物、水生植物、鱼类以及浮游细菌群落等,其主要特点为对外界干扰敏感性较强,分布范围广,有一定的生命周期,是反映水质污染负荷累积与生物群落变化的相互影响的结果,进而有助于从生态系统的角度客观评价水质污染状况与水体富营养化程度 (Hakanson & Buldin, 2003; 孙刚等, 2001; 高世荣等, 2006). 其中,着生藻类和底栖动物均为河流生态系统中重要的环境指示生物 (孙春梅和范亚文, 2009; Fore & Graf, 2002). Reavie 等 (2010)利用着生藻类的生物密度和生物量,来识别美国中部河流的水环境主导因子;王朝晖等 (2009)通过调查珠江广州河段着生藻类的多样性指数,以判定该河段的富营养化特征;Salgado等 (2007)利用底栖动物的时空分布特征,来评价 Tej 河口盐沼湿地的环境质量状况;江晶等 (2009)通过调查清江流域上游一二级支流大型底栖动物的群落特征,对该地区进行水质评价.

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 ($24^{\circ}29' \sim 25^{\circ}28'N$, $102^{\circ}29' \sim 103^{\circ}01'E$),流域总面积为 2920km^2 . 流域内共有 29 条河流从其北部、东部和南部辐射状汇入滇池,而与此

同时,滇池只有西部 1 条河流作为出水口,这就自然地形成了滇池湖水置换能力差,交换周期长和污染负荷沉积量大的特点. 随着 20 世纪 80 年代以来滇池流域城市化进程和社会经济的迅猛发展,越来越多的污染物质经这些入湖河流输入滇池,不断增加的环境压力导致滇池生态系统的自我调节功能超负荷运作,湖体水质已从 1975 年的 II 类地表水降为 2009 年的劣 V 类水平,并且湖体富营养化程度严重,2009 年营养物指标总氮 (TN) 和总磷 (TP) 浓度分别超过国际普遍认定的富营养化浓度参考阈值 (TN 为 $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 TP 为 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 5 倍和 8 倍 (Chen *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2006). 因此,滇池流域目前的地表水环境功能已无法保证流域社会经济发展与水污染物排放总量控制的要求,并严重威胁着流域的饮用水安全和生态系统健康.

近年来有关滇池流域水质污染状况的研究还主要集中在滇池湖体 (Lu *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2009; 高丽等, 2004; 胡俊等, 2005), 对于流域入湖河流水质污染状况的研究则相对较少 (谭蓁等, 2009), 而通过水生生物指标来识别滇池流域入湖河流水质污染因子的研究更是鲜有报道. 因此,本研究基于滇池流域 29 条入湖河流着生藻类和底栖动物调查数据与水质监测数据,通过运用因子分析、典型对应分析和等级聚类分析,来探讨入湖河流水生生物群落结构与水质污染因子及其空间分布特征,以期能为流域综合管理提供基础.

2 研究方法 (Research methods)

2.1 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、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)着生藻类和底栖动物调查与水质监测的样点布设一致,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,即样点布设在入湖河流下游,且避开滇池回水 15~20m 的区域内.

表 1 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类名录

Table 1 List of periphytic algae in streams of the Lake Dianchi watershed in the wet season

属类	王家堆渠	新运粮河	老运粮河	乌龙河	大观河	西河	船房河	采莲河	金家河	盘龙河	大海河	六甲河	小清河	宝象河	象河	老宝象河	新宝象河	马料河	洛龙河	捞鱼河	南冲河	淤泥河	白河	老柴河	茨巷河	东河	中河	古城河
蓝藻门																												
颤藻科																												
颤藻属																												
螺旋藻属	+																											
色球藻科																												
腔球藻属																												
平裂藻属																												
硅藻门																												
舟型藻科																												
舟型藻属																												
羽纹藻属																												
曲壳藻科																												
卵型藻属																												
异极藻科																												
异极藻属																												
圆筛藻科																												
直链藻属																												
小环藻属																												
脆杆藻科																												
脆杆藻属																												
针杆藻属																												
桥弯藻科																												
桥弯藻属																												
管形藻科																												
根管藻属																												
绿藻门																												
丝藻科																												
丝藻属																												
小球藻科																												
小球藻属																												
栅藻科																												
栅藻属																												
水网藻科																												
盘星藻属																												
小楮藻科																												

属类	王家新运	老运	乌龙	大观	西坝	船房	采莲	金家	盘江	大青	海河	六甲宝象河	五甲宝象河	虾坝	老宝	新宝	马料	洛龙	捞鱼	南冲	淤泥	白河	老柴	茨巷	东河	古城
弓形藻属												+	+	+												+
鼓藻科																										
角星鼓藻属													+													
鼓藻属												+		+												+
金藻门																										
金囊藻科																										
金囊藻属																										+
金枝藻科																										
金枝藻属																										
裸藻门																										
裸藻科																										
裸藻属	+			+			+		+	+		+	+	+	+	+	+						+	+	+	+

表 2 滇池流域入湖河流丰水期底栖动物名录

Table 2 List of macrozoobenthos in streams of the Lake Dianchi watershed in the wet season																										
属类	王家新运	老运	乌龙	大观	西坝	船房	采莲	金家	盘江	大青	海河	六甲宝象河	五甲宝象河	虾坝	老宝	新宝	马料	洛龙	捞鱼	南冲	淤泥	白河	老柴	茨巷	东河	古城
节肢动物门																										
摇蚊科																										
前突摇蚊属	+			+	+			+	+			+							+							
环节动物门																										
石蛭科																										
红蛭属																		+	+					+		
黄蛭科																										
金线蛭属																			+							
舌蛭科																										
舌蛭属																										
鳃科																										
尾鳃科																										
水丝蚓属																										
软体动物门																										
田螺科																										
圆田螺属																										
珠蚌科																										
珠蚌属																										

表 3 滇池流域入湖河流污水污染状况评价*

Table 3 Results of water pollution assessment in streams of the Lake Dianchi watershed

入湖河流	pH	TSS	DO	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	COD _{Mn}	BOD	NO ₃ ⁻ -N	TOC	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
王家堆渠	7.4	17.7	0.76 ^{劣V}	17.15 ^{劣V}	24.35 ^{劣V}	2.23 ^{劣V}	17.49 ^{劣V}	23.30 ^{劣V}	0.27	27.3	0.000 ^I	0.000 ^I	0.024 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
新运粮河	7.5	55.7	0.10 ^{劣V}	28.96 ^{劣V}	35.91 ^{劣V}	2.28 ^{劣V}	23.22 ^{劣V}	94.45 ^{劣V}	0.29	27.1	0.124 ^{II}	0.080 ^{III}	1.405 ^{IV}	0.085 ^{IV}	0.000 ^I
老运粮河	7.3	21.7	3.47 ^{IV}	10.47 ^{劣V}	19.59 ^{劣V}	1.76 ^{劣V}	11.70 ^V	19.53 ^{劣V}	2.62	12.4	0.078 ^{II}	0.000 ^I	0.797 ^{II}	0.068 ^{IV}	0.000 ^I
乌龙河	7.4	12.7	4.57 ^{IV}	9.16 ^{劣V}	14.54 ^{劣V}	0.94 ^{劣V}	11.96 ^V	27.56 ^{劣V}	0.52	11.3	0.000 ^I	0.000 ^I	0.103 ^I	0.001 ^I	0.000 ^I
大观河	7.5	31.8	4.07 ^{IV}	9.85 ^{劣V}	16.20 ^{劣V}	1.30 ^{劣V}	9.50 ^{劣V}	16.55 ^{劣V}	0.81	13.4	0.000 ^{II}	0.000 ^I	0.029 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
西坝河	7.8	86.0	1.43 ^{劣V}	13.77 ^{劣V}	28.30 ^{劣V}	1.12 ^{劣V}	19.33 ^{劣V}	34.30 ^{劣V}	0.38	17.2	0.014 ^{II}	0.000 ^I	0.147 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
船房河	7.7	4.0	5.08 ^{III}	7.58 ^{劣V}	12.98 ^{劣V}	0.47 ^{劣V}	9.38 ^{IV}	6.38 ^V	1.10	16.2	0.000 ^I	0.000 ^I	0.029 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
采莲河	7.6	24.6	2.26 ^V	19.69 ^{劣V}	25.50 ^{劣V}	1.88 ^{劣V}	19.59 ^{劣V}	32.52 ^{劣V}	0.39	17.2	0.000 ^I	0.000 ^I	0.016 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
金家河	7.6	23.1	1.02 ^{劣V}	13.67 ^{劣V}	21.85 ^{劣V}	1.41 ^{劣V}	16.09 ^{劣V}	18.50 ^{劣V}	0.37	30.6	0.000 ^I	0.000 ^I	0.007 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
盘龙江	7.4	8.5	3.57 ^{IV}	6.53 ^{劣V}	10.96 ^{劣V}	0.58 ^{劣V}	5.95 ^{III}	6.60 ^V	1.04	39.0	0.006 ^I	0.000 ^I	0.029 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
大青河	7.6	21.1	1.42 ^{劣V}	23.44 ^{劣V}	29.68 ^{劣V}	2.21 ^{劣V}	20.41 ^{劣V}	26.23 ^{劣V}	0.24	37.4	0.082 ^{II}	0.000 ^I	0.063 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
海河	7.6	18.0	1.07 ^{劣V}	21.24 ^{劣V}	26.45 ^{劣V}	1.99 ^{劣V}	22.04 ^{劣V}	24.05 ^{劣V}	0.47	24.3	0.022 ^{II}	0.000 ^I	0.146 ^I	0.003 ^I	0.000 ^I
六甲宝象河	8.0	27.9	2.72 ^V	17.73 ^{劣V}	22.13 ^{劣V}	1.42 ^{劣V}	25.19 ^{劣V}	30.77 ^{劣V}	0.28	23.3	0.093 ^{II}	0.000 ^I	0.061 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
小清河	7.9	15.2	2.31 ^V	15.26 ^{劣V}	21.68 ^{劣V}	0.91 ^{劣V}	19.25 ^{劣V}	19.23 ^{劣V}	0.48	25.2	0.001 ^I	0.000 ^I	0.005 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
五甲宝象河	7.9	15.3	4.29 ^{IV}	5.62 ^{劣V}	8.94 ^{劣V}	0.66 ^{劣V}	18.09 ^{劣V}	19.25 ^{劣V}	0.46	22.7	0.023 ^{II}	0.000 ^I	0.100 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
虾坝河	8.0	22.1	3.38 ^{IV}	2.21 ^{劣V}	5.02 ^{劣V}	0.29 ^{劣V}	22.76 ^{劣V}	14.37 ^{劣V}	0.43	20.7	0.125 ^{II}	0.000 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
老宝象河	8.1	11.4	7.11 ^{II}	1.46 ^{IV}	2.79 ^{劣V}	1.56 ^{劣V}	6.45 ^{IV}	5.71 ^{IV}	0.74	16.4	0.090 ^{II}	0.000 ^I	0.005 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
新宝象河	7.9	11.8	5.92 ^{III}	4.30 ^{劣V}	7.73 ^{劣V}	0.60 ^{劣V}	10.38 ^V	9.73 ^V	0.80	15.7	0.185 ^{II}	0.000 ^I	0.049 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
马料河	8.0	14.1	4.99 ^{IV}	7.85 ^{劣V}	12.66 ^{劣V}	0.71 ^{劣V}	12.61 ^V	11.71 ^{劣V}	3.14	14.2	0.000 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I	0.003 ^I
洛龙河	7.8	17.3	4.82 ^{IV}	0.36 ^{II}	4.58 ^{劣V}	0.08 ^{II}	2.13 ^{II}	1.84 ^I	1.43	12.9	0.003 ^I	0.000 ^I	0.008 ^I	0.000 ^I	0.001 ^I
捞鱼河	7.8	50.4	6.08 ^{II}	0.34 ^{II}	7.06 ^{劣V}	0.12 ^{III}	3.74 ^{II}	2.37 ^{III}	4.31	7.5	0.007 ^I	0.000 ^I	0.051 ^I	0.000 ^I	0.002 ^I
南冲河	7.6	43.9	6.54 ^{II}	0.81 ^{III}	10.26 ^{劣V}	0.14 ^{III}	5.88 ^{III}	3.40 ^{III}	4.97	7.4	0.050 ^{II}	0.000 ^I	0.216 ^I	0.000 ^I	0.001 ^I
淤泥河	7.7	47.3	7.01 ^{II}	1.19 ^{IV}	4.45 ^{劣V}	0.10 ^{III}	4.88 ^{III}	2.97 ^{III}	1.65	18.5	0.008 ^I	0.000 ^I	0.126 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
老柴河	8.3	43.9	5.66 ^{III}	1.99 ^V	3.78 ^{劣V}	0.23 ^{IV}	10.25 ^V	7.33 ^V	0.57	10.8	0.045 ^I	0.010 ^{II}	0.373 ^I	0.001 ^I	0.000 ^I
白鱼河	7.7	37.8	6.30 ^{II}	1.52 ^V	5.22 ^{劣V}	0.18 ^{III}	6.84 ^{IV}	3.64 ^{III}	1.80	17.8	0.018 ^{II}	0.020 ^{II}	0.174 ^I	0.001 ^I	0.000 ^I
茨巷河	7.6	43.4	6.43 ^{II}	4.95 ^{劣V}	14.38 ^{劣V}	0.36 ^V	4.37 ^{III}	3.33 ^{III}	5.97	12.1	0.075 ^{II}	0.030 ^{II}	0.337 ^I	0.002 ^I	0.000 ^I
东大河	7.9	30.5	6.90 ^{II}	0.48 ^{II}	1.83 ^V	0.07 ^{II}	3.53 ^{II}	2.78 ^{III}	0.52	7.6	0.000 ^I	0.080 ^{III}	0.080 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
中河	7.4	86.0	3.04 ^{IV}	4.15 ^{劣V}	9.54 ^{劣V}	0.28 ^{IV}	5.46 ^{III}	8.04 ^V	1.99	13.0	0.003 ^I	0.010 ^{II}	0.109 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I
古城河	7.6	4.0	5.79 ^{III}	0.59 ^{III}	3.29 ^{劣V}	0.39 ^V	3.71 ^{II}	3.79 ^{III}	0.94	8.6	0.008 ^I	0.020 ^{II}	0.064 ^I	0.000 ^I	0.000 ^I

注: * 除 pH 无量纲外,其余水质指标单位均为 mg·L⁻¹; 依据《中华人民共和国地表水环境质量标准 (GB3838-2002)》(国家环境保护总局,2002)。

表 4 滇池流域入湖河流水质指标的因素特征值

Table 4 Eigenvalues of water quality indicators in streams of the Lake Dianchi watershed

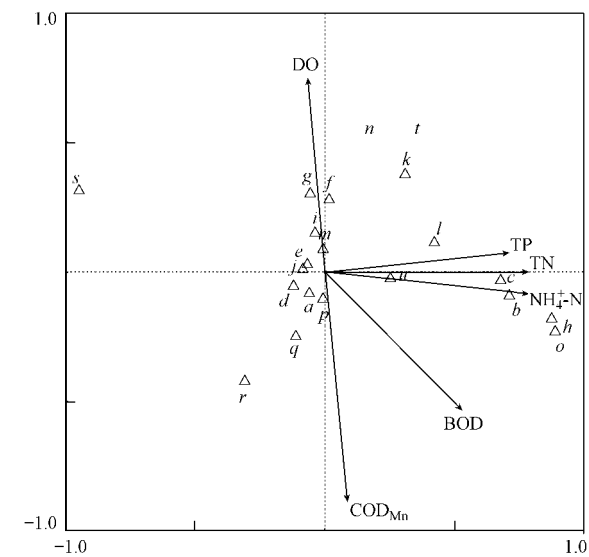
因子	因子旋转前			因子旋转后		
	特征值	方差贡献率	累积方差贡献率	特征值	方差贡献率	累积方差贡献率
F1	5.792	57.924%	57.924%	5.792	57.904%	57.904%
F2	1.594	15.942%	73.866%	1.594	15.932%	73.836%
F3	0.999	9.990%	83.856%			
F4	0.512	5.118%	88.974%			
F5	0.468	4.678%	93.652%			
F6	0.243	2.426%	96.078%			
F7	0.196	1.962%	98.040%			
F8	0.108	1.082%	99.122%			
F9	0.075	0.775%	99.876%			
F10	0.012	0.124%	100.00%			

表 5 滇池流域入湖河流水质指标旋转后的因子载荷率

Table 5 Loadings of rotated water quality indicators in streams of the Lake Dianchi watershed

因子	旋转后的因子载荷率									
	NH ₄ ⁺ -N	TN	DO	TP	COD _{Mn}	BOD	TOC	TSS	pH	NO ₃ ⁻ -N
F1	0.970	0.929	-0.931	0.890	0.859	0.835	0.704	-0.013	-0.328	-0.540
F2	0.084	0.279	-0.035	0.006	-0.205	-0.207	-0.336	0.740	-0.619	0.615

注：粗体数据表示因子载荷率大于 0.750，即可被筛选的数值。



由图 3 可得，第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为 0.395 和 0.078，它们共解释了底栖动物属种数据累积方差值的 47.3%，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底栖动物属种分布的污染影响程度，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 0.0056，两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，主导因子对底栖动物属种分布的相关性大小为 $\text{NH}_4^+\text{-N} > \text{TN} > \text{DO} > \text{COD}_{\text{Mn}} > \text{BOD} > \text{TP}$ 。从箭头与第一排序轴的夹角可以看出，

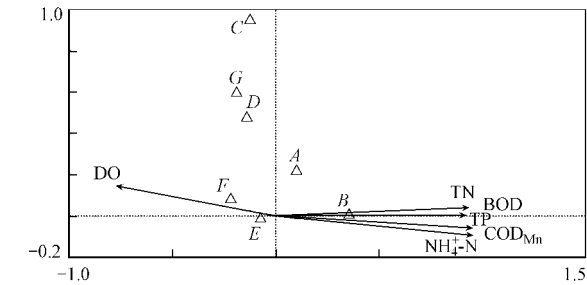


图 3 滇池流域入湖河流水污染状况主导因子与底栖动物属种的典型对应分析双轴图

(注：A. 前突摇蚊属 (*Procladius*)、B. 石蛭属 (*Epidrella*)、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 (*Campylopus*))

Fig 3 Results of canonical correspondence analysis for water quality indicators and macrobenthic assemblages in streams of the Lake Dianchi watershed

图 2 滇池流域入湖河流水污染状况主导因子与着生藻类属种的典型对应分析双轴图

(注：a. 颤藻属 (*Oscillatoria*)、b. 腔球藻属 (*Goebosphaerium*)、c. 平裂藻属 (*Merismopedia*)、d. 舟型藻属 (*Navicula*)、e. 羽纹藻属 (*Pinnularia*)、f. 卵型藻属 (*Cocconeis*)、g. 异极藻属 (*Gomphonema*)、h. 直链藻属 (*Meibomia*)、i. 小环藻属 (*Cyclotella*)、j. 脆杆藻属 (*Fragilaria*)、k. 针杆藻属 (*Synedra*)、l. 桥弯藻属 (*Cymbella*)、m. 根管藻属 (*Rhizosolenia*)、n. 丝藻属 (*Ulothrix*)、o. 小球藻属 (*Chlorella*)、p. 栅藻属 (*Scenedesmus*)、q. 弓形藻属 (*Schroeteria*)、r. 鼓藻属 (*Cosmarium*)、s. 金囊藻属 (*Chrysosapsa*)、t. 金枝藻属 (*Phaeothamion*)、u. 裸藻属 (*Euglena*))

Fig 2 Results of canonical correspondence analysis for water quality indicators and periphytic algal assemblages in streams of the Lake Dianchi watershed

主导因子与水质污染状况相关性的 大小为 $BOD > TN > TP > COD_{Mn} > NH_4^+-N > DO$, 并且只有 DO 与水质污染状况呈负相关. 因此, 综合而言滇池流域入湖河流水质污染状况主导因子对底栖动物属种分布的污染影响程度为 $BOD > TN > COD_{Mn} > TP > NH_4^+-N > DO$.

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 4 可得, TN 、 NH_4^+-N 和 TP 这 3 项水质污染状况主导因子对着生藻类和底栖动物属种分布的污染影响程度均存在显著性. 因此, TN 、 NH_4^+-N 和 TP 是滇池流域入湖河流的水质污染因子.

表 6 滇池流域入湖河流水质污染状况主导因子与着生藻类和底栖动物属种的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between water quality indicators and periphytic algal and macrozoobenthic assemblages respectively in streams of the Lake Dianchi watershed

属类	TN	NH_4^+-N	TP	COD_{Mn}	BOD	DO
着生藻类	0.6470*	0.6923*	0.6481†	0.0674	0.4349	-0.0537
底栖动物	0.9334**	0.9448**	0.9422**	0.8257**	0.9020**	-0.7610†

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

4 讨论 (Discussion)

4.1 滇池流域入湖河流水生生物密度的空间分布特征

在 50% 的相似性水平上 (蔡永久等, 2010), 着生藻类和底栖动物生物密度的等级聚类分析将滇池流域 29 条入湖河流分成 3 组 (图 4). 组 A 共 2 条入湖河流, 均位于流域东部, 包括洛龙河和捞鱼河;

组 B 共 7 条入湖河流, 均位于流域南部, 包括南冲河、淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河和中河; 组 C 共 20 条入湖河流, 除古城河外, 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、马料河和古城河.

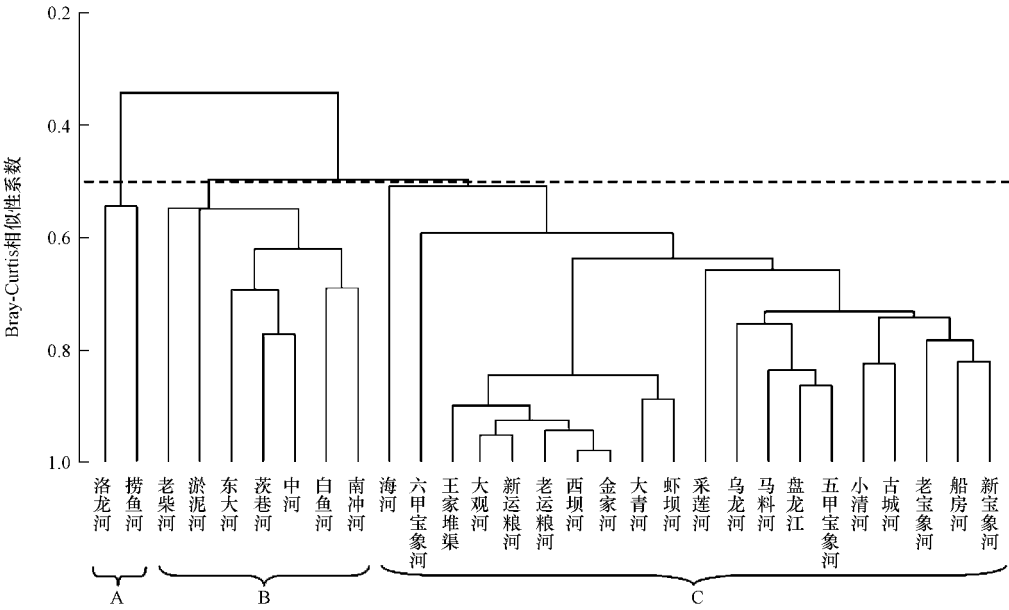


图 4 滇池流域入湖河流着生藻类和底栖动物生物密度 Bray-Curtis 相似性系数的等级聚类分析树状图

Fig. 4 Dendrogram of hierarchical cluster analysis for density of periphytic algae and macrozoobenthos in streams of the lake Dianchi watershed based on Bray-Curtis similarity coefficients

4.2 滇池流域入湖河流水质污染状况的空间分布特征

对滇池流域入湖河流水质污染因子 TN 、 NH_4^+-N 和 TP 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 以判断入湖河流水质污染状况的空间分布特征 (图 5). 再结合 TN 、 NH_4^+-N 和 TP 与水生生物样点的典型对应分析双轴图 (图 6、图 7) 可得, 滇池流域入湖河流

水质污染严重程度的空间分布特征为北部 > 南部。其中,流域北部入湖河流共 19 条,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;流域南部入湖河流共 10 条,包括洛龙河、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。

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;流域南部入湖河流共 10 条,包括洛龙河、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。

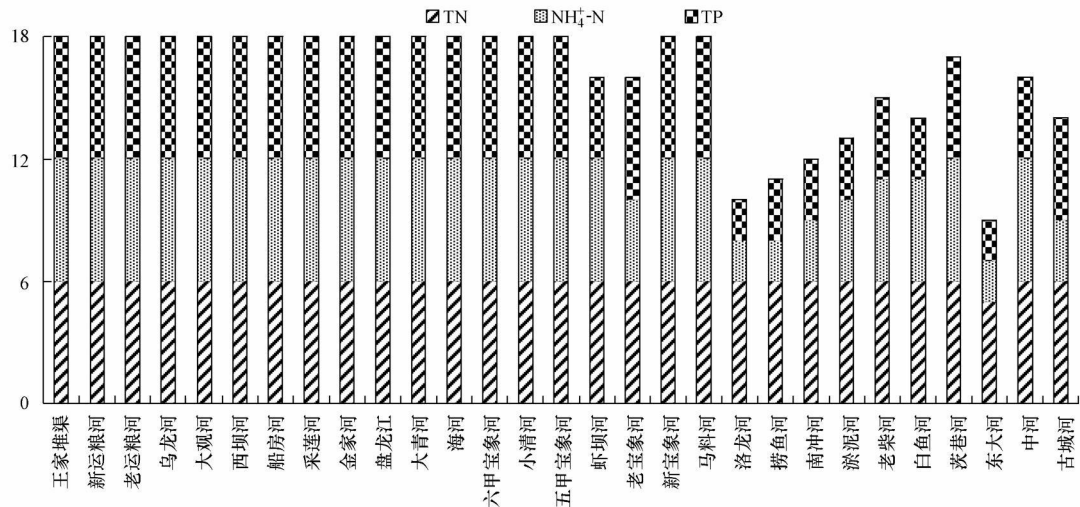


图 5 滇池流域入湖河流 TN、NH₄⁺-N 和 TP 质量评价空间分布特征

Fig 5 Spatial distribution of TN, NH₄⁺-N and TP assessments in streams of the Lake Dianchi watershed

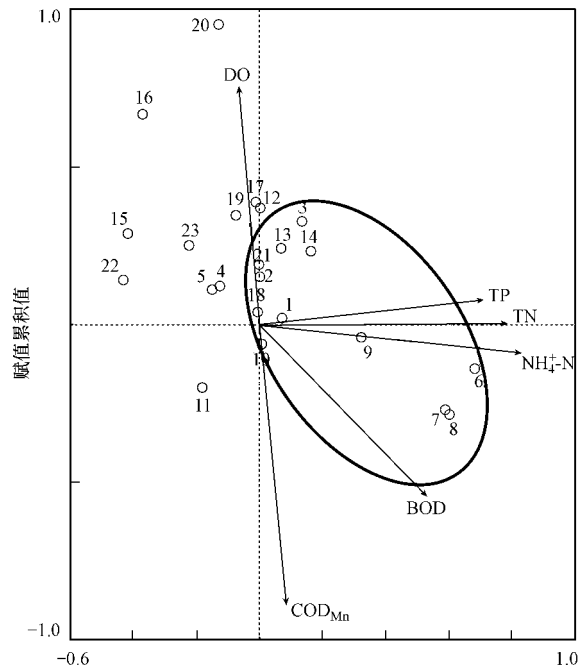


图 6 滇池流域入湖流水污染状况主导因子与着生藻类样点的典型对应分析双轴图

(注: 1. 王家堆渠、2. 乌龙河、3. 船房河、4. 金家河、5. 盘龙江、6. 大青河、7. 海河、8. 六甲宝象河、9. 小清河、10. 五甲宝象河、11. 虾坝河、12. 老宝象河、13. 新宝象河、14. 马料河、15. 洛龙河、16. 捞鱼河、17. 南冲河、18. 淤泥河、19. 老柴河、20. 茨巷河、21. 东大河、22. 中河、23. 古城河)

Fig 6 Results of canonical correspondence analysis for water quality indicators and periphytic algal sampling sites in streams of the Lake Dianchi watershed

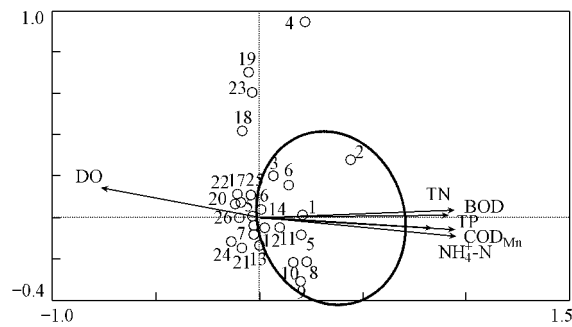


图 7 滇池流域入湖流水污染状况主导因子与底栖动物样点的典型对应分析双轴图

(注: 1. 王家堆渠、2. 新运粮河、3. 乌龙河、4. 西坝河、5. 采莲河、6. 金家河、7. 盘龙江、8. 大青河、9. 海河、10. 六甲宝象河、11. 小清河、12. 五甲宝象河、13. 虾坝河、14. 老宝象河、15. 新宝象河、16. 马料河、17. 洛龙河、18. 捞鱼河、19. 南冲河、20. 淤泥河、21. 老柴河、22. 白鱼河、23. 茨巷河、24. 东大河、25. 中河、26. 古城河)

Fig 7 Results of canonical correspondence analysis for water quality indicators and macrobenthic sampling sites in streams of the Lake Dianchi watershed

4 3 滇池流域入湖流水生生物生物密度与水质污染状况的空间分布特征比较

结合上述两项空间分布特征的结果可以发现,滇池流域入湖流水生生物生物密度与水质污染状况的空间分布特征基本一致。由图 5 可得,洛龙河

和捞鱼河的水质污染状况为全流域最好,因而基于入湖河流水生生物密度的 Bray-Curtis相似性系数将其聚为一类的结果,即流域东部入湖河流,是可靠的;古城河位于流域南部,且其水质污染状况又与流域南部入湖河流基本一致,因而将古城河归入流域南部入湖河流之中。综上所述,滇池流域入湖河流水质污染状况的空间分布特征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)污染程度大于南部入湖河流(南冲河、淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河)大于东部入湖河流(洛龙河和捞鱼河)。

5 结论 (Conclusions)

1)滇池流域入湖河流在水生生物调查期间共检出着生藻类 5 门 18 科 24 属,以硅藻门的舟型藻属(*Navicula*)为优势属;底栖动物 3 门 7 科 8 属,以环节动物门的水丝蚓属(*Limnodrilus*)为优势属。

2)TN、 NH_4^+-N 和 TP 是滇池流域入湖河流的水质污染因子。

3)滇池流域入湖河流水质污染状况的空间分布特征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)污染程度大于南部入湖河流(南冲河、淤泥河、老柴河、白鱼河、茨巷河、东大河、中河和古城河)大于东部入湖河流(洛龙河和捞鱼河)。

责任作者简介:黄艺(1964—),女,副教授,博士,主要从事水环境控制与环境生态学研究。

参考文献 (References):

蔡永久,龚志军,秦伯强. 2010 太湖大型底栖动物群落结构及多样性 [J]. 生物多样性, 18(1): 50-59

Cai Y J, Gong Z J, Qin B Q. 2010. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China [J]. Biodiversity Science 18(1): 50-59 (in Chinese)

Chen J N, Zhang T Z, Du P F. 2002. Assessment of water pollution control strategies: a case study for the Dianchi Lake [J]. Journal of Environment Sciences 14(1): 76-78

Daily G C. 1997. Nature's Services: Social Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington: Island Press 5-21

邓建民,蔡永久,陈宇炜,等. 2010 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, 22(1): 70-78

Deng J M, Cai Y J, Chen Y W, et al. 2010. Structure of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Lake Honghu [J]. Journal of Lake Sciences 22(1): 70-78 (in Chinese)

Dodkins I, Rippey B, Hale P. 2005. An application of canonical correspondence analysis for developing ecological quality assessment metrics for river macrophytes [J]. Freshwater Biology 50(5): 891-904

Falkenmark M, Folke C. 2000. How to bring ecological services into integrated water resources management [J]. AMBIO 29(6): 351-352

Fore L S, Gafie C. 2002. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (USA) [J]. Freshwater Biology 47: 2015-2037

福迪 B(罗迪安,译). 1980. 藻类学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1-350

Foudy B (Rodion, translation). 1980. Phycology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press 1-350 (in Chinese)

高世荣,潘力军,孙凤英,等. 2006 用水生生物评价环境水体的污染和富营养化 [J]. 环境科学与管理, 31(6): 174-176

Gao S R, Pan L J, Sun F Y, et al. 2006. Assessment on the pollution and eutrophication of environmental water by hydrobiological [J]. Environmental Science and Management 31(6): 174-176 (in Chinese)

高丽,杨浩,周健民,等. 2004 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究 [J]. 环境科学学报, 24(5): 776-781

Gao L, Yang H, Zhou J M, et al. 2004. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 24(5): 776-781 (in Chinese)

Hakanson L, Boulion V V. 2003. Modeling production and biomass of zoobenthos in lakes [J]. Aquatic Ecology 37: 227-306

胡俊,刘永定,刘剑彤. 2005 滇池沉积物孔隙水中氮磷形态及相关性的研究 [J]. 环境科学学报, 25(10): 1391-1396

Hu J, Liu Y D, Liu J T. 2005. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 25(10): 1391-1396 (in Chinese)

Huang D B, Bader H P, Scheidegger R, et al. 2007. Confronting limitations: new solutions required for urban water management in Kunming City [J]. Journal of Environmental Management 84: 49-61

黄艺,蔡佳亮,吕明姬,等. 2009 流域水生态功能区划及其关键问题 [J]. 生态环境学报, 18(5): 1995-2000

Huang Y, Cai J L, Li M J, et al. 2009. Aquatic ecological function regionalization at watershed scale and its key issues [J]. Journal of Ecology and Environment Sciences 18(5): 1995-2000 (in Chinese)

中国科学院水生生物研究所. 1980 中国淡水藻类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1-300

Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. 1980. Chinese freshwater algae [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers 1-300 (in Chinese)

江晶,温芳妮,顾鹏,等. 2009 湖北清江流域胡家溪大型底栖动物群

- 落结构及水质评价 [J]. 湖泊科学, 21(4): 547-555
- Jiang J W, Wen F N, Gu P, *et al*. 2009. Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Hujiaxi Stream of Qingjiang River basin in Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences, 21(4): 547-555 (in Chinese)
- Liu C W, Lin K H, Kuo Y M. 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 313(1-3): 77-89
- 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 1979. 中国经济动物志·淡水软体动物 [M]. 北京: 科学出版社. 1-130
- Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, *et al*. 1979. Economic fauna of China-freshwater mollusk [M]. Beijing: Science Press. 1-130 (in Chinese)
- Liu Z H, Liu X H, He B, *et al*. 2009. Spatio-temporal change of water chemical elements in Lake Dianchi, China [J]. Water and Environment Journal, 23(3): 235-244
- Lu J J, Yang H, Gao L, *et al*. 2005. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China [J]. Pedosphere, 15(1): 78-83
- Luss R, d'Apremont A. 2010. Clustering and feature selection using sparse principal component analysis [J]. Optimization and Engineering, 11(1): 145-157
- Ouyang Y. 2005. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis [J]. Water Research, 39(12): 2621-2635
- Reavie E D, Jichab T M, Anagnost R, *et al*. 2010. Algal assemblages for large river monitoring: Comparison among biovolume, absolute and relative abundance metrics [J]. Ecological Indicators, 10: 167-177
- Salgado J P, Cabral H N, Costa M J. 2007. Spatial and temporal distribution patterns of the macrozoobenthos assemblage in the salt marshes of Tejo estuary (Portugal) [J]. Hydrobiologia, 587: 225-239
- 沈会涛, 刘存歧. 2008. 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, 20(1): 773-779
- Shen H T, Liu C Q. 2008. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 20(1): 773-779 (in Chinese)
- Signa G C, Tweedale W A. 2003. Watershed scale assessment of nitrogen and phosphorus loadings in the Indian Stream Lagoon Basin, Florida [J]. Environmental Management, 67(4): 363-372
- Singh K P, Malik A, Mohan D, *et al*. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - a case study [J]. Water Research, 38(18): 3980-3992
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 32-70
- State Environmental Protection Administration. 2002. Water and Wastewater Monitoring Analysis Method (fourth edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 32-70 (in Chinese)
- 国家环境保护总局. 2002. 中华人民共和国地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社
- State Environmental Protection Administration. 2002. Surface water quality standards for People's Republic of China [S]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- 孙春梅, 范亚文. 2009. 黑龙江黑河江段藻类植物群落与环境因子的典型对应分析 [J]. 湖泊科学, 21(6): 839-844
- Sun C M, Fan Y M. 2009. Canonical correspondence analysis of the relationship between algal community and environment variables of Heilongjiang Stream in Heihe [J]. Journal of Lake Sciences, 21(6): 839-844 (in Chinese)
- 孙刚, 盛连喜, 李明全. 2001. 长春南湖底栖动物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 应用生态学报, 12(2): 319-320
- Sun G, Sheng L X, Li M Q. 2001. Community characteristics of benthonic animals and its relationship to environment factors in the Nanhu Lake, Changchun [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 12(2): 319-320 (in Chinese)
- 谭蓓, 陈求稳, 朱传保, 等. 2009. 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, 29(3): 634-640
- Tan K, Chen Q W, Zhu C B, *et al*. 2009. Development and application of a two-dimensional water quality model to the confluence of the Daqinghe River and Dianchi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(3): 634-640 (in Chinese)
- Terbraak C J F. 1986. Canonical correspondence analysis—a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. Ecology, 65(5): 1167-1179
- 王朝晖, 胡韧, 谷阳光, 等. 2009. 珠江广州河段着生藻类的群落结构及其与水质的关系 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1510-1516
- Wang Z H, Hu R, Gu Y G, *et al*. 2009. Community structures of periphytic algae in the Guangzhou reaches of the Pearl River and their relationship to water quality [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(7): 1510-1516 (in Chinese)
- 王洪铸. 2002. 中国小蛭类研究 [M]. 北京: 高等教育出版社. 1-220
- Wang H Z. 2002. Studies on Taxonomy, distribution and ecology of *Micodrilus obsoletus* of China [M]. Beijing: Higher Education Press. 1-220 (in Chinese)
- 吴荣军, 李瑞香, 朱明远, 等. 2006. 应用 PRIMER 软件进行浮游植物群落结构的多元统计分析 [J]. 海洋与湖泊, 37(4): 316-321
- Wu R J, Li R X, Zhu M Y, *et al*. 2006. Multivariate analysis with PRIMER on marine phytoplankton community structure in mesocosm system [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 37(4): 316-321 (in Chinese)
- 周红, 张志南. 2003. 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 [J]. 青岛海洋大学学报, 33(1): 58-64
- Zhou H, Zhang Z N. 2003. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 33(1): 58-64 (in Chinese)