

三峡库区支流底栖硅藻功能群特征及其驱动因子分析——以汝溪河为例*

李巧玉¹, 刘瑞², 向荣¹, 喻焱¹, 董聪聪¹, 张红波¹, 施军琼¹, 吴忠兴^{1**}

(1: 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715)

(2: 武汉市环境监测中心, 武汉 430015)

摘要: 以三峡库区重要支流汝溪河为研究区域, 分析汝溪河中底栖硅藻功能群季节演替特征, 并探讨影响其季节演替的驱动因子。结果表明, 3 个水情期(平水期、枯水期及丰水期)共鉴定出底栖硅藻 168 种, 隶属 8 科 27 属, 共划分为 B、C、D、L₀、MP、P、X3 和 T_B 8 个功能群, 其中 MP 在 3 个水情期中均占主导地位。通过冗余分析(RDA)发现, 汝溪河中底栖硅藻功能群季节演替的主要驱动环境因子为亚硝酸盐浓度、电导率、溶解性磷酸盐浓度、高锰酸钾指数和温度。

关键词: 底栖硅藻; 功能群; 季节演替; 驱动因子; 汝溪河; 三峡库区

Functional group characteristics of benthic diatoms and its driving factors in the branch of Three Gorges Reservoir: A case study of Ruxi River

LI Qiaoyu¹, LIU Rui², XIANG Rong¹, YU Yi¹, DONG Congcong¹, ZHANG Hongbo¹, SHI Junqiong¹ & WU Zhongxing^{1**}

(1: Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

(2: Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015, P.R.China)

Abstract: The seasonal succession of function groups in benthic diatom and its relationship with environmental factors were investigated in Ruxi River, an important branch of Three Gorges Reservoir. Results showed that 168 species of benthic diatoms belonging to 27 genus, 8 families were found in this river, and these species were categorized to 8 functional groups including B, C, D, L₀, MP, P, X3 and T_B during three different water periods for low, level and high water period, and MP was absolutely dominant. Redundancy analysis suggested that seasonal succession of functional groups in the benthic diatom was mainly determined by nitrite, conductivity, phosphate, permanganate index and water temperature.

Keywords: Benthic diatoms; functional groups; seasonal dynamics; driving factors; Ruxi River; Three Gorges Reservoir

在河流生态系统中, 藻类能进行光合作用, 对污染物反应灵敏, 且群落结构组成变化随着水体生态环境变化而变化, 常被用于水质监测和评价^[1]。传统研究常根据形态学水平划分不同的类群, 不同生境下浮游植物群落往往高度多样化且大多数物种的发生难以预测, 因此, 不能很好体现出河流生态环境特征。为了弥补传统分类方法在应用方面的不足, Reynolds 依据浮游植物生理、生态、形态特点等综合特征提出了相对完整的浮游藻类功能群理论^[2], 并依据浮游植物对不同环境因子的耐受性及个体形态差异将浮游植物划分出 31 个功能群^[3]。Padisák 在 Reynolds 的基础上, 依据在功能上适应性较强的物种, 更能耐受因子缺失的限制条件和在受光照、P、C、N 或其他因子限制的生态境更有可能生存等特征, 进一步将功能群归纳整理为包括 A、B、D、MP、T_B 等 39 个功能群^[4-6]。近些年来, 该理论被广泛应用于国内外浮游植物的研究^[7], 如 Becker 等^[3]对巴

* 中央高校基本业务费专项(XDJK2016C111)和西南大学博士基金项目(SWU110065)联合资助。2016-11-14 收稿; 2017-02-24 收修改稿。李巧玉(1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: 1255805492@qq.com。

** 通信作者; E-mail: wuzhx@swu.edu.cn。

西亚热带深水水库、Crossetti 等^[8]对 Mangueira 湖、Devercelli 等^[9]对 Salado 河、Xiao 等^[10]对流溪水库及李磊等^[11]对阿哈水库等开展了相应的研究。然而,对硅藻功能群的研究相对较少。硅藻是食物链中的主要初级生产者,具有繁殖快、生长周期短且对水体理化环境的变化反应迅速、敏锐的特点,被广泛关注^[12-13]。特别是底栖硅藻具有分布广泛,便于采集和对水体生态变化的敏感性强的优点,常被用于水体监测^[14]。

自三峡大坝建成蓄水后,水位升高,水流减缓,水体扩散能力减弱,支流水体富营养化问题严重,局部地区水华频繁发生,对水质健康状况产生严重威胁^[15]。汝溪河是三峡库区重要支流之一,发源于万州,流经忠县汝溪镇,最后经涂井乡汇入长江。全流域面积 720 km²,主河道长 54.5 km,在忠县的流域面积为 272.9 km²,主河道长 25.4 km。库区蓄水后,在忠县区域形成长 15 km 的回水区^[16]。目前,关于汝溪河底栖硅藻的研究较少,而对汝溪河底栖硅藻功能群的特征以及其与环境之间的关系未见相关报道,为了揭示人为活动影响下汝溪河底栖硅藻群落结构及功能群变化,本研究主要对汝溪河上游区域开展底栖硅藻功能群季节演替特征以及季节演替的驱动因子的研究,为汝溪河及相应流域的水生生态系统保护和管理提供一定依据。

1 材料与方 法

1.1 样点设置

本实验对汝溪河忠县段(30°27'~30°31'N,108°1'~108°6'E)的汝溪镇至涂井乡设置了 9 个样点(图 1)。在汝溪镇至涂井乡自上而下分布有桐油滩、长溪、高洞梁和鑫家源等 4 个水电站。S1 为控制样点,距最上游的桐油滩水电站 1000 m 左右,基本不受梯级电站的影响,样点 S2、S4、S6、S8 分别为桐油滩水电站、长溪水电站、高洞梁水电站以及鑫家源水电站上游样点,而样点 S3、S5、S7、S9 为 4 个电站下游的样点。根据对汝溪河长期的监测(2011—2013 年),于 2013 年 4 月(丰水期)、8 月(平水期)和 12 月(枯水期)进行样品采集与理化指标的测定和分析。

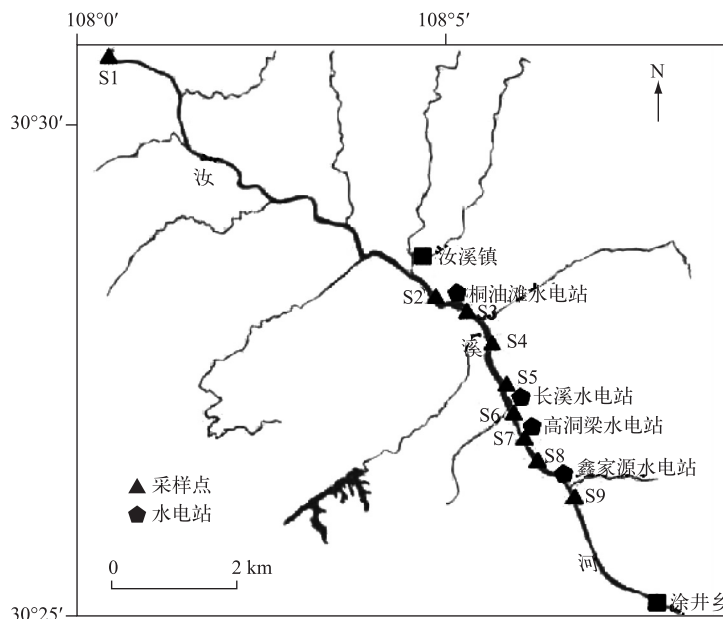


图 1 汝溪河样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Ruxi River

1.2 样品采集与理化指标

附石藻的采集依据 EPA^[17]的采样方法,每个样点随机选取 3~5 块石头,在石头上选取 R=2.7 cm 的固定表面积,共取 5 个圆形样方,刷取圆内的藻。记录刷液体积,等量分装为 3 份,一份抽滤后测定叶绿素 a 浓度,一份加鲁哥氏剂固定,一份加甲醛固定。带回实验室经处理后,鲁哥氏剂固定的藻液用于定量分析,甲醛

固定的藻液用于固定标本玻片的制作以及优势种的确定. 用多参数水质分析仪 DS5 (Hydrolab, 美国) 现场测定水体理化指标: 流速(V)、透明度(SD)、温度(T)、水下光照(PAR)、pH、氧化还原电位(ORP)、电导率(SPC)、溶解氧(DO)、浊度(Tur). 水样带回实验室, 参照《水和废水监测分析方法》^[18] 测定营养盐指标: 总氮(TN)、硝酸盐(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐(NO₂⁻-N)、铵盐(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、溶解性磷酸盐(PO₄³⁻-P)、可溶性硅酸盐(SiO₂)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总碱度(CaO).

1.3 数据处理及分析

功能群分类参照 Reynolds 和 Padisák^[4,5,19] 等分类体系进行划分. 用 Excel 整理数据, SPSS 22.0 软件进行多元逐步回归分析, 其中以环境因子为自变量, 不同功能类群藻密度为因变量, 根据 *P* 值和 *F* 值逐步筛选出主要影响环境因子, 得到回归方程和相关系数. 采用 Canoco 5.0 软件进行排序分析^[20]. 排序分析前, 先将物种数据进行除趋势对应分析(DCA), 4个轴最大梯度大于4.0, 选用典范对应分析(CCA), 如果小于3.0, 选用冗余分析(RDA). 本文4个轴最大梯度均小于3.0, 故选用 RDA 分析, 除 pH 外其余数据均进行 lg(*x*+1) 转换, 进行 RDA 分析前, 用 SPSS 软件对环境因子进行 Pearson 相关分析.

2 结果

2.1 汝溪河底栖硅藻的群落结构及功能群

在丰水期、平水期、枯水期3个时期, 对汝溪河9个样点底栖硅藻进行采样, 结果表明9个样点中共鉴定出硅藻门8科27属168种, 其中中心纲和羽纹纲所占比例分别为6.55%和93.45%, 舟形藻属(28种)、菱形藻属(23种)和异极藻属(21种)为主要优势属, 分别占总种数的16.7%、13.7%和12.5%. 依据生境的不同, 对168种硅藻进行功能群划分, 结果发现168种硅藻可划分为8个功能类群(表1), 分别为B、C、D、L₀、MP、P、T_B、X3. 从种类组成(图2)来看, 所占种数比例最大的是MP类群(62种), 其次为D(29种), 最少的为C(2种)和T_B(3种). 丰水期底栖硅藻功能类群的种类比例分布为MP(53.45%)最大, 其次为D(19.83%), C(0.86%)最小; 平水期的种类比例分布为MP(45.95%)最大, 其次为D(20.30%), C(1.35%)最小; 枯水期的功能群种类比例为MP(48.60%)最大, 其次为D(27.10%), 而B、L₀、C(各占1.87%)最小. 从藻密度来看, 丰

表1 汝溪河底栖硅藻功能群组成

Tab.1 Benthic diatom functional group composition in Ruxi River

功能群	代表物种	生境特征
B	具星小环藻 (<i>Cyclotella stelleri</i>) 广缘小环藻 (<i>Cyclotella bodanica</i>) 意大利直链藻 (<i>Melosira italica</i>)	中营养中小型水体, 对分层敏感
C	梅尼小环藻 (<i>Cyclotella meneghiniana</i>)	富营养中小型水体
D	尖针杆藻 (<i>Synedra acus</i>) 谷皮菱形藻 (<i>Nitzschia palea</i>)	对分层敏感, 浅、浑浊的水体
L ₀	西藏羽纹藻 (<i>Pinnularia tibetica</i>)	浅至深、贫至富营养、中到大型水体
MP	披针形舟形藻 (<i>Navicula lanceolata</i>) 近缘桥弯藻 (<i>Cymbella affinis</i>) 窄异极藻 (<i>Gomphonema angustatum</i>) 扁圆卵圆藻 (<i>Cocconeis placentula</i>) 披针形曲壳藻 (<i>Achnanthes lanceolata</i>) 窄双菱藻 (<i>Surirella angusta</i>) 钝脆杆藻 (<i>Fragilaria capucina</i>)	频繁搅动, 浑浊、浅水体
P	颗粒直链藻 (<i>Melosira granulata</i>)	连续或半连续混合、较高营养的水体
T _B	变异直链藻 (<i>Melosira varians</i>) 小型异极藻 (<i>Gomphonema parvulum</i>)	高激流环境
X3	尖布纹藻 (<i>Gyrosigma acuminatum</i>) 草鞋形波缘藻 (<i>Cymatopleura solea</i>)	浅、充分混合贫营养的水体

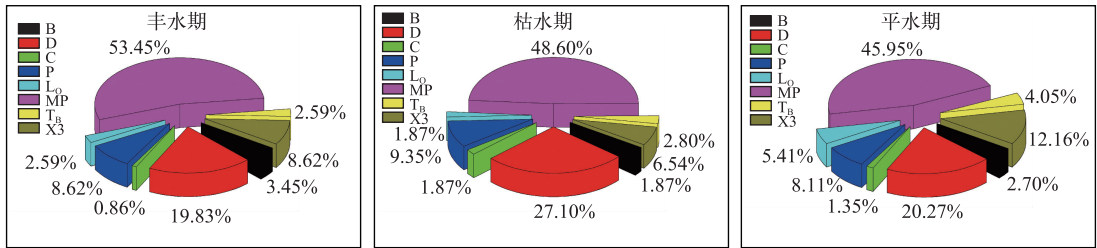


图2 汝溪河不同水情期底栖硅藻功能类群的组成

Fig.2 The functional groups composition of benthic diatoms in Ruxi River during different hydrological periods

水期 MP 类群占绝对优势 (7703.5 cells/cm²), 其次为 C (2994.7 cells/cm²); 平水期 MP 类群占绝对优势 (2891.8 cells/cm²), 其次为 P (776.1 cells/cm²); 枯水期 MP 类群占绝对优势 (12226.3 cells/cm²), 其次为 D (3107.5 cells/cm²).

2.2 不同时期功能类群与环境因子的逐步回归分析

为了寻找不同时期功能类群与环境因子之间的关系, 应用逐步回归分析不同水文时期特征, 结果表明 (表 2), 丰水期, 除 D、L₀ 外, 其余功能群均筛选出主要影响的环境因子. C 与环境因子 (TN、PO₄³⁻-P、CaO)、P 与环境因子 (NO₂⁻-N、SD、COD_{Mn})、T_B 与 pH 的相关系数分别为 0.999、0.978、0.891, P 均小于 0.005. MP 与环境因子 (SD、CaO)、B 与 NO₂⁻-N、X₃ 与 SiO₂ 的相关系数分别为 0.875、0.710、0.676, P 均小于 0.05. MP 与 C 类群共同的主要影响环境因子为 CaO, MP 与 P 类群共同的主要影响环境因子为 SD, B 与 P 类群共同的主要影响环境因子为 NO₂⁻-N.

平水期, 除 L₀、T_B 外, 其余功能群均筛选出主要影响的环境因子. MP 与环境因子 (SPC、TN、TP、NO₂⁻-N、SiO₂)、B 与环境因子 (SD、NH₄⁺-N)、P 与环境因子 (DO、NO₃⁻-N、ORP) 的相关系数分别为 1.000、0.990、0.989, P 均小于 0.001. X₃ 与环境因子 (Tur、PO₄³⁻-P、COD_{Mn})、C 与 PO₄³⁻-P 的相关系数分别为 0.958、0.811, P 均小于 0.01. D 与环境因子 T 的相关系数为 0.735, P 小于 0.05. C 与 X₃ 共同的主要影响环境因子为 PO₄³⁻-P (表 2).

枯水期, 除 L₀、B、C、P 外, 其余功能群均筛选出主要影响的环境因子. T_B 与环境因子 (T、NO₃⁻-N、PAR、pH、SD、COD_{Mn})、MP 与环境因子 NO₂⁻-N 的相关系数分别为 1.000、0.929, P 均小于 0.001. X₃ 与环境因子 ORP、D 与环境因子 PAR 的相关系数为 0.729、0.750, P 均小于 0.05. T_B 与 D 共同的主要影响环境因子为 PAR (表 2).

方差分析结果 (表 3) 显示, 在丰水期, B、C、MP、P、T_B、X₃ 类群的 F 值范围为 5.892~37.122, 6 个类群受环境因素的影响较大; 在平水期, B、C、D、MP、P、X₃ 类群的 F 值范围为 8.229~795.697, 受环境因素的影响较大; 在枯水期, D、MP、T_B、X₃ 类群的 F 值范围为 7.926~15589.766, 4 个类群受环境因素的影响较大.

2.3 不同时期功能类群藻密度与环境因子的相关性分析

为了分析环境因子对不同时期功能群生物量的影响, 利用 RDA 分析了不同时期功能群藻密度与环境因子的相关性. 结果发现, 丰水期时, RDA 分析结果是种类与环境因子排序轴的相关性系数为 1, 前两轴特征值分别为 0.605、0.212, 物种—环境关系的累积百分率为 81.7% (表 4). 在排序图中 (图 3), 与轴 1 相关性最大的正相关因子是 SPC, 相关系数为 0.5657; 与轴 1 相关性最大的负相关因子是 NO₂⁻-N, 相关系数为 -0.6202. 与轴 2 相关性最大的正相关因子是 TN, 相关系数为 0.6368; 与轴 2 相关性最大的负相关因子是 V, 相关系数为 -0.6519. 功能群 B、C、D、MP、P、T_B、X₃ 的藻密度与环境因子 NO₂⁻-N、TN 呈正相关, 与环境因子 SPC、V 呈负相关; 功能群 L₀ 的藻密度与环境因子 SPC、V 呈正相关, 与环境因子 NO₂⁻-N、TN 呈负相关.

平水期, RDA 分析结果是种类与环境因子排序轴的相关性系数为 1, 前两轴特征值分别为 0.344、0.296, 物种—环境关系的累积百分率为 64.0%. 在排序图中, 与轴 1 相关性最大的正相关因子是 PO₄³⁻-P, 相关系数为 0.6941; 与轴 1 相关性最大的负相关因子是 CaO, 相关系数为 -0.6267. 与轴 2 相关性最大的正相关因子是 COD_{Mn}, 相关系数为 0.7741; 与轴 2 相关性最大的负相关因子是 NH₄⁺-N, 相关系数为 -0.7329. 功能

表 2 不同水情期汝溪河底栖硅藻功能类群藻密度与环境因子的逐步回归分析

Tab.2 Stepwise multiple regression between densities of benthic diatom functional classification and environmental factors in Ruxi River during different water periods

水情期	功能群	筛选出的相关变量	逐步回归分析方程	相关系数 R	P
丰水期	B	NO ₂ ⁻ -N	$y = -0.377 + 20.439x_1$	0.710	0.032
	C	TN、PO ₄ ³⁻ -P、CaO	$y = -8.217 + 2.413x_1 + 49.834x_2 + 0.044x_3$	0.999	0.003
	D	—	—	—	—
	L ₀	—	—	—	—
	MP	SD、CaO	$y = 2.584 + 0.221x_1 - 0.115x_2$	0.875	0.040
	P	NO ₂ ⁻ -N、SD、COD _{Mn}	$y = -0.301 + 19.972x_1 - 0.012x_2 + 0.23x_3$	0.978	0.001
	T _B	pH	$y = -62.685 + 6.882x_1$	0.891	0.001
	X3	SiO ₂	$y = 2.492 - 0.64x_1$	0.676	0.046
	平水期	B	SD、NH ₄ ⁺ -N	$y = -0.027 + 0.001x_1 - 0.153x_2$	0.990
C		PO ₄ ³⁻ -P	$y = 0.978 - 7.456x_1$	0.811	0.008
D		T	$y = -6.343 + 0.206x_1$	0.735	0.024
L ₀		—	—	—	—
MP		SPC、TN、TP、NO ₂ ⁻ -N、SiO ₂	$y = -5.735 + 0.027x_1 - 8.09x_2 + 14.634x_3 + 32.221x_4 - 0.079x_5$	1.000	<0.001
P		DO、NO ₃ ⁻ -N、ORP	$y = -2.58 + 0.206x_1 - 6.934x_2 + 0.008x_3$	0.989	<0.001
T _B		—	—	—	—
X3		Tur、PO ₄ ³⁻ -P、COD _{Mn}	$y = -0.142 + 0.023x_1 + 3.413x_2 - 0.122x_3$	0.958	0.004
枯水期		B	—	—	—
	C	—	—	—	—
	D	PAR	$y = -2.808 + 0.033x_1$	0.750	0.020
	L ₀	—	—	—	—
	MP	NO ₂ ⁻ -N	$y = -35.35 + 873.193x_1$	0.929	<0.001
	P	—	—	—	—
	T _B	T、NO ₃ ⁻ -N、PAR、pH、SD、COD _{Mn}	$y = 8.855 + 0.418x_1 - 3.4394x_2 + 0.004x_3 - 1.336x_4 + 0.016x_5 - 1.777x_6$	1.000	<0.001
	X3	ORP	$y = 2.929 - 0.007x_1$	0.729	0.026

表 3 不同时期汝溪河底栖硅藻功能群藻密度受环境因子影响的单因素方差分析统计结果

Tab.3 ANOVA for effects of environmental factors on the densities of benthic diatom functional classifications in Ruxi River during different hydrological periods

功能群	丰水期		平水期		枯水期	
	F	P	F	P	F	P
B	7.120	0.032	148.454	0	—	—
C	27.016	0.003	13.495	0.008	—	—
D	—	—	8.229	0.024	9.016	0.020
L ₀	—	—	—	—	—	—
MP	9.758	0.013	795.697	0	44.399	0
P	37.122	0.001	74.873	0	—	—
T _B	26.833	0.001	—	—	15589.766	0
X3	5.892	0.046	18.716	0.004	7.926	0.026

群 T_B、X3、L₀ 的藻密度与 PO₄³⁻-P、NH₄⁺-N 呈正相关, 与环境因子呈负相关 COD_{Mn}、CaO; 功能群 C、MP 的藻密度与 CaO、NH₄⁺-N 呈正相关, 与 PO₄³⁻-P、COD_{Mn} 呈负相关. 功能群 D、P 的藻密度与 CaO、COD_{Mn} 呈正相关, 与 PO₄³⁻-P、NH₄⁺-N 呈负相关; 功能群 B 的藻密度与 PO₄³⁻-P、COD_{Mn} 呈正相关, 与 CaO、NH₄⁺-N 呈负相关.

表 4 不同时期汝溪河底栖硅藻功能类群藻密度与主要环境因子间的 RDA 分析
 Tab.4 The major environmental factors affecting densities of benthic diatom functional classification by RDA analysis in Ruxi River during different water periods

水情期	参数指标	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
丰水期	特征值	0.605	0.212	0.095	0.046
	种类—环境相关性	1.000	1.000	1.000	1.000
	物种数据累积变化百分率/%	60.5	81.7	91.2	95.8
	物种—环境相关性累积变化百分率/%	60.5	81.7	91.2	95.8
平水期	特征值	0.344	0.296	0.220	0.098
	种类—环境相关性	1.000	1.000	1.000	1.000
	物种数据累积变化百分率/%	34.4	64.0	86.1	95.9
	物种—环境相关性累积变化百分率/%	34.4	64.0	86.1	95.9
枯水期	特征值	0.279	0.253	0.228	0.135
	种类—环境相关性	1.000	1.000	1.000	1.000
	物种数据累积变化百分率/%	27.9	53.2	76.0	89.5
	物种—环境相关性累积变化百分率/%	27.9	53.2	76.0	89.5

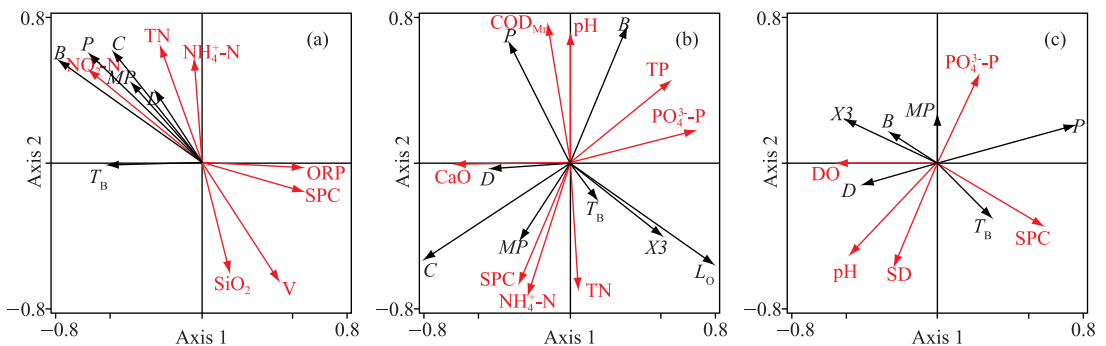


图 3 不同时期功能群藻密度与环境因子 RDA 排序图: (a) 丰水期; (b) 平水期; (c) 枯水期

Fig.3 The RDA diagrams between environmental factors and densities of benthic diatoms functional classifications in Ruxi River during different water periods: (a) high water period; (b) level water period; (c) low water period

枯水期, RDA 分析结果是种类与环境因子排序轴的相关性系数为 1, 前两轴特征值分别为 0.279、0.253, 物种—环境关系的累积百分率为 53.2%。在排序图中, 与轴 1 相关性最大的正相关因子是 SPC, 相关系数为 0.5880; 与轴 1 相关性最大的负相关因子是 DO, 相关系数为 -0.5515。与轴 2 相关性最大的正相关因子是 $PO_4^{3-}-P$, 相关系数为 0.4794; 与轴 2 相关性最大的负相关因子是 SD, 相关系数为 -0.5574。功能群 B、MP、X3 的藻密度与环境因子 DO、 $PO_4^{3-}-P$ 呈正相关, 与环境因子 SPC、SD 呈负相关; 功能群 L_0 、 T_B 的藻密度与环境因子 SPC、SD 呈正相关, 与环境因子 DO、 $PO_4^{3-}-P$ 呈负相关; 功能群 C、D 的藻密度与环境因子 DO、SD 呈正相关, 与环境因子 SPC、 $PO_4^{3-}-P$ 呈负相关; 功能群 P 藻密度与环境因子 SPC、 $PO_4^{3-}-P$ 呈正相关, 与环境因子 DO、SD 呈负相关。

3 讨论

由于许多物种往往代表着一定的生境类型, 因此基于传统藻类分类单元进行水体生态学的研究已经被广泛应用^[21]。然而, 藻类对环境的反应往往依赖于地理环境或栖息地特征, Kelly 认为由于地理环境或栖息地的变化可能导致相同的物种出现不一样的结果^[22], 甚至同一物种生态型出现不同的生态特征^[23]。因此, 基于传统的藻类分类单元研究水生生态系统一直受到质疑^[22]。而功能性状特征能够反映真实的生态环境

条件,近年来在国外水体生态系统评价中经常被报道,如:Passy 提出的“guild”功能群^[24],Reynolds 提出的“function group”^[2]。“guild”和“function group”是同义词,本质上都是基于功能性状提出的分类单元,两者区别在于前者强调资源共用,而后者强调生态功能相似。由于 Blondel 认为“guild”更多应用在动物方面^[25],因此,功能群“function group”常被用于藻类学。Becker 利用浮游植物功能群对地中海水库的浮游植物驱动特征进行研究,证实了浮游植物功能群具有潜在用途,能够了解藻类生长的策略、适应和耐受等特性以及水库浮游植物动力学提供信息^[3]。先前功能群的研究主要基于浮游植物提出的浮游植物功能群的概念,却很少用于底栖藻类,特别是底栖硅藻的研究。然而,底栖硅藻分布广泛、便于采集,繁殖快、生长周期短且对水体中理化环境的变化反应迅速、能快速敏锐地做出反应的特点^[12-13],如果能更好地确定功能特性与环境因子相关性,用其作为水生生态系统研究将具有很好的应用价值^[21]。本文利用功能群对汝溪河开展了研究,发现汝溪河中有近缘桥弯藻(*Cymbella affinis*)、披针形舟形藻(*Navicula lanceolata*)等为优势种,均属于功能群中的 MP 类群;通过汝溪河 3 个水情期环境因子分析得到,透明度均值为 0.59 m、流速均值为 0.11 m/s,这与 MP 类群的生境特征相符。Reynolds^[2]研究表明,由于物种的选择性,比表面积大且能耐受低光照的硅藻(如 MP 类群为典型代表)利于生活在水体浑浊环境中。受三峡库区周期性蓄水变动的影响,库区支流水体悬浮颗粒物搅拌频繁,因此,汝溪河 3 个水情期底栖硅藻功能群中均以 MP 占主(表 1)。这一结果也支持了闵文武等^[26]对渭河流域不同时期浮游植物功能群的研究结论。

电导率是天然水体中总离子浓度指数,是影响底栖硅藻群落组成与分布的一个重要因素^[26-27],本次研究发现丰水期和枯水期不同功能群的藻密度与电导率均有相关性(表 2),其中占优势地位的 MP 类群藻密度与电导率呈正相关(图 3)。Leira 等研究发现水体中电导率变化与营养物质浓度呈正相关^[29],即电导率越高,营养物质浓度越高,水体越浑浊,MP 类群喜好生长于频繁搅动、浑浊水体,伴随电导率的升高,该生境更利于 MP 类群生长,这一结果也支持了功能群能够很好地应用于底栖硅藻的研究。Stevenson 等^[30]研究指出水体 pH 与硅藻群落组成间有一定的相关性。本次研究测定 3 个水情时期 pH 变化区间在 7.93~10.11 之间,水体呈碱性,跨度变化在碱性区间,逐步回归分析发现丰水期时 T_B类群与 pH 呈正相关,(表 2),这表明汝溪河流域中底栖硅藻功能群 T_B对 pH 耐受较强^[31]。温度也是影响硅藻分布的因素之一^[32],本研究发现 D 功能群(表 2)与水温有相关性,李磊等^[11]对阿哈水库的研究中也发现 D 功能群与温度有关,在一定温度范围,温度升高,光照增加,从而促进光合作用,利于 D 功能群生长繁殖。N 和 P 被视为影响硅藻群落的因素之一^[33],同时也是水体生态质量的重要指标,本次研究中,平水期(8 月份)NO₂-N 浓度范围为 0.0072~0.0197 mg/L,普遍低于丰水期和枯水期,MP 的藻密度也较丰水期和枯水期小。Becker 等^[3]研究表明功能群 C 与水体中可溶性磷浓度呈负相关,本次研究中,平水期与枯水期的排序分析(图 3)和逐步回归分析(表 2)均表明,汝溪河底栖硅藻功能群 C 的藻密度与 PO₄³⁻-P 浓度呈负相关,PO₄³⁻-P 浓度越高,该栖息地的功能群 C 的藻密度越小,反之则越大,这与 Becker 等^[3]的研究结果一致。

4 结论

1) 汝溪河流域中共鉴定出硅藻 168 种,划分出 8 个功能群,在种类水平上,3 个时期均以 MP 类群占主导地位,其次为 D 类群;在藻密度水平上,丰水期中 MP 类群占绝对优势,其次为 C 类群,平水期中 MP 类群占绝对优势,其次为 P 类群,枯水期中 MP 类群占绝对优势,其次为 D 类群,总体来看 3 个时期均以 MP 类群占主导优势地位。

2) 通过分析结果得到,NO₂-N、SPC、PO₄³⁻-P、COD_{Mn}、T 是影响汝溪河底栖硅藻不同功能群的主要环境因子,其中功能群 MP 主要受到 NO₂-N、SPC 的影响,功能群 C 主要受到 PO₄³⁻-P 的影响,功能群 D 主要受到 T 的影响。

致谢:感谢许金铸师兄、杨燕君师姐和徐沙师姐对本次野外实验和室内藻类鉴定的辛苦付出。

5 参考文献

- [1] Li Guocheng, Liu Lusan, Li Li et al. Applications of diatom in river health assessment: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2617-2624. [李国忱,刘录三,李黎等.硅藻在河流健康评价中的应用研究进展.应用

- 生态学报, 2012, **23**(9): 2617-2624.]
- [2] Dong Jing, Li Yanhui, Li Genbao *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836-843. [董静, 李艳晖, 李根保等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 836-843.]
- [3] Becker V, Caputo L, Ordóñez J *et al.* Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354.
- [4] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**: 417-428.
- [5] Hu Ren, Lan Yuqian, Xiao Lijuan *et al.* The concepts classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI:10.18307/2015.0102. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [6] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [7] Chen Xiaojiang, Yang Ji, Liu Bo *et al.* Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Guanting Reservoir. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 74-81. [陈晓江, 杨劼, 刘波等. 官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子. 中国环境监测, 2016, **32**(3): 74-81.]
- [8] Crossetti LO, Becker V, Cardoso LDS *et al.* Is phytoplankton functional classification a suitable tool to investigate spatial heterogeneity in a subtropical shallow lake?. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**(3): 157-163.
- [9] Devercelli M, Farrell IO. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**(2): 67-78.
- [10] Xiao LJ, Wang T, Hu R *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5099-5109.
- [11] Li Lei, Li Qiuhua, Jiao Shulin *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in Aha Reservoir and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3604-3611. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3604-3611.]
- [12] O'Driscoll C, Eyto ED, Rodgers M *et al.* Diatom assemblages and their associated environmental factors in upland peat forest rivers. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 443-451.
- [13] Benito X, Trobajo R, Ibáñez C. Benthic diatoms in a Mediterranean delta: ecological indicators and a conductivity transfer function for paleoenvironmental studies. *Journal of Paleolimnology*, 2015, **54**(2/3): 171-188.
- [14] Delgado C, Pardo I, García L. Diatom communities as indicators of ecological status in Mediterranean temporary streams (Balearic Islands, Spain). *Ecological Indicators*, 2012, **15**(1): 131-139.
- [15] Qiu Guangsheng, Hu Sheng, Ye Dan *et al.* Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(3): 311-316. [邱光胜, 胡圣, 叶丹等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(3): 311-316.]
- [16] Li Renfang, Zhang Xinwei. Investigation on water quality of the Ruxi River in the Zhong County of Chongqing Municipality. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011, **33**(2): 10-12. [李仁芳, 张信伟. 忠县汝溪河流域水质现状调查. 三峡环境与生态, 2011, **33**(2): 10-12.]
- [17] Delgado C, Pardo I. Comparison of benthic diatoms from Mediterranean and Atlantic Spanish streams: Community changes in relation to environmental factors. *Aquatic Botany*, 2015, **120**: 304-314.
- [18] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [19] Liu Zugen, Zhang Zhu, Zhang Meng *et al.* Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(3): 375-384. [刘足根, 张柱, 张萌等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 375-384.]

- [20] Jan L, Peter S. Multivariate analysis of ecological data using Canoco. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [21] Tapolczai K, Bouchez A, Stenger-Kovenger-Kovács C *et al.* Trait-based ecological classifications for benthic algae: Review and perspectives. *Hydrobiologia*, 2016, **776**(1): 1-17.
- [22] Kelly M. Data rich, information poor? Phytobenthos assessment and the Water Framework Directive. *European Journal of Phycology*, 2013, **48**: 437-450.
- [23] Neilan BA, Jacobs D, Goodman AE. Genetic diversity and phylogeny of toxic cyanobacteria determined by DNA polymorphisms within the phycocyanin locus. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**: 3875-3883.
- [24] Passy SI. Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters. *Aquatic Botany*, 2007, **86**: 171-178.
- [25] Blondel J. Guilds or functional groups: does it matter? *Oikos*, 2003, **100**: 223-231.
- [26] Min Wenwu, Wang Peipei, Li Lijuan *et al.* Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(9): 1397-1406. [闵文武, 王培培, 李丽娟等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系. 环境科学研究, 2015, **28**(9): 1397-1406.]
- [27] Dalu T, Richoux NB, Froneman PW. Distribution of benthic diatom communities in a permanently open temperate estuary in relation to physico-chemical variables. *South African Journal of Botany*, 2015, **107**: 31-38.
- [28] Urrea G, Sabater S. Epilithic diatom assemblages and their relationship to environmental characteristics in an agricultural watershed (Gadiana River, SW Spain). *Ecological Indicators*, 2009, **9**(4): 693-703.
- [29] Leira M, Sabater S. Diatom assemblages distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors. *Water Research*, 2005, **39**(1): 73-82.
- [30] Liu S, Xie G, Wang L *et al.* Different roles of environmental variables and spatial factors in structuring stream benthic diatom and macroinvertebrate in Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 602-611.
- [31] Zhang Meng, Deng Daogui, Huang Dan *et al.* Functional group diversity of planktonic diatoms and the driving pattern of water-period guild succession in Ganjiang River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 680-691. [张萌, 邓道贵, 黄丹等. 赣江流域浮游硅藻功能群多样性及其水期演替的驱动特征. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 680-691.]
- [32] Patil JS, Anil AC. Temporal variation of diatom benthic propagules in a monsoon-influenced tropical estuary. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(17): 2404-2416.
- [33] Zhang Y, Huo S, Li R *et al.* Diatom taxa and assemblages for establishing nutrient criteria of lakes with anthropogenic hydrologic alteration. *Ecological Indicators*, 2016, **67**: 166-173.