

三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系

王自业¹, 葛继稳^{1*}, 李建峰^{1,2}, 程腊梅¹, 吴述园¹, 冉桂花¹, 苗文杰^{1,3}

(1. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 生态环境研究所, 武汉 430074;

2. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院, 拉萨 850000; 3. 武汉市伊美净科技发展有限公司, 武汉 430072)

摘要: 于2010年12月至2011年12月, 对位于长江三峡库区内的湖北省兴山县古夫河着生的藻类和水体共采样10次, 共鉴定出着生藻类28属, 检测水质指标12项。对水质变量进行因子分析, 根据特征值大于1的原则选取4个主成分, 第一主成分主要代表总氮(TN)和硝酸盐氮(NO_3^- -N), 第二主成分主要代表pH和化学需氧量(COD_{Cr}), 第三主成分主要代表磷酸盐磷(PO_4^{3-} -P)、总磷(TP)和氨氮(NH_4^+ -N), 第四主成分主要代表电导率(Cond)和总有机碳(TOC)。将提取的9项主要水质因子与着生藻类重要属进行典型对应分析(CCA), 结果可见, 古夫河主要水质因子与着生藻类类群分布相关性大小为: $\text{COD}_{\text{Cr}} > \text{pH} > \text{TN} > \text{NO}_3^-$ -N $> \text{TOC} > \text{TP} > \text{PO}_4^{3-}$ -P $> \text{Cond} > \text{NH}_4^+$ -N。Monte Carlo显著性检验表明, COD_{Cr} 和pH对古夫河着生藻类物种组成及空间分布的影响最大, 其次为TN、 NO_3^- -N和TOC。pH与 COD_{Cr} 呈极强的负相关关系, 古夫河着生藻类大多数类群均与 COD_{Cr} 表现出正相关关系, 仅胶毛藻属(*Chaetophora*)倾向低 COD_{Cr} 和偏碱性的环境。TN和 NO_3^- -N有很强正相关性, 而两者均与TOC有强负相关, 它们将古夫河着生藻类大体上分为两类, 即亲碳元素的类群和亲氮元素的类群。TP通常是河流生态系统中的限制性营养因子, 但在古夫河流域中并不是影响着生藻类物种分布的主要水质因子。

关键词: 着生藻类; 水质因子; 典型对应分析; 古夫河; 三峡库区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2013)03-0219-09

Relationship between Periphyton Distribution and Water Quality of Gufu River of Three Gorges Reservoir Area

WANG Zi-Ye¹, GE Ji-Wen^{1*}, LI Jian-Feng^{1,2}, CHENG La-Mei¹,
WU Shu-Yuan¹, RAN Gui-Hua¹, MIAO Wen-Jie^{1,3}

(1. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Tibet Hydropower Planning & Design Institute, Lhasa 850000, China; 3. Wuhan Imagination Science and Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

Abstract: Periphyton and water samples were collected ten times from Gufu River in Xingshan County, Hubei Province, from December 2010 to December 2011. A total of twenty-eight genera were identified from the periphyton samples, and twelve water quality parameters were tested. Factor analysis was performed on the twelve water quality factors, with four major components, whose eigenvalues were greater than 1, selected. The first major component was accounted by TN and NO_3^- -N, the second by pH and COD_{Cr} , the third by PO_4^{3-} -P, TP and NH_4^+ -N, and the fourth by Cond and TOC. The relationships between the nine extracted dominant water quality parameters and the main genera of periphyton were analyzed by CCA. According to CCA ordination, the sequencing of the correlations between the main water quality parameters and periphyton distribution was: $\text{COD}_{\text{Cr}} > \text{pH} > \text{TN} > \text{NO}_3^-$ -N $> \text{TOC} > \text{TP} > \text{PO}_4^{3-}$ -P $> \text{Cond} > \text{NH}_4^+$ -N. Monte Carlo significance test showed that the distribution of the periphyton taxa was most influenced by COD_{Cr} and pH, and less by TN, NO_3^- -N and

收稿日期: 2012-08-20, 修回日期: 2013-01-26。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972218); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(G1323521125, G1323521225)。

作者简介: 王自业(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事湿地生态学研究(E-mail: wzyhawking@foxmail.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: gejiwen2002@yahoo.com.cn)。

TOC. Both pH and COD_{Cr} were strongly negatively correlated with each other. Most of the periphyton taxa in Gufu River were strongly correlated with COD_{Cr} , while only *Chaetophora* was fit for the low COD_{Cr} and slightly alkaline environment. TN and NO_3^- -N were strongly correlated, but both of them were negatively correlated with TOC. These three factors roughly classified the periphyton into two ecological groups: one preferring nitrogen, and the other carbon. Though usually a limited nutrient factor for algae, TP was not a dominant influencer on the distribution of periphyton in Gufu River.

Key words: Periphyton; Water quality factors; Canonical Correspondence Analysis (CCA); Gufu River; Three Gorges Reservoir Area

着生藻类作为河流生态系统的主要初级生产者,虽然生活位置相对固定,但生境多样,主要附着基质有石头(附石的 epilithic)、水生植物(附植的 epiphytic)、沉积物(附泥的 epipellic)、砂粒(附砂的 epipsammic)、水生动物(附动的 epizoiic)等^[1,2]。着生藻类在河流生态系统中有非常重要的功能:①在河流生态系统中处于营养链的最底端,是水生生态系统物质循环和能量流动的重要一环;②是河流生态系统中重要的化学调节者,能吸收水体中的重金属等化学元素;③在流速较快的河流中具有稳定基质的作用;④为其它水生生物提供丰富的生存环境和重要的栖息地^[3-6]。另外,着生藻类具有生活周期较短、标本易于保存、对环境变化反映迅速可靠、容易定点监测等优点,且在流速较大的河流中,着生藻类比浮游藻类能更有效地反映水质的状况和变化,因此其成为河流生态学的主要研究对象^[7-12]。迄今为止,国内对低人为干扰的山区河流着生藻类的研究还不多。古夫河是长江三峡库区一级支流香溪河的支流,亦是神农架南坡的重要水系,其健康程度可反映神农架林区生态环境质量,并可能会间接影响到三峡水库的水质。因此,开展古夫河流域着生藻类生态研究不仅具有很高的科学价值,还有重要的社会影响和应用价值。在长期野外监测的基础上,我们通过因子分析和典型对应分析,探讨着生藻类类群分布与主要水质因子的关系,以期古夫河水环境质量评价和综合管理提供参考。

1 研究区域

古夫河又名东河,源头位于神农架林区新华镇黑龙潭处,由北向南流经新华镇、平水乡、古洞口水库和古夫镇,在响滩与湘坪河(又名西河)汇入

香溪河。位于北纬 $31^{\circ}16' \sim 31^{\circ}41'$, 东经 $110^{\circ}32' \sim 110^{\circ}57'$ 之间,跨越神农架林区和兴山县两个行政区划,河流主体位于兴山县西北部。上游(平水乡以上)山体陡峭,河床狭窄,水流湍急,河岸两侧树木生长茂盛;中游(平水乡至古洞口水库)山势较平坦,由于古洞口水库的建设,河道变宽,水流缓慢;下游(古洞口至响滩)服务于兴山县的水上运输、水电开发和农业生产等。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究在古夫河流域范围内布置 10 个样点(图 1),各样点间海拔落差约 100 m。从 2010 年 12 月至 2011 年 8 月每月采样 1 次(除 2011 年 1 月,冰雪封山无法采样外),2011 年 9 月至 12 月每

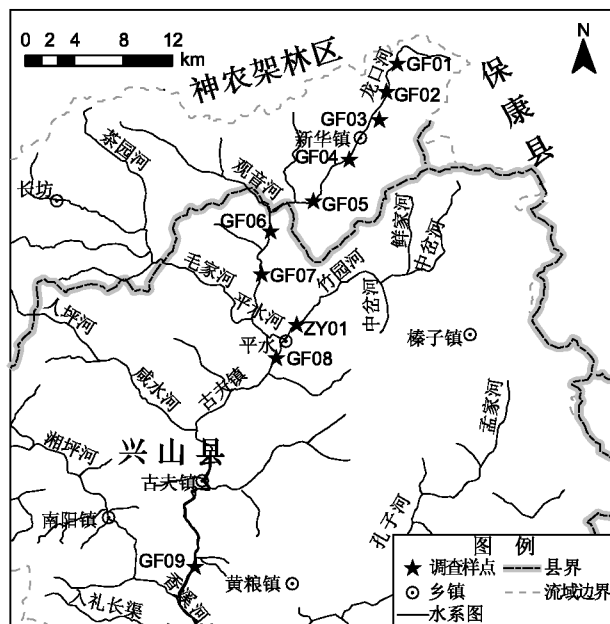


图 1 古夫河样点分布示意图
Fig. 1 Sampling sites in Gufu River

2个月采样1次,共采样10次。

依照美国环境保护局提出的着生藻类采样方法,在每个样点随机选3块石头,从每块石头上选取面积约 22.89 cm^2 (直径为 5.40 cm 的圆形塑料盖)的平面,以硬毛牙刷刷取,再用无藻水冲洗3次,装入试剂瓶中并记录体积。充分摇匀后,将其中 100 mL 分别装入2个 50 mL 标本瓶中,用于藻类的定性和定量分析,同时用 2 mL 甲醛进行固定。

地表水的采集严格按照《水质采样技术指导》(HJ 494-2009)的相关技术规定、规范操作。每个样点采集 600 mL 水样,用浓硫酸酸化至 $\text{pH} < 2$,带回实验室用于测定总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、二氧化硅(SiO_2)、化学需氧量(COD)和总有机碳(TOC)。

2.2 藻类定性定量分析

将野外采集的藻样在避光条件下静置沉淀 24 h ,抽出上清液,定容至 20 mL 备用。

依据《湖泊生态调查观测与分析》中的藻类鉴定方法,吸取 0.1 mL 样品置于 10×40 倍显微镜下进行分类鉴定,多数鉴定到属,部分鉴定到种,藻类分类鉴定主要参考《藻类学》^[13]、《西藏藻类》^[14]和《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[15]等文献。

将 20 mL 用于定量分析的样品充分摇匀后,吸取 0.1 mL 于 0.1 mL 的计数框中,在 10×40 倍显微镜下,根据藻类密度观察 100 个视野、 200 个视野或者全片,计数单位为细胞数。每个样品至少观察2片,如果2片的计数与平均值之差在 $\pm 15\%$ 之外,需进行第3片计数。最后,根据各样点的计数值,换算成藻类密度。

2.3 主要理化指标的测定

现场测定指标及所用仪器:用溶解氧仪(JPB-607)测定溶氧(DO)和水温,pH仪(PHB-1-S)测定pH,电导率仪(HANNA HI 8733)测定电导率(Cond)。

按照《水和废水监测分析方法》相关技术规定、规范测定 SiO_2 、碱度和硬度,钼酸铵分光光度法测定TP,碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定TN,紫外分光光度法测定 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,纳氏试剂分光光度法测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,快速消解分光光度法测定COD,燃烧氧化-非分散红外吸收法测定TOC。

2.4 数据处理及分析

2.4.1 因子分析

因子分析是一种重要的多元统计分析方法,其实质是对原始变量进行分解,找出潜在的起支配作用的公共因子,以达到降维的目的。应用因子分析法(SPSS 13.0 for windows)对古夫河流域的12项水质因子进行处理,根据特征值大于1的原则选取主成分,同时为了使每个主成分更具有可解释性,意义更加明确,采用方差最大旋转方法,以识别表征古夫河流域水环境质量的主导因子。旋转后的因子载荷率可解释各水质因子与主成分之间的相关性,即 $|\text{载荷量}| < 0.30$,表示两者无相关性; $0.30 < |\text{载荷量}| < 0.50$,表示两者的相关性较差; $0.50 < |\text{载荷量}| < 0.75$,表示两者相关性一般; $|\text{载荷量}| > 0.75$,表示两者的相关性比较好。

2.4.2 典型对应分析

CCA是在对应分析的基础上发展而来的约束性排序方法,适用于单峰数据模型,其基本思路是在对应分析迭代过程中,将每一次得到的样方排序值与环境因子进行多元线性回归得到样方排序值,然后用于下一轮的迭代运算,最后得到的排序轴其实是环境因子的一种线性组合。

在进行CCA之前需先进行DCA分析,以检验该物种数据是否可用于CCA分析。DCA分析结果中的4个排序轴的梯度长度最大值大于3时才适合进行CCA分析,否则应用线性模型进行分析。其中着生藻类数据矩阵是剔除相对丰度小于 0.30% 的稀有属后得到 10×16 的样地-物种数据矩阵。将 10×16 的样地-物种矩阵输入Canoco for windows执行DCA,在分析过程中选择对数转换,以便降低稀有物种的权重,消除相对丰度极端值对排序产生影响。分析完成后对log文件进行解读,4个排序轴的梯度长度最大值为 3.139 ,说明该物种数据可进行CCA。

应用CCA(Canoco for windows 4.5)将因子分析所得的水环境质量主导因子与古夫河流域主要着生藻类属进行分析,以分析古夫河流域着生藻类类群分布于主要水环境质量因子的关系。在CCA分析结果的排序图中,箭头连线长度代表水质因子与着生藻类类群分布间相关性的,连线长度越长相关性越大,反之越小;箭头连线和排序轴的夹角代表水质因子与排序轴间相关性的,夹角越

小相关性越高,反之越低。物种在水质因子箭头上的投影点近似代表了该物种在此环境变量上的相对位置,亦即物种在环境变量上的最适宜值。

3 结果与分析

3.1 水质检测与藻类鉴定结果

经过室内鉴定和分析,共鉴定出着生藻类 28 属,隶属于 4 门 17 科。其中硅藻门最多,共 15 属,绿藻门其次,共 9 属,蓝藻门、裸藻门各 3 属和 1 属。选取相对丰度大于 0.3% 的属列于表 1,除此之外,还有 *Cyclotella*、*Stephanodiscus*、*Diatoma*、

Diploneis、*Gyrosigma*、*Cocconeis*、*Cymatopleura*、*Chlorella*、*Microspora*、*Klebsormidium*、*Closterium* 和 *Euglena*。对 12 项水质因子的检测结果列于表 2。

3.2 因子分析结果

对 Cond、DO、pH、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 SiO_2 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TOC、Ca-Mg 和 COD_{Cr} 等 12 项水质参数用 SPSS 13.0 进行因子分析,根据特征值大于 1 的原则选取了 4 个主成分,其累积方差贡献率为 84.86%,能够反映 12 项水质因子所代表的整体水环境质量(表 2,表 3)。

表 1 古夫河着生藻类主要属的相对丰度矩阵(以百分比记)
Table 1 Relative abundance matrix of the main genera of periphyton in Gufu River

藻类属 Algae genera	样 点 Sampling sites									
	GF01	GF02	GF03	GF04	GF05	GF06	GF07	GF08	ZY01	GF09
<i>Navicula</i>	9.62	3.57	3.65	25.19	1.93	4.32	1.60	9.11	0.43	0.30
<i>Achnanthes</i>	4.12	0.68	2.55	1.50	0.79	0.63	0.63	0.20	0.12	0.65
<i>Fragilaria</i>	1.65	1.21	1.82	16.92	0.20	0.50	0.67	8.23	0.00	0.50
<i>Cymbella</i>	2.20	0.19	0.73	4.51	0.00	0.25	0.67	5.23	0.12	0.00
<i>Oscillatoria</i>	0.00	0.00	9.85	0.00	0.00	0.88	1.26	6.81	2.92	2.25
<i>Synedra</i>	0.55	1.64	0.00	2.26	0.49	0.75	0.09	1.01	0.00	0.20
<i>Gomphonema</i>	1.65	0.00	0.73	0.00	0.20	0.13	0.04	1.52	0.00	0.00
<i>Chaetophora</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	92.93	0.00	0.00	34.74	0.00	0.00
<i>Stigeoclonium</i>	0.00	17.95	57.30	17.29	2.87	82.30	2.88	0.00	31.23	91.51
<i>Melosira</i>	12.09	8.01	11.68	28.57	0.40	10.01	4.47	17.03	20.66	3.15
<i>Pinnularia</i>	0.00	0.00	1.46	0.00	0.00	0.00	0.45	1.48	0.00	0.05
<i>Spirogyra</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	0.51	1.28	0.00
<i>Ulothrix</i>	0.00	66.18	0.00	2.26	0.00	0.00	82.51	13.42	39.73	1.25
<i>Cladophora</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08	0.00	2.79	0.00
<i>Merismopedia</i>	54.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71	0.00	0.00	0.00
<i>Synechocystis</i>	12.64	0.00	6.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 2 古夫河水质因子检测结果
Table 2 Values of water quality factors of Gufu River

水质因子 Water quality factors	样 点 Sampling sites									
	GF01	GF02	GF03	GF04	GF05	GF06	GF07	GF08	ZY01	GF09
Cond	465.31	396.52	465.31	450.59	445.39	448.15	468.39	469.85	500.95	444.89
DO	8.99	8.98	8.99	8.31	7.96	8.27	7.53	7.76	7.31	8.02
pH	8.12	8.49	8.12	8.40	8.54	8.42	8.36	8.55	7.98	8.52
TN	1.05	0.91	1.05	1.08	0.96	1.10	0.61	0.96	1.05	1.32
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TP	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04	0.02	0.02
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.11	0.13	0.11	0.11	0.14	0.17	0.09	0.19	0.21	0.22
SiO_2	1.96	2.19	1.96	2.16	2.05	2.45	2.51	2.34	2.72	1.81
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.87	0.73	0.87	0.82	0.69	0.76	0.37	0.59	0.64	0.76
TOC	14.84	13.34	14.84	15.98	16.04	15.85	15.91	14.79	16.67	15.06
Ca-Mg	1.99	1.64	1.99	1.94	1.93	1.76	1.95	1.92	1.69	2.12
COD_{Cr}	1.31	1.27	1.31	1.19	1.04	1.19	1.44	1.34	1.57	1.19

表3 古夫河水质因子的特征根及相应的贡献率						
Table 3 Eigenvalues and contribution rates of waterquality factors in Gufu River						
因子 Factors	因子旋转前 Initial			因子旋转后 Rotated		
	特征值 Total	方差贡献率(%) Variance	累积方差贡献率(%) Cumulative	特征值 Total	方差贡献率(%) Variance	累积方差贡献率(%) Cumulative
F1	4.259	35.493	35.493	2.683	22.359	22.359
F2	2.412	20.099	55.592	2.661	22.178	44.538
F3	1.974	16.449	72.041	2.437	20.312	64.850
F4	1.539	12.822	84.863	2.402	20.013	84.863

从表4可以发现,第一主成分主要代表TN和NO₃⁻-N,第二主成分主要代表pH和COD_{Cr},第三主成分主要代表PO₄³⁻-P、TP和NH₄⁺-N,第四主成分主要代表Cond和TOC。9项因子载荷率的绝对值均大于0.75,说明这9项是表征古夫河水环境质量的主要因子。

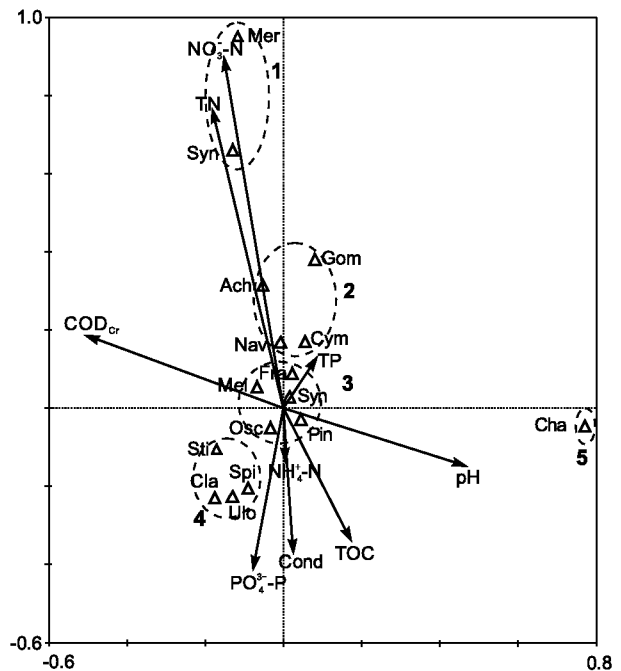
表4 古夫河水质因子旋转后的因子载荷率				
Table 4 Loadings of rotated water quality factors in Gufu River				
水质因子 Water factors	旋转后的因子载荷率 Loadings of components			
	F1	F2	F3	F4
Cond	-0.329	0.263	0.171	0.825
DO	-0.057	0.278	-0.282	-0.659
pH	-0.185	-0.831	0.185	-0.333
TN	0.933	0.020	0.297	-0.058
PO ₄ ³⁻ -P	-0.368	0.410	0.762	0.223
TP	0.099	-0.192	0.863	0.028
NH ₄ ⁺ -N	0.187	0.033	0.866	0.227
SiO ₂	-0.632	0.647	0.268	0.209
NO ₃ ⁻ -N	0.900	0.132	-0.028	-0.287
TOC	-0.366	0.079	0.088	0.785
Ca-Mg	0.368	-0.680	-0.226	0.521
COD _{Cr}	0.087	0.845	-0.011	0.239

3.3 典型对应分析结果

古夫河9项水质主要因子与着生藻类主要属的CCA分析结果中,第一排序轴和第二排序轴为主成分轴,特征值分别为0.324和0.281,所能解释的着生藻类的数据比例达60.5%,因此,第一、二排序轴能够反映水质因子对着生藻类物种组成及空间分布的影响。

从图2可以看出,古夫河主要水质因子与着生藻类类群分布的相关性大小为:COD_{Cr}>pH>TN>TOC>NO₃⁻-N>TP>PO₄³⁻-P>Cond>NH₄⁺-N。通过Monte Carlo置换法进行显著性检验,得到古

夫河主要水质因子与着生藻类的相关系数分别为:R(COD_{Cr})=-0.4926、R(pH)=0.4501、R(TN)=-0.2029、R(TOC)=0.1781、R(NO₃⁻-N)=-0.1813、R(TP)=0.0699、R(PO₄³⁻-P)=-0.0528、R(Cond)=0.0419、R(NH₄⁺-N)=0.0108。由此可得,COD_{Cr}和pH对古夫河着生藻类物种组成及空间分布的影响最大,其次为TN、TOC和NO₃⁻-N。



三角形表示藻类种属;箭头表示环境变量;虚线圈表示藻类类群;数字1~5表示类群编号。
Triangles represent algae genera; Arrows represent water quality factors; Dashed line circles represent algae; Numbers 1 to 5 represent algae groups.
Nav—Navicula; Ach—Achnanthes; Fra—Fragilaria; Cym—Cymbella; Osc—Oscillatoria; Syn—Synedra; Gom—Gomphonema; Cha—Chaetophora; Sti—Stigeoclonium; Mel—Melosira; Pin—Pinnularia; Spi—Spirogyra; Ulo—Ulothrix; Cla—Cladophora; Mer—Merismopedia; Syn—Synechocystis.

图2 古夫河水质主要因子与着生藻类重要属的CCA排序图
Fig. 2 Ordination diagram of dominant water quality factors and dominant genera of periphytic algae in Gufu River by CCA

由图2还可以看出, pH和 COD_{Cr} 呈极强的负相关关系, TN和 NO_3^- -N两者与TOC呈强负相关关系。在着生藻类中, 除*Chaetophora*表现出喜欢高pH外, 其他大多数均偏向较低的pH和较高的 COD_{Cr} , 其中*Merismopedia*和*Synechocystis*表现为亲高 COD_{Cr} 。*Merismopedia*和*Synechocystis*倾向高浓度的TN和 NO_3^- -N, 与TOC则呈负相关。根据着生藻类物种与水质因子的关系, 可以将着生藻类分为5个类群: 类群1为*Merismopedia*和*Synechocystis*, 喜欢相对高浓度的 COD_{Cr} 、TN和 NO_3^- -N; 类群2为*Navicula*、*Achnanthes*、*Gomphonema*和*Cymbella*, 倾向中等浓度的 COD_{Cr} 、TN和 NO_3^- -N; 类群3为*Fragilaria*、*Melosira*、*Synedra*、*Pinnularia*和*Oscillatoria*, 倾向较低的几种水质因子值; 类群4为*Stigeoclonium*、*Cladophora*、*Spirogyra*和*Ulothrix*, 倾向中浓度的 COD_{Cr} 和TOC; 类群5为*Chaetophora*, 喜欢高pH和TOC。

4 讨论

大量研究表明, 水质因子与着生藻类的物种分布有着密切关系, 不同流域中对藻类影响最大的水质因子往往不同, 氮、磷和pH等通常会成为影响河流藻类的重要生态因子^[16-20]。对古夫河12项水质因子进行因子分析, 找出了9项代表水质的主要因子, 即TN、 NO_3^- -N、pH、 COD_{Cr} 、 PO_4^{3-} -P、TP、 NH_4^+ -N、Cond和TOC。将主要水质因子与着生藻类主要属进行CCA分析可得, COD_{Cr} 和pH对古夫河着生藻类类群分布的影响最大, 其次为TN、 NO_3^- -N和TOC。除类群5外, 其他类群均与 COD_{Cr} 正相关, 这说明大多数藻类对有机质有一定量的需求, 这可能和它们的营养方式有关。 COD_{Cr} 对着生藻类产生的影响最大, 说明此流域有机质含量变化较大, 该流域外源有机质进入不均衡。上游人口稀少, 自然植被丰富, 植被凋落物较多, 有机质含量相对丰富; 中游耕地相对较多, 有机质进入河流则较少; 而下游水电开发和生活污水较多, 进入河流的有机质必然增加。胡学军对香溪河另一支流的研究显示, 着生藻类的密度变化与凋落物和树叶凋落物的动态具有明显的相关性, 为此结果提供

了依据^[21]。藻类对COD也有去除能力, 已有研究表明硅藻中的舟形藻和小环藻对造纸废水COD有很高的去除效率^[22], 这说明COD与藻类之间是相互作用、互相影响的。pH是影响多种河流生态因子的重要水质参数, 还影响藻类对水体中的离子吸收, 与藻类生长密切相关。不同藻类对pH都有一定的适应范围, 即使同一属中不同种类的藻, 在不同的pH下其生长也有很大差别。许海等的研究表明, 藻类适合在中性到偏碱性的水体中生活^[23], 刘春光等的研究得出的结论也相近, pH在8.0到8.5之间对很多藻类较为适宜^[24]。由于藻类对pH变化较为敏感, 所以pH也是影响藻类物种分布的重要因子。游亮等研究得出pH与藻类生长状况有很好的相关性^[25], 本研究得出的pH为着生藻类类群分布影响最大的生态因子之一支持了这一结果。除类群5喜欢较高pH外, 其他藻类群均倾向于较低的pH, 说明古夫河偏碱性水质对着生藻类的生长产生了抑制效应。藻类光合作用吸收二氧化碳, 影响地表水中碳酸及碳酸盐的平衡, 导致地表水中pH偏向碱性, 若水体中碳酸及碳酸盐浓度高, 则pH变化小, 若碳酸及碳酸盐浓度低, 则pH变化大^[26], 说明藻类与pH之间也是相互作用的。而此流域中Ca离子含量很高, 表明碳酸盐浓度高, 所以pH变化不大, 但即便是较小的pH变化, 也会对藻类的物种组成产生很大影响。兴山县矿业发达, 需严防工矿污染导致酸雨, 否则将对古夫河水质及着生藻类群落产生重大影响。 COD_{Cr} 和pH为强负相关关系, 说明有机物的增加会导致pH降低, 可能是有机物分解会释放出酸性物质的原因。在人为干扰增加的情况下, 古夫河着生藻类中亲有机质类群的生物量将增加, 进而会对河流生态系统产生负面影响。

苏玉等研究了滇池流域着生藻类群落特征与水质因子的关系, 得出TN、 NH_4^+ -N和TP是影响藻类分布的主要水质因子^[27]; 文航等对太子河着生藻类和主要水质因子的关系研究认为, NH_4^+ -N和TP对着生藻类分布有显著的影响^[28]; 殷旭旺则认为驱动着生藻类群落结构形成的水环境因子为电导率、总溶解固体和总氮^[29]; 吴乃成在研究雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类群落与环境

因子的关系时得出总磷(TP)是5月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素;而氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和海拔是11月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素^[30]。与以上研究结果相比,TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TOC对古夫河着生藻类有较大影响,而TP不是影响古夫河流域着生藻类物种分布的主要水质因子。已有研究表明,氮和磷的浓度升高会影响到水生植被的物种组成、溶解氧浓度和藻类的丰度,而藻类也对氮和磷有很好的指示作用,尤其是硅藻,已经被应用于水质评价中^[31-33]。从图2中可以看出,TN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的箭头夹角很小,说明两者相关性很大,可以作为相似生态因子来分析。氮作为藻类繁殖的重要营养因子,能够显著影响藻类生长繁殖, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是藻类的重要氮源,古夫河中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的波动自然会影响到着生藻类的生长,这与以上研究结果也很相近。很多河流有机质污染都很严重,一方面是来自农业中的药品使用,另一方面是生活污水中的有机污染物,农药等有机污染对藻类有很大影响,硅藻相对绿藻和金藻对农药的耐受性更强^[34,35]。TOC代表了有机物含量高低,有机物在水体中很容易被分解而释放出各种离子及 CO_2 ,对水体中可溶性氮、磷和pH都有影响。古夫河流域TOC从上游到下游有增高趋势,对着生藻类生长、空间分布与物种组成都会产生较大影响。TN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与TOC呈显著负相关,可以将着生藻类分成两类,一类是亲TOC的类群,如类群4,一类是亲氮元素的类群,说明这两种类群对水质因子的需求不同,亲TOC的类群中大多数也与 COD_{Cr} 正相关,说明这些藻类在光合作用中可能需要有机物来提供必要的碳源,而亲氮元素的类群同样大部分也亲 COD_{Cr} ,可能这些类群更需要营养盐。古夫河流域TP含量均较低且各样点差异较小,处于贫营养-中营养型,较低的总磷含量使得着生藻类不能大量繁殖;同时流域内TP含量变化不大,而在地质构造上此地区分布有丰富的磷,上游有大型磷矿开采,说明矿物磷释放较小,且磷矿开采管理较为严格,没有对该流域产生严重污染。同时也应警惕地质成因磷的释放,要给予磷矿开采更多的关注与研究,使磷矿开采过程更加科学合理,以降低对环境的破坏。

河流着生藻类的诸多特点使其成为河流水质监测与评价的指示生物,如物种多样性高,且生活差异显著,可以为水质监测提供大量的信息;同时,生活周期较短,可以对环境变化做出快速反应。古夫河流域着生藻类物种分布与水质因子有很大关系,对该流域藻类的进一步研究和水质的监测可以为研究流域生态环境变化提供重要数据,同时也为探索河流生态管理提供更多参考,对揭示三峡大坝工程对上游流域的生态环境的影响也有很大作用。

5 结论

综上所述,在为期一年(2010年12月~2011年12月)野外采样的基础上,对古夫河着生藻类和水样进行分析和测定,运用因子分析提取主要水质因子,将所得的主要水质因子与着生藻类数据进行CCA分析,研究了古夫河着生藻类群落组成分布与主要水质因子的关系,并得出如下结论:

(1)通过对古夫河12项水质因子进行分析,找出了9项影响水质的主导因子,即TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、pH、 COD_{Cr} 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Cond和TOC;

(2)将主要水质因子与着生藻类主要属进行CCA分析得知, COD_{Cr} 和pH对古夫河着生藻类类群分布的影响最大,其次为TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TOC;

(3)TP不是影响古夫河流域着生藻类类群分布的主要水质因子,主要是因为该流域TP含量相对较低,处于贫营养-中营养型,且TP在整个流域中变化不大;

(4)pH和 COD_{Cr} 呈极强的负相关关系,古夫河中着生藻类大多数类群亲 COD_{Cr} ,仅*Chaetophora*表现出与pH高度正相关。

(5)TN和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有很强正相关性,而两者与TOC则表现出负相关关系,它们将古夫河着生藻类大体分为两种,亲碳元素的类群和亲氮元素的类群。

影响着生藻类类群分布的环境因子很多,既有非生物因素也有生物因素,它们的作用是综合的和极其复杂的。本研究长期监测的环境因子只是一些

近端直接影响的环境因子,而大量研究表明,经纬度、海拔、地质地貌、水电站的建设、土地利用格局、矿产的开发等顶端环境因子对着生藻类群落结构和功能都会产生更加复杂而重要的影响^[36-40]。古夫河流域着生藻类物种贫乏,生物多样性较低,极易受到各种环境因子的影响,尤其是人为活动的影响。为了使古夫河流域生态系统处于稳定状态,建议对流域内污染和破坏生态环境的工农业生产行为加强预防和治理,尤其是加强对磷矿开采、水电站开发和河床采砂石的监管和整治。

参考文献:

- [1] 裴国风. 淡水湖泊底栖藻类的生态学研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.
- [2] 吴乃成. 应用底栖藻类群落评价小水电站对河流生态系统的影响——以香溪河为例[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.
- [3] Hauer F R, Lamberti G A. *Methods in Stream Ecology* [M]. San Diego: Academic Press, 1996: 637–659.
- [4] Biggs B J F, Kilroy C. *Stream Periphyton Monitoring Manual* [M]. Christchurch: NIWA, 2000: 1.
- [5] Hill B H, Herlihy A T, Kaufmann P R, *et al.* Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity [J]. *Ecological Indicators*, 2003, 2(4): 325–338.
- [6] Hill B H, Willingham W T, Parrish L P, *et al.* Periphyton community responses to elevated metal concentrations in a Rocky Mountain stream [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 428(1): 161–169.
- [7] 唐涛. 香溪河附石藻类特征及河流生态系统管理研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2003.
- [8] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 141–144.
- [9] Euan D R, Terri M J, Ted R A, *et al.* Algal assemblages for large river monitoring comparison among biovolume, absolute and relative abundance metrics [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 167–177.
- [10] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 1–14.
- [11] Allan J D. *Stream Ecology: Structure and function of running water* [M]. London: Chapman & Hall, 1995: 105–106.
- [12] Norris R H, Hawkins C P. Monitoring river health [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 435(1–3): 5–17.
- [13] Fott B 著. 藻类学 [M]. 罗迪安译. 上海: 上海科学出版社, 1980.
- [14] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏藻类 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 香溪河流域水体环境因子研究 [J]. *生态科学*, 2007, 26(3): 199–207.
- [17] 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 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 1510–1516.
- [18] 孙春梅, 范亚文. 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*, 2009, 21(6): 839–844.
- [19] 雷欢, 梁银铨, 朱爱民, 等. 三峡库区童庄河浮游植物及其与水质的关系 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 195–200.
- [20] 凌旌瑾, 顾咏洁, 许春梅, 等. 黄浦江和苏州河的着生藻类与水质因子关系的多元分析 [J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 184–189.
- [21] 胡学军, 江明喜. 香溪河流域一条一级支流河岸林凋落物季节动态 [J]. *武汉植物学研究*, 2003, 21(2): 124–128.
- [22] 董芳芳, 程凯, 许敏, 等. 藻类对造纸废水中 COD 的去除效率研究 [J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(1): 172–175.
- [23] 许海, 刘兆普, 袁兰, 等. pH 对几种淡水藻类生长的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(1): 33–36.
- [24] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 藻类生长和种类变化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 32(1): 294–298.
- [25] 游亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析 [J]. *环境科学与技术*, 2007, 143(9): 48–50.
- [26] 沈青. 地表水中藻类代谢对 pH 和含氧量影响分析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(2): 266–267.
- [27] 苏玉, 王东伟, 文航, 等. 太子河流域本溪段水生

- 生物的群落特征及其主要水质影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1801–1808.
- [28] 文航, 蔡佳亮, 苏玉, 等. 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[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 40–48.
- [29] 殷旭旺, 张远, 渠晓东, 等. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2732–2740.
- [30] 吴乃成, 唐涛, 黎道丰, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类群落与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1697–1703.
- [31] Houser Jeffrey N, Richardson William B. Nitrogen and phosphorus in the Upper Mississippi River: transport, processing, and effects on the river ecosystem[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 640(1): 71–88.
- [32] Ponader K C, Charles D F, Belton T J. Diatom-based TP and TN inference models and indices for monitoring nutrient enrichment of New Jersey streams [J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 79–93.
- [33] Winter J G, Duthie H. Epilithic diatoms as indicators of stream total N and total P concentration [J]. *J N Am Benthol Soc*, 2000, 19(1): 32–49.
- [34] Guasch H, Ivorra N, Lehmann V, *et al.* Community composition and sensitivity of periphyton to atrazine in flowing waters: the role of environmental factors [J]. *J Appl Phycol*, 1998, 10(2): 203–213.
- [35] Watanabe T, Asai K, Houki A, Tannaka S, *et al.* Saprophilous and eury saprobic diatom taxa to organic water pollution and diatom assemblage index (DAI_{po}) [J]. *Diatom*, 1986, 2: 23–73.
- [36] Pei G F, Liu G X. Distribution patterns of benthic diatoms during summer in the Niyang River, Tibet, China [J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2011, 29(6): 1192–1198.
- [37] Wu N C, Tang T, Qu X D, *et al.* Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China [J]. *Aquat Ecol*, 2009, 43(1): 37–49.
- [38] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illionis River basin in relation to geology and land use [J]. *Freshwater Biol*, 2000, 44(2): 279–301.
- [39] Molloy J M. Diatom communities along stream longitudinal gradients[J]. *Freshwater Biol*, 1992, 28(1): 59–69.
- [40] Kiffney P M, Bull J P. Factors controlling periphyton accrual during summer in headwater streams of southwestern British Columbia, Canada [J]. *J Freshwater Ecol*, 2000, 15(3): 339–351.

(责任编辑: 张 平)