

大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系

郑丙辉¹, 张佳磊^{1,2}, 王丽婧¹, 王丽平¹, 黄民生², 曹承进^{1,2}, 吴光应³

(1. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境研究室, 北京 100012; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 3. 巫山县环境监测站, 重庆 404700)

摘要:以三峡支流大宁河水华敏感期(2008年4~5月)水环境状况的监测数据为基础,运用数理统计分析手段,对浮游植物的分布特征及其与环境因子的关系进行了讨论。结果表明,水温、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO_3^- -N)、pH和溶解氧(DO)时空分布差异显著(ANOVA, $p < 0.05$)。浮游植物细胞密度时空分布差异显著(ANOVA, $p < 0.05$),最高值出现在大昌样点,最低值出现在长江干流巫峡口样点;7个采样点藻细胞密度的最高值均出现在水华期,发生多藻种同时同地水华的情况。利用相关分析方法分析藻细胞密度与环境因子间的关系,表明藻细胞密度与TN呈显著负相关($r = -0.789$, $p < 0.05$);与 NO_3^- -N呈显著负相关($r = -0.825$, $p < 0.05$);与 NO_2^- -N呈显著负相关($r = -0.803$, $p < 0.05$);表明在调查期间N是影响浮游植物细胞密度的关键因子。利用冗余度分析(redundancy analysis, RDA)浮游植物种类组成与环境因子之间的关系,表明营养盐(TN、TP、 NO_3^- -N和 NO_2^- -N)、悬浮物和透明度是影响浮游植物组成的主要因素。浮游植物的大量生长对环境因子反馈效应显著,水体的pH值随着藻类细胞密度的增加而上升。大宁河水体水生态环境特征存在显著的空间特征异质性。浮游植物群落结构组成受到水环境特征和空间相邻性的双重影响。

关键词:浮游植物;环境因子;大宁河;水华

中图分类号:X173 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)03-0641-08

Exploration of Relationships Between Phytoplankton and Related Environmental Factors in the Daning River During Sensitive Period of Algal Blooms

ZHENG Bing-hui¹, ZHANG Jia-lei^{1,2}, WANG Li-jing¹, WANG Li-ping¹, HUANG Min-sheng², CAO Cheng-jin^{1,2}, WU Guang-ying³

(1. River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Environmental Monitoring Station of Wushan, Chongqing 404700, China)

Abstract: To elucidate relationships between phytoplankton and related environmental factors, phytoplankton and environmental parameters of water quality in the Daning River were conducted using multivariate statistical analysis. Most of the investigated physico chemical parameters [water temperature, total nitrogen, nitrate-N(NO_3^- -N), pH and dissolved oxygen concentration(DO)] in Daning River are significantly different among those sampling sites (ANOVA, $p < 0.05$). The results indicate that the Daning River has a comparatively high spatial and temporal heterogeneity in the phytoplankton community composition (ANOVA, $p < 0.05$). The maximum cell density was recorded in Dachang and the minimum density was found at Wuxia-kou sites. Multi-algal species blooms were observed in the same time and place with the maximum density appeared. Correlation analysis was performed to illuminate the relationships between algae density and environmental variables, TN ($r = -0.789$, $p < 0.05$), NO_3^- -N ($r = -0.825$, $p < 0.05$) and NO_2^- -N ($r = -0.803$, $p < 0.05$) were negatively correlated with algae density. The results indicate that nitrogen soluble nutrients are key regulatory factors for phytoplankton abundance. The results of redundancy analysis (RDA) indicate that main soluble nutrients (TN, TP, NO_3^- -N and NO_2^- -N), suspended substance (SS) and transparency contributed significantly to phytoplankton community composition. Phytoplankton growth could enhance the pH value. The environmental characterizations and sample sites adjacency contributed significantly to phytoplankton community composition.

Key words: phytoplankton; environmental factors; Daning River; algal blooms

三峡工程对水生态环境有显著的影响,蓄水成库后,库区的水域类型呈现多样化^[1~3]。水库支流大宁河自2003年6月首次在双龙暴发蓝绿藻水华后^[4],2004~2008在龙门至双龙水域水华频发,已经成为三峡库区的重要水环境问题^[5]。在国内外的报道中,营养盐水平被经验性地认为是水华“暴发”

的重要原因^[6~8]。因此,三峡水库成库前后,张晟^[9]、

收稿日期:2010-03-22;修订日期:2010-06-17

基金项目:国际科技合作计划项目(2007DFA90510);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07528-003)

作者简介:郑丙辉(1963~),男,研究员,主要研究方向为流域水环境保护、河流水污染, E-mail: zhengbh@cras. org. cn

郭劲松^[10]和胡建林^[11]等对典型支流的浮游植物与营养盐的分布特征进行过初步研究,但对浮游植物本身的分布特征关注较少。

近年来,本课题组通过对大宁河回水段以下的富营养化因子和水华进行初步分析,揭示了水华特征和入库河流营养盐的特征及来源^[12,13]。一般而言,营养盐和水温是影响浮游植物生长的关键因子,但浮游植物群落结构与动态是多个环境因子在时间和空间序列上作用的结果。在本课题组前期的工作中,对浮游植物的调查分析带有普查的性质,对浮游植物群落组成与演替这一动态过程的关注较少^[12,13]。本实验在 2008 年 4~5 月水华高发期间对大宁河水环境状态进行连续监测。在分析水华高发季节浮游植物群落结构组成与演替过程的基础上,结合前期研究成果,揭示影响浮游植物细胞密度及群落结构的主要环境因子,从而进一步探讨大宁河“水华”发生的主要环境因子。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况与采样

大宁河(东经 108°44′~110°11′,北纬 31°04′~31°44′)是三峡水库的典型支流之一,位于三峡库区腹心地带,流域面积 4 045 km²,其中部分位于巫溪东部,另一部分位于巫山县北部^[12,13]。三峡大坝截流后,由于库区水体流速减缓引起污染物扩散能力减弱,近岸水域水环境承载能力减小,水库支流回水区已经出现富营养化现象,水华频发。

根据大宁河流域的水文地质等特征及历年大宁河水华暴发的情况,对大宁河水华敏感期进行连续实地监测。从大宁河上游至下游出口(长江)分别设置大昌断面(上游区)、双龙断面(回水区)、东坪坝断面(回水区)、白水河断面(回水区)、龙门断面(回水区)、菜子坝断面(巫山县城污染区)和巫峡口断面(大宁河入长江处)。其布设点具体位置如图 1 所示。

调查时间为大宁河水华敏感期(2008-04-15~2008-05-22),每 5 d 采样一次。每个采样断面分左、中、右 3 点表层水体(0.5 m)采样。浮游植物的采样及定性、定量方法分别参照文献^[14,15]的相关规定进行。YSI-6600 型水质自动分析仪现场测定酸碱度(pH 值)、气温、水温、透明度、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chla);悬浮物、高锰酸盐指数、总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)和氨氮(NH₄⁺-N)现场采样,室内实验测定,其采样及

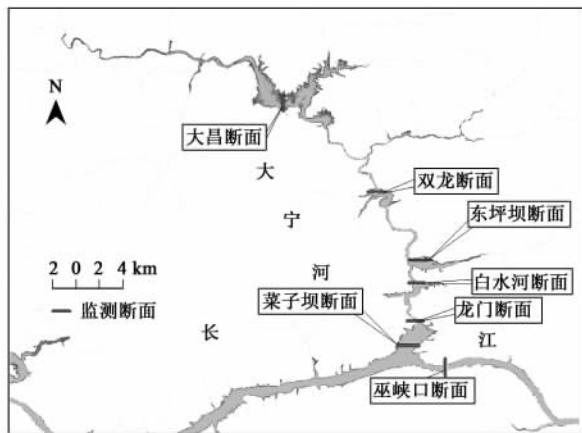


图 1 大宁河采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Daning River

测定方法均参照文献^[14]进行。

1.2 生物学评价方法

采用种类相似性指数(Jaccard 指数, J)对样点间浮游植物群落结构的相似性进行评价:

$$J = \frac{c}{a + b - c}$$

式中, J 为相似性指数; a 为样本 A 的种类数; b 为样本 B 的种类数; c 为样本 A 和 B 共有种类数。

当 $0 < J < 0.25$ 时,极不相似;当 $0.25 \leq J < 0.50$ 时,中等不相似;当 $0.50 \leq J < 0.75$ 时,中等相似;当 $0.75 \leq J < 1.00$ 时,极相似^[16]。

1.3 数据处理及分析方法

由于所有监测项目的单位不完全相同,在进行聚类分析时,为了消除量纲的影响,对原始数据进行标准化,公式如下:

$$X_{ij} = \frac{(S_{ij} - \bar{S}_j)}{\sqrt{\sum (S_{ij} - \bar{S}_j)^2 / (n - 1)}}$$

式中, X_{ij} 为变量标准化之后的第 i 个采样点的第 j 个指标的数值, S_{ij} 为原始数据, $\bar{S}_j$ 为第 j 个指标的均值。聚类分析方法选用目前应用广泛的系统聚类^[17],从而划分出大宁河水生态环境的特征水域。同时应用相关分析法分析藻细胞密度与环境因子间的关系。方差分析(ANOVA)、皮尔逊相关分析和聚类分析均采用 SPSS 17.0 统计软件处理,其中皮尔逊相关性分析采用双变量相关性分析,双尾检验,显著性水平为 0.05 和 0.01^[17]。

先用 CANOCO 软件进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),结果显示“Lengths of gradient”(展示每个轴的梯度长度)为 2.6,因此选择冗余度分析(redundancy analysis,

RDA)分析浮游植物的种类组成与环境因子之间的关系比较合适.为使浮游植物的细胞密度数据获得正态分布,将其进行 $\lg(x+1)$ 转换^[18].

2 结果与分析

2.1 环境参数特征

表1为大宁河水华敏感期的环境参数.水温和气温相比各样点的差异显著(ANOVA, $F=3.31$, $p<0.05$),变化范围为 $(20.98 \pm 1.31)^{\circ}\text{C}$ (巫峡口) ~ $(24.14 \pm 2.56)^{\circ}\text{C}$ (白水河),7个样点的水温均在浮游植物适宜生长的温度范围 $(18 \sim 25^{\circ}\text{C})$ 内. DO 含

量的范围在 $(7.12 \pm 0.58)\text{mg/L}$ (巫峡口) ~ (11.73 ± 1.998) (双龙) mg/L , DO 饱和率的变化范围为 $(75.23 \pm 7.86)\%$ ~ $(138.49 \pm 1489.57)\%$ (东坪坝).受藻类繁殖的影响,最严重的超饱和现象出现在水华暴发期(5月10~16日).不同采样点间差异极显著(ANOVA, $F=5.30$, $p<0.001$),中上游的大昌、双龙、东坪坝和白水河4个样点 DO 饱和率明显高于下游龙门、菜子坝和巫峡口.

大宁河 pH 为 (8.11 ± 0.08) ~ (8.60 ± 0.38) , 为中性偏弱碱性水体,水华暴发样点东坪坝 pH 较高,大宁河口(巫峡口)最低,各采样点间存在非常

表1 大宁河水华敏感期各采样点环境参数¹⁾(平均值±标准差)
Table 1 Variability of environmental parameters (mean ± sd) during sensitive period of algal blooms in the Daning River

监测项目	大昌	双龙	东坪坝	白水河
气温/°C	26 ± 2.45	27 ± 2.22	25.5 ± 2.78	25.5 ± 3.49
水温/°C	24.1 ± 1.67	23.1 ± 1.597	22.83 ± 2.07	24.14 ± 2.56
透明度/m	1.22 ± 0.31	2.38 ± 1.08	1.65 ± 0.82	2.38 ± 0.94
pH 值	8.35 ± 0.081	8.58 ± 0.27	8.60 ± 0.38	8.47 ± 0.32
溶解氧饱和度/%	134.98 ± 185.71	136.69 ± 716.90	138.49 ± 1489.57	132.77 ± 809.96
叶绿素 a/mg·L ⁻¹	6.41 ± 4.20	16.03 ± 13.48	23.22 ± 33.98	26.40 ± 47.21
总氮/mg·L ⁻¹	1.01 ± 0.189	1.36 ± 0.077	1.45 ± 0.22	1.95 ± 0.63
总磷/mg·L ⁻¹	0.02 ± 0.003	0.04 ± 0.025	0.053 ± 0.026	0.11 ± 0.16
硝酸盐氮/mg·L ⁻¹	0.85 ± 0.11	1.19 ± 0.123	1.18 ± 0.21	1.23 ± 0.42
亚硝酸盐氮/mg·L ⁻¹	0.01 ± 0.001	0.02 ± 0.0014	0.018 ± 0.002	0.02 ± 0.01
氨氮/mg·L ⁻¹	0.10 ± 0.007	0.12 ± 0.011	0.11 ± 0.012	0.11 ± 0.01
悬浮物/mg·L ⁻¹	3.44 ± 1.12	3.4 ± 0.62	3.82 ± 0.98	3.63 ± 0.70
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	1.76 ± 0.09	2.21 ± 0.35	2.45 ± 1.43	2.20 ± 0.33

监测项目	龙门	菜子坝	巫峡口	F(df)
气温/°C	22 ± 3.53	22 ± 2.99	26.83 ± 2.54	0.58(23)
水温/°C	23.19 ± 2.58	23.71 ± 2.12	20.98 ± 1.31	3.31(31)*
透明度/m	2.2 ± 0.58	2.43 ± 0.82	1.86 ± 0.39	1.49(31)
pH 值	8.34 ± 0.27	8.33 ± 0.23	8.11 ± 0.08	3.72(31)**
溶解氧饱和度/%	98.60 ± 842.42	102.34 ± 477.87	75.23 ± 7.86	5.30(36)***
叶绿素 a/mg·L ⁻¹	7.05 ± 6.75	13.35 ± 16.61	1.39 ± 0.39	1.09(42)
总氮/mg·L ⁻¹	1.87 ± 0.37	1.98 ± 0.46	1.98 ± 0.40	6.71(42)***
总磷/mg·L ⁻¹	0.068 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.02	1.14(42)
硝酸盐氮/mg·L ⁻¹	1.50 ± 0.49	1.49 ± 0.48	1.56 ± 0.52	2.66(42)*
亚硝酸盐氮/mg·L ⁻¹	0.03 ± 0.019	0.019 ± 0.01	0.022 ± 0.009	0.99(6)
氨氮/mg·L ⁻¹	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.04	0.098 ± 0.009	1.13(42)
悬浮物/mg·L ⁻¹	3.13 ± 0.16	3.09 ± 0.70	3.24 ± 0.49	0.91(37)
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	2.25 ± 0.39	2.27 ± 0.47	2.03 ± 0.21	0.57(28)

1) F 值为组间均方与组内均方的比值;样点的显著性差异使用单因素方差分析($p<0.05$);*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ***表示 $p<0.001$

显著的差异(ANOVA, $F = 3.72, p < 0.01$).

高锰酸盐指数作为有机污染的指标,当其超过 4 mg/L 时,表示水体受到有机污染^[19]. 高锰酸盐指数范围在 $(1.76 \pm 0.09) \sim (2.45 \pm 1.43)$ mg/L,说明大宁河还未受到有机污染的严重影响. 高锰酸盐指数空间分布无显著差异(ANOVA, $p < 0.05$). 在时间分布上,高锰酸盐指数峰值出现在水华暴发期. 水华暴发期藻类生长量远远大于死亡量,因此高锰酸盐指数在水华暴发期增高,应与藻类大量吸收累积有机物有关. 可溶态高锰酸盐指数的增加,可能与水体中有机物的部分来源于藻类死亡分解有关.

大宁河氮、磷含量变化见表 1, 方差分析结果表明 TN 的空间分布存在极显著差异(ANOVA, $F = 6.71, p < 0.001$). TN 含量变化范围在 (1.01 ± 0.189) mg/L (大昌) $\sim (1.98 \pm 0.40)$ mg/L (巫峡口), 无机氮是 TN 的主要存在形式, 其中又以

NO₃⁻-N 为主(占 TN 比例的 63.08% ~ 87.5%). TP 含量的变化范围在 (0.02 ± 0.003) (大昌) $\sim (0.11 \pm 0.16)$ mg/L (白水河),各采样点间并不存在显著差异(ANOVA, $p < 0.05$). 悬浮物含量的变化范围为 (3.09 ± 0.70) mg/L (菜子坝) $\sim (3.82 \pm 0.98)$ (东坪坝) mg/L. 透明度(SD)主要受浮游植物和悬浮物的双重影响,并与该区域的水环境条件也有一定关系^[20]. SD 在 $(1.22 \pm 0.31) \sim (2.43 \pm 0.8)$ m. 受上游水土流失和水华暴发的双重影响 SD 在大昌最小,最高值出现在悬浮物含量最低的菜子坝.

2.2 浮游植物在水华敏感期的分布特征

以大宁河流域 7 个采样点计,共鉴定出浮游植物 5 门 43 属 68 种,其中以硅藻门和绿藻门分布最多分别为 23 种和 22 种,其次是蓝藻门的 16 种和甲藻门 5 种,隐藻门为 2 种. 各采样点细胞密度和主要藻类组成随时间的变化见表 2.

表 2 各采样点的浮游植物变化特征

Table 2 Distribution features of phytoplankton during sensitive period of algal blooms in the Daning River

监测 样点	细胞密度 $\times 10^5$ /cells·L ⁻¹	藻类组成的演变过程	水华优势种
大昌	2.444 ~ 166.192	硅-蓝藻→硅-隐藻→硅藻	水华期藻类的优势种并不单一;以硅藻门小环藻为优势种,亚优势种为隐藻门的卵形隐藻和绿藻门的弓形藻、衣藻
双龙	0.611 ~ 24.44	绿-硅藻→隐-蓝藻→绿-蓝藻→绿-硅藻	优势种为绿藻门的实球藻和甲藻门的不显著多甲藻
东坪坝	0.611 ~ 47.658	蓝-硅藻→蓝-绿藻→绿藻→绿-甲藻→绿-硅藻	水华期藻类的优势种并不单一,5月10日:绿藻门的实球藻;5月13日:绿藻门的实球藻,蓝藻门的螺旋藻和隐藻门的卵形隐藻;5月16日:绿藻门的实球藻和空球藻
白水河	3.055 ~ 16.497	蓝-硅藻→绿-蓝藻→绿藻→绿-蓝藻→绿-甲藻	优势种为绿藻门的弓形藻和实球藻,亚优势种为裸藻门的扁裸藻和钹圆囊裸藻
龙门	0.611 ~ 31.772	硅藻→硅-绿藻→绿藻→绿-隐藻→绿-甲藻	优势种为硅藻门的小环藻和绿藻门实球藻,亚优势种为甲藻门的埃尔多甲藻
菜子坝	1.222 ~ 39.71	硅藻→绿-硅藻→绿藻→绿-隐藻→绿-甲藻	水华期藻类的优势种并不单一;5月10日:硅藻门的小环藻和甲藻门的埃尔多甲藻;5月13日,绿藻门的实球藻和小球藻;5月16日:绿藻门的实球藻和甲藻门的埃尔多甲藻
巫峡口	1.222 ~ 5.499	绿藻、蓝藻和甲藻的比例有所上升,但硅藻在藻类组成中始终占绝对优势	优势种为硅藻门的小环藻和颗粒直链藻

总体而言,水华敏感期浮游植物分布主要表现在以下 3 个特征.

(1)大宁河水华的优势藻种范围较大,且水华时优势种不单一,发生过以小环藻、埃尔多甲藻、实球藻、空球藻、小球藻和卵形隐藻为优势种的水华.

(2)藻类的细胞密度是水生态系统功能和水质评价的重要参数之一^[21]. 方差分析结果表明:水华敏感期浮游植物细胞密度的时空分布差异显著(F 为 2.65 和 2.48,ANOVA, $p < 0.05$). 按时间分布情况看,5月10~16日出现水华使得各采样点的藻细胞密度出现峰值. 按空间分布情况来看,藻类的细胞

密度最低值出现在位于长江干流上的巫峡口样点,细胞密度的最高值出现在大昌样点,其次为东坪坝和菜子坝.

(3)采用 Jaccard 指数分析不同样点浮游植物群落的相似性,结果表明:白水河、双龙和东坪坝两两比较的相似性系数分别为 0.65、0.56 和 0.54,达到中等相似的水平. 大昌与其它样点的相似性指数范围在 0.16~0.40,巫峡口与其它样点的相似性指数范围在 0.17~0.31,说明大昌和巫峡口的浮游植物群落结构和其它样点差异显著. 菜子坝与龙门相似性系数为 0.54,达到中等相似水平;菜子坝与双

龙、白水河和东坪坝的相似性系数分别为 0.23、0.34 和 0.2,群落结构不相似.

2.3 浮游植物与相关环境因子的关系

2.3.1 相关分析

水华通常是指浮游植物的生物量显著地高于一般水体中的平均值,并在水体表面大量聚集,形成肉眼可见的藻类聚积体^[22].正是由于水华暴发的前提是一定的藻类生物量,因此探讨水华暴发成因的关键就是要分析浮游植物细胞密度与环境因子的相关

关系.相关关系见表 3,结果表明:浮游植物的细胞密度与 TN、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮存在显著的负相关,即较高的氮营养盐含量会对藻类的生长起抑制作用.相反,水温、TP 和浮游植物细胞密度之间相关性不显著.

Chla 和 pH 成显著正相关,表明水华敏感期浮游植物的快速增长导致其光合作用加强,从而使水体的 pH 值升高.这与 Wang^[8]和 Bernard^[23]等的研究结果一致.

表 3 水华敏感期浮游植物与相关环境因子的相关性分析结果¹⁾
Table 3 Correlation coefficients between phytoplankton and environmental factors

	气温	水温	透明度	pH 值	溶解氧饱和度	叶绿素 a	总氮	总磷	硝酸盐氮	亚硝酸盐氮	氨氮	悬浮物	高锰酸盐指数	细胞密度
气温	1													
水温	-0.334	1												
透明度	-0.369	0.094	1											
pH 值	0.141	0.488	0.135	1										
溶解氧饱和度	0.312	0.660	-0.178	0.880 **	1									
叶绿素 a	0.059	0.483	0.330	0.810 *	0.701	1								
总氮	-0.453	-0.302	0.672	-0.437	-0.686	0.013	1							
总磷	-0.336	0.024	0.670	-0.143	-0.308	0.398	0.885 **	1						
硝酸盐氮	-0.460	-0.556	0.597	-0.500	-0.836 *	-0.263	0.892 **	0.593	1					
亚硝酸盐氮	-0.459	-0.349	0.604	-0.169	-0.540	-0.114	0.685	0.484	0.796 *	1				
氨氮	-0.385	0.295	0.647	0.592	0.260	0.373	0.088	0.111	0.174	0.577	1			
悬浮物	0.536	0.170	-0.348	0.673	0.744	0.715	-0.414	-0.062	-0.599	-0.420	-0.087	1		
高锰酸盐指数	-0.351	-0.063	0.546	0.517	0.087	0.606	0.414	0.433	0.436	0.513	0.620	0.223	1	
细胞密度	0.116	0.542	-0.697	0.069	0.471	-0.163	-0.789 *	-0.661	-0.825 *	-0.803 *	-0.377	0.143	-0.669	1

1) * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$

2.3.2 RDA 分析

大宁河水华敏感期浮游植物群落与环境因子的 RDA 分析结果见表 4 和图 2.表 4 列出了浮游植物群落 RDA 分析的统计信息.由表 4 可知,前 2 个轴解释了 100% 浮游植物与环境因子相关性的信息.在浮游植物种类与环境因子之间的相关系数中,可以看到轴 1 中浮游植物种类与环境因子的相关性达

到 0.867,轴 2 也有 0.437,说明在轴 1、轴 2 中相关性都较高.调查期间共有 7 次采样,对 7 个采样点共计 49 个样品进行 RDA 分析,从图 2 可以看出与蓝藻呈明显正相关的是 NO_2^- -N、SD 和 TP;和绿藻呈明显正相关的是 SS、高锰酸盐指数、pH、DO 和 Chla;和硅藻、甲藻和裸藻呈明显正相关的是 NO_3^- -N、水温和气温;呈明显负相关的是 TP.

表 4 大宁河浮游植物群落与环境因子 RDA 分析的统计信息
Table 4 Summary of redundancy analysis (RDA) for the first two axes between environmental factors and phytoplankton biomass in sensitive periods in the Daning River

参数	1	2	3	4	总方差
特征值	0.713	0.010	0.000	0.000	1.000
浮游植物种属与环境因子相关关系	0.867	0.437	0.573	0.378	
浮游植物种类的累积百分数/%	71.3	72.2	72.3	72.3	
浮游植物与环境因子相关性的累积百分数/%	98.6	100.0	100.0	100.0	
特征值总和			1.000		
典型特征值总和			0.723		

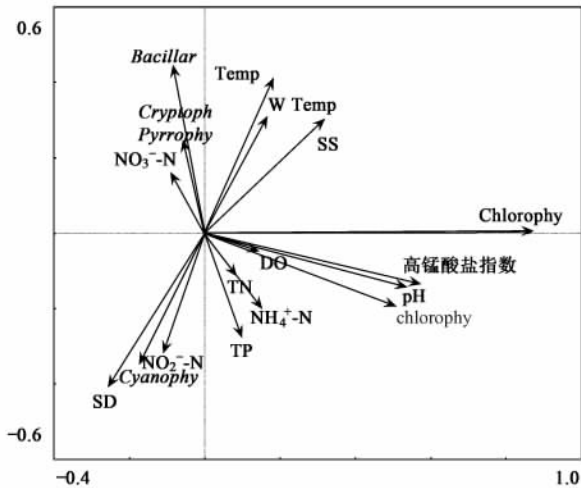


图2 大宁河浮游植物组成与环境关系的 RDA 排序图

Fig.2 Biplot of the first two axes of the RDA analysis for environmental factors associated with phytoplankton variation

2.4 水生态环境特征

将 7 个测点的营养盐、Chla、藻类细胞密度等 14 个水华敏感期的监测数据做系统聚类分析, 聚类结果见图 3。当聚类距离取值为 5 时, 可分为 3 组。第 1 组为巫峡口和龙门, 巫峡口位于长江干流上, 龙门离长江较近, 其水流速度和水体紊动扩散能力受长江干流的影响较大。水体交换频繁, 对富营养化的敏感性最低。第 2 组为大昌, 受上游来水影响较大, 水流较缓慢, 由于移民迁移、新建城镇及大量农田的淹没导致污染负荷大量增加, 富营养化敏感性增大。第 3 组为东坪坝、白水河、双龙和菜子坝。从图 1 可以看出, 这 4 个样点均位于大宁河的回水区内, 水流缓慢, 滞留时间延长, 水体交换能力减弱, 对富营养化的敏感性最大。聚类结果表明大宁河水体水生态环境特征存在显著的空间异质性, 这对分析大宁河水华发生的主要控制因子和水环境质量分区管理极为重要。

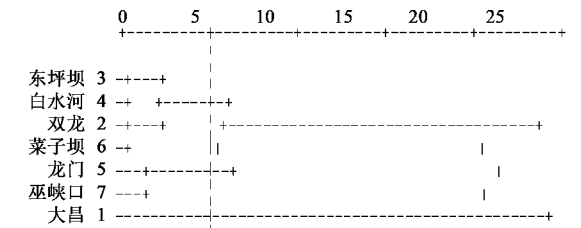


图3 大宁河水华敏感期各采样点水生态环境的聚类分析结果

Fig.3 Result of cluster analysis of aquatic environmental characters in Daning River during sensitive period of algal blooms

3 讨论

在调查期间细胞密度最高值出现在大昌样点, 而叶绿素 a 含量平均值较低, 这似乎有悖于 Chla 与藻类细胞密度可同作为藻类生物量表征的普遍观点。根据本课题组 3 a 的野外观测经验, 认为这与大昌特殊的生态环境特征有很大关系。该样点位于大昌古镇淹没区, 由于移民迁移, 大量农田被淹, 水体有机营养物质浓度增加, 为藻类的繁殖提供了足够的营养盐; 加上 2007 年 12 月 26 ~ 31 日在该点发生水华, 导致该点底泥中藻类种源丰富, 事实上 2008 年 5 月 13 ~ 16 日, 在大昌暴发了小环藻、隐藻、弓形藻和衣藻的水华, 因此细胞密度的最高值出现在该样点。由于大昌位于上游, 水流频繁, 平时藻类很难聚集, 因此叶绿素的平均值较低。该点流速和其他样点相较而言较快, 根据藻类的生存策略^[24]和 RDA 分析结果, 大昌适宜对光强需求较低和对动力扰动适应性较强的硅藻、隐藻门的卵形隐藻和绿藻门的衣藻、弓形藻生长。

聚类分析结果表明, 大昌和巫峡口与其它样点水生态环境特征差异显著; Jaccard 指数分析结果表明, 这 2 个样点浮游植物群落结构与其他样点差异显著。白水河、双龙和东坪坝生态环境特征相似, 其群落结构也达到了中等相似的水平。说明浮游植物的群落结构受到了生态环境特征的影响。菜子坝与白水河、双龙、东坪坝虽然具有相似的生态环境特征, 但是其群落结构与相邻的龙门样点相似性水平高于白水河、双龙和东坪坝。事实上, 在本研究野外原位观测中也有与上述样点在水华期具有相同的水华优势种和类似的群落结构。说明浮游植物的群落结构受到了水生态环境特征与地域相邻性的影响; 藻类的一部分来源于采样点原位生长, 另一部分来源于水力或风力驱动表层藻类的漂移。李哲等^[25]在三峡库区的小江支流也观测到类似的现象。

根据 RDA 的结果, 蓝藻的数量主要是由 SD、TP 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度的变化所决定的; 绿藻的数量主要与 SS、高锰酸盐指数、pH、DO 和 Chla 的浓度变化相一致; 硅藻、甲藻和裸藻的数量主要是由 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、水温和气温的变化所决定的。有研究表明, 蓝藻比较适合稳定的水体, 而且也偏好较高的光照强度和高温, 透明度的增大导致光强也比较高, 因此, 它们与透明度有较强的正相关关系。蓝藻具有储磷机制, 能够对磷进行富集^[24], 从而导致 TP 的浓度随着蓝藻数量的增加而升高。5 月调水导致的较高的悬浮物浓度

降低了水体透明度,进而限制了需强光生长的蓝藻种群的快速积累。文献[24]发现带鞭毛的大型单细胞绿藻或群体绿藻能够在水体中主动运动,从而获取更多的营养盐和防止沉降。因此5月悬浮物浓度增高导致光强较弱的条件反而有利于绿藻的竞争优势。硅藻由于其个体比重较大,跟需要水体的扰动以增加其浮力对抗沉降,因此它多出现在动力扰动相对较大的大昌和巫峡口样点。硅藻、甲藻和隐藻与水温气温均呈正相关,这表明在4~5月中,硅藻、甲藻和隐藻的细胞密度随着温度的升高而升高。

三峡库区属湿润亚热带季风气候,具有雨多、湿度大、云雾多和风力小等特征。降雨主要集中在4~10月,约占全年降水量的80%。在调查期间(4~5月)大宁河常有暴雨骤降导致气温骤降,由于水温降温缓慢,因此出现龙门和菜子坝样点平均水温高于气温的现象。另外,集中降雨导致的水文过程剧烈变化能够显著地影响浮游植物的种类组成,降雨会使大宁河产生更多适合机会型生态位,从而增加浮游植物的多样性^[26]。事实上,在本研究野外原位调查中,发现降雨量大的时期,绿藻的种类数量有了明显的增加。这也在一定程度上解释了大宁河发生多藻种同时同地水华的现象。相较而言,蓝藻比较适应稳定水体,而且也偏好较高的光照强度和水温,而降雨恰恰会增大水体的动力扰动,降低光强和水温,因此,这也在一定程度上解释了在降雨量高的5月,较少出现蓝藻水华。降雨有可能是大宁河浮游植物群落动态的主要驱动因子,需要进一步探索。

大宁河是一个非常复杂的环境生态体系,除了受到支流上游来水的影响,还受到干流顶托的影响。水华敏感期水温、总氮、硝酸盐氮、pH和DO时空分布差异显著(ANOVA, $p < 0.05$),下部河段的物理、化学和生物因子受上部河段的影响并不明显。此外,这也与7个采样点的地势有关,大昌、双龙、东坪坝、白水河和菜子坝为开阔水域、龙门为峡谷水域,巫峡口位于大宁河入长江口上。

Wang等^[8]通过在太湖连续5a的监测数据指出:pH、DO和高锰酸盐指数为富营养化的反馈因子。相关分析结果表明:pH与Chla有显著的相关性,而高锰酸盐指数和DO与Chla没有显著的相关性。说明藻类的快速增长导致其光合作用加强,从而使水体的pH值升高。

根据有关报道,三峡水库支流发生过不同藻类水华现象,其中小江发生过严重的甲藻、硅藻以及绿藻水华^[10];香溪河曾经发生过严重的甲藻、硅藻以

及隐藻水华^[5];童庄河、大溪河、东溪河和黄金河支流也发生过严重的甲藻水华^[7]。大宁河的水华具有其自身的特点:水华的优势藻种范围较大,且水华时优势种不单一,发生过以小环藻、埃尔多甲藻、实球藻、空球藻、小球藻和卵形隐藻为优势种的水华。在分类学上,这些藻种分属不同的门类,生态特征各异,却能发生多藻种同时同地水华的情况。这与这些藻种具有不同形态和生理特征来实现它们对生态环境的适应性特征有关。一方面,水华期间水温升高,由于调水、地表径流的输入等带来营养盐和悬浮物浓度的升高,根据RDA分析结果,优势藻类所占百分比随着氮营养盐浓度的升高而升高。另一方面,这些藻类按照Reynolds的划分属于运动型,运动型藻类往往具有鞭毛能够进行一定的主动运动,对营养盐具有较强的吸收能力,和蓝藻相比抗扰动能力较强,对光强不敏感^[24]。RDA分析结果也有力地支持了这一点。因此大宁河中高营养盐和低透明度有利于绿藻门中的实球藻、衣藻、甲藻门的埃尔多甲藻和隐藻门的卵形隐藻的竞争优势。从而暴发多藻种同时同地水华的情况。

4 结论

(1) 大宁河水体水生态环境特征存在显著的空间特征异质性。因此水华敏感期浮游植物细胞密度的分布具有明显的时空异质性。从时间尺度上看,各采样点细胞密度的最高值出现在水华期。从空间格局上看,浮游植物细胞密度的最高值出现在大昌样点,最低值出现在长江干流巫峡口样点。浮游植物群落结构组成受到水环境特征和空间相邻性的双重影响。由于藻种具有不同形态和生理特征来实现它们对生态环境的适应性特征,大宁河发生多藻种同时同地水华的情况。

(2) 水华敏感期水温、总氮、硝酸盐氮、pH和DO时空分布差异显著(ANOVA, $p < 0.05$)。调查期间N是影响浮游植物细胞密度的关键因子,营养盐、悬浮物和透明度是影响浮游植物的组成的主要因素,降雨量可能对其也有一定的影响,需要进一步的探索。浮游植物的大量生长对环境因子反馈效应显著:水体的pH值随着藻类细胞密度的增加而上升。

参考文献:

- [1] 刘瑞秋. 三峡大坝截留前后长江中下游江段水化学特性的初步调查[J]. 水生生物学报, 2002, 24(5): 446-450.
- [2] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J].

科学导报, 2003, (2): 49-52.

[3] 黄真理. 国内外大型水电工程生态环境监测与保护 [J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 101-108.

[4] 钟成华, 幸治国, 赵文谦, 等. 三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 20-23.

[5] Zeng H, Song L R, Yu Z G, *et al.* Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons [J]. Science of the Total Environment, 2006, 367: 999-1009.

[6] Wu X D, Kong F X, Chen Y W, *et al.* Horizontal distribution and transport process of bloom-forming Microcystis in a large shallow lake (Taihu, China) [J]. Limnologica, 2009, 2(1): 1-10.

[7] 周广杰, 况琪军, 胡征宇. 大宁河春季浮游藻类“水华”及其营养限制 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5): 628-633.

[8] Wang X L, Lu Y L, He G Z, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 920-927.

[9] 张晟, 刘景红, 黎莉莉, 等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征 [J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1056-1061.

[10] 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价 [J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2710-2715.

[11] 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等. 三峡库区重庆段主要支流浮游植物调查 [J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 116-119.

[12] 郑丙辉, 曹承进, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3218-3225.

[13] 曹承进, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究 [J]. 环境科学, 2010, 31(1): 3471-3480.

[14] 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. 239-284.

[15] 胡鸿均, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类——系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[16] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994. 141-165.

[17] 厉红梅. 多变量分析在海洋环境底栖动物生态监测数据处理中的应用 [D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[18] Jan L, Petr S. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 250-259.

[19] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出 [J]. 环境科学, 2009, 30(1): 58-63.

[20] 张晟, 宋丹, 张可, 等. 三峡水库典型支流上游区和回水去营养状态分析 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 201-207.

[21] 况琪军, 胡征宇, 周广杰, 等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价 [J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(6): 507-513.

[22] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养湖泊中蓝藻水华形成机理的思考 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-591.

[23] Bernard P, Antoine L, Bernard L, *et al.* Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system [J]. Ecological Modelling, 2004, 178: 295-311.

[24] Reynolds C S. Ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 25-53.

[25] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐的特征 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36-44.

[26] Weyhenmeyer G A, Willen E, Sonesten L. Effects of an extreme precipitation event on water chemistry and phytoplankton in the Swedish Lake Malaren [J]. Boreal Environment Research, 2004, 9: 409-420.