

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.019

三峡水库大宁河春季水华藻类分布及影响因子

洪尚波 吴光应 万 丹 付道林

(重庆市巫山县环境监测站,重庆 404700)

摘要 :以三峡水库支流大宁河 2010 年 3 月中旬的水华调查数据为依据,分析浮游藻类分布规律,并探讨其影响因子。结果表明,在容易暴发水华的库湾开阔地带之外,狭窄的峡谷地带亦会暴发严重水华,并且持续时间更长;河口区域的浮游藻类则表现出比其他区域更好的群落稳定性和生物均匀性。在此次水华的前、中期,浮游藻类的群落稳定性随生物量增大而降低;后期则随其增大而增加。通过对样品的定量分析,共鉴定浮游藻类 7 门 24 属,主要为绿藻和甲藻,第一优势种为拟多甲藻,占到总藻类的 38%,其次为小球藻和衣藻。观察到藻类群体有垂直迁移现象,可能因藻类有趋光性所致。拟多甲藻水华的暴发会降低水体氮磷比,而随着水华的消退,水体氮磷比会较迅速地恢复到一个较高水平。在水华前期,总磷与浮游藻类群落稳定性呈现高度负相关,在中、后期其相关性减弱。

关键词 :三峡水库;浮游藻类;水华;藻类分布

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2012)01-0080-05

Distribution of algae and its influencing factors in Daning River in Three Gorges Reservoir during period of spring algal bloom

HONG Shang-bo, WU Guang-ying, WAN Dan, FU Dao-lin

(Wushan Environmental Monitoring Station of Chongqing City, Chongqing 404700, China)

Abstract :Based on investigation data of the algal bloom in the Daning River, which is the tributary of the Three Gorges Reservoir, in the middle of March, 2010, the spatial and temporal distribution of algae and its influencing factors were studied. The results show that algal blooms not only occur in wide reservoir bays, but also in narrow valley belts, where there exist significant algal blooms that last longer periods of time. The planktonic algae in the estuary region show greater community stability and biological uniformity than other regions. With the increase of plankton biomass, the community stability of the planktonic algae decreased during the early and middle periods of the algal bloom and increased during the late period of the algal bloom. Through quantitative analysis of samples from the period of the algal bloom, the planktonic algae were classified as 24 genera of seven phyla, mainly including Chlorophyta and Pyrrophyta. The first dominant species were *Peridiniopsis* sp., accounting for 38% of the total algae, followed by *C. vulgaris* and *Chlamydomonas*. During the period of the algal bloom, the vertical migration of algae groups was observed, which might be due to the change of illumination and the phototaxis of algae. The algal bloom of *Peridiniopsis* sp. reduced the N/P ratio of the water body. With the retrogression of the algal bloom, the N/P ratio quickly recovered to a relatively high level. The total phosphorus and the community stability of planktonic algae had a highly negative correlation during the early period of the algal bloom, and this correlation weakened during the middle and late periods.

Key words :Three Gorges Reservoir; planktonic algae; algal bloom; distribution of algae

大宁河发源于陕西省平利县的中南山,流经巫溪、巫山县之间的云崖险峰,注入巫峡西口的长江,在巫山县境内的流域面积为 343.5 km²^[1],是三峡水

库一级支流。三峡水库正式运行以来,最高水位已达到 172 m,大宁河下游约 50 km 成为库湾区,在长江干流对其的顶托作用下,水流非常缓慢,滞留时间

长,易形成富营养化并在适宜条件下暴发水华。2010年3月中旬,大宁河回水区部分水域发生水华,水华表现为酱油色,在数个河段呈片状分布。笔者分析了此次水华期间浮游藻类的群落组成与时空分布特征,并探讨其影响因素,以期为三峡库区支流的水华预警预报与控制工作提供参考依据。

1 调查范围与研究方法

1.1 调查范围

根据大宁河流域的水文地质特征及此次水华暴发情况,选取调查点位(图1):A点位于此次水华区域上游,B、D点均位于一个很大的库湾,C点位于一个长约2 km的峡谷,E点位于大宁河在长江的入口。每个采样断面分水深0.5 m、2.0 m、5.0 m采样,在整个水华期间每2 d采样1次。取B、C、D、E点的均值分析当日水华发展的总体情况;取水深0.5 m处的数据作为水体表层数据。

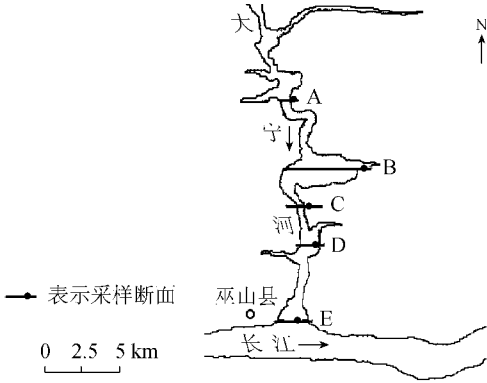


图1 采样点示意图

1.2 分析方法

水质理化监测项目包括TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、DO、Chl-a、SD、pH、水温*T*、浊度(NTU)和电导率等11项。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定*ρ*(TN);采用钼酸铵分光光度法测定*ρ*(TP);采用纳氏试剂分光光度法测定*ρ*(NH₃-N);酸性高锰酸钾法测定*ρ*(COD_{Mn})。为了控制测定的准确性,在TN、TP、NH₃-N和COD_{Mn}分析时,每10个测定样品用标准样品校验。另采用10%的平行样分析来控制实验的精密度。具体分析方法参见文献^[2]。

藻类的分类、计数采用光学镜检法,用长条计数法

计数^[23]。Chl-a、DO、浊度采用便携式多参数水质测定仪(DS5X)测定;水体流速、流量、河宽、水深等水文参数用多普勒测流剖面仪(YCN-RC3025)测定;数据相关性分析及主成分分析采用SPSS17.0统计软件处理^[46]。

2 结果分析与讨论

2.1 水体环境因子

2.1.1 水环境概况

此次水华暴发正值三峡水库放水期间,2010年3月12—3月16日,长江巫山段水位以平均0.13 m/d的速度下降,大宁河回水区域的水体流速为0.00~0.02 m/s。水华集中在B、C、D、E点位所在区域。水华区域环境因子数值见表1。水华期间,调查区域的水温保持在13℃左右,其日间*ρ*(DO)为7.63~12.23 mg/L,pH值在8.17~9.22,水体偏弱碱性。3月12日,*ρ*(Chl-a)平均值为18.80 mg/m³;3月14日为32.06 mg/m³,最大值达到111.97 mg/m³;3月16日为11.71 mg/m³,趋于同期正常水平。水华区域*ρ*(TN)为1.198~3.862 mg/L,日均值分别为1.667 mg/L、1.781 mg/L、1.663 mg/L;*ρ*(TP)为0.027~0.499 mg/L,日均值分别为0.141 mg/L、0.163 mg/L、0.081 mg/L;*ρ*(COD_{Mn})为1.38~4.65 mg/L,日均值分别为3.08 mg/L、2.28 mg/L、2.44 mg/L。水华期间,环境因子Chl-a、TN、TP随水华过程的进行表现出先增大后减小的规律。

2.1.2 水体分层比较

此次水华期间,水体表层处(0.5 m)的pH值最大,水深增大,pH值变小(图2)。分析Chl-a、TN、TP在水体0.5 m、2 m、5 m水层的垂向变化(图2),在3月12日水华早期,Chl-a、TN、TP均在2 m水层出现最大值;3月14日水华中期,Chl-a、TN、TP最大值皆出现在0.5 m水层,表明在水华前期和中期,Chl-a、TN、TP随水深变化有很强的关联性。其最大值所在水层的改变,表明藻类有向适宜环境大量迁移的习性,而3月14日Chl-a、TN、TP在0.5 m水层出现最大值,推测是当日天降小雨,藻类向水体表层迁移所致。3月16日水华后期,Chl-a最大值出现在2 m水层,而氮磷营养盐被此水层藻类大量消耗掉,使得

表1 大宁河春季水华期间水华区域主要物理化学参数

时间	数值	<i>T</i> /℃	<i>ρ</i> (DO)/ (mg·L ⁻¹)	电导率/ (μS·cm ⁻²)	pH	<i>ρ</i> (Chl-a)/ (mg·m ⁻³)	<i>ρ</i> (NH ₄ ⁺ -N)/ (mg·L ⁻¹)	<i>ρ</i> (TN)/ (mg·L ⁻¹)	<i>ρ</i> (TP)/ (mg·L ⁻¹)	<i>ρ</i> (COD _{Mn})/ (mg·L ⁻¹)
3月12日	均值	12.9	9.82	334.3	8.78	18.80	0.318	1.667	0.141	3.08
	范围	12.15~13.85	8.44~12.23	329.3~341.1	8.25~9.09	1.92~96.37	0.159~0.534	1.198~2.083	0.052~0.314	1.41~4.65
3月14日	均值	13.21	9.71	333.1	8.66	32.06	0.310	1.781	0.163	2.28
	范围	12.38~13.70	7.63~11.81	321.7~340.3	8.17~9.09	3.17~111.97	0.186~0.512	1.274~3.382	0.037~0.499	1.79~4.04
3月16日	均值	13.17	9.48	334.9	8.72	11.71	0.263	1.633	0.081	2.44
	范围	12.47~14.66	7.89~11.62	323.3~374.3	8.29~9.22	2.55~33.6	0.11~0.517	1.236~3.862	0.027~0.399	1.38~3.68

TN、TP 在此处出现最小值。

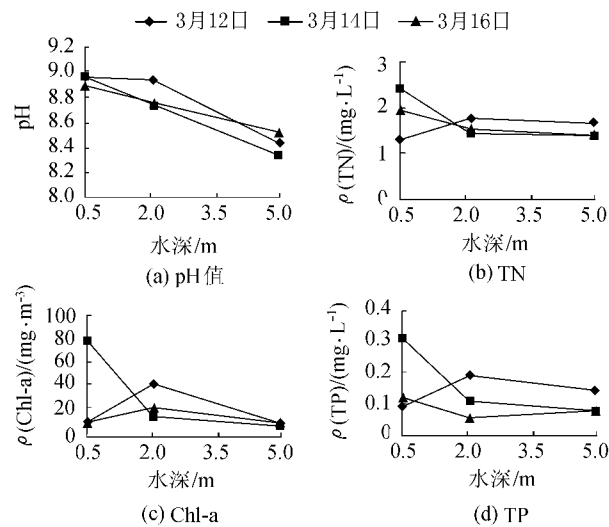


图2 不同水层 pH 值、 $\rho(Chl-a)$ 、 $\rho(TN)$ 、 $\rho(TP)$ 变化

2.2 浮游藻类的种类组成

此次春季水华期间,共鉴定浮游藻类 7 门 24 属,其中绿藻门 10 属,硅藻门 8 属,蓝藻门 2 属,其余甲藻门、隐藻门、裸藻门、黄藻门各 1 属。常见的检出种类有甲藻门的拟多甲藻,绿藻门的衣藻、小球藻,蓝藻门的色球藻以及硅藻门的颗粒直链藻。由图 3 可知,浮游藻类以甲藻和绿藻为主,共占到藻类数量的 77%,其中第一优势种类为拟多甲藻,占 38%,其次为小球藻,占 19%,衣藻占 12%以及其他。

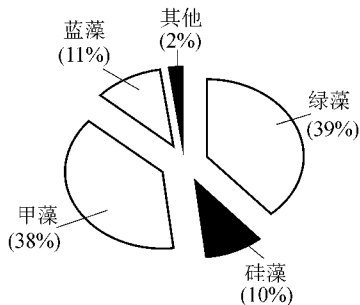


图3 大宁河春季水华期间藻类组成结构

对比分析 3 月 12 日、14 日、16 日各采样点的藻类密度(图 4),3 月 12 日,5 个采样点藻密度范围 $2.44 \times 10^5 \sim 50.35 \times 10^5$ 个/L 第一优势种拟多甲藻

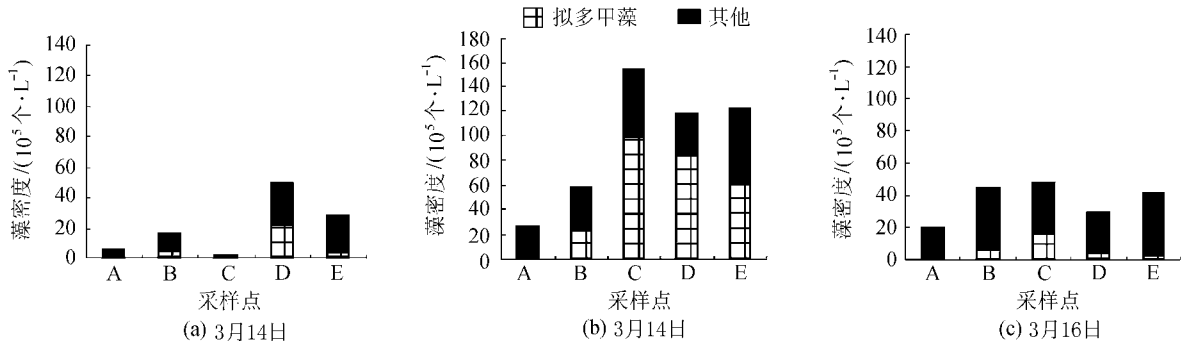


图4 大宁河春季水华期间各调查点藻类分布

在 5 个采样点的密度分别为 0.35×10^5 、 5.15×10^5 、 1.55×10^5 个/L、 21.55×10^5 个/L、 3.45×10^5 个/L,在总浮游藻类中所占比重为 5.51%、30.12%、6.35%、42.80%、12.26%,水体中藻类整体丰度并不高,但 B、D 两点拟多甲藻的种群优势明显,都超过了 30%。3 月 14 日,各样点藻密度范围 $26.6 \times 10^5 \sim 153 \times 10^5$ 个/L,第一优势种的拟多甲藻在 5 个采样点的密度分别为 2.15×10^5 个/L、 23.55×10^5 个/L、 99.35×10^5 个/L、 84.25×10^5 个/L、 60.9×10^5 个/L,在总浮游藻类中所占比重为 8.08%、40.50%、64.93%、71.58%、50.25%,A 点藻类总密度有所增大,但甲藻比重仍低于 10%,水华区域 B、C、D、E 点藻类疯狂生长,尤以 C 点为最。水华区域拟多甲藻获得绝对种群优势。其比重平均占到 56.82%。3 月 16 日,5 个采样点藻密度变化范围为 $20.01 \times 10^5 \sim 47.8 \times 10^5$ 个/L,作为第一优势种的拟多甲藻在 5 个样点的密度分别为 0.55×10^5 个/L、 6.55×10^5 个/L、 16.35×10^5 个/L、 4.95×10^5 个/L、 3.1×10^5 个/L,在浮游藻类中所占比例为 2.74%、14.60%、34.21%、16.98%、7.48%,比重整体下降,拟多甲藻仅在 C 点仍保持着种群优势,表明 C 点的峡谷地带的水华持续时间更长一点。

2.3 藻类生长分布特点及其影响因素

2.3.1 水华过程氮磷营养盐变化

此次水华第一优势种为拟多甲藻,其生物量在总浮游藻类中所占百分比以及各调查点氮磷比值见图 5。3 月 14 日,在水华区域的 B、C、D、E 点拟多甲藻种群优势最为明显,其所占比值均在 40% 以上,此时氮磷比为水华期间最小,其值均小于 10。在水华后期,氮磷比迅速变大,除水华消退较慢的 C 点外其余各调查点氮磷比值均在 20 以上。以上表明,拟多甲藻水华的暴发会降低水体氮磷比,而随着该水华的消退,水体氮磷比会较迅速的恢复到一个较高的水平。

2.3.2 种类多样性指数与均匀度指数

Shannon-Weaver 种类多样性指数(H')是对浮游植物群落物种数敏感的指数,对浮游植物群落多样

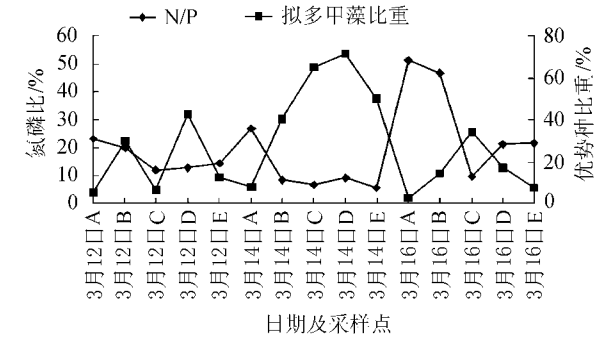


图5 大宁河春季水华中氮磷比及优势种比重变化

性有较好的解释。其值越大,表明其群落结构越复杂,稳定性越大,水质越好;Pielou 均匀度指数(J)可以很好地应用于浮游植物群落多样性分析中,分别按下式计算^[8-9]

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$$

$$J = H' / \log_2 S$$

式中: S 为生物种类数; n_i 为*i*种的个体数; N 为总个体数。

由图6可见,整个水华期间各采样点 H' 值和 J 值分别为1.6387~3.1165、0.4731~0.8524,采用SPSS17.0软件对 H' 和 J 进行检验,在0.01水平上显著相关。根据评价标准^[9-10],有86.7%的样点属于中污染。($H' > 3$,轻或无污染; $H = 1 \sim 3$,中污染; $H = 0 \sim 1$,重污染。)分析该次水华不同时期的浮游藻类情况,处于水华区域的B、C、D、E点,在水华中期(3月14日) H' 值和 J 值均显著低于水华前期(3月12日)和水华后期(3月16日)。对比各采样点情况,

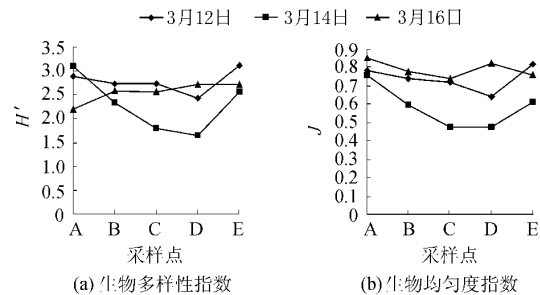


图6 大宁河春季水分结期间各调查点生物多样性指数、生物均匀度指数

A、E两点 H' 和 J 处于较高水平,其中A点位于水华区域上游的巴雾峡口,E点位于大宁河的入江口,A点未发生水华,调查期间叶绿素a均值为2.96(1.92~4.40) mg/m^3 ,E点水华比较严重,叶绿素a均值为42.51(6.30~11.97) mg/m^3 。以上表明,水华的暴发使得浮游藻类的群落结构变得不稳定,且该群落会自发向稳定群落结构发展;而江河汇口区域较强的水体紊流效应,会使得该区域的浮游藻类特征异于其它水华区域,表现出较好的群落稳定性和生物均匀性;水华后期,整个区域的浮游藻类结构稳定性差异会变小。

Chl-a和 H' 是对浮游藻类生物量和群落稳定性的分别表征^[10]。大宁河3月中旬水华前中后期,Chl-a和 H' 与各环境因子相关性见表2。前期和中期,Chl-a和 H' 呈负相关;后期Chl-a和 H' 呈正相关。可见在水华的前、中期,浮游藻类生物量的增大会使其群落越来越不稳定,而在水华后期,生物量的增大却可以增加其群落稳定性。

分析Chl-a与其他环境因子的相关性可知,在水华中期, $\rho(\text{Chl-a})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈高度正相关,其相关系数分别为0.857、0.910($p < 0.01$),该时期氮磷营养盐是影响浮游藻类生物量的关键因子,而在水华后期其相关性变得不明显(相关系数分别为0.132、0.086)。水华中期,Chl-a和氮磷比值呈负相关(-0.637 ; $p < 0.05$)。Chl-a与NTU在水华前、中期显著正相关(0.939、0.840; $p < 0.01$),在水华后期相关性不明显(0.111),说明在浮游藻类疯长聚集时,藻类生物量是影响水体浊度的主要因素。在水华中期, $\rho(\text{Chl-a})$ 与 $\rho(\text{DO})$ 、pH、电导率的相关性也变得显著起来(表2)。分析可知浮游藻类生物量的增加会使得水中DO和pH值的增大,而电导率会变小。

分析 H' 与其他环境因子的相关性可知,在水华前期 H' 与 $\rho(\text{TP})$ 呈高度负相关(-0.848 ; $p < 0.01$),与氮磷比呈高度正相关(0.816; $p < 0.01$),说明磷营养盐的富集增多会使浮游生物群落变得不稳定,是藻类疯长的表征。此外,环境因子与 H' 相关性均不显著,表明浮游生物群落稳定性受各环境因子的

表2 大宁河春季水华期间水体特征因子与Chl-a、 H' 相关性分析结果

分期	类别	H'	$T/^\circ\text{C}$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2})$	pH	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	NTU	$\rho(\text{TN}):\rho(\text{TP})$
前期	Chl-a	-0.488	0.169	0.034	0.119	0.395	0.129	0.482	0.606*	0.408	0.939**	-0.490
	H'		0.019	-0.109	-0.515	-0.276	-0.271	-0.413	-0.848**	-0.670*	-0.639*	0.816**
中期	Chl-a	-0.288	0.684*	0.858**	-0.640*	0.786**	0.698*	0.857**	0.910**	0.225	0.840**	-0.637*
	H'		-0.363	-0.523	0.303	-0.460	-0.239	-0.416	-0.386	-0.471	-0.495	0.420
后期	Chl-a	0.480	0.003	0.463	-0.244	0.210	-0.020	0.132	0.086	0.318	0.111	-0.046
	H'		-0.121	-0.063	-0.284	-0.000	-0.522	-0.173	-0.342	0.081	-0.021	0.187

数据经SPSS17.0统计软件处理,**表示显著性水平为0.01(双尾检验);*表示显著性水平为0.05(双尾检验) $N=36$ 。

表 3 水体特征因子主成分分析

特征因子	水华前期			水华中期		水华后期		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3
<i>T</i>	0.551	- 0.630	0.238	0.789	- 0.257	0.871	- 0.382	- 0.261
DO	0.639	- 0.672	- 0.258	0.961	0.007	0.902	0.037	0.250
电导率	- 0.060	0.704	0.216	- 0.796	- 0.148	- 0.782	0.233	- 0.111
pH	0.753	- 0.554	0.248	0.898	- 0.085	0.890	- 0.339	- 0.042
Chl-a	0.708	0.389	0.481	0.926	- 0.087	0.306	0.052	0.929
TN	0.678	0.352	- 0.402	0.874	0.190	0.634	0.732	- 0.110
TP	0.848	0.385	- 0.216	0.914	0.022	0.588	0.767	- 0.129
COD _{Mn}	0.817	0.218	- 0.458	0.354	0.890	0.864	- 0.031	0.002
NTU	0.871	0.248	0.400	0.920	- 0.290	0.827	- 0.146	- 0.228
方差贡献率/%	48.753	24.262	11.565	71.258	11.294	58.276	16.290	12.105
累计方差贡献率/%	48.189	73.015	84.580	71.258	82.552	58.276	74.566	86.671

注 :PC1 ,PC2 ,PC3 分别为第 1 2 3 主成分。

影响很复杂 ,是一个相互影响的动态稳定。

2.3.4 主成分分析

此次水华区域水生态环境特征指标的主成分分析结果见表 3。水华前、中、后期前 3 个主成分分量的累计方差贡献率均超过 80% ,满足生态环境分析的需要^[10]。水华前、中期第 1 主成分中反映信息基本相同 ,氮磷营养盐是藻类生长的物质基础 ,Chl-a 指标反映藻类生物量 ,藻类大量增殖聚集会导致水体浊度增大 ,而 DO、pH 是和藻类生物量相互影响的因子。水华前期第 2 主成分反映了 *T*、DO、电导率和 pH 的信息 ,水华中期 ,COD_{MN}是决定第 2 主成分的主要因子。水华后期 ,第一主成分反映的信息改变 ,主要体现了 *T*、DO、pH、COD_{MN}和浊度的信息 ,营养盐指标 TN、TP 与 Chl-a 成为决定第 2 主成分的主要因子 ,第三主成分的主要因子为 Chl-a。可见 ,在 1 次水华过程中 ,水环境特征的主要影响因子会从营养盐因子 TN、TP 向水环境状态因子水温、DO、pH 等转变。

3 结 语

- a. 大宁河 2010 年 3 月中旬水华暴发区域主要为 B、C、D、E 调查点所在区域 ,峡谷地带的 C 点区域 ,其持续时间更久。此次水华中 ,河口区域 E 点亦发生水华 ,且浮游藻类表现出比其他几处更好的群落稳定性和生物均匀性。
- b. 此次水华的前、中期 ,浮游藻类的群落稳定性随生物量的增大而降低 ,而在水华后期则随其增大而增加。在水华过程中 ,水生态环境特征的主要影响因子会发生变化 ,水华前、中期为营养盐因子 TN、TP ,水华后期变化为水环境状态因子水温、DO、pH 等。
- c. 通过对水华期间样品的定量分析 ,共鉴定浮游藻类共 7 门 24 属 ,主要为绿藻和甲藻。第一优势

种为拟多甲藻 ,占到总藻类的 38% ,其次为小球藻和衣藻。在水华期间观察到藻类群体垂直迁移的现象 ,可能是光照改变 ,而藻类具有趋光性所致。

d. 拟多甲藻水华的暴发会降低水体氮磷比 ,而随着该水华的消退 ,水体氮磷比会比较迅速地恢复到一个较高的水平。在水华前期 ,总磷与浮游藻类群落稳定性会呈现高度负相关 ,在中、后期其相关性减弱 ,高水平的磷营养盐会使得藻类群落稳定性降低。

参考文献 :

[1] 罗专溪 ,朱波 ,郑丙辉 ,等 .三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. 中国环境科学 ,2007 ,27(2) : 208-212 .

[2] 国家环境保护总局 .水和废水监测分析方法[M].4 版 .北京 :中国环境科学出版社 ,2002 :239-284 .

[3] 周凤霞 ,陈剑虹 .淡水微型生物图谱[M].北京 :化学工业出版社 ,2005 .

[4] 程子峰 ,徐富春 .环境数据统计分析基础[M].北京 :化学工业出版社 ,2006 :77-97 .

[5] 刘大海 ,李宁 ,晁阳 .SPSS15.0 统计分析从入门到精通[M].北京 :清华大学出版社 ,2008 .

[6] 陈宇炜 ,秦伯强 ,高锡云 .太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J].湖泊科学 ,2001 ,13(1) :63-71 .

[7] 况琪军 ,马沛明 ,胡征宇 ,等 .湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J].安全与环境学报 ,2005 ,5 (2) :87-91 .

[8] 沈韞芬 ,章卓涉 ,龚循矩 ,等 .微型生物监测新技术[M].北京 :中国建筑工业出版社 ,1990 :136

[9] 刘健康 .高级水生生物学[M].北京 :科学出版社 ,2000 : 84-86 ,383-386 .

[10] 刘宁 ,沈建忠 .藻类生物学评价在水质监测中的应用[J].水利渔业 ,2008(4) :5-7 .

(收稿日期 2011-01-11 编辑 :高渭文)