

2015-2016年汉江中下游硅藻水华发生成因分析

吴兴华¹, 殷大聪², 李 翀¹, 陈 磊¹, 李 媛¹, 赵 莹¹

(1. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038; 2. 长江科学院水资源综合利用研究所, 武汉 430010)

摘要:为了探究汉江中下游多年春季易发生硅藻水华的成因,2015年和2016年早春水华发生期在汉江干流布设8个点位(黄家港、襄阳、皇庄、沙洋、兴隆闸、泽口、仙桃、蔡甸),进行密集的浮游植物定性定量监测,同时监测总氮、总磷、硅酸盐、水温、pH和溶解氧等水质理化指标,并搜集水华期汉江中下游干流各水文站的流量数据,分析理化指标与水华细胞密度之间的相关性以及流量与水华细胞密度之间的关系。结果表明,自皇庄以下,水华发生期浮游植物密度高于 10^7 个/L,优势种为冠盘藻属(*Stephanodiscus*),达总生物量的95%以上;各样点浮游植物细胞密度与硅酸盐浓度、硅氮比均呈显著正相关($P < 0.01$);在考虑上下游点位距离和时间推移的交互作用下,通过逐步向前回归方法拟合多元线性回归模型,发现采样时间和采样点位间距与细胞密度呈极其强烈的显著正相关($P < 0.001$),流量与细胞密度呈极其强烈的显著负相关($P < 0.001$)。适宜的早春气候条件、较高的硅氮比、低流量是汉江中下游硅藻水华发生的原因。建议在控源截污的基础上,应注意早春时节对重要站点的流量监控,适时增加下泄流量以防控硅藻水华的发生。

关键词:汉江中下游;硅藻水华;硅氮比

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)06-0019-08

汉江是长江的第一大支流,汉江中下游通常是指丹江口水库下游的襄樊、钟祥、沙洋、潜江、仙桃和汉川等主要城镇,最后在武汉龙王庙汇入长江,全长超过630 km。汉江中下游干流共设置了44个饮用水源取水口,供给流域沿线24个市县、904.2万人的生活饮用水,年累计供水量1.07亿t(张家玉等,2000)。近年来,随着国家南水北调中线工程、引江济汉工程以及梯级电站的不断建设,汉江中下游的水文情势逐渐发生了改变;同时,江汉平原重要市镇的经济也导致污染负荷的逐年增加,这使得汉江中下游水质逐年恶化。从1992年媒体首次报导汉江硅藻水华以来,水华的发生越来越密集,自2008年开始,每年冬春季均发生硅藻水华,其持续时间也有延长的趋势(谢平等,2004a;殷大聪等,2011;梁开学等,2012)。

以往研究认为,汉江中下游硅藻水华的发生与气候、水文以及环境中营养盐的结构与分布有关(况琪军等,2000;谢平等,2004b;梁开学等,2012);冬春季节出现气温偏高或持续日照的天气条件时,

极易发生硅藻水华(卢大远等,2000;殷大聪等,2011);每年11月至翌年3月的枯水期,汉江干流流量减小、水位较低、断面流速较小,是水华发生的因素之一(陈根祥等,2002;王红萍等,2004);水体中氮磷含量较高,也是触发水华的必要条件(张家玉等,2000;窦明等,2002)。以上3种因素与硅藻水华的发生密切相关,并缺一不可。

本研究在2015-2016年冬春季汉江水华期间,每日进行干流沿线的浮游植物和环境监测,结合水华发生期干流流量的变化,分析营养盐结构变化与水华发生的关联性以及干流流量对水华发生和维持的影响,旨在为控制汉江水华和水利调度提供科学决策依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

2015年2月22日汉江中下游干流据报发生水华,持续至3月2日,湖北省水利厅与长江防总采取联合调度措施后,水华迅速消亡;2016年3月1日起,湖北省环保厅接荆门市环保局上报汉江硅藻水华,持续至于3月9日,水利调度下泄流量后迅速消亡。2015-2016年春季,汉江中下游硅藻水华自襄阳以下全流域发生,因水利调度的干预而中止,发生时间约10 d。水华发生期间,对汉江干流进行水样理化指标监测与每天1次的浮游植物水样采集(图

收稿日期:2016-12-22

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502210);国家自然科学基金(41301097;51279011)。

作者简介:吴兴华,1979年生,女,博士,工程师,主要从事浮游植物生理生态学研究。E-mail: wenluo8015@126.com

1)。自丹江口水库坝下开始,设置8个样点,即黄家港(X1)、襄阳(X2)、皇庄(X3)、沙洋(X4)、兴隆闸(X5)、泽口(X6)、仙桃(X7)、蔡甸(X8);其中X1、X3、X5和X7也是干流水文站监测断面。

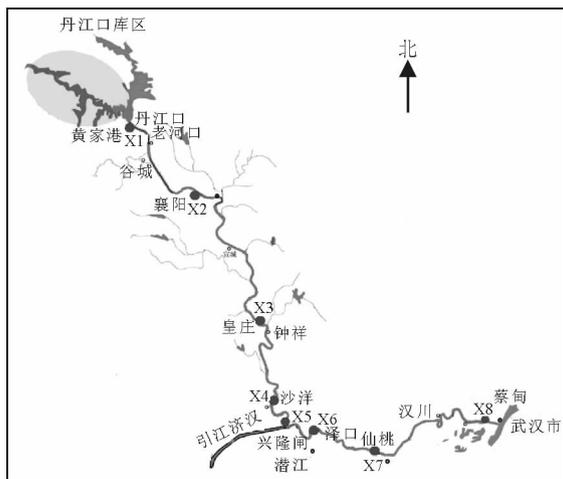


图1 汉江中下游干流采样点示意

Fig.1 Location of the sampling sites in the middle and lower reaches of Hanjiang River

1.2 样品采集与测定

1.2.1 环境指标 以 YSI-650 多参数水质分析仪现场检测溶解氧(DO)、水温(T)和 pH 值。每样点采集 500 mL 水样,暂存于 4℃ 的便携式冰箱,带回实验室按《水和废水检测分析方法》(第 4 版)进行总氮(TN)和总磷(TP)的检测。Kritiansen 等(2001)认为硅是春季水华期间初级生产力的控制因子,水体中的溶解性硅酸盐将不断转化为硅藻细胞壁上的硅。因此每个样点采集 500 mL 进行水中溶解性硅酸盐含量测定,方法参照美国地质调查局(U S Geological Survey,1989)提供的分析方法。

1.2.2 浮游植物 采用 25 号浮游生物网在表层水呈“∞”字形拖曳 3~5 min,捞取样品放入 100 mL 广口瓶,加入 4% 的甲醛溶液固定,显微镜下镜检鉴定到属(胡鸿钧和魏印心,2006)。定量样品直接采水样 1 L,加入 10 mL 的 Lugol 液固定,以沉降器将样品沉淀 96 h,虹吸上清液后,将水样浓缩到 30 mL,保存并计数。浮游植物的定量和定性实验室分析均使用 Olympus BX43 光学显微镜观测,定性分析鉴定其所属门类,定量分析采用浮游植物计数框,获得细胞密度(个/L)。

1.3 数据统计与分析

干流 4 个水文站(X1、X3、X5、X7)的日流量原始数据来源于湖北省南水北调局官方网站公布的水情信息(<http://www.hbnsbd.gov.cn/>)。

以 Origin 8.5 统计浮游植物定量数据并绘制图表。利用 SPSS 13.0 软件,以 Pearson 相关性系数进行双侧检验,分析硅藻水华密度与 TN、TP、硅酸盐、DO、水温和 pH 等环境因子的相关性;以 R 软件逐步向前回归方法拟合的多元线性回归模型,分析水华持续期采样时间、采样点位之间的上下游关系与细胞密度的相关性。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类与密度组成

2015 年和 2016 年春季汉江干流水华发生期,共检测出浮游植物 7 门(甲藻门、裸藻门、蓝藻门、隐藻门、金藻门、绿藻门和硅藻门)、31 属(表 1)。其中,硅藻门最多,在各点位占据其检出物种的 29%(X3)至 48%(X6);其次是绿藻门,2016 年在 X7 处检出物种最少,占总数的 20%,X1 处检出最多,占总数的 35%。2015 年和 2016 年,其余检出各门浮游植物的差别并不大,甲藻门、金藻门是偶见种,甲藻门在 X1、X2、X3、X4 偶见少量,之后并未检测到;金藻门仅在 X1 和 X3 见到,其余点位都未检测到。2015 年浮游植物种类最多的是 X8,检测到有 29 属,最少的是 X5,检出 24 属。2016 年浮游植物种类最多的是 X3,有 31 属;最少的是 X1,仅有 23 属。在水华发生期,干流各点位浮游植物种类组成并无显著差异。

2015 年和 2016 年春季,汉江干流浮游植物的密度分布从上游至下游有显著的空间差异(图 2)。春季水华发生期,从 X3 皇庄至 X8 蔡甸,每个站点的优势种均为冠盘藻属(*Stephanodiscus*) (郑凌凌等,2009),其生物量占比均在 95% 以上;X3 皇庄以下在水华期的细胞密度均高于 10^7 个/L,X1 黄家港和 X2 襄阳均在 10^6 个/L 或以下;2015 年 X6 泽口在水华期浮游植物细胞密度的平均值最高,超过 4.0×10^7 个/L,X4 沙洋次之,为 3.0×10^7 个/L,除上游 X1 和 X2 外,X3 皇庄最低,约为 1.0×10^7 个/L;2016 年 X3 皇庄到 X5 仙桃的细胞密度均超过了 3.0×10^7 个/L,最高为 X4 沙洋,接近 4.0×10^7 个/L,除上游 X1 和 X2 外,X6 泽口最低,约为 1.0×10^7 个/L。

2.2 理化指标与浮游植物密度的关系

表 2 所示为 2015-2016 年汉江中下游干流水华发生期理化指标均值。2015 年干流 DO 值 X1 皇庄最低,为 8.57 mg/L,X5 兴隆闸最高,为 19.10 mg/L;2016 年干流 DO 值 X4 沙洋最低,

表 1 2015–2016 年汉江水华期各样点浮游植物的种类组成

Tab. 1 Phytoplankton community composition in the Hanjiang River during the diatom bloom period (2015–2016)

浮游植物	X1		X2		X3		X4		X5		X6		X7		X8		
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	
甲藻门 Pyrrophyta	1	1	3	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
裸藻门 Euglenophyta	1	1	1	0	1	3	2	1	0	2	2	1	1	1	1	1	1
蓝藻门 Cyanophyta	5	4	4	6	5	7	6	5	5	6	5	4	6	8	7	6	6
隐藻门 Cryptophyta	1	1	1	2	2	2	2	1	4	3	3	2	2	1	2	3	3
金藻门 Chrysophyta	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
绿藻门 Chlorophyta	7	8	8	8	7	8	6	8	6	5	7	6	6	5	8	9	9
硅藻门 Diatom	8	7	10	12	8	9	10	12	9	9	8	12	11	10	11	9	9
合计	24	23	27	30	26	31	27	27	24	25	25	25	26	25	29	28	28

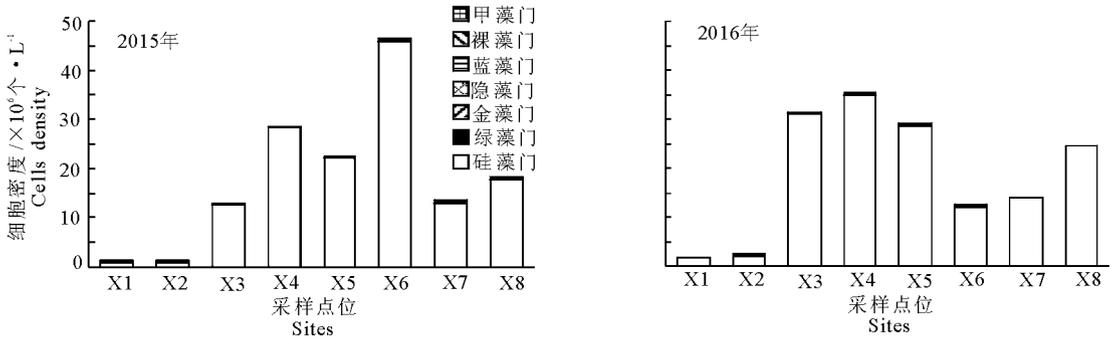


图 2 汉江中下游 2015–2016 年水华期浮游植物群落组成

Fig. 2 Cell density composition of phytoplankton at each sampling site during diatom bloom period of the middle and lower Hanjiang River (2015–2016)

为 10.91 mg/L, X6 泽口最高, 为 15.83 mg/L, 这也体现了高密度的硅藻细胞充满在水柱中, 其持续的光合放氧造成了水中 DO 过饱和情况。2015 年干流水温 X1 黄家港最低为 9℃, 最高为 X3 皇庄 14℃; 2015 年干流水温 X1 黄家港最低为 12℃, 最高为 X8 蔡甸 16.20℃。2015 年干流水华期 pH 为 7.90 ~ 8.86, 2016 年 pH 在 8.05 ~ 9.03, 无较大波动。2015 年干流 X7 仙桃总氮浓度最低, 为 0.84 mg/L, X3 皇庄最高, 为 1.53 mg/L; 2016 年干流总氮浓度最低在 X2 襄阳, 为 1.24 mg/L, 最高为 X6 泽口的 1.67 mg/L。2015 年干流总磷 X2 皇庄和 X7 仙桃最低, 为 0.03 mg/L, 最高在 X1 黄家港, 为 0.12 mg/L。2015 年汉江干流水体溶解性硅酸盐在 X2 皇庄最低

为 3.82 mg/L, 在 X6 泽口最高, 为 9.21 mg/L; 2016 年则 X1 黄家港最低, 为 2.21 mg/L, X4 沙洋最高, 为 5.67 mg/L。

表 3 是水质理化指标与浮游植物细胞密度 (主要是冠盘藻密度) 的相关性分析。浮游植物细胞密度与 DO、T、pH、TN 和 TP 无显著相关。细胞密度与水体 TSi 有非常显著的正相关性, 同时水华细胞密度与营养盐结构 TSi/TN 也呈现非常显著的正相关性, 两者的 Pearson 系数分别为 $r = 0.858$ 和 0.941 , $P < 0.01$, 这与余立华等 (2006) 发现硅藻水华与水体中氮和硅氮营养结构相关的结论一致。DO 和 pH 呈现显著正相关 ($r = 0.800$, $P < 0.05$)。其余水质理化指标间无显著相关。

表 2 2015–2016 年汉江水华发生期的环境因子监测结果

Tab. 2 Environmental factors during the diatom bloom period of Hanjiang River (2015–2016)

点位	溶氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		水温/ $^{\circ}\text{C}$		pH		总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		硅酸盐/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
X1(黄家港)	8.57	11.00	9.00	12.00	8.07	8.21	1.35	1.31	0.12	0.10	4.45	2.21
X2(襄阳)	11.31	11.32	11.00	13.00	8.23	8.05	1.41	1.24	0.03	0.06	3.82	3.15
X3(皇庄)	11.23	12.01	14.00	13.00	8.08	8.78	1.53	1.27	0.05	0.09	7.86	4.83
X4(沙洋)	11.00	10.91	11.50	13.00	7.92	9.03	1.30	1.43	0.10	0.06	8.45	5.67
X5(兴隆闸)	19.10	12.23	10.00	13.00	8.86	8.62	1.45	1.32	0.09	0.11	8.17	5.00
X6(泽口)	13.74	15.83	9.10	13.00	8.91	8.50	1.21	1.67	0.08	0.17	9.21	4.41
X7(仙桃)	10.00	11.00	10.00	13.00	7.90	8.72	0.84	1.41	0.03	0.10	4.66	3.62
X8(蔡甸)	12.20	13.06	13.80	16.20	8.55	8.50	1.12	1.42	0.06	0.07	6.43	5.29

表3 2015–2016年汉江水华期浮游植物密度与水质理化指标参数的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between phytoplankton density and the physiochemical parameters of water body during the diatom bloom period in Hanjiang River (2015–2016)

指标	细胞密度	DO	T	pH	TN	TP	TSi	TSi/TN
细胞密度	1.00							
DO	0.456	1.00						
T	0.089	-0.027	1.00					
pH	0.557	0.800 *	-0.120	1.00				
TN	-0.157	0.285	0.053	0.161	1.00			
TP	0.210	0.056	-0.088	0.125	0.260	1.00		
TSi	0.858 **	0.558	0.379	0.490	0.252	0.315	1.00	
TSi/TN	0.941 **	0.381	0.321	0.403	-0.318	0.145	0.836 **	1.00

注:(1) DO、T、TN、TP、TSi 分别表示溶解氧、水温、总氮、总磷和总硅酸盐;(2) “*”和“**”分别表示显著水平为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

Notes: (1) DO, T, TN, TP and TSi represent dissolved oxygen, water temperature, total nitrogen, total phosphorus and total silicate, respectively;

(2) * indicates significant correlation ($P < 0.05$) and ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$).

2.3 干流流量与浮游植物密度的关系

结合2015–2016年水华发生期4个水文站流量数据,分析同一位置浮游植物细胞密度随流量的变化。

2015年水华发生期(图3),X1黄家港的浮游植物细胞密度从 4.0×10^5 个/L 在9 d内超过 1.5×10^6 个/L;而流量前8 d在 $600 \sim 700 \text{ m}^3/\text{s}$,第9天降低至 $450 \text{ m}^3/\text{s}$;X3皇庄的浮游植物细胞密度从 2.0

$\times 10^6$ 个/L 增加至 1.7×10^7 个/L,流量前6 d从 $980 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低到 $820 \text{ m}^3/\text{s}$,之后3 d增加至 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$;X5兴隆闸的浮游植物细胞密度从 1.0×10^7 个/L 增加至 3.5×10^7 个/L,流量前6 d从 $850 \text{ m}^3/\text{s}$ 波动后降低到 $710 \text{ m}^3/\text{s}$,之后3 d稍有波动;X7仙桃的浮游植物细胞密度从 1.0×10^7 个/L 增加至 1.9×10^7 个/L,流量前7 d从 $830 \text{ m}^3/\text{s}$ 波动后降低到 $760 \text{ m}^3/\text{s}$,之后3 d稍有波动。

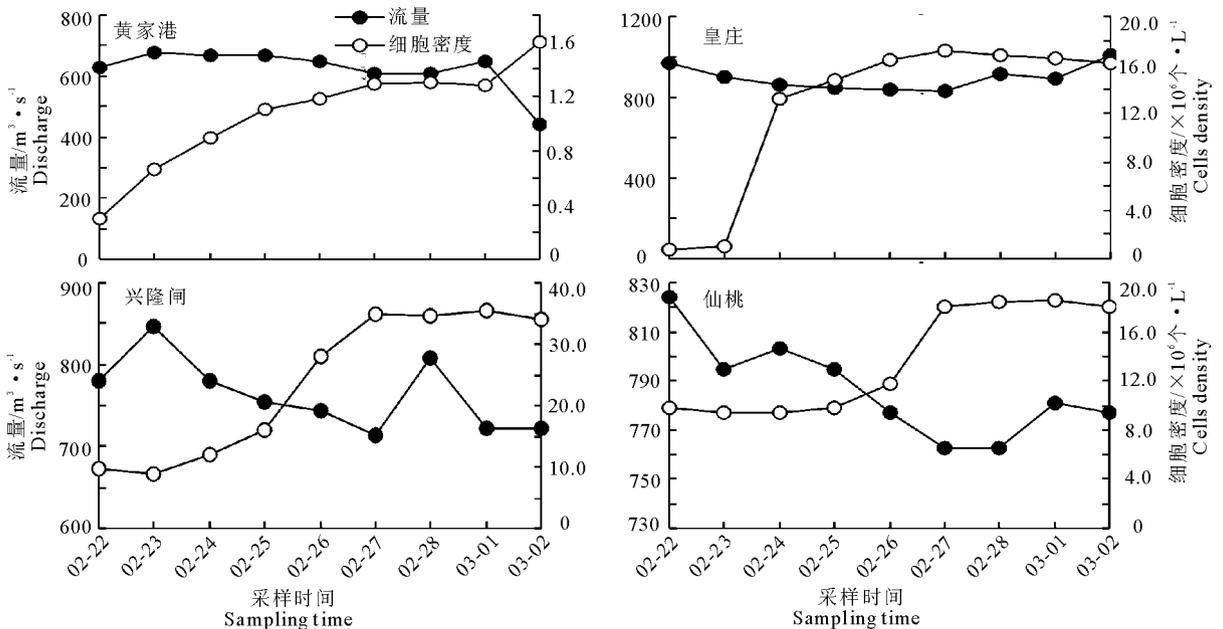


图3 汉江中下游2015年水华期干流流量与细胞密度的关系

Fig.3 Correlation between phytoplankton density and flow discharge during the diatom bloom period in Hanjiang River(2015)

自2016年3月1日开始监测水华(图4),X1黄家港的浮游植物细胞密度从 5.2×10^6 个/L 增加至 8.0×10^6 个/L,而流量前7 d在 $380 \sim 600 \text{ m}^3/\text{s}$,第3~6天流量恒定在接近 $600 \text{ m}^3/\text{s}$,第7天降低至 $380 \text{ m}^3/\text{s}$,后2 d略有上升,在 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右波动;

X3皇庄的浮游植物细胞密度从 1.9×10^7 个/L 增加至 4.0×10^7 个/L,流量从 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $780 \text{ m}^3/\text{s}$;X5兴隆闸的浮游植物细胞密度前4 d从 2.5×10^7 个/L 降低至 2.0×10^7 个/L,后5 d增加至 3.0×10^7 个/L,流量前4 d从 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至

760 m³/s, 之后 3 d 稍有波动; X7 仙桃的浮游植物细胞密度从 1.0 × 10⁷ 个/L 增加至 1.9 × 10⁷ 个/L, 后

3 d 略有降低, 最终到达 1.4 × 10⁷ 个/L, 流量前 7 d 在 550 m³/s 波动, 后上升到 650 m³/s。

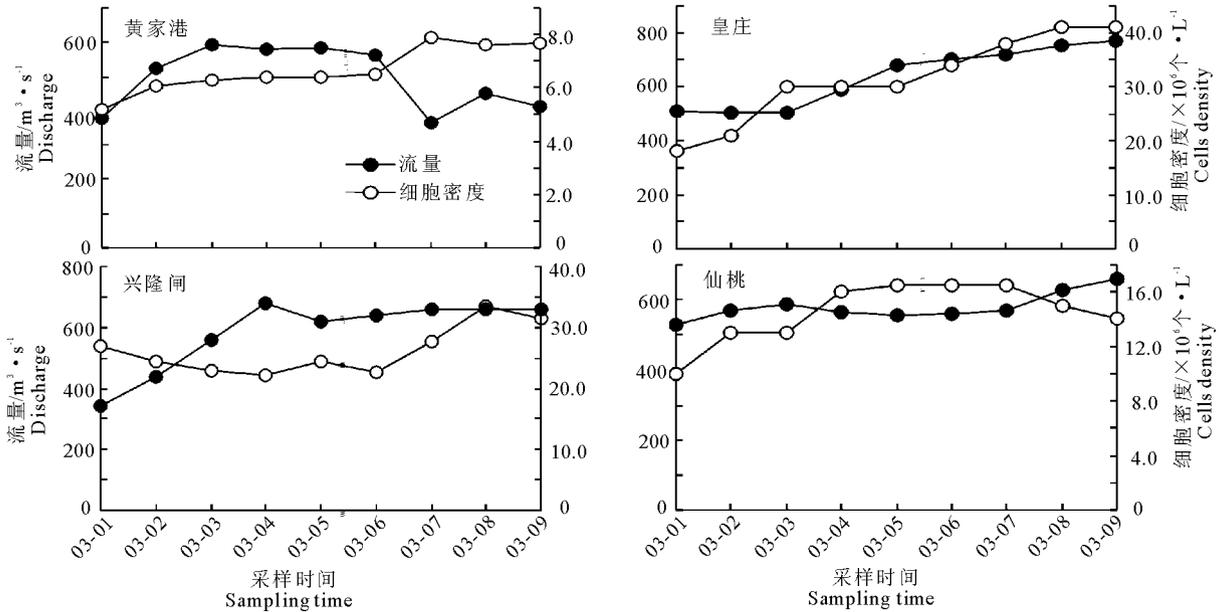


图 4 汉江中下游 2016 年水华期干流流量与细胞密度的关系

Fig. 4 Correlation between the phytoplankton density and flow discharge during the waterbloom period in Hanjiang River (2016)

以往的相关研究显示, 汉江水华的发生与枯水期流量降低相关(谢平, 2004b; 王红萍等, 2004)。本研究考虑采样点位置的上下游关系和采样时间对水华发生与发展的交互影响作用, 通过逐步向前回归方法拟合浮游植物细胞密度与流量的多元线性回归模型结果如表 4 所示。

采样时间、采样点位之间的上下游关系均与细胞密度呈极其强烈的显著正相关 ($P < 0.001$), 流量与细胞密度呈极其显著的正相关 ($P < 0.01$), 但考虑点位之间的上下游地理位置关系导致的流量叠加或削减效应, 流量实际上与细胞密度呈现极其强烈的显著负相关 ($P < 0.001$)。

表 4 多元线性回归模型解释汉江水华期浮游植物细胞密度与流量的相关性

Tab. 4 Multiple linear regression models indicating correlation of phytoplankton density with flow discharge during the diatom bloom period in Hanjiang River.

因变量	线性模型	r^2_{adj}	AIC	F
Cell	$0.07^{***} S$	0.25	9.30	13.10
	$0.46^{***} S - 0.187^{***} S \times Q$	0.65	-17.20	33.90
	$-0.24^{**} + 0.41^{***} S + 0.03^{**} T - 0.16^{***} S \times Q$	0.71	-22.80	29.58
	$-1.89^{**} + 0.66^{***} S + 0.05^{***} T + 0.95^{**} Q - 0.31^{***} S \times Q$	0.77	-30.54	30.62

注: (1) Cell 代表细胞密度, S 指代表采样点位(上下游关系), Q 指流量, T 为采样时间; 模拟逐步拟合的完整公式为: $Cell = a + b \times T + c \times S + d \times Q + e \times S \times D$, 其中 a, b, c, d, e 为模型系数; r^2_{adj} 指校准 r^2 值, AIC 指 Akaike Information Criterion; *** 表示显著水平 $P < 0.001$; ** 表示显著水平 $0.001 < P < 0.01$ 。

Notes: (1) Cell represents cell density, S represents the upstream and downstream relationships of the sites, Q represents discharge, T represents sampling time; The complete formula for simulating progressive fits is: $Cell = a + b \times T + c \times S + d \times Q + e \times S \times D$, a, b, c, d, and e are model coefficients; (2) r^2_{adj} represents adjusted r^2 , AIC represents Akaike Information Criterion; (3) *** indicates very highly significant correlation ($P < 0.001$); ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 硅藻水华与气候因素的关系

有研究认为, 汉江硅藻水华的发生与气候因素密切相关。汉江冬春季如遇持续高温(10 ~ 20℃)、

天气晴好、光照充足, 将会导致硅藻水华发生(况琪军等, 2000; 窦明等, 2002; 李春青等, 2007)。彭虹等(2002)对汉江中下游进行水质模型的研究, 模拟结果显示汉江硅藻水华在枯水期发生的天气条件是水温 6℃ 以上、光照充足时; 汉江硅藻水华多年被认为

是小环藻,2005年分子鉴定为冠盘藻(*Stephanodiscus*)(郑凌凌等,2009);之后进行其光强应答机制的生理学研究表明,该优势种的最适生长光强为2 000~5 000 lx,也最接近野外水华发生时期的光照条件(殷大聪等,2012)。本研究监测的2015-2016年水华发生期,水温持续在10~15℃,适宜冠盘藻生长,这也与前期开展实验室研究冠盘藻对冬春季低温的生理适应一致(殷大聪等,2012)。

3.2 硅藻水华与水质理化因素的关系

水体中溶解性硅酸盐与硅藻水华的发生有密切联系,有研究认为水体中硅元素含量较高,会使得硅藻在生长竞争中处于有利地位而成为优势种群(Tsunogai,1979;Tsunogai & Watanabe,1983);由于冬春季气温较低,硅藻承受较低的捕食压力,水体中较高浓度的硅酸盐有机会大量转化为硅藻细胞壳质,使可溶性硅酸盐成为春季水华初级生产力的重要控制因子。湖北省近年的水环境质量公报显示,汉江的13条一级支流中,蛮河、竹皮河、唐白河、天门河等多条河流水质较差,其氨氮、COD等指标严重超标;而中下游支流输入的营养负荷极大的影响了干流水质。随着经济发展,外源营养物质的不断增加,导致汉江水体污染负荷逐年增加,其中氮磷指标的上升尤为显著(窦明等,2002;谭铁强等,2002;王红萍等,2004);殷大聪等(2012)认为汉江硅藻水华与水体总氮和硅酸盐有显著的正相关。本研究重点关注在水华发生的过程中,水体中硅氮比对细胞密度的影响,结果不仅显示水华的增长与硅酸盐相关,更具相关性的是水体硅氮比营养结构。余立华等(2006)曾提出水中无机氮和硅氮比对三峡水库浮游植物的影响,而汉江中下游由于经济发展产生COD和氨氮等有机氮源和无机氮的增加,历年发生硅藻水华导致对水体中硅酸盐的截留沉积,经过日积月累,促使在汉江中下游的一些河段如沙洋、泽口等地出现硅氮比较大的现象,为硅藻水华的发生创造了合适的营养结构条件(成庆利和王文林,2007)。

3.3 硅藻水华与流量因素的关系

曾经发生过硅藻水华的1992年、1998年和2000年,皇庄、沙洋、仙桃水文站的流量平均值均在425 m³/s,水华期仙桃和武汉宗关断面的流速分别为0.59~0.75 m/s和0.13~0.21 m/s(殷大聪等,2012)。枯水期本身水量较少,丹江口水库下泄流量不足,导致汉江中下游流量小、流速慢,是以往研究者一致认识到水华发生的原因之一。谢敏等

(2006)认为汉江硅藻水华发生的临界流量在500 m³/s左右;王红萍等(2004)通过建立藻类浓度与流速的函数关系,认为在宗关断面发生水华的警戒流速为0.225 m/s。本研究认为,流量低是引发水华发生的原因之一,但其中应考虑上游传输给下游硅藻种源的生物量叠加作用,上游至下游各监测点位间距和水流传输时间的差异,导致硅藻水华的生物量有所差异。如2016年春季水华发生期,长江防总要求丹江口和王甫洲枢纽出库流量同步加大至600 m³/s,之后按日均600 m³/s下泄,很快控制了硅藻水华,其生物量的降低从上游至下游有时间延迟效应。

4 结论

(1)汉江硅藻水华的发生与水体中TSi和TSi/TN等营养盐显著正相关,说明汉江中下游城镇发展与支流汇入带来营养盐的负荷仍为硅藻水华的发生提供了条件,其中N和Si是最重要指标。

(2)水华出现后,随着其发展,其优势种冠盘藻(*Stephanodiscus*)的细胞密度逐渐增加,但其增加与监测点所在的位置与流量有密切的联系;越往下游,离丹江口大坝越远,其浮游植物细胞密度越大,但综合考虑地理位置引起的上游水华种源积累与流量的交互作用,细胞密度与流量呈极其强烈的显著负相关,说明冬春季流量较低是水华发生的水文因素。

(3)为防控冬春季汉江中下游出现硅藻水华,建议对干流和一级支流控源截污,减少COD、总氮和硅酸盐等的污染输入,减轻营养负荷;冬春季在持续高温和强日照天气出现时,需警惕形成低流量(<500 m³/s)低流速水文条件,应协调水利调度加大流量,避免硅藻水华的产生。

参考文献

- 陈根祥,胡高平,张德兵,2002. 汉江发生“水华”的水文因素[J]. 长江职工大学学报,19(1):57-58.
- 成庆利,王文林,2007. 丹江口水库水体三氮时空变化特征分析[J]. 河南农业大学学报,41(1):52-55.
- 窦明,谢平,夏军,等,2002. 汉江水华问题研究[J]. 水科学进展,13(5):557-561.
- 胡鸿钧,魏印心. 2006. 中国淡水藻类系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 况琪军,谭渝云,万登榜,等,2000. 汉江中下游江段藻类现状调查及“水华”成因分析[J]. 长江流域资源与环境,9(1):63-70.
- 李春青,叶闯,普红平,2007. 汉江水华的影响因素分析及控

- 制方法初探[J]. 环境科学导刊, 26(2): 26 - 28.
- 梁开学, 王晓燕, 张德兵, 等, 2012. 汉江中下游硅藻水华形成条件及其防治对策[J]. 环境科学与技术, 35(12): 113 - 116.
- 卢大远, 刘培刚, 范天俞, 等, 2000. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 13(2): 28 - 31.
- 彭虹, 郭生练, 2002. 汉江下游河段水质生态模型及数值模拟[J]. 长江流域资源与环境, 11(4): 363 - 369.
- 谭铁强, 黄渤, 徐立, 等, 2002. 汉江枯水期藻类生长调查[J]. 环境与健康杂志, 19(2): 136 - 137.
- 王红萍, 夏军, 谢平, 等, 2004. 汉江水华水文因素作用机理 - 基于藻类生长动力学研究[J]. 长江流域资源与环境, 13(3): 282 - 285.
- 谢敏, 王新才, 管光明, 等, 2006. 汉江中下游“水华”成因分析及其对策初探[J]. 人民长江, 37(8): 43 - 45.
- 谢平, 夏军, 窦明, 等, 2004a. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(I): 汉江水华发生的关键因子分析[J]. 自然资源学报, 19(4): 418 - 423.
- 谢平, 夏军, 窦明, 等, 2004b. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(II): 汉江水华发生的概率分析与防治对策[J]. 自然资源学报, 19(5): 546 - 549.
- 殷大聪, 黄薇, 吴兴华, 等, 2012. 汉江水华硅藻生物学特性初步研究[J]. 长江科学院院报, 29(2): 6 - 10.
- 殷大聪, 郑凌凌, 宋立荣, 2011. 汉江中下游早春冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*) 水华暴发过程及其成因初探[J]. 长江流域资源与环境, 20(4): 451 - 458.
- 余立华, 李道季, 方涛, 等, 2006. 三峡水库蓄水前后长江口水域夏季硅酸盐、溶解无机氮分布及硅氮比值的变化[J]. 生态学报, 26(9): 2817 - 2826.
- 张家玉, 罗莉, 李春生, 等, 2000. 南水北调中线工程对汉江中下游生态环境影响研究[J]. 环境科学与技术, 90(S1): 1 - 31.
- 郑凌凌, 宋立荣, 吴兴华, 等, 2009. 汉江硅藻水华优势种的形态及 18s rDNA 序列分析[J]. 水生生物学报, 33(3): 562 - 564.
- Kristiansen S, Farbro T, Naustvoll L, 2001. Spring bloom nutrient dynamics in the Oslofjord[J]. Marine Ecology Progress Series, 219: 41 - 49.
- Tsunogai S, 1979. Dissolved silica as the primary factor determining the composition of phytoplankton classes in the ocean[J]. Bulletin Faculty Fisheries Hokkaido University, 30: 314 - 322.
- Tsunogai S, Watanabe Y, 1983. Role of dissolved silicate in the occurrence of a phytoplankton bloom[J]. Journal of Oceanography, 39: 231 - 239.
- U S Geological Survey, 1989. Methods for the Analysis of Inorganic Substances in Water and Fluvial Sediments (Third Edition)[M]. Washington: United States Government Publishing Office.

(责任编辑 万月华)

Analysis of Factors Influencing Diatom Blooms in the Middle and Lower Hanjiang River

WU Xing-hua¹, YIN Da-cong², LI Chong¹, CHEN Lei¹, LI Yuan¹, ZHAO Ying¹

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100081, P. R. China;

2. Water Resources Department, Yangtze River Science Research Institute, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: The middle and lower Hanjiang River (downstream of Danjiangkou Dam) provide drinking water for the people of 24 cities and counties along the river. However, diatom blooms have occurred frequently in winter and spring for nearly ten years, since 2008, and the duration has gradually extended, posing a threat to drinking water safety. To explore the causes of diatom blooms and provide scientific evidence for bloom control and water project operations in Hanjiang River, we carried out intensive monitoring of qualitative and quantitative indices of phytoplankton and physical and chemical indices of water quality (total nitrogen, total phosphorus, silicate, water temperature, pH and dissolved oxygen) in these sections during the bloom period in the early spring of 2015 and 2016. The correlation between physicochemical indices of water quality and algal cell density and the relationship of diatom cells density to flow discharge were analyzed. In the spring of 2015 – 2016, the diatom algae bloom occurred from Xiangyang to the lower reaches and lasted 10 days each year. During the bloom, monitoring of phytoplankton and water quality was carried out once a day at eight sampling sites: X1, Huangjiagang; X2, Xiangyang; X3, Huangzhuang; X4, Shayang; X5, Xinglongzha; X6, Zekou; X7, Xiantao; X8, Caidian. The integrated hydrological data was provided by hydrological stations of the middle and lower reaches of Hanjiang River. A total of 31 phytoplankton genera from eight phyla were detected during the investigation, with absolute dominance of Bacillariophyta at all sampling sites; accounting for 29% – 48% of the total phytoplankton species at each site. Phytoplankton cell density varied significantly among sampling sites. Phytoplankton cell density was $> 10^7$ cells/L below the Huangzhuang section (X3 – X8) during the bloom period, and the dominant species was *Stephanodiscus*, accounting for more than 95% of the biomass at all sampling sites. Phytoplankton cell density was not significantly correlated with DO, temperature, pH, TN and TP, but there was a significant positively correlation with silicate concentration and the silicon to nitrogen ratio ($r = 0.858$ and 0.941 , $P < 0.01$). Because of the interaction of distance between sites and sampling time, the relationships between sampling time, distance of the sampling sites and cell density was analyzed by using stepwise regression and fit to a multiple linear regression model. The results showed a positive correlation between cell density, sampling time and distance between sampling sites that was very highly significant ($P < 0.001$), as was the negative correlation with flow discharge ($P < 0.001$). Causative factors for diatom blooms include suitable climatic conditions (extended periods of relatively high water temperature and strong solar radiation) in early spring, high Si/N, and low discharges. Two suggestions are made to prevent diatom blooms in Hanjiang River: (1) Decrease pollution inputs from towns in the Hanjiang River basin, particularly for total nitrogen and silicate, and (2) monitor discharge at critical sites (Shayang, Qianjiang and Xiantao) in early spring. When discharge is less than $500 \text{ m}^3/\text{s}$, local water conservancy departments should coordinate efforts to increase flow discharge sufficiently to prevent diatom blooms.

Key words: Hanjiang River middle and lower reaches; diatom bloom; Si/N