

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.021

梯级水库输水线路伪鱼腥藻属时空分布特征及影响因子分析

赵静静¹, 张可方¹, 高静思², 朱佳²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;

2. 深圳职业技术学院城市水良性循环利用工程技术开发中心, 广东 深圳 518055)

摘要:根据中国南方某城市 A、B、C 3 座重要的地表供水和原水调蓄梯级水库输水线路上 2013 年 5 月—2014 年 6 月水环境理化指标和伪鱼腥藻属监测数据,从生物和环境的角度来探究梯级水库输水线路伪鱼腥藻属时空分布特征,应用相关分析法对伪鱼腥藻属细胞密度与其环境影响因子进行相关性分析。结果表明:①伪鱼腥藻属细胞密度有明显的季节变化趋势,且季节性变化与水温显著相关($P<0.05$)。②伪鱼腥藻属细胞密度在垂直方向上分布出现 3 种类型:a 层>b 层>c 层,b 层>a 层>c 层,c 层>a 层或 b 层。③伪鱼腥藻属细胞密度沿梯级水库输水线路直线增加。④伪鱼腥藻属细胞密度与水温 and TP 质量浓度呈显著正相关($P<0.05$),与 TN 和 TP 的浓度比呈显著负相关($P<0.01$)。

关键词:梯级水库;输水线路;伪鱼腥藻属;时空分布特征;影响因子;相关分析

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)03-0111-06

Characteristics of temporal and spatial distribution of *Pseudoanabaena* sp. in water transfer route of cascade reservoirs and analysis of influencing factors

ZHAO Jingjing¹, ZHANG Kefang¹, GAO Jingsi², ZHU Jia²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. The Engineering Technology Development Center of Urban Water Recycling, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: According to the water environmental physicochemical indices and *Pseudoanabaena* sp. monitoring data from May 2013 to June 2014 in the water transfer route of three important cascade reservoirs in a city in southern China, the characteristics of temporal and spatial distribution of *Pseudoanabaena* sp. were examined from biological and environmental perspectives, and the correlation between the cell density of *Pseudoanabaena* sp. and environmental factors was studied through correlation analysis. The results are as follows: (1) The cell density of *Pseudoanabaena* sp. has an obviously seasonal variation trend, which is significantly correlated with water temperature ($P<0.05$). (2) The cell density of *Pseudoanabaena* sp. exhibits three types of distribution in the vertical direction: layer a>layer b>layer c; layer b>layer a>layer c; and layer c>layer a or b, respectively. (3) The cell density of *Pseudoanabaena* sp. increases significantly along the water transfer route of the cascade reservoirs. (4) The cell density of *Pseudoanabaena* sp. was significantly positively correlated with water temperature and total phosphorus ($P<0.05$), and significantly negatively correlated with the ratio of TN to TP ($P<0.01$).

Key words: cascade reservoir; water transfer route; *Pseudoanabaena* sp.; temporal and spatial distribution characteristics; influencing factors; correlation analysis

作者简介:赵静静(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水体修复。E-mail:314353781@qq.com

通信作者:高静思,工程师。E-mail:gaojs0420@qq.com

我国可利用淡水资源有限,水库是人民生活中重要的饮用水资源。截至目前,几乎每座地表供水水库都存在一定程度的富营养化问题^[1-3]。蓝藻是原核生物中最原始、最古老的藻类植物,包括单细胞和丝状体两种类型。蓝藻基于分布广、环境适应性强、能够自主调节水体垂直位置等特点使其成为多数富营养化水体中的主要藻属^[4-6]。近几年蓝藻事件频发,如太湖、滇池、巢湖等湖泊及部分供水水库^[7]均遭受不同程度蓝藻侵袭。目前我国对藻类研究多集中在形成“赤潮”和“水华”的微囊藻、聚球藻、多甲藻、塔玛亚历山大藻^[8-13]等少量藻种上,但对于蓝藻门中伪鱼腥藻属的研究却鲜有报道。伪鱼腥藻是一种丝状蓝藻^[14-15],常见于水库、鱼虾池^[16-19]中,其在水体中大量繁殖会产生藻毒素、肝毒素、二甲基异次醇等代谢产物,使水体臭味异常,产生的毒素严重威胁人类身体健康。

笔者以南方某城市 A、B、C 3 座重要的地表供水和原水调蓄串联梯级水库群为研究对象。3 座水库的基本信息如下:①A 水库,总库容 3 239 万 m³,集雨面积 29 km²,年平均径流量 2 664 万 m³,年平均降雨量 1 578 mm,最大水深 29.6 m;②B 水库,总库容 9 950 万 m³,集雨面积 64 km²,年平均径流量 5 760 万 m³,年平均降雨量 1 345.7 mm,最大水深 23.8 m;③C 水库,总库容 3 200 万 m³,集雨面积 15 km²,年平均径流量 3 691.9 万 m³,年平均降雨量 1 597.3 mm,最大水深 17.8 m。3 座水库均为兼有防洪、供水、调蓄功能的水库;3 座水库同以上游河流来水为水源,形成了上下游串联而成的水库群。水库群在一定程度上能相互协作、共同调节径流,满足流域中各部门的多种取水需求。基于“水力互通”的特点,水库群中任一水库流域水体被污染将会对整个流域的水环境造成影响。因此,研究梯级水库群输水线路上的优势藻种时空分布特征,识别输水线路沿线藻类风险高观点位,分析其主要影响因子,对掌握梯级水库群总体水质情况、确定联调联控方案具有重要意义。

通过对 2013 年 5 月—2014 年 6 月梯级水库群输水线路上伪鱼腥藻属及水深、透明度、水温、pH 值、浊度、DO、TN、TP 等水环境质量理化指标的监测数据进行综合分析,掌握了伪鱼腥藻属在输水线路上的时空分布特征及主要影响因子,对确保城市安全供水具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选取南方某城市 A、B、C 3 座重要的地表供水和原水调蓄水库,3 座水库之间相互联通,可

以联合调度。

1.2 采样点(层)布设

分别选取梯级水库 A、B、C 的进水口、库心、出水口作为采样点位(图 1),每次采样采用 GPS 定位确定具体位置。采样点编号沿着输水线路依次设置为 S1→S2→S3→S4→S5→S6→S7→S8→S9。

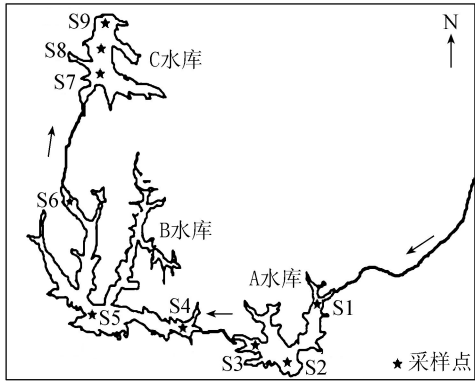


图 1 梯级水库输水线路点位布置

每个采样点分 3 层采集水样,分别为:表层 a 层(约水面下 20 cm 水层)、透光层 b 层(所测透明度深度所在水层)、底层 c 层(底泥上方约 10 cm 水层)。

1.3 研究方法

本研究采样时间为 2013 年 5 月—2014 年 6 月,采样频率为 A、B、C 水库每月各 1 次,总计 42 次。水样采集、藻类鉴定等参考湖泊富营养化调查规范等资料^[20-22]。水温、pH、DO、浊度采用 YSI 多参数水质监测仪现场实测,透明度 SD 采用塞氏盘现场实测,TN 采用碱性过硫酸钾氧化法,TP 采取 GB 11893—1989《钼酸铵分光光度计法》,藻类细胞密度的测定方法依照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行检测。

1.4 数据处理

数据均采用 Origin8.5 软件作图,采用统计软件 IBM. SPSS20.0 进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 伪鱼腥藻属细胞密度季节分布特征

2013 年 5 月—2014 年 6 月梯级水库伪鱼腥藻属监测数据中伪鱼腥藻属细胞密度最低为 3.9×10^4 个/L,最高为 3.56×10^7 个/L,平均密度变化范围为 $1.34 \times 10^6 \sim 1.45 \times 10^7$ 个/L。伪鱼腥藻属细胞密度占总细胞密度百分比最低为 0.8%,最高为 77.5%,平均百分比变化范围为 6.16%~34.41%。伪鱼腥藻属细胞平均密度和平均百分比随时间变化值均以输水线路上监测 9 次的伪鱼腥藻属细胞密度平均值来计。

从图 2 中可以看出伪鱼腥藻细胞平均密度在 7

月份达到最大,在1月份最低。从季节变化规律来分析,伪鱼腥藻属细胞密度在夏季高温多雨期(5—10月)普遍偏高,进入秋季高温无雨期(11月)后开始降低,冬季储水期(12月到次年1月)达到全年中最低,冬春温度越升期(2—4月)后会随着时间逐渐升高。由此证明伪鱼腥藻属细胞密度有明显的季节变化趋势。也有相关研究^[23-26]表明藻类的增殖与存活存在一个最适宜的温度范围,温度过高或者过低都会抑制藻类生长。因此伪鱼腥藻属的这种季节性变化特点和水温有直接关系,后面通过相关性分析进一步印证了这一结论。

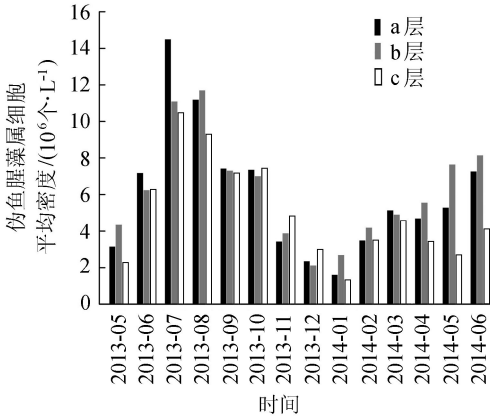


图2 伪鱼腥藻属细胞平均密度随时间变化情况

从图3中可以看出伪鱼腥藻属细胞密度占总藻类细胞密度平均百分变化范围为6.16%~34.41%,为绝对优势藻种,除了冬季1月份较少之外在全年中均占有一定比例。并且从2013年5月—2014年6月的调查中可以看出伪鱼腥属比例有一定的上升趋势,需要水务主管部门引起高度重视。

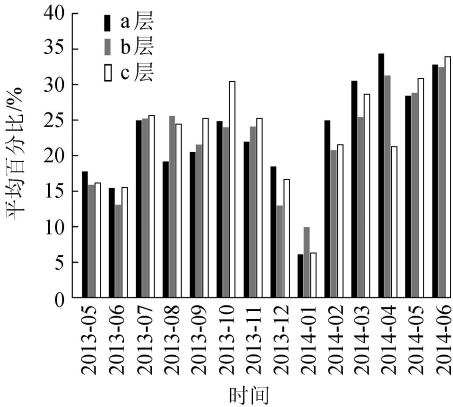


图3 伪鱼腥藻属细胞密度占藻类细胞总密度平均百分比随时间变化情况

2.2 伪鱼腥藻属细胞密度沿输水线路分布特征

伪鱼腥藻属细胞平均密度和平均百分比随空间变化值以2013年5月—2014年6月14次监测数据的平均值来计。图4~5为梯级水库伪鱼腥藻属细胞密度空间变化图。

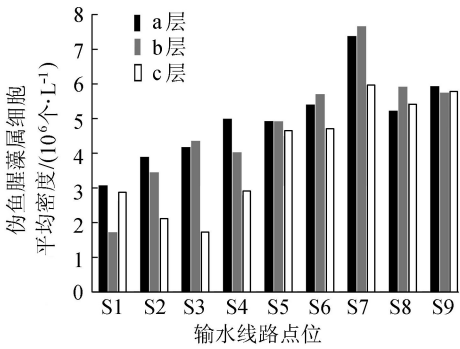


图4 伪鱼腥藻属细胞平均密度随空间变化情况

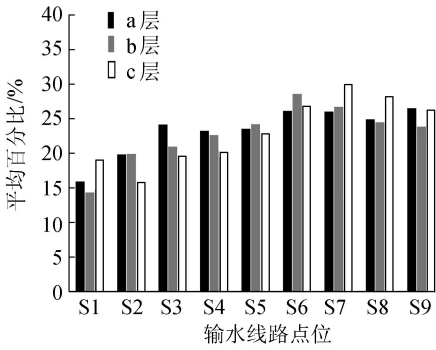


图5 伪鱼腥藻属细胞密度占总藻类细胞密度平均百分比随空间变化情况

从图4~5中可以看出:①伪鱼腥藻属细胞密度从S1→S6点位顺序递增,C水库的密度相对较高,其在S7(进水口)点位最高,S8、S9点位差别不大。这主要是由于C水库库区面积较小,河流和工农业外源污染对库区影响大,水体营养水平相对高等原因。②3座水库之间进行比较,伪鱼腥藻属细胞密度沿输水方向逐步上升,末端C水库达到始端A水库的2倍多,这表明进水从A水库,经B、C水库的输、配送过程中水体环境较为适合伪鱼腥藻属的繁殖,该藻属细胞密度增加趋势明显。③从图5中可以看出梯级水库沿输水线路S1→S5点位伪鱼腥藻属细胞密度占总藻类细胞密度的平均比例逐渐递增,S6→S9点位伪鱼腥藻属细胞密度占总藻类细胞密度的平均比例达到了近30%,存在藻类水华风险。

对3个水库水质进行对比、分析和推测,影响梯级水库伪鱼腥藻属细胞密度沿输水线路变化的主要因素是TP浓度的差别,后续的相关性分析进一步证实了这一推测。此外,水动力因素也可能是影响伪鱼腥藻属细胞密度的一个重要因素。C水库位于输水线路的末端,水体流动性明显劣于A、B两座水库,且库容较小,水深较浅,光照可透射到底层,为藻类生长提供了更好的光照环境。因此下游C水库的藻类防控需求更为迫切。

2.3 伪鱼腥藻属细胞密度垂向分布特征

梯级水库伪鱼腥藻属细胞平均密度a层(表

层)变化范围为 $1.62\times10^6\sim1.45\times10^7$ 个/L,总平均值为 6.02×10^6 个/L; b 层(透光层)变化范围为 $2.13\times10^6\sim1.17\times10^7$ 个/L,总平均值为 6.21×10^6 个/L; c 层(底层)变化范围为 $1.34\times10^6\sim1.05\times10^7$ 个/L,平均值为 5.06×10^6 个/L。总体上,伪鱼腥藻属细胞密度的垂向分布出现 3 种类型:①a 层>b 层>c 层,伪鱼腥藻属细胞密度呈垂向递减的趋势。这种现象在春、夏季节较为常见,占总检测次数的 26.19%。主要可能是由于中上层水体受到适宜太阳辐射促进藻类生长,而底层光照相对较弱。②b 层>a 层>c 层,这种现象除秋季外其余季节均出现过,占总检测次数的 19.84%。出现这种现象除了受太阳能辐射的影响之外,也和供水型水库水体流动频繁会促进垂直方向上藻类的交替有一定关系。③c 层>a 层或 b 层,占总检测次数的 19.84%,从图 2 中可以看出这种现象多出现在水温相对较低的 10 月至次年 2 月,这种现象很可能是由于水体水温均较低,水温垂向分层不明显,水体底层缺氧容易引起底泥营养物质的释放,从而促进了底层藻类的生长。

2.4 输水线路上影响伪鱼腥藻属分布的环境因子变化情况

从表 1 可见:梯级水库自上游 A 水库到下游 C 水库,水体透明度大体上呈下降趋势。主要原因是夏季水温升高,浮游藻类大量增殖,阻碍了光线在水体中传播从而降低了水体透明度。pH 值秋冬季(11 月至次年 1 月)明显要高于夏季(5—10 月)。

表 1 梯级水库输水线路点位理化指标

采样点 编号	透明度/m			水深/m			水温/℃			pH		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
S1	0.40	1.50	0.61	1.70	5.00	3.19	14.42	30.75	23.49	4.62	10.17	7.65
S2	0.50	1.70	0.85	8.50	10.20	9.61	13.72	30.92	23.23	5.95	10.75	7.86
S3	0.50	1.80	0.91	3.60	12.65	8.65	14.20	31.25	23.65	5.50	12.50	8.19
S4	0.50	1.40	0.73	2.40	5.20	4.16	14.21	31.56	24.24	5.27	10.31	7.87
S5	0.60	1.50	0.89	3.60	12.70	9.39	14.74	31.17	24.08	5.78	9.83	8.02
S6	0.60	1.60	0.91	7.50	13.60	11.36	14.34	31.32	23.72	5.40	10.09	8.07
S7	0.45	0.80	0.59	0.78	10.00	5.33	14.04	31.32	24.45	5.26	10.71	7.97
S8	0.50	1.00	0.71	5.20	10.80	7.13	13.25	31.80	24.37	5.89	16.36	8.44
S9	0.60	1.30	0.77	2.00	9.92	5.64	13.65	32.66	24.63	6.80	18.06	8.77

采样点 编号	浊度/NTU			$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
S1	4.60	90.00	22.50	2.86	14.09	8.25	1.55	3.01	1.89	0.01	0.08	0.03
S2	2.40	82.00	15.66	0.32	21.58	8.49	1.36	2.23	1.68	0.01	0.05	0.02
S3	2.30	44.75	11.33	0.98	20.08	9.21	1.06	2.17	1.60	0.01	0.05	0.02
S4	1.10	47.40	14.38	2.10	17.13	9.48	1.42	2.24	1.70	0.01	0.08	0.03
S5	2.14	20.00	7.66	1.30	16.02	8.57	1.20	2.21	1.50	0.01	0.05	0.03
S6	2.10	36.50	9.45	0.45	21.74	8.57	1.12	2.16	1.46	0.01	0.07	0.04
S7	3.20	86.20	14.63	0.45	18.25	8.63	1.33	3.06	2.03	0.01	0.07	0.04
S8	3.00	52.00	11.90	0.52	22.40	7.67	0.01	2.60	1.96	0.01	0.06	0.04
S9	3.30	75.60	12.81	1.11	16.16	7.83	0.01	2.56	1.91	0.01	0.06	0.04

这主要是和夏季浮游藻类细胞密度大,相对的光合作用导致了 pH 值的变化,总体上梯级水库输水线路上 pH 值差别不大。梯级水库输水线路浊度季节性变化不明显,但分层明显。随着水深的增大,总体上水体浊度逐渐增大。输水线路进水口浊度普遍偏高,而库心普遍偏低,这主要是和进水口水深普遍偏低而库心水深偏高有关。DO 质量浓度在夏季普遍偏高,沿输水线路 DO 质量浓度变化不明显,但 c 层(底层)DO 质量浓度明显要低于 a 层(表层)和 b 层(透光层)DO 质量浓度,这种情况较为普遍,水库底层存在长期处于厌氧甚至缺氧状态的现象。梯级水库 TN 质量浓度仅在各水库内部沿呈递减,而在输水线路上变化不明显。TP 质量浓度在 A 水库为进水口较高,其余相对偏低,B 水库沿呈增加,而 C 水库分布均匀且含量较高。

2.5 伪鱼腥藻属细胞密度影响因子相关性分析

对伪鱼腥藻属细胞密度与环境因子进行相关性分析,结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,伪鱼腥藻属细胞密度与水温、TP 质量浓度在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关,与 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 在 $P<0.01$ 水平上呈显著负相关,与浊度和 $\rho(\text{TN})$ 呈低度负相关。c 层伪鱼腥藻属细胞密度和 pH 值呈中度相关。

营养元素中磷元素是影响梯级水库伪鱼腥藻属细胞密度的主要元素。磷元素在下游 C 水库含量最高,这主要是由于 C 水库库区面积较小,河流和工农业外源污染对库区影响大。因此要控制藻类需

表 2 伪鱼腥藻属细胞密度与环境因子相关性分析

分层	透明度	水深	水温	pH	浊度	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$
a 层	-0.232	-0.018	0.747 *	0.325	-0.459	-0.199	0.312	0.698 *	-0.873 **
b 层	-0.232	-0.018	0.745 *	0.431	-0.440	-0.265	0.352	0.734 *	-0.846 **
c 层	-0.232	-0.018	0.703 *	0.537	-0.309	0.131	0.358	0.710 *	-0.865 **

注: $n=9$; * 为在 0.05 水平上显著相关; ** 为在 0.01 水平上显著相关。

首先控制营养盐尤其是 TP 的外源输入,这对梯级水库水环境状况的改善至关重要。

3 结 论

a. 从 2014 年 5 月—2014 年 6 月 14 个月的监测数据中,伪鱼腥藻属细胞密度占总细胞密度最低百分比 0.8%,最高达到 77.5%,藻类水华风险极大。伪鱼腥藻属在梯级水库的平均百分比变化范围为 6.16%~34.41%,总平均比例为 22.75%,在水库中为绝对优势藻种,需要引起高度重视。

b. 伪鱼腥藻属细胞密度有明显的季节变化趋势,且季节性变化与水温在 $P<0.05$ 水平上显著正相关。

c. 伪鱼腥藻属在垂直方向上分布出现 3 种类型:a 层>b 层>c 层,b 层>a 层>c 层,c 层>a 层或 b 层。出现前两种类型和太阳能辐射、溶解氧、供水型水库水体流动以及伪鱼腥藻属能够自主调节水体垂直位置均有一定关系。出现第 3 种类型和水体底层缺氧容易引起底泥营养物质的释放,从而促进了底层伪鱼腥藻属的生长有一定关系。

d. 梯级水库输水线路上,伪鱼腥藻属细胞密度沿线直线上升,末端 C 水库达到始端 A 水库的 2 倍多,这表明从进水口进入 A 水库,经 B、C 水库的输配送过程存在利于伪鱼腥藻属繁殖的环境因素,其细胞密度增加趋势明显。

e. 伪鱼腥藻属细胞密度与水温 and TP 质量浓度呈显著正相关($P<0.05$),与 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 呈显著负相关($P<0.01$),与浊度、TN 质量浓度呈低度负相关。c 层伪鱼腥藻类细胞密度和 pH 值呈中度相关。伪鱼腥藻属细胞密度营养元素中磷元素是主要影响因子,控制营养盐尤其是 TP 的外源输入对于梯级水库水环境状况的改善至关重要。

参考文献:

[1] 苗硕. 中国淡水资源现状与保护措施探讨[J]. 现代商贸工业,2010(17):19-21. (MIAO Shuo. Discussed the status of water resources and protective measures in China [J]. Modern Business Trade Industry,2010(17):19-21. (in Chinese))

[2] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(6):575-578.

(MA Jingan, LI Hongqing. Preliminary discussion on eutrophication status of lakes, reservoirs and rivers in china and overseas[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2002,11(6):575-578. (in Chinese))

[3] 黄廷林,柴蓓蓓. 水源水库水质污染与富营养化控制技术研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(6):588-596. (HUANG Tinglin, CHAI Beibei. Progress in research on control technology of water pollution and eutrophication in the water source reservoir[J]. Advances in Earth Science, 2009,24(6):588-596. (in Chinese))

[4] 孔繁翔. 湖泊富营养化治理与蓝藻水华控制[J]. 江苏科技信息,2007(9):7-11. (KONG Fanxiang. Treatment of lake eutrophication and the control of blue algae bloom [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2007(9):7-11. (in Chinese))

[5] 刘鹏,缪锦来,阚光锋,等. UV-B 增强对南极蓝藻形态和超微结构影响的研究[J]. 海洋科学,2004,28(5):21-25. (LIU Peng, MIU Jinlai, KAN Guangfeng, et al. Research on the influence of Antarctic cyanophyceae morphology and ultrastructure of UV-B enhancement [J] Marine Sciences,2004,28(5):21-25. (in Chinese))

[6] KONG Fanxiang,GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. Journal of Ecology,2005,25(3):589-595.

[7] 姚维志. 以浮游植物评价金堂水库富营养化[J]. 重庆环境科学,1996,18(1):55-57. (YAO Weizhi. Evaluation of eutrophication of the Jintan Reservoir by means of phytoplankton [J]. Chongqing Environmental Sciences, 1996,18(1):55-57. (in Chinese))

[8] 陈建中,刘志礼,李晓明,等. 温度、pH 和氮、磷含量对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的影响[J]. 海洋与湖沼,2010,42(5):714-718. (CHEN Jianzhong, LIU Zhili, LI Xiaoming, et al. Effects of temperature, pH, nitrogen and phosphorus on growth of *Microcystis aeruginosa* [J] Oceanologia et Limnologia Sinica,2010,42(5):714-718. (in Chinese))

[9] 马英,焦念志. 聚球藻(*Synechococcus*)分子生态学研究进展[J]. 自然科学进展,2004,14(9):8-13. (MA Ying, JIAO Nianzhi. Research progress in molecular ecology of *Synechococcus* [J]. Progress in Natural Science, 2004,14(9):8-13. (in Chinese))

[10] 刘国祥,胡圣,储国强,等. 中国淡水多甲藻属研究[J]. 植物分类学报,2008,46(5):754-771. (LIU Guoxiang, HU Sheng, CHU Guoqiang, et al. Study on freshwater genus *Peridinium* (*Dinophyta*) from China [J]. Journal of

- Systematics and Evolution, 2008, 46 (5) : 754-771. (in Chinese))
- [11] 边归国,刘国祥,陈克华,等. 福建龙岩市龙潭湖甲藻水华成因的研究[J]. 中国环境科学,2010,30(12) :1678-1682. (BIAN Guiguo, LIU Guoxiang, CHEN Kehua, et al. The possible cause of a *dinoflagellate* bloom occurring in Longtan Lake. [J] China Environmental Science, 2010, 30 (12) :1678-1682. (in Chinese))
- [12] 洪专,高亚辉,易瑞灶,等. 赤潮毒藻塔玛亚历山大藻研究进展[J]. 海洋科学,2006,30(11) :82-87. (HONG Zhuan, GAO Yahui, YI Ruizao, et al. Advances in study of toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. Marine Science, 2006, 30(11) :82-87. (in Chinese))
- [13] 齐雨藻,黄长江,钟彦,等. 甲藻塔玛亚历山大藻昼夜垂直迁移特性的研究[J]. 海洋与湖沼,1997,28(5) :458-467. (QI Yuzao, HUANG Changjiang, ZHONG Yan, et al. Laboratory study on the diurnal vertical migration of a poisonous red-tide dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1997, 28(5) :458-467. (in Chinese))
- [14] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.
- [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] 刘孝竹,李卓佳,曹煜成,等. 珠江三角洲低盐度虾池秋冬季浮游微藻群落结构特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (5) : 1010-1018. (LIU Xiaozhu, LI Zhuojia, CAO Yucheng, et al. Study on the characteristics of *planktonic microalgae* community structure of low salinity shrimp ponds during autumn and winter in Pearl River delta [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5) :1010-1018. (in Chinese))
- [17] 查广才,周昌清,黄建荣,等. 凡纳对虾淡化养殖虾池微型浮游生物群落及多样性[J]. 生态学报, 2004, 24 (8) : 1752-1759. (ZHA Guangcai, ZHOU Changqing, HUANG Jianrong, et al. Studies on the structure and biodiversity of the microplankton community in *Litopenaeus vannamei* desalination culture ponds [J]. Acta Ecology Sinica, 2004, 24(8) :1752-1759. (in Chinese))
- [18] 刘雪花,赵秀侠,高攀,等. 安徽菜子湖浮游植物群落结构的周年变化(2010 年) [J]. 湖泊科学, 2012, 24 (5) : 771-779. (LIU Xuehua, ZHAO Xiuxia, GAO Pan, et al. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure (2010) in Lake Caizi, Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5) :771-779. (in Chinese))
- [19] 王建国. 西泉眼水库浮游植物群落结构动态特征及其与水环境因子的关系分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [20] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [21] 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.
- [22] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京:农业出版社,1980.
- [23] 刘静玲,盛连喜,侯瑞珍. 不同温度下铜绿微囊藻生产特性的初步研究[J]. 农业与技术, 1994 (2) : 21-24. (LIU Jingling, SHENG Lianxi, HOU Ruizhen. An initial research for the growth chamber of *Microcystis aeruginosa* under different temperature [J]. Agriculture & Technology, 1994(2) :21-24. (in Chinese))
- [24] EPPLER W. Temperature and phytoplankton growth in the sea[J]. Fishery Bulletin, 1972, 70(4) :1063-1085.
- [25] ASAEDA T, VAN BON T. Modelling the effects of *macrophytes* on algal blooming in eutrophic shallow lakes [J]. Ecological Modelling, 1997, 104(2) :261-287.
- [26] ZHANG Zhi, LI Can, ZENG Xiaolan. et al. Application of QUAL2E model to Chongqing urban section of the Yangtze River[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(1) :1-3.
- [27] 张玉超,钱新,钱瑜,等. 太湖日成层现象的监测与模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (11) : 23-26. (ZHANG Yuchao, QIAN Xin, QIAN Yu, et al. Field measurement and model simulation of diurnal stratification in Taihu Lake [J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(11) :23-26. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-04-23 编辑:徐 娟)
- +++++
- (上接第 58 页)
- [8] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17 (3) :262-269. (XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3) :262-269. (in Chinese))
- [9] 朱一中,夏军,谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25 (4) :43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of Northwest China [J]. Resources Science, 2003, 25 (4) :43-48. (in Chinese))
- [10] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4) :440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4) :440-447. (in Chinese))
- [11] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5) :148-153. (GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyu. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5) :148-153. (in Chinese))
- (收稿日期:2015-05-15 编辑:徐 娟)