

天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系

崔扬^{1,2}, 朱广伟¹, 李慧贇¹, 陈伟民¹, 周万平¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;

2. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100101)

摘要:基于2012年天目湖沙河水库逐月水质及浮游植物群落结构的监测,采用主成分分析及典范对应分析,对沙河水库水质时空分布特征及其对浮游植物群落演替的影响进行了分析。结果表明,沙河水库透明度(SD)、悬浮物(SS)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素a(Chl a)、总磷(TP)、总氮(TN)等主要水质因子既有明显的季节变化,也存在显著的空间分布差异,浮游植物生物量和群落结构也表现出显著的季节演替。从丰度上看,蓝藻门的席藻全年都是优势种,但冬、春季节硅藻门和隐藻门藻类丰度显著增高。从生物量上看,春季的优势种为硅藻门的针杆藻,是沙河水库水体透明度的主要影响因子。主成分分析表明,沙河水库的氮和磷具有明显不同的时间变化规律。典范对应分析表明,水温、pH、溶解性总氮、SD与藻类生物量的季节演替关系密切,蓝藻、硅藻生物量与水温、溶解性总磷呈正相关,与硝态氮浓度呈负相关。研究结果表明,天目湖沙河水库水质时空差异与浮游植物种群结构的时空分布关系密切,降低氮、磷浓度对沙河水库富营养化控制及水质的保护都非常重要,但在不同季节氮、磷的相对重要性不同。农业活动,如茶园的大面积开发及旅游业活动是影响天目湖水质的两个重要因素。

关键词:天目湖沙河水库;富营养化;浮游植物;主成分分析;典范对应分析

中图分类号:X132,Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2014)03-0010-09

天目湖位于江苏省溧阳市南部(119°25'N, 31°17'E),由沙河水库和大溪水库2个相连的水库构成,其中沙河水库水域面积12 km²,集水面积148.5 km²,平均水深7 m,地面高程22 m(曾春芬等,2010)。沙河水库呈南北长、东西窄的狭长形,南面是上游,主要有平桥河、中田河、下宋河3条入湖河流,北面是下游,出流为大坝调泄蓄水。沙河水库属于北亚热带季风气候,是溧阳市的主要饮用水源地,承载着该市60万人口的饮用水供给(高永霞等,2009)。1997年以来,随着库区经济发展,水库养殖业的开发,旅游业的兴盛,农业面源的污染,大量的氮、磷营养盐流入水库,其中,总磷以颗粒态磷为主(李恒鹏等,2013),致使沙河水库具有富营养化的风险。2006年以来,为控制沙河水库的富营养化,当地政府投入巨资开展了底泥清淤、河口湿地构建、渔业调控等一系列保护措施,对富营养化的控制具有一定的成效,但是对于营养盐与浮游植物的演替关系仍不清楚。

主成分分析(PCA)是研究如何将多指标问题化为较少的综合指标问题的工具。由于主成分分析消除了指标间相关关系的影响,针对相关性较强的指标,评价结果可靠性较高(曾庆飞等,2011)。典范对应分析(CCA)常用于多因子作用下的浮游植物群落分析,是分析浮游植物群落与环境因子间复杂关系的工具(Naselli-Flores, 2000; Naselli-Flores and Barone, 1998; Habib et al, 1997; Komárková et al, 2003),而且CCA能同时结合多个环境因子,信息量大,结果明确而且直观(李秋华和韩博平,2007)。

本研究基于2012年逐月的沙河水库水质及浮游植物监测数据,应用主成分分析提取沙河水库水质的主控污染因子,进一步选用CCA对浮游植物种群生物量与环境因子之间进行分析,探讨水质与浮游植物之间的关系以及影响浮游植物群落的主要环境因子,分析流域人类活动对沙河水库水质的影响,以为沙河水库水体生态保护的决策提供参考。

1 材料和方法

1.1 采样点布设

沙河水库监测的采样点布设如图1。由南向北共设9个采样点,即上游2个点(TM08、TM09),中游4个点(TM04、TM05、TM06、TM07),下游3个点(TM01、TM02、TM03)。

收稿日期:2013-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51279194;41301022)和溧阳市沙河水库管理处科研项目联合资助。

通讯作者:朱广伟。E-mail:gwzhu@niglas.ac.cn

作者简介:崔扬,女,硕士研究生,主要从事环境生态学研究。E-mail:cuiyangz@163.com

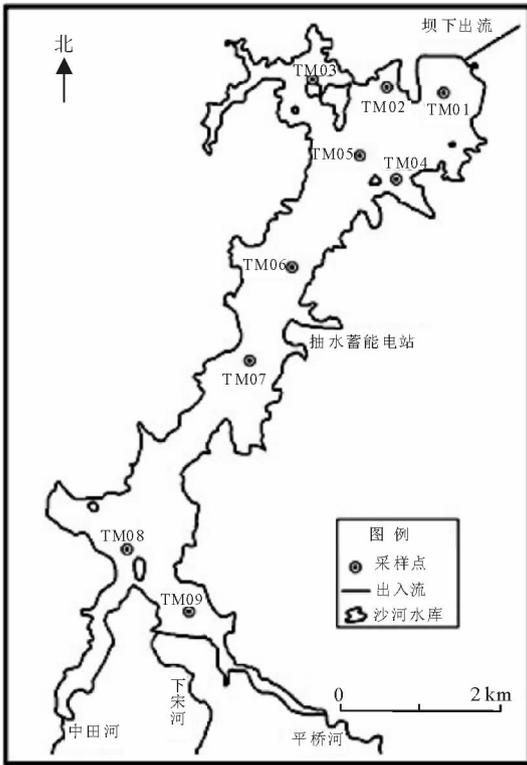


图1 沙河水库采样点及出入流分布

Fig. 1 Sampling points and inflows and outflows of Shahe Reservoir

1.2 样品的采集及测定方法

于2012年1-12月每月下旬进行采样监测,均选取表层水样进行测定分析。水环境指标包括水温(TEMP)、pH、透明度(SD)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、叶绿素a(Chl a)、磷酸盐磷(PO_4^{3-} -P)、溶解性总磷(DTP)、溶解性总氮(DTN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解氧(DO)、悬浮物(SS)。各项指标测定方法见《湖泊富营养化调查规范》(金相灿和屠清瑛,1990)。除TEMP、pH、DO、SD现场测定外,其他指标均为实验室分析得出。

浮游植物样品用采水器采集上层水样1 L,带回实验室后转入广口瓶中,加入10 mL鲁格试剂,摇匀,沉降48 h后,收集底层沉降物。显微镜鉴定浮游植物种类,浮游植物计数方法为目镜视野法。由于浮游植物的比重接近于1,因此,直接用浮游植物的体积换算为生物量,浮游植物的生物量主要根据浮游植物个体形状测量而得,即浮游植物的丰度乘以各自的平均体积,单位为 mg/L 。样品处理和测定方法参照文献(章宗涉和黄祥飞,1991)。

1.3 数据处理方法

运用Origin8.5软件绘制水质以及浮游藻类随时间变化图。利用Surfer10.0软件,采用Kriging空间内插法进行空间内插,绘制水质空间分布图。主成分分析及聚类分析均在统计软件SPSS20.0上进行。典范对应分析采用Canoco for Windows 4.5软件,为使生物数据获得正态分布,将浮游植物生物量进行 $\log(x+1)$ 处理。环境因子数据除了pH值以外均进行 $\log(x+1)$ 转换(石晓丹等,2008)。

2 结果与分析

2.1 水温四季变化

沙河水库四季水温变化明显(图2),2012年平均水温为 20.1°C 。7月份水温最高, 32.2°C ;2月份水温最低, 5.8°C 。4-10月份平均水温超过 15°C ,有利于硅藻的生长,其中6-8月份平均水温超过 25°C ,更有利于蓝藻的生长。沙河水库水温存在温跃层现象(图3)。3月份开始,水温开始出现轻微分层现象;6月份底部水温比表层水温低 9.3°C ;9月份温跃层消失;冬季处于均温期,垂向混合,表层、中层和底层水温几乎一致。

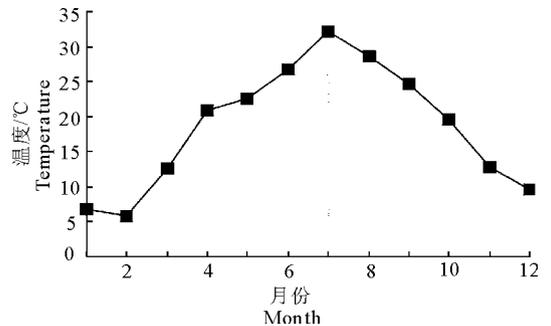


图2 沙河水库表层水温四季变化

Fig. 2 Seasonal variation of surface temperature in Shahe Reservoir

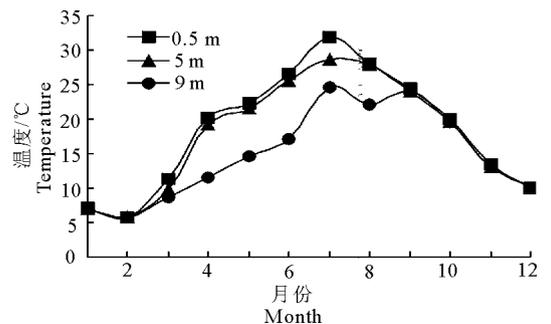


图3 TM01表中底三层水温四季变化

Fig. 3 Seasonal variations of temperature in surface, middle and bottom layer of TM01

2.2 水质时空变化特征

水质指标测定结果见图4。全年TP平均为 (0.036 ± 0.002) mg/L,最高值出现在6月份,为0.052 mg/L;最低值出现在1月份,为0.026 mg/L;全年有10个月份处于Ⅲ类标准(GB3838-2002)。全年TN平均为 (1.15 ± 0.06) mg/L,变化范围为0.74~1.92 mg/L,春季含量较高,3、4月份均超过1.50 mg/L,处于V类标准。冬春季透明度较高,夏秋季透明度较低,全湖年平均透明度为1.16 m;3月份最高,为1.80 m。SS在5月份最高,为9.79 mg/L。COD_{Mn}分别在5月份(4.30 mg/L)和8月份(3.90 mg/L)出现2个峰值。叶绿素a全年平均值为 (18.40 ± 1.72) μg/L,在时间分布上呈现2个峰值:5月份最高,为47.88 μg/L;9月份次高,为32.41 μg/L。冬春季节叶绿素含量较低,而夏季(5-9月份)叶绿素含量较高。

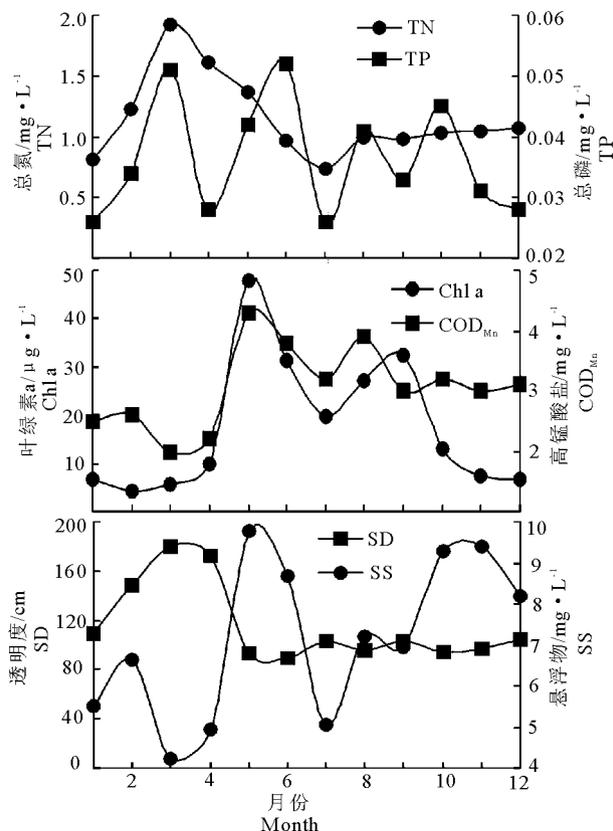


图4 沙河水库水质逐月变化

Fig. 4 Monthly variations of TN, TP, SD, SS in Shahe Reservoir

沙河水库各水质指标的空间变化(图5)趋势基本一致,整体表现为下游低上游高(透明度相反)。受上游农业面源污染的影响,入湖口的TN、TP、COD_{Mn}、SS明显高于其他湖区,尤其是平桥河入口处的9号采样点,月均总氮最高浓度达到3.66 mg/L,

属劣V类标准。

叶绿素a的空间分布变化较小。TM01(下游)年平均值为 (12.21 ± 2.85) μg/L, TM07(中游)年平均值为 (18.10 ± 5.29) μg/L, TM09(上游)年平均值为 (23.98 ± 5.20) μg/L。对3个采样点的叶绿素a浓度进行配对样本t检验,只有下游的TM01和上游的TM09差异性显著($P < 0.05$),表明大坝处的下游和河流入湖口的上游叶绿素a浓度有显著差异,而湖区的中游和上下游的叶绿素a浓度差异不显著($P > 0.05$)。

2.3 浮游植物

沙河水库浮游植物丰度、生物量及组成逐月变化见图6。浮游植物丰度全年变化在 $901 \times 10^4 \sim 31746 \times 10^4$ 个/L, 2个峰值分别在7月和8月, 10-4月份丰度较低。蓝藻门在丰度上全年都占优势, 7-9月份最高时所占比例达到97.5%, 最低的11月份也超过67%。除蓝藻外, 冬春季节隐藻和硅藻的丰度较高, 11月份隐藻所占比例为15.1%, 3月份硅藻所占比例为15.2%。

从生物量上看, 浮游植物生物量全年变化在2.30~21.94 mg/L, 与丰度的变化具有相似的趋势。2个峰值分别在5月和7月, 11-3月份生物量最低。7-9月份蓝藻的生物量最高, 最高达到9.49 mg/L; 其他月份则是硅藻占优, 最高达到15.64 mg/L, 占生物量的71.3%。

2.4 水质主成分分析

用SPSS软件计算出相关矩阵的特征值、方差贡献率和累计方差贡献率见表1。前2个主成分的累计方差贡献率达到82.5%, 表明该湖泊体系主要受前2个主因子控制。因子载荷见图7, 根据特征值的大小分配系数, 计算综合得分并排序, 见表2。建立主因子模型如下, 其中 $X_1 \sim X_{11}$ 依次代表TN、DTN、TP、DTP、Chl a、COD_{Mn}、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P、DO、SS、NO₂⁻-N。

$$F_1 = 0.372X_1 + 0.366X_2 + 0.365X_3 + 0.113X_4 + 0.332X_5 + 0.324X_6 + 0.360X_7 + 0.004X_8 + 0.132X_9 + 0.300X_{10} + 0.359X_{11}$$

$$F_2 = 0.003X_1 + 0.121X_2 + 0.130X_3 + 0.597X_4 - 0.273X_5 + 0.034X_6 - 0.012X_7 + 0.375X_8 + 0.540X_9 - 0.305X_{10} - 0.133X_{11}$$

从因子载荷大小来看, TN、DTN、TP、NO₂⁻-N、SS与第一主成分密切相关, 相关系数都超过了0.95, 可以推断第一主成分反映的是沙河水库水体氮污染与悬浮物的特征; 与第二个主成分密切相关的是

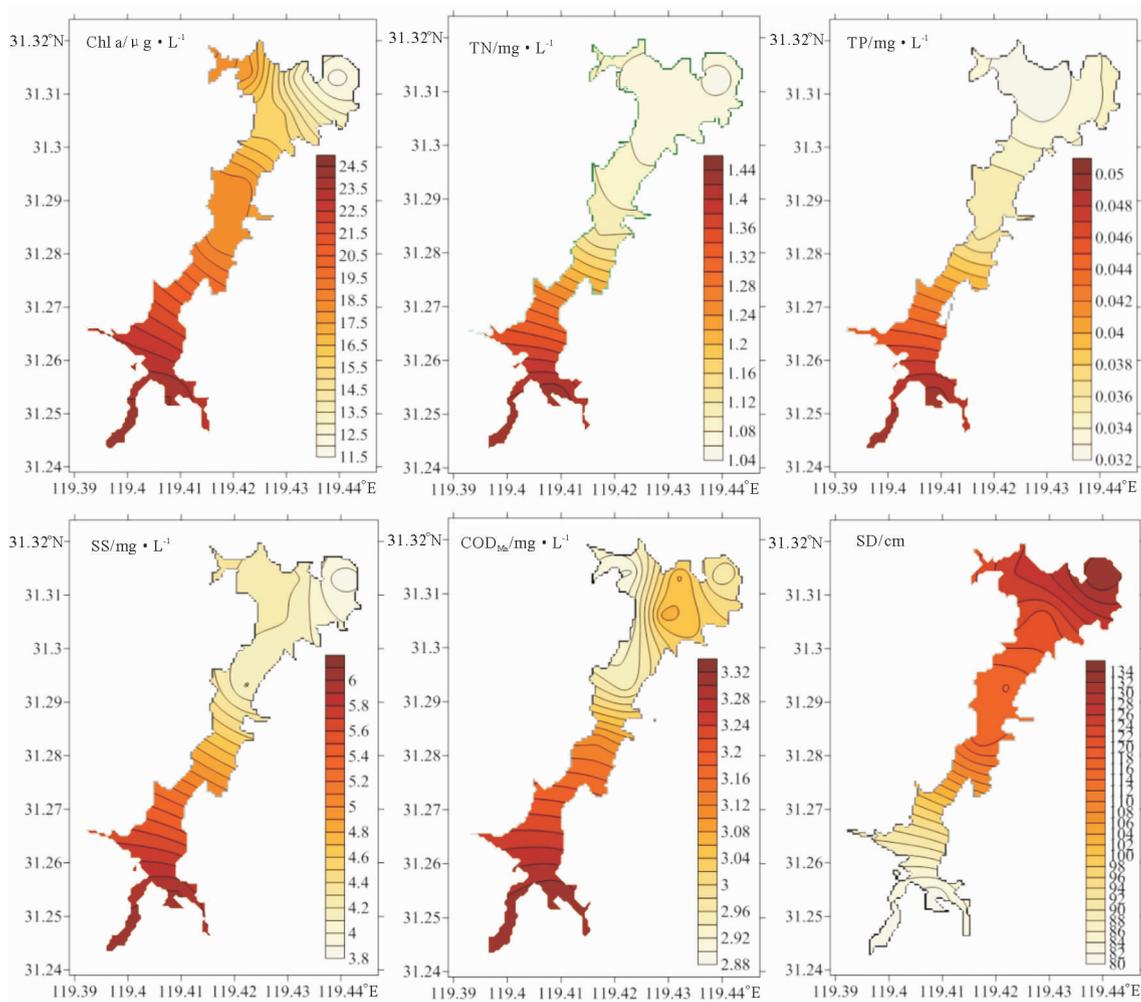


图5 沙河水库水质指标年平均值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean values of water quality indexes in Shahe Reservoir

DTP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,说明第二主成分主要代表水体溶解态磷的污染特征。然而,从方差贡献率上来看,第一主成分为65%,远远大于第二主成分的17%,所以沙河水库水质污染主要是以第一主成分氮和悬浮物污染为主,其次则是水体磷污染。

各因子系统聚类分析见图8。可将水质分为4大类:TM08、TM09、TM03、TM06、TM07、TM04、TM05、TM01、TM02。将各点位的综合得分进行排序,污染程度从重至轻依次为:TM09 > TM08 > TM07 > TM06 > TM02 > TM01 > TM03 > TM04 > TM05,系统聚类分析结果与主成分因子综合得分的结果基本一致。

2.5 浮游植物群落与环境因子的CCA分析

选择水温、溶解性总氮、硝态氮、溶解性总磷、透明度及pH 6个环境因子指标与7个门类的藻类之间进行CCA分析。温度、pH会影响藻类的生长及其群落结构的改变;总氮、总磷的测定中包含藻类自

身的氮、磷含量,因此自相关性很大,故选择溶解性总氮、溶解性总磷;透明度的高低会影响水中的光源情况,也会影响藻类的生长,而且藻类的生物量与透明度相关性很高;由于沙河水库氮污染非常严重,另选取硝酸氮进行藻类与环境因子的分析。分析结果见图9。

温度是上述选择的6个环境因子中最主要的影响因素。这是因为在一个周年的变化过程中,藻类的生长主要受温度季节变化的影响,特别是喜欢高温的蓝藻,与温度的一致性较好。除了温度之外,蓝藻与透明度、溶解性总氮、硝态氮均为负相关,原因是沙河水库氮的补给主要在早春,也即蓝藻生物量最低的季节,二者的负相关并不代表氮的浓度对蓝藻生长没影响,而是说明温度的影响大大强于氮供给的影响。

硅藻的生长与溶解性总磷呈现正相关,说明磷的供给对硅藻生物量具有较大的影响。从生物量的

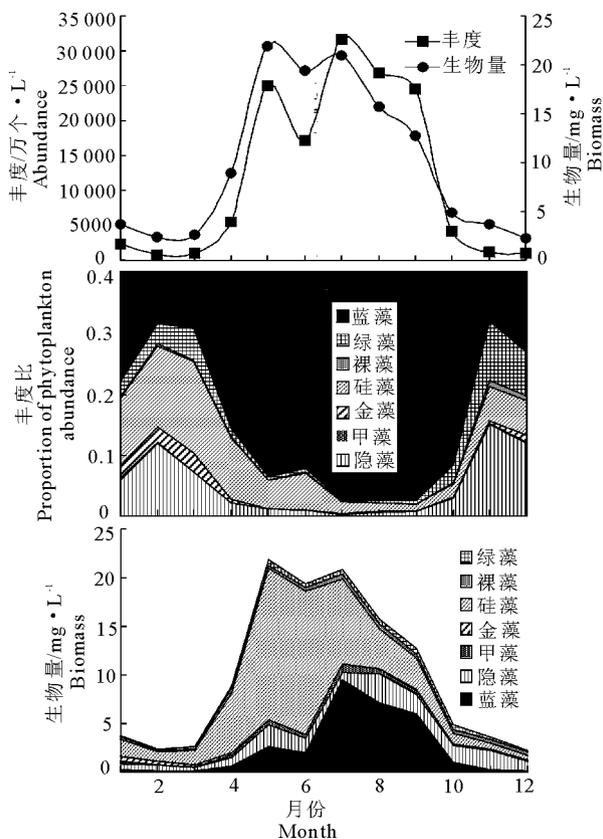


图6 沙河水库浮游植物丰度、生物量及组成逐月变化
Fig.6 Monthly variations of phytoplankton abundance, biomass and composition in Shahe Reservoir

表1 主因子方差解释

Tab.1 Variance explanation of principal factors

主因子数	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	7.183	65.303	65.303
2	1.896	17.325	82.538
3	1.091	9.916	92.454

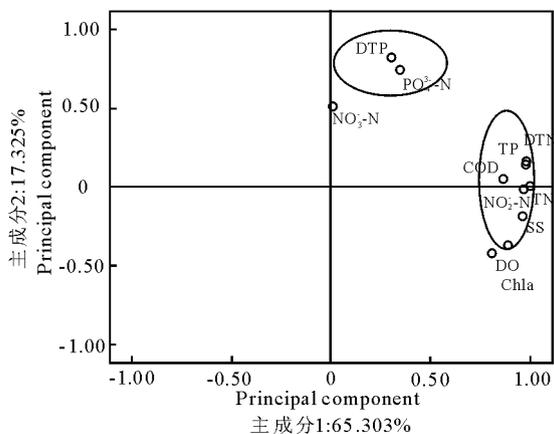


图7 9个监测点因子载荷

Fig.7 Environmental factor loadings for the first two PCs obtained from 9 sampling sites

角度看,硅藻是沙河水库浮游植物生物量的决定性藻类,特别是在春末、秋季的2次生物量高峰期,硅

藻生物量是峰值高低的决定性因素。硅藻生物量与溶解性总磷的正相关关系说明,对于沙河水库的浮游植物生物量,磷的控制是关键。

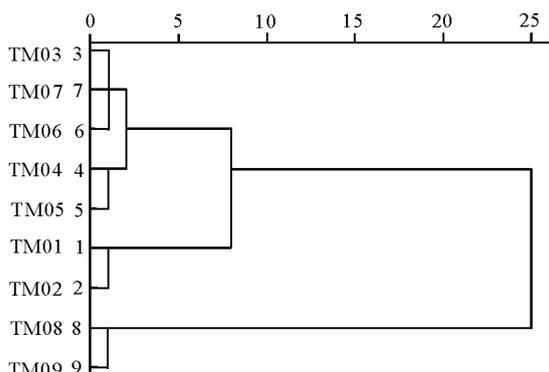


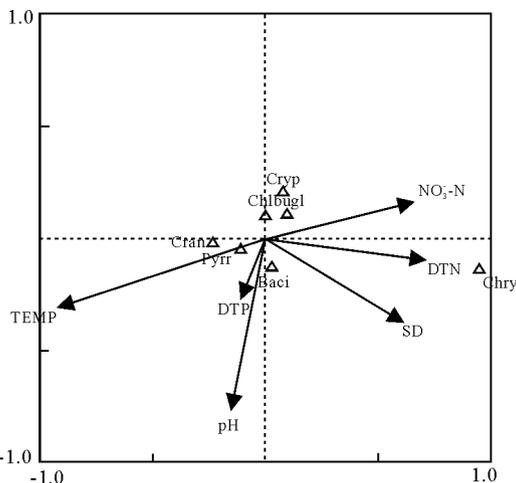
图8 不同监测点聚类树

Fig.8 Cluster analysis of environmental factors from 9 sampling sites

表2 主因子和综合主因子分值

Tab.2 General scores of principal components

点位	F ₁	F ₂	综合得分 S	排名
TM01	-2.090	2.493	-1.133	7
TM02	-1.434	0.626	-1.004	5
TM03	-1.178	-0.901	-1.120	6
TM04	-1.595	-0.180	-1.300	8
TM05	-1.441	-0.905	-1.329	9
TM06	-0.910	0.213	-0.676	4
TM07	-0.417	-1.159	-0.572	3
TM08	3.321	-1.751	2.262	2
TM09	5.745	1.563	4.872	1



cryp:隐藻门,pyrr:甲藻门,chry:金藻门,baci:硅藻门,eugl:裸藻门,chlo:绿藻门,cyan:蓝藻门

图9 沙河水库浮游植物与环境因子的 CCA 二维排序

cryp: cryptophyta, pyrr: pyroptata, chry: chrysophyta, baci: bacillariophyta, eugl: euglenophyta, chlo: chlorophyta, cyan: cyanophyta

Fig.9 Relationship of phytoplankton population and environment factors based on CCA in Shahe Reservoir

3 讨论

3.1 水质、营养盐与浮游植物群落的关系

天目湖沙河水库既是饮用水源地,又是国家级AAAA级景区的核心地带。沙河水库水质的关键问题包括藻类异常增殖产生的异味物质以及水体的透明度。从前面的分析结果可知,沙河水库影响透明度高低的因素是水中的悬浮物质和浮游植物生物量,这与张运林等(2006)研究结果相同。浮游植物是悬浮物的重要组成部分,因此,沙河水库水质的关键是浮游植物生物量问题。

沙河水库5-9月份透明度较低,而浮游植物生物量相对较高,这与同期的藻类异常增殖有密切关系:春末夏初,硅藻大量生长(优势种为针杆藻);夏季,蓝藻门的席藻大量疯长,成为优势种,严重影响水质。从本研究的主成分分析可知,氮、悬浮物和磷污染是2类主控污染因子,同时也是影响浮游植物生长及其群落结构的重要环境因子。营养盐数量的增多会促进藻类的繁殖,藻类丰度越高,则透明度越低,水质越差,在三者的变动关系中,营养盐是自变量,浮游植物生物量是变化过程,而透明度成了因变量,是营养盐高低条件影响下的浮游植物生长作用的结果。当然,浮游植物的丰度还与温度、风力、降雨等气候因子密切关联(李秋华和韩博平,2007;王丽卿等,2011),并受浮游动物、鱼类牧食等的下行控制效应影响,但就天目湖沙河水库水质保护的根本策略来说,营养盐的控制可谓根本之策。

3.2 沙河水库氮、磷变化规律

朱广伟等(2011)研究表明沙河水库水体总磷主要以颗粒态磷存在,而颗粒态磷主要由藻类或浮游动物生物量变化带来的磷以及悬浮颗粒物变化引起的磷2个来源构成,故总磷与悬浮物息息相关,属于第一主成分。水库氮、颗粒物、颗粒态磷的浓度主要受流域输入的影响,反映了流域农业开发和植被保护、土地扰动等状况。显著高的方差贡献率说明沙河水库的污染主要受流域输入的控制。

溶解态磷既可能受流域入湖污染程度的影响,同时也受水库底泥释放的影响。特别是在水温较高的季节,底泥释放可能对水体溶解态磷的影响很大。主成分分析结果说明,沙河水库水体磷的污染与氮的污染控制因素差异较大,内源释放对磷的贡献较高。磷是影响藻类繁殖的关键元素之一,也是沙河水库湖泊富营养化的关键元素(金相灿和章宗涉,1995),所以第二主成分也反映水体的富营养化程

度(李波等,2003;廖奇志和卢晓华,1998;吕焕春等,2002)。当水体中氮磷比 $<7\sim 10$ 时,藻类生长表现为氮限制状态,当氮磷比 $>22.6\sim 30$ 时,磷将成为藻类生长的限制性因子(李哲等,2009;Guildford and Heeky,2000)。沙河水库氮磷比的年均值为32.6,变化范围是18.6~57.8,因此,磷是沙河水库藻类生长的限制性因子。

沙河水库污染最严重的是靠近中田河入口(TM08)和靠近平桥河入口(TM09)。李恒鹏等(2013)对沙河水库不同流域氮磷迁移量研究表明,沙河水库流域总氮入湖量共计206.01 t/a,其中平桥河流域、中田河流域的贡献分别为32.56%、21.03%;总磷入湖量共计3.29 t/a,其中两个流域贡献分别为22.32%、9.32%。因此TM08、TM09受上游面源氮磷污染严重。沙河水库的主要污染来源于上游面源污染,位于沙河水库的过渡区的TM07、TM06污染相对较严重。下游的TM02点受旅游业的污染,水质较差。其余各点位水质差异不大。

3.3 影响浮游植物群落的主要环境因子与群落演替规律

沙河水库浮游植物群落的优势门类相对稳定,主要由蓝藻门、硅藻门、隐藻门组成。从丰度上看,蓝藻门的席藻为绝对的优势种,全年没有发生浮游植物优势种类更替。但由于蓝藻细胞面积较硅藻细胞小很多,所以从生物量上看,蓝藻主要在夏季占优,而冬季隐藻的生物量最高,春季硅藻的生物量最高。

本文的统计分析表明,在选取的主要环境因子中,浮游植物生物量与温度、pH、溶解性总氮、透明度因素相关性较大。温度是影响浮游藻类生长繁殖的基本生态因子,并且对生长率影响最大。沙河水库水温四季变化明显,冬、春季节温度较低,适合隐、硅藻的生长;夏季随着水温的不断升高,水体环境更适合蓝藻的生长,大部分蓝藻的最适温度在25~35℃(陈开宁等,2007),CCA分析也表明,蓝藻与温度呈显著的正相关关系;秋季温度降低后,适应低温的硅藻和隐藻又开始大量生长。营养盐作为浮游藻类赖以增殖的基础,其数量与分布直接影响藻类群落结构的动态变化。冬季,水体中N、P浓度较低,而且气温较低,导致藻类没有出现大量增长;春季,农业施肥使得面源污染加剧,大量营养盐输入水体,水体中DTN、DTP、 NO_3^- -N浓度较高,温度也开始回升,硅藻开始大量生长;夏季,水中的藻类转化为蓝藻占优势,前期藻类死亡会释放氮、磷营养盐,

特别是磷盐的增加促进了蓝藻的增长,CCA 排序分析表明蓝藻与 DTP 呈显著的正相关关系。藻类细胞结构不同,对水体氮磷等营养元素的吸收特性也不相同(Tilman et al, 1982; Tilman et al, 1986)。蓝藻和硅藻与 TEMP、DTP 呈正相关,而与 NO_3^- -N 呈负相关,说明春夏季节要加强磷负荷的削减,从而抑制藻类的快速繁殖(张志兵等,2009),降低湖泊富营养化的危险。

3.4 关于表层采样

沙河水库坝前的水深在 10m 左右。成晓奕等(2013)模拟的沙河水库的温跃层从春季 4 月份开始发育,秋季 9 月份开始消失,冬季垂向混合。本研究沙河水库 3-9 月份出现了温跃层。对于下游的几个点位,按规范应该分层采样。不过,我们对沙河水库进行了超过 10 年的逐月监测,多数上游段的点位,除了中间较窄的河槽较深外,多数区域水深在 5m 以内,且不同月份水深差别较大。这样,如果分层采样,有些季节有分层,有些季节没分层,可比性上会有一些问题。为了数据的长期可比性,在多次分层采样、比较的基础上,认为表层点位相对稳定,可比性好。

3.5 流域人类活动对沙河水库水质的影响

对沙河水库水质产生影响的 2 个主要原因是土地利用与旅游开发。沙河水库流域土地利用以林地、耕地、茶园、建设用地、水体为主。其中茶园面积占 9.3%,茶园植被覆盖度较低,为 70%,尤其是近 1~4 年新开发的茶园覆盖度仅为 41%(韩莹等,2012)。茶园主要分布在沙河水库与大溪水库连接临湖地区和杨村河流域。茶园施肥强度很高,李恒鹏等(2013)研究发现茶园施用有机肥高达 $18 \text{ t}/(\text{a} \cdot \text{hm}^2)$,折纯氮为 $0.959 \text{ t}/(\text{a} \cdot \text{hm}^2)$,而耕地的施肥量约为茶园施肥量的一半(韩莹等,2012);由于茶园覆盖率比较低,坡度大,水土流失比较严重,大量的营养盐随颗粒物被输送到水体中。茶园地表径流总氮浓度为 11.25 mg/L ,壤中流总氮浓度为 25.09 mg/L (聂晓飞等,2013),茶园总氮排放量为 $43.90 \text{ kg}/(\text{a} \cdot \text{hm}^2)$ 、总磷(以颗粒态为主)排放量为 $0.84 \text{ kg}/(\text{a} \cdot \text{hm}^2)$ (李恒鹏等,2013),造成沙河水库中总氮、总磷的含量较高,尤其是沙河水库上游河流水体部分受上游河道的输入影响很大,易引发湖泊富营养化问题。

沙河水库同时也是国家 4A 级景区。近年来,旅游业发展对湖泊污染较为严重,污水排放量也随旅游规模扩大而不断增加。生活污水中含有大量的

磷酸盐,加剧了湖泊富营养化的趋势。这些也解释了由主成分分析得出的 2 个主控污染因子是氮、悬浮物污染和磷污染的结论。

流域大面积的种茶以及旅游业的开发,会向沙河水库输入大量的营养盐。氮、磷是藻类等浮游生物生长的主要限制因子,足够的氮磷是发生水华的物质基础。因此,为防止沙河水库富营养化问题的出现,必须加强流域农业生产活动,特别是茶园的管理与规划,建设生态隔离带,减少氮、磷排放量,同时倡导生态旅游,集中建设污水处理厂,有效保护沙河水库水环境。

参考文献

- 陈开宁,周万平,鲍传和,等. 2007. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应—以太湖五里湖大型围隔示范工程为例[J]. 湖泊科学, 19(4):359-366.
- 成晓奕,李慧赞,戴淑君. 2013. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟[J]. 湖泊科学, 25(6):818-826.
- 高永霞,朱广伟,贺冉冉,等. 2009. 天目湖水水质演变及富营养化状况研究[J]. 环境科学, 30(3):673-679.
- 韩莹,李恒鹏,聂小飞,等. 2012. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮、磷收支平衡特征[J]. 湖泊科学, 24(6):829-837.
- 金相灿,屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社:69-75.
- 金相灿,章宗涉. 1995. 中国湖泊环境:第一册[M]. 北京:海洋出版社.
- 李波,濮培民,韩爱民. 2003. 洪泽湖水质的因子分析[M]. 中国环境科学, 23(1):69-73.
- 李恒鹏,陈伟民,杨桂山,等. 2013. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 25(6):785-798.
- 李秋华,韩博平. 2007. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析[J]. 生态学报, 27(6):2535-2564.
- 李哲,郭劲松,方芳,等. 2009. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J]. 湖泊科学, 21(4):509-517.
- 廖奇志,卢晓华. 1998. 山丹湖环境水化学特征的主因子分析[J]. 华中理工大学学报, 26(1):65-67.
- 吕焕春,陈英旭,方志发,等. 2002. 千岛湖水体营养物质的主导因子分析[J]. 农业环境保护, 21(4):318-321.
- 聂小飞,李恒鹏,黄群彬,等. 2013. 天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征[J]. 湖泊科学, 25(6):827-835.
- 石晓丹,阮晓红,邢雅因,等. 2008. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析

- [J]. 环境科学, 29(11):2999-3008.
- 王丽卿,许莉,卢子园,等. 2011. 淀山湖浮游植物丰度消长及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 32(10):2869-2874.
- 曾春芬,黄文钰,王伟霞,等. 2010. 天目湖溶氧分布特征及环境影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 19(4):445-451.
- 曾庆飞,谷孝鸿,周露洪,等. 2011. 东太湖水质污染特征研究[J]. 中国环境科学, 31(8):1355-1360.
- 张运林,陈伟民,周万平,等. 2006. 2001-2002年天目湖(沙河水库)浮游植物的生态学研究[J]. 海洋湖沼通报, (2):31-37.
- 章宗涉,黄祥飞. 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.
- 张志兵,施心路,刘桂杰,等. 2009. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系[J]. 生态学报, 29(6):2980-2988.
- 朱广伟,赵林林,陈伟民,等. 2011. 低水位运行对天目湖水库水质与生态的影响[J]. 生态与农村环境学报, 27(4):87-94.
- Guildford S J, Hecky R E. 2000. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. Limnology and Oceanography, 45(6):1213-1223.
- Habib O A, Tippet R, Murphy K J. 1997. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physicochemical factors in Loch Lomond, Scotland[J]. Hydrobiologia, 350: 63-79.
- Komárková J, Komárek O, Hejzlar J. 2003. Evaluation of the term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods[J]. Hydrobiologia, 504: 143-157.
- Naselli-Flores L. 2000. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationship between species composition and environmental factors[J]. Hydrobiologia, 424: 1-11.
- Naselli-Flores L, Barone R. 1998. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy)[J]. Hydrobiologia, 369/370: 163-178.
- Tilman D, Kiesling R, Sterner R, et al. 1986. Green, blue-green and diatom algae: taxonomic differences in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen [J]. Archiv für Hydrobiologie, 106(4): 473-485.
- Tilman D, Kilham S, Kilham P. 1982. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 13: 349-372.

(责任编辑 张俊友)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Water Quality in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir and its Relationship with Phytoplankton Community

CUI Yang^{1,2}, ZHU Guang-wei¹, LI Hui-yun¹, CHEN Wei-min¹, ZHOU Wan-ping¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Sino-Danish Center for Research and Education, Beijing 100101, P. R. China)

Abstract: Monthly investigation was made on water quality and phytoplankton community structure in Shahe Reservoir in 2012. Temporal and spatial distribution characteristics of water quality and its effect on phytoplankton community succession were analyzed through principal component analysis and canonical correspondence analysis. The results indicated there was a close relationship between the temporal and spatial differentiation of water quality and distribution of phytoplankton community structure. Obviously seasonal and spatial variations were observed in water quality factors such as transparency, suspended solids, permanganate index, chlorophyll a, total nitrogen and total phosphorus in Shahe Reservoir. Meanwhile, phytoplankton biomass and community structure were also presented significantly seasonal succession, which was closely related with temperature, pH, dissolved total nitrogen and transparency based on the canonical correspondence analysis, with the biomass of cyanophyta and bacillariophyta positively correlated with temperature, dissolved total phosphorus and negatively correlated with nitrate. *Synedra* was the dominant species in spring in terms of phytoplankton biomass and also the key impact factor for transparency in Shahe Reservoir. The abundance of phytoplankton was dominated by phormidium in 2012, and the abundance of bacillariophyta and cryptophyta significantly increased in winter and spring. Nitrogen and phosphorus also showed significantly temporal variations in Shahe Reservoir based on principal component analysis, and the effects of nitrogen and phosphorus on water quality varied in different seasons. Therefore, to control water eutrophication and protect water quality, it is crucial to decline the concentration of nitrogen and phosphorus according to the temporal variations of nitrogen and phosphorus. Furthermore, highly developed tea garden and tourism in the catchments of Tianmuhu Reservoir are two important factors influencing water quality.

Key words: Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir; eutrophication; phytoplankton; principal component analysis; canonical correspondence analysis