*J. Lake Sci.*(湖泊科学),2010,**22**(2):291-299
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn


# 南亚热带典型调水型水库——广东大镜山水库的富营养化特征分析*

张华俊,李秋华,韩博平**
(暨南大学水生生物研究所,广州 510632)

**摘　要**:调水型水库是一种以抽水入库为主要来水水源的水体,是沿海地区重要的供水水源地.为了解这类水库的富营养化特点,于2005年全年每月2次对地处我国南亚热带地区(广东珠海市)的大镜山水库进行采样和监测.监测和测定指标主要包括氮、磷营养盐浓度、水温、透明度及叶绿素a浓度等,结合水库水文数据对水库富营养化特征和主要的影响因素进行分析.结果表明,2005年,大镜山水库的富营养化状态 $TSI_M$ 指数在45-53之间,水库处于中富营养状态,多数时间处于富营养状态.水体富营养化主要参数表现出明显的季节变化,即叶绿素a浓度和富营养化状态指数在早春和晚秋出现两个峰值,明显地与温带富营养化水体在夏季出现单个峰值的特征不同.调水入库增加了水库营养盐负荷的同时,也在很大程度上影响了水库水动力学过程,与夏季的集中强降雨一起成为影响该水库富营养化的关键因素,这些因素改变了浮游植物群落对营养盐的直接响应,导致叶绿素a浓度与总磷、总氮浓度之间呈弱相关关系,降水和调水量在时间上相对配置重要性决定了叶绿素a浓度与营养盐浓度的关系.
**关键词**:调水水库;富营养化;叶绿素a浓度;水动力学;南亚热带;大镜山水库

# Eutrophication of a typical pumped storage reservoir, Dajingshan Reservoir, subtropical China

ZHANG Huajun, LI Qiuhua & HAN Boping
(*Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou* 510632, *P. R. China*)

**Abstract**: Pumped storage reservoirs are a type of water bodies which usually have small catchments and mostly store water that was pumped from near rivers. The special reservoirs play an important role in drinking water supply in coastal regions. In order to understand eutrophication processes of these reservoirs, we investigated the Dajingshan Reservoir, a typical pumped storage reservoir, located in Zhuhai, Guangdong, a subtropical area of China. The reservoir was monitored and sampled every two times a month in 2005. The monitored variables included nutrients (nitrogen and phosphorus), chlorophyll-a concentration, transparency, temperature, precipitation and pumped water amount. The trophic state index ($TSI_M$) of the reservoir ranged from 45 to 53, indicating that the reservoir was in meso-eutrophic states, but eutrophic state was present in the reservoir in most time of the year. There was a seasonal variation of eutrophication with two peaks of chlorophyll-a concentration and $TSI_M$ in early spring and late autumn. This seasonal pattern is markedly different from those eutrophic lakes with only a peak in summer in temperate water body. Pumping water into reservoir not only increased nutrient loading, but also modified largely hydrodynamic processes. Combining with the heavy precipitation in summer, pumping water became a major factor affecting eutrophication processes, changing the phytoplankton community into a direct response to nutrient loading. The chlorophyll-a concentration correlations with total phosphorus concentration or with total nitrogen concentration were markedly weakened, and the timing configuration of pumping water and precipitation have determined the ratio of chlorophyll-a concentration and nutrient concentration.
**Keywords**: Pumped storage reservoir; eutrophication; concentration of chlorophyll-a; hydrodynamics; subtropics; Dajingshan Reservoir

---

* 国家自然科学基金"863"项目(2008AA06A413)和珠海市科技计划重大项目(PC20071075)联合资助. 2009-11-05收稿;2009-12-02收修改稿.张华俊,男,1983年生,硕士研究生;E-mail:zhanghuajun83@yahoo.com.cn.
** 通讯作者;E-mail:tbphan@jnu.edu.cn.

富营养化是水生生物对水体系统中营养盐浓度增加的响应及其变化过程,富营养化后期通常发生"藻华"和水体缺氧等现象,是当前水环境主要问题之一[1]. 氮、磷是影响富营养化进程的主要营养盐元素. 在自然水体中,浮游植物是水体中最重要的生产者,它对氮、磷营养盐增加的响应是富营养化研究的主要内容. 除营养盐负荷外,水体的水动力学条件(水量、水温)等能在很大程度上影响富营养化的表现,这意味着水体富营养化受区域因素和水体性质的影响[2].

水库是一种半人工半自然水体,在全球水资源供需矛盾突出的今天,已成为向城镇供水的重要水源地[3]. 在一些地区,当水库自产水量不能满足供水需求时,需要从邻近的河流中调水入库,这种靠调水为主要来水的水库称为调水水库. 调水水库是一类特殊的水库,在英国等海岛型国家和地区中调水水库比较普遍,研究较多,在我国的广东省等沿海发达地区有一定分布,但研究较少[4]. 由于入库水量主要来自抽水,调水水库的营养盐负荷及其季节动态受控于调水水源和调水模式,其富营养化特点与一般天然集水型水库存在较大差别. 由于对这类水库研究的较少,调水能够在多大程度上影响水体富营养化现在还不清楚. 我国华南沿海地区近 30 年修建了大量的调水型水库,如广东省珠海市的大镜山水库、凤凰山水库以及东莞市的契爷石水库等都是典型的调水型水库[5-9]. 本文以大镜山水库为研究对象,2005 年对影响供水水质的 2 个关键区域进行了每月 2 次的高频采样,在此基础上对调水型水库富营养化现状及其表现进行分析,为这类水库的供水水质管理提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 水库概况

大镜山水库位于广东省珠海市香洲区西北凤凰山南麓,是一座典型的中型调水水库. 水库功能以城市生活供水和防洪为主,目前是珠海市区供水系统的重要水源之一. 水库集雨面积 $5.95 km^2$,集雨面积小. 水库总库容为 $12.1\times10^6 m^3$,多年平均降雨量为 1991mm,受季风影响主要集中在丰水期(4-9 月),年调水水量为 $4.902\times10^7 m^3$,调水集中在枯水期,年可供水量为 $4.287\times10^7 m^3$,全年供水比较平均,正常蓄水位高程 20.42m,正常库容对应的平均水深为 11m.

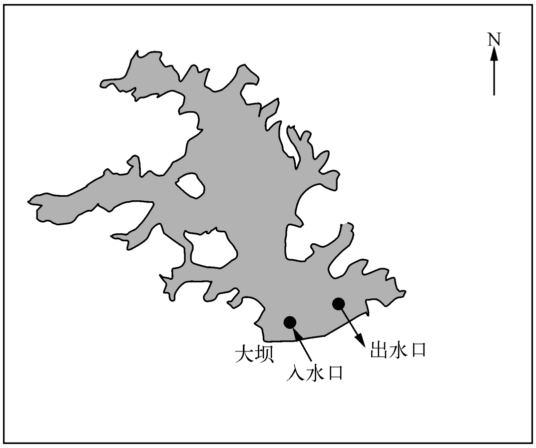



图 1 大镜山水库采样点位置

Fig. 1 The sampling sites in Dajingshan Reservoir

### 1.2 采样点的位置及采样频率

作为中小型水库,当水力滞留时间较短时,水体内的空间差异小,针对供水影响分析的需要,本次研究在抽水入水口处(简称入水口)(22°17′43.1″N,113°32′59.4″E)与抽水出水口处(简称出水口)(22°17′42.5″N,113°33′04.4″E)(图 1),设置 2 个采样点,2005 年全年每月对大镜山水库进行两次采样和现场观测.

### 1.3 监测指标与实验方法

透明度(SD)现场用塞氏罗盘测定;水温(T)现场用 YSI-85 测定仪测定;总氮(TN)、总磷(TP)、硝酸盐氮($NO_3^-$-N)、亚硝酸盐氮($NO_2^-$-N)、氨氮($NH_4^+$-N)、正磷酸盐($PO_4^{3-}$-P)浓度均按照国家地表水质标准上的方法进行测定;可溶性无机氮浓度由硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮浓度相加所得;叶绿素 a 浓度(Chl. a)采用反复冻融-浸提过滤水样后的滤膜,运用改进的丙酮萃取法[10]. 每月的水位、库容、降雨量、调水量、供水量等水文数据均来自于大镜山水库管理处;水力滞留时间由库容除以出流量计算得到.

### 1.4 富营养化指数的计算与数据分析方法

富营养状态 $TSI_M$ 指数以叶绿素 a 的 $TSI$ 参数为基准,选择总氮、总磷、透明度和叶绿素 a 的 $TSI$ 参数,参照广东省水库的经验公式进行相关加权综合所得[11-12].

本文采用 SPSS 16.0 统计软件进行相关、回归和独立样本 $t$ 检验分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 水文

2.1.1 水温　2005 年水库 2 个采样点表层(0.5m)水温,在 16.45 - 29.30℃之间,水温具有一定的季节变化:在 1 - 3 月水温相对较低,一般不超过 20℃,在 4 - 9 月份水温升高,平均温度达到 28℃左右,9 月以后水温开始降低,最低值出现在 12 月,为 16.45℃. 对比水库入水口和出水口,2 个采样点间水温变化基本一致. 3 月末水体出现分层现象,6 月份表层与深层水温相差全年最大,形成深度约为 4m,温差约为 11℃的温跃层,到 12 月份温跃层消失.

2.1.2 水文与水力滞留时间　2005 年水库调水主要发生在 9 - 12 月,10 月份的调水最大,达到 $616.67 \times 10^4 m^3$. 除了 1 月和 12 月供水较大外,2005 年水库供水比较平均,平均供水量为 $262.86 \times 10^4 m^3$(图 2a). 2005 年水库水位在 15.4 - 19.9m 之间,最大和最小水位落差为 4.5m. 枯水期水位高于丰水期水位,水库水位高程在 5 月最低,为 15.4m,在 11 月份最高,为 19.9m(图 2a).

2005 年水库降雨量为 2014mm,略高于多年平均降雨量. 受季风影响丰水期从 4 月份开始一直到 9 月份结束,丰水期的降雨量高达 1806mm,占该年总降雨量的 90% ,1 - 3 月及 10 - 12 月为水库的枯水期,降雨量仅为 208mm(图 2b). 水库 2005 年水力滞留时间在 37 - 130d 之间,平均水力滞留时间约为 90d,10 月份水力滞留时间最大为 130d,最小值出现在 12 月为 37d(图 2b).

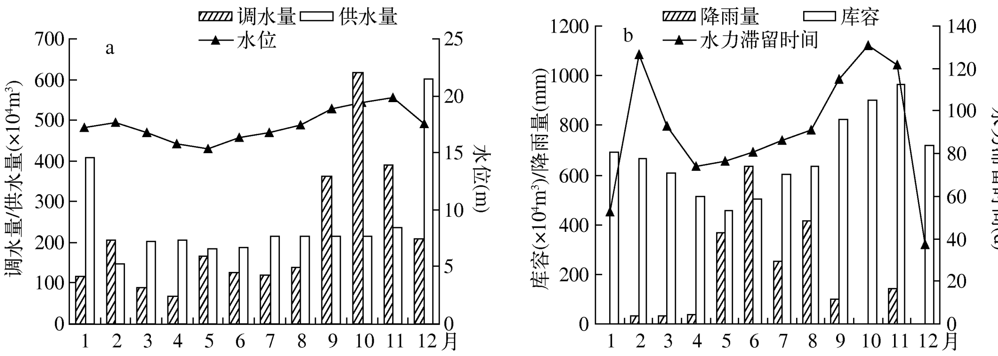



图 2 2005 年大镜山水库水位、调水量、供水量(a)、降雨量、库容和水力滞留时间(b)的动态变化

Fig. 2 Dynamics of water level, pumped water volume, water supply amount(a), precipitation, reservoir capacity and hydraulic retention time(b) in Dajingshan Reservoir,2005

### 2.2 富营养化参数及指数

2.2.1 氮、磷营养盐　2005 年水库总氮浓度在 0.450 - 2.060mg/L 之间,年均值为 0.978mg/L,可溶性无机氮浓度在 0 - 1.135mg/L 之间,年均值为 0.437mg/L. 在水库入水口,硝酸盐氮占总氮的 46% ,为总氮的主要成分,其中可溶性无机氮占总氮的 52% ,在水库出水口硝酸盐氮占总氮的 43% ,可溶性无机氮占总氮的 48% . 总磷浓度在 0 - 0.066mg/L 之间,年均值为 0.036mg/L,$PO_4^{3-}$-P 浓度在 0.005 - 0.0215mg/L 之间,年均值为 0.0053mg/L,$PO_4^{3-}$-P 占 TP 的 15% . 氮/磷的质量比为 27.5,说明水库浮游植物的生长为磷限制. 总氮浓度变化呈现显著的季节变化规律,3 月份最大,为 2.060mg/L,在 4 - 9 月丰水期维持较低水平,在 0.450 - 1mg/L 之间,在 10 月总氮的浓度又开始增加(图 3). 可溶性无机氮浓度和总氮浓度的季节变化规律一致,枯水期高,丰水期低,在 5 - 8 月维持最低水平,最大值出现在 10 月底,浓度为 1.135mg/L. 总磷和 $PO_4^{3-}$-P 浓度变化规律不是那么明显,但总磷浓度基本上还是枯水期高,丰水期低,在 3、4 月和 10、11 月两时期较高,$PO_4^{3-}$-P 浓度的变化规律性不强. 通过独立样本的 $t$ 检验得出两采样点间各指标的双尾 $t$ 检验,结果表明两个采样点的营养盐浓度没有显著性差异. 总的来看,水库营养盐浓度在冬春季节的枯水期要高于夏秋季节的丰水期.

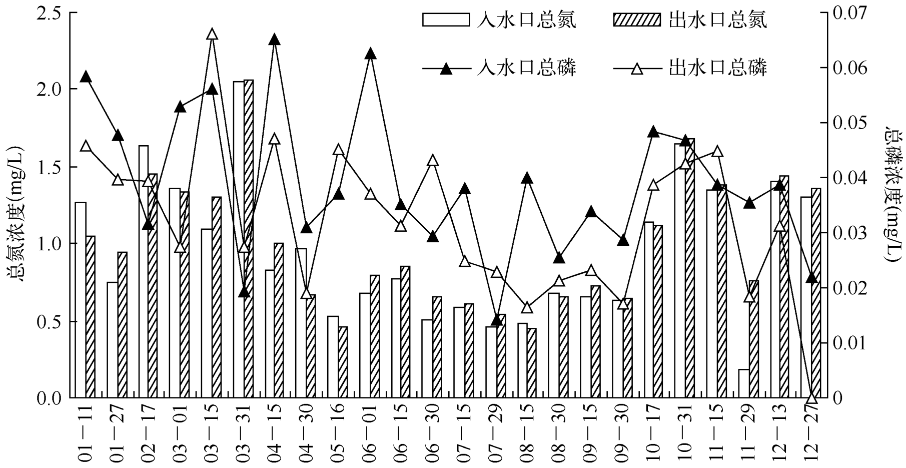



图 3 2005 年水库采样点总氮总磷浓度的动态

Fig. 3 Dynamics of TN and TP concentrations in Dajingshan Reservoir, 2005

2.2.2 叶绿素 a 与透明度 全年叶绿素 a 浓度的平均值为 32.06μg/L. 在 7-10 月叶绿素 a 浓度较低,入水口最低值出现在 7 月为 14.99μg/L,出水口最低值出现在 9 月末为 14.11μg/L. 2 、 4 、 6 月份的浓度较高,入水口和出水口的叶绿素 a 最大浓度都出现在 2 月,分别为 49.65μg/L,46.14μg/L. 2005 年水库的透明度在 0.6-1.2m 之间,入水口和出水口的年平均值分别为 0.85m 和 0.90m,4-6 月水库透明度较低,基本不超过 0.8m,最低值出现在 4 月,入水口和出水口均为 0.65m;7-10 月份较高,最高值出现在 9 月,水库入水口和出水口都为1.2m,2 个采样点季节变化规律基本一致,出水口的透明度略高于入水口处. 出、入水口处叶绿素 a 浓度与透明度呈显著性负相关. 经叶绿素 a 浓度与透明度独立样本的 $t$ 检验,2 个采样点之间无显著差异($P_{Chl.a}=0.983$,$P_{SD}=0.420$).

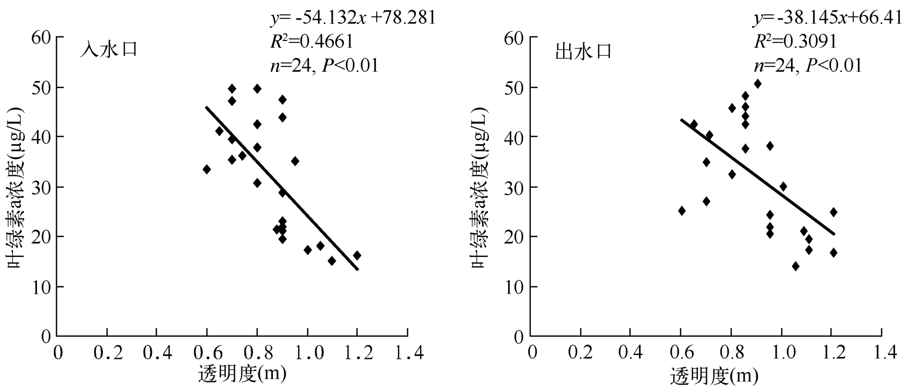



图 4 水库叶绿素 a 浓度与透明度的回归关系

Fig. 4 Linear regression between chlorophyll-a concentration and SD in Dajingshan Reservoir

2.2.3 富营养化状态指数 2005 年水库富营养化状态($TSI_M$)指数在 45-53 之间,指示水库处于中-富营养状态,且较多时间处于富营养状态. 富营养化状态指数的季节变化明显,在枯水期的 2-5 月、10-12 月,富营养化指数超过 50,水体呈现富营养化状态,在夏季的 7-9 月,富营养化指数低于 50,水体呈现中营养状态. 调水入水口与出水口的营养状态指数的动态变化相同.

### 2.3 营养盐、水温对叶绿素 a 浓度的影响

2005 年水库叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度在全年时间尺度上呈正相关,但叶绿素 a 浓度与总氮浓度

呈显著相关性，叶绿素 a 浓度与水温在全年水平上则表现了较显著的负相关（$P<0.05$）（图 5）．水库叶绿素 a 浓度与总氮浓度在枯、丰两期表现为正相关，丰水期两者的相关性要比枯水期显著（$P<0.01$）（表 1）．水库叶绿素 a 浓度与总磷浓度在丰水期表现出了正相关，而在枯水期表现出了负相关，且丰水期的相关性较枯水期更显著（$P<0.01$）．水库叶绿素 a 浓度与水温在枯水期和丰水期均呈负相关，但相关性没有达到显著水平（$P>0.05$）．

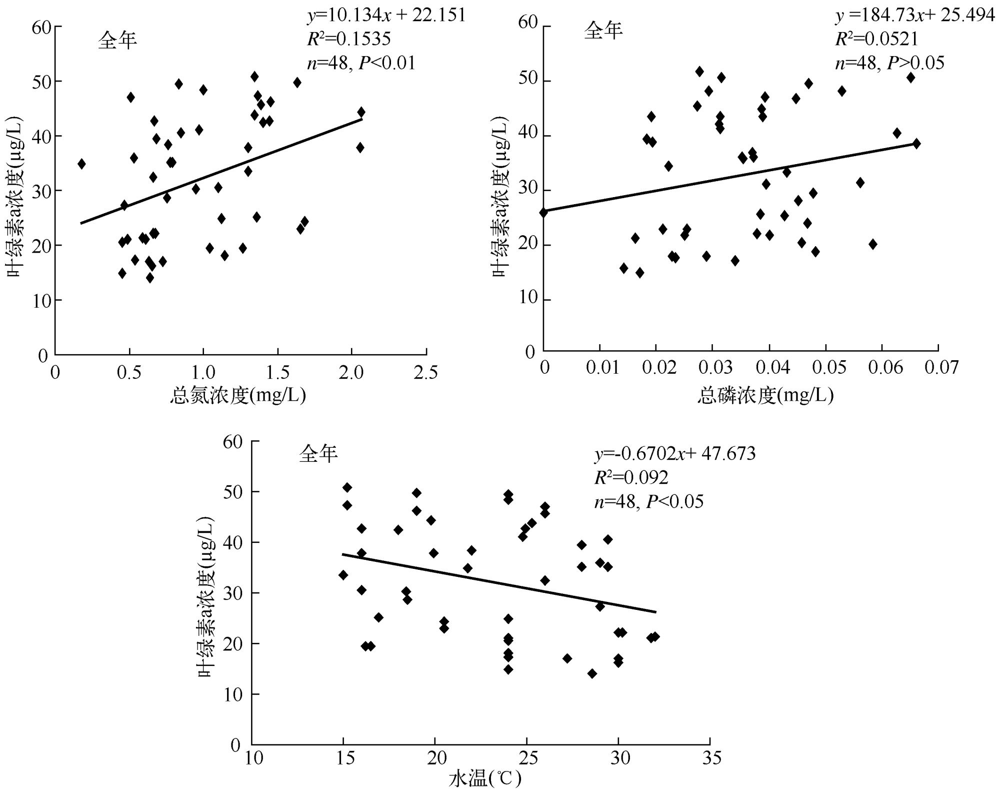



图 5 水库总氮、总磷浓度、水温与叶绿素 a 浓度的相关关系

Fig. 5 Correlations between chlorophyll-a concentration and TN, TP concentration, temperature

表 1 丰水期、枯水期的叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度、水温的相关性

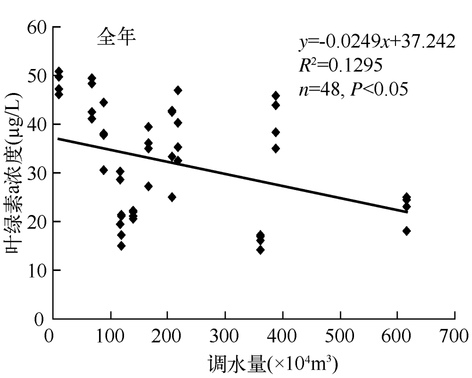
Tab. 1 Correlations between chlorophyll-a concentration and total nitrogen, total phosphorus concentrations and temperature in wet and dry seasons

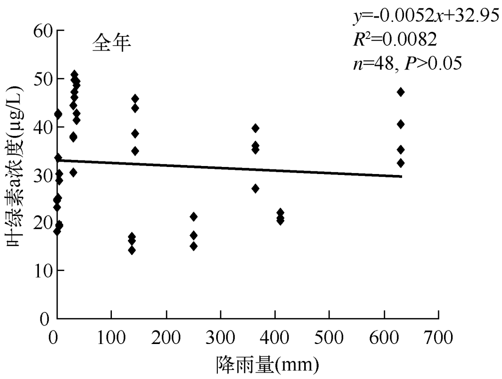
| | 丰水期 | 枯水期 |
|---|---|---|
| 叶绿素 a 浓度与总氮浓度（TN） | $Chl.\ a=42.854TN+0.8236$<br>$r=0.551, n=24, P<0.01$ | $Chl.\ a=6.7155TN+26.276$<br>$r=0.261, n=24, P>0.05$ |
| 叶绿素 a 浓度与总磷浓度（TP） | $Chl.\ a=507.34TP+12.454$<br>$r=0.569, n=24, P<0.01$ | $Chl.\ a=-142.64TP+40.426$<br>$r=0.201, n=24, P>0.05$ |
| 叶绿素 a 浓度与水温（T） | $Chl.\ a=-1.3056T+64.964$<br>$r=0.301, n=24, P>0.05$ | $Chl.\ a=-0.1332T+37.526$<br>$r=0.043, n=24, P>0.05$ |

### 2.4 降雨、调水对叶绿素 a 浓度的影响

在全年时间尺度上，水库叶绿素 a 浓度与调水量、降雨量及水力滞留时间均表现为负相关，但只有与调水量的相关性较为显著（$P<0.05$）（图 6）．在丰水期和枯水期，水库叶绿素 a 浓度与调水量均表现出较为显

著的负相关.叶绿素 a 浓度与降雨量在丰水期与枯水期两期则均为正相关,枯水期的相关程度略高于丰水期.水库叶绿素 a 浓度与水力滞留时间在丰水期表现出负相关,而在枯水期表现出正相关,且在丰水期有显著的相关性($P<0.01$)(表 2).



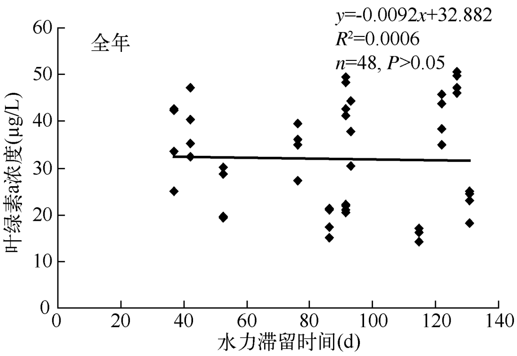




图 6 降雨量、调水量和水力滞留时间对叶绿素 a 浓度的影响

Fig. 6 Relationship of chlorophyll-a concentration with precipitation, pumped water amount, hydraulic retention time

表 2 丰水期、枯水期的叶绿素 a 浓度与降雨量、调水量、水力滞留时间的相关性

Tab. 2 Correlation between chlorophyll-a concentration and precipitation, pumped water amount, hydraulic retention time

| | 丰水期 | 枯水期 |
|---|---|---|
| 叶绿素 a 浓度与降雨量($PP$) | $Chl.\ a=0.0046PP+27.76$<br>$r=0.076, n=24, P>0.05$ | $Chl.\ a=0.0869PP+31.935$<br>$r=0.429, n=24, P<0.05$ |
| 叶绿素 a 浓度与调水量($PW$) | $Chl.\ a=-0.0562PW+39.178$<br>$r=0.455, n=24, P<0.05$ | $Chl.\ a=-0.0236PW+40.59$<br>$r=0.479, n=24, P<0.05$ |
| 叶绿素 a 浓度与水力滞留时间($RT$) | $Chl.\ a=-0.2825RT+52.803$<br>$r=0.534, n=24, P<0.01$ | $Chl.\ a=0.065RT+28.892$<br>$r=0.236, n=24, P>0.05$ |

## 3 讨论

2005 年,大镜山水库为中富营养化中小型水体,在早春(1-3 月)和晚秋(10-12 月),富营养化程度相对较高,水体呈现富营养状态,而在夏季(7-9 月),水体呈现中富营养状态,这种营养状态的季节变化与类似的温带水体有着明显的差别.在温带地区的富营养化水体中,由于夏季水温显著高于其它季节,大型浮游

动物生物量下降，浮游植物生物量在夏季生长快且具有生物量积累的条件，水体的叶绿素 a 浓度高，营养状态指数高[13]. 在热带亚热带地区，受夏季风影响的强降雨成为水体动力条件的主要控制因素，水体动力条件极大地影响了水体营养盐和浮游植物生物量. 对调水型水库而言，同时受到调水入库模式（时间和水量）的影响. 大镜山水库位于南亚热带地区（热带北缘），全年气温较高，表层水体与深层水体温差相对温带地区要小，水温变化不如温带地区强烈，水库水体出现热分层时间较早，在 3 月末就出现了较明显的分层. 在分层前，水体垂直混合相对较强，底层的营养盐带入表层，导致这一阶段水体中营养盐浓度较高. 随着水温增加，在水温分层稳定之前，通过混合由底层带入到表层的营养盐促进了藻类的生长和细胞数量积累，最终导致早春（分层前后）水体的叶绿素 a 浓度出现了峰值. 夏季风导致的集中强雨，大大稀释了水体中藻类细胞密度，从而导致整个夏季水体叶绿素浓度的明显下降. 水库晚秋水体中叶绿素 a 浓度的增加在机理上与春季叶绿素峰值形成机制相似，即热分层消失前后存在一个营养盐高和水温不是很低的有利于藻类生长期. 在温带地区的富营养化水体中，水体中全年的藻类生物量和叶绿素 a 浓度的峰值通常出现在夏季，这是主要由水温所决定，如捷克 Simov 水库的叶绿素 a 浓度只在夏季出现一个峰值[14]. 热带地区由于全年的水温变化程度远不如温带地区大，温度对浮游植物生长和数量积累的季节动态影响不是特别明显. 在大镜山水库中，全年及丰水期的叶绿素 a 浓度与水温的关系呈负相关，在枯水期呈微弱的负相关（图 5，表 1），说明了水温不是控制叶绿素 a 浓度整体变化的主要因素. 大镜山水库处于季风区，夏季的降雨受季风影响，丰水期降雨量大且比较集中，是全年主要的降水来源. 尽管集雨区很小，但由于降雨量大而且集中，夏季降雨能够显著地改变水库原有的水文过程. 大镜山水库集雨范围内森林覆盖率高，几乎没有人为干扰，面源污染少，降雨入库水相对于调入水的营养盐浓度较低，对水体营养盐的浓度起到稀释作用，导致水库出现了清水阶段. 在丰水期，叶绿素 a 浓度的平均值为 29.15μg/L，低于枯水期的平均值（34.97μg/L）；全年的叶绿素 a 浓度与降雨量呈负相关（图 6），说明全年的降雨有利于控制浮游植物的生物量. 进入枯水期后，降雨少，调水增加，调水量远大于供水量，水库库容增加，水位增加，导致水力滞留时间相对较长. 调水入库带入大量的营养盐负荷，为晚秋浮游植物生物量的积累提供了条件. 从全年来年，浮游植物生物量（叶绿素 a 浓度）与水体中氮、磷营养盐浓度的季节动态相一致，它是营养盐、水温和水力滞留时间共同作用的结果. 作为中小型水库，当水力滞留时间较短时，水体内的空间差异小. 针对供水影响分析的需要，本次研究中的两个采样点为抽水入库口与供水口，它们空间距离较近，采样点在环境变量与生物变量上没有明显的差异，这是原初供水系统设计中没有考虑利用水库自身的生态功能.

水体中叶绿素 a 浓度能够反映浮游植物生物量的高低，是浮游植物现存量的重要指标，也是水体初级生产力和水体富营养化水平的重要指标[15-17]，水体富营养化指数的计算中，以叶绿素 a 浓度的反映标为核心，这决定了富营养化指数与叶绿素 a 浓度的相关性，在水体研究管理中常用叶绿素 a 浓度代替浮游植物生物量[11,18-20]. 从全年时间水平来看，水库叶绿素 a 浓度与总氮、总磷浓度呈现正相关（图 5），但相关系数均较低. 在丰水期和枯水期，总氮与叶绿素 a 浓度均呈正相关，丰水期两者的相关性要大于枯水期且相关性显著（表 1），这是因为丰水期总氮浓度相对低，它对浮游植物生长的重要性更为明显. 从氮磷比看，大镜山水库水体为一个磷限制性水体，叶绿素 a 浓度与总磷浓度在丰水期呈现显著正相关关系，在枯水期呈较弱的负相关，但是显著性不强（表 1），与全年不显著的正相关形成对照，说明水库藻类生物量积累对磷的直接依赖性受到其它因素的影响或修改. 在自然水体中，水体磷和叶绿素 a 的浓度均受到其它因素的影响. 丰水期的磷浓度相对较低，磷是主要的限制因素，水温高，藻类生长快对磷的需求，直接导致磷与叶绿素 a 浓度呈正相关. 在枯水期磷与叶绿素 a 浓度呈负相关，说明枯水期磷的增加没有导致叶绿素 a 的同步增加，枯水期水温下降，调水产生的营养负荷没有被藻类利用. 这与徐宁等在对广东省 20 个水库调查中发现的相似的规律一致，即总氮、总磷浓度较低时它们与叶绿素 a 浓度的相关性要好[21-22].

大镜山水库是一座调水水库，集雨面积小，面源污染不明显，而调水水源的营养盐负荷较高，这决定了水库营养盐主要依赖外源输入，调水明显地改变了水库的水动力学过程，频繁的调水供水，导致水体水力滞留时间发生变化，而水力滞留时间是浮游植物生物量的限制因子之一，这都会影响浮游植物对营养盐的响应，从而影响水体的富营养化过程[23-24]. 调水量与叶绿素 a 浓度全年呈负相关（图 6），在丰水期和枯水期也均呈负相关性（表 2），说明调水入库对水库叶绿素 a 浓度起到稀释作用. 从相关系数看，调水对叶绿素 a 浓

度的影响总的要比营养盐对叶绿素 a 浓度的影响大. 水力滞留时间是反映水体水文和水动力学的整体变量,水力滞留时间是由库容、入库(降水和调水)水量共同决定. 水力滞留时间与叶绿素 a 浓度的关系要比调水量与叶绿素 a 浓度的关系复杂. 在大镜山水库中,丰水期水力滞留时间与叶绿素 a 浓度呈负相关(表 2),这主要是由于降雨增加、而调水量减少,尽管水力滞留时间增加,降水量增加对水体叶绿素 a 浓度的稀释作用强于水力滞留时间的整体效果,而在枯水期两者呈现正相关性(表2),水力滞留时间的增加有利于浮游植物生物量的积累. 降雨对叶绿素 a 浓度的影响也表现季节性,在枯水期,降雨有利于叶绿素 a 浓度的增加,这与枯水期少量降雨时雨水中的营养盐浓度高增加了水体的营养负荷有关.

同样作为调水水库的契爷石水库,所处地理位置及调水模式和大镜山水库相似,但由于其调水来源的水体水质较好,加上集雨面积比大镜山水库大,导致营养盐浓度动态变化和生物对营养盐的响应模式与大镜山水库不同. 在调水少的丰水期,水体营养盐浓度由于面源带入而较高,加上较高的温度导致这时期的叶绿素 a 浓度较高,而在调水较多的枯水期大量较为干净的东江水调入水库后会起到稀释营养盐浓度的作用,使营养盐浓度降低,这时叶绿素 a 浓度较低,表现出浮游植物生物量丰水期高于枯水期,水库富营养化状态指数全年只在夏季出现一个峰值,这与大镜山水库全年两次出现峰值模式不同[21]. 大镜山水库由于调水水源的营养盐浓度较高,调水会加重水体营养盐浓度,而降雨反而会起到稀释水体的作用,使水库富营养化状态指数在枯水期出现两个峰值,调水量和调水时间成为大镜山水库富营养化的主要影响因子.

## 4 结论

大镜山水库是一座地处南亚热地区的中型调水水库,调水主要保障枯水期(咸潮期)的供水水量,因此调水主要发生在咸潮的枯水期时段. 该调水水库富营养化的主要参数表现出明显的季节变化,即叶绿素 a 浓度和富营养化状态指数在早春和晚秋出现两个峰值,丰水期叶绿素 a 浓度的下降是由于夏季风形成的集中降雨所导致,因此处于中-富营养水平的大镜山水库在早春和晚秋出现了两个峰值,其特征不同于温带富营养化水体在夏季出现单个峰值;大镜山水库在早春和晚秋的特征不同在机理上与温带贫营养水体在夏季出现的两个峰值也不同. 调水入库极大地增加了水库营养盐负荷的同时,也在显著地影响水库水动力学过程,与夏季的集中强降雨一起成为影响该水库富营养化表现的关键因素,这些因素改变了浮游植物群落对营养盐的响应表现.

## 5 参考文献


[1] Carpenter SR. Eutrophication of aquatic ecosystems: Biostability and soil phosphorus. *Proceeding of National Academy of Sciences*, 2005, **102**(29): 10002-10005.

[2] Schindler DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology & Oceanography*, 2006, **51**(1): 356-363.

[3] 韩博平,李 铁,林旭钿. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京:科学出版社,2003: 3-6.

[4] 韩博平,冯远船,刘正文. 广东省大镜山水库生态学与水质管理研究. 广州:广东科技出版社,2006: ⅰ-ⅱ.

[5] 李秋华. 大镜山水库水质改善生态工程效果及浮游植物群落东台特征[学位论文]. 广州:暨南大学,2008.

[6] 李秋华,韩博平. 南亚热带调水水库春季浮游植物群落的结构与动态. 热带亚热带植物学报,2007,**15**(4): 294-300.

[7] 李秋华,韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析. 生态学报,2007,**27**(6): 2355-2364.

[8] 欧阳昊,韩博平. 从东江调水后契爷石水库的水质和富有植物群落特征. 湖泊科学,2007,**19**(2): 204-211.

[9] 聂 祥,林彰文,顾继光等. 南亚热带中小型水库沉积物中磷的形态与释放特征. 生态环境,2008,**17**(3): 903-908.

[10] 林少君,贺立静,黄沛生等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. 生态科学,2005,**24**(1): 9-11.

[11] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22** (2): 361-369.

[12] Lin QQ, Han BP, Lin QX *et al*. Reservoir water supply and eutrophication in Guangdong Province (South China). In: International Lake Environment Committee ed. Proceedings of 9th International Conference on the Conservation and management of Lakes. Shiga, 2001: 269-272.

[13] Reynolds C, Dokulil M, Padisák J. Understanding the assembly of phytoplankton in relation to the trophic spectrum: where are we now? *Hydrobiologia*, 2000, **424**(1-3): 147-152.

[14] Komarkova J, Hejzlar J. Summer maxima of phytoplankton in the Rimov Reservoir in relation to hydrologic parameters and phosphorus loading. *Archiv für Hydrobiologie*, 1996, **136**(2): 217-236.

[15] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv für Hydrobiologie*, 1966, **62**: 1-28.

[16] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton. London: Cambridge University Press, 1984.

[17] 胡 韧,林秋奇,段舜山等.热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征.生态科学,2002,**21**(4): 310-315.

[18] Dillon PJ, Rigler FH. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology & Oceanography*, 1974, **19**(5): 767-773.

[19] Carlson RE. More complications in the chlorophyll-secchi disk relationship. *Limnology & Oceanography*, 1980, **5**(2): 379-382.

[20] An KG, Park SS. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological Modelling*, 2002, **152**(2-3): 191-203.

[21] 徐 宁,段舜山,林秋奇等.广东大中型供水水库的氮污染与富营养化分析.生态学杂志,2004,**23**(3): 63-67.

[22] 徐 宁,段舜山,王朝晖等.广东大中型供水水库的磷污染与富营养化分析.生态科学,2003,**22**(4): 341-345.

[23] Straskraba M, Dostálková I, Hejzlar J *et al*. The effect of reservoirs on phosphorus concentration. Internationale Revue der gesamten. *Hydrobiologie*,1995, **80**(3): 403-413.

[24] Han BP, Armengol J, Garcia JC *et al*. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecological Modelling*, 2000, **125**(2-3): 109-122.