

流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响

林秋奇, 胡 韧, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要:流溪河水库 2001 年年降雨量 2250mm, 其中 79% 来自 4 月至 9 月的丰水期。入库流量变幅 4.25~414.00 m³/s, 近 60% 的入库水量流来自吕田河。流域营养盐输送量取决于流域降雨径流强度, 吕田河高于玉溪河。由于营养盐被泥沙吸附沉积, 丰水期湖泊区营养盐浓度明显低于河流区。浮游植物密度为 17~1245 cells/ml, 以硅藻为主要优势种群。硅藻密度分布与水流流速和透明度的相关程度明显高于与营养盐和温度的相关程度。在丰水期, 由于受水流和透明度的强烈控制, 尽管营养盐供应比较充足, 硅藻密度处于比较低的水平。丰水期硅藻密度稍低于枯水期, 河流区明显低于大坝处。浮游植物香农-威纳多样性指数为 0.97~2.75。受水库水动力学(水位波动等因素)的影响, 最大浮游植物多样性出现于水位波动比较大的 8 月份, 最小值则出现于水位波动最小的 6 月份。

关键词:水文; 营养盐; 浮游植物; 多样性

Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir

LIN Qiu-Qi, HU Ren, HAN Bo-Ping (Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2278~2284.

Abstract: Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution was studied in 2001 in a tropical reservoir, Liuxihe Reservoir (South China). The annual precipitation was 2250 mm and about 79% was contributed by the flood season (from April to September). Reservoir inflow varied from 4.25 to 414.00 m³/s, and was primarily from the Lutian River and Yuxi River. The Lutian River contributed about 60% of the reservoir inflow. During the raining season, high-suspended materials were transported into the reservoir by overland runoff. Then, high nutrient concentration and low secchi disk depth was found. Nutrient input was higher in the flood season than in the dry season and depended mostly on the intensity of rainfall. Nutrient input was higher from the large catchment area Lutian River than that from the Yuxi River. Phytoplankton density was between 17 and 1245 cells/ml and contributed mostly by diatom. Diatom abundances showed more significant relationships with inflow than with nutrient and

基金项目:广东省科技攻关资助项目(2KM06103S);国家自然科学基金资助项目(39900022);教育部骨干教师基金资助项目;教育部“优秀青年教师资助计划”资助项目

收稿日期:2002-12-10; **修订日期:**2003-04-04

作者简介:林秋奇(1973~),男,硕士,讲师,主要从事水域生态学研究。E-mail: tlinqq@jnu.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: tbphan@jnu.edu.cn

Foundation item: The Chinese Education Ministry Grants, National Natural Science Foundation of China (No. 39900022) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2KM06103S)

Received date:2002-12-10; **Accepted date:**2003-04-04

Biography: LIN Qiu-Qi, Majoring in aquatic ecology. E-mail: tlinqq@jnu.edu.cn

temperature. Because of short residence time, diatom abundance was maintained at relatively low level, although the nutrient supply was relatively rich in the flood season. Phytoplankton Shannon-Wiener diversity index varied between 0.97 and 2.75, with the maximum found in August. It was likely that hydrodynamics such as water level fluctuation acted as a disturbing factor and maintained high phytoplankton diversity in the reservoir.

Key words: hydrodynamics; nutrient; phytoplankton; diversity

文章编号:1000-0933(2003)11-2278-07 中图分类号:Q94 文献标识码:A

在温带地区,温度和光照是引起水体浮游植物季节性变化的主要因素之一^[1]。在热带地区,由于温度和光照的季节性变化没有温带地区那么显著,水库浮游植物群落的季节性变化更大程度上与流域水文的季节性变化相关^[2~4]。对水库浮游植物来说,营养盐主要是外源性的,依靠流域径流输送,并取决于流域地质、土地利用和降雨地表径流强度等^[5~7]。因流域径流量的季节性和短期性变化,流域营养盐输送量相应出现季节性和短期性变化,影响了浮游植物的生长。与此同时,水库是一种介于河流和湖泊的人造水体,具有明显的入库和出库水流,水流流速比同等水面面积的湖泊要快得多,水流流速的季节性和短期性变化也是控制水库浮游植物生物量的重要因素之一^[8,9]。

流溪河水库是广东省一座大型供水水库(23°45'N,113°46'E),水库海拔高度 235 m,最大水深 73 m,平均水深 21.3 m,水面面积 15.25 km²,库容 0.325 km³,滞留时间 170 d。入库水流主要来自吕田河和玉溪河,其中,玉溪河集水面积 192.3 km²,年平均流速 7.9 m/s,吕田河集水面积 264.4 km²,年平均流速 11.4 m/s。水库每年供水量占广州市需水量的 70%左右,是广州市主要的供水水源。为了保证水库的可持续性供水,加强水库水质管理必不可少。为了能制定出合理的水库水质保护对策,对引起水库水质和浮游植物季节性和短期变化的因素的了解是必不可少的^[10],本文探讨了水库水动力学的季节性和短期变化对水库营养盐和浮游植物分布的影响。

1 材料与方法

根据流溪河水库水流特征,在吕田河(S1)和玉溪河(S2)入库处,两条河流汇合处(S3)和大坝处(S4)四个区的原来河道位置设点采样。于 2001 年 4 月至 12 月每隔 2 个月对水库进行采样。温度的垂直分布用 YSI85 型水质分析仪现场测定,萨氏盘测定透明度。采取表层 0.5m 的水样,按标准方法测定 DIN 和 PO₄-P。浮游植物定量样品在表层 0.5m 处采取 1L 水,用福尔马林固定,浓度为 5%,于实验室沉淀浓缩计数。定性样品用 64μm 浮游生物网于水平及垂直方向拖网,用福尔马林固定(5%)。流溪河水库水文数据由流溪河水电站提供。

2 结果与讨论

2.1 水库水文水动力学特征

由图 2 可见,水库在 2001 年年降水量 2250 mm,属偏丰年,在热带风暴及西南季风的影响下,4 月至 9 月为丰水期,降水量占全年的 79%,其中最高月降水量为 7 月份的 389 mm,最小月降水量为 10 月份的 1 mm。入库流量和出库流量的季节分布比较相似,最大入库和出库水量均出现于 7 月份,分别为 415.0 和 62.8 m³/s,最小入库流量为 4.3 m³/s(1 月份),最小出库流量由于 12 月份有几天没有放水而为 0。入库和出库水流的交换使水库水位波动比较大,最高水位出现于 7 月中旬的 233.8 m,最低水位出现于 4 月上旬的 224.3 m。吕田河由于集水面积大于玉溪河,提供了近 60%的入库水量。

表 1 为每次采样时水库水文特征。入库水流主要来自流域地表径流、表层流(壤中流)和地下径流,地

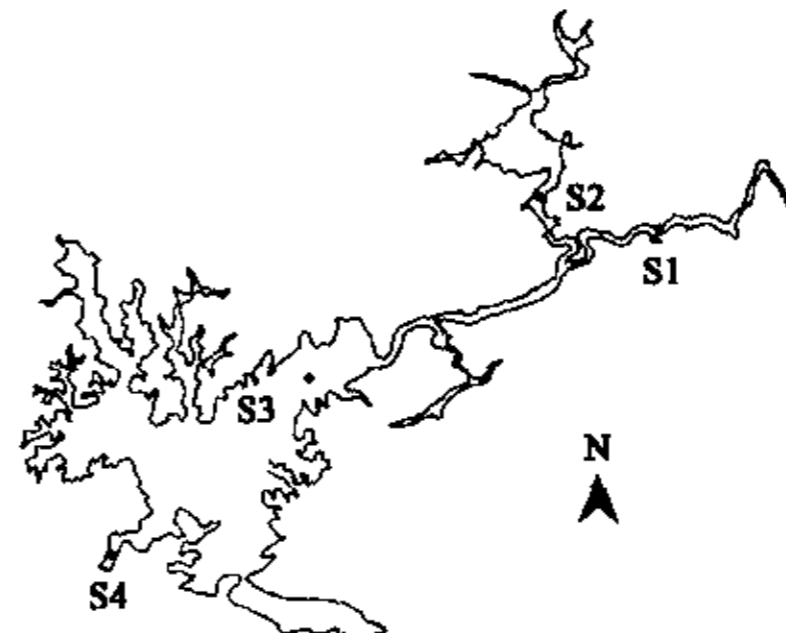


图 1 流溪河水库示意图

Fig. 1 Map of Liuxihe Reservoir

表径流在雨后发生,强度取决于降雨量,地下径流则全年均有发生。4月中旬和8月中旬的采样恰逢降雨周期,持续时间比较长,采样时一周降水量分别为115.3和46.8 mm,地表径流相对比较强,水库流速比较快;6月的月降水量虽高于4月和8月,但采样时一周降水量比较少,只有17.3 mm,地表径流量比较少,而表层径流量比较高,入库流量仍比较高。10月份月降水量很少,入库水流基本上依靠地下径流,而12月份采样时有一定的降雨量及表层径流量,但入库流量仍比较低。采样时水库一周水位波动为0.13~0.40 m,其中6月份采样时水位比较高,入库和出库流量差值不是太大,水位波动最小,而4月份采样时水位比较低,入库和出库流量差值比较大,水位波动相应比较大。吕田河和玉溪河流域降水量虽差别不大,但由于集水面积比较大,吕田河入库流量明显高于玉溪市(表1)。

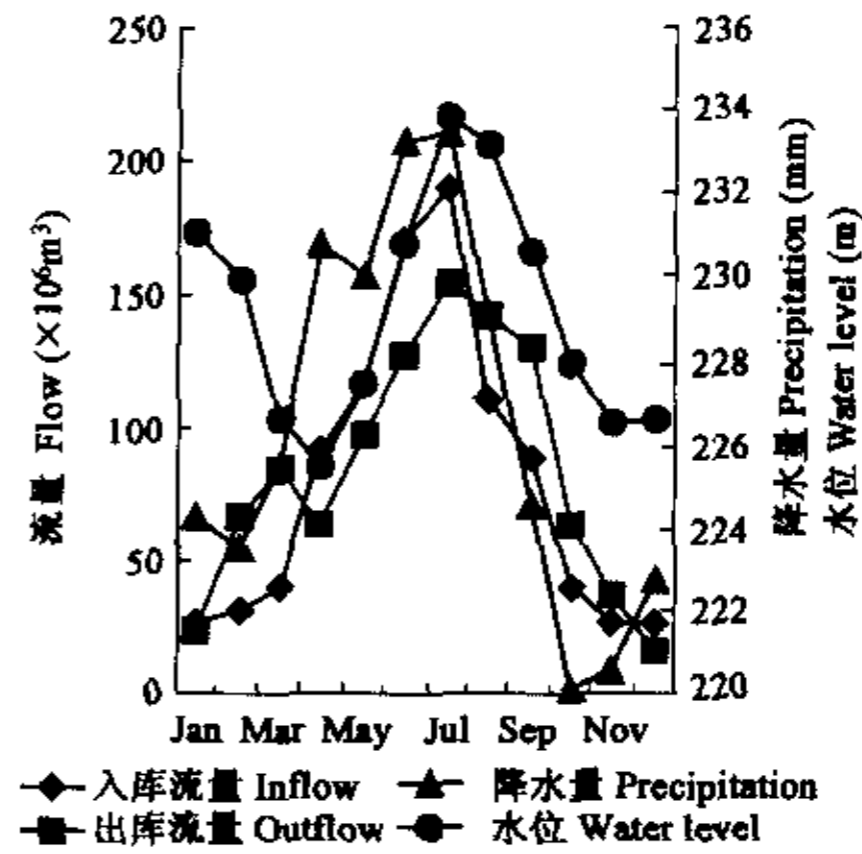


图2 流溪河水库2001年水文动态
Fig. 2 Hydrologic fluctuation in 2001

表1 每次采样时水库一周水文特征

Table 1 Hydrologic characteristics

	降水量 Precipitation (mm)	水位波动 Water level fluctuation (m)	最大出库 流量 Max. outflow(m ³ /s)	最小出库 流量 Min. outflow (m ³ /s)	最大入库流量 Max. inflow(m ³ /s)		最小入库流量 Min. inflow(m ³ /s)	
					吕田河 Lutian River	玉溪市 Yuxi River	吕田河 Lutian River	玉溪市 Yuxi River
Mid-Apr	115.3	0.40	41.6	6.1	49.6	33.0	9.7	6.4
Mid-Jun	17.3	0.12	57.2	49.0	40.4	27.0	26.6	17.7
Mid-Aug	46.9	0.31	57.8	6.6	31.4	20.9	16.9	11.2
Mid-Oct	0.3	0.40	32.4	19.6	11.6	7.8	9.4	6.3
Mid-Dec	15.8	0.25	0.0	8.3	8.9	5.9	6.0	4.0

表2 各采样时期水库营养盐和透明度分布特征

Table 2 Distribution of PO₄-P, DIN and Secchi depth in the reservoir

		PO ₄ -P (μg/L)				DIN(μg/L)				Secchi depth (m)			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
丰水期 Flood season	Apr	124	89	15	11	579	245	472	301	0.2	0.6	1.6	1.3
	Jun	42	17	19	11	336	326	422	373	2.5	2.4	3.4	4.0
	Aug	28	19	11	15	412	280	288	392	0.6	1.5	3.2	3.5
枯水期 Dry season	Oct	9	9	13	5	305	113	190	179	2.6	2.7	3.2	3.8
	Dec	12	14	12	4	177	153	198	233	2.0	1.5	3.2	3.5

* S1 吕田河 Lutian River; S2 玉溪市 Yuxi River; S3 库中 Central part of the reservoir; S4 大坝 Dam

2.2 水库水温、透明度和营养盐动态特征

水库表层温度为16.8~32.2 C,各采样点各采样时期温度垂直分布情况见图3。丰水期采样时水库湖泊区出现温度垂直分层现象,但温跃层的位置及厚度取决于光辐射强度、水流流速等。在吕田河,4和8月份的采样正赶上降雨周期,比较高的地表径流使垂直分层遭到破坏,表层温度也相对低于其它采样点。在枯水期,随着气温逐渐下降,水体表层温度也逐渐下降,采样时垂直热分层现象基本消失。

水库中的PO₄-P和DIN主要依靠入库水流的输送^[11],并取决于流域降水造成地表径流的强度。由图4和5可见,吕田河PO₄-P和DIN均与流域降水量呈明显的正相关关系;虽然玉溪市DIN与降水量正相关程度不是太高,但PO₄-P也与降水量呈显著的正相关关系。由于透光率受悬浮颗粒影响,吕田河和玉溪市

透明度均与降水量呈负相关关系。高的流域地表径流量意味着高的 $PO_4\text{-P}$ 、DIN 和悬浮颗粒物输送量,因此水库河区透明度与 $PO_4\text{-P}$ 和 DIN,尤其是 $PO_4\text{-P}$ 呈负相关关系(图 6)。由表 2 可见,丰水期高的地表径流量造成河区 $PO_4\text{-P}$ 和 DIN 浓度在丰水明显高于枯水期,尤其是 4 月份的采样时,水库有比较高的磷的输送量。有地表径流发生时(4 月份和 8 月份)水库透明度低于没有地表径流时,尤其是 4 月份采样时的吕田河,透明度只有 0.2 m。由于入库水流速由河区向湖泊区逐渐减缓,水体中悬浮物逐渐沉降,与此同时,水体中部分 $PO_4\text{-P}$ 被其吸附而随之沉积,丰水期河区 $PO_4\text{-P}$ 含量明显高于湖泊区,透明度则低于湖泊区;吕田河较高的流域径流量导致输入水库的 $PO_4\text{-P}$ 和 DIN 量也明显高于玉溪河。在枯水期的两次采样中,12 月份采样时有少量的降水量,虽然入库流量比 10 月份时还低,但河区 DIN(吕田河外)和 $PO_4\text{-P}$ 浓度略有上升。在湖泊区大坝处, $PO_4\text{-P}$ 含量一直维持在比较低的水平,即使在丰水期有比较高的 $PO_4\text{-P}$ 输入时,也只有 $10 \mu\text{g/L}$ 左右,表明水库对磷的滞留率是相当高的。

2.3 浮游植物分布

在水库中共检测到浮游植物 83 种,其中大部分种类

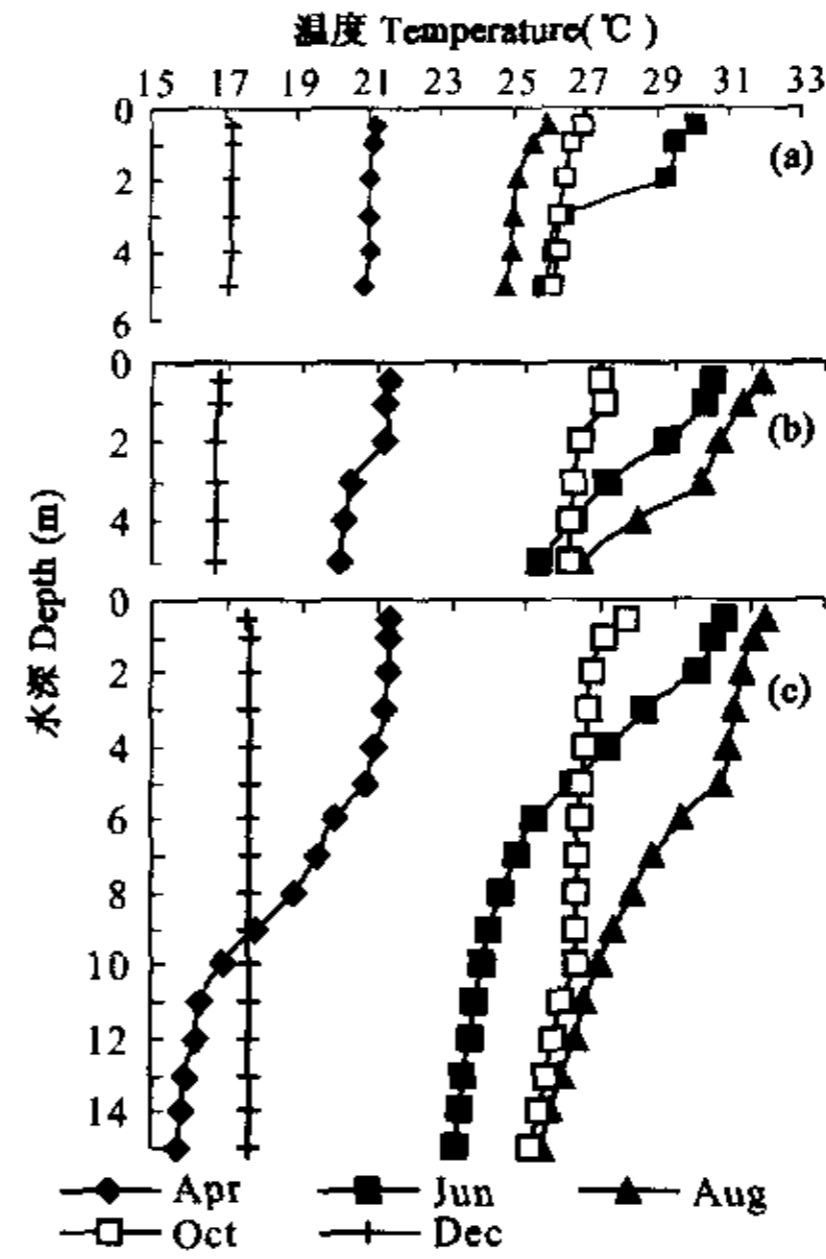


图 3 采样时水库温度垂直分布 (a)吕田,(b)玉溪,(c)大坝

Fig. 3 Thermal profiles in each sampling site (a) Lutian River, (b) Yuxi River, (c) Dam

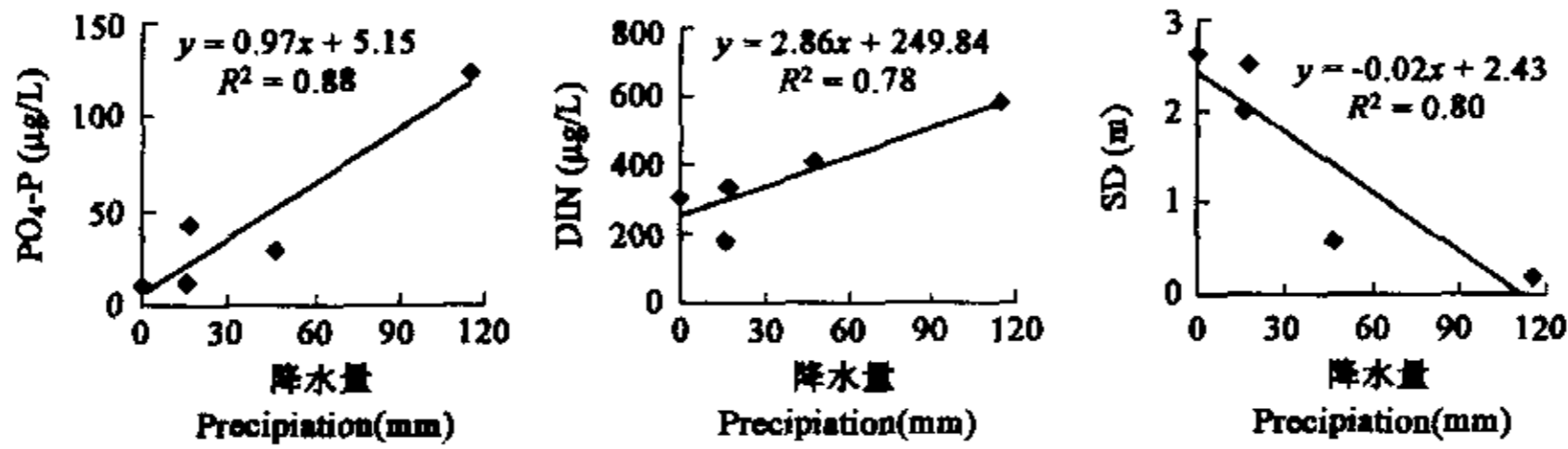


图 4 吕田河 $PO_4\text{-P}$ 、DIN 和 SD 与降水量的关系

Fig. 4 Relationship of $PO_4\text{-P}$, DIN and SD with precipitation in Lutian River

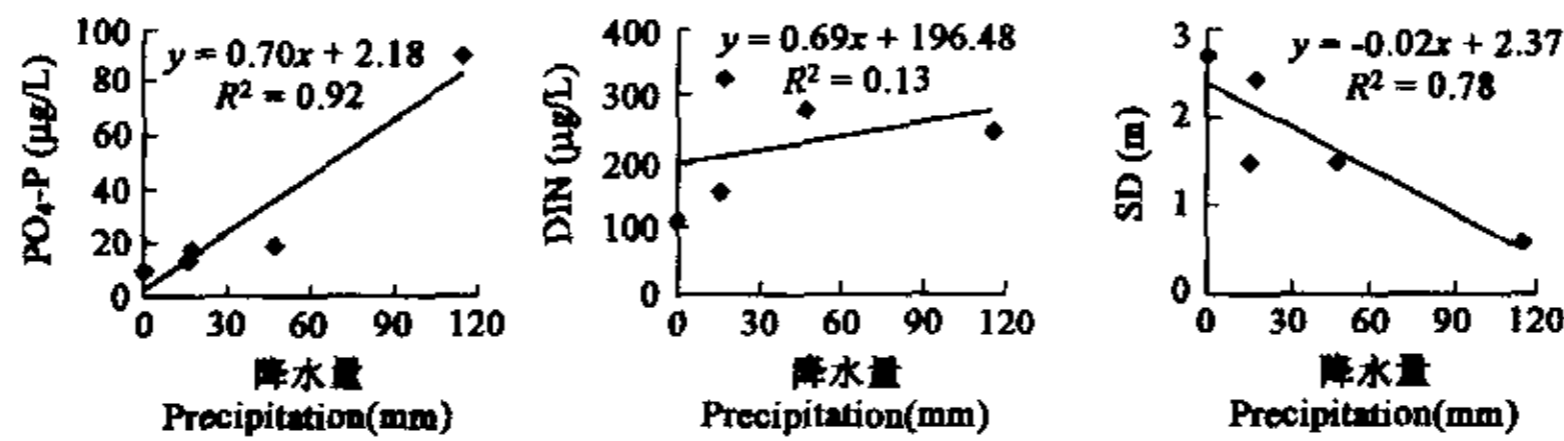


图 5 玉溪河 $PO_4\text{-P}$ 、DIN 和 SD 与降水量的关系

Fig. 5 Relationship of $PO_4\text{-P}$, DIN and SD with precipitation in Yuxi River

为绿藻(43 种),其次为硅藻(17 种)和蓝藻(13 种),其它种类 10 种。绿藻主要以无鞭毛种类:纤维藻

(*Ankistrodesmus* sp.)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、双对栅藻 (*S. bijuga*)、二形栅藻 (*S. dimorphus*)和胶网藻 (*Dictyosphaerium ehrenbergianum*) 等为主;硅藻以梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 和极小直链藻 (*Aulacoseira pusilla*) 等为优势种类;点形粘球藻 (*Gloeocapsa punctata*)、色球藻 (*Chroococcus* sp.) 和水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 则为主要的蓝藻种类。

浮游植物丰度为 17~1245 cells/ml, 其中硅藻、蓝藻和绿藻占据水库浮游植物丰度的绝大部分(图 7)。硅藻在几次采样中均有比较高的优势度, 除在夏季湖泊区丰度低于蓝藻外, 在其它时间均为水库的绝对优势种群。温度虽是浮游植物季节性变化的主要非生物因素之一^[1], 但在流溪河水库中, 硅藻丰度与水温的相关性并不明显(图 8)。水库有别于同样水面面积湖泊的一个明显特征是水库水量水质受流域影响要大得多, 水库水动力学过程表现出强烈的不稳定性^[12,13], 水库入库水流和透明度的频繁波动对浮游植物的生长影响很大。由图 9 可见, 水库硅藻丰度与入库水流流速和透明度均呈显著的相关关系。受水流和透明度的影响, 由图 10 可见, 在丰水期, 高的营养盐供应并没有相应出现高的硅藻丰度。在 4 月份采样周期(春季), 虽然流域比较高的地表径流量造成水库营养盐浓度相对高于其它几次采样, 水温也比较适中, 但大量悬浮颗粒物的输入使水库透明度大为降低, 较低的透明度明显抑制浮游植物的生长^[5], 而较快的水流流速使浮游植物平流损失量大为增加^[6], 硅藻和浮游植物丰度在各采样点差别不大, 且远低于其它几次采样。在吕田河, 虽 $PO_4\text{-P}$ 浓度高达 $124 \mu\text{g/L}$, 表层温度 21 C , 但低的透明度 (0.2 m) 和高的平流损失率(水流流速达 $49.6 \text{ m}^3/\text{s}$) 使硅藻及浮游植物丰度只有 52 和 57 cells/ml。在 6 月份和 8 月份采样时, 大坝处虽然营养盐浓度不如河流区高, 但水流流速(虽然大坝出库水量高于河流区, 但流速远低于河流区)和透明度比河流区大有改善(表 1 和 2), 因此大坝处硅藻及浮游植物丰度均明显高于河流区。在玉溪河, 虽然丰水期营养盐浓度低于吕田河, 但水流流速比吕田河慢得多(表 1), 浮游植物平流

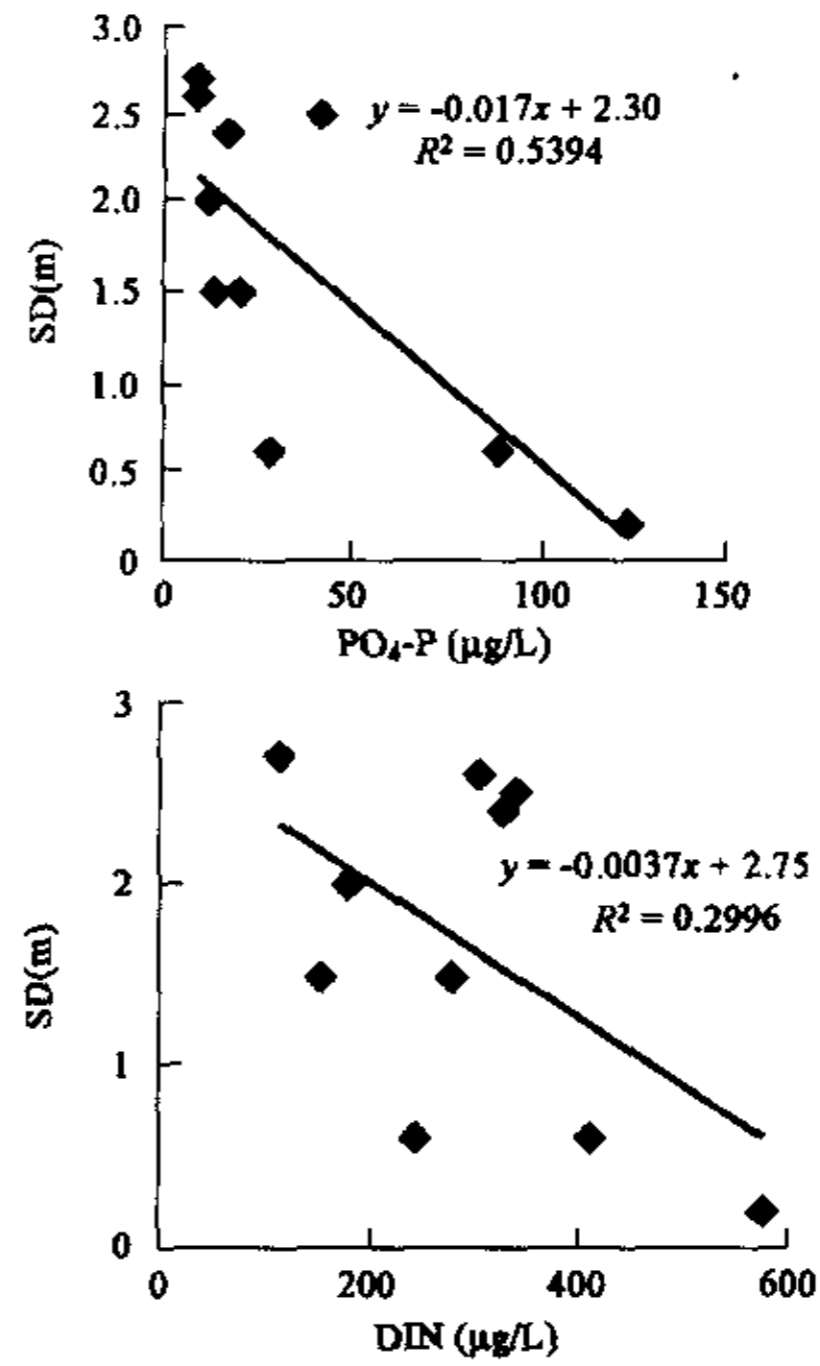


图 6 河流区 $PO_4\text{-P}$ 和 DIN 与 SD 的关系
Fig. 6 Relationship of $PO_4\text{-P}$ and DIN with SD in the riverine zone

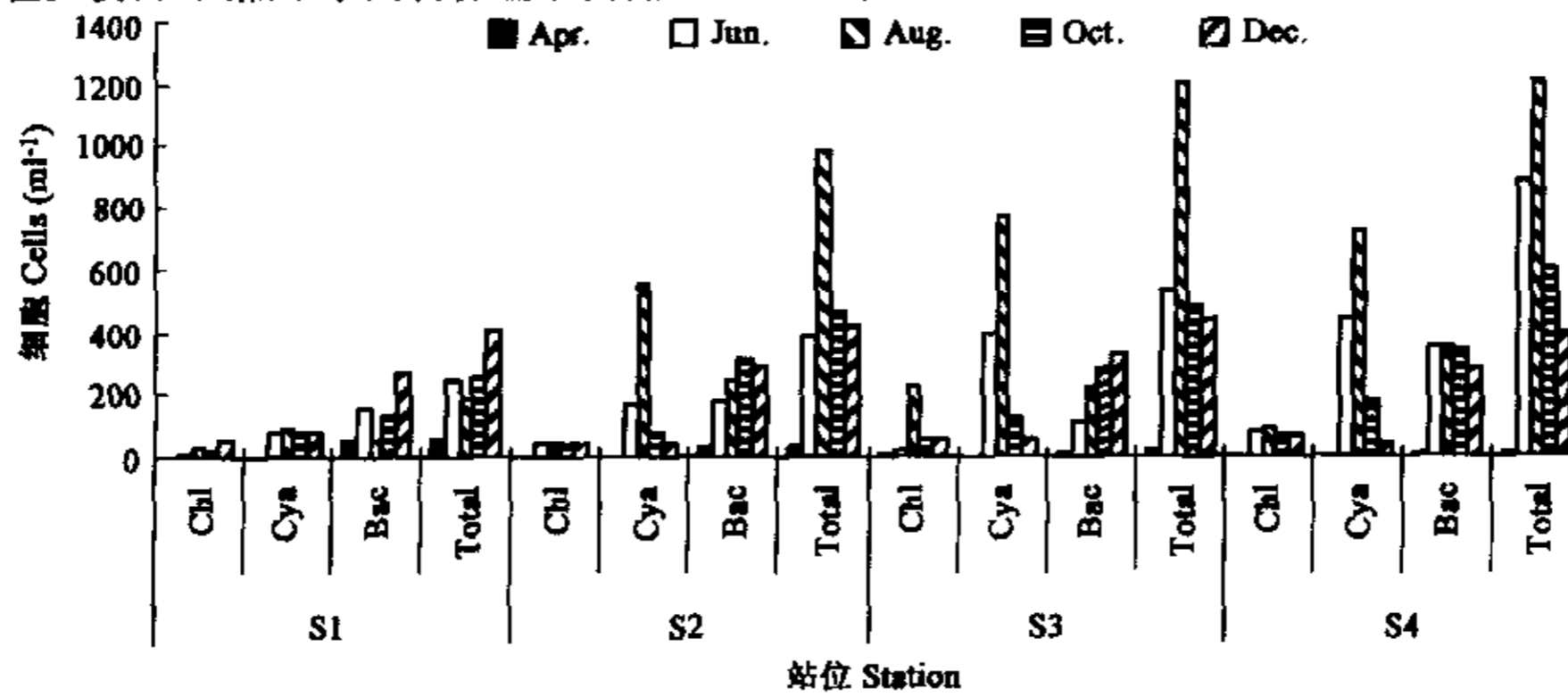


图 7 在各采样点和采样时期浮游植物丰度(Total)及绿藻(Chl)、蓝藻(Cya)和硅藻(Bac)的分布
Fig. 7 Spatial and temporal variations of phytoplankton abundances in the reservoir

损失率不如吕田河高,硅藻及浮游植物丰度远高于吕田河。在枯水期,虽然输入水库的营养盐量大大减少,硅藻的生长明显受营养盐限制,但因平流损失量也大为减少,硅藻丰度比丰水期反而有所上升(尤其在吕田河)。水库由于受人为调控以及流域频繁降雨径流事件的扰动,水体透明度、营养盐、和水流流速频繁波动,比较适合硅藻这一类具有硅质壁能抗机械损伤、对光的快速变化适应能力比较强的种类生长^[14],因此硅藻在水库中占有明显的优势,但其丰度时空变化受水库水动力学密切相关。

虽然蓝藻更喜在稳定的环境条件下生长,但比较高的水温条件有利于蓝藻的生长^[1]。由图 7 可见,水库蓝藻丰度的变化与水库水温具有相当明显的正相关性。在丰水期 6 月份和 8 月份采样时,尽管水流流速仍比较快,但垂直热分层显著,比较高的水体表层温度(30 °C 左右)和相对比较充足的营养盐供应促进了蓝藻的繁殖,尤其是微囊藻的生长^[15],蓝藻的丰度远高于其它几次采样,尤其在 8 月份采样时,库中水华微囊藻丰度达 428 cells/ml,成为水库主要优势种之一。由于水库水流流速、透明度等的频繁波动,绿藻虽然种类最多,但主要以无鞭毛种类为主,且密度一直处于比较低的水平,尤其在 4 月份采样时。

水库浮游植物香农-威纳多样性指数为 0.97~2.75,最小值出现于 6 月份采样周期的湖泊区,这时蓝藻和硅藻占浮游植物丰度的 96.3%,而蓝藻和硅藻的绝对优势种分别为点形粘球藻和梅尼小环藻;最大值

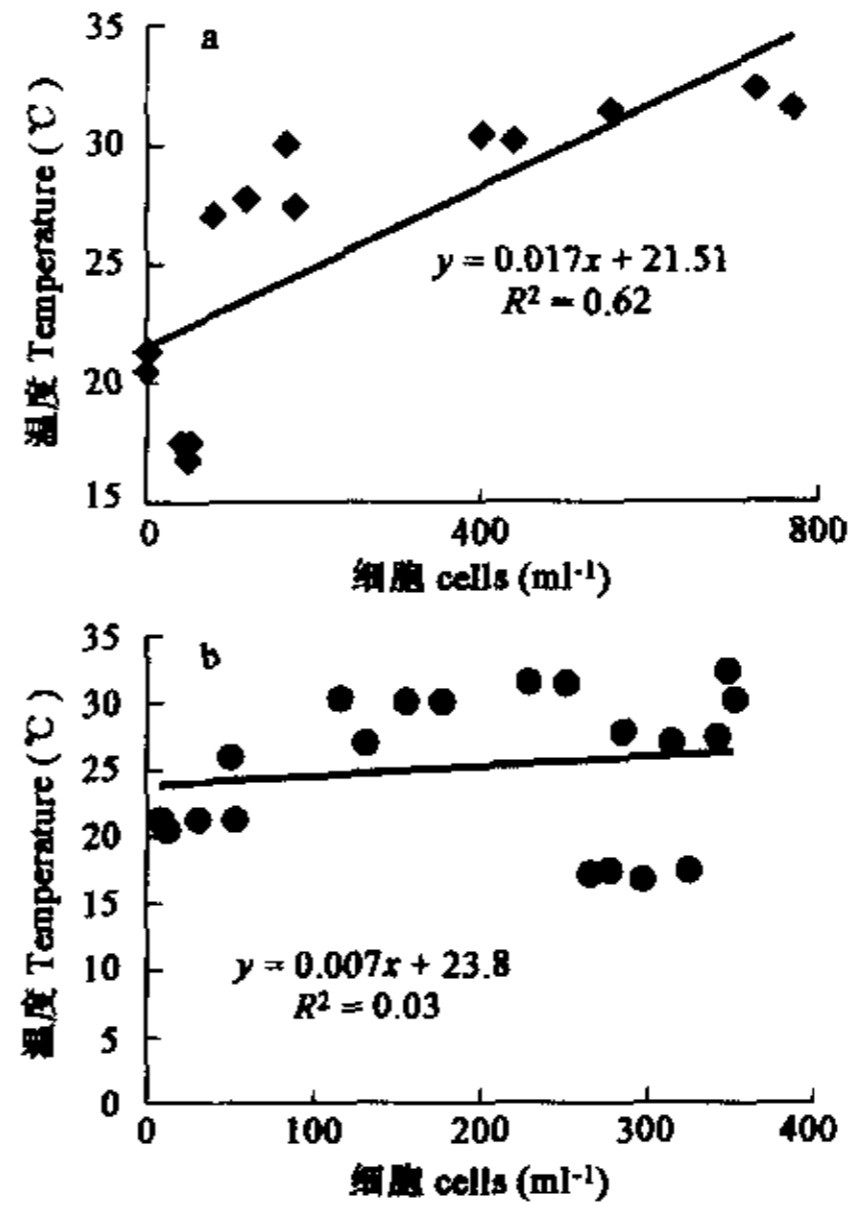


图 8 蓝藻(a)和硅藻(b)密度与水温关系
Fig. 8 Relationship of water temperature with Cyanophyta (a) and Bacillariophyta (b) abundances

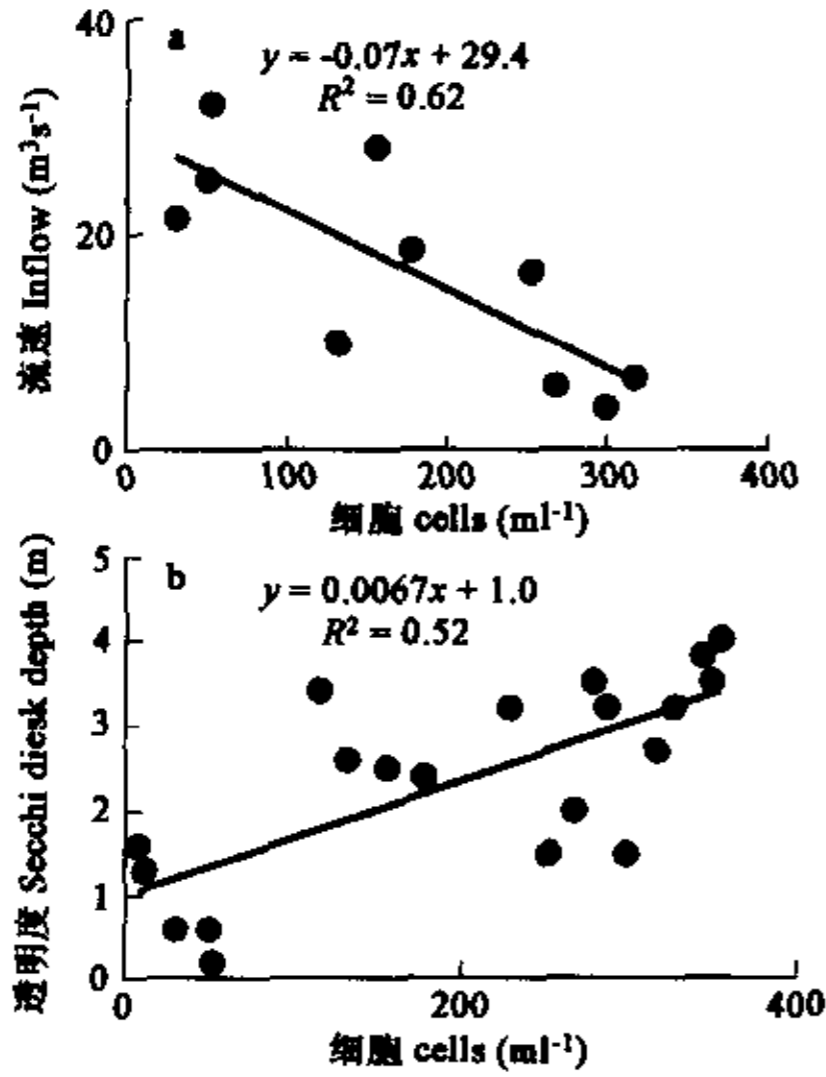


图 9 硅藻丰度与水流流速(a)和透明度(b)关系
Fig. 9 Relationship of Bacillariophyta abundance with inflow (a) and secchi disk depth (b)

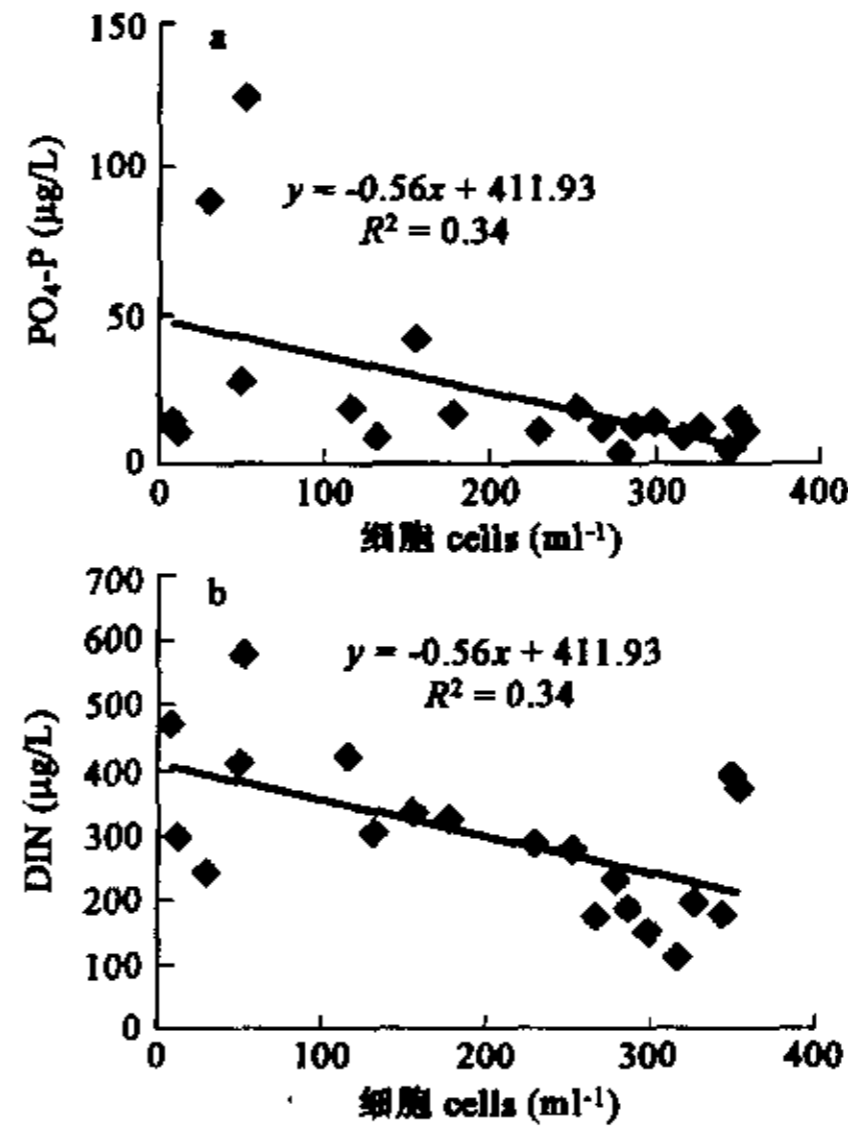


图 10 硅藻丰度与 PO₄-P (a)和 DIN (b)关系
Fig. 10 Relationship of Bacillariophyta abundance with PO₄-P (a) and DIN (b)

则出现于8月份采样的吕田河,这时蓝藻、绿藻和硅藻分别占浮游植物丰度的47%、20.2%和27.3%,而且各种类的相对优势度差别不是太大。从几次采样浮游植物多样性的时空变化看,两条河流汇合处浮游植物多样性相对要高于河流区和湖泊区,湖泊区多样性是最低的。在不稳定的环境条件下,生物群落不太容易形成单一优势种群,生物多样性一般比较高^[16]。作为引起水库环境扰动的因素之一,流域降雨量被认为与水库浮游植物多样性季节性和短期性变化密切相关^[2]。浮游植物多样性变化与水位波动明显相关($R^2=0.45$),在丰水期的4月份和8月份采样时,降水造成的水位波动相对比其它3次采样时大(表1),各采样点浮游植物多样性均比较高,尤其在8月份采样时。

3 结论

输送到水库的 $PO_4\text{-P}$ 和DIN负荷量主要取决于流域降水造成地表径流的强度,丰水期高于枯水期。由于被悬浮物的吸附沉降,湖泊区 $PO_4\text{-P}$ 浓度明显低于河流区,水库对磷的滞留率比较高。受流域降水造成入库水流流速和透明度的季节性和短期性波动的影响,水库浮游植物主要以对该环境条件适应能力比较强的硅藻为主,且其密度时空变化明显受水库水动力学影响。受水流流速的影响,高的营养盐供应并没有相应出现高的硅藻丰度,硅藻丰度与营养盐呈负相关关系,但相关性不如与流速的相关性高。水库浮游植物多样性与水库环境条件(流速和水位等的波动)的稳定性密切相关。在相对不太稳定的环境条件下,浮游植物呈现出比较高的多样性,尤其在两条河流汇合处。

References:

- [1] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton. Cambridge University Press. Cambridge, 1984.
- [2] Cleber C F and Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, **445**: 165~174.
- [3] Hooker E and Hernandez S. Phytoplankton biomass in Lake Xolotlan (Managua): its seasonal and horizontal distribution. *Hydrobiol. Bull.*, 1991, **25**(2): 125~131.
- [4] Nogueira M G. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), Sao Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 2000, **431**: 115~128.
- [5] Kimmel B L, Lind O T and Paulson L J. Reservoir primary production. In: Thornton, K. W., B. L. Kimmel and F. E. Payne, eds. *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1990.
- [6] Lin Q Q, Hu R, Duan S S, et al. Reservoir Trophic States and the Response of Plankton in Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(6): 1101~1108.
- [7] Wei P, Lin Q Q, Hu R, Han B P, et al. Water quality and plankton fluctuation in Gaozhou reservoir. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2002, **8**(2): 165~170.
- [8] Straskraba M, Tundisi J G and Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. In: Straskraba M., J. G. Tundisi and A. Duncan eds., *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 1993.
- [9] You J T, Lin Q Q, Hu R, Duan S S, et al. Trophic state and plankton distribution in a newly constructed reservoir, Feilaixia reservoir. *Ecologic Science*, 2002, **21**(1): 21~24.
- [10] Nilssen J P. Tropical lakes- functional ecology and future development: The need for a process-orientated approach. *Hydrobiologia*, 1984, **113**: 231~242.
- [11] Thornton K W. Perspectives on Reservoir Limnology. In: Thornton, K. W., B. L. Kimmel and F. E. Payne eds., *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1990.
- [12] Lin Q Q and Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: an overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 1034~1040.
- [13] Han B P, Armengol J, Garcia J C, et al. The thermal structure of Sau Reservoir (NE; Spain): a simulation approach. *Ecol. Modell.*, 2000, **125**: 109~122.
- [14] Reynolds C S, Descy J P and Padisak J. Are phytoplankton dynamics in rivers so different those in shallow lakes? *Hydrobiologia*, 1994, **289**: 1~7.
- [15] Calijuri M C and Dos Santos A C A. Short-term changes in the Barra Bonita reservoir (Sao Paulo, Brazil): emphasis on the phytoplankton communities. *Hydrobiologia*, 1996, **330**: 163~175.
- [16] Connel J. Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science*, 1978, **199**: 1304~1310.

参考文献:

- [6] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应. *生态学报*, 2003, **23**(6): 1101~1108.
- [7] 魏鹏, 林秋奇, 胡韧, 等. 高州水库水质与浮游生物动态分析. *应用与环境生物学报*, 2002, **8**(2): 165~170.
- [9] 游江涛, 林秋奇, 胡韧, 等. 飞来峡水库蓄水初期营养状态及浮游生物分布特征. *生态科学*, 2002, **21**(1): 21~24.
- [12] 林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用. *生态学报*, 2001, **21**(6): 1034~1040.