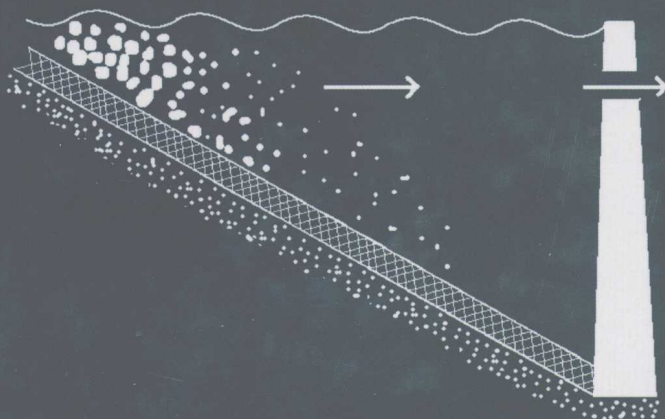


中国水库生态学与水质管理研究

Reservoir Ecology and Water Quality Management in China

韩博平 石秋池 陈文祥 主编

Edited by HAN Bo-ping, SHI Qiu-chi and CHEN Wen-xiang



科学出版社
www.sciencep.com

中国水库生态学与水质管理研究

Reservoir Ecology and Water Quality Management in China

韩博平 石秋池 陈文祥 主编

Edited by

HAN Bo-ping, SHI Qiu-chi and CHEN Wen-xiang

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容涉及水库生态学、水库富营养化、水质管理、水库渔业资源利用与管理、水库水质模型以及水库水质安全。介绍了中国水库水资源现状、水库生态学研究和水质管理的最新进展,为今后我国水库水质资源的保护与管理提供了系统的理论和方法。

本书可供从事水域生态学和环境保护研究的科技工作者、水资源和水质管理人员以及大专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国水库生态学与水质管理研究/韩博平,石秋池,陈文祥主编. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-018075-5

I. 中… II. ①韩… ②石… ③陈… III. ①水库—生态环境—环境保护—研究—中国 ②水库—水质管理—研究—中国 I V. ①X524 ②TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 112760 号

责任编辑:钟如松

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

韶关二九〇研究所地图彩印厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 1 版 开本:787×1092 1/16

2006 年 12 月第 1 次印刷 印张:41

印数:1—500 字数:930000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《中国水库生态学与水质管理研究》编辑委员会

主 任:刘建康

副主任:李德尚 史为良 胡传林 刘 平

委 员(按姓氏笔画为序):

万国江	万成炎	于 涛	王宇庭	王雨春	王朝晖
石秋池	史为良	史玉强	刘 平	刘正文	刘家寿
刘建康	刘 威	华德尊	吴生桂	李吉方	李春艳
李德尚	李维贤	李凤彬	宋立荣	杜桂森	苏昌永
陈文祥	陈尔金	陈永灿	陈 椽	陈伟明	陈金生
林秋奇	陆开宏	周储伟	胡传林	胡 韧	施为光
黄永春	黄道明	钱 新	顾继光	梁 涛	梁 岩
梁旭方	董方勇	谢树莲	韩德举	韩博平	彭建华
虞左明	雷腊梅	瞿丽雅			

序

水库是人类控制和利用水资源的主要工程，也是伟大和壮观的工程，兴建水库开发和利用水资源所产生的经济社会效益是巨大的。

我国是世界上的水库大国，坝高 15m 以上的水库数量占全世界水库的 46%，并拥有世界上最大的水利工程——三峡水库工程。截至 2005 年底，我国已建成水库 85 108 座，总库容达 5 624 亿 m^3 。水库的防洪、发电、供水、灌溉、养殖功能的发挥在我国工农业生产及人民生活中起着举足轻重的作用。

但是，在人口增长及经济社会快速发展过程中，污染未得到有效控制，水库水质明显下降，引起社会的广泛关注。保护水库水质关系到我国 21 世纪供水安全和经济的可持续发展。中国水资源公报数据表明，目前我国水库水质远好于自然湖泊，多年水库水质监测数据显示，富营养化水体约占总数的 10%，大型水库的水质要好于中小水库，发生富营养化的水库主要是城市周边的中小水库，尚未发现大型水库出现长期大规模水华现象。但农村面源污染影响水库水质，一些水库处于中富营养水平。还有上游城市大量排放工业和生活废污水，从而使一些水库水质不能满足水功能要求。

我国社会经济的发展对水的需求仍在不断增加，无论水量还是水质保护，都迫切需要技术和管理方面的提高。系统地开展水库生态学的研究，全面推动我国水库以生态系统为单元的保护工作已是当务之急。

目前，我国水库生态学和基础研究及成果的应用仍十分薄弱，与可持续发展对水库管理的要求仍有差距。全国各地开展的研究主要针对水库的水质退化或突发性水污染问题，人们更为关注作为饮用水水源水质监测的指标，将水库作为一类特殊的生态系统，研究其发展和演变过程还鲜见报道，积累

的成果十分有限。《中国水库生态学与水质管理研究》收集了我国目前有代表性的研究成果，力图反映目前这方面研究的现状。该书的出版将推动我国在保护和管理水库生态系统方面的发展，对全面保护水库资源 and 功能具有重要意义。

高西坤

2006 年 11 月

前 言

水库是通过筑坝形成的半人工半自然水体，在传统上，水库的功能以防洪、发电和灌溉为主，但随着社会和经济的发展，人类对淡水资源的需要增加，从水库直接和间接供水成为缓解水资源供需矛盾的主要手段。目前世界各地水库普遍存在富营养化和水质退化问题，迫切需要面向水质管理的应用技术。我国是一个水库大国，水库在我国的工农业生产和人民生活中已经发挥了巨大的作用，开展水库生态学和水质管理研究，发展水库水质改善和生态恢复的生态技术，对保障我国社会稳定和经济长期的持续稳定发展具有重大的战略意义。

水库作为一类介于河流和湖泊之间的水体，与天然湖泊不同，水库水动力学过程受发电、防洪和灌溉等用水方式的调节，加上特殊的库盆形态，水库水动力学明显地受人为调节与控制，导致水位变化大，水滞留时间相对较短，缺少有利于维持鱼类和底栖动物生物多样性的环境，水库生态系统的结构与功能有着自身的特殊性。20 世纪 80 年代以来，水库生态学和水质管理受到世界各国学者和有关组织的重视，经过 30 多年的发展，已基本形成了较为完善的理论和研究方法，水库生态学研究也已成为现代湖沼学的重要方面。近 5 年来发表在国际水生生物学报 (*Hydrobiologia*) 上有关水库方面的论文已超过 1/5，反映出水库生态学研究已经得到广泛重视。欧美学者对建立和形成水库生态学的理论和方法做出了重要的贡献，而亚洲（中国、印度）的学者则侧重于与水库渔业相关的研究。1987 年召开了第一届国际水库湖沼学和水质管理大会，2006 年夏天在捷克举行了第五届国际水库湖沼学大会，大会以水库生态系统的环境与生物整体性和有害蓝藻水华控制为主题，反映了国际上对生态系统水平上的水库生态和水质管理的关注和重视。

我国水库生态研究起步相对较晚，20 世纪 70 年代初期中国科学院水生生物研究所设立了水库研究室，后来独立为水利部水库渔业研究所，在我国水库的渔业资源方面开展了大量工作。在这一时期，我国水库生态学的研究主要以渔业生产为服务对象，一些水库为提高产量进行了投饵养殖，对水质

产生了负面影响。20 世纪 90 年代后，我国经济和社会高速发展，水库供水量日益增加，人类对水库的影响程度也不断增加，水库水质监测和保护得到水利和环保部门的重视。我国很多高校陆续开展了与水库生态学有关的基础研究。广东省是我国水库最为集中的地区之一，水库供水在区域经济发展方面起着至关重要的支撑作用，例如对香港和澳门的供水，关系到两个特别行政区的稳定与繁荣。暨南大学水生生物学国家重点学科将水库生态学作为学科发展的重要方向之一，坚持系统地开展了热带亚热带地区水库生态学和面向水质的应用技术研究，并热心推动我国水库生态学的发展。《中国水库生态学与水质管理研究》编委会于 2004 年夏天在广州召开会议，并就我国水库生态学发展进行了研讨。国家“十一五”规划强调对水环境保护改善和保护技术的研究，给我国这个水库大国的水库生态学发展提供了良好机遇。《中国水库生态学与水质管理研究》收集了我国水库生态学研究论文 38 篇，这些论文基本反映了我国水库生态学研究现状。本书的出版对于我国水库生态学研究将起到积极的推动作用，让更多的同志关注和参与水库生态学和水质管理研究，以提高我国水库生态学理论和应用研究的水平。

中国科学院水生生物研究所研究员

中国科学院院士

刘建康

2006 年 10 月于武汉

目 录

序	高而坤 (I)
前言	刘建康 (III)

第一部分 水库生态学

流溪河水库浮游生物时空分布异质性研究	林秋奇等 (3)
新安江水库浮游生物群落研究	虞左明等 (21)
广东省水库水资源分布与生态系统特征	韩博平等 (34)
水库中沉积磷早期成岩作用的地球化学研究	王雨春等 (55)
丹江口水库生态系统演替及水利工程的生态效应评价	韩德举等 (75)
广东省水库轮虫分布特征	林秋奇等 (90)
热带亚热带地区典型水库与湖泊浮游植物脂肪酸组成的初步研究	游江涛等 (103)
广东流溪河水库和星湖浮游动物群落特征与比较研究	赵帅营等 (119)
云南石林黑龙潭水库环境与生物多样性研究	李维贤等 (138)
密云水库的浮游生物群落与水体营养状态	杜桂森等 (164)
杏林湾水库水质现状与水生生物群落特征	黄永春等 (174)

第二部分 水库富营养化

汤溪水库富营养化特点与微囊藻水华发生影响因子	赵孟绪等 (199)
生物操纵防治水库富营养化的原理与实践	陈文祥等 (216)
浙江省三座饮用水水库的蓝藻控制对策及效果评价	陆开宏等 (236)
四川黑龙滩水库的非点源污染及其对水库富营养化的作用研究	施为光等 (251)
沙河水库的营养状况与水质管理	万成炎等 (271)
二龙山水库水质富营养化及其综合防治研究	李春艳等 (285)
贵州红枫湖、百花湖水库浮游植物群落特点及其对富营养化 的指示分析	陈 橡等 (298)
土地利用方式对官厅水库周边氮、磷流失的影响	梁 涛等 (311)
洋河水库富营养化现状与管理对策	李凤彬等 (322)
漳泽水库浮游植物的组成及其营养状态的指示	谢树莲等 (342)
鹤地水库浮游植物特征与富营养化综合评价	胡 韧等 (361)

第三部分 水库渔业与利用

江苏省水库渔业资源调查与评价	于 涛等 (379)
湖北省水库渔业资源利用与管理	陈金生等 (395)
长江流域大型养殖型水库渔业对环境的影响及其调控	
——以湖北省麻城浮桥河水库为例	彭建华等 (406)
水库凶猛鱼类种群操控实践与种质基因库构想	梁旭方等 (426)
放养渔业对北方水库生态系统影响的初步研究	王宇庭 (437)
山东省水库渔业性能及渔业利用	李吉方等 (451)

第四部分 水库水环境与水质模型

密云水库的水温模拟及分层特征分析	陈永灿等 (467)
日本水库生态与水质建模方法——以七宿水库为例	钱 新等 (484)
水库水质模型与应用	周储伟等 (505)

第五部分 水库水质管理

水库生态系统的典型特征、服务功能及渔业效用	陈文祥等 (525)
辽宁大伙房水库水质的长期变化与安全预警研究	史玉强等 (548)
利用水网藻治理水库富营养化的可行性	王朝晖等 (570)
香港饮用水源(东江和深圳水库)水氯化消毒副产物三卤甲烷的形成	
和影响因素分析	梁 岩等 (580)
微囊藻毒素的检测及毒理学研究	雷腊梅等 (599)
贵州红枫湖与百花湖水库的汞污染状况分析	瞿丽雅等 (621)
东张水库水质及浮游生物的时空分布	陈尔金 (632)
后记	韩博平等 (650)

第一部分 水库生态学

流溪河水库浮游生物时空分布异质性研究

林秋奇, 顾继光, 韩博平

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要: 于2001年4月至2002年12月调查了流溪河水库营养盐和浮游生物的时空分布特征。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 $17 \sim 1245 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, 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。

流溪河水库轮虫、枝角类和桡足类丰度均不是太高, 分别为 $0.2 \sim 173$ 、 $0.1 \sim 13.8$ 和 $0.2 \sim 83.3 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相对而言, 轮虫和桡足类丰度远高于枝角类。轮虫以螺形龟甲轮虫、广生多肢轮虫和胶鞘轮虫为优势种; 枝角类以短尾秀体溞、长额象鼻溞和颈沟基合溞为优势种; 桡足类基本上以幼体为主, 成体相对丰度一般不超过20%, 并主要来自广布中剑水蚤和微小近剑水蚤。浮游动物丰度季节性变化不明显。在河流区丰水期, 轮虫丰度高于桡足类; 在湖泊区, 桡足类丰度全年高于轮虫。

浮游动物 Sheldon - type 生物量谱并不是平谱, 生物量随着粒径 (等效球形直径 (ESD)) 的增大而增大。对轮虫而言, 个体大小范围为 $50 \sim 160 \mu\text{m}$ ESD, 生物量随粒径的增大而减少; 枝角类 ($100 \sim 512 \mu\text{m}$ ESD) 生物量大小分布模式呈 ‘单峰型’, 最大生物量出现在中等大小的粒径组 ($200 \sim 256 \mu\text{m}$)。桡足类是流溪河水库浮游动物最重要的组成部分, 生物量大约占总浮游动物生物量的60%; 大小分布同时覆盖了轮虫和枝角类的粒径范围。总体而言, 桡足类的生物量随粒径的增大而增大, 但在粒径 $128 \sim 400 \mu\text{m}$ 间有一个小波谷 (刚好是枝角类最大生物量的粒径组)。

水库作为一个半人工半自然水体, 结合了河流和自然湖泊的许多特征。浮游动物大小分布在较小的尺度上显示出空间差异, 并展现了不同的季节变化模式。河流区浮游动物小型个体的优势度大于湖泊区, 标准化谱斜率明显小于湖泊区。从浮游动物大小分布的季节性变化看, 湖泊区季节性变化不明显; 河流区则变化显著, 丰水期标准化谱的斜率大于 -0.75 , 枯水期小于 -0.75 , 斜率的变化与水位波动呈正相关关系, 与透明度呈负相关关系。水库库盆的形状及水动力学的时空差异是影响浮游动物大小分布时空差异的重要非生物因素。

关键词: 水文; 营养盐; 浮游生物; 生物量谱; 空间异质性; 季节变化; 热带水库

在温带地区, 温度是引起水体浮游生物季节性变化的主要因素之一 (Reynolds, 1984; George & Taylor, 1995; William 1999)。在热带地区, 温度季节性变化没有温带地区那么显著, 温度对浮游生物季节性变化的影响不是太明显。但是, 在热带地区水库中仍能观察到浮游生物的季节性变化 (Nilssen, 1984)。水库是一个动态系统, 入库水流从集水区带来了营养盐和有机碎屑等颗粒物, 出库水流又将营养盐和有机颗粒物带出水库, 但出库水流受人为调节, 整座水库就象一个浮游生物连续培养器, 浮游生物的

现存量取决于生长速率和稀释率 (Marzolf, 1990)。水库营养盐主要是依靠流域径流输送, 并取决于流域地质、土地利用和降雨地表径流强度等 (Kimmel *et al.*, 1990; 林秋奇等, 2003), 而稀释率也同样取决于流域径流量。流域径流量的季节性变化, 一方面影响流域营养盐输送量的季节性变化另一方面决定了稀释和平流损失率的季节性变化。在热带地区水库中, 浮游植物群落季节性波动可由营养盐和稀释率控制, 并且与流域水文循环的季节性节律密切相关 (Cleber *et al.*, 2001;

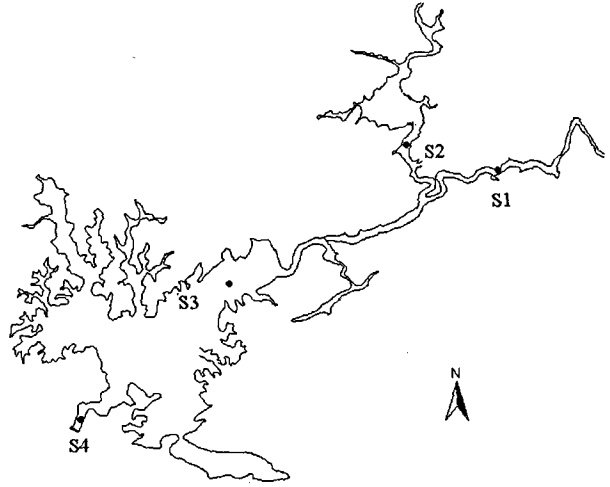


图1 流溪河水库示意图
Fig. 1 Map of Liuxihe reservoir

Hooker *et al.*, 1991; Nogueira *et al.*, 2000)。对浮游动物而言, 除稀释率外, 食物 (浮游植物) 的季节性变化、种间食物竞争及捕食与被捕食均可导致浮游动物群落结构的变化 (Arcifa *et al.*, 1992; Nilssen, 1984)。此外, 由于水库库盆的几何形状和水流速的纵向变化, 导致水库纵轴在物理和化学上有一个梯度分布, 影响了浮游生物在水库中的空间分布 (Thornton 1990; Taylor 1971)。流溪河水库是广东省一座大型供水水库 (位于 $23^{\circ}45'N$ 、 $113^{\circ}46'E$) , 是广州市主要的供水水源地。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 km^2 , 库容 0.325 km^3 , 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 km^2 , 年平均流速 $7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 吕田河集水面积 264.4 km^2 , 年平均流速 $11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水库集水区是一座国家级森林公园, 受人为污染较少, 水库营养盐动态特征更大程度上取决于自然因素, 而不是人为因素。本文调查了流溪河水库浮游生物的种类组成、群落时空分布特征以及水库水动力学对它们的影响。

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 2002 年 12 月每隔 2 个月对水库进行采样。用萨氏盘测定透明度。采取表层 0.5m 的水样, 按标准方法测定 DIN 和 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 。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 $64\mu\text{m}$ 浮游生物网于水平及垂直方向拖网, 用福尔马林固定 (5%)。浮游动物定性样品用 64 和 $113\mu\text{m}$ 浮游生物网于水平及垂直方向拖网, 用福尔马林固定 (5%)。定量样品用 5L 采水器从表层

0.5m 处每隔 1m 采至 10m (湖泊区真光层) 或从表层 0.5m 处每隔 1m 采至底层 0.5m 处 (河流区 0.5m), 用 $64\mu\text{m}$ 浮游生物网当场过滤, 用福尔马林固定 (5%)。对浮游动物计数的同时, 测量每个个体的大小。其中, 轮虫的体积通过测定体长和体宽, 采用近似几何体积公式计算 (章宗涉等, 1991); 甲壳类的湿重则通过测定体长, 采用体长与体重的几何异速方程计算 (陈雪梅, 1981; 章宗涉等, 1991)。浮游动物的比重近似为 1。采用 Sheldon - type (Sheldon *et al.*, 1972) 生物量谱方法构建流溪河水库浮游动物生物量谱和标准密度谱 (Platt & Denman, 1978; Sprules & Munawar, 1986), 以反映浮游动物群落的组成特征和时空分布的异质性。根据流溪河水库浮游动物大小, 选定了大小为等效球体直径 (ESD, equivalent spherical diameter) $50 \sim 512\mu\text{m}$ 的范围, 并将此范围由小到大分为 10 个连续的粒径组, 每一组 ESD 的上限对应的体积是下限的两倍。在以 2 为基底的对数横坐标轴上, 以每一组个体大小 (ESD) 的下限为横坐标, 对应该组的浮游动物生物量为纵坐标, 构建了 Sheldon - type 生物量谱。标准密度谱的构建则是以每一组 ESD 的下限对应的生物量的对数值 (以 2 为基底) 为横坐标, 以该组的浮游动物生物量除以该组上限生物量与下限生物量的差值的对数值 (以 2 为基底) 为纵坐标。标准密度谱回归方程的斜率反映了浮游动物生物量在不同粒径组的分布情况。如果斜率为 -1, 表明生物量在各粒径组中是均匀分布的; 斜率大于 -1, 生物量随着粒径的增大而减少; 斜率小于 -1 则相反。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 水库营养盐动态特征

表 1 为 2001 年各次采样时水库营养盐、透明度和降水量。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, 而表层流径流量比较高, 入库流量仍比较高。10 月月降水量很少, 入库水流基本上依靠地下径流, 而 12 月采样时有一定的降雨量及表层流径流量, 但入库流量仍比较低。水库中的 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 和 DIN 主要依靠入库水流的输送 (Thornton, 1990), 并取决于流域降水造成地表径流的强度。由图 2 和 3 可见, 吕田河 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 和 DIN 均与流域降水量呈明显的正相关关系; 虽然玉溪市河 DIN 与降水量正相关程度不是太高, 但 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 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 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 、DIN 和悬浮颗粒物输送量, 因此水库河流区透明度与 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 和 DIN, 尤其是 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 呈负相关关系 (图 4)。由表 1 可见, 丰水期高的地表径流量造成河流区 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 和 DIN 浓度在丰水明显高于枯期水期, 尤其是 4 月的采样时, 水库有比较高的磷的输送量。有地表

径流发生时（4 月和 8 月）水库透明度低于没有地有径流时，尤其是 4 月采样时的吕田河，透明度只有 0.2 m。由于入库水流流速由河流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 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 被其吸附而随之的沉积，丰水期河流区 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 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 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 和 DIN 量也明显高于玉溪市。在枯水期的两次采样中，12 月采样时有少量的降水量，虽然入库流量比 10 月时还低，但河流区 DIN（吕田河外）和 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 浓度略有上升。在湖泊区大坝处， $\text{PO}_4 - \text{P}$ 含量一直维持在比较低的水平，即使在丰水期有比较高的 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 输入时，也只有 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右，表明水库对磷的滞留率是相当高的。

表 1 2001 年水库营养盐、透明度和降水量分布特征

Tab. 1 Distribution of $\text{PO}_4 - \text{P}$, DIN, Secchi depth and precipitation in the reservoir in 2001

		$\text{PO}_4 - \text{P} / \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$				$\text{DIN} / \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$				透明度/m				一周降水量 /mm
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	
丰水期	4 月	124	89	15	11	579	245	472	301	0.2	0.6	1.6	1.3	115.3
	6 月	42	17	19	11	336	326	422	373	2.5	2.4	3.4	4.0	17.3
	8 月	28	19	11	15	412	280	288	392	0.6	1.5	3.2	3.5	46.9
枯水期	10 月	9	9	13	5	305	113	190	179	2.6	2.7	3.2	3.8	0.3
	12 月	12	14	12	4	177	153	198	233	2.0	1.5	3.2	3.5	15.8

注：S1 代表吕田河；S2 代表玉溪市；S3 代表库中；S4 代表大坝。

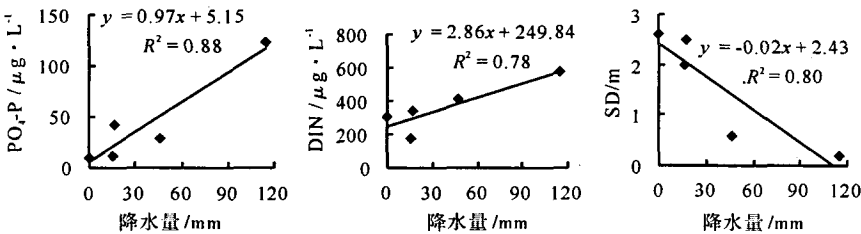


图 2 吕田河 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 、DIN 和 SD 与降水量的关系

Fig. 2 Relationship of $\text{PO}_4 - \text{P}$, DIN and SD with precipitation in Lutian River

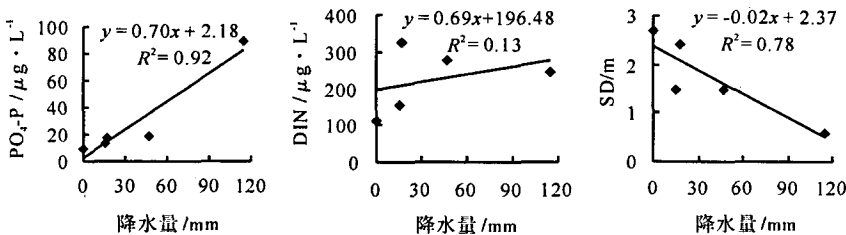


图 3 玉溪市 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 、DIN 和 SD 与降水量的关系

Fig. 3 Relationship of $\text{PO}_4 - \text{P}$, DIN and SD with precipitation in Yuxi River

2.2 浮游植物分布

在水库中共检到浮游植物 83 种，其中大部分种类为绿藻（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（*Ankistro-*

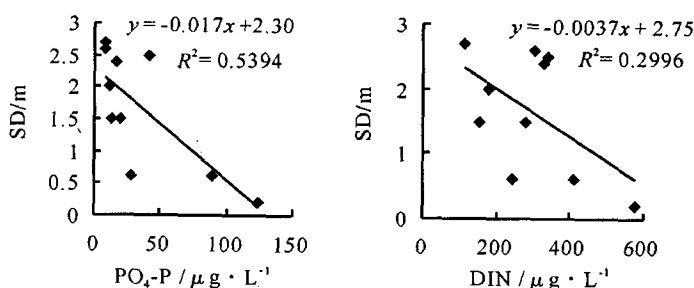


图4 河流区 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 DIN 与 SD 的关系

Fig. 4 Relationship of $\text{PO}_4\text{-P}$ and DIN with SD in the riverine zone

desmus 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 $17 \sim 1245 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, 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 5)。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 (Reynolds, 1984), 但在流溪河水库中, 硅藻丰度与水温的相关性并不明显 (图 6)。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 (林秋奇等, 2001; Han *et al.*, 2000), 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 7 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 8 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。在四月采样周期 (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 (Kimmel *et al.*, 1990), 而较快的水流流速使浮游植物平流损失量大为增加 (Straskraba *et al.*, 1993), 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 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度高达 $124 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 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 $49.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 使硅藻及浮游植物丰度只有 52 和 $57 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ 。在 6 月和 8 月采样时, 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,