滇池水体理化环境状况时空分布格局研究

方 涛 敖鸿毅 刘剑彤 蔡庆华 刘永定
(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 在滇池全湖设置了 40 个采样点, 从 2002 年 9 月至 2003 年 8 月, 按每月一次的频度对滇池水体的 pH、溶解氧、透明度、总磷、溶解性总磷、溶解性磷、总氮、氨氮、Chla 进行了为期一年的监测。结果表明, 滇池外海水质已属 V 类及超 V 类水质, 重富营养程度, 只能满足工业和农业供水水质要求。滇池外海水质存在区域性强的特点, 其污染程度与该地区的工农业分布格局相关, 西北部水质污染情况最为严重, 北部次之, 南部最轻; 在不同月份水质存在明显差异, 在汛期(5—9 月份) 水质污染最为严重, 冬春季节则较轻。本研究初步揭示了滇池污染的现状及时空分布规律, 为分区域治理滇池水污染提供了科学依据。

关键词: 滇池; 时空变化; 理化指标; 富营养化
中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2004)02-0124-07

滇池是我国著名的高原淡水湖泊, 属长江流域金沙江水系, 位于昆明市南端, 湖体略呈弓形, 弓背向东, 南北长约 40km, 东西最宽处 12.5km, 平均水深 4.4m, 水面面积 306km^2, 库容为 12.9 亿 m^3[1]。滇池具有城市供水、工农业用水、调蓄、防洪、旅游、水产养殖等多种功能。随着城市化的进程和社会经济的发展, 滇池所受污染日益严重, 水质急剧恶化, 富营养化程度加剧, 水华频频暴发, 水体功能受到极大破坏, 已成为昆明市持续发展的制约因素之一。在过去的 20—30 年里, 相继出现了各种蓝藻水华污染控制技术。然而, 由于湖泊特别是大型湖泊的水质、底质、沉积地貌等环境因子时空分布的高度异质性以及控藻技术的适用性, 使得蓝藻水华的控制技术在大型湖泊中的应用受到了不同程度的限制。

本研究在全湖设置了 40 个采样点, 从 2002 年 9 月至 2003 年 8 月, 按每月一次的频度进行了为期一年的水体理化环境研究。虽然对滇池的理化环境已经有了不少研究[2—5], 但是如此大规模、高密度的研究尚不多见。本项研究的目的, 就是通过对滇池水体理化环境的研究, 摸清其空间分布规律及时间变异性, 了解滇池污染现状及发展趋势, 从而为滇池的富营养化及蓝藻水华治理的实施提供科学依据。

1 研究方法

从 2001 年 9 月开始, 至 2002 年 8 月为止, 历时 1 年, 进行滇池水体环境状况空间分布格局调查。在滇池外海中按网络布点法, 同时考虑了滇池的污染状况及河口的地理位置, 设置了 40 个采样点(图 1), 按每月一次的频度进行采样, 分析水样中的 pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)、溶解性磷酸盐(DP)、总氮(TN)、氨氮、Chla、各理化指标的测定方法及依据如表 1 所示。

在本调查中, 将滇池外海分成东北部(Ⅰ)(1—3 号样点)、北部(Ⅱ)(4—15 号样点)、中部(Ⅲ)(16—25 号样点)及南部(Ⅳ)(26—40 号样点)四个部分进行研究(图 1)。各区域的理化参数由该区域各样点的算术平均值求得。

收稿日期: 2003-11-17; 修订日期: 2003-12-10
基金项目: 中国科学院重大项目 KZCX1-SW-12; 国家 973 项目(2002CB412300); 国家科技部重大专项"滇池蓝藻水华污染控制技术"(K99-05-35-01-05) 课题; 中国科学院方向性创新课题(220316) 资助
作者简介: 方 涛(1971—), 男, 云南省曲靖市人; 博士; 主要从事水环境化学的研究
通讯作者: 刘剑彤

2　结果

根据2001年9月—2002年8月40个采样点的分析, 滇池外海TN, TP, 叶绿素a(Chla)含量年均分别达2.62mg/L、0.20mg/L和0.074mg/L, 按照地表水环境质量标准(GB3838-2002)(表2), 已属超Ⅴ类水质, 重富营养程度, 外海水只能满足工业和农业供水水质要求。

2.1　滇池水质空间分布特征

滇池外海水质存在区域性强的特点, 不同区域污染程度不同。表3是2001年9月至2002年8月滇池外海西北部、北部、中部及南部的水质情况。从表中可以看出西北部水质污染情况最为严重, 北部次之, 南部最轻。

滇池外海四个区域的pH值均在8.5以上, 并以西北部为最高; 水温则无明显差异。从透明度来看, 由于夏秋季有蓝藻水华的影响, 冬春季节风浪较大, 而滇池属浅水湖泊, 底泥被风浪扰动造成水质浑浊, 因此透明度较差, 尤其是污染情况最严重的东北部, 透明度在0.5m以下。与此相反的是, 西北部的DO最高, 可能与藻类的光合作用有关。COD_{Mn}、Chla、TN、TP、氨氮、溶解性总磷及溶解性磷酸盐均呈现相似的分布规律, 即西北部最高, 北部次之, 中部和南部较低。其中, 西北部的Chla比北部高1倍, 比中部和南部高2倍; 西北部的TP和TN比其他区域高1倍, 北部的TP是中部和南部的120%和115%, TN是118%和124%。

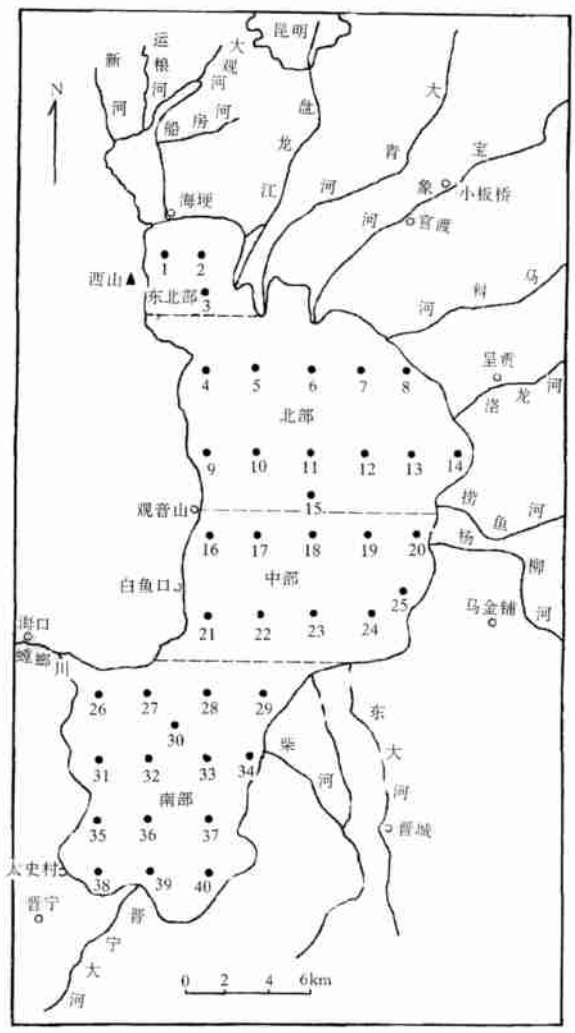


图1　滇池采样点分布图

Fig. 1　The sampling locations in the Dianchi Lake

表1　理化指标的测定方法及依据

Tab. 1　The analysis methods of physicochemical index

序号 Number	分析项目 Physicochemical index	分析方法 Analysis methods	测定下限(mg/L) Detection limits	方法来源 Reference
1	总磷	钼酸铵分光光度法	0.01	3)
2	总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	0.05	3)
3	叶绿素a	分光光度法		2)
4	透明度	塞氏圆盘法	0.5cm	1)
5	氨氮	纳氏试剂比色法	0.05	3)
6	生化需氧量(BOD_5)	稀释与接种法	2	3)
7	溶解氧	碘量法	0.2	3)
8	高锰酸盐指数		0.5	3)

注: 1) 水和废水监测分析方法(第三版), 中国环境科学出版社, 1989年; 2) 湖泊富营养化调查规范(第二版), 中国环境科学出版社, 1990年; 3) 水和废水标准检验法(第15版), 中国建筑工业出版社, 1995年。

表 2 湖泊水库特定项目标准值(mg/L)

Tab. 2 The particular values of N and P for Lake and Reservoir

项目	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
总磷(湖、库,以P计) ≤	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
总氮(湖、库,以N计) ≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0

注:引自地表水环境质量标准(GB3838-2002)。

表 3 2001—2002年滇池水质情况*

Tab. 3 The water quality of Dianchi Lake of 2001—2002

项目(mg/L) Water parameters	西北部(Ⅰ) North-west	北部(Ⅱ) North	中部(Ⅲ) Middle	南部(Ⅳ) South
pH	8.81	8.57	8.52	8.77
T(℃)	17.56	17.09	17.47	17.13
COD_{Mn}	14.59	12.72	11.63	11.11
SD(cm)	44.6	54.7	64.1	62.3
DO	8.38	7.89	7.18	7.78
Chl.a	0.149	0.078	0.057	0.052
TN	4.45	2.66	2.26	2.14
NH_3-N	0.69	0.42	0.39	0.41
TP	0.317	0.142	0.118	0.124
溶解性总磷(TDP)	0.053	0.025	0.023	0.025
可溶性磷酸盐(DP)	0.033	0.012	0.012	0.012

* 表中水质参数为各区域采样点算数平均数的年均值。

图2代表2001—2002年滇池年均水质分布图,其中,富营养程度指标(TSI)是选择Chla、TP及SD为评价指标,运用国际上通用的修正卡尔森指数计算得出的[6]。结果表明,Chla、可溶性磷酸盐、可溶性总磷、总磷、总氮及富营养程度指标均是西北角最高,并沿西南方向降低,但总磷在滇池外海东部呈贡县方向,可溶性磷酸盐在滇池东南角及海口附近的含量均较高,反映了城镇生活污水及工业废水的点源污染对滇池的影响。根据富营养程度指标来判断,滇池2001—2002年处于重富营养化状态,西山脚下的西北部处于严重富营养状态。

导致上述水质区域性差异的主要原因是东北部、北部靠近草海,接纳城市生活污水和工业废水,因而污染较严重。从Chla、TP来看,中部和南部属于Ⅴ类水质标准,而东北部、北部属于超Ⅴ类水质标准,处于超富营养化阶段。

表 4 滇池富营养程度划分标准

Tab. 4 The eutrophication standards of the Dianchi Lake

TSI指数	0—<30	30—<50	50—<60	60—<70	70—<80	80—<90	90—<100
营养状态	贫营养	中营养	中富营养	富营养	重富营养	严重富营养	异常富营养

2.2 滇池水质时间分布特征

图3代表2001年9月至2002年8月滇池不同区域的水质变化情况。从图中可以看出,滇池外海水质在不同月份存在明显差异。在汛期(5—9月份)水质污染最为严重,冬春季节则较轻。

透明度2002年1月份最高,南部达到1.1m以上,污染最严重的西北部也超过0.8m,随后逐渐降低,特别在蓝藻水华爆发后降到最低,6月份降至0.4m,西北部则不到0.2m。Chla含量从2001年9月开始降低(但西北部11月出现最高值),至2002年1月最低,四个区域均在0.015mg/L左右,随后逐渐上升,在5—6月则达到峰值。COD_{Mn}在秋冬季节含量较低,其它季节较高。TN含量在2002年6、8月出现两个高峰值,其他月份变化不大,氨氮含量则是冬、春季高,夏、秋季低。TP含量2002年5—8月及2001年9月较高,其他月份较低,其中2002年5

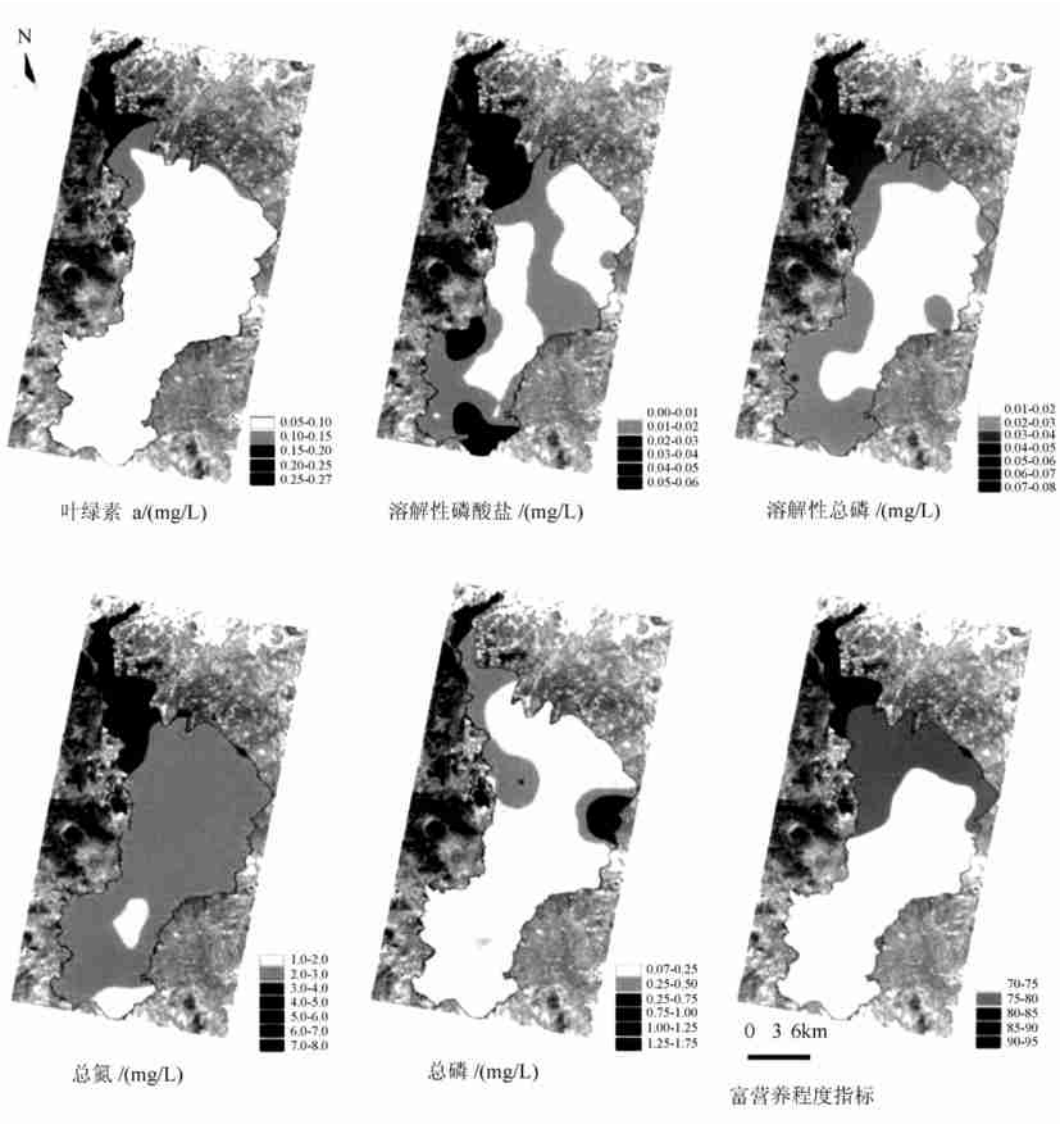


图 2　滇池水质年均分布示意图

Fig. 2　The average water quality of Dianchi Lake

月最高, 2002 年 3 月最低。溶解性总磷及溶解性磷酸盐变动较大, 最低值出现在 2002 年 4—5 月份, 它们只占总磷含量的 10% 左右, 表明滇池中的磷主要以颗粒态的形式存在。值得注意的是, 在 2002 年 11 月, 西北部 TP、TN 和 Chla 含量均出现一个峰值, 透明度也相应很低, 表明了营养元素与藻类的生长存在密切关系。

作为富营养化重要指标的氮、磷和叶绿素全年变动很大。全年含量范围总氮在 1.11—10.27mg/L 之间, 不同月份相差 10 倍, 总磷在 0.074—0.573mg/L 之间, 相差近 8 倍, Chla 在 0.0136—0.327mg/L, 相差达 24 倍。西北部全年水质都属超Ⅴ类水质, 其它区域在冬季处于Ⅳ类至Ⅴ类之间, 其余时间则属Ⅴ类及超Ⅴ类水体。

3　分析与讨论

滇池的主要污染为严重富营养化。从 1988—1999 年, 滇池主要的富营养化指标呈明显上升趋势, 近 10 年来, 滇池主体外海 TP 浓度增加了一倍多, 叶绿素 a 增长了十几倍, 营养水平由富营养发展到严重富营养, 增加了两个级别, 发展趋势近年来尤为明显。P 是近 10 年来滇池水体中增长最快的营养盐, 水体中 P 浓度的持续增加是滇池富营养化加剧的基本原因[7]。虽然到目前为止, 已经采取了一系列措施对滇池富营养化进行了治理, 在局部区域有所改善, 但总的污染情况并未得到有效控制。根

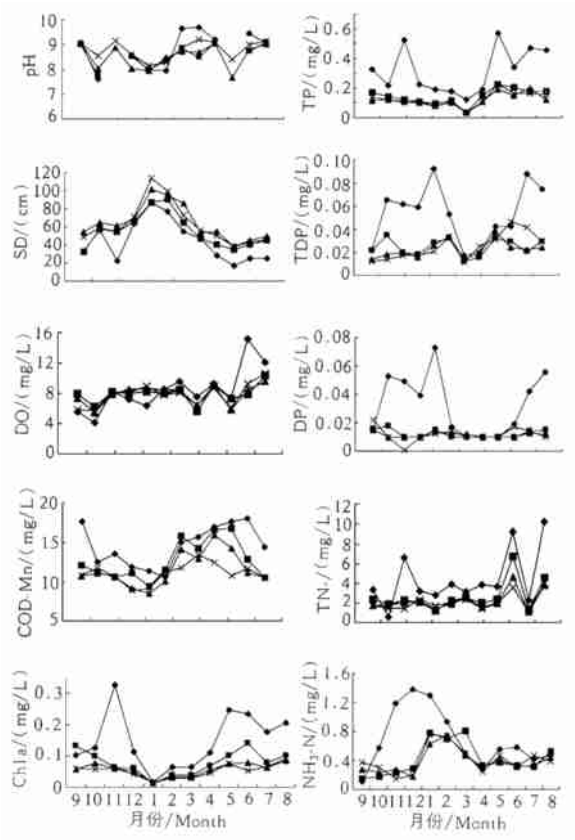


图 3 滇池外海不同区域 2001 年 9 月至 2002 年 8 月水质变化情况

Fig. 3 The water quality variation from Sep. 2001 to Aug. 2002 of different areas of Dianchi Lake

(Northwest area Ⅰ —◆— North area Ⅱ —■— Middle area Ⅲ —▲— South area Ⅳ—× —)

据本研究的结果,近年来滇池的污染呈继续恶化的趋势,其主要原因是面源污染及水生态系统恶化的势头未得到有效控制。

3.1 滇池富营养化成因

3.1.1 特定的社会环境、自然条件的影响 滇池流域面积为 2920km^2。流域平均水资源量 5.7 亿 m^3,属水资源缺少地区,而且年际变化大,存在连续丰水,连续枯水长周期变化的特点。流域均在昆明市辖区内,是昆明市居民最密集,人为活动最活跃,经济最发达的地区。正常年缺水 1 亿 m^3,枯水年缺水 2 亿 m^3。水资源的供需平衡完全靠径流水、污水和农田回归水在滇池中循环,重复利用才得以实现,重复用水率 25%。

滇池地处亚热带季风气候区,属冬暖夏凉性气候,气候特点适合微囊藻的大量繁殖;滇池湖面海拔高达 1887.5m,年平均日照达到 2481.2h,充足的光照条件为微囊藻的快速繁殖提供了有利条件;滇池流域的大风期基本集中在冬春季节,而夏秋季节由于受暖湿气流控制,风力相对较小,在外海靠近西山的西北部,因受山脉阻隔,风速多在 3.5m/s 以下,故夏秋季节这些地区常常出现大面积水华[8]。

注入滇池的河流有 20 余条,但出水口却仅有草海的西园隧道和外海的海口中滩闸。这种封闭性使入湖污染物常在未输出之前就沉积于湖底,增加了湖区内源污染物量,促进了滇池的富营养化状况。

3.1.2 污染源 滇池的外污染物源可分为两大类:一是来自流域的城镇生活污水和工业污染源的点源,主要分布于滇池北部、东部和西南部;二是来自流域的农业面源、降雨降尘等[9]。

点源:滇池流域的工矿企业约有 250 余家,人口共计 203 万,每天排入滇池的工业污水与生活污水可达到 50.7×10^{4}m^3。1999 年以来,流域内点源 COD 的治理取得了一定成效,但 TN、TP 的削减量却并没有达到预期的效果。

面源:丰水年以面源形式入湖的 TP、TN 负荷量甚至超过点源。面源污染物主要来自于水土流失、降水降尘、径流污染和农业面源,其中由径流污染和农业面源形成的入湖氮磷污染物可达到氮磷面源污染物总量的 70% 以上[8]。

内源:磷是滇池最主要的内源释放营养物。每年入湖磷营养盐约有 70% 沉入湖底,草海由于接纳大量的城市污水,底泥中磷的含量较高,基本处在 1—2×10^{-3}mg/g 之间,外海南部由于受磷矿区的影响,底泥中磷的含量为全湖最高水平,在 1.5—3.0×10^{-3}mg/g 之间[8]。

3.2 滇池水环境治理的可能途径

滇池前段时期的治理主要侧重于点源和草海内污染源的控制,面源控制及湖内生态治理尚未实施,而像滇池这样的浅水湖泊,面源污染所占比例较大(2000 年 TN、TP 的面源负荷量分别占滇池总污染负荷的 27% 和 45%),内源污染严重,生态系统脆弱,水体自净能力低,因此仅靠控制点源的输入难以控制滇池的富营养化和水质恶化。在滇池的富营养化下一阶段的治理中应加强以下几方面的工作:

(1) 湖泊生态修复工程。国内外许多经验证明,像滇池这样生态系统极为脆弱的浅水湖泊,仅减少湖外营养盐的输入不能有效地控制湖泊的富营养化,即使在彻底控制了外源的情况下,由于湖内底泥和生物营养库的不断释放,湖水营养水平的下降仍十分缓慢[10]。要从根本上改善滇池水体的富营养化状态,必须在控制外污染源的同时,着力恢复与重

建外海的湿地生态系统, 培植水生生物群落, 利用水生植物净化水体, 控制藻类的快速繁殖, 加强湖体的自净能力, 建立良好的生态平衡系统, 进而达到治理滇池富营养化的目的。

(2) 面源治理。面源污染是造成滇池外海水质恶化的重要原因。滇池面源污染有相当部分来自农田径流, 因此滇池面源控制的重要对策之一是改善农业的耕作措施, 降低农田化肥、农药的施用量或用高效少污染的有机肥、生物肥, 减少农田营养盐的流失; 优化种植结构, 发展生态农业、绿色农业建设, 达到间接降低营养物入湖负荷; 同时加强流域的水土保持工作, 增加植被覆盖率, 防止水土流失。

(3) 调整加强流域环境管理。当前滇池流域的管理现状仍比较薄弱, 应加强、完善滇池保护政策与法规的制定、实施和监管力度, 开展宣传教育, 提高民众的环境意识; 协调各有关部门的行动, 保证滇池各项治理措施得以有效实施; 加强滇池流域的监测工作, 建立滇池富营养化预测预报系统, 为滇池富营养化的治理提供科学的决策依据。

滇池对于云南昆明的社会和经济发展有举足轻重的作用, 然而其生态承载能力毕竟是十分有限的。近年来, 城市化、社会经济增长、围海造地、湖滨带破坏等导致滇池生态环境不断遭到严重破坏, 流域水资源越来越紧缺, 自我调节能力逐渐下降, 水质不断恶化。采取全面保护措施维持其生态平衡是保持该地区可持续发展的关键。本项研究通过对滇池外海水体环境状况的研究, 初步揭示了滇池污染的现状及时空分布规律, 为分区域治理滇池水污染提供了一定的依据。

参考文献:

[1] Tuo Y M. Eutrophication of Dianchi and its trend and treatment [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2002, **21**(1): 35—38. [柘元蒙, 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策、云南环境科学, 2002, **21**(1): 35—38]

[2] Yang Q F, Investigation of organic carbon, nitrogen, phosphorus, and the total number of bacteria in Dianchi lake[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2003, **22**(suppl.): 101—103. [杨琼芳, 滇池细菌总数与有机碳、氮、磷的调查研究. 云南环境科学, 2003, **22**(增刊): 101—103]

[3] Tian S P, Dongy M X, Zhou J M. Phosphorus burden on water body of Dianchi lake and its impact on water environment[J]. *Geology of Chemical Minerals*. 2002, **24**(1): 11—16. [田升平, 东野脉兴, 周建民, 滇池湖泊磷负荷及其对水环境的影响. 化工矿产地质, 2002, **24**(1): 11—16]

[4] Yu G Y, Zhang X H, Liang X M. Biogeochemical characteristics of metal elements in water-plant system of lake Dianchi[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(2): 172—177. [余国营, 张晓华, 梁晓民, 滇池水—植物系统金属元素的分布特征和相关性研究. 水生生物学报, 2000, **24**(2): 172—177]

[5] Hao X L, Yang C L, Wei Q, Comprehensive Evaluation and Analysis on Pollution Condition of Dianchi Lake [J]. *Journal of Yunnan University* (Nature Science), 1998, **20**: 589—592. [郝晓蕾, 杨常亮, 魏勤, 滇池污染现状的综合评价及分析, 云南大学学报(自然科学版), 1998, **20**: 589—592]

[6] He T J. Water environmental index[M]. Beijing: Environmental science press of China, 1982, 269—277. [合田健, 水环境指标。北京: 中国环境科学出版社, 1982, 269—277]

[7] Liu L P. Analysis of eutrophic development trend of Dianchi lake and countermeasures for control [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2001, **20**(suppl.), 25—27. [刘丽萍, 滇池富营养化发展趋势分析及其控制对策. 云南环境科学, 2001, **20**(增刊), 25—27]

[8] Guo H C, Sun Y F. Characteristic analysis and control strategies for the eutrophicated problem of the lake Dianchi[J]. *Progress in geography*, 2002, **21**(5): 500—506. [郭怀成, 孙延枫, 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨. 地理科学进展, 2002, **21**(5): 500—506]

[9] Guo H G, Ma P J. Integrated environmental treatment frame of Dianchi lake and its budget[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2000, **19**(suppl.): [郭慧光, 马丕京. 滇池环境综合治理框架及其投资估算, 云南环境科学, 2000, **19**(增刊)]

[10] Li W C. Multplcity of stable states in shallow lakes and its application [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, **9**(2): 97—103. [李文朝, 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用, 湖泊科学, 1997, **9**(2): 97—103]

THE SPATIO-TEMPORAL OF WATER ENVIRONMENTAL STATUS IN DIANCHI LAKE

FANG Tao, AO Hong-Yi, LIU Jiarr-Tong, CAI Qing-Hua and LIU Yong-Ding
(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract: After decades of economic reform and booming industry development, a tremendouds amount of pollutant were discharged into the Dianchi lake and the lake is suffered from severe eutrophication. In order to investigate the pollution situation of the Dianchi lake, forty sampling locations were set at Waihai of the Dianchi Lake and pH, DO, transparency, total-P, dissolved total-P, dissolved-P, total-N, NH_3-N and Chla were analyzed monthly from Sep. 2001 to Aug. 2002. Four areas were defined geographical and each contains several sampling stations. They are the northwest area(sampling locations of 1—3), the north area (4—15), the middle area(16—25) and the south area(26—40). The results showed that the water quality of Waihai in Dianchi lake was worse than the standard of V level(Environmental quality standards for surface water), fell into the super-eutrophication state, only suitable for industry and agriculture use. Generally, the pollution status is as following, the northwest area was the worst, the north area was worse, the middle area was bad, then the south area. In addition, the spatial distribution of pollution was correlative with the industry and agriculture distributions. Although the concentrations of total-P, dissolved total-P, dissolved-P, total-N and Chla were the highest in the northwest area, and declined southwestward, a peak value of total-P was observed at the east part of the north area, and two peak values of dissolved-P were observed at the south area and the west part of the middle area. The contaminative degree was various greatly in different months, the concentrations scopes of total-N is from 1.11 to 10.27mg/L, total-P from 0.074 to 0.573mg/L, and Chla from 0.0136 to 0.327mg/L. It was observed that the pollution was worst in flood season (May to Sept.), while in winter and spring, the pollution was relatively better. The paper showed the pollution status and spatio-temporal distribution of pollution of Dianchi lake, which provided for the theoretic reference of divisional treatment Dianchi lake pollution. At last, the paper discussed the cause of eutrophication of the Dianchi lake, and gives some advice on the possible eutrophication prevention.

Key words: Dianchi Lake; Spatio-temporal; Physico-chemical index; Eutrophication.