

滇池水体中磷的时空变化特征研究

陈永川^{1,2}, 汤利¹, 谌丽¹, 李杰¹

(1.云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2.中国科学院南京土壤所土壤圈物质循环重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:应用 GPS 定位技术,对滇池海埂、斗南、罗家村、新街、昆阳等 5 个代表性样点水体总磷及可溶性磷进行了为期 1 a 的动态监测,全面分析了不同区域、不同层次、不同时期滇池水体总磷、可溶性磷的时空动态变化特征。结果表明,全湖水体总磷的平均浓度为 0.10~0.20 mg·L⁻¹,全湖水体可溶性磷的平均浓度为 0.003~0.021 mg·L⁻¹。水体磷含量因季节而变化较大,总体趋势是总磷浓度以夏季较高,可溶性磷以 5 月和 10 月较高,但不同位点变化高峰和趋势不同。水体总磷浓度以底层较高,除斗南外均显著高于中层,而表层和中层水体总磷浓度差异不大。水体可溶性磷浓度以底层较高,但无显著的层次变化。不同区域总磷浓度 1 年的平均动态跃迁范围是:表层为 0.05~0.41 mg·L⁻¹,中层为 0.07~0.30 mg·L⁻¹,底层为 0.05~0.88 mg·L⁻¹。水体总磷年均层次变化范围为 0.14~0.30 mg·L⁻¹。各区域总磷浓度以海埂和昆阳较高,其次是斗南,新街和罗家村较低;可溶性磷含量以昆阳和海埂位点较高。

关键词:滇池; 水体; 总磷; 可溶性磷; 时空变化特征

中图分类号:X832 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1145-07

Spatially and Temporally Dynamic Variation of Phosphorus in Water of Dianchi Lake

CHEN Yong-chuan^{1,2}, TANG Li¹, CHEN Li¹, LI Jie¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Key Lab of pedosphere matter circulation in Nanjing Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Dynamic changes of both total phosphorus and soluble phosphorus concentrations at differently deep level of water in 5 representative sites of Dianchi Lake, namely Haigeng, Dounan, Luojiacun, Xinjie, and Kunyang, respectively, located with GPS were studied from May 2003 to May 2004. The spatially and temporally dynamic variation characteristics of phosphorus in Dianchi Lake were discussed. The results showed that, average concentrations of total phosphorus (T-P) and soluble phosphorus (S-P) in water of Dianchi Lake were 0.10~0.20 mg·L⁻¹ and 0.003~0.021 mg·L⁻¹, respectively. The phosphorus concentration of water was influenced obviously by seasons. The total phosphorus concentration was higher in summer and the soluble phosphorus was a little higher in May and Oct, but the peak and the trend of different sites were different. The concentration of T-P in bottom layer was significantly higher than that in middle layer with exception in Dounan site, but the difference of that in middle layer and in surface layer was little. The concentration of S-P in bottom layer showed higher but was no variation along vertical direction. The average T-P concentrations of the 5 sites in one year in water of surface, middle and bottom layer were 0.05~0.41 mg·L⁻¹, 0.07~0.30 mg·L⁻¹ and 0.05~0.88 mg·L⁻¹, respectively. The average variation of T-P in different deepth level of water was 0.14~0.30 mg·L⁻¹. The T-P concentrations in Haigeng and Kunyang were higher, in contrast, in Luojiacun and Xinjie were lower. The S-P concentrations in Kun Yang and Hai Geng water were higher than that in others sites.

Keywords: Dianchi lake; water; total phosphorus, soluble phosphorus, spatial and dynamic variation

收稿日期:2005-01-12

基金项目:中国科学院南京土壤所土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金和教育部“春晖计划”资助

作者简介:陈永川(1977—),男,云南镇雄人,在读博士,主要从事植物营养与环境的研究。

联系人:汤利 E-mail:tangli@yahoo.com

氮磷在水体富营养化中的作用已被普遍认可。近年来,随着湖泊水体富营养化问题的日益严重,湖泊环境中氮磷等营养元素的含量、分布与迁移转换一直是国际上的研究热点^[1-7]。有关沉积物-水体界面氮磷营养物交换及其环境影响因素等在太湖已有较深入系统的研究^[8-12],对梅梁湖、五里湖、镬湖、武汉东湖、杭州西湖、贵州百花湖等湖泊环境也有相关的研究报道^[13-17]。大量研究表明,湖泊富营养化的主要限制因子是磷^[5-7],磷是湖泊水体中藻类种群和密度的第一限制性营养元素^[11,16],湖水中总磷浓度与藻类生物量的代表性参数叶绿素 a 呈明显正相关^[11,16,18]。也有资料显示,磷是滇池富营养化的限制性营养元素^[19],但目前有关滇池水体不同形态磷的分布和动态变化、水体-沉积物界面的磷交换及蓝藻生长的动态变化特征等,均尚未见系统报道。以往对滇池磷的研究多以某个位点或某个时期来分析,尚不能全面体现滇池的富营养化状况^[19-21]。

本文通过对滇池 5 个位点水体磷的动态监测,分析了滇池不同区域、不同时期、不同位点水体中总磷和可溶性磷含量的动态变化特征,了解水体磷的动态变化规律,以期为阐明滇池蓝藻水华的爆发机制,提高滇池富营养化治理成效提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究位点及采样方法

采用 GPS 定位,在滇池选择具有代表性的 5 个位点,分别是海埂(N24°54.857',E102°39.837')、斗南(N24°52.662',E102°45.237')、罗家村(N24°48.799',E102°41.789')、新街(N24°46.157',E102°41.868')、昆阳(N24°43.599',E102°37.362'),其中海埂是藻类发生的重灾区,斗南是花卉蔬菜主产区,罗家村为滇池中,新街是水稻主产区,昆阳是磷矿生产区。对这 5 个位点进行定位动态采样。

从 2003 年 5 月至 2004 年 5 月进行 1 年定位采样,每月采样 1 次。采用有机玻璃采水器采取水样,每个位点采集上、中、下 3 层水样,每样品 3 次重复。

1.2 分析方法

各测定项目按国家标准方法测定。水体总磷采用过硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度法,水体可溶性磷采用氯化亚锡还原法^[22,23]。

2 结果分析与讨论

2.1 滇池全湖水体磷的动态变化特征

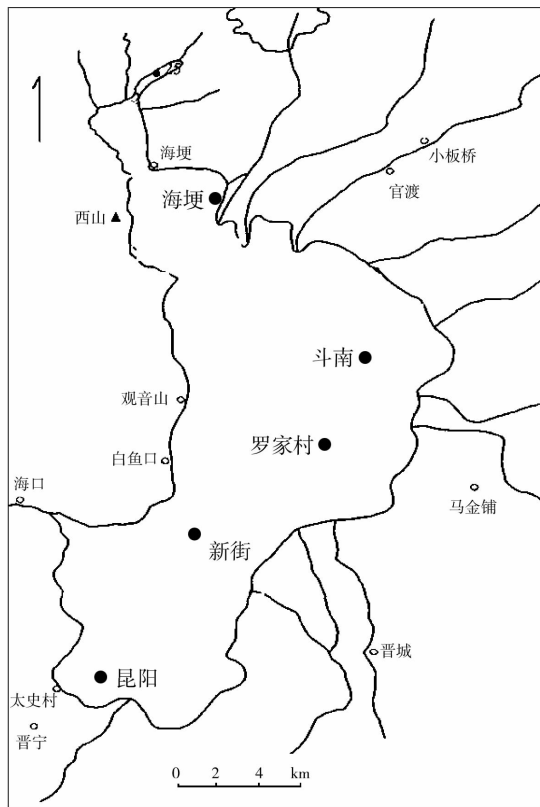


图 1 滇池取样与监测位点

Figure 1 Sampling and Regional Location

2.1.1 滇池全湖水体总磷的月变化特征

表 1 为滇池不同层次水体总磷含量的周年变化特征,其特征值为 5 个研究位点、每位点 3 次重复的平均值($n=15$)。结果表明,滇池全湖水体总磷浓度平均为 $0.10\sim 0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 呈现明显的月变化和层次变化。水体底层总磷含量明显高于中层和表层,而表层和中层总磷含量的变化趋势基本一致。其中,底层水体总磷浓度为 $0.14\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层水体总磷浓度为 $0.09\sim 0.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层水体总磷浓度为 $0.07\sim 0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 为超富营养化水体。除 2003 年 5 月各层次水体的总磷含量均为最低外,中上层水体总磷浓度以 8 月份最高,底层水体则以 7 月最高。

2.1.2 滇池全湖水体可溶性磷的月变化特征

表 2 为不同层次水体可溶性磷浓度的动态变化特征,其特征值为 5 个研究位点、每位点 3 次重复的平均值($n=15$)。结果表明在 3 层水体中,可溶性磷浓度以底层呈较高趋势,但由于是 5 位点的平均值,而变异较大。全湖水体可溶性磷的平均浓度 $0.003\sim 0.021\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中底层水体可溶性磷的浓度变化范围为 $0.004\sim 0.022\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层水体可溶性磷的浓度变化范围为 $0.003\sim 0.024\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层水体可溶性磷

的浓度变化范围为 0.002~0.019 mg·L⁻¹。高峰值出现在 2003 年 5 月和 2003 年 10 月，这可能是因为 5 月

和 10 月是藻类发生的高峰期，藻类的生长会影响内源磷的释放,雨季会导致外源磷迁移到水体。

表 1 滇池水体总磷的月变化特征

Table 1 The dynamic variation of total phosphorus in water of Dianchi Lake

年-月	底层/mg · L ⁻¹	中层/mg · L ⁻¹	表层/mg · L ⁻¹
2003-05	0.14±0.08	0.09±0.02	0.07±0.02
2003-06	0.20±0.05	0.14±0.04	0.17±0.04
2003-07	0.30±0.31	0.15±0.02	0.15±0.04
2003-08	0.21±0.07	0.19±0.06	0.21±0.07
2003-09	0.21±0.12	0.16±0.06	0.21±0.11
2003-10	0.17±0.09	0.15±0.05	0.15±0.03
2003-11	0.20±0.03	0.17±0.03	0.17±0.01
2004-01	0.27±0.02	0.17±0.03	0.16±0.04
2004-02	0.16±0.04	0.14±0.03	0.13±0.01
2004-03	0.27±0.11	0.16±0.03	0.13±0.03
2004-04	0.28±0.31	0.12±0.02	0.12±0.02
2004-05	0.26±0.11	0.15±0.04	0.14±0.05

表 2 滇池水体可溶性磷的月变化特征

Table 2 The dynamic variation of solubility phosphorus in water of Dianchi Lake

年-月	底层/mg · L ⁻¹	中层/mg · L ⁻¹	表层/ mg · L ⁻¹
2003-05	0.021±0.007	0.024±0.008	0.019±0.003
2003-06	0.004±0.001	0.003±0.002	0.002±0.001
2003-07	0.007±0.003	0.003±0.001	0.004±0.002
2003-08	0.007±0.002	0.003±0.001	0.005±0.001
2003-09	0.007±0.003	0.007±0.003	0.007±0.004
2003-10	0.022±0.0024	0.016±0.001	0.011±0.006
2003-11	0.009±0.002	0.009±0.001	0.010±0.002
2004-01	0.007±0.009	0.005±0.009	0.007±0.005
2004-02	0.005±0.002	0.004±0.001	0.009±0.011
2004-03	0.006±0.006	0.005±0.005	0.008±0.004
2004-04	0.008±0.002	0.007±0.000	0.007±0.000
2004-05	0.006±0.005	0.005±0.002	0.003±0.000

2.2 滇池不同区域水体磷的动态变化特征

2.2.1 不同区域水体总磷的动态变化特征

图 2 为滇池不同区域、不同层次水体总磷 1 年的动态变化,每位点每层次测定 3 次重复。结果表明,不同区域、不同层次、不同季节水体总磷含量呈明显差异。各区域水体均以底层总磷浓度较高,表层略高于中层。统计分析表明,除斗南外,海埂、罗家村、新街、昆阳各点水体底层总磷浓度与中层水体均达显著差异。但中层与表层水体总磷浓度未达显著差异,而且表层水体与中层水体总磷含量的月变化趋势一致。全年总磷浓度变化趋势是夏季高于冬季,一般从 5—9 月水体总磷浓度逐渐升高,但各区域因磷的来源和蓝藻生长状况不同而呈现不同的变化高峰。

图 2A 显示,滇池海埂区域不同层次水体总磷浓度在 0.07~0.88 mg·L⁻¹ 之间变化,多在 0.1~0.41 mg·L⁻¹

范围内。2003 年 5—9 月水体总磷浓度逐渐升高,2003 年 9 月—2004 年 2 月这段时期水体中总磷浓度逐渐下降。这可能与夏季水体温度高,底泥磷易释放到水体,而冬季温度低,水体中的磷易被底泥吸附有关。底层水体磷浓度的年变化范围为 0.12~0.88 mg·L⁻¹, 中层水体总磷的浓度年变化范围为 0.07~0.30 mg·L⁻¹, 表层水体总磷的浓度最高浓度出现在 2003 年 9 月,最低浓度在出现在春季(3—5 月),年变化范围为 0.1~0.41 mg·L⁻¹。

图 2E 的结果表明,滇池斗南水体的总磷浓度为 0.05~0.45 mg·L⁻¹,以底层浓度较高,但与中层、表层之间差异不显著。底层水体磷的浓度为 0.05~0.45 mg·L⁻¹,但一年中的变异较大。中层水体总磷浓度变化范围为 0.10~0.21 mg·L⁻¹。表层的浓度变化范围为 0.05~0.23 mg·L⁻¹。各层次水体总磷浓度都以 2004 年 5 月

最高,以2003年5月最低。表层总磷的浓度2003年5—9月逐渐升高,夏季高于其他季节,其他几个月出现起伏性的变化。这可能是因为斗南是花卉主产区,水体总磷含量受温度和雨季的影响较大,2004年5月雨季较2003年来得早,雨水较多,因而水体总磷浓度较高。

滇池罗家村水体总磷浓度为 $0.07\sim 0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中底层水体总磷的浓度在 $0.10\sim 0.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,最高浓度在2003年8月和2004年1月,最低浓度出现在2004年2—3月。底层和表层水体总磷的浓度2003年5—8月逐渐升高,中层水体总磷的浓度变化范围为 $0.07\sim 0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表层水体总磷的浓度变化范围为 $0.07\sim 0.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,见图2C。罗家村远离污染区,磷主要来源于内源磷的释放,可能主要受水体扰动和温度影响。

图2D表明,滇池新街水体总磷浓度为 $0.05\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中底层水体总磷浓度变化趋势较大,变化范围为 $0.07\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较高浓度出现在2003年6—7月、2004年1月和2004年3月,最低浓度在

2003年10月。中层水体总磷浓度变化范围为 $0.09\sim 0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表层水体总磷的浓度变化范围为 $0.05\sim 0.18$,二者差异不显著。中层和表层水体总磷浓度均以2003年8月最高,以2003年5月最低。新街水体中总磷主要受降雨及温度的影响。

滇池昆明不同层次水体总磷浓度的年变化范围多在 $0.10\sim 0.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,见图2B。除2004年4月底层水体总磷浓度高达 $0.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,其底层水体总磷浓度为 $0.18\sim 0.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,浓度变化范围较小。最高浓度出现在2004年4月,最低浓度出现在2003年6月;中层水体总磷的浓度年变化范围为 $0.10\sim 0.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高浓度出现在2004年3月,最低浓度出现在2003年5月;表层水体总磷的浓度年变化范围为 $0.07\sim 0.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高浓度出现在2003年11月,最低浓度出现在2003年5月。

2.2.2 不同区域水体可溶性磷的动态变化特征

图3为滇池不同区域、不同层次水体可溶性磷1年的动态变化特征,每次测定3个重复。结果表明,不同区域、不同层次、不同时期水体可溶性磷含量不同,

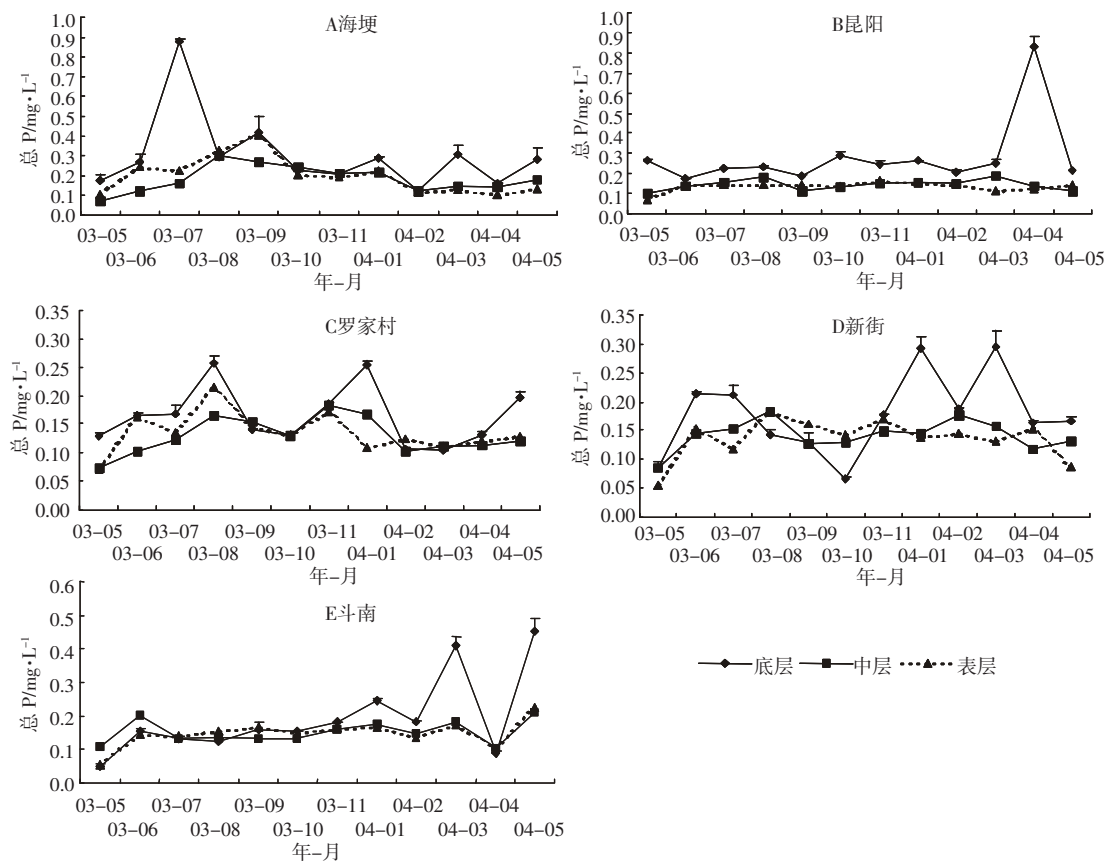


图2 滇池不同区域水体总磷的动态变化

Figure 2 The dynamic variation of total phosphorus at different sites of Dianchi lake

而且不同区域可溶性磷的年变化趋势不同。各位点可溶性磷浓度以海埂较高和昆阳较高,以罗家村和新街较低。由于水体可溶性磷浓度较低,同一区域内不同层次间可溶性磷含量差异不显著。

海埂水体可溶性磷全年在 $0.002\sim 0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,见图 3A。底层水体可溶性磷的浓度为 $0.003\sim 0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层的浓度变化范围为 $0.002\sim 0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层的浓度变化范围为 $0.003\sim 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。中层和底层可溶性磷的含量随月份变化趋势较一致,以 2003 年 10 月可溶性磷的含量较高,其次是 2003 年 5 月和 2004 年 1 月,表、中、底 3 层深度水体可溶性磷含量均较高。

斗南水体全年的可溶性磷在 $0.001\sim 0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,见图 3E。其中底层水体可溶性磷的浓度变化范围在 $0.003\sim 0.015\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层的浓度变化范围为 $0.001\sim 0.019\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层的浓度变化范围为 $0.001\sim 0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。该区域全年可溶性磷变化趋势较大,这可能与斗南是花卉主产区,农田磷可能迁移到

水体中有关。

罗家村全年的水体可溶性磷含量为 $0.001\sim 0.021\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,图 3C。其中底层水体可溶性磷的浓度变化范围为 $0.001\sim 0.021\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层水体可溶性磷的浓度变化范围为 $0.001\sim 0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层水体可溶性磷的浓度变化范围为 $0.001\sim 0.013\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。底层峰值出现在 2003 年 5 月和 2003 年 10 月。

与罗家村相似,新街水体可溶性磷的高峰值出现在 2003 年 5 月和 2003 年 10 月。底层水体在 $0.002\sim 0.016\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中层水体为 $0.002\sim 0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表层水体可溶磷的变化范围为 $0.002\sim 0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 见图 3D。

昆阳水体可溶性磷最高峰出现在 2003 年 5 月、2003 年 6 月,以表层水体最为明显。不同层次水体可溶性磷浓度在 $0.002\sim 0.031\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,各层次间未达到显著差异,见图 3B。

2.3 滇池不同区域水体磷的空间分布特征

2.3.1 滇池不同区域水体总磷的空间分布特征

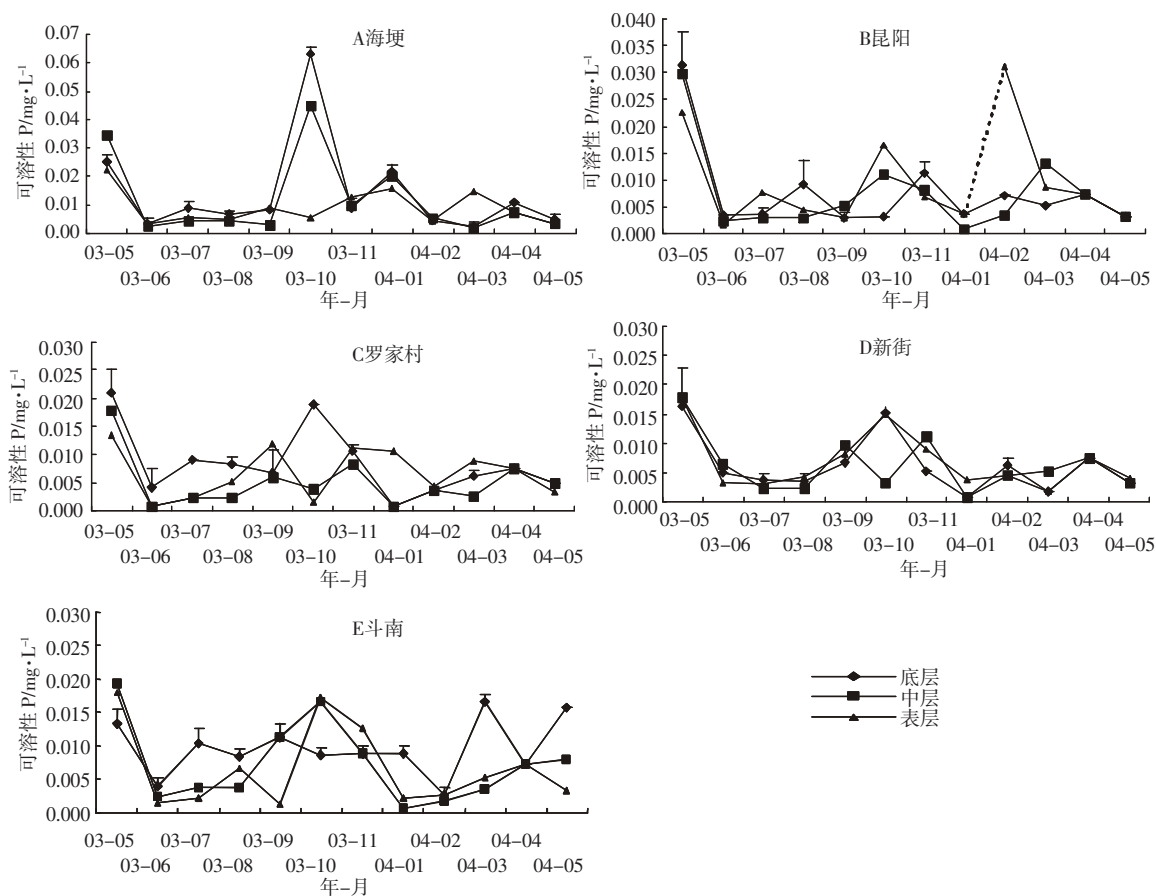


图 3 滇池不同区域水体可溶性磷的动态变化

Figure 3 The dynamic variation of soluble phosphorus at different sites of Dianchi lake

表 3 为滇池不同层次、不同区域水体总磷的空间变化特征,均为 1 年 12 个月的平均值(每次测定 3 重复, $n=12\times 3=36$)。结果表明,2003 年 5 月—2004 年 5 月全湖水体总磷的平均浓度为 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由表 3 和图 2 的结果可以看出,5 个位点各层次水体总磷浓度以海埂最高、罗家村最低。各区域底层水体总磷平均浓度明显高于中层和表层,而且以海埂和昆阳较高。各区域 1 年内底层平均水体总磷浓度变化范围为 $0.16\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,依海埂、昆阳、斗南、新街、罗家村顺序降低。经统计分析,海埂与新街、罗家村差异显著,昆阳与罗家村差异显著。各区域 1 年内中层平均水体总磷浓度变化范围为 $0.13\sim 0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以海

埂、斗南较高,显著高于其他 3 区域,而罗家村、新街、昆阳之间无显著差异。1 年内各区域表层水体总磷浓度的变化范围为 $0.14\sim 0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以海埂最高,显著高于其他区域,而斗南、罗家村、新街、昆阳表层水体总磷含量无显著差异。

2.3.2 滇池不同区域水体可溶性磷的空间分布特征

表 4 为滇池不同区域水体可溶性磷的空间变化特征,为 1 年 12 个月的平均值(每次测定 3 重复, $n=12\times 3=36$)。由于水体可溶性磷的浓度较低,1 年的变异较大。水体可溶性磷浓度一般以底层较高,各区域的年平均值以海埂较高,罗家村和新街较低,全湖水体年平均浓度为 $0.008\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 3 滇池不同区域水体总磷的空间变化($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 3 The spatial variation of total phosphorus in water of Dianchi Lake ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

水体层次	海埂	斗南	罗家村	新街	昆阳
底层	$0.30\pm 0.20\text{ a}$	$0.19\pm 0.12\text{ ac}$	$0.16\pm 0.05\text{ c}$	$0.18\pm 0.07\text{ cb}$	$0.25\pm 0.18\text{ ab}$
中层	$0.18\pm 0.07\text{ a}$	$0.15\pm 0.03\text{ a}$	$0.13\pm 0.03\text{ b}$	$0.14\pm 0.03\text{ b}$	$0.14\pm 0.03\text{ b}$
表层	$0.20\pm 0.09\text{ a}$	$0.15\pm 0.04\text{ b}$	$0.14\pm 0.04\text{ b}$	$0.14\pm 0.04\text{ b}$	$0.14\pm 0.02\text{ b}$

注:采用 SPASS 多重比较,差异显著性在 0.05 水平。

表 4 滇池水体可溶性磷的空间变化($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 The spatial dynamic variation of soluble phosphorus in water of Dianchi Lake($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

水体层次	海埂	斗南	罗家村	新街	昆阳
底层	0.014 ± 0.017	0.010 ± 0.004	0.008 ± 0.006	0.006 ± 0.005	0.008 ± 0.008
中层	0.012 ± 0.014	0.007 ± 0.006	0.005 ± 0.005	0.006 ± 0.005	0.008 ± 0.008
表层	0.009 ± 0.006	0.007 ± 0.006	0.007 ± 0.004	0.007 ± 0.005	0.010 ± 0.009

3 小结

在本研究条件下,滇池不同区域水体总磷的平均浓度为 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可溶性磷的平均含量为 $0.008\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水体总磷的浓度均达到富营养化。

滇池水体总磷和可溶性磷含量因滇池区域位点、水体深度(层次)和时间季节不同而呈现明显的动态变化。水体总磷浓度以底层较高,除斗南点外,均显著高于中层水体,而表层与中层水体总磷含量差异不显著。5 位点 1 年内底层、中层和表层水体总磷浓度的平均跃迁范围分别为: $0.05\sim 0.88$ 、 $0.07\sim 0.30$ 和 $0.05\sim 0.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可溶性磷的年变化范围是 $0.001\sim 0.034\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但各层次水体可溶性磷含量差异不显著,层次变化不明显。各区域水体总磷和可溶性含量以海埂和昆阳较高,以罗家村和新街较低,斗南的动态变异较大。

不同时期的总磷和可溶性磷含量变化较大,总体趋势是水体总磷以夏季浓度较高,可溶性磷以 5 月和

10 月相对较高,但不同位点呈现不同的变化高峰和趋势,这可能与不同区域水体磷的来源、富营养化程度、藻类的生长状况、沉积物磷的释放及其环境影响因素不同有关,特别是水体-沉积物界面磷的迁移转化与藻类生长之间的相互作用,还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Boström B, et al. Bioavailability of different phosphorus forms in fresh-water systems[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 170: 133-155.

[2] Lee-Hyung Kim, et al. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 53-61.

[3] McComb A J, Qiu S, Luktulich R J, et al. Spatial and tem-poral heterogeneity of sediment phosphorus in the Peel-Harvey Estuar-ine System [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1998, 47: 561-577.

[4] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Wat Res*, 2000, 34(7): 2037-2042.

[5] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agriculture phosphorus for protection of surface wa-ters: issues and options [J]. *J*

Environ Qual, 1994,23: 437–451.

- [6] Smith V H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis [J]. *J Limnol Oceanogr*, 1982, 27:1101–1111.
- [7] Smith V H,Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nu- trient inputs on freshwater, Marine and terrestrial ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 1999,100:169–179.
- [8] Fan Chengxin, Zhang Lu, Qu Wenchuan. Lake sediment resuspension and caused release—a simulation study[J]. *J Environ Sci*, 2001, 13(4): 406–410.
- [9] 范成新,杨龙元,张 路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J].湖泊科学,2000,12(4):359–366.
- [10] 杨龙元,蔡启铭,秦伯强,等.太湖梅梁湾沉积物–水界面氮迁移特征初步研究[J].湖泊科学,1998,10(4):41–47.
- [11] 尹大强,吴重华,王晓蓉.太湖湖水及沉积物磷释放对藻类生长潜力研究[J].南京大学学报,1996,32(2):253–260.
- [12] 王晓蓉,华兆哲,徐 菱,等.环境条件的变化对太湖磷释放的影响[J].环境化学,1996,15(1):15–19.
- [13] 范成新,秦伯强,孙 越.梅梁湖和五里湖水–沉积物界面物质交换[J].湖泊科学,1998,10(1):53–58.
- [14] 范成新. 镭湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4):341–350.
- [15] 韩伟明.底泥释放磷及其对杭州西湖富营养化的影响[J].湖泊科学,1993,5(1):71–77.
- [16] 周培疆,等.普通小球藻生长与武汉东湖水体磷形态的相关研究[J].水生生物学报,2001,25(6):571–575.
- [17] 王雨春,万国江,尹澄清,等.红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵赋存特征[J].湖泊科学,2002,14(4):301–309.
- [18] 吴重华,王晓蓉,孙 昊.羊角月牙藻的生长与湖水中几种磷形态关系的建立[J].环境化学,1997,16(4):341–346.
- [19] 田升平,东野脉兴,周建明.滇池湖泊磷负荷及其对水环境的影响[J].化工矿产地质,2002,24(1):11–16.
- [20] 郭怀成,孙延枫.滇池水体富营养化特征分析及控制对策[J].地理科学进展,2002,21(5):500–506.
- [21] 孟裕芳.滇池外海氮磷含量的发展趋势分析[J].云南环境科学,1999,18(4):32–33.
- [22] 湖泊生态调查观测与分析[M].中国标准出版社,1999.
- [23] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范(第 2 版)[M].北京:中国环境科学出版社,1990.164–188.