

滇池宝象河流域土壤磷素变异特征及影响因素研究^①

杨振兴, 张乃明*, 王磊, 张刚

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 磷(P)是水体富营养化的一个重要的限制因子, 本文以滇池宝象河流域土壤为研究对象, 对流域内不同土地利用类型土壤P素时空变异特征以及其影响因素进行研究。结果发现流域内P素有明显累积。P素含量会受到土壤流失的影响, 不同土地利用类型不同形态P素累积与流失情况也不同, 同时, Olsen-P与pH、OM有很好的正相关性。研究结果可以为防止不同土地利用类型土壤P素流失提供依据, 为滇池宝象河流域精确农业的研究和实施提供了一定的参考依据。

关键词: 滇池; 土壤; 磷素; 时空变异

中图分类号: S156.4

磷(P)是动植物生长所必需的营养元素, 长期以来P素的投入一直被认为是维护动植物产品产量, 满足食品需求的重要手段, 但随着P素的大量应用, 环境问题也随之产生。众所周知, P素是引发水体富营养化的限制因子^[1]。在美国, 农田面源排放的P约占各种污染源总排放量的50%^[2]; 丹麦270条河流52%的P负荷是由非点源污染引起^[3]; 荷兰农业非点源提供的总P占水环境负荷总量的40%~50%^[4]。在我国非点源污染也越来越受到重视, 随着点源治理程度的逐步提高, 非点源P素负荷占总负荷的比重也在增大^[5-7]。滇池作为我国重点整治的三大污染湖泊, 目前形势不容乐观。宝象河是滇池流域内仅次于盘龙江的第二大河道, 沿途污染基本属非点源污染, 其水流未经处理, 直接排入滇池, 威胁着滇池的水体。因此, 研究滇池宝象河流域不同土地利用类型的土壤P素累积特征与时空变异, 为滇池宝象河流域制定合理的农业措施, 防止不同土地利用类型土壤P的流失、控制宝象河水质污染和河道治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宝象河属昆明古六河之一, 源于官渡区东南部老爷山, 流经小板桥、阿拉、经开区、小板桥, 在宝丰村附近汇入滇池, 全长36.2 km, 是入滇的第二大河流。宝象河流域位于滇池的东北部, 地理坐标为东经102°41'~102°56', 北纬24°58'~25°03'; 流域面积302

km², 南北跨度近30 km, 约占整个滇池流域的10.3%。流域属典型的北亚热带湿润季风气候, 在低纬度、高海拔地理条件综合影响下, 受季风气候制约, 形成了流域内四季温差小、干湿季分明、垂直变异显著的低纬山原季风气候。年内降雨分布极不均匀, 80%以上降雨集中在雨季5—10月, 多年平均气温14.7℃, 年均降雨量953 mm, 土壤主要为红壤、黄棕壤等地带性土壤和水稻土等人为土, 其中主要是红壤, 约占全流域的71.7%, 水稻土次之, 约占24.9%, 黄棕壤约占3.4%^[8]。

1.2 野外布点采样

在实地考察的基础上, 遵循均匀分布、代表性、典型性的原则, 分别在流域两岸耕地、林地、坡地等不同土地上采样, 于2006年5月一共采基础混合样63个。根据土壤的不同利用方式将采样点分为5类: 上游稀疏林地(I, 8个); 中上游坡耕地(II, 14个); 中上游平地耕地(III, 24个); 下游大棚土壤(IV, 11个); 下游平耕地(V, 6个)。之后于2007年11月、2008年6月和11月又分别采样进行监测。采样方式: 采取分层采样, 分为两层, 分别是0~10、10~20 cm。在采样的同时取原状土测定土壤水分含量、体积质量等物理指标。以上土壤采用随机多点混合采样, 风干后尽可能除去未分解的有机残体、煤渣、木炭等, 以减少对有机质及微量元素含量测定的影响。采集的土壤样品用木棒压碎, 依次通过1 mm、0.25 mm尼龙筛, 再充分混匀, 装入小塑料袋待测试。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目(40761014)和国家科技支撑计划项目(2007BAD87B12-3)资助。

* 通讯作者(zhangnaiming@sina.com.cn)

作者简介: 杨振兴(1981—), 男, 山西省忻州人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染与土壤养分流失方面的研究。E-mail: yang1981che@163.com



图 1 采样点和监测点分布图

Fig. 1 Sampling and monitoring sites

1.3 测定方法

土壤全 P 用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定；Olsen-P 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提-钼锑抗比色法测定。无机 P 采用酸性、中性土壤无机 P 形态分级测定；Al-P 采用 1.0 mol/L NH₄Cl 溶液浸提，Fe-P、O-P 采用 NaCl 溶液浸提，Ca-P 采用 0.5 mol/L 1/2 H₂SO₄ 浸提，均用钼锑抗比色法测定^[9]。

2 结果与分析

2.1 宝象河流域土壤基本性质及变异特征分析

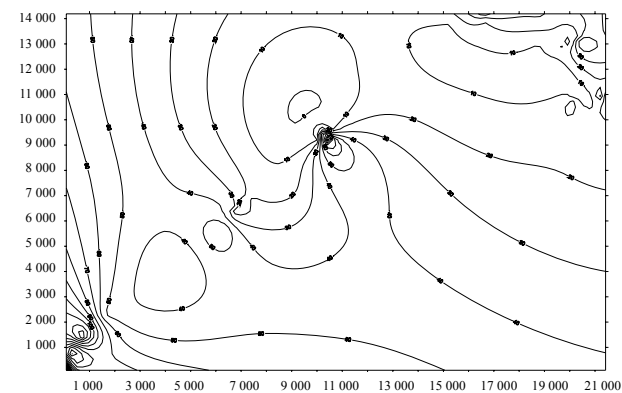
从表 1 的数据可以看出，下游大棚设施农业土壤中的全 P 含量最高，然后依次为下游平耕地>上中平地耕地>上中坡耕地>上游林地。宝象河流域 0 ~ 10 cm 土层土壤总 P 含量在 0.44 ~ 2.67 g/kg 之间，平均为 1.29 g/kg，明显高于南方酸性土壤全 P 含量的一般值（根据全国第二次土壤普查：南方土壤全 P 含量一般低于 0.56 g/kg），这表明宝象河流域土壤 P 素有明显的积累。由于土壤利用类型的差异所导致的累积情况有所不同，中上游以传统农业为主，化肥、有机肥、农药施用强度相对较小，相应地全 P 含量就低；由于农村产业结构的调整，宝象河下游为昆明的主要蔬菜、花卉生产地，土壤利用强度加大，化肥、有机肥、农药施用量大，化肥施用量达 10 000 kg/(hm²·a)，相应地全 P 含量就高，从而下游土壤 P 流失的潜在风险就大。

为了更加准确和直观地描述土壤中 Olsen-P 在空间上的分布状况，根据所得到的半方差函数模型，利用 Kriging 最优内插法，最后绘制了 Olsen-P 的等值线图（图 2）。

表 1 不同土壤利用类型 0 ~ 10 cm 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils under different uses at 0-10 cm depth

土样	利用方式	体积质量 (g/cm ³)	pH	有机质 (g/kg)	全P (g/kg)	Olsen-P (mg/kg)
I	上游林地	1.25	6.46	35.02	1.02	7.72
II	上中坡耕地	1.13	6.75	31.21	1.16	7.90
III	上中平地耕地	1.29	7.34	41.63	1.32	29.17
IV	下游大棚土壤	1.51	7.40	44.77	1.58	77.42
V	下游平耕地	1.04	7.32	36.07	1.37	41.9



（坐标系是以宝象河流域下游末端为原点，以大地坐标的东北方向为 x 轴和 y 轴建立的，x 轴和 y 轴分别表示距离原点的距离 m，是经纬度通过 WGS-84 坐标系转换得到的，以下坐标类同）

图 2 Olsen-P 含量的等值线图

Fig. 2 Contour of Olsen-P

由图 2 可以看出，整个滇池宝象河流域西南角土壤 Olsen-P 含量明显高于其他部位，其最大值达 198.1 mg/kg，而在流域的东北角 Olsen-P 含量较低，一般在 10 ~ 20 mg/kg，整个流域表层 Olsen-P 含量分布不均匀，整体趋势呈现从上游东北角坡林地、坡耕地向中上游平地耕地、西南角下游平耕和下游大棚土壤地递增。

通过对宝象河流域土壤调查采样分析，分别对土壤中的全P、Olsen-P 和各形态磷酸盐进行数据比对，同时得到流域 P 素时空变异特征。

从图 3 中可以看出，以 2006 年 5 月采样土壤全 P 为基础数据，2007 年 11 月全 P 的含量最高，2008 年略有下降。主要原因在于 2006 年到 2007 年间昆明雨季降雨偏少，5 月到 11 月间，降雨量为 832.7

mm, 大雨和暴雨基本没有, 所以径流产生泥沙携带量少, 土壤中 P 素有所累积。2008 年昆明降雨明显高于往年, 大雨和暴雨不断, 据资料仅对 4 月下旬到 7 月下旬的降雨量统计, 4 月 28—29 日, 全市大面积降水, 雨季来临时间较往年提前了 10 ~ 15 天。5 月—7 月 20 日, 全市出现了 6 次较大的降雨过程, 即 5 月 12—14 日, 5 月 28—31 日, 6 月 8—9 日, 6 月 22—25 日, 7 月 7—8 日, 7 月 13—18 日, 各场次降水均在 35 mm 以上, 其中 7 月 7—8 日的降水量最高值达到了 124.3 mm, 径流对表面土壤侵蚀严重, 宝象河流域河道和沟渠水质混浊, 泥沙携带量大。上游林地和坡地土壤流失相对其他利用类型较大, 从空间上看, 土壤 P 素含量最多的是在流域下游, 主要原因是下游为昆明主要的蔬菜和花卉基地, 施肥量大, 大棚种植一般为一年两季。所以土壤中的全 P 高于上中游土壤含量。

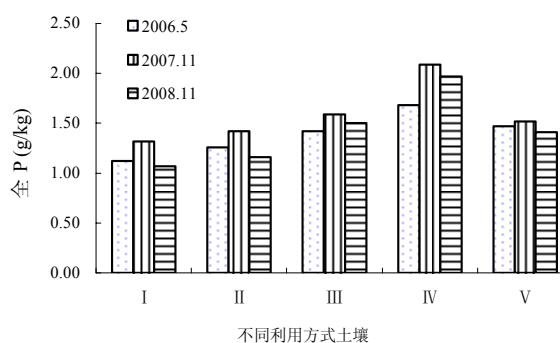


图3 土壤全 P 时空变异图

Fig. 3 Temporal and spatial variation of soil total P

由图 4 Olsen-P 的变化可以看出, 流失主要原因也与全 P 的原因基本相同, 然而下游土壤 2007 年到 2008 年间 Olsen-P 相对下降较快, 是由于下游种植的蔬菜、花卉等对 Olsen-P 的需求量大, 而且下游大棚土壤变化最大。

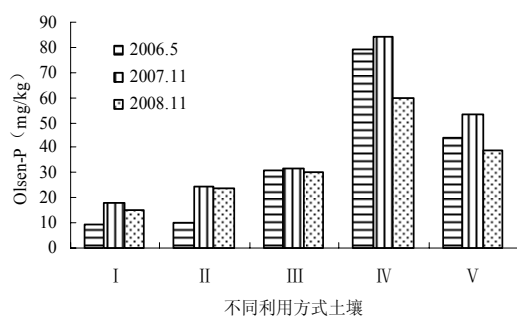


图4 土壤 Olsen-P 时空变异图

Fig. 4 Temporal and spatial variation of soil Olsen-P

通过对 2007 年不同土地利用类型中 Olsen-P 与全 P 相关分析 (图 5) 可以看出, Olsen-P 与全 P 之间呈正相关性。因此, 土壤中全 P 的流失会影响 Olsen-P 的含量, Olsen-P 会随着全 P 的升降而升降 ($r = 0.6673$, $n = 5$)。

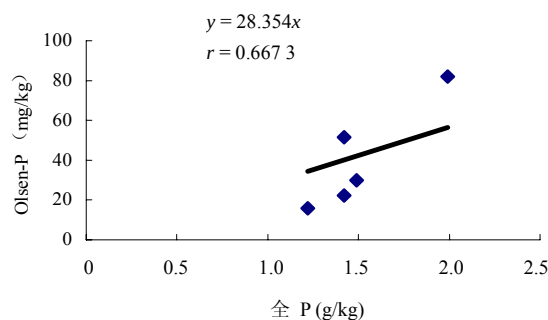


图5 Olsen-P与全 P 相关分析图

Fig. 5 Correlation between soil Olsen-P and TP

2.2 pH、有机质与磷素关系

pH 是衡量土壤酸碱度的一个重要标准, 土壤 pH 过低, 则可溶性的矿质态 P 易与土壤中的 Fe、Mn、Al 等形成磷酸铁、磷酸铝沉淀或难溶的闭蓄态 P, 植物难以利用。土壤 pH 过高, 则可溶性矿质态 P 会形成溶解度较小的磷酸钙, 植物亦难以吸收。一般土壤 pH 为 5.5 ~ 7.5 时, 植物吸收 P 最容易, 植物能吸收的 P 多为可溶性的矿质态 P。由图 6 可以看出, 整个流域土壤 pH 都在 6.0 ~ 7.5 间, 土壤 P 素基本可以转化为有效 P 被植物吸收, 土壤中 Olsen-P 的变化也随土壤 pH 的变化而变化 ($r = 0.8031$, $n = 5$)。

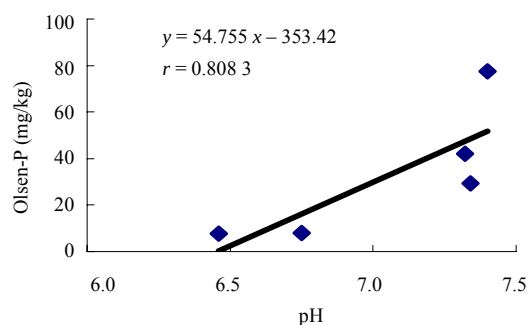


图6 土壤 pH 与 Olsen-P 相关分析图

Fig. 6 Correlation between soil pH and Olsen-P

土壤 P 的含量和母质性质、土壤发育程度、有机质含量、土壤的熟化程度有关。一般有机质含量高的土壤 P 的含量也高。从图 7 可以看出, Olsen-P

的多少随有机质的多少而变化, 成正相关性 ($r = 0.8233$, $n = 5$)。

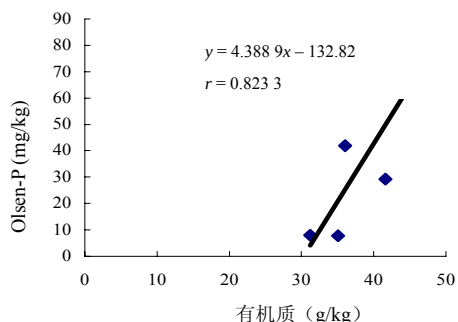


图 7 土壤有机质与 Olsen-P 相关分析图

Fig. 7 Correlation between soil organic matter and Olsen-P

2.3 土壤无机磷时空变异分析

土壤无机 P 对大多数耕地而言, 占土壤总 P 量

的 60%~80%, 是植物所需 P 的主要来源。土壤无机 P 分级的研究, 始于上世纪 30 年代。目前将土壤无机 P 分成以下几种主要形态: Al-P (磷酸铝盐)、Fe-P (磷酸铁盐)、Ca-P (磷酸钙盐) 和 O-P (闭蓄态磷)。其中, Al-P、Fe-P、Ca-P 为可溶性磷酸盐, O-P 为难溶性磷酸盐。

从各形态 P 时空变异图 (图 8~11) 来看, 土壤中的无机 P 随着时间的变化都有不同程度的累积, 但是大棚设施土壤各形态 P 有一个明显的峰线变化, 主要由于两季作物对土壤扰动较大, 所以 P 素变化不稳定。从空间来看, Ca-P 和 O-P 在整个流域变化不大, Al-P 含量最多的是下游大棚土壤, Fe-P 含量最多的是上游林地。其中, 土壤类型、水分、有机质、时间和温度等对各种磷酸盐的影响不同, 其含量变化也不同。而且无机 P 还会随着 pH 值的变化而变化。

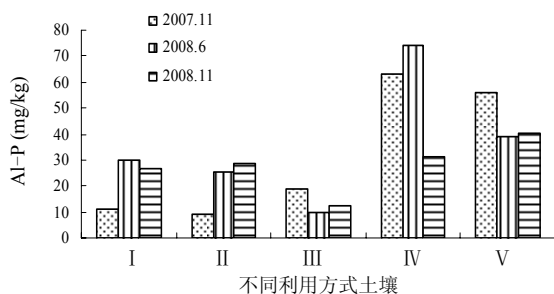


图 8 土壤 Al-P 时空变异图

Fig. 8 Temporal and spatial variation of soil Al-P

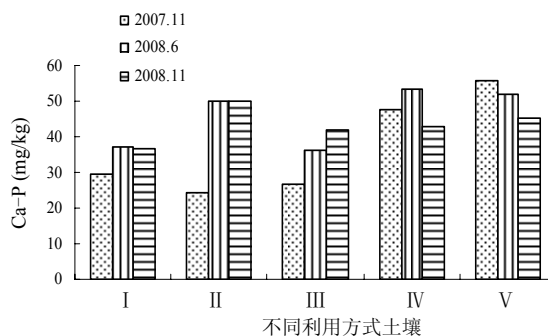


图 9 土壤 Ca-P 时空变异图

Fig. 9 Temporal and spatial variation of soil Ca-P

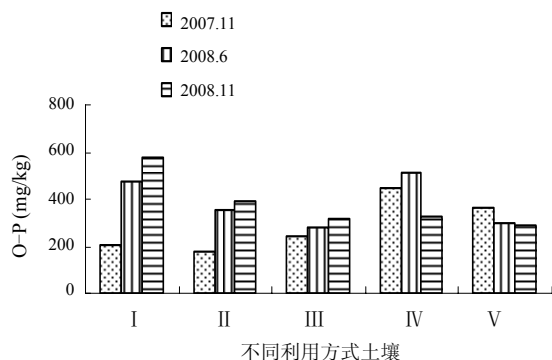


图10 土壤 O-P 时空变异图

Fig. 10 Temporal and spatial variation of soil O-P

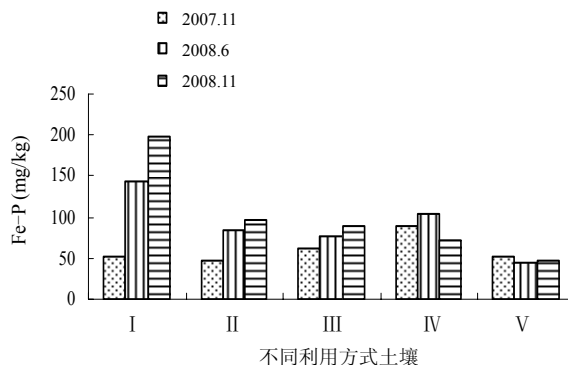


图11 土壤 Fe-P 时空变异图

Fig. 11 Temporal and spatial variation of soil Fe-P

无机 P 在土壤的转化中首先会变成缓效态 P 存于土壤中, 植物吸收慢。然而, 土壤流失所携带的无

机 P 会在水体中通过水解和微生物降解转化为有效 P, 对水体富营养化有相当大的危害作用。

3 结论

(1) 通过对宝象河流域土壤的监测发现, 流域内不同土地利用类型的 P 素都有显著累积, 尤其是下游设施农业土壤。土壤中 Olsen-P 时空变异特征与全 P 成正相关性, P 素累积对宝象河以及滇池污染影响严重。

(2) 宝象河流域土壤中 Olsen-P 与 pH 酸碱度在 5.5 ~ 7.5 之间呈正相关性、同时随土壤有机质含量的变化而变化, 也与 Olsen-P 成正相关性。

(3) 目前, 滇池无机 P 的研究属于空白, 由于无机 P 在土壤 P 素中占有相当大的比重, 同时转化相对较慢, 所以流失风险也较大, 对滇池水体污染造成的危害也大, 还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理. 生态环境, 2006, 15(2): 391-396
- [2] Sharpley AN, Gburek WJ, Folmar GJ, DAN JP. Sources of

phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania. *Agricultural Water Management*, 1999, 41: 77-89

- [3] Kronvang B. Diffuse nutrient losses in Denmark. *Water Science & Technology* (G.B.), 1996, 133(1): 81-88
- [4] Boersp CM. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands causes and remedies. *Water Science & Technology* (G.B.), 1996, 33(1): 183-190
- [5] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京: 化学工业出版社, 2001: 52-86
- [6] 何萍, 王家骥. 非点源污染控制与管理研究的现状、困境与挑战. *农业环境保护*, 1999, 18(5): 234-237
- [7] 丁锁, 臧宏伟. 农业区磷流失形态的研究. *水土保持应用技术*, 2006(4): 3-5
- [8] 赵磊, 袁国林, 贺彬, 刘忠翰, 王志芸, 张琰, 李靖. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 42-146
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 39-110

Research on Soil Phosphorus Variation and Influential Factors in Drainage Basin of Baoxiang River in Dianchi

YANG Zhen-xing, ZHANG Nai-ming, WANG Lei, ZHANG Gang

(College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Phosphorus is a crucial factor for water eutrophication. Taking soil in drainage basin of Baoxiang River as the study subject in this paper, the spatial-temporal variation and its influence factors of phosphorus in different land use types were studied. The results showed that phosphorus accumulated obviously in the drainage basin, phosphorus accumulation and loss could be influenced by soil loss and by different land use types. There were positive correlations between Olsen-P and pH, soil organic matter. The above results are helpful for preventing soil phosphorus loss in different land use types and for the study and implement of regional precision agriculture.

Key words: Dianchi, Soil, Phosphorus, Spatial-temporal variation