

滇池流域不同土地利用方式土壤磷解吸研究*

郑莲琴 和树庄**

(云南大学生命科学学院 昆明 650091)

摘要 滇池富营养化严重,非点源磷污染对滇池有重要影响。溶解态磷一旦冲入湖中容易被水生植物利用,所以土壤中溶解态磷的输出值得专门研究。本文选取滇池流域不同土地利用类型的17样点,测定了样点土壤中全磷、速效磷、溶解性总磷和溶解性磷酸盐的含量,并进行了静态土壤磷解吸试验,以了解土壤磷的析出特征。结果表明,滇池流域土壤全磷含量为 $0.137\sim 2.935\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (不包括磷矿区的上蒜林地和上蒜坝平地),速效磷含量在 $0.311\sim 96.238\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,不同土地利用方式下土壤全磷、速效磷含量均依次为湖滨废弃大棚>大棚>坝平地>坡地>林地;土壤溶解性总磷含量为 $0.66\sim 9.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同土地利用方式的土壤溶解性总磷含量为湖滨废弃大棚>大棚>坡地>坝平地>林地;土壤溶解性磷酸盐含量较低。相关分析表明,土壤溶解性全磷含量与土壤全磷含量存在明显的正线性关系,溶解性磷酸盐含量与溶解性总磷含量线性正相关。溶解性磷酸盐在溶解性总磷中占20%~95%,说明溶解性磷酸盐是溶解性总磷的重要组成部分。结果表明,滇池流域土壤磷的溶出水平由土壤全磷含量所决定,而大量施肥不利于湖泊富营养化控制。研究结果还表明,磷的静态溶出过程在0.5~1 h能达到平衡,说明在地下水或地表径流的输移过程中有足够多时间达到溶解平衡,析出最大量。

关键词 滇池流域 非点源污染 磷 解吸 土地利用方式

中图分类号: S3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)07-0855-06

Soil P desorption in different land use types in Dianchi Lake Watershed

ZHENG Lian-Qin, HE Shu-Zhuang

(School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract Non-point P pollution is the main element of eutrophication of Dianchi Lake. Study of dissolved soil P is critical because of its ease of utilization by aquatic plants especially when flushed into Lakes. 17 soil sampling sites of 5 land use types were selected, and total P, available P, total dissolved P and dissolved phosphate contents of sampled soils were determined. P desorption experiment of sampled soils was conducted too. The aim of the study was to learn the desorption characteristics of P in soils of different land use types in Dianchi Lake Watershed. Based on the results, the orders of soil total P and available P in different land use types were abandoned lakeside greenhouse > greenhouse > flat-land > slope-land > woodland with the contents ranges of $0.124\sim 2.935\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ for total P and $0.311\sim 96.238\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for available P. The total dissolved P content range was $0.66\sim 9.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and its order for different land use types was abandoned lakeside greenhouse > greenhouse > slope-land > flat-land > woodland. Soil dissolved phosphate content under different land use types was lower. Soil total dissolved P was linearly positively correlated with soil total P. Soil dissolved phosphate was also linearly positively correlated with soil total dissolved P. Dissolved phosphate was 20%~95% of total dissolved P. These trends implied that dissolved phosphate was important component of total dissolved P, and the degree of soil dissolved P was determined by the amount of soil total phosphorus. Also the higher the rate of P fertilization in the region, the more difficult was the control of eutrophication in Dianchi Lake. The study showed that dissolution of soil total P reached equilibrium in about 0.5~1 hours of application. This implied that there was sufficient time for P to attain dissolution equilibrium as it moved down in the lake through groundwater flow or surface runoff.

Key words Dianchi Lake Watershed, Non-point pollution, Phosphorus, Desorption, Land use type

* 国家科技重大专项(2009ZX07002-004-1)资助

** 通讯作者: 和树庄(1964—),男,高级工程师,主要研究方向为环境工程与区域发展。E-mail: heshuzhuang@ynu.edu.cn

郑莲琴(1987—),女,硕士研究生,主要研究方向为污染生态学。E-mail: lianqinzheng@hotmail.com

收稿日期: 2011-08-09 接受日期: 2012-02-08

(Received Aug. 9, 2011; accepted Feb. 8, 2012)

磷(P)素是引起水体富营养化的关键元素。在我国,湖泊的磷 50%以上来自于非点源污染。如密云水库、巢湖、滇池、太湖等,大部分非点源污染比例都超过点源污染^[1]。司友斌等^[2]调查的 25 个湖泊中,只有 2 个湖泊(大理洱海和新疆博斯腾湖)的总磷含量低于引起“水华”的临界指标(总磷含量超过 0.02 mg·L⁻¹时,会引起水体的富营养化),其余 92%的湖泊皆超过这一标准,比国际标准高出 10 倍或 10 倍以上。土壤磷素在雨水的冲刷和淋溶下可形成溶解性总磷,不仅对地表水造成污染,并且具有对地下水造成污染的潜质^[3]。滇池水体富营养化程度较高,滇池流域又以红壤土为主,固磷能力强,除被当季作物吸收 10%~25%外,都以不同形态积累于土壤中。一旦土壤中的磷素和土壤水分发生作用后,磷素的流失便成为可能^[4]。2005 年对滇池流域污染负荷调查表明,来自农业非点源污染的总磷占 50%~60%^[5];据 2009 年调查数据显示,滇池流域非点源污染中总磷排放量为 547 t,占全流域总磷排放量的 70.95%^[6]。近年来国家投入大量资金开展滇池污染治理工作,然而,滇池的富营养化表征并没有明显改善,其主要原因为滇池流域农村非点源污染还没有得到有效控制^[7]。目前国内对土壤磷素开展了较多的研究^[8-11],但针对不同土地利用方式土壤磷素的解吸平衡时间及最大析出量的研究较少。

本文以滇池全流域土壤磷素为对象,调查研究了该流域不同土地利用方式非点源污染磷素的土壤吸收量、溶解性总磷平衡时间与最大值,为滇池流域磷素的合理控制提供依据。

1 材料与方 法

1.1 滇池流域概况

滇池是我国著名的高原淡水湖泊,位于云南省昆明市西南,流域面积 2 920 km²,年径流量为 9.7 亿 m³,整个流域南北长 114 km,东西平均宽 25.6 km。滇池水面面积 298 km²,平均水深 4 m,蓄水量 12.9 亿 m³,是一个典型的浅水湖泊^[12]。气候属于中亚热带湿润季风气候,年均降雨量 1 035 mm,年均降雨日数 135 d,地带性土壤为山地红壤。目前沿湖乡镇农业生产已发展到集约化、高肥耗的初级阶段,化肥施用量普遍较高,尤其温室大棚内化肥施用量更高。其中呈贡县斗南镇(主要种植花卉,全部为大棚)年化肥施用强度最高,达 12 241.73 kg·hm⁻²,晋城(主要种植水稻、玉米等)最低,为 2 187.7 kg·hm⁻²^[13]。

1.2 采样方案

在实地考察的基础上,遵循均匀分布、代表性、典型性的原则,采用 GPS 定位,在滇池流域(102°31′~102°56′E、24°32′~25°17′N 之间),包括宝象河、松华坝、斗南、晋宁县、马金铺、双龙水库和西山区等区域,共布设 130 个采样点。采样点土地利用方式为林地、坡地、坝平地、大棚和湖滨废弃大棚。林地主要植被为云南松林、坡地主要植被为玉米、坝平地主要植被为蔬菜、大棚主要植被为花卉、湖滨废弃大棚主要植被为杂草。根据土地利用方式,兼顾土壤类型,选定 53 个点进行土壤全磷测定。对各样点数据进行整理,选择每种用地类型中接近平均含量水平的样点作为代表,进行深入的解吸试验。解吸试验样点共 17 个点(林地 4 个、坡地 4 个、大棚 3 个、坝平地 4 个、湖滨废弃大棚 2 个),其土地利用方式、经纬度、土壤质地类型和主要植物见表 1。

采集土层为表层(0~20 cm),采取三点混合法,风干后尽可能除去未分解的有机残体、煤渣、木炭等。采集的土壤样品用木棒压碎,通过 2 mm、0.25 mm 尼龙筛,常温保存。采样时间为 2010 年 5 月 15 日。

1.3 土壤样品分析

土壤样品过 2 mm 筛测定速效磷含量、溶解性总磷含量(磷素解吸试验)和溶解性磷酸盐含量,过 0.25 mm 筛测定全磷含量。

土壤全磷用硫酸-高氯酸消解后钼锑抗比色法测定,速效磷采用 NaHCO₃ 法测定^[14]。称取土样 0.25 g 若干份,置于三角瓶中,分别加入蒸馏水 25 mL,在恒温[(25±1) °C]摇床振荡不同时间(5 min、10 min、15 min、30 min、1 h、2 h、3 h、4 h),过 0.45 μm 滤膜,滤液未消煮直接用钼锑抗比色法测定其中溶解性磷酸盐含量,滤液消煮后用钼锑抗比色法测定其中溶解性总磷含量^[15]。

1.4 数据分析

采用 Excle 2007 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤全磷、速效磷、溶解性总磷和溶解性磷酸盐含量的变化

表 2 为滇池流域 17 个典型样地土壤的全磷、速效磷、溶解性总磷和溶解性磷酸盐含量。其中上蒜林地与上蒜坝平地土壤全磷含量最高,达 7.857 g·kg⁻¹ 和 8.434 g·kg⁻¹,其原因是这两个样点位于磷矿区的出口,自然土本身就含有大量的磷。其余样点全磷含

量依次为湖滨废弃大棚区>大棚区>坝平地区>坡地区>林地区。湖滨废弃大棚和大棚主要位于斗南、马金铺, 废弃大棚区原来主要种植蔬菜、花卉, 于 2008—2009 年退耕还湖。本次试验表明滇池流域 0~20 cm 土层全磷含量在 0.137~2.935 g·kg⁻¹ 之间, 平均为 1.203 g·kg⁻¹ (不包括磷矿区的上蒜林地和上蒜坝平地), 明显高于南方酸性土壤全磷含量的一般值(根

据全国第 2 次土壤普查, 南方土壤全磷含量一般低于 0.56 g·kg⁻¹)。滇池流域土壤磷素有明显积累, 特别是废弃大棚区和大棚区。17 个典型样地土壤速效磷含量范围在 0.311~96.238 mg·kg⁻¹ 之间, 全磷含量最高的上蒜林地和上蒜坝平地的速效磷含量同样也非常高。除这两点外, 不同土地利用方式速效磷含量(平均值)从高到低依次为废弃大棚区(80.846 mg·kg⁻¹)>大

表 1 滇池流域不同土地利用类型各采样地点状况
Table 1 Situations of the sampling sites of different land use patterns in Dianchi Lake Watershed

采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	经纬度 Longitude and latitude	坡度 Slope	土壤质地类型 Soil type	主要植物 Dominant plant
上蒜 Shangsuan	林地 Woods	102°41'19.3" E, 24°39'09.9" N	25°	黏土 Clay	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>
松华坝 Songhuaba	林地 Woods	102°50'51.0" E, 25°14'26.1" N	9°	黏土 Clay	云南松 <i>P. yunnanensis</i>
晋宁 Jinning	林地 Woods	102°46'38.2" E, 24°43'24.4" N	7°	黏壤土 Clay loam	鱼骨松 <i>Acacia dealbata</i>
西山 Xishan	林地 Woods	102°37'51.8" E, 24°57'46.1" N	12°	壤土 Loam	云南松 <i>P. yunnanensis</i>
松华坝 Songhuaba	坡地 Slope	102°51'01.2" E, 25°14'18.4" N	4°	黏土 Clay	玉米 <i>Zea mays</i>
宝象河 Baoxianghe	坡地 Slope	102°55'57.7" E, 25°02'43.7" N	12°	黏土 Clay	玉米 <i>Z. mays</i>
西山 Xishan	坡地 Slope	102°39'06.8" E, 24°49'42.0" N	10°	黏壤土 Clay loam	玉米 <i>Z. mays</i>
晋宁 Jinning	坡地 Slope	102°45'03.9" E, 24°38'34.3" N	10°	壤土 Loam	玉米 <i>Z. mays</i>
马金铺 Majinpu	大棚 Greenhouse	102°47'05.0" E, 24°46'04.8" N	0°	黏土 Clay	生菜 <i>Spinacia oleracea</i>
晋宁 Jinning	大棚 Greenhouse	102°42'52.7" E, 24°44'15.9" N	0°	黏壤土 Clay loam	小白菜 <i>Brassica rapa</i>
斗南 Dounan	大棚 Greenhouse	102°45'17.1" E, 24°54'17.4" N	0°	壤土 Loam	月季 <i>Rosa chinensis</i>
上蒜 Shangsuan	坝平地 Flat land	102°41'42.3" E, 24°38'24.1" N	0°	黏土 Clay	玉米 <i>Z. mays</i>
晋宁 Jinning	坝平地 Flat land	102°45'09.4" E, 24°43'28.7" N	0°	黏土 Clay	蚕豆 <i>Vicia faba</i>
双龙 Shuanglong	坝平地 Flat land	102°32'08.0" E, 24°33'21.9" N	0°	黏壤土 Clay loam	玉米 <i>Z. mays</i>
西山 Xishan	坝平地 Flat land	102°39'14.1" E, 24°49'49.9" N	0°	壤土 Loam	蚕豆 <i>V. faba</i>
斗南江尾 Dounanjiangwei	湖滨废弃大棚 Abandoned lakeside greenhouse	102°46'25.8" E, 24°52'45.7" N	0°	黏壤土 Clay loam	河草 River grass
斗南湿地 Dounan wetland	湖滨废弃大棚 Abandoned lakeside greenhouse	102°46'47.6" E, 24°52'26.4" N	0°	壤土 Loam	河草 River grass

表 2 滇池流域不同土地利用方式土壤全磷、速效磷、溶解性总磷和溶解性磷酸盐含量变化
Table 2 Soil total P, available P, total dissolved P and dissolved phosphate contents under different land use types in Dianchi Lake Watershed

采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	pH	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	溶解性总磷 Total dissolved P (mg·kg ⁻¹)	溶解性磷酸盐 Dissolved phosphate (mg·kg ⁻¹)
上蒜 Shangsuan	林地 Woods	5.01	7.857	80.669	9.52	2.61
松华坝 Songhuaba	林地 Woods	5.75	0.402	0.311	1.10	0.30
晋宁 Jinning	林地 Woods	5.11	0.137	5.260	0.66	0.20
西山 Xishan	林地 Woods	5.89	1.124	0.484	1.05	0.39
松华坝 Songhuaba	坡地 Slope	5.64	0.569	4.566	1.51	0.41
宝象河 Baoxianghe	坡地 Slope	6.40	1.094	15.227	2.19	1.90
西山 Xishan	坡地 Slope	5.74	1.090	13.563	2.00	1.21
晋宁 Jinning	坡地 Slope	6.96	0.606	11.818	2.88	2.00
马金铺 Majinpu	大棚 Greenhouse	7.68	2.935	96.238	6.70	5.22
晋宁 Jinning	大棚 Greenhouse	6.81	1.259	25.352	3.80	2.40
斗南 Dounan	大棚 Greenhouse	7.67	1.610	70.985	4.70	2.03
上蒜 Shangsuan	坝平地 Flat land	6.00	8.434	95.354	7.92	7.01
晋宁 Jinning	坝平地 Flat land	6.59	1.250	30.733	1.24	0.84
双龙 Shuanglong	坝平地 Flat land	5.31	0.839	40.603	2.66	1.29
西山 Xishan	坝平地 Flat land	8.02	1.495	12.595	2.55	0.58
斗南湿地 Dounan wetland	湖滨废弃大棚 Abandoned lakeside greenhouse	7.38	1.927	71.766	8.60	7.81
斗南江尾 Dounanjiangwei	湖滨废弃大棚 Abandoned lakeside greenhouse	8.03	2.459	89.926	7.78	6.52

棚区($69.733 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>坝平地区($27.977 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>坡地区($11.296 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>林地区($2.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 与全磷含量分布规律相同。

17 个典型样地土壤析出的溶解性总磷含量在 $0.66\sim 9.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围之间, 远超过了水质含磷标准。表明滇池流域大面积的土壤所积累的磷素在经过雨水冲刷及淋溶时具有较大磷素流失风险。除磷矿区外, 不同土地利用方式的溶解性总磷含量(平均值)最高为湖滨废弃大棚($9.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 然后依次为大棚($4.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 坡地($2.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和坝平地($1.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最后为林地($1.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

17 个典型样地土壤溶解性磷酸盐含量较低, 随溶解性总磷含量增加而增加。

通过对溶解性总磷和全磷含量的相关分析(图 1)可以看出, 滇池流域溶解性总磷与全磷含量之间呈线性关系, 土壤全磷含量决定溶解性总磷的含量, 溶解性总磷含量随全磷含量升降而升降($R^2=0.6853$, $n=15$)。

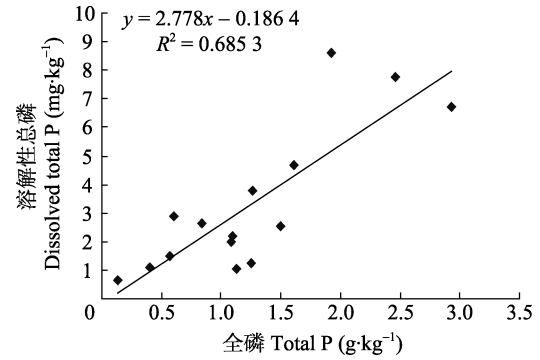


图 1 滇池流域不同土地利用方式下溶解性总磷和全磷含量的相关分析

Fig. 1 Correlation between soil total dissolved P and total P under different land use types in Dianchi Lake Watershed (磷矿区除外 Except for phosphate mining area).

2.2 不同土地利用方式下溶解性总磷的解吸平衡时间

图 2 为滇池流域不同土地利用方式下土壤溶解性总磷的解吸平衡时间, 可以看出大部分土地利用方式下土壤磷的解析约在 0.5 h 左右达到平衡, 只

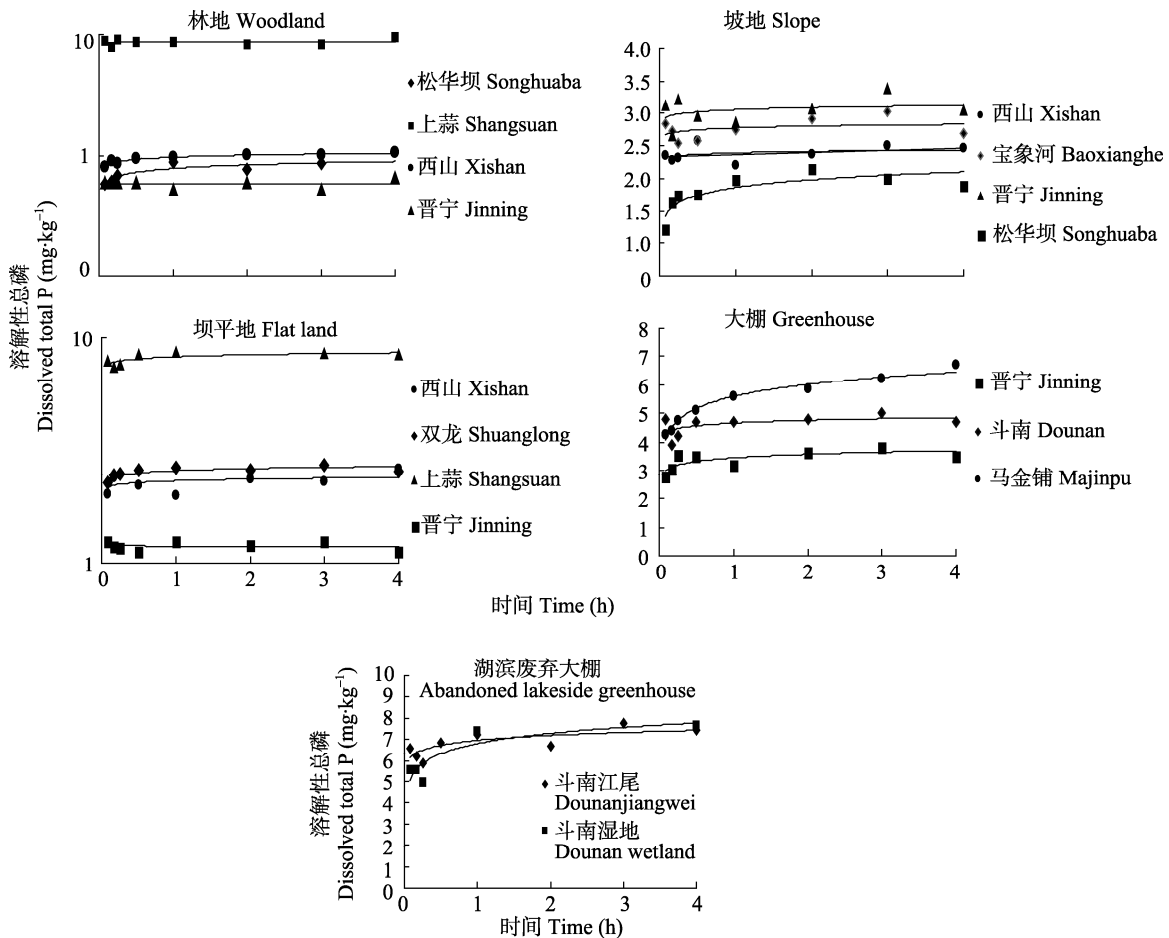


图 2 滇池流域不同土地利用方式下溶解性总磷解吸特征

Fig. 2 Desorption characteristics of soil total dissolved P under different land use types in Dianchi Lake Watershed

有马金铺大棚、斗南湿地土样约在 1 h 左右达到平衡, 表明不同土地利用方式下溶解性总磷解吸平衡时间没有太大差异, 在 0.5~1 h 内都达到平衡。由于在滇池流域, 降雨径流产生过程一般都超过 1 h, 所以可以认为降雨形成的径流中, 溶解态磷基本达到平衡浓度。

2.3 不同土地利用方式下磷素在土壤液相-固相之间的分配关系

从表 3 可以看出滇池流域不同土地利用方式下磷素在液相和固相的比例为 1/1 000~5/1 000, 表明不同土地利用方式下土壤磷素不易解吸, 土壤吸附

磷素能力很强, 磷素不易析出。滇池流域不同土地利用方式下土壤全磷量普遍较高, 因此 1/1 000~5/1 000 的磷素溶到液相后, 仍可以引起水体富营养化。

2.4 不同土地利用方式下溶解性总磷与溶解性磷酸盐的关系

表 4 为溶解性磷酸盐占溶解性总磷的百分比, 可以看出溶解性磷酸盐在溶解性总磷中占 20%~95%。图 3 表明, 滇池流域土壤溶解性磷酸盐含量与溶解性总磷含量线性正相关, 反映了土壤中磷酸盐的溶出能力主要决定于溶解性总磷的含量。

表 3 滇池流域不同土地利用方式下磷在液固相之间的分配比例

Table 3 Phase distribution of P in liquid/solid of soil under different land use types in Dianchi Lake Watershed

采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	液相/固相 Liquid/solid-phase	采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	液相/固相 Liquid/solid-phase
上蒜 Shangsuan	林地 Woods	1/1 000	晋宁 Jinning	大棚 Greenhouse	3/1 000
松华坝 Songhuaba	林地 Woods	3/1 000	斗南 Dounan	大棚 Greenhouse	3/1 000
晋宁 Jinning	林地 Woods	5/1 000	上蒜 Shangsuan	坝平地 Flat land	1/1 000
西山 Xishan	林地 Woods	1/1 000	晋宁 Jinning	坝平地 Flat land	1/1 000
松华坝 Songhuaba	坡地 Slope	3/1 000	双龙 Shuanglong	坝平地 Flat land	3/1 000
宝象河 Baoxianghe	坡地 Slope	2/1 000	西山 Xishan	坝平地 Flat land	2/1 000
西山 Xishan	坡地 Slope	2/1 000	斗南湿地 Dounan wetland	湖滨废弃大棚区 Abandoned lakeside greenhouse	4/1 000
晋宁 Jinning	坡地 Slope	5/1 000	斗南江尾 Dounanjiangwei	湖滨废弃大棚区 Abandoned lakeside greenhouse	3/1 000
马金铺 Majinpu	大棚 Greenhouse	2/1 000			

液相/固相=溶解性总磷/全磷 Liquid/solid phase=dissolved total P/total P.

表 4 滇池流域不同土地利用方式下溶解性磷酸盐在溶解性总磷的百分比

Table 4 Percentage of soil dissolved phosphate in dissolved total P under different land use types in Dianchi Lake Watershed

采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	溶解性磷酸盐/溶解性总磷 Dissolved phosphate/ total dissolved P (%)	采样地点 Sampling site	土地利用方式 Land use type	溶解性磷酸盐/溶解性总磷 Dissolved phosphate/ total dissolved P (%)
上蒜 Shangsuan	林地 Woods	27.37	晋宁 Jinning	大棚 Greenhouse	63.16
松华坝 Songhuaba	林地 Woods	27.27	斗南 Dounan	大棚 Greenhouse	42.55
晋宁 Jinning	林地 Woods	28.57	上蒜 Shangsuan	坝平地 Flat land	88.61
西山 Xishan	林地 Woods	36.36	晋宁 Jinning	坝平地 Flat land	66.67
松华坝 Songhuaba	坡地 Slope	26.67	双龙 Shuanglong	坝平地 Flat land	48.15
宝象河 Baoxianghe	坡地 Slope	86.36	西山 Xishan	坝平地 Flat land	23.08
西山 Xishan	坡地 Slope	60.00	斗南湿地 Dounan wetland	湖滨拆除大棚区 Abandoned lakeside greenhouse	93.98
晋宁 Jinning	坡地 Slope	68.97	斗南江尾 Dounanjiangwei	湖滨拆除大棚区 Abandoned lakeside greenhouse	83.33
马金铺 Majinpu	大棚 Greenhouse	77.61			

3 讨论

近年来大量施用化肥导致土壤磷素大量积累现象严重。已有资料表明, 蔬菜保护地土壤全磷、Olsen-P 平均含量为一般耕地土壤的 2.7~14.0 倍^[16]。本试验也表明, 扣除部分区域成母土含磷高的因素, 滇池流域表层土仍出现了大量的磷素积累, 尤其湖滨废弃大棚区和大棚区。从表层土的全磷含量顺序磷矿区>湖滨废弃大棚>大棚>坝平地>坡地>林地就

可看出土地利用强度越高, 施肥量越大, 表土中积累的全磷含量越高的规律。

本次试验表明, 滇池流域表层土全磷含量平均值为 1.203 g·kg⁻¹, 明显高于南方酸性土壤全磷含量的一般值(低于 0.56 g·kg⁻¹)。17 个典型样地土壤可析出的溶解性总磷含量在 0.66~9.52 mg·kg⁻¹ 之间, 相当于平均含量的 0.85%。但土壤中溶解性全磷与土壤中全磷的含量存在较高的正线性关系, 说明土壤中全

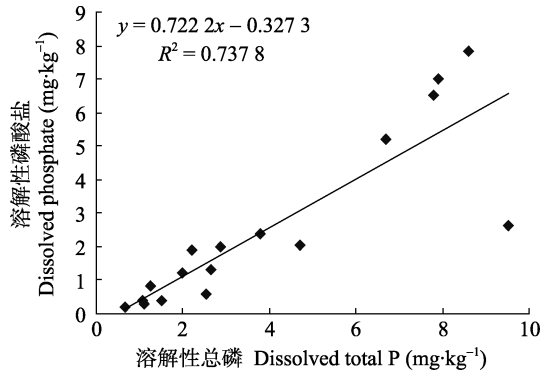


图 3 滇池流域不同土地利用方式下溶解性总磷与溶解性磷酸盐的关系

Fig. 3 Relationship between soil total dissolved P and dissolved phosphate under different land use types in Dianchi Lake Watersherd

磷含量越高, 溶出风险越大。所以过量施肥带来污染风险的相应增加。

溶解性磷酸盐在溶解性总磷中占 20%~95%, 说明溶解性磷酸盐是溶解性总磷的重要组成部分。滇池流域土壤溶解性磷酸盐含量与溶解性总磷含量线性正相关, 反映了土壤中磷酸盐的溶出能力主要决定于其中的溶解性总磷的含量。

磷素解析试验结果表明, 土壤中溶解性总磷的解吸过程, 在 0.5~1.0 h 之内达到平衡, 说明在地下水或地表径流的输移过程中有足够多时间达到溶解平衡。

参考文献

[1] 赵永宏, 邓箱征, 战金艳, 等. 我国农业面源污染的现状与控制技术研究[J]. 安徽农业大学, 2010, 38(5): 2548-2552

- [2] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193
- [3] 陆安祥, 赵云龙, 王纪华, 等. 不同土地利用类型下氮、磷在土壤剖面中的分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3923-3929
- [4] 周萍. 土壤磷素流失影响因子及流失潜力评价指标研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007
- [5] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-340
- [6] 王崇云, 彭明春, 杨莎, 等. 滇池流域面源污染防治方案. 国家重大水专项滇池项目第四课题专题 5 课题组. 2011: 21
- [7] 段永蕙, 张乃明. 滇池流域农村面源污染状况分析[J]. 自然生态保护, 2003(7): 28-30
- [8] 庞燕, 金相灿, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征——吸附等温线和吸附/解吸平衡质量浓度[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 18-23
- [9] 赵海洋, 王国平, 刘景双, 等. 三江平原湿地土壤磷的吸附与解吸研究[J]. 生态环境, 2006, 15(9): 930-935
- [10] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1369-1374
- [11] 罗敏, 王旭东. 不同肥力壤土的土壤颗粒分布及其磷素吸附-解吸规律[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 106-109
- [12] 刘毅, 陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1549-1553
- [13] 段永蕙, 张乃明, 洪波, 等. 滇池流域农田土壤氮磷流失影响因素探析[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 116-118
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 39-110
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 中国环境科学出版社, 2002: 243-248
- [16] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2689-2701