

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201907048

滇池流域大棚土壤磷素空间分布特征研究*

杨浩瑜^{1,2}, 张 敏^{1,2}, 邓 洪^{1,2}, 刘惠见^{1,2}, 张乃明^{2**}, 包 立^{1,2**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】对滇池全流域大棚土壤的磷素分布特征进行研究,为滇池流域面源污染的控制以及大棚土壤的安全利用提供参考。【方法】2014年6—8月,采集滇池流域102个大棚表层土壤样品,以土壤样品的全磷、有效磷和水溶性磷为研究对象,利用地理信息系统空间分析对全磷、有效磷和水溶性磷进行普通克里金空间插值,并得到磷素空间分布图。【结果】滇池流域大棚土壤中全磷含量为0.99~2.34 g/kg,有效磷含量为35.14~181.33 mg/kg,水溶性磷含量为12.99~94.56 mg/kg。研究区域大棚土壤全磷与有效磷含量和水溶性磷之间均成正相关关系,滇池流域大棚土壤磷素空间分布存在差异。其中,东岸湖滨大棚种植区土壤全磷含量和水溶性磷含量最高;西岸大棚典型种植区土壤有效磷含量最高。磷素的累积对滇池环境影响严重。【结论】滇池流域大棚土壤磷素累积显著,因此减少大棚土壤中磷素流失是防治滇池水体富营养化的关键。

关键词: 滇池; 大棚土壤; 磷素; 空间分布

中图分类号: S 153.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2021)01-0140-07

Spatial Distribution Characteristics of Soil Phosphorus in Greenhouses of Dianchi Lake Basin

YANG Haoyu^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, DENG Hong^{1,2}, LIU Huijian^{1,2},
ZHANG Naiming², BAO Li^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Science of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Soil Fertilizer and Pollution Repair Engineering Laboratory in Yunnan Province, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To study the distribution characteristics of phosphorus in greenhouse soil in Dianchi Lake basin, and to provide reference for the control of non-point source pollution in Dianchi Lake basin and the safe use of greenhouse soil. [Method] A total of 102 surface soil samples from the Dianchi Lake basin were collected from June to August in 2014, and the total phosphorus, available phosphorus and water-soluble phosphorus of the soil samples were taken as the research objects. Based on the spatial analysis of geographic information system, the Kriging spatial interpolation of total phosphorus, available phosphorus and water-soluble phosphorus were carried out, and the spatial distribution map of phosphorus was obtained. [Result] The total phosphorus content in the greenhouse soil of Dianchi Lake basin was 0.99-2.34 g/kg, the effective phosphorus content was

收稿日期: 2019-07-25

修回日期: 2020-11-14

网络首发时间: 2021-01-14 17:13:40

*基金项目: 国家水污染控制科技重大专项(2012ZX01702-003); 云南省科技创新人才计划项目(2015HC018); 云南省自然科学基金重点项目(2009CC006)。

作者简介: 杨浩瑜(1993—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事农业非点源污染与土壤修复方向的研究。E-mail: 369220094@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 张乃明(1963—),男,山西长治人,博士,教授,主要从事土壤修复及面源污染方面的研究。E-mail: zhangnaiming@sina.com; 包立(1985—),男,云南建水人,博士,讲师,主要从事农业非点源污染与土壤修复方向的研究。E-mail: bllty@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210114.0920.002.html>



35.14-181.33 mg/kg, and the water soluble phosphorus content was 12.99-94.56 mg/kg. There was a positive correlation between total phosphorus content and water-soluble phosphorus content, spatial distribution of soil phosphorus in greenhouses in Dianchi Lake basin. The soil total phosphorus content and water-soluble phosphorus content in the east bank lakeside greenhouse planting area were the highest; and the soil available phosphorus content in the typical planting area of the west coast greenhouse was the highest. The accumulation of phosphorus had a serious impact on the environment of the Dianchi Lake. [**Conclusion**] Phosphorus accumulation in the greenhouse of Dianchi Lake basin is significant, so reducing phosphorus loss in greenhouse soil is the key to preventing eutrophication in Dianchi Lake.

Keywords: Dianchi Lake; soil; phosphorus; spatial distribution

滇池是西南地区最大的淡水湖, 其半封闭的湖体结构、流入的河流交换周期长, 导致水体污染物滞留时间长, 滇池水体富营养化非常严重。中国已将滇池水污染问题定位为全国水污染防治的重点^[1]。磷不仅是造成湖泊富营养化的主要营养成分, 还是富营养化的限制因子^[2], 磷肥和有机磷农药中的磷素随土壤下渗和地表径流进入水体^[3]。据统计, 1980—2010 年, 中国农田的磷肥施用量增长了 2 倍^[4], 而磷肥利用率不到 20%^[5], 长期过量的施用磷肥会导致土壤中磷素通过径流等方式向水体迁移, 进而造成水质污染。有研究^[6-10]统计了 2002—2017 年部分关于有机磷农药赋存的文献, 发现国内土壤中含有有机磷农药十几种, 并通过不同途径分配到其他环境介质中, 对人体和生态环境产生危害。

设施栽培具有良好的可控性, 可人工调节大棚内温度、湿度等因素^[11]。由于其可减少气候对作物生长的限制并有较高经济效应, 在全球有着很好的发展前景。随着农业产业结构的调整, 中国的设施栽培规模也得到迅速发展。至 2016 年, 中国设施农业面积已达 5872 万 hm^2 , 居全球第一, 其中 95% 以上是利用聚烯烃温室大棚膜覆盖^[12-14]。滇池流域是全国最典型的大棚种植区之一, 其大棚面积占区域种植面积的 80% 以上^[15]。有研究表明: 2014 年滇池流域入湖污染物中来源于农业面源污染的总磷达 175 t^[16]。因此, 设施农业的发展应该与水质保护相协调。

关于滇池流域不同土壤利用方式的土壤磷积累方面已有大量研究^[17-18], 而对于滇池大棚土壤磷素的空间分布的研究鲜有报道^[19-20]。本研究以滇池全流域的大棚土壤为供试土壤, 并对大棚土

壤的磷素空间分布特征进行研究分析, 为滇池流域农田磷素养分管理以及面源污染防治提供依据, 并为流域大棚土壤质量的改良和修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域面积约为 2 920 km^2 , 面源污染主要集中在雨季, 即每年的 5—10 月。

1.2 样品采集

如图 1 所示: 于 2014 年 6—10 月, 在滇池流域的大棚中采用随机多点混合采样法得到 102 个 0~20 cm 的表层土壤样本, 风干去除石砾、有机残体和作物根系等非土壤物质。风干后土样分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛后装袋保存。

1.3 样品分析与方法

土壤全磷使用高氯酸—硫酸消煮, 钼锑抗比色紫外分光光度法测定; 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提, 钼蓝比色紫外分光光度法测定; 土壤水溶性磷使用蒸馏水提取, 钼锑抗比色法测定^[21]。

1.4 数据处理

为保证数据的可靠性, 对受人为影响较重的采样点进行检验处理并剔除异常样本。采用 3 倍标准差法处理样本数据, $\bar{x} \pm 3S$ 为标准, $\bar{x}$ 表示某指标所有样点的平均值, S 为标准差, 超出该范围的数据则需剔除^[22]。所有试验数据采用 Excel 2013、SPSS 23.0 等软件进行分析与统计; 利用 ArcGIS 10.0 对全磷、速效磷和水溶性磷的分布进行普通克里格插值, 建立滇池流域大棚土壤磷素空间分布图。应用半方差分析其空间结构, 其中 C_0 表示块金值, 代表由试验误差和随机因素引起

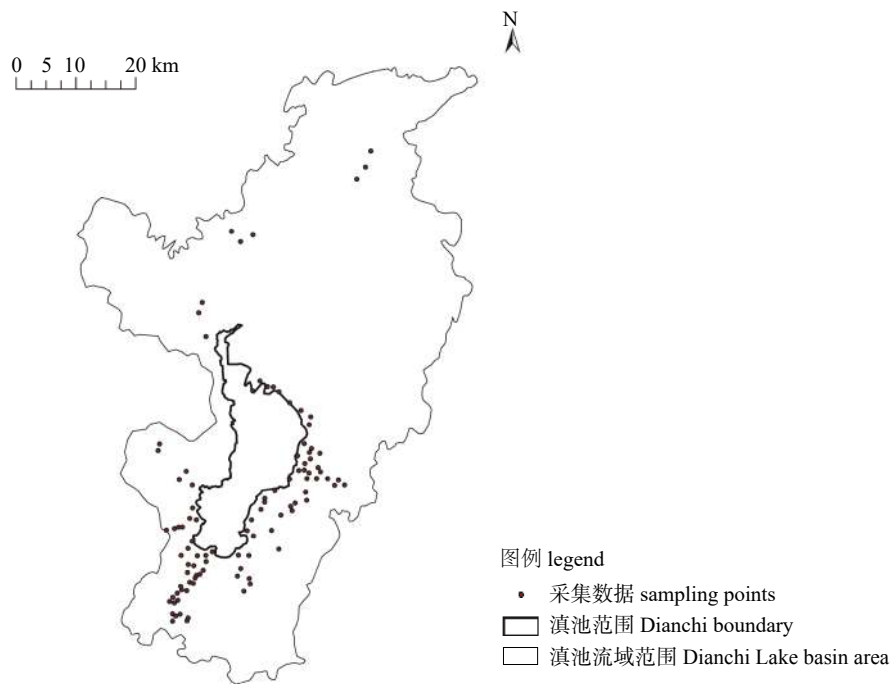


图 1 大棚土壤取样点
Fig. 1 Sampling points of greenhouse soil

的变异； C 为偏基台值，代表由非人为的区域因素 (空间自相关部分) 引起的变异；块金效应代表了无法解释的或随机的变异，通常由测定误差或土壤性质的微变异所造成 (表 1)。

表 1 块金效应与空间相关性 Tab. 1 Nugget effect and spatial correlation	
块金效应 nugget effect	空间相关性 spatial correlation
<0.25	强 strong
0.25~0.75	中等 medium
>0.75	弱 weak

2 结果与分析

2.1 滇池流域大棚土壤各磷素含量及相关性分析
如表 2 所示：所有大棚土壤样品全磷的含量分布区间为 0.99~2.34 g/kg，平均值为 1.34 g/kg；全磷含量与 2011 年滇池周边设施大棚种植区土壤和废弃大棚区土壤^[23]相比分别下降了 43.28% 和 21.64%。所有大棚土壤样品中有效磷含量范围为 35.14~181.33 mg/kg，平均值为 62.94 mg/kg。大棚土壤样品中水溶性磷含量范围为 12.99~94.56 mg/kg，平均值为 26.40 mg/kg。有效磷和水溶性磷变异系数分别为 0.75 和 1.00，高于全磷的变异系数 0.26。

表 2 滇池流域大棚土壤磷素累积特征 Tab. 2 Greenhouse soil phosphorus accumulation characteristics of Dianchi Lake basin			
统计量 statistic	TP/(g·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	WSP/(mg·kg ⁻¹)
最小值 Min.	0.99	35.14	12.99
最大值 Max.	2.34	181.33	94.56
平均值 average	1.34	62.94	26.40
标准差 standard deviation	0.35	47.18	26.39
变异系数 coefficient of variation	0.26	0.75	1.00
偏度 skewness	1.79	2.18	2.27
峰度 kurtosis	3.46	3.47	3.77
P_{k-s}	0.617	0.362	0.480

注：TP. 全磷含量；AP. 有效磷含量；WSP. 水溶性磷含量； P_{k-s} . 拟合优度检验；下同。
Note: TP. total phosphorus content; AP. available phosphorus content; WSP. water-soluble phosphorus content; P_{k-s} . kolmogorov-smirnov test; the same as below.

从全国第二次土壤普查养分分级标准来看，本次采集的滇池流域大棚土壤样本全磷和有效磷均为一级 (表 3)。
对滇池大棚土壤中全磷、有效磷和水溶性磷之间进行相关性分析，得到研究区域内大棚土壤全磷与有效磷含量呈显著正相关关系 ($R^2=0.965\ 4$)，与水溶性磷含量也呈正相关关系 ($R^2=0.968\ 6$) (图 2)。

表 3 全国第二次土壤普查养分分级标准
Tab. 3 The second national soil census nutrient grading standard

项目 project	一级 level one	二级 level two	三级 level three	四级 level four	五级 level five	六级 level six
TP/(g·kg ⁻¹)	>1	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
AP/(mg·kg ⁻¹)	>40	20~40	10~20	5~10	3~5	<3

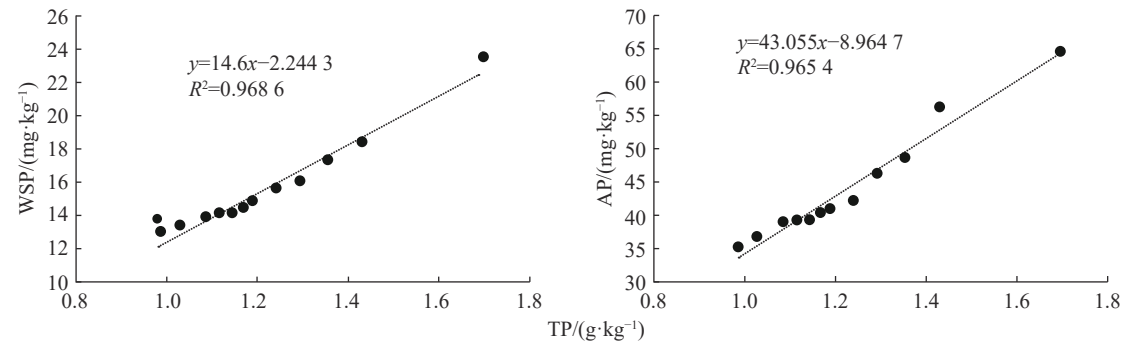


图 2 大棚土壤全磷含量与有效磷及水溶性磷含量相关性

Fig. 2 Correlation between total phosphorus content (TP) and file contents of available phosphorus (AP) and water-soluble phosphorus (WSP) in greenhouse soils of Dianchi Lake

2.2 滇池流域大棚土壤磷素空间分布

在对研究区内大棚土壤磷素做空间插值前需进行正态分布检验, 对于非正态分布序列通过对数方法进行标准化处理。所有数据均符合正态分布, 进而进行地理统计学普通克里金插值分析。

从表 4 可见: 总体来看, 滇池流域大棚土壤磷素与模拟试验变异函数拟合较好 (决定系数

R^2 均在 0.7 以上)。块金效应 $[C_0/(C+C_0)]$ 可用来表明系统变量的空间相关性的程度^[24]。土壤全磷和有效磷的块金效应分别为 0.108 和 0.027, 具有很强空间相关性, 受结构性因素 (自然因素) 的影响较大; 水溶性磷的块金效应达到 0.434, 属中等空间自相关, 受耕作等人为因素影响的程度大。

表 4 滇池流域大棚土壤磷素地统计学分析
Tab. 4 Greenhouse soil phosphorus in Dianchi Lake basin geostatistical analysis

指标 index	模型 model	块金值 (C_0) nugget value	偏基台值 (C) partial base station value	块金效应 nugget effect $[C_0/(C+C_0)]$	变程/m range change	决定系数 (R^2) coefficient of determination	残差 (RSS) residual
TP	指数 exponential	0.004	0.033	0.108	591	0.877	0.002
AP	球型 spherical	0.001	0.036	0.027	613	0.838	0.002
WSP	球型 spherical	0.023	0.030	0.434	404	0.787	0.004

利用普通克里金插值, 得到滇池流域大棚土壤全磷、有效磷和水溶性磷的空间分布情况, 如图 3 所示。土壤全磷含量高值区主要分布在滇池东岸呈贡区马料河、洛龙河和捞渔河流域周边的斗南、金马铺和上蒜村等地, 以及滇池北部盘龙区盘龙江流域松华坝附近, 以上所有样点全磷含量均高于 1 g/kg; 土壤有效磷含量高值区主要分布在滇池西岸西山区、东岸呈贡区和官渡区宝象

河流域周边, 样点有效磷含量均高于 40 mg/kg; 土壤水溶性磷含量高值区和有效磷一样, 主要分布在滇池东西两岸。滇池流域大棚土壤全磷, 有效磷和水溶性磷的空间分布状况基本一致, 均表现出东岸种植区含量普遍高于其他地区。说明其存在一定的相关性, 但具体的分布变化状况又各有特点, 因此, 对滇池流域大棚土壤的研究要根据不同的磷形态来进行。

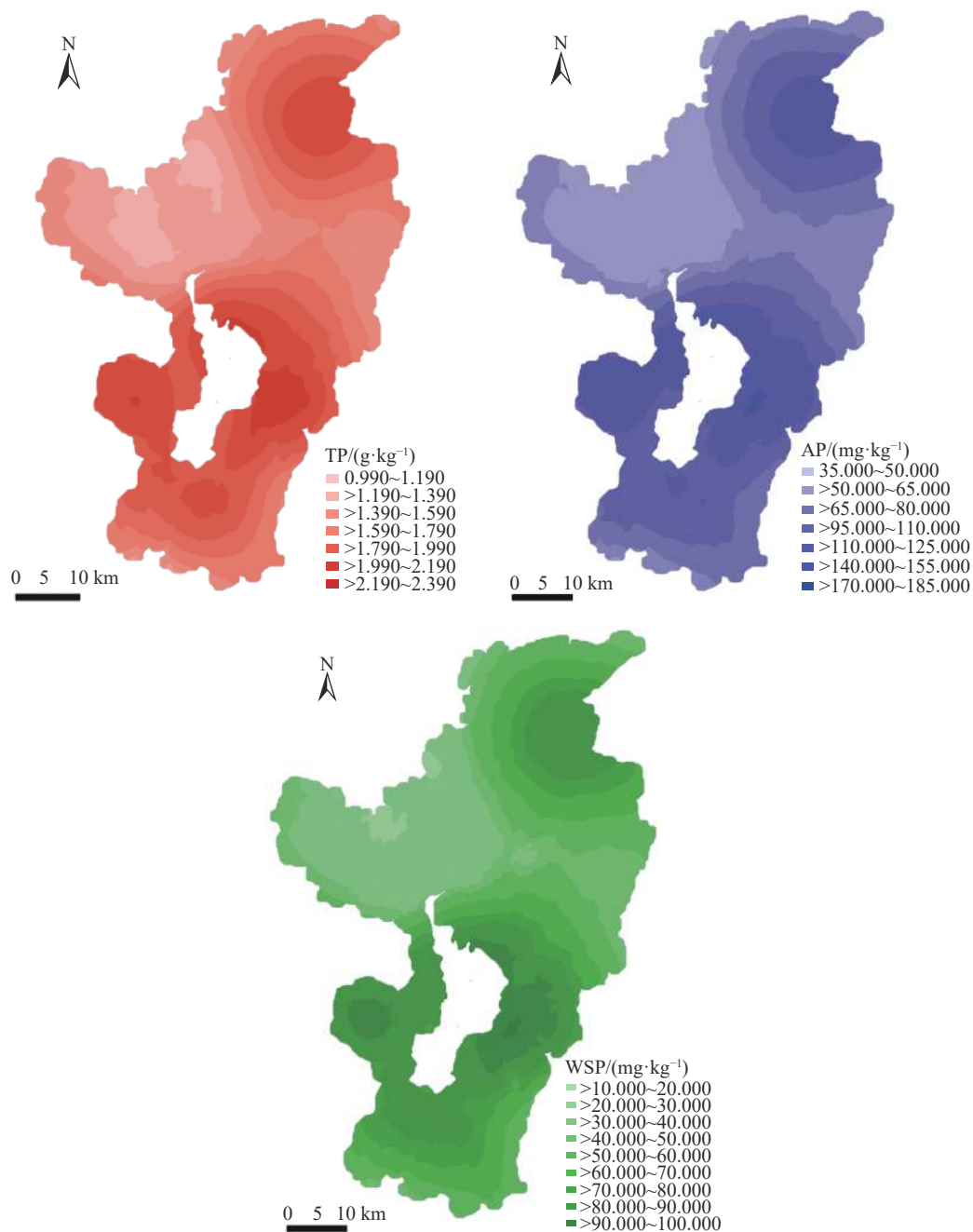


图 3 滇池流域土壤全磷、有效磷和水溶性磷空间分布图

Fig. 3 The spatial distribution of soil total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and water-soluble phosphorus (WSP) in Dianchi Lake basin

3 讨论

本研究结果表明：滇池流域大棚土壤全磷、有效磷和水溶性磷都处于极高水平。主要是因为滇池流域是昆明主要的花卉和蔬菜种植基地，近年来大棚中化肥的施用量增长较快，施用强度也逐渐增高，但是以增加矿物磷养分的施用量以期获得高产^[25]的同时，磷的利用率很低，导致大量

磷素以各种形态累积在土壤中^[26]。随着 2012 年“四退三还”工作执行以来，滇池湖岸线周边约有 87 万 m² 大棚被拆除并恢复为湿地，随着大棚栽培的减少，磷素含量也随之降低。

土壤中的速效磷是全磷的一部分，而速效磷中又包含易被植物吸收的水溶性磷^[27]。研究区全磷与有效磷、水溶性磷的正相关关系与很多研究结果相一致：土壤中磷素含量与径流进入水体中

磷素的浓度呈显著正相关^[28-29],同时土壤水溶性磷含量与全磷的淋溶损失也具有正相关性^[30-31]。

全流域尺度上,全磷含量最高,变幅最大,累积量最大的地区为东岸湖滨大棚种植区,显著高于其他区域。这是因为滇池东岸上蒜村为富磷区,本身磷背景值较高,加之花卉和蔬菜的种植导致该区域全磷含量偏高。除此之外滇池东岸的斗南和马金铺片区也有着较长的花卉和蔬菜种植历史,大量的化肥施用也是增加大棚土壤中全磷含量的原因之一。同时,全磷在西岸也有较高累积,但变化程度不大。滇池北部松华坝片区全磷含量也高于平均水平,主要是因为该区域的耕地农药施用量为139 t,但利用率仅为20%~30%。滇池流域大面积的大棚土壤磷素含量非常高,因而磷进入滇池引发水体富营养化的风险同样很大。

土壤有效磷分布具有明显的空间特征,土壤有效磷是土壤磷素养分供应水平高低的指标,土壤磷素含量高低在一定程度反映了土壤中磷素的贮量和供应能力^[32]。根据已有研究表明^[33]:滇池流域的红壤中有效磷<40 mg/kg时,对环境中的水体富营养化没有显著的影响;流域红壤有效磷介于40~70.9 mg/kg之间时,对滇池水环境有一定的影响;土壤有效磷>70.9 mg/kg时,对滇池流域水体环境富营养化具有显著影响。从整个区域尺度看,有效磷含量高的区域为流域西岸大棚典型种植区和东岸呈贡种植区,有效磷含量均高于70.9 mg/kg。滇池东岸宝象河流域西南角有效磷含量明显高于其他地区,最高值达到176.4 mg/kg;而宝象河东北角含量较低,大致在30~40 mg/kg。在滇池南部的东大河流域,大棚土壤有效磷含量呈现由西南向东北递增的趋势,西南部背离滇池的山区有效磷含量最低,小于40 mg/kg。滇池北部的盘龙江流域大棚土壤有效磷含量也介于52.4~89.7 mg/kg之间,对滇池水环境有显著影响。总体来看,有效磷在大棚的累积不如全磷显著,但利用率低的区域,流失风险依然很大。

土壤水溶性磷分布具有明显的空间特征,从整个区域尺度看,水溶性磷的含量较高,其中东岸大棚区的含量最高,但变幅最大,受人为因素的影响也最为明显,一旦离开大棚区,水溶性磷的含量迅速下降。土壤水溶性磷是土壤磷素进入水体引起水体富营养化的直接指标,这也说明大棚区域的磷流失风险高于其他土地利用类型。

4 结论

在滇池流域,大棚土壤中的磷素显著累积,全磷和有效磷含量均属于《全国第二次土壤普查养分分级标准》中的一级水平,水溶性磷含量也处于极高水平;大棚土壤中全磷与有效磷、水溶性磷均呈现显著正相关的关系;从地统计学分析来看,大棚土壤全磷和有效磷受自然因素的影响较大,水溶性磷受人为因素的影响较大;从空间分布看,全磷含量在滇池东岸大棚区最高,有效磷含量在滇池西岸和东岸大棚区最高,水溶性磷含量分布情况与有效磷呈相同趋势;磷素的累积对滇池环境影响严重,存在较高的流失风险。

[参考文献]

- [1] 刘勇,朱元荣,吴丰昌,等. 滇池沉积物中重金属污染特征及其生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1181. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.07.013](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.07.013).
- [2] MONBET P, MCKELVIE I D, WORSFOLD P J. Dissolved organic phosphorus speciation in the waters of the Tamar estuary (SW England)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(4): 1027. DOI: [10.1016/j.gca.2008.11.024](https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.024).
- [3] 包立,刘惠见,邓洪,等. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 815. DOI: [10.11766/trxb201709210394](https://doi.org/10.11766/trxb201709210394).
- [4] 国家统计局. 中国农村统计年鉴2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [5] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 918. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.018).
- [6] 丁浩东,万红友,秦攀,等. 环境中有机磷农药污染状况、来源及风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 463. DOI: [10.7524/j.issn.0254-6108.2018051405](https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2018051405).
- [7] 王俊,胡进锋,陈峰,等. 福州菜地土壤中有机磷农药残留特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 951. DOI: [10.11654/jaes.2014.05.018](https://doi.org/10.11654/jaes.2014.05.018).
- [8] 王建伟,张彩香,潘真真,等. 江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1597. DOI: [10.13227/j.hjks.201609206](https://doi.org/10.13227/j.hjks.201609206).
- [9] 简毅,杨万勤,张健,等. 岷江下游(五通桥段)土壤污染特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 256. DOI: [10.3321/j.issn:1672-2043.2009.02.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-2043.2009.02.007).
- [10] 周婕成,陈振楼,毕春娟,等. 上海崇明农田土壤中有机磷农药的残留特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1456. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2010.06.032](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2010.06.032).
- [11] 曹舰艇,杨红,彭艳,等. 藏东南不同种植年限蔬菜大棚土壤pH及养分的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 117. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.08.015](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.08.015).
- [12] 蔡祖聪. 我国设施栽培养分管理中待解的科学和技术问题[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 36. DOI: [10.11766/trxb](https://doi.org/10.11766/trxb)

- 201805310286.
- [13] 石宁, 李彦, 井永苹, 等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2434. DOI: 10.11654/jaes.2018-1065.
- [14] 包立, 张乃明, 农明英. 滇池东大河流域土壤磷素累积规律及空间分布特征研究[J]. 土壤, 2014, 46(3): 470. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2014.03.014.
- [15] 李婧, 杨浩, 谢标, 等. 滇池湖滨农业土壤中PAHs分布特征及来源[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2015.12.006.
- [16] 徐晓梅, 吴雪, 何佳, 等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 476. DOI: 10.18307/2016.0302.
- [17] 胡斌, 和树庄, 陈春瑜, 等. 滇池流域土壤氮磷分布特征及关键影响因素研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1178. DOI: 10.11766/trxb201110310417.
- [18] 夏运生, 李阳红, 史静, 等. 滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 325. DOI: 10.11766/trxb200901070005.
- [19] 刘琳. 松华坝水源保护区农业种植模式与面源污染控制研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [20] 桂萌, 祝万鹏, 余刚, 等. 滇池流域大棚种植区面源污染释放规律[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 1. DOI: 10.3321/j.issn: 1672-2043.2003.01.001.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [22] LIU X M, WU J J, XU J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 257. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.08.048.
- [23] 陈春瑜, 和树庄, 胡斌, 等. 土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2677. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2012.0369.
- [24] 文波龙, 刘兴土, 张乃明. 滇池大河流域农田土壤磷素空间变异特征及对地表径流的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 173. DOI: 10.11766/trxb201009270397.
- [25] 刘毅. 中国磷代谢与水体富营养化控制政策研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [26] 李建查, 张国盛, 倪振伟, 等. 退耕对滇池湖滨土壤理化性质与无机磷分布的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 98. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.023.
- [27] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 76. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6257.2011.06.015.
- [28] 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): 190. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-9829.2000.04.005.
- [29] BROCK E H, KETTERINGS Q M, KLEINMAN P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3): 269. DOI: 10.1007/s10705-006-9065-3.
- [30] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1810. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2013.10.012.
- [31] CASSON J P, BENNETT D R, NOLAN S C, et al. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of alberta[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 2212. DOI: 10.2134/jeq2006.0085.
- [32] 余薇薇, 张智, 罗苏蓉, 等. 沼液灌溉对紫色土菜地土壤特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 182. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.16.028.
- [33] 徐红娇. 滇池流域土壤磷素环境阈值及影响因素研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2015.

责任编辑: 何承刚