

成都平原近 40 年来表层土壤全磷变化及其与 农地利用方式转变的关系

李呈吉, 张元媛, 方红艳, 邓 茜, 冉 敏, 宋靛颖,
李艾雯, 张露心, 王昌全, 李启权

(四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130)

摘 要: 【目的】掌握农地土壤全磷含量变化特征及其影响因素有助于合理制定田间磷肥管理措施和科学防控面源污染。

【方法】基于 1980s 第二次土壤普查时获得的 160 个样点数据和 2016~2017 年采集分析获得的 175 个样点数据, 采用一般统计和方差分析探讨了近 40 年来成都平原农地表层 (0~20 cm) 土壤全磷 (P) 含量变化特征及其与农地利用方式和母质类型的关系。【结果】结果表明, 研究区农地表层土壤全磷含量从 0.48 g kg⁻¹ 增加到 0.95 g kg⁻¹, 增加了 97.92% ($P < 0.01$)。与 1980s 传统稻-麦/油轮作相比, 2016~2017 年稻-麦/油轮作、稻-蔬轮作和园林地土壤全磷含量分别增加了 79.17%、150.00% 和 85.42% ($P < 0.01$)。不同母质类型上, 更新统老冲积物发育的土壤全磷含量增幅最高, 为 147.06% ($P < 0.01$), 其次分别是灰棕冲积物 (115.56%, $P < 0.01$) 和灰色冲积物 (81.82%, $P < 0.01$)。与传统稻-麦/油轮作相比, 稻-蔬轮作下更新统老冲积物发育的土壤全磷累积量增幅 (132.35%, $P < 0.01$) 远高于灰棕冲积物 (68.88%, $P < 0.01$) 和灰色冲积物 (49.09%, $P < 0.01$), 而园林地只增加了更新统老冲积物发育土壤的全磷累积量增幅, 降低了灰棕冲积物发育的土壤上全磷累积量增幅, 对灰色冲积物发育的土壤则影响不大。【结论】这表明, 农地利用方式转变改变了研究区表层土壤全磷累积特征, 但农地利用方式转变对表层土壤全磷累积的影响依赖于成土母质类型。

关键词: 土壤全磷; 农地利用方式转变; 母质类型; 成都平原

中图分类号: S151, S153, X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)01-0187-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021070502

李呈吉, 张元媛, 方红艳, 邓 茜, 冉 敏, 宋靛颖, 李艾雯, 张露心, 王昌全, 李启权. 成都平原近 40 年来表层土壤全磷变化及其与农地利用方式转变的关系 [J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 187-194

LI Cheng-ji, ZHANG Yuan-yuan, FANG Hong-yan, DENG Qian, RAN Min, SONG Liang-ying, LI Ai-wen, ZHANG Lu-xin, WANG Chang-quan, LI Qi-quan. Changes of Total Phosphorus in Topsoil and the Correlations with Agricultural Land-Use Change Across the Chengdu Plain During the Past 40 Years [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 187-194

【研究意义】土壤磷素是植物生长的主要营养元素之一^[1-2], 较高的磷含量水平意味着良好的土壤肥力状况和较高的农产品生产力^[3-5]。然而, 土壤中磷素积累过量也会导致土壤磷流失, 造成面源污染, 引起水体富营养化^[6-8]。研究表明, 农田土壤中积累的磷素对磷淋溶的影响甚至超过新投入的磷, 成为淡水水质的主要污染源^[9-11]。因此, 掌握区域土壤全磷含量变化特征及其影响因素对于农田磷肥管理和面源污染防治至关重要。

【前人研究进展】土壤中全磷含量变化受成土母质、农地利用方式和农业管理措施等自然和人为因素共同影响, 不同区域土壤全磷变化特征及其主控因素存在明显差异^[3-4, 12-14]。其中, 农地利用方式转

变会引起耕作方式和施肥等田间管理措施的改变, 进而导致土壤理化性质发生显著变化^[15-17]。近年来, 快速的城镇化和人口增长导致城镇急剧扩张和农产品需求量不断增加, 使得农地集约化利用程度不断提高^[16-18], 一些地区农地利用方式发生明显改变, 如传统的水稻-小麦/油菜轮作地转变为水稻-蔬菜轮作地或蔬菜地以提高城镇蔬菜供给^[19]。农地集约利用和农地利用方式转变带来的高频率、过量的磷肥施用使我国农田土壤全磷逐年累积, 呈盈余状态^[7-8, 20-21], 一些地区农田土壤成为巨大的磷库^[7]。不少学者开展了区域农田土壤全磷平衡、有效性以及空间分布等方面的研究^[20-24], 但针对快速城镇化和农地高度集约利用地区农地利用方式转变对土壤全磷

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301701) 和四川省科技计划项目 (No. 2019YJ0433) 资助

作者简介: 李呈吉 (1997-), 女, 四川南部人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量演变研究, E-mail: lcjfighting0622@163.com

变化的影响仍需开展进一步研究。此外,成土母质是土壤形成的物质基础,一方面直接影响着土壤中全磷的供给^[25-26],另一方面通过影响土壤中生物地球化学循环过程(磷吸附解析、沉淀与溶解以及微生物固定与矿化等)^[27-29]调控土壤对磷素的吸附强度,间接影响土壤全磷含量。揭示不同母质类型上农地利用方式转换对土壤全磷含量变化的影响将有助于集约利用条件下农田磷肥的精准管理和面源污染的精准防控。

【本研究切入点】成都平原是我国西南地区主要的粮食生产基地和农业集约化利用程度较高的区域。随着人口的快速增长以及城镇化进程的加速,该区农地利用方式发生明显改变,大量传统水稻—小麦/油菜轮作地转变为水稻—蔬菜轮作地和园林地^[19]。相较传统农地利用方式,转变后的农地利用方式集约化程度和肥料投入量均发生显著改变^[19,30]。目前针对农地利用方式转变背景下该区域土壤性质变化的研究主要集中于土壤有机碳和酸碱度变化上^[19,30-32]。有研究分析了该区土壤剖面全磷分布特征及其主控因素^[25],但没有涉及土壤全磷在时间上的变化规律。因此,目前该区域农地表层土壤中全磷含量变化特征及其与农地利用方式转变的关系尚不明确。**【拟解决的问题】**本研究基于 1980s 第二次土壤普查数据和 2016~2017 年采集的土壤样点数据,分析近 40 年来成都平原农地表层土壤全磷含量变化特征,对比 2016~2017 年 3 种典型用地方式(水稻—

小麦/油菜轮作、水稻—蔬菜轮作和园林地)与 1980s 传统水稻—小麦/油菜轮作条件下土壤全磷含量的差异及其在不同母质类型上的变化,揭示农地利用方式转变条件下该区域表层土壤全磷的累积规律,期为高强度农业利用背景下合理的磷肥施用和面源污染管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

研究区位于四川盆地西部(30°23′~31°50′N、103°27′~104°14′E),全区面积约 3173 km²(图 1a),包括温江、郫县、新津、都江堰、大邑、邛崃、彭州和崇州等区县在内的成都平原的主体区域。该区海拔高度 447~732 m,地势西北高,东南低(图 1b)。区内河网密布,水渠纵横(图 1b)。该地区属亚热带季风气候,区内温暖湿润,年平均气温 16℃,年平均降水量约 1000 mm,降雨主要集中在夏季。该区成土母质主要为更新统老冲积物、灰色冲积物和灰棕冲积物。其中,更新统老冲积物发育的土壤风化程度较深,黏粒含量高,质地粘重,而灰色冲积物和灰棕冲积物通透性较好,黏粒含量和容重相对较低^[32-33]。水稻土为该区域最主要的土壤类型。近 20 年来随着该地区经济和城镇化快速发展,区内大量传统水稻—小麦/油菜轮作地转变为水稻—蔬菜轮作地和园林地(种植园林植物的耕地,以下简称园林地);其中,园林地主要用于种植桂花、银

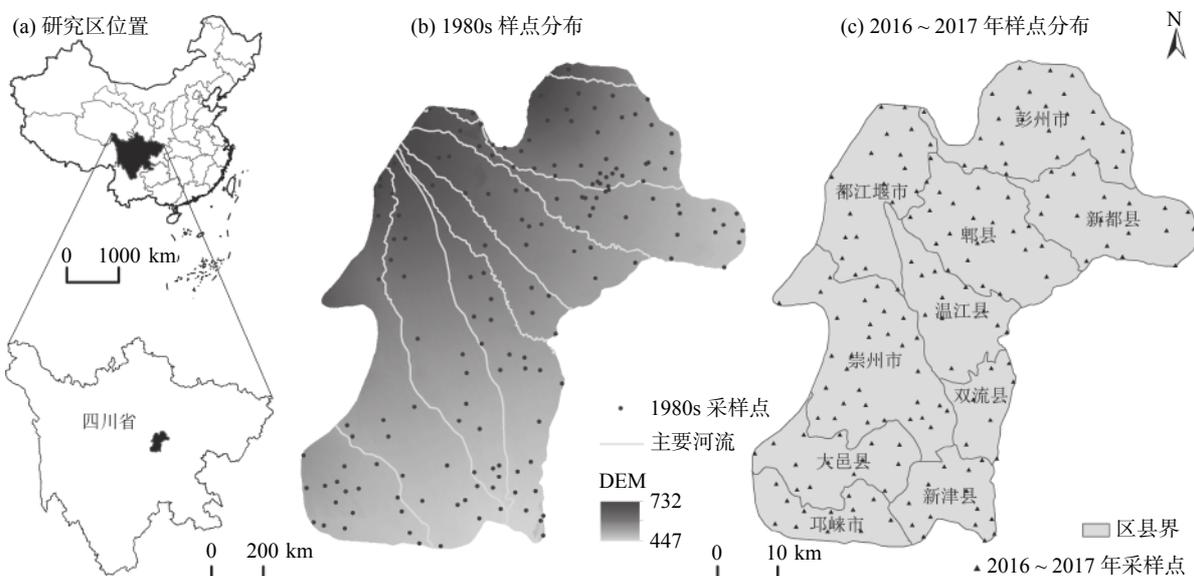


图 1 研究区位置及样点分布

Fig.1 Maps for the location of the study area and distribution of sample points

杏等观赏树木以满足城镇化建设过程中对园林绿化的需求^[30]。

1.2 数据来源与实验分析

1980s 土壤全磷含量数据来源于研究区各区县第二次土壤普查时获得的典型土壤剖面资料, 共 165 个表层土壤 (0~20 cm) 采样点。2016~2017 年在 1980s 样点分布位置或接近该位置的区域结合 3 种典型农地利用方式及 3 种母质类型分布情况开展实地采样, 共采集 178 个表层土壤 (0~20 cm) 样品。其中, 稻—蔬轮作地和园林地利用时间至少在 10 年以上。样品采集过程中, 使用手持 GPS 记录每个样点的经纬度坐标及海拔等地理信息, 并详细记录每个点位的地名、成土母质、土壤类型以及耕作管理等信息。土壤样品在室内经自然风干和去杂后, 碾磨过 100 目 (0.149 mm) 筛, 采用与 1980s 完全相同的方法测定各样品中的土壤全磷 (以单质 P 计) 含量, 即采用 NaOH 碱熔法消煮—钼锑抗比色法^[34]测定土壤全磷含量。测定过程中, 采用 3 次重复和国家标准物质进行数据质量控制。

1.3 数据处理方法

采用均值加减 3 倍标准差法分别在各母质类型中剔除 1980s 和 2016~2017 年土壤样点全磷含量 5

个和 3 个极端异常值, 两个时期最终样点数分别为 160 个和 175 个 (2016~2017 年稻—麦/油轮作、稻—蔬轮作和园林地土壤样点数各为 82、42 和 51 个)。采用一般统计方法和方差分析揭示不同时期表层土壤全磷含量的统计特征及不同时期不同农地利用方式和不同母质类型间表层土壤全磷含量的差异。试验数据用 Excel 2019 整理, 方差分析在 IBM Statistics SPSS 25 统计软件中进行, 利用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 研究区农地表层土壤全磷含量总体变化特征

统计结果表明, 近 40 年来研究区表层土壤全磷含量发生显著改变 (表 1)。1980s 表层土壤全磷含量的平均值为 0.48 g kg^{-1} , 2016~2017 年大幅上升至 0.95 g kg^{-1} ; 与 1980s 相比, 全磷含量增加了 0.47 g kg^{-1} , 增幅高达 97.92% ($P < 0.01$)。从变异系数来看, 1980s 至 2016~2017 年研究区表层土壤全磷含量的变异系数从 45.83% 下降到 34.74%, 下降了 11.09%。这表明, 近 40 年来研究区农地表层土壤全磷累积明显, 空间异质性有所降低, 全磷含量变化呈现均一化趋势。

表 1 两个时期研究区表层土壤全磷含量数据统计特征

Table 1 Statistical characteristics of total phosphorus contents in topsoil in the studied area in two periods

年份 Year	样本数 Number	极大值 (g kg^{-1}) Maximum value	极小值 (g kg^{-1}) Minimum value	均值 (g kg^{-1}) Mean	变异系数 (%) Variation coefficient	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
1980s	160	1.16	0.06	$0.48 \pm 0.22 \text{ b}$	45.83	0.55	-0.22
2016—2017年	175	2.37	0.20	$0.95 \pm 0.33 \text{ a}$	34.74	0.98	2.08

注: 不同小写字母 (a, b) 代表不同年份土壤全磷含量差异显著。显著性水平为 $P < 0.05$ 。

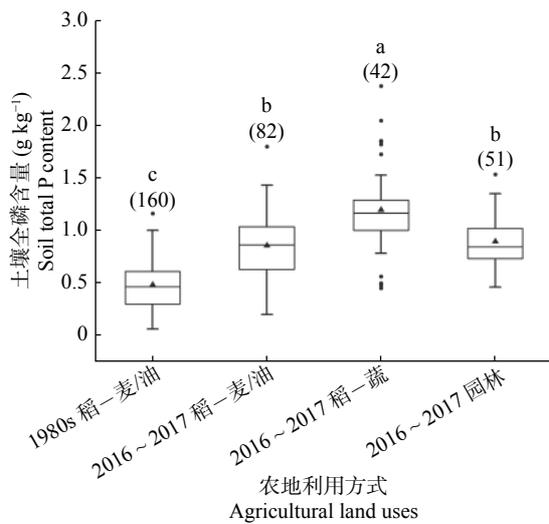
2.2 不同农地利用方式下表层土壤全磷含量变化特征

方差分析结果表明 (图 2), 近 40 年来不同农地利用方式下表层土壤全磷含量均显著增加 ($P < 0.01$), 但增幅差异明显。与 1980s 传统稻—麦/油轮作地相比, 2016~2017 年稻—蔬轮作地表层土壤全磷含量增加到 1.20 g kg^{-1} , 增幅为 150% ($P < 0.01$); 园林地表层土壤全磷含量增加至 0.89 g kg^{-1} , 增幅为 85.42% ($P < 0.01$); 稻—麦/油轮作地表层土壤全磷含量增加至 0.86 g kg^{-1} , 增幅为 79.17% ($P < 0.01$)。2016~2017 年稻—蔬轮作地表层土壤全磷含量显著高于另 2 种用地方式, 园林地表层土壤全磷含量略高于稻—麦/油轮作地, 但不显著。这可以得出, 农地利用方式转变对表层土壤全磷累积量产生了明显

的影响, 传统稻—麦/油轮作地转变为稻—蔬轮作地和园林地均增加了表层土壤全磷累积量, 但在园林地上不明显。

2.3 不同母质类型下表层土壤全磷含量变化特征

母质类型对研究区内表层土壤全磷含量变化有显著的影响 ($P < 0.01$), 不同母质发育的土壤全磷含量增幅差异明显 (图 3)。更新统老冲积物发育的土壤全磷含量变化幅度最大, 与 1980s 相比, 2016~2017 年全磷含量由 0.34 g kg^{-1} 大幅上升至 0.84 g kg^{-1} , 增幅为 147.06% ($P < 0.01$); 其次是灰棕冲积物发育的土壤, 全磷含量由 0.45 g kg^{-1} 增加至 0.97 g kg^{-1} , 增幅为 115.56% ($P < 0.01$); 增加幅度最小的是灰色冲积物发育的土壤, 全磷含量由



注:实心圆圈“●”为离群值,中间实线代表中位数,“▲”代表平均值;上下两条线分别代表75%和25%的置信区间;上下两个短线分别代表97.5%和2.5%的置信区间。小写字母(a, b, c)代表不同农地利用方式下土壤全磷含量差异显著($P < 0.01$)。括号内数字表示样本数。

图2 两个时期不同农地利用方式表层土壤全磷含量

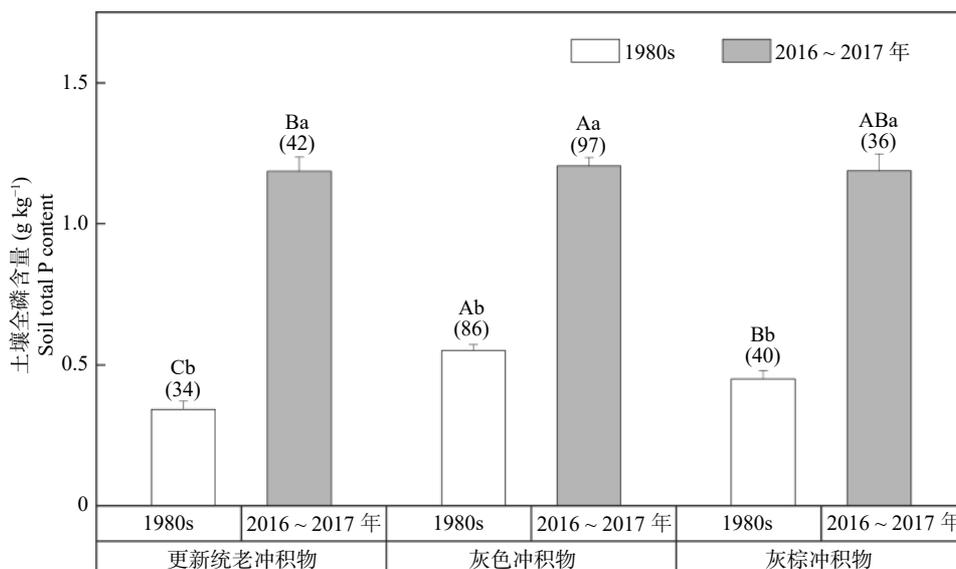
Fig.2 Total phosphorus contents of topsoil in different agricultural land uses in two periods

0.55 g kg⁻¹ 增加至 1.00 g kg⁻¹, 增幅为 81.82% ($P < 0.01$)。这表明,表层土壤全磷累积要受到成土母质因素的影响。

2.4 不同母质类型各农地利用方式表层土壤全磷含量变化特征

各农地利用方式下表层土壤全磷含量变化幅度在不同成土母质发育的土壤上存在差异(图4)。3

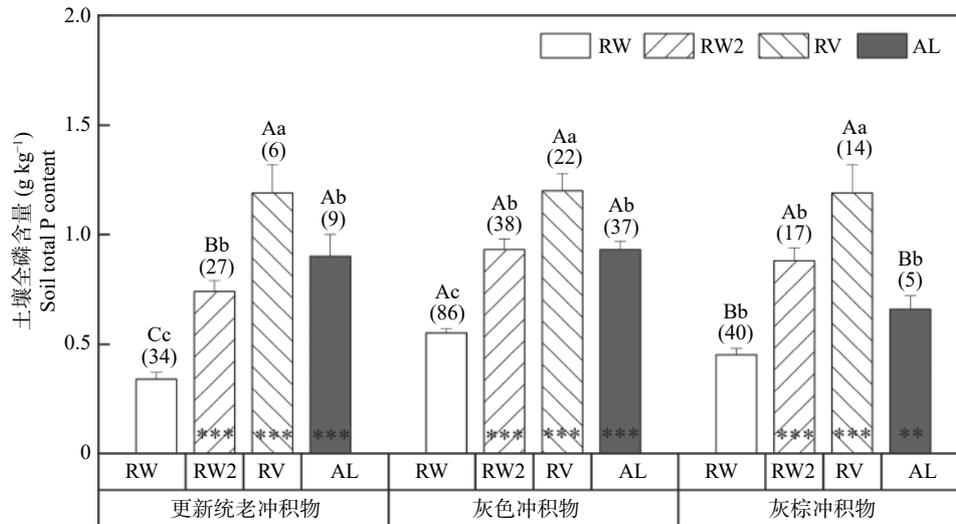
种用地方式中,表层土壤全磷含量最高增加幅度均发生于更新统老冲积物发育的土壤上。更新统老冲积物发育的土壤上,1980s传统稻-麦/油轮作地表层土壤全磷含量为 0.34 g kg⁻¹, 2016~2017年稻-麦/油轮作地、稻-蔬轮作地和园林地表层土壤全磷含量分别增加至 0.74 g kg⁻¹、1.19 g kg⁻¹ 和 0.90 g kg⁻¹, 增幅相应为 117.65%、250.00% 和 164.71% ($P < 0.01$)。灰色冲积物发育的土壤上,2016~2017年稻-麦/油轮作地、稻-蔬轮作地和园林地表层土壤全磷含量由 1980s 的 0.55 g kg⁻¹ 增加到 0.93 g kg⁻¹、1.20 g kg⁻¹ 和 0.93 g kg⁻¹, 分别增加了 69.09%、118.18% 和 69.09% ($P < 0.01$)。灰棕冲积物发育的土壤上,2016~2017年稻-麦/油轮作地、稻-蔬轮作地和园林地表层土壤全磷含量由 0.45 g kg⁻¹ 上升至 0.88 g kg⁻¹、1.19 g kg⁻¹ 和 0.66 g kg⁻¹, 增幅分别为 95.56% ($P < 0.01$)、164.44% ($P < 0.01$) 和 46.67% ($P < 0.05$)。与传统稻-麦/油轮作相比,稻-蔬轮作对更新统老冲积物、灰色冲积物和灰棕冲积物发育土壤的全磷累积量分别增加了 1.12 倍、0.71 倍和 0.72 倍;而园林地只增加了更新统老冲积物发育土壤的全磷累积量(增加了 47.06%),大幅降低了灰棕冲积物发育土壤的全磷累积量(1.05 倍),对灰色冲积物发育土壤则没有影响。这说明,农地利用方式转换对表层土壤全磷含量变化的影响受控于土壤成土母质。



注:图中不同大写字母(A, B, C)代表同一年份不同母质间土壤全磷含量差异显著($P < 0.05$);不同小写字母(a, b)代表同一母质不同年份间土壤全磷含量差异显著($P < 0.01$)。括号内数字表示样本数。

图3 两个时期不同母质类型表层土壤全磷含量

Fig.3 Fig. 3 Total phosphorus contents of topsoil in different parent material types in two periods



注: RW、RW2、RV 及 AL 分别代表 1980s 稻-麦/油轮作地、2016~2017 年稻-麦/油轮作地、2016~2017 年稻-蔬轮作地及 2016~2017 年园林地。图中不同大写字母 (A, B, C) 代表同一农地利用方式不同母质类型的土壤全磷含量差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母 (a, b, c) 代表同一母质类型不同农地利用方式的土壤全磷含量差异显著 ($P < 0.05$)。* 代表同一母质间 2016~2017 年不同农地利用方式土壤全磷含量与 1980s 土壤全磷含量差异显著性; **、*** 分别代表差异显著性 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 。括号内数字表示样本数。

图 4 不同母质和农地利用方式表层土壤全磷含量

Fig.4 Total phosphorus contents of topsoil in different parent materials and agricultural land uses

3 讨论

3.1 研究区表层土壤全磷含量变化的影响因素

近 40 年来成都平原地区农地表层土壤全磷含量显著增加, 增幅高达 97.92%。已有研究表明, 1980s 以来中国农地土壤全磷盈余量逐年增加^[20-22], 本研究区表层土壤全磷变化与全国趋势一致。研究区表层土壤全磷含量显著增加主要与施肥量、大气磷沉降、土壤有机碳含量和土壤酸化等因素有关。首先, 长期高频率、过量的磷肥投入是研究区农地表层土壤全磷含量显著增加的主要原因^[8,20-22]。成都平原地区快速的城镇化和人口增长导致农产品需求量不断增加, 使得农业生产活动中磷肥投入量大幅提高。根据《四川农业统计年鉴(1980~2015)》的统计数据, 1980 年至 2015 年成都市耕地磷肥投入量由 86.97 kg hm⁻² 增加至 101.05 kg hm⁻²。由于磷素在土壤中移动性较弱, 易固定, 磷肥当季利用率仅 10%~25%^[7], 长期过量投入磷肥使研究区农地表层土壤全磷积累明显。其次, 人类活动导致的大气磷沉降是区域土壤全磷积累的又一重要来源, 磷沉降水平提高可促使土壤全磷含量增加^[35-36]。成都平原地区人口密集, 人类活动强度大, 高强度的人类活动导致大气中磷浓度增加, 使得该地区大气磷沉降水平逐年递增^[37]。在区域干湿沉降作用下, 大气中的磷进入土壤, 为表层土壤中全磷的累积起到了一定的促进作

用。再次, 土壤全磷含量与有机碳含量呈正相关关系^[38-40]。已有研究证实 1980s 至 2010s 成都平原地区表层 (0~20 cm) 土壤有机碳含量持续增长^[32]。伴随着土壤有机碳含量增加, 全磷在表层土壤中累积。此外, 土壤酸碱度可通过直接影响土壤中 CaCO₃ 和活性铁铝的含量影响土壤对磷素的吸附能力^[29]。通常情况下土壤酸化后对磷酸根的吸附能力增强^[41-42]。研究发现, 1980s 至 2010s 成都平原地区农地表层 (0~20 cm) 土壤发生显著酸化^[19], 增强了表层土壤对外源输入磷的吸附。在上述因素的共同驱动下, 成都平原地区农地表层土壤全磷含量显著增加。

3.2 农地利用方式转变对表层土壤全磷累积的影响

与传统稻-麦/油轮作方式相比, 稻-蔬轮作大幅增加了表层土壤全磷累积量, 且累积量高于园林地, 与此前多数研究结果一致^[17,25,43]。这表明农地利用方式转变改变了研究区表层土壤全磷累积规律。造成这一结果的主要原因是, 蔬菜生育期短一年内可多次种植且收益高, 磷又是品质元素, 在经济效益的驱动下农户对稻-蔬轮作地的利用强度和磷肥投入量远高于其他用地类型^[30]。此外, 高强度的氮肥施用量加剧了稻-蔬轮作地土壤酸化程度^[19], 这使得稻-蔬轮作地土壤对磷素的吸附能力更强, 从而累积更多的磷。而研究区园林地大多在 2005 年以后由传统稻-麦/油轮作地转变而来^[30]。转变为园林地后,

土壤酸化程度较传统稻—麦/油轮作地更明显^[19]。转变前的磷累积、大气沉降以及土壤酸化增强磷素的吸附使得园林地表层土壤全磷含量较 1980s 传统稻—麦/油轮作有明显增加。相较于传统稻—麦/油轮作, 转变后的园林地几乎无外源肥料投入^[30], 表层土壤中增加的全磷主要来源于用地类型转变前投入的磷肥以及大气沉降的磷。值得注意的是, 土壤在淹水厌氧条件下 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 部分被吸持的磷素得以释放^[44-45], 转变后的园林地土体不再有水稻季的淹水状态, 使得园林地土壤释磷能力弱于传统稻—麦/油轮作; 但园林树木根系生长又会在一定程度上提高土体通透性^[31], 增加了土壤中磷素的淋失, 这些因素最终使园林地表层土壤全磷较 1980s 稻—麦/油轮作地呈增加趋势, 但累积量与传统稻—麦/油轮作地并无差异。

成土母质可通过影响土壤质地和游离氧化铁含量调控土壤对磷素的吸附能力。土壤质地越黏重, 对磷素的吸附能力越强^[14,28]。同时, 铁氧化物比表面积较大, 易与磷素结合形成稳定的络合物, 土壤中游离氧化铁含量越高, 对磷素的吸附固定能力越强^[46-47]。更新统老冲积物发育的土壤质地黏重、容重高^[32], 且游离氧化铁含量高于灰棕冲积物和灰色冲积物发育的土壤^[33], 对磷素的吸附固定能力较强, 因此全磷含量增幅最高。灰棕冲积物发育的土壤较灰色冲积物有更高的游离氧化铁含量^[33], 因此全磷累积量高于灰色冲积物发育的土壤。不同母质类型发育的土壤磷吸附能力的差异造成了农地利用方式转变对表层土壤全磷累积的影响与母质类型有关, 传统稻—麦/油轮作地转变为稻—蔬轮作地后, 更新统老冲积物发育的土壤全磷累积量远高于另两种母质发育的土壤。同时, 更新统老冲积物发育的土壤其较高的黏粒含量和铁含量对磷素较强的吸附固定能力也在一定程度上抵消了园林地对土壤全磷累积的不利影响, 使得该类型母质上园林地表层土壤全磷累积量仍有明显增加。综上, 农田磷肥的精准管理和面源污染的精准防控既要依据不同农地利用方式下植物的需求, 同时也要考虑母质因素的影响。

4 结论

近 40 年来成都平原地区农地表层土壤全磷累积明显, 全磷含量增加了 97.92%。农地利用方式转变对表层土壤全磷累积产生了明显的影响; 与传统

稻—麦/油轮作相比, 稻—蔬轮作大幅增加了表层土壤全磷累积量, 在园林地上不明显。不同农地利用方式转换类型下表层土壤全磷累积量同时还受到成土母质的影响。与传统稻—麦/油轮作相比, 稻—蔬轮作对更新统老冲积物发育土壤的全磷累积量增幅远大于灰色冲积物和灰棕冲积物发育土壤; 而园林地只增加了更新统老冲积物发育土壤的全磷累积量, 大幅降低了灰棕冲积物发育土壤的全磷累积量, 对灰色冲积物发育土壤的全磷累积量则没有明显的改变。

参考文献:

- [1] Liu Y, Jiang M, Lu X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in Northeast China[J]. *Wetlands*, 2017, 37(1): 153 – 161.
- [2] Zhang L, Zhuang T, Bai J H, et al. Dynamics of phosphorus fractions and potential bioavailability along soil profiles from seasonal-flooding wetlands in a Chinese estuary[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 28(6): 6549 – 6560.
- [3] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. Spatial distribution of soil total phosphorus in Yingwugou watershed of the Dan River, China[J]. *Catena*, 2016, 136: 175 – 181.
- [4] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2019, 150(1): 141 – 149.
- [5] Gao X S, Xiao Y, Deng L J, et al. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 279 – 289.
- [6] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Ecology. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(5719): 1014 – 1015.
- [7] 都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 476 – 486.
- [8] Xi B, Zhai L M, Liu J, et al. Long-term phosphorus accumulation and agronomic and environmental critical phosphorus levels in haplic luvisol soil, northern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(1): 200 – 208.
- [9] Huang L D, Wang H Y, Li Y X, et al. Spatial distribution and risk assessment of phosphorus loss potential in urban-suburban soil of Lishui, China[J]. *Catena*, 2013, 100: 42 – 49.
- [10] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. Chinese agriculture: An experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 33 – 35.
- [11] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045 – 4050.
- [12] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响

- 因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 945 - 952.
- [13] Cross A F, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, 64(3): 197 - 214.
- [14] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于GIS和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异——以周口为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1211 - 1220.
- [15] 孔祥斌, 张风荣, 齐 伟, 等. 集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响——以河北省曲周县为例[J]. *地理学报*, 2003, 58(3): 333 - 342.
- [16] Kong X B, Zhang F R, Wei Q, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88(1-2): 85 - 94.
- [17] 张 健, 陈 凤, 濮俊杰, 等. 区域土地利用变化对土壤磷含量的影响评价研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(3): 1018 - 1023.
- [18] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农田生态系统不同土地利用方式与管理措施对土壤质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 303 - 309.
- [19] Li Q Q, Li A W, Yu X L, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698, 2020, 698: 134320.
- [20] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207 - 4299.
- [21] Ma J, Liu Y, He W, et al. The long-term soil phosphorus balance across Chinese arable land[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(3): 306 - 315.
- [22] Wang X L, Feng A P, Wang Q, et al. Spatial variability of the nutrient balance and related NPSP risk analysis for agroecosystems in China in 2010[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2014, 19(3): 42 - 52.
- [23] 张微微, 周怀平, 黄绍敏, 等. 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 263 - 274.
- [24] Sattari S Z, Bouwman A F, Giller K E, et al. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 6348 - 6353.
- [25] 李 珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原西部土壤全磷的剖面分布及主控因素[J]. *资源科学*, 2018, 40(7): 1397 - 1406.
- [26] Koopman A M, Jongejans J, Sevink J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain[J]. *Catena*, 2005, 59(1): 55 - 68.
- [27] 肖华翠, 李靖雯, 夏 允, 等. 中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 16 - 22.
- [28] 吕珊兰, 杨熙仁, 康新茸. 土壤对磷的吸附与解吸及需磷量探讨[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(3): 29 - 35.
- [29] 王 彦, 张进忠, 王振华, 等. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 158 - 164.
- [30] Luo Y L, Li Q Q, Shen J, et al. Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(15): 1875 - 1885.
- [31] Li Q Q, Luo Y L, Wang C Q, et al. Spatiotemporal variations and factors affecting soil nitrogen in the purple hilly area of Southwest China during the 1980s and the 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 173 - 181.
- [32] Li Q Q, Li A W, Dai T F, et al. Depth-dependent soil organic carbon dynamics of croplands across the Chengdu Plain of China from the 1980s to the 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 4134 - 4136.
- [33] 成都市土壤普查成果资料编辑委员会. 成都土壤[M]. 成都: 成都市农牧局, 1993.
- [34] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [35] Wang R, Balkanski Y, Boucher O, et al. Significant contribution of combustion-related emissions to the atmospheric phosphorus budget[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(1): 48 - 54.
- [36] Du E Z, Wim D V, Han W X, et al. Imbalanced phosphorus and nitrogen deposition in China's forests[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(13): 8571 - 8579.
- [37] 邓欧平, 张春龙, 唐 锐, 等. 气象因素对成都平原夏季大气氮、磷连续性沉降的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(2): 223-232.
- [38] 刘志祥, 江长胜, 祝 滔. 缙云山不同土地利用方式对土壤全磷和有效磷的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(3): 140 - 145.
- [39] Debicka, Kocowicz, Weber, et al. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(6): 840 - 855.
- [40] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对桂西北喀斯特生态系统土壤有机碳、氮、磷和微生物量剖面分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 164 - 169.
- [41] 王 波, 李 琴, 朱 炜, 等. 毛竹林覆盖经营对土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的影响[J]. *林业科学*, 2019, 55(1): 110 - 118.
- [42] Eimers M C, Watmough S A, Paterson A M, et al. Long-term declines in phosphorus export from forested catchments in south-central Ontario[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2009, 66(10): 1682 - 1692.
- [43] 陈志超, 杨小林, 刘昌华. 万安流域不同土地利用类型土壤全磷时空分异特征[J]. *土壤通报*, 2014, 45(4): 857 - 862.
- [44] 于晓莉, 傅友强, 甘海华, 等. 干湿交替对作物根际特征及铁膜形成的影响研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 225 - 234.
- [45] 田 娟, 刘 凌, 董贵明, 等. 淹水土壤磷释放机理研究进展[J]. *土壤通报*, 2008, 39(2): 426 - 430.
- [46] Filippelli G M. The global phosphorus cycle: Past; present; and future[J]. *Elements*, 2008, 4(2): 89-95.
- [47] 雷 梅, 常庆瑞, 冯立孝, 等. 太白山土壤特性及氧化铁发生学特征[J]. *地理研究*, 2001, 20(1): 83 - 90.

Changes of Total Phosphorus in Topsoil and the Correlations with Agricultural Land-Use Change Across the Chengdu Plain During the Past 40 Years

LI Cheng-ji, ZHANG Yuan-yuan, FANG Hong-yan, DENG Qian, RAN Min, SONG Liang-ying,
LI Ai-wen, ZHANG Lu-xin, WANG Chang-quan, LI Qi-quan
(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: [Objective] Understanding the dynamics of soil total phosphorus (TP) in agricultural land and its influencing factors is helpful to formulate rational management measures of field phosphorus fertilizer and scientifically prevent and control non-point source pollution. [Method] Based on 160 soil samples obtained during the period of the Second Soil Survey and 175 soil samples collected in 2016 ~ 2017, this study used general statistics and variance analysis to investigate the TP dynamics in the topsoil (0-20 cm) of the agricultural land across the Chengdu Plain in the past 40 years and the correlations with agricultural land-use change and parent materials. [Result] The results showed that TP contents in the surface soil significantly increased from 0.48 g kg⁻¹ to 0.95 g kg⁻¹, with an increase of 97.92%. Compared with the traditional rice-wheat/rapeseed rotation land in the 1980s, TP contents in rice-wheat/rapeseed rotation land, rice-vegetable rotation land and afforested land increased by 79.17%, 150.00% and 85.42% in 2016 ~ 2017, respectively. The increase of TP contents of soils formed from Q3 (Quaternary Pleistocene) old alluvium was the highest (147.06%), followed by Q4 (Quaternary Holocene) grey-brown alluvium (115.56%) and Q4 grey alluvium (81.82%). Compared with the traditional rice-wheat/rapeseed rotations, soils formed from Q3 old alluvium (132.35%) showed a much higher increase of TP accumulation than those of soils formed from Q4 grey-brown alluvium (115.56%) and Q4 grey alluvium (81.82%) for rice-vegetable rotations; whereas, afforestation only led to the increase of TP accumulation in soils formed from Q3 old alluvium, decreased TP content in soils formed from Q4 grey-brown alluvium, and caused unobvious change of TP contents in soils formed from Q4 grey alluvium. [Conclusion] The results indicated that the change of agricultural land use had altered the characteristics of soil phosphorus accumulation, but it's effect on topsoil TP accumulation depended on the type of parent material.

Key words: Total phosphorus; Agricultural land-use change; Parent material types; Chengdu Plain

[责任编辑: 韩春兰]