

秦岭北麓两种土地利用下土壤磷素淋溶风险预测

张瑞龙^{1,2}, 吕家珑^{1,2*}, 刁展^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 鉴于猕猴桃、小麦-玉米轮作两种土地利用的施肥差异和磷素的环境风险, 研究秦岭北麓两种利用方式下壤土磷素的淋溶风险与差异。测定两种利用耕层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)土壤 Olsen-P、CaCl₂-P 含量, 用耕层土壤 Olsen-P、CaCl₂-P 作图预测磷素淋溶“突变点”, 分析两种利用方式土壤剖面 CaCl₂-P 与 Olsen-P 含量的变化趋势和 CaCl₂-P 的变化特征。得出猕猴桃园土壤磷素肥力较好, 42.63%的果园土壤 Olsen-P 含量充足, 达到丰产优质需求(60.90~79.60 mg·kg⁻¹), 96.43%的农田土壤 Olsen-P 含量低于大田作物高产适宜含量(20 mg·kg⁻¹), 平均值处于四级肥力水平。猕猴桃园磷素淋溶“突变点”对应的 Olsen-P 含量为 40.11 mg·kg⁻¹, 有 62.79%的果园土壤会发生磷素淋溶, 淋溶风险较大; 农田土壤磷素累积少, 没有明显的淋溶“突变点”, 但多年的耕作使其也有微弱的淋溶发生。两种利用下土壤磷素的淋溶深度为 40 cm, 需要采取一些措施解决优质丰产与磷素环境风险的矛盾。

关键词: 土壤磷素; 磷素淋溶; 淋溶突变点; 土地利用

中图分类号: S158 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)01-0121-07 doi:10.11654/jaes.2014.01.015

Prediction of Soil Phosphorus Leaching Risk Under Two Types of Land Use in Northern Area of Qinling Mountains

ZHANG Rui-long^{1,2}, LÜ Jia-long^{1,2*}, DIAO Zhan^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil phosphorus(P) leaching has been considered to be a critical cause of water eutrophication. Phosphorus leaching risks in Lou soil under two kinds of land use, kiwi-fruit orchard and arable land, in the northern area of Qiling Mountains were studied. The samples included surface layer(0~20 cm) samples of 43 kiwi orchard and 28 arable land and three profile(0~100 cm) samples of two types of land use. In general, soil phosphorus contents were higher in kiwi orchard than in arable land, with 42.63% of the kiwi orchard containing sufficient Olsen-P but 96.43% of the arable land being P deficient. In kiwi orchard soils, the change-point of phosphorus leaching was 40.11 mg·kg⁻¹ for Olsen-P, and 62.79% of the orchard had potential phosphorus leaching. However, there was not obvious change-point for arable land, implying weak phosphorus leaching under decades of cultivation. The phosphorus leaching could be detected as deep as 40 cm under two kinds of land use. Some measures should be taken to improve crop yield and quality and to reduce environmental risks.

Keywords: soil P; P leaching; leaching change-point; land use

关于磷素流失的研究始于水体富营养化的出现, 现在广泛认为农田土壤磷素流失是水体富营养化磷的主要来源^[1], 据报道水体中磷浓度达到 0.02 mg·L⁻¹ 就会导致富营养化^[2-5]。据 Heckrath 等^[2]报道, 英国自然水体中约 35%的磷来自农业, 德国该比例为 38%,

丹麦为 70%, 联合国粮农组织估计中国农田土壤磷素进入水体的量为 19.5 kg·hm⁻²·a^[6]。磷肥施入土壤后, 其中的水溶性磷与土壤发生剧烈吸附、固持, 使磷肥当季利用率较低, 一般为 10%~25%^[7], 加上后季利用也不超过 25%, 占施磷总量 75%~90%的磷余留在土壤中^[8], 过量盈余导致磷在土壤耕层累积, 影响磷素存在形态, 带来环境风险。Sharpley 等^[11]认为农田土壤磷素进入水体主要有地表径流和地下径流两条途径, 也有人持磷在土壤中不容易移动^[9-10], 壤中流很难发生的观点。近年来国内外相关研究认为, 土壤磷素的垂直

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目子课题(2012BAD15B04)

作者简介: 张瑞龙(1987—), 男, 陕西延长人, 硕士研究生, 主要从事土壤磷素面源污染研究。E-mail: studysoil@sina.cn

* 通信作者: 吕家珑 E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

迁移(淋洗)也应引起人们的重视^[1-3,10,12-14],含磷量超过土壤吸附饱和点时会发生磷素淋洗,过量磷肥投入和不合理的灌溉方式,又增大了磷素的淋失风险^[10,15-16]。磷素淋洗一般以接近土壤溶液离子强度的 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提的磷为测定指标^[17-18],当土壤 Olsen-P 超过某一临界值, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 会迅速增加^[19-22], $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 的相关“突变点”可作为土壤磷淋失风险预测的临界值^[3,19,23-26]。吕家珑等^[27]用上述方法预测洛桑试验站 Broadbalk 试验地磷素淋溶“突变点”的 Olsen-P 含量与 Heckrath 等^[26]的结果一致,证明该预测方法可靠性较高。

秦岭北麓周至县是我国猕猴桃的重要产地,产业发展已具规模,2012 年底,猕猴桃种植面积为 $37.1 \text{ 万} \text{ hm}^2$,年产鲜果 $35 \text{ 万} \text{ t}$;计划 2013 年种植面积达到 $40 \text{ 万} \text{ hm}^2$,总产量达到 $36 \text{ 万} \text{ t}$ ^[28]。猕猴桃的增收效应不仅使其种植面积扩大,肥料投入也不断增加。目前农户对肥料的使用只重投入,很少关注肥料的利用、损失和由此带来的环境问题。调查显示,周至县竹峪乡猕猴桃园施用的有机肥料以畜禽粪为主,部分施用油渣、菌肥等;化肥施用包括单施氮、磷、钾肥和复合肥。畜禽粪等有机肥的大量施用,不仅使土壤磷素大量积累,而且有机肥能降低土壤对磷的吸附力,其中的阴离子与磷素竞争吸附位点,使磷素解析,增加淋溶风险^[30-32]。产粮农田施肥相对很少,以化肥为主,有研究表明秦岭北麓农田土壤磷素平衡率已高于氮素^[29]。磷素平均淋失量较低,一般为 $0.04 \sim 0.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不足施磷量的 1% ^[33],虽然从农业观点看损失 1 个百分点的磷并不重要,但磷素环境临界值低,超过临界值会引起严重的环境问题。本研究以周至县竹峪乡猕猴桃果园和产粮农田土壤为研究对象,分析两种利用方式土壤磷素淋溶的临界值与淋溶风险,及剖面土壤磷素的含量变化与淋溶状况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

周至县竹峪乡地处秦岭浅山区,南依秦岭,北濒

渭水,地理坐标为 $\text{N}33^\circ 42' \sim 34^\circ 14'$, $\text{E}107^\circ 39' \sim 108^\circ 37'$,属温带大陆性季风气候,年平均气温 13.2°C ,年降雨量 674.3 mm ,主要集中在 7、8、9 三个月。区内塄坎沟壑相间,有“九口十八峪”之称,整个地貌呈漏斗状,余家河作为干流贯穿其中,为减少水土流失,90%以上的耕地进行了坡改梯工程。土壤类型为壤土,质地以粉壤为主,有机质、pH 值、机械组成等基本理化性质见表 1。

研究区内猕猴桃园树龄最长为 20 年,最短为 1 年,大部分果园正常挂果。有机肥一般作基肥在 2、3 两月施用,以鸡粪、猪粪等畜禽粪为主,少量果园施用菌肥和油渣,猪粪平均施用量为 $2800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,鸡粪为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,油渣为 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;化肥分单施氮磷钾肥和复合肥两种方式,一般在 2、3 两月作基肥施用,部分 7、8 月追施一次,个别果园针对树体状况有微肥施用。施肥量换算成纯 N/P 为 $2:1 \sim 1.5:1$,而丰产优质猕猴桃园碱解氮与有效磷的比值为 $2.25 \sim 2.33$ ^[34],可见区内猕猴桃园土壤磷素已有明显盈余。农田耕种有几十年之久,经济效益的影响使其耕种面积逐年减少,施肥量也少,以含氮、磷为主的化肥施用较多,分基肥和追肥两种施用方式,不施有机肥,氮肥平均用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥平均用量为 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,追肥施用量少于基肥,换算成纯 N/P 为 $3:1 \sim 2:1$ 。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 土样采集与处理

2012 年 11 月上旬(距最近一次施肥两个月)采集研究区内 43 个猕猴桃园和 28 块农田 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤,按照“S”形路线每块地取 5 个点混合为一个土样,各采样点距树干 110 cm 左右。测定其 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量,作图预测两种利用方式下土壤磷素的淋溶“突变点”;分别选择猕猴桃园和农田 3 个肥力等级的土壤,用土钻按 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 的间距取剖面上 6 个不同深度的土壤,4 点混合为一个土样。测定其 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量,分析两种利用方式剖面土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量的相关性、变化规律及淋溶状况。从所采土样

表 1 两种利用方式土壤基本理化性质

Table 1 Soil chemical and physical properties under two types of land use

项目	有机质 SOM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Olsen-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值	<0.002 mm/%	0.002~0.05 mm/%	0.05~2 mm/%
猕猴桃园 Kiwi orchard	17.23	1.19	60.35	359.59	7.63	5.37	90.39	4.24
农田 Arable land	10.34	0.66	6.00	111.52	7.83	6.87	88.16	4.97

注:土壤质地分类采用美国制。

中捡去碎石块、根系等外来物,带回风干,过1 mm筛,保存备用。

1.2.2 测定方法

土壤有机质等养分含量采用常规方法测定^[35];pH值测定采用2.5:1的水土比测定;机械组成用吸管法测定;Olsen-P用1:20土液比,0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定;CaCl₂-P用1:5土液比,0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,钼锑抗比色法测定^[3,22,27]。

1.3 数据处理

试验数据采用SPSS 18.0进行相关性分析,用Excel 2003作图预测。

2 结果与讨论

2.1 土壤磷素淋溶“突变点”及淋溶风险预测

钙质土壤有Olsen-P与CaCl₂-P的突变拐点即磷素淋溶“突变点”,当Olsen-P含量小于突变点时,磷素淋失风险低;反之,CaCl₂-P随Olsen-P含量增加显著增加,淋失风险较高^[22]。以Olsen-P含量为横坐标,CaCl₂-P含量为纵坐标作图,以二者的突变拐点为预测土壤磷素淋失的临界值(图1)。

预测结果表明,研究区内猕猴桃园土壤磷素淋溶

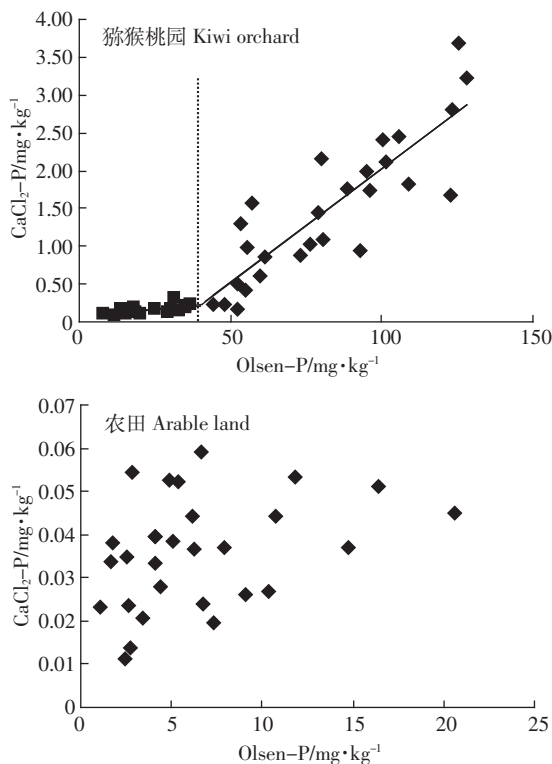


图1 两种利用方式土壤的磷素淋溶突变点

Figure 1 The change-point of soil P leaching under two types of land use

“突变点”Olsen-P含量为40.11 mg·kg⁻¹,对应CaCl₂-P含量为0.22 mg·kg⁻¹,农田土壤没有表现出明显的“突变点”。其他同类研究结果分别为:北京平谷区砂壤、轻壤、重壤磷素淋溶“突变点”Olsen-P含量依次为23.1、40.1、51.5 mg·kg⁻¹^[22],山东寿光设施蔬菜种植区为80.7 mg·kg⁻¹^[10],石家庄等地农田为55.6~63.9 mg·kg⁻¹^[36],西北农林科技大学试验农场为23 mg·kg⁻¹^[37],长沙郊区蔬菜种植地为78.33 mg·kg⁻¹^[38],杭州郊区菜地为76.19 mg·kg⁻¹^[39],苏南菜地为55 mg·kg⁻¹^[40],无锡安镇爽水型水稻土和常熟囊水型水稻土依次为32、26 mg·kg⁻¹^[41]。本研究结果与北京平谷区轻壤的结果相同。磷素淋溶“突变点”受土壤类型、质地、降雨等的影响,不同地区的结果不同,主要是因为土壤是一个复杂体系,不同地区土壤的理化性质、雨热条件差异很大,特别是粘粒含量和对磷素吸附、固定能力的差异。磷素进入土壤后变化过程不同,有效性、稳定性也不同;长期耕种、施肥,使土壤性质发生变化,最终使土壤的淋溶特性不同。

测定的43个猕猴桃园土样有27个Olsen-P含量大于突变临界值,占样本总数的62.79%,即研究区内3/5以上的猕猴桃园土壤会发生磷素淋溶;农田土壤没有表现出明显的“突变点”,主要因为粮食作物产量少、价格低,经济效益远低于猕猴桃,肥料投入远小于猕猴桃,Olsen-P累积量少,没有达到土壤吸附磷素的饱和点。猕猴桃园耕层Olsen-P平均含量是农田的10倍(表1),灌溉条件和灌溉量猕猴桃园也比农田有很大优势,水分运动相对强烈,淋溶作用产生的动力条件好。因此,猕猴桃园耕层土壤磷素淋溶风险较大,农田耕层Olsen-P含量最高为20.62 mg·kg⁻¹,为猕猴桃园磷素淋溶“突变点”Olsen-P含量的1/2,按照这样的耕作方式磷素淋溶风险很小。

2.2 土壤磷素水平分析

李百云等^[34]选择管理水平较好,连续3年667 m²产量保持在2300~2500 kg,优质果率保持在90%以上的5个果园,测定其土壤速效氮磷钾含量,作为猕猴桃优质丰产养分需要参照标准,得出这些果园土壤Olsen-P含量为60.90~79.60 mg·kg⁻¹,并按生产中表现优质、丰产、中等、较差的标准对猕猴桃园土壤磷素水平分级(表2)。第二次全国土壤普查将我国土壤磷素水平分为6个等级(表3)^[42],大田作物高产适宜的土壤Olsen-P含量为20 mg·kg⁻¹^[43]。

分析显示,研究区内猕猴桃园耕层土壤Olsen-P变化范围为7.84~128.04 mg·kg⁻¹,平均为60.35 mg·

表 2 猕猴桃园土壤磷素水平
Table 2 Soil P status in kiwi orchard

Olsen-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	>80 过剩 Excess	60~80 充足 Sufficient	40~60 不足 Moderately deficient	20~40 缺乏 Deficient	<20 严重缺乏 Serious deficient
样品数量 Sample numbers	14	4	9	9	7
百分比 Percentage	33.33%	9.3%	20.93%	20.93%	16.28%

表 3 农田土壤磷素水平
Table 3 Soil P status in arable land

Olsen-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	一级>40 First class	二级 20~40 Second class	三级 10~20 Third class	四级 5~10 Fourth class	五级 3~5 Fifth class	六级<3 Sixth class
样品数量 Sample numbers	0	1	5	9	6	7
百分比 Percentage	0	3.57%	17.86%	32.14%	21.43%	25%

kg^{-1} , 42.63% 的果园土壤 Olsen-P 含量达到优质丰产标准。个别果园磷素水平之所以低, 是因为建园时间晚, 树龄小, 需肥量少, 施肥量也少, 如最小值 $7.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是建园 3 年还未挂果的果园 Olsen-P 含量。农田耕层 Olsen-P 含量变化范围为 $1.09\sim 20.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $6.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 处于四级肥力水平(表 3), 28 个样品仅有 1 个达到高产磷素肥力要求, 96.43% 的农田磷素在三级肥力水平以下, 两种利用磷素肥力的差异主要是由施肥引起的。

2.3 剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 相关性分析

Heckrath 等^[26]认为耕层土壤水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$)与 Olsen-P 含量有很好的相关性。选择 Olsen-P 含量为 $90.78, 84.56, 62.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 3 个猕猴桃园和 Olsen-P 含量为 $20.62, 14.79, 10.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 3 块农田, 分析各地块剖面土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量的相关性。结果表明(图 2)猕猴桃园和农田各自的 3 个剖面上, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量均表现为高度正线性相关, 与 Heckrath 等对耕层二者关系的研究结论一致, 认为土壤剖面上 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量有很好的相关性。同时, 根据猕猴桃园 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 随 Olsen-P 含量增加先慢后快的幂函数变化趋势, 也可间接表明作图预测土壤磷素淋失临界值的可行性。

2.4 剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分析

以 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量为土壤磷素淋洗指标, 根据图 3 显示, 3 个猕猴桃园剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量都在 20 cm 处转折, 20 cm 以下 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量明显减少; 农田土壤剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的变化趋势不如前者明显, 总趋势为随土壤深度增加含量下降; 两种利用方式在 40 cm 以下 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量基本接近。猕猴桃园、农田 0~10 cm $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 3 点平均值分别为 $1.57, 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相差 30 倍, 10~20 cm 分别为 $0.17, 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相差 3 倍,

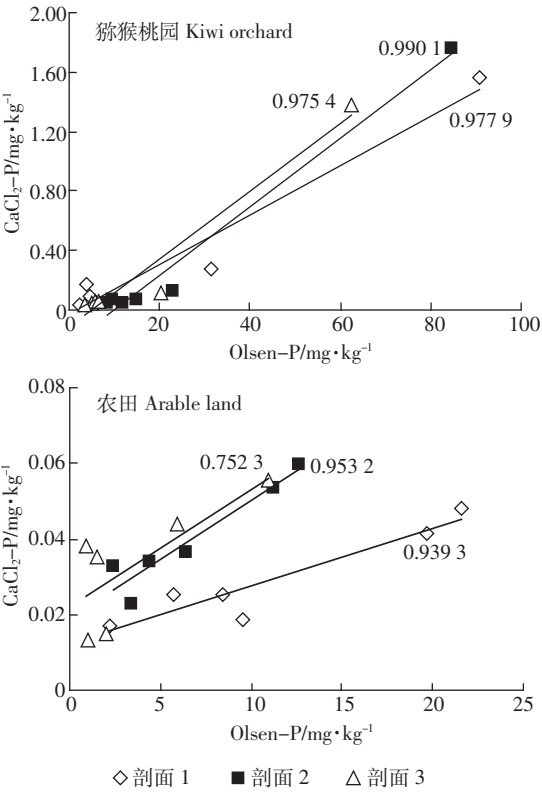
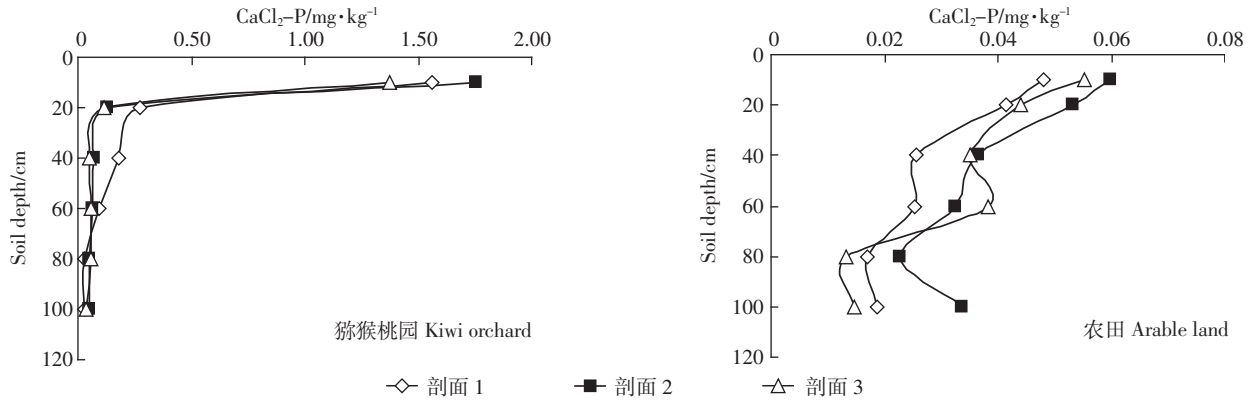


图 2 两种利用剖面土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 的相关性
Figure 2 Correlation between $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Olsen-P in soil profile under two types of land use

20~40 cm 分别为 $0.10, 0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相差 2.5 倍。说明由于猕猴桃园耕层 Olsen-P 含量高, 磷素淋溶较强, 耕层以下淋溶作用弱, 与刘建玲等^[7]、张经纬等^[10]的结论一致。猕猴桃园 Olsen-P 为 $90.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地块(剖面 1), $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量在 20 cm 处转折后, 其斜率小于另外两点, 40 cm 处含量($0.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)仍明显高于其他两点, 到 60 cm 深度处含量与其他两点相近, 说明猕猴桃园剖面 1 在 40 cm 处仍有磷素淋溶发生, 符合“长期大量施用磷肥不仅使 0~20 cm 耕层土壤磷素

图3 两种利用剖面土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量变化Figure 3 Changes of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in soil profile under two types of land use

大量积累,20~40 cm 土层磷素也有不同程度的增加”的结论^[30,44]。

农田土壤剖面 40 cm 以上部分, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量表现为随深度增加而减少的变化趋势。一次 107.7 mm 的降雨水分垂直移动距离为 60~70 cm, 土壤中易溶态磷在上下层浓度梯度作用下随水分运动而迁移^[45], 而且产粮农田可机械化耕作, 土壤经碾压后容重变大^[46], 在一定容重范围内, 磷素扩散系数随水分含量增加、容重增大而增加^[47]。因此, 尽管农田施肥量不高, Olsen-P 累积少, 但耕层土壤中未被利用的可溶性磷在降雨或灌溉时水分运动下, 也发生微弱的淋溶。Barbro 等^[48]也认为, 几十年低磷投入后土壤磷素也会发生淋溶。

3 结论与建议

(1) 土壤磷素损失已成为不争的事实, 研究区内猕猴桃园施肥量大, 耕层 Olsen-P 积累较多, 最高含量 $128.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是淋溶“突变点” $40.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 3 倍, 平均含量 $60.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是其 1.5 倍, Olsen-P 含量高, 易淋失的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量相应也高, 淋溶风险则会增大; 62.79% 的猕猴桃园耕层土壤 Olsen-P 含量大于淋溶临界值, 会发生磷素淋溶, 比例较大, 环境风险较高; 优质丰产猕猴桃园的最适 Olsen-P 含量为 $60.90\sim 79.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于该类土壤磷素淋溶临界值, 因此优质丰产与磷素环境风险之间产生矛盾, 要求磷肥施用必须合理。猕猴桃树年周期内各时期吸磷量有明显的季节性变化, 萌芽期需磷大部分从土壤吸收, 利用根、茎上年贮磷量占 21.11%, 果实是累积磷素的主要器官, 果实生长始期到果实迅速膨大末期吸磷为全年总吸磷量的 55.39%, 是磷素营养最大效率期, 从果实迅速膨大末期到落叶期, 各器官中

磷素向茎中转移^[49]。为最大程度地减少磷素流失, 在猕猴桃磷素营养最大效率期^[32-33], 萌芽期和果实生长始期集中施肥, 避开当地降雨集中期, 果实收获后施肥可使来年萌芽期树体需磷得到保证; 并且施肥后松土, 能降低表层土壤磷素吸附饱和度, 而减少磷素流失风险^[31]。

农田土壤由于施磷量少, 磷素累积少, 没有达到土壤吸磷的饱和点, 也没有表现出明显的淋溶“突变点”; 多年的施肥、机械化耕作, 耕层中未被利用的易溶态磷在水分运动下, 40 cm 以上部分也有微弱的磷素淋溶现象, 但淋失量很小, 0~10 cm 土层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量是猕猴桃园的 1/30, 10~20 cm 土层是猕猴桃园的 1/3, 20~40 cm 土层是猕猴桃园的 2/5, 淋溶风险很低。两种利用的剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量变化趋势说明, 研究区土壤磷素的淋溶深度为 40 cm。

(2) 研究区内猕猴桃园土壤磷素肥力较好, 42.63% 的果园 Olsen-P 含量充足, 达到优质丰产养分需求; 对 Olsen-P 含量不足的果园, 应根据生长时期和产量需求, 合理培肥, 避免盲目、经验施肥, 实现果园优质高产与环境保护双赢。农田土壤磷素肥力较差, 96.43% 的农田土壤 Olsen-P 含量低于大田作物高产适宜 Olsen-P 含量 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值处于四级肥力水平, 因此对农田土壤培肥还需适当加大磷肥比例, 以保证粮食产量与品质。

参考文献:

- [1] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 282-285.
ZHANG Ming-kui, WANG Li-ping. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 282-285.
- [2] 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.

- LÜ Jia-long. Phosphorus leaching from agricultural soils and prediction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2689-2701.
- [3] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Environ Quality*, 1995, 24:904-910.
- [4] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. *Environ Quality*, 2000, 29:130-144.
- [5] OECD. Eutrophication of water[R]. Monitoring Assessment and Control, 1982:156
- [6] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社, 1998:433-436.
- LU Ru-kun. Principle and methods of soil-plant nutrition science[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 1998:433-436.
- [7] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2):179-186.
- LIU Jian-ling, ZHANG Fu-suo, YANG Fen-he. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in Northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2):179-186.
- [8] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1):260-268.
- WANG Yong-zhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1):260-268.
- [9] 高超, 张桃林, 吴蔚东, 等. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3):344-348.
- GAO Chao, ZHANG Tao-lin, WU Wei-dong, et al. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(3):344-348.
- [10] 张经纬, 曹文超, 严正娟, 等. 种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):977-983.
- ZHANG Jing-wei, CAO Wen-chao, YAN Zheng-juan, et al. Effects of cropping years on the characteristics of phosphorus accumulation in soil profiles under greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):977-983.
- [11] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Phosphorus loss from land to water: Integrating agricultural and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2):287-307.
- [12] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29:111-116.
- [13] Zhang M K, Jiang H, Liu X M. Phosphorus concentration and forms in surface and subsurface drainage water from wetland rice fields in the Shaoxing plain[J]. *Pedosphere*, 2003, 13:239-248.
- [14] Lu J L, Fortune S, Brookes P. P fractions in drainage water from the broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted[J]. *Pedosphere*, 2004, 14:235-240.
- [15] Martina P, Wolf-Anno B, Andeas B. Mineral-nitrogen and phosphorus leaching from vegetable gardens in Niamey, Niger[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2011, 174:47-55.
- [16] 吴艳春, 庄舜尧, 杨浩, 等. 土壤磷在农业生态系统中的迁移[J]. 东北农业大学学报, 2003, 34(2):210-218.
- WU Yan-chun, ZHUANG Shun-yao, YANG Hao, et al. Soil phosphorus transfer from agricultural ecosystem[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2003, 34(2):210-218.
- [17] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Environ Qual*, 2001, 30:508-520.
- [18] 刘星, 梁成华, 杜立宇, 等. 施磷对水稻土磷素淋溶的影响[J]. 广东农业科学, 2012(9):55-58.
- LIU Xing, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Effects of phosphorus fertilizer application on P leaching in paddy soil[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(9):55-58.
- [19] Fortune S, Lu Jialong, Addiscott T M, et al. Assessment of phosphorus leaching losses from arable land[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269:99-108.
- [20] Maguire R O, Sims J T. Observations on leaching and subsurface transport of phosphorus on the Delmarva Peninsula, USA [C]//Connecting Phosphorus Transfer from Agriculture to Impacts in Surface Waters. International Phosphorus Transfer Workshop, 2001:20.
- [21] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural phosphorus and eutrophication. United States department of Agriculture ARS-149, 2003.
- [22] 柏兆海, 万其宇, 陈清, 等. 县域农田土壤磷素积累及损失风险分析:以平谷区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1853-1860.
- BAI Zhao-hai, WAN Qi-yu, CHEN Qing, et al. Evaluation of soil phosphorus accumulation and loss risk on arable land at county level: The example of Pinggu District[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1853-1860.
- [23] 章明奎, 周翠, 方利平, 等. 蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4):544-548.
- ZHANG Ming-kui, ZHOU Cui, FANG Li-ping, et al. Phosphorus saturation degree of soils on vegetable farms and its effects on soil phosphorus release potential and water quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):544-548.
- [24] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1):82-86.
- GAO Xiu-mei, WANG Ji-dong, LIU Zhao-pu, et al. Accumulation and leaching risk of phosphorus in vegetable soils under intensive cultivation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1):82-86
- [25] Jordan C, McGuckn S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface water from soils with high Olsen-P concentration[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16(1):27-35.
- [26] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:904-910.
- [27] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):142-146.
- LÜ Jia-long, Fortune S, Brookes P C. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “Change-Point”[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):142-146.
- [28] 陕西周至猕猴桃种植面积将达40万亩-承诺维护品牌形象, 人民网-陕西频道[M/OL][2013, 04, 26]<http://sn.people.com.cn/n/2013/0426/c226647-18546356.html>
- [29] 戴相林, 刘瑞, 周建斌, 等. 秦岭北麓地区农田土壤养分平衡状况演变分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3):191-199, 205.

- DAI Xiang-lin, LIU Rui, ZHOU Jian-bin, et al. Changes of Nutrient balances in soil in the northern area of Qinling Mountain of Shaanxi during the past 30 years[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2012, 40(3): 191-199, 205.
- [30] 金圣爱, 王恒, 刘庆花, 等. 山东寿光设施菜地富磷土壤磷素淋溶特征研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 577-581.
- JIN Sheng-ai, WANG Heng, LIU Qing-hua, et al. Phosphorus leaching characteristics of the phosphorus-rich soils in protected field production in Shouguang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 577-581.
- [31] Dalton B A, Amlan K G, Ivo Ribeiro da Silva, et al. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 162: 15-23.
- [32] Kang J, Amoozegar A, Hesterberg D, et al. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2011, 161: 194-201.
- [33] Neumann A, Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen and phosphorus leaching losses from potatoes with different harvest times and following crops[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 130-138.
- [34] 李白云, 刘旭峰, 金会翠, 等. 陕西眉县部分猕猴桃园土壤主要养分状况分析[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(3): 215-218.
- LI Bai-yun, LIU Xu-feng, JIN Hui-cui, et al. Analysis on soil nutrition of kiwifruit orchards in Meixian County of Shaanxi Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(3): 215-218.
- [35] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [36] 王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. *华北农学报*, 2006, 21(4): 67-70.
- WANG Xin-jun, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. Phosphorus leaching from vegetable fields and impact factors[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2006, 21(4): 67-70.
- [37] 刘利花, 杨淑英, 吕家珑. 长期不同施肥土壤中磷淋溶“阈值”研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(3): 123-126.
- LIU Li-hua, YANG Shu-ying, LÜ Jia-long. Studies on “threshold value” of phosphorus leaching in long-term different fertilization soils[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2003, 31(3): 123-126.
- [38] QIN Hong-ling, QUAN Zhi, LIU Xin-liang, et al. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soils of different planting years in suburbs of Changsha, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(11): 1641-1649.
- [39] 姜波, 林咸永, 章永松. 杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2008, 34(2): 207-213.
- JIANG Bo, LIN Xian-yong, ZHANG Yong-song. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science*, 2008, 34(2): 207-213.
- [40] Liang L Z, Shen R F, Yi X Y, et al. Phosphorus requirement of *Amaranthus man-gostanus* L. exceeds ‘change point’ of P loss[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25: 152-158.
- [41] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen-P 的“突变点”[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 8(5): 6-10.
- ZHANG Huan-chao, ZHANG Hong-ai, CAO Zhi-hong. Research on phosphorus runoff losses from paddy soils in the Taihu Lake region and its Olsen-P “Change-point”[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2004, 8(5): 6-10.
- [42] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 901-918.
- China National Soil Survey Office. Chinese soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1998: 901-918.
- [43] 张福锁, 陈新平, 高祥照, 等. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 37-53.
- ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, GAO Xiang-zhao, et al. Coordinate high-yielding crop and environment protection of nutrient resources management technology research and application[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2008: 37-53.
- [44] Schwab A P, Kulyingong S. Changes in phosphate activities and availability indexes with depth after 40 years of fertilization[J]. *Soil Science*, 1989, 147(3): 179-186.
- [45] 吕家珑, 张一平, 张君常, 等. 土壤磷运移研究[J]. *土壤学报*, 1999, 36(1): 75-82.
- LÜ Jia-long, ZHANG Yi-ping, ZHANG Jun-chang, et al. Studies on phosphorus transport in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(1): 75-82.
- [46] 张兴义, 隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6): 122-125.
- ZHANG Xing-yi, SUI Yue-yu. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 122-125.
- [47] 徐明岗, 孙本华. 陕西土壤磷素扩散的某些影响因素的研究[J]. *西北农业学报*, 1997, 6(4): 51-55.
- XU Ming-gang, SUN Ben-hua. Investigation on the factors affecting the diffusion of phosphate in soils of Shaanxi Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1997, 6(4): 51-55.
- [48] Ulén B, Etana A. Risk of phosphorus leaching from low input grassland areas[J]. *Geoderma*, 2010, 158: 359-365.
- [49] 王建, 同延安, 高义民. 关中地区猕猴桃树体周年磷素需量动态规律研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 119-123.
- WANG Jian, TONG Yan-an, GAO Yi-min. Study on dynamics of phosphorus need of kiwifruit tree in Guanzhong of Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 119-123.