

县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析 ——以北京市平谷区为例

柏兆海, 万其宇, 李海港, 段增强, 陈 清*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:作物的磷素需求和投入的差异导致土壤磷素积累对环境的影响不同。通过分析京郊平谷区果树、蔬菜和粮食作物的磷素投入数量和农田土壤有效磷含量,比较研究不同作物体系中土壤磷素积累对环境的影响。结果表明,粮田、菜地和果园平均年际磷投入量分别为 76、575 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 和 693 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$,其中菜地和果园的磷素投入以有机肥为主,年际磷盈余分别达到 498 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 和 468 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$,远大于粮田的磷素盈余(38 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$)。这种状况造成粮田、菜地和果园土壤 Olsen-P 含量差异很大,分别为 18.4($n=260$)、44.3($n=108$) $mg \cdot kg^{-1}$ 和 40.4 $mg \cdot kg^{-1}$ ($n=548$)。分析钙质土壤 Olsen-P 与 $CaCl_2$ 浸提 P 的相关性发现,钙质土壤存在着 Olsen-P 与 $CaCl_2$ -P 突变拐点即磷的淋溶拐点,在拐点之后土壤 $CaCl_2$ -P 随土壤 Olsen-P 的增加而显著增加,且土壤磷淋溶拐点明显受土壤类型及质地的影响。按质地分类,砂壤、轻壤和重壤拐点分别是 23.1、40.1 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 51.5 $mg \cdot kg^{-1}$,土壤质地由轻至重拐点 Olsen-P 值随之逐渐增加。根据质地模拟,7.7%的粮田、44.0%的菜田、33.6%的果园土壤磷淋失风险较高。因此,合理的磷素投入在果树、蔬菜作物的可持续生产中具有重要的意义。

关键词: Olsen-P; $CaCl_2$ -P; 拐点; 磷淋溶风险; 粮田; 果园; 菜田

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)09-1853-08

Evaluation of Soil Phosphorus Accumulation and Loss Risk on Arable Land at County Level: The Example of Pinggu District, Beijing City, China

BAI Zhao-hai, WAN Qi-yu, LI Hai-gang, DUAN Zeng-qiang, CHEN Qing*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The variation of phosphorus demand and input among different cropping system may cause the different surplus and risk to environment. The aim of this study is to evaluate the difference of soil phosphorus(P) accumulation and potential risk of P loss to environment among cereal, fruit and vegetable cropping systems in Pinggu District, Beijing suburb, through field survey on phosphorus application and soil analysis. The results showed that the average P input was 76, 575 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ and 693 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ in cereal, vegetable and orchard systems, respectively. Manure P was the main proportion of the total P input in vegetable and orchard systems and P surplus was 468 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ and 498 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, which was much higher than that in cereal system(38 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$). This caused high variation in soil Olsen-P content, which was 18.4, 44.3 $mg \cdot kg^{-1}$ and 40.4 $mg \cdot kg^{-1}$ for cereal ($n=260$), vegetable ($n=108$) and orchard ($n=548$) system, respectively. It was found that there were change-points when soil $CaCl_2$ -P rapid increased with soil Olsen-P was 23.1, 40.1 $mg \cdot kg^{-1}$ and 51.5 $mg \cdot kg^{-1}$ for sandy loam, light loam and heavy loam soils, respectively, through the correlation analysis between soil Olsen-P and $CaCl_2$ extracted P contents. The value of change-point was significantly higher in clay soils than loam soils. As classified with soil texture, 7.7%, 44.0% and 33.6% of the surveyed fields were with high P leaching potential in cereal, vegetable and orchard cropping system, respectively. It is necessary to manage P input in vegetable and orchard system following crop requirement and soil P fertility.

Keywords: Olsen-P; $CaCl_2$ -P; change-point; P leaching risk; cereal; vegetable; orchard

收稿日期: 2011-02-27

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“农作物最佳养分管理技术研究与应用”(201103003);北京市果类蔬菜产业创收团队

作者简介: 柏兆海(1986—),江苏盐城人,博士研究生,主要从事农业生产系统中养分环境排放阻控研究。E-mail: baizh1986@126.com

* 通讯作者: 陈 清 E-mail: qchen@cau.edu.cn

磷作为植物生长必需的大量营养元素之一,其投入对提高土壤磷水平和作物产量有重要作用^[1]。1950s 我国农田土壤磷含量约为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1960s 中期至 1970s 末期降至 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]。自 1980 年以来,随着大量磷肥的投入,我国农田磷盈余不断增加,1990s 初期和末期分别达到 23.8 、 $33.7 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$, 一些经济作物种植体系磷盈余增加的更多,如有些设施菜田每年磷盈余达到 $1\ 801 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3]。过量磷素投入不仅无助于进一步提高作物产量,大量的磷素累积反而易引发土壤磷素向水体迁移,造成水体富营养化等环境问题。英国洛桑试验站的长期定位试验结果显示,当土壤中 Olsen-P 超过某一临界值时(磷淋溶拐点),从土体排出水的磷浓度迅速增加,这一临界值可以用土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量进行模拟,并应用于土壤磷的淋失风险预测^[4-8]。而基于磷源头及途径因素考虑量化的磷指数法,在美国很多地区开始应用,可以很好地评价区域磷淋失风险并提出管理建议^[9]。根据中国国家环保局在太湖、巢湖、滇池、三峡库区等流域的调查,生活污水和农田的氮、磷流失成为水体富营养化的主要原因^[9]。

北京市平谷区粮食和蔬菜生产分别占北京市 5.2%和 8.6%,果园生产在北京市占有重要地位,其产值占北京市的 29.9%。平谷区粮食、蔬菜和果园面积分别占平谷耕地面积的 20.2%、15.6%和 64.2%。作为北京市水源保护区,平谷区域土壤磷素的管理非常关键,但是目前对于该地区不同种植体系土壤磷的现状缺乏系统的调查研究。本研究以北京市平谷区不同种植体系为对象,根据调查区域农田不同种植体系土壤磷素投入及积累现状,确定平谷区农田土壤磷环境临界值,并应用磷淋溶拐点分析县域不同种植体系的磷淋失风险。

1 材料和方法

1.1 调查地点

调查工作在北京市平谷区境内进行,调查点指由经纬度确定的农户地块,该地块面积决定于实际种植方式的规模。农户问卷调查内容涉及农户背景信息、种植制度、作物养分管理、农户经济收益等等。在此基础上根据土壤类型、控制面积等分层抽样。采用 GPS 仪田间定位调查地块(调查采样点分布如图 6)。调查地块实际种植方式与预定不符时,如果 50 m 内存在预定种植方式,重新确定基于预定种植方式的调查地块;如果 50 m 内没有预定种植方式时,重新确定基于

当地代表性种植方式的调查地块。

1.2 调查数据处理方法

分别整理调查农户养分管理数据,导入 Access 数据库,做记录无重复检查。同时在数据库中可以进行简单的统计分析。采用养分平衡法计算不同体系磷素盈余。

磷素盈余=磷素投入(有机肥磷+磷肥)-作物带走磷

磷肥养分含量在调查时从农户家肥料袋获得。因为本次工作只涉及调查,没有采集到有机肥样品,所以不同有机肥养分含量依据中国农业技术推广中心编著的《中国有机肥养分志》,有机肥养分数量(表 1)按照 1 m^3 鲜基有机肥= $1\ 000 \text{ kg}$, 1 m^3 干基有机肥= 600 kg 计算。作物带走养分参数(表 2)参考高祥照《肥料实用手册》及马文奇《山东省作物施肥现状、问题与对策》^[10-11]。

1.3 土样处理及数据分析

采样工作在平谷区进行,具体使用间距为 400 m 的方格网与平谷农业土地利用现状图叠加,确定交叉样点,选定调查点 916 个,其中粮田 260 个,菜田 108 个,果园 548 个。采用土钻取土,取土深度为 20 cm,在田间以 S 型路线,取 5 钻土样代表 1 个地块,混合后自然风干,过 2 mm 筛。Olsen-P 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提,土液比 1:20,钼锑抗比色法测定。 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提,土液比 1:5,钼锑抗比色法测定^[4]。经验方法也曾被采用估计临界值,本研究采用 SigmaPlot 的双线性模型进行分析模拟磷淋溶拐点。

2 结果分析

2.1 不同种植体系有机肥投入比例及磷素盈余

表 3 表明菜田的有机肥投入比例在三大种植体

表 1 有机肥养分含量

Table 1 Nutrient content of different manures

有机肥种类 Manure	鲜基(%)Fresh weight basis			干基(%)Dry weight basis		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
鸡粪	1.03	0.95	0.86	2.14	2.01	1.83
猪粪	0.55	0.56	0.35	2.04	1.87	1.30
牛粪	0.38	0.22	0.28	1.56	0.88	1.08
羊粪	1.01	0.50	0.64	1.97	1.05	1.54
马粪	0.44	0.31	0.46	1.35	0.99	1.50
鸭粪	0.71	0.83	0.66	1.64	1.80	1.51
堆肥	0.35	0.25	0.48	0.64	0.49	1.26
有机肥	0.69	0.56	0.54	1.78	1.43	1.46

注:数据来自中国农业技术推广服务中心编著《中国有机肥料养分志》。

表 2 形成 100 kg 经济产量作物收获带走氮磷钾养分(kg)

Table 2 NPK nutrient removal for 100 kg economic yield of crop harvest(kg)

作物 Crop	带走养分/kg Harvest removal		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
春玉米	2.50	1.30	2.10
冬小麦	2.70	1.20	2.00
夏玉米	2.30	1.25	1.60
小麦	2.70	1.05	2.10
玉米	2.40	1.30	1.85
大豆	7.50	0.65	2.50
大葱	0.18	0.06	0.11
萝卜	0.31	0.19	0.58
胡萝卜	0.24	0.08	0.57
荚豆	0.80	0.25	0.70
冬瓜	0.14	0.05	0.22
黄瓜	0.27	0.13	0.35
豇豆	0.41	0.25	0.88
豆角	0.34	0.23	0.59
辣椒	0.51	0.11	0.65
茄子	0.32	0.09	0.45
番茄	0.35	0.10	0.39
小白菜	0.16	0.09	0.39
大白菜	0.19	0.09	0.34
菜心	1.09	0.21	0.49
甘蓝	0.30	0.10	0.22
芹菜	0.20	0.09	0.39
桃	0.50	0.20	0.70
樱桃番茄	0.25	0.10	0.32

注:参考高祥照《肥料实用手册》,马文奇博士论文等。

系中最高,果园其次,而粮田最少。菜地平均每年施磷 575 kg P₂O₅·hm⁻²,其中有机肥 483 kg P₂O₅·hm⁻²,占总投入磷量的 84.0%;果园平均每年施磷 693 kg P₂O₅·hm⁻²,其中有机肥 471 kg P₂O₅·hm⁻²,有机肥磷占果园总投入磷量的 67.9%;粮田每年磷肥投入为 76 kg P₂O₅·hm⁻²,几乎没有有机肥投入磷素。在磷素投入量方面,菜田和果园的磷肥投入量分别是粮田投入量的 7.6 倍和 9.1 倍。平谷区粮田平均年际磷盈余 38 kg P₂O₅·hm⁻²,菜地平均年际磷盈余 498 kg P₂O₅·hm⁻²,果

园平均年际磷盈余为 468 kg P₂O₅·hm⁻²。果园、菜地磷素盈余为粮田磷素盈余量的 12 倍左右。

2.2 不同种植体系土壤磷素累积水平

本次调查表层土壤(0~20 cm)Olsen-P 样本数为 916 个(图 6),Olsen-P 平均含量为 34.2 mg·kg⁻¹,其中:粮田土壤样本 260 个,Olsen-P 平均含量为 18.4 mg·kg⁻¹;果园土壤样本 548 个,Olsen-P 平均含量为 40.4 mg·kg⁻¹;菜田土壤样品 108 个,Olsen-P 平均含量为 44.3 mg·kg⁻¹。

29.6%的菜田土壤样本 Olsen-P 含量处于 0~20 mg·kg⁻¹之间,而相应的有 43.1%果园土壤和 75.0%的粮田土壤 Olsen-P 含量处于 0~20 mg·kg⁻¹之间,土壤 Olsen-P 含量处于该范围内的分布比例是粮田>果园>菜田。与 Olsen-P 含量处于 0~20 mg·kg⁻¹之间的分布比例相反,土壤样本处于 20~80 mg·kg⁻¹之间的比例分别是菜田(52.8%)>果园(41.8%)>粮田(23.7%)。菜田土壤 Olsen-P 含量大于 80 mg·kg⁻¹的占样本比例最高,为 16.7%;果园其次,为 15.1%;粮田最少,为 1.3%。75%粮田土壤 Olsen-P 含量<20 mg·kg⁻¹,30%菜田土壤 Olsen-P 含量<20 mg·kg⁻¹,而果园土壤 Olsen-P 含量<20 mg·kg⁻¹的占到 43%,相对菜田和粮田分布比例比较平均(图 1)。

图 2 结果表明高量磷肥的投入导致土壤 Olsen-P 分布不均匀,菜田、果园和粮田平均施肥量分别为 127、268 kg P₂O₅·hm⁻²和 83 kg P₂O₅·hm⁻²时,土壤 Olsen-P 水平处于 0~20 mg·kg⁻¹;菜田、果园和粮田平均施肥量分别为 289、396 kg P₂O₅·hm⁻²和 71 kg P₂O₅·hm⁻²时,土壤 Olsen-P 水平处于 20~80 mg·kg⁻¹;当菜田、果园和粮田平均施肥量分别达到 319、493 kg P₂O₅·hm⁻²和 63 kg P₂O₅·hm⁻²时,土壤 Olsen-P 水平>80 mg·kg⁻¹。

2.3 不同类型及质地土壤磷淋溶拐点特性

图 3、图 4 表明,在钙质土壤中存在 Olsen-P 与 CaCl₂-P 突变拐点即磷的淋溶拐点,在拐点之后土壤 CaCl₂-P 随土壤 Olsen-P 的增加而显著增加。当土壤 Olsen-P 含量小于磷淋溶拐点时,土壤磷淋失风险

表 3 平谷区不同种植体系土壤磷水平及磷素平衡的平均值

Table 3 The average of soil Olsen-P level and P input rates for each cropping system of Pinggu county

种植体系 Cropping system	Olsen-P/ mg·kg ⁻¹	磷平衡 P balance/ kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²	磷肥投入 P input/ kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²	有机肥 P 占总磷比例 Po/TP/%	磷淋失风险(Olsen-P 高于磷淋溶拐 点占总样本比例)P leaching risk/%
粮田 Cereal	18.4±32.5(n=260)	38±88(n=190)	76±87(n=190)	0	7.7
果园 Orchard	44.3±41.3(n=549)	468±528(n=138)	693±503(n=138)	67.9	44.0
菜田 Vegetable	40.4±41.5(n=109)	498±343(n=30)	575±342(n=30)	84.0	33.6

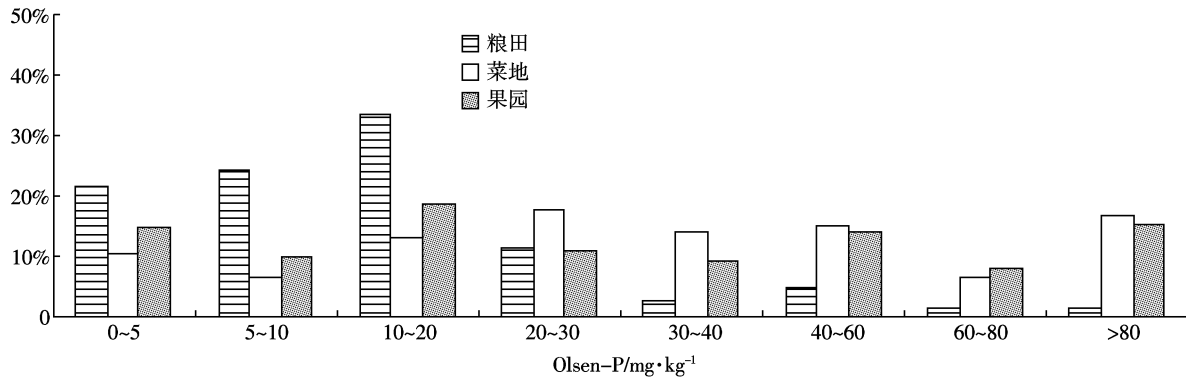


图 1 平谷区不同种植体系表层土壤有效磷分布比例

Figure 1 Frequency of Olsen-P level of surface soil for each cropping system of Pinggu county

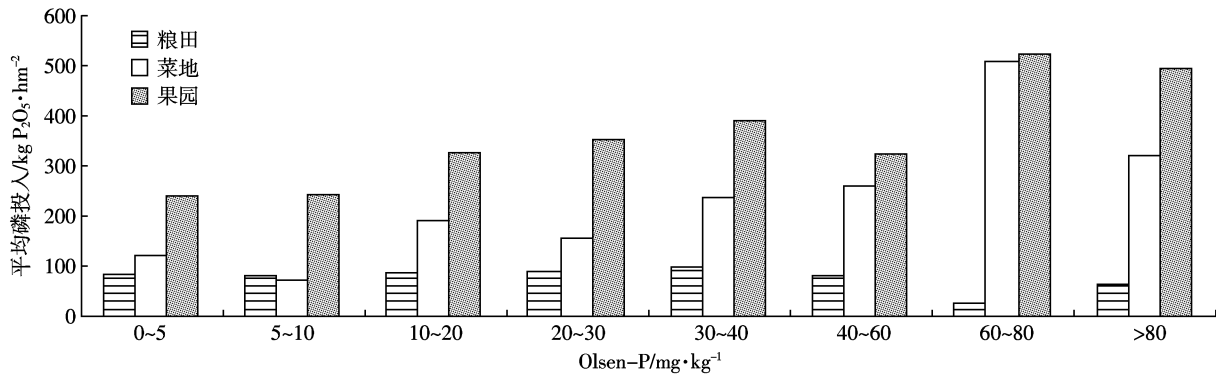


图 2 平谷区不同土壤 Olsen-P 水平的磷投入量分布

Figure 2 Annual P inputs of different Olsen-P level for each cropping system of Pinggu county

较低;反之,则磷淋失风险较高。土壤磷淋溶拐点明显受土壤类型及质地的影响,潮土和褐土的磷淋溶拐点的 Olsen-P 值分别为 $25.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $40.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。拐点 Olsen-P 及 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 值随土壤质地粘重而呈逐渐增加趋势:砂壤拐点对应的 Olsen-P 是 $23.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远小于轻壤的 $40.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和重壤 $51.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;砂壤、轻壤和重壤对应拐点 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 值分别为 0.24 、 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。褐土中重壤 34%,而潮土只占 20%;褐土中砂壤占 11%,潮土却占 63%(图 5)。

土壤磷淋溶拐点将土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系分为两部分,在淋溶拐点之后的方程斜率显著高于淋溶拐点之前方程的斜率。砂壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间关系的两个斜率分别为 0.01 和 0.07,轻壤是 0.023 和 0.087,重壤是 0.024 和 0.064。两者之间的比值是砂壤 $7.0 >$ 轻壤 $3.8 >$ 重壤 2.7 ,随土壤质地变粘重而逐渐下降。根据质地分类,评价不同种植体系磷淋溶风险,平谷区菜田、果园和粮田磷淋溶风险较高,土壤样本占总样本比例分别为 41.3%、38.3%和 9.2%(图 6)。

3 讨论

平谷区粮田土壤 Olsen-P 含量与北京市粮田长期监测点数据相近;菜田土样取自露天菜田,且有部分露天菜田种植年限较短,所以菜田土壤 Olsen-P 值低于北京市菜田监测点的 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;果园土壤 Olsen-P 含量与全国果园平均 Olsen-P 含量 $43.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相近,但略高于北京市果园平均 Olsen-P 水平 $33.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [12]。平谷区不同种植体系磷素水平分布不均匀,不同体系的施肥特点可能是造成土壤 Olsen-P 含量不均匀的主要因素(图 2)。当果园、菜田和粮田的平均施肥量分别为 507 、 $413 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $43 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,对应土壤 Olsen-P 含量大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;当施肥量分别为 268 、 $127 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $83 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,对应土壤 Olsen-P 含量则低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;果园、菜田和粮田 Olsen-P 含量 $> 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的农户的施肥量是 Olsen-P 含量为 $0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 农户施肥的 1.9、3.2 倍和 0.5 倍,施肥量的差异导致土壤 Olsen-P 分布比例的不均。

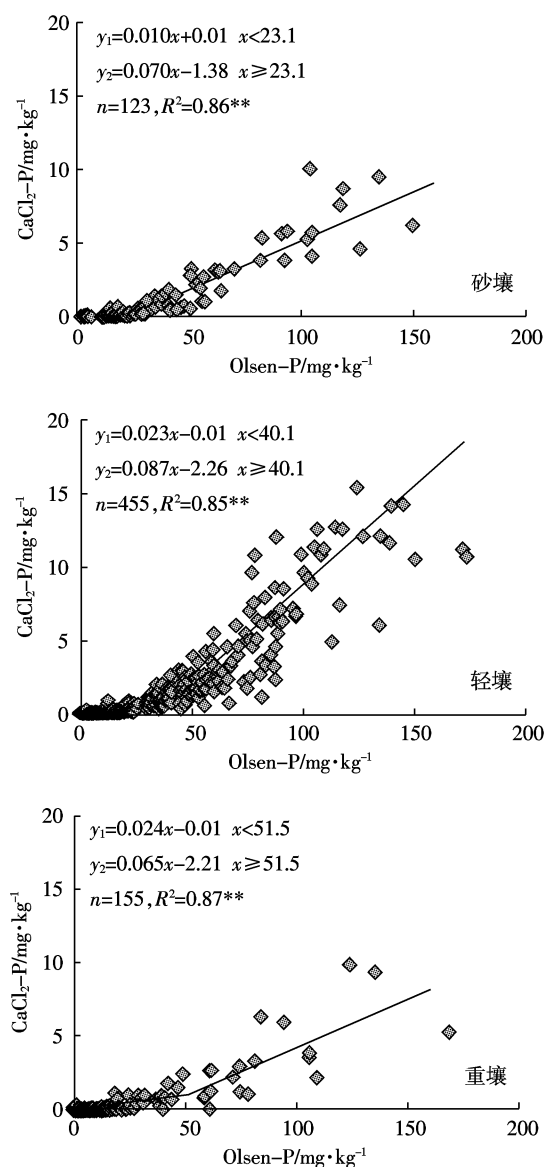


图3 平谷区不同质地土壤的磷淋溶拐点

Figure 3 Soil P leaching change-points based on soil texture of Pinggu county

平谷区不同种植体系土壤磷素的分布存在两种极端情况:土壤磷的缺乏——限制产量和土壤磷的富集——高淋失风险。平谷地区 77.5% 的农田土壤低于大田作物高产适宜土壤 Olsen-P 浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[13], 这部分土壤需要施用磷肥提高肥力以满足作物的高产; 13.3% 的粮田土壤已经超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但磷淋溶风险较低, 这部分土壤仅需要使用少量的启动磷肥; 其余 9.2% 的农田土壤磷淋溶风险较高, 应避免磷肥施用过量。露天蔬菜高产适宜的土壤 Olsen-P 浓度为 $20 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[14], 平谷区露天蔬菜土壤 Olsen-P 浓度超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占到 23.1%, 这部分土壤磷的淋溶风险很

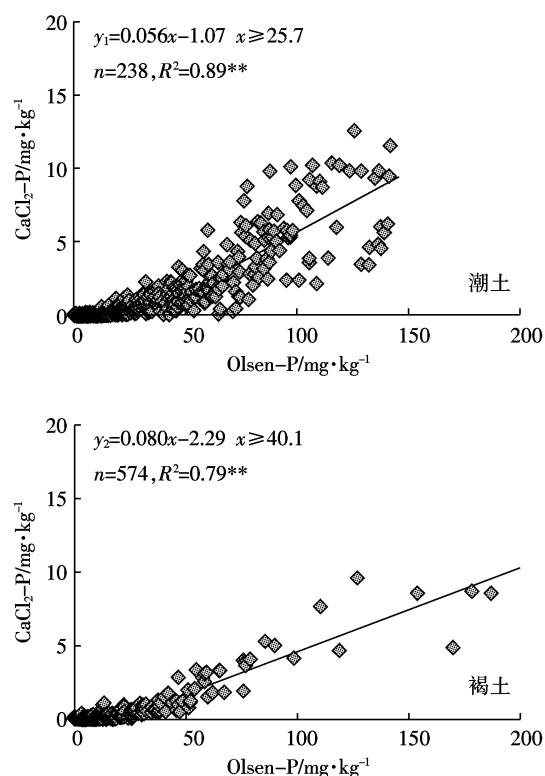


图4 平谷区不同类型土壤的磷淋溶拐点

Figure 4 Soil P leaching change-point based on soil classification of Pinggu county

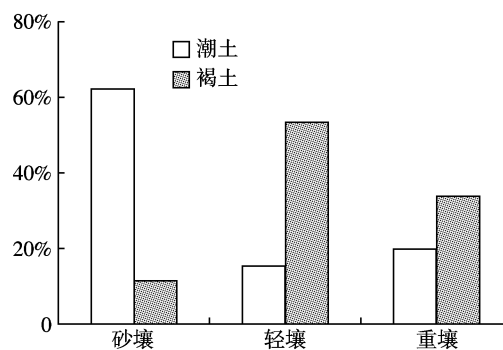


图5 不同类型土壤的质地分布比例

Figure 5 The distribution of soil texture based on soil classification

高, 在保证蔬菜高产的前提下, 应避免磷肥的投入过量, 并控制磷的淋失途径, 降低磷淋溶风险; 处于适宜露天菜田高产浓度 $20 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间的占到 46.3%, 但是这部分土壤中有 39% 的土壤具有高淋溶风险; 而其余 30.6% 的菜田土壤 Olsen-P 低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这部分需要进行土壤有效磷库的培肥。果树高产土壤适宜的 Olsen-P 含量在 $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[12], 平谷区果园土壤只有 19.9% 土壤 Olsen-P 是处于适宜范围内的, 这部分土壤磷淋溶风险较低; 高于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的果园土壤占到 37.0%, 土壤磷淋溶风险较

平均每年施磷 $575 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中有机肥占 84.0%, 菜地平均年际磷盈余 $498 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$; 粮田每年磷肥投入为 $76 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 不施用有机肥, 粮田平均年际磷盈余 $38 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。菜田和果园的磷肥投入量分别是粮田投入量的 7.6 倍和 9.1 倍, 磷素盈余量约为粮田磷素盈余量的 12 倍。有机肥的大量施用导致了果园和菜田土壤 Olsen-P 的含量显著增加, 菜田土壤 Olsen-P 含量可达到 $170.9 \sim 646.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[13, 18-20], 果园土壤 Olsen-P 为 $13.9 \sim 109.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[12]。有机肥含有大量速效的无机磷和有机磷^[21-22], 可以直接增加土壤的 Olsen-P 水平; 另一方面有机肥含有大量的有机质, 大分子的胡敏酸类物质可以与碳酸钙结合, 抑制磷酸钙晶体的生成^[23]; 同时有机质在降解过程释放小分子的有机酸, 也可以溶解一部分磷酸钙增强土壤磷的有效性^[24-25]。有机肥的施用可以显著增强土壤磷的活性, 促使土壤 Olsen-P 的增加速率显著高于单独施用化学磷肥。

平谷区菜田和果园由于磷盈余量及有机肥投入比例过高, 土壤磷淋失风险比例较高, 但同时存在相当比例土壤磷素缺乏的问题; 同时粮田则由于磷盈余量及有机肥投入比例较低, 土壤普遍缺乏磷素。鉴于有机肥在培肥土壤磷库, 增强磷的移动性方面效果显著, 可以降低磷淋失风险较高的菜田和果园有机肥投入, 降低磷素的淋失风险; 同时加大有机肥在粮田或磷素缺乏的果园和菜田中的施用, 培肥土壤磷库保证作物高产。

4 结论

钙质土壤上随着土壤 Olsen-P 的增加 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 提高, 存在一个突变拐点即磷淋溶拐点, 并随土壤质地粘重而呈逐渐增加趋势。平谷区不同种植体系 Olsen-P 分布不均匀, 根据质地模拟, 9.2% 的粮田, 41.3% 的菜田和 38.3% 的果园土壤磷淋失风险较高, 同时粮田、菜田和果园分别有 79.0%、29.6% 和 41.3% 的土壤磷素相对缺乏。不同种植体系的磷肥及有机肥投入差异可能是造成平谷区农田磷素分布不均的主要原因。果园平均施磷 $693 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中有机肥磷占投入总磷量的 67.9%; 菜地平均施磷 $575 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机肥磷占总磷量的 84.0%; 大田作物平均施磷 $76 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机肥磷占总磷量的 0%。研究结果表明平谷区不同种植体系磷素缺乏和富集的土壤并存, 应根据不同种植体系土壤地力情况合理施用无机磷肥和有机肥, 实现粮菜果生产和环境安全。

参考文献:

- [1] Johnston A E. The Rothamsted classical experiments. [M]/Leigh, R A, Johnston, A E(Eds.). Long-term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences. CAB International, Wallingford, UK, 1994:9-37.
- [2] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
SHEN Shan-min. Chinese soil fertility[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [3] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(12): 296-303.
LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(12): 296-303.
- [4] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:904-910.
- [5] Maguire Q, Sims J T. Observations on leaching and subsurface transport of phosphorus on the Delmarva Peninsula, USA. Connecting Phosphorus Transfer from Agriculture to Impacts in Surface Waters. International Phosphorus Transfer Workshop. 2001:20.
- [6] Sharpley A N, Daniel T, Sims T, et al. Agricultural phosphorus and eutrophication. United States Department of Agriculture ARS-149, 2003.
- [7] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2690-2701.
LV Jia-long. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction[J]. *Aata Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2690-2701.
- [8] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2275-2280.
ZHONG Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion[J]. *Aata Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2275-2280.
- [9] 李贵宝, 尹澄清, 周怀东. 中国“三湖”的水环境问题和防治对策与管理[J]. 水问题论坛, 2001(3): 36-39.
LI Gui-bao, YIN Cheng-qing, ZHOU Huai-dong. The strategy and management to the environment problem in China three lakes[J]. *Water Problem Forum*, 2001(3): 36-39.
- [10] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥养分志 [B]. 北京: 中国农业大学出版社. 1999.
National agro-technical popularization service center. Nutrients content of manure in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [11] 马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策[D]. 博士论文. 北京: 中国农业大学, 1999.
MA Wen-qi. Current status and evaluation of crop fertilization in Shandong Province[D]. Ph.D Thesis. Beijing: China Agricultural University, 1009.
- [12] 卢树昌. 我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响[D]. 博士论文. 北京: 中国农业大学, 2009.
LU Shu-chang. Characteristics of nutrients input and the influences on soil quality in intensive orchards of China[D]. Ph.D Thesis. Beijing:

- China Agricultural University, 2009.
- [13] 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.
- [14] 张福锁, 马文奇, 陈新平, 等. 养分资源综合管理理论与技术概论[M]. 北京: 中国农业大学出版社. 2006: 103-116.
- ZHANG Fu-suo, MA Wen-qi, CHEN Xin-ping, et al. Overview of nutrient resources comprehensive management theory and technology[M]. Beijing: China Agriculture University Press. 2006: 103-116.
- [15] Cole C V, Olsen S R, Scott C O. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate[J]. *Soil Sci Amer Proc*, 1953, 17:352-356.
- [16] Freeman J S, Rowell D L. The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite [J]. *Eur J Soil Sci*, 1981, 32: 75-84.
- [17] Larsen S. Soil phosphorus[J]. *Adv in Agron*, 1967, 19:151-210.
- [18] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翻. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥科学报, 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.
- [19] 刘建玲, 廖文华, 高志岭, 等. 河北省蔬菜保护地土壤养分的积累状况及影响因素[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(1): 19-24.
- LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, GAO Zhi-ling, et al. The status and impact factors of accumulating in cover vegetable field in Hebei Province[J]. *Journal of Agriculture University of Hebei*, 2004, 27(1): 19-24.
- [20] 周晓芬, 杨军芳, 冯 伟, 等. 设施菜田土壤磷、钾养分积累状况与特点[J]. 华北农学报, 2008, 23(4): 196-220.
- ZHOU Xiao-fen, YANG Jun-fang, FENG Wei, et al. The accumulation and characteristic of phosphorus and potassium in greenhouse soil[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2008, 23(4): 196-220.
- [21] Dou Z, Toth J D, Galligan D T, et al. Laboratory Procedures for Characterizing Manure Phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29(2): 508-514.
- [22] Turner B L, Leytem A B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: Chemical speciation and a novel fractionation procedure[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38, 6101-6108.
- [23] Delgado A, Madrid A, Kassem S, et al. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids[J]. *Plant Soil*, 2002, 245: 277-286.
- [24] Arai Y, Livi K J T, Sparks D L. Phosphate reactivity in long-term poultry litter-amended Southern Delaware sandy soils[J]. *Soil Sci Soc Am*, 2005, 69:616-629.
- [25] Wang L J, Zhang W, Qiub S R, et al. Inhibition of calcium oxalate monohydrate crystallization by the combination of citrate and osteopontin[J]. *Crystal Growth*, 2006, 291: 160-165.