

河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析

卢树昌^{1,2}, 陈清¹, 张福锁¹, 贾文竹³

(¹中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ²天津农学院农学系, 天津 300384; ³河北省土壤肥料总站, 石家庄 050012)

摘要:【目的】作为果树生长发育必需的大量营养元素, 磷素对生态环境和可持续发展同样具有重要影响。研究果园磷素投入特点及分析磷素负荷特征对加强果园磷素管理具有重要意义。【方法】以河北省主要果园土壤磷素分析、农户投入调查等统计数据为基础, 采用盈余法从区域角度分析果园生产体系中的磷素输入输出特点及磷素盈余状况, 分析土壤磷负荷风险。【结果】果园磷肥投入量为 230.6 kg P₂O₅·ha⁻¹, 主要来源于普钙、二铵和三元复合肥; 通过有机肥投入的磷素水平为 128.1 kg P₂O₅·ha⁻¹, 主要来源于畜禽粪便, 其中畜粪占 35.8%, 禽粪占 25.5%。果园施磷水平以冀东北区和冀中南平原区较高, 分别为 378.5、195.5 kg P₂O₅·ha⁻¹。80%的果园磷素样本处于盈余, 总体平均盈余量为 269.5 kg P₂O₅·ha⁻¹, 最大盈余量超过 1 900 kg P₂O₅·ha⁻¹。施磷过量造成土壤有效磷积累, 供磷丰富的果园土壤上磷肥过量的样本占 88.5%。土壤磷环境负荷以冀东北区和冀中南平原区的果园较高, 总体上果园土壤有效磷高于土壤磷环境风险阈值的样本占 33.6%。【结论】河北果园磷素的高量投入给土壤环境带来较大的磷素负荷, 这对土壤环境和周围水体造成很大威胁。

关键词: 果园; 磷素投入; 土壤磷负荷; 磷素盈余

Characteristics of Soil Phosphorus Input and Phosphorus Load Risk in Major Orchards Region of Hebei

LU Shu-chang^{1,2}, CHEN Qing¹, ZHANG Fu-suo¹, JIA Wen-zhu³

(¹College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; ²Department of Agronomy, Tianjin Agriculture University, Tianjin 300384; ³Soil Fertilizer Working Station in Hebei Province, Shijiazhuang 050012)

Abstract: 【Objective】 As one of the necessary macronutrients for fruit tree growth, phosphorus affects ecological environment and sustainable development. It's very important to study the characteristics of phosphorus input and phosphorus load in orchard in order to improve phosphorus nutrient management. 【Method】Based on the data collection through soil fertility survey of orchard, farmer interviewing and agricultural statistics database, the characteristics of P application, surplus and P load were studied using nutrient balance method at different regions in Hebei. 【Result】 The average application rate of P fertilizer was 230.6 kg P₂O₅·ha⁻¹, with common types of calcium superphosphate, diamine phosphate and compound fertilizers; The P input rate through manure application was 128.1 kg P₂O₅·ha⁻¹, with common animal waste and manures. The proportions of livestock manure and fowl manure in organic manure species accounted for 35.8% and 25.5%, respectively. The P fertilizer applied rate in the orchards in northeast and central-south districts of Hebei plain were 378.5 and 195.5 kg P₂O₅·ha⁻¹, respectively, and were relatively higher than the other region. P surplus was investigated in the 80% of surveyed orchards, with the average amount of 269.5 kg P₂O₅·ha⁻¹, and highest amount of 1 900 kg P₂O₅·ha⁻¹. High rate of P supply caused soil P accumulation in orchard, however, P over-fertilization were investigated on 88.5% of orchards with excessive soil P accumulation. P surplus rate and soil environmental P load in these orchards at the northeast and central-south districts were higher than the other regions of Hebei plain. Soil available P level in 33.6% in the

收稿日期: 2008-01-24; 接受日期: 2008-03-20

基金项目: 农业部“948”项目(2006-G30, G60)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(nyhyzx07-025)

作者简介: 卢树昌(1970-), 男, 河北献县人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为土壤资源综合利用与养分资源综合管理。Tel: 022-23781298; E-mail: lsc9707@163.com。通讯作者陈清(1968-), 山东文登人, 教授, 博士, 研究方向为园艺作物养分资源综合管理。Tel: 010-62733822; E-mail: qchen@cau.edu.cn

surveyed orchard had been over the critical risk level of P. 【Conclusion】 High P input in the orchards of some regions led to very high rate of P load to soil environment, and this will increase high environmental risk in Hebei.

Key words: Orchard; Phosphorus input; Phosphorus load; Phosphorus surplus

0 引言

【研究意义】磷素对土壤生态环境和果业可持续发展具有重要影响。研究果园磷素投入特点及分析磷素负荷特征对加强果园磷素管理具有重要意义。【前人研究进展】中国农田磷养分平衡在 20 世纪 60 年代表现亏缺,到 70 年代中期,由亏缺转向基本平衡,到 90 年代初一直处于盈余状况^[1]。河北省农田土壤有效磷含量大于 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本比重由 1980 年的 2.19% 增加到 1993 年的 10.17%, 2002 年达到 35.2%, 主要原因是增施磷肥。据统计,河北省农田施磷量由 1980 年的 $20.8 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到 1993 年的 $38.5 \times 10^4 \text{ t}$, 2002 年达到 $45 \times 10^4 \text{ t}$ ^[2-5]。进入 20 世纪 90 年代后,随着种植业结构调整力度加大,河北省果树面积占农作物面积的比例由 20 世纪 80 年代初的 6.3% 上升到目前的 12.7%, 2005 年其果树栽培面积跃居全国第一位,产量仅次于山东省^[6]。由于果业拉动农村经济的增长,导致果园集约化生产得到加强,果园磷肥投入水平越来越高^[7]。苏南太湖流域农业面源磷污染研究表明,农田化肥磷过高施用和畜禽养殖排放的有机磷等可能是造成目前流域水体富营养化的主要原因^[8,9],尤其果菜等经济作物面积大幅度增长引起的磷素增加对环境总磷的贡献约占 60%^[10,11]。曹宁等^[12]研究东北地区农田土壤磷平衡及对面源污染贡献时指出,由农田土壤进入水体环境的磷负荷呈增加趋势,其中果菜种植面积比例的增加是造成农田土壤磷盈余增加的主要原因。因此,果园生产体系磷养分平衡状况及其影响日益受到国内外广泛重视。农田磷养分平衡作为理解养分在农业系统中环境负荷的有效手段,是评价土壤养分水平发展趋向的根本依据,是评价农业是否可持续发展的一个重要指标^[13]。然而中国在果园生产体系大尺度上研究整个区域磷养分平衡状况及其对土壤磷负荷影响还不够。【本研究切入点】本文拟通过土壤调查与农户调查,结合相关统计资料,对河北省大区域尺度果园磷素平衡盈余变化进行研究,以期从养分资源管理角度为区域磷素有效管理提供理论依据。【拟解决的关键问题】从果园生产体系大尺度分析区域磷素投入问题,探讨磷素投入对土壤磷环境负荷风险的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

河北省气候属温带湿润半干旱大陆性季风气候,平均降水量为 350~770 mm,时空分布极不均匀,总的趋势是东南部多于西北部。光能资源丰富,年均日照时数 2 400~3 077 h,属日照条件较好地区。高原和山地丘陵约占土地总面积的 60%,平原约占 40%。全省耕地面积 $6.49 \times 10^6 \text{ ha}$,人均耕地 0.1 ha。土壤类型多样,主要为褐土、潮土、棕壤等土类。主要种植小麦、玉米、蔬菜和果树,其中果树种植面积为 $1.11 \times 10^6 \text{ ha}$,约占耕地面积的 17.0%。苹果、梨和桃种植面积名列全国前三位,是中国果品的主要产区。以其为调查区域研究中国北方果园磷素投入特征具有较强的代表性。

1.2 调查布点方法

调查点按调查县果园总面积、地形、树种,每个点代表面积 266.7 ha 的要求进行采样点控制,一般平川地每 200 ha 设置一个点,丘陵区每 266.7 ha 设置一个点。根据评价单元个数以及面积和总采样点总数,初步确定各评价单元的采样点数。确定采样点原则,首先考虑地形部位,其次为土种,第三为果树种类,第四为果龄,最后为第二次土壤普查采样点位置。根据果园评价单元的数量、树龄、产量水平等因素确定耕层样采样点,在图上标注采样点编号。各评价单元的采样点位确定后,再根据土壤类型、地形、果树种类、树龄等因素,统计各因素的点位数。当某一因素点位数过少或过多时,进行调整,同时考虑点位的均匀性。最后确定的调查采样点总计约 916 个。考虑到果树根系较深,土壤采样深度为 0~30 cm。河北果品主产区和高产区主要分布于河北东北部和中南部平原地带,因此,在平原区确定的调查点较多,约占 80%。主要土类褐土和潮土分布的调查点占了 90%以上,轻、砂壤质地土壤分布约占 75%,主要果树苹果、梨、桃等确定的调查点约占 60%。样点分布见图 1。

1.3 调查内容及分析方法

调查采样点的立地条件包括地貌类型、土壤类型、土壤质地等。农户调查主要采用问卷调查与实地调查结合方法,调查近三年果园生产与管理情况。调查内

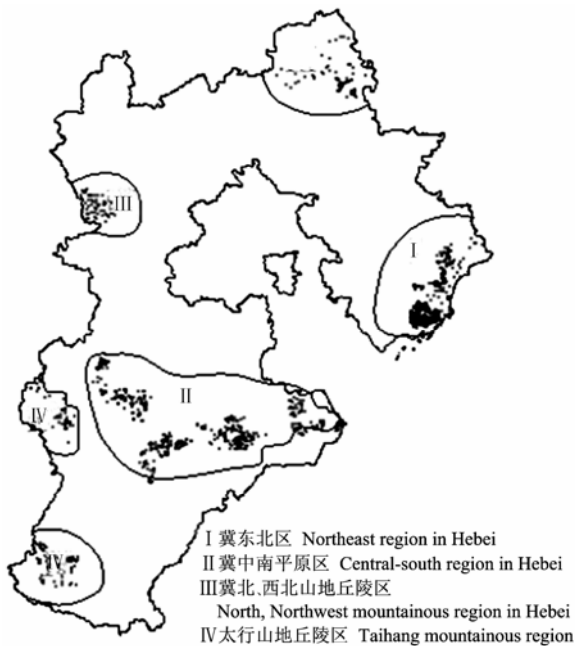


图 1 河北果园调查采样点分布

Fig. 1 The distribution of soil sampling in major orchards of Hebei

容主要包括代表面积, 施肥种类(有机肥、单质磷肥、复合磷肥等)、肥料品种、养分含量及施用量, 果树种类、面积及产量水平等。在农户调查的同时, 采集相应果园土壤样品。土壤样品有效磷测定采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{pH } 8.5$ 的 NaHCO_3 溶液浸提——钼蓝比色法分析。农户调查结果可靠性与相应土壤样品磷的分析对比加以验证。

1.4 参数选择及计算方法

化肥养分含量按照农户所施肥料包装袋上标识的养分含量计算, 有机肥料的养分含量根据《中国有机肥料养分志》^[14]和《中国有机肥料资源》^[15]的参数汇总计算(以鲜基计)。

磷素平衡的计算方法:

磷素平衡=输入项(化肥磷+有机肥磷) - 输出项
(收获物带走量)

化肥和有机肥输入的磷按照农户调查点的实际值计算; 不同果树产量、面积按照农户调查实际值和统计年鉴参考数据计算; 不同果树经济产量吸收磷分量按照《肥料实用手册》^[16]、《中国肥料实用手册》^[17]和《果树栽培学各论》^[18]等参考计算。

1.5 数据处理与统计方法

采用 Excel 2003 方法进行数据处理, 采用 SPSS

12.0.1 的 ANOVA 程序进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 果园磷养分投入状况

2.1.1 农户磷素调查可靠性分析 评价单元选取的土壤采样点确定后, 根据采样点位置追踪相应农户进行调查。此次调查是在各市、县经过严格培训的技术人员配合下亲自进行实地访谈, 调查样本一般多于土壤采样样本。为保证调查的可靠性, 笔者同时抽取了 80% 的调查样本 ($n=790$) 与土壤磷分析结果进行对比分析, 其中 <100 、 $100\sim300$ 、 $300\sim500$ 、 $>500 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 的样本数分别为 224、231、155、180 个。由图 2 可以看出, 随着果农施磷量的增加, 土壤有效磷相应增加, 表现出施磷与土壤磷状况的一致性关系。

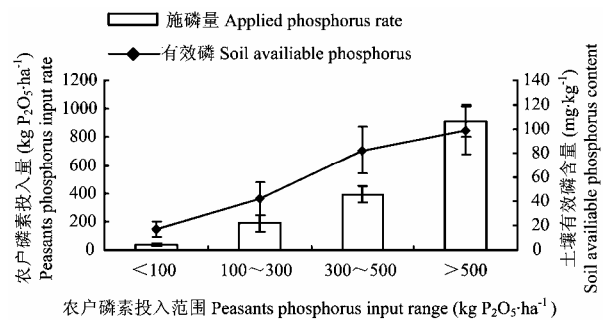


图 2 果园磷素投入与土壤有效磷含量对比分析

Fig. 2 The comparison between phosphorus input and soil available phosphorus contents in orchards

2.1.2 磷素投入总体特征 果园合理的磷肥推荐量为 $100\sim150 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ ^[19], 但从河北果园磷素投入分组与投入情况看, 磷肥投入在 $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 以上的样本达 47.9%, 其中 $150\sim300 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 样本为 24.9%, $>500 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 也占了 12% 以上。不施磷肥的样本仅占 12%。总体磷肥投入水平为 $230.6 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$; 有机肥投入磷在 $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 以上的样本占近 30%。其中 $>500 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 仅占 6%。施用量 $<60 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 的样本达到 55.6%, 其中不施有机肥的占了 30%。有机肥投入磷平均为 $128.1 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 。磷肥和有机肥提供磷在 $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 以上的样本占 59%, 投入量平均为 $346.7 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 。可见, 果园磷的投入水平总体较高, 磷肥投入高于有机肥磷的投入(图 3)。

由图 4 可以看出, 磷肥投入品种主要为普钙、二

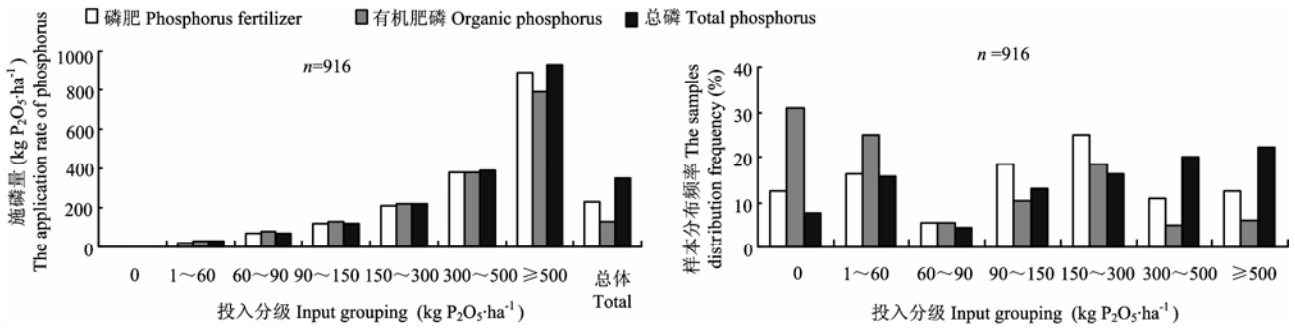


图3 果园磷素不同投入分级下施用量和样本分布频率

Fig. 3 The application rate and samples distribution frequency under different input groupings of phosphorus in orchard

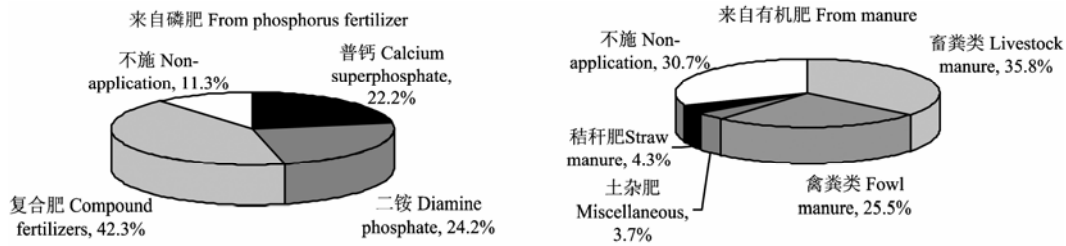


图4 果园磷素投入的来源与结构

Fig. 4 The sources and proportions of phosphorus application in orchard

铵和三元复合肥。其中，三元复合肥占了49%。有机肥施用种类主要是畜禽粪，占61.3%。其中，畜粪占35.8%，禽粪（以鸡粪为主）占25.5%。

2.1.3 果园不同分布区域磷素投入特点 不同区域由于经济发展水平和果农科技素质差异，磷肥投入水平有所不同。由表1可知，磷肥投入水平以冀东北区，即唐山和秦皇岛市最高，达到378.5 kg P₂O₅·ha⁻¹，该区几乎没有不施化学磷肥的样本；其次是冀中南平原区投入水平较高。太行山地丘陵区磷肥投入量最低，仅为24.0 kg P₂O₅·ha⁻¹。有机肥磷投入水平较高的区域也是在冀东北区和冀中南平原区，其中冀东北区最高，

达到186.6 kg P₂O₅·ha⁻¹，太行山地丘陵区有机肥磷投入仍最低，仅为20.2 kg P₂O₅·ha⁻¹。由此可以看出，河北北部、西北和西部山地丘陵区磷素投入水平较低，而冀东北、冀中南磷素投入水平较高，这可能与冀东北、冀中南两区经济发展水平较高有关。

2.1.4 果园磷养分投入合理性评价 根据不同土壤供磷水平果树产量效应研究^[20]，供磷丰富、中等及较低水平下磷肥的推荐施用量分别为目标产量下吸磷量的1、2、3倍，若磷素施用量为推荐量的80%~120%，则投入较为合理，否则，为不足或过量。由表2可以看出，土壤供磷水平越高的果园，施磷水平过量程度

表1 河北省果园不同分布区域磷素投入状况

Table 1 The phosphorus input status in different production regions of orchards in Hebei Province

区域 Region	样本数 Number of samples	来自磷肥 From phosphorus fertilizer (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹)	来自有机肥 From manure (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹)
冀东北区 Northeast region in Hebei	315	378.5±177.4	186.6±78.6
冀中南平原区 Central-south region in Hebei	415	195.4±97.2	129.8±53.5
冀北、西北山地丘陵区 North, Northwest mountainous region in Hebei	127	74.7±26.3	27.9±10.2
太行山地丘陵区 Taihang mountainous region	59	24.0±10.9	20.2±9.9

表 2 不同土壤有效磷水平下果园磷肥投入量评价

Table 2 The evaluation of phosphorus fertilizer application under different soil available phosphorus rates in orchard

土壤有效磷分级	样本数	不足	适宜	过量
Soil available phosphorus classification	Number of samples	Low (%)	Optimum (%)	Excessive (%)
高 High	372	8.3	3.2	88.5
中 Medium	155	32.9	5.8	61.3
低 Low	389	44.0	11.6	44.4

越高。果园磷肥的高量施用造成土壤磷积累。如土壤磷丰富水平下磷肥过量的样本占了 88.5%。同时反映出果农施磷盲目性较强。可见，果园磷养分投入存在较大不合理性。

表 3 河北不同果园主分布区磷素盈余状况

Table 3 The phosphorus surplus status in major orchard regions of Hebei

区域 Region	磷素分级 Classification (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹)						总体均盈余量 Total average surplus (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹)
	<0	0~150	150~300	300~500	500~1000	>1000	
	样本数 Number of samples	样本数 Number of samples	样本数 Number of samples	样本数 Number of samples	样本数 Number of samples	样本数 Number of samples	
冀东北区 Northeast region in Hebei	24	46	84	55	62	44	454.9(-217.5~1914.5)
冀中南平原区 Central-south region in Hebei	116	72	80	70	65	12	243.1(-240.0~543.0)
冀北、西北山地丘陵区 North, Northwest mountainous region in Hebei	36	82	8	1	0	0	68.4(-120.8~312.2)
太行山地丘陵区 Taihang mountainous region	32	27	0	0	0	0	10.4(-118.9~127.8)
全部调查区域 Total survey regions	208	227	172	126	127	56	269.5(-240.0~1914.5)

2.2.2 不同果园磷养分盈余状况 从不同果园磷养分盈余状况可以看出，梨、苹果、桃和葡萄园磷养分盈余量较高，在 250~525 kg P₂O₅·ha⁻¹ 之间，其中葡萄园盈余量最高，达 525.2 kg P₂O₅·ha⁻¹。而枣园、板栗园磷养分盈余量均在 100 kg P₂O₅·ha⁻¹ 以下。由表 4 可见，葡萄、桃、苹果、梨等果园土壤磷负荷水平较高，对土壤环境质量影响较大，尤其是葡萄园。

2.2.3 果园磷养分盈余原因及影响分析 果园生产体系磷养分盈余与磷素投入之间存在一定相关性。图 2 显示，果园磷素高量投入造成土壤磷的积累，同时表明果园磷素投入量远高于输出量，磷养分盈余量较高。在冀东北区和冀中南平原区果园磷盈余量较高，冀北、西北区域磷盈余量较低，这与不同区域磷素投入存在差异是分不开的。另外，磷投入产生差异的原因与区域间社会、经济发展水平有关。河北不同区域经济发展水平位次为京津东>冀中南>冀北、西北

2.2 果园生产体系磷养分盈余状况

2.2.1 不同区域果园磷养分盈余状况 不同区域果园磷素投入差异造成果园磷养分盈余程度不同。冀东北区和冀中南平原区磷养分盈余量较高，分别为 454.9 和 243.1 kg P₂O₅·ha⁻¹，冀北、西北山地丘陵区 and 太行山山地丘陵区均在 70 kg P₂O₅·ha⁻¹ 以下。说明前两个区域果园磷养分盈余负荷较大，尤其冀东北区果园。在全部调查果园中，磷养分盈余的样本占 80%，平均盈余量为 269.5 kg P₂O₅·ha⁻¹，最大盈余量超过 1 900 kg P₂O₅·ha⁻¹。其中盈余量在 300 kg P₂O₅·ha⁻¹ 以上样本占 33.7%。由表 3 可见，果园磷素投入量高于果树果实带走量，大量残留于土壤中，造成果园土壤磷养分高量盈余，土壤磷负荷程度增高，对果园环境质量的影响加大。尤其在冀东北区和冀中南平原区表现突出。

表 4 不同果园磷养分盈余状况

Table 4 The surplus status of phosphorus nutrient in different orchards

果园 Orchards	样本数 Number of samples	盈余量 Surplus rates (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹)
梨园 Pear orchard	147	253.1(-138.0~1914.5)
苹果园 Apple orchard	224	301.1(-156~2778.8)
桃园 Peach orchard	183	439.3(-217.5~2172.0)
葡萄园 Grape orchard	70	525.2(-9.8~1810.0)
枣园 Jujube orchard	138	96.2(-240.0~991.2)
板栗园 Chinese chestnut orchard	47	73.3(-1.4~275.3)

区域，相应地果园施磷水平以冀东北区较高，而冀北、西北区域较低。

果园磷养分盈余量增加，造成果园土壤有效磷积

累。在冀东北区和冀中南平原区果园磷养分盈余量较高,相应地土壤有效磷含量也较高,平均值分别为 110.8 和 28.2 mg P·kg⁻¹,而其它两区果园磷盈余量较低,其土壤有效磷均在 15 mg P·kg⁻¹ 以下。由此可见,果园磷养分盈余造成了果园土壤磷环境风险加大。

2.3 果园土壤磷环境负荷分析

由表 5 可以看出,不同区域果园土壤磷环境负荷以冀东北区域最高,高于风险临界值(50 mg P·kg⁻¹)的样本占本区的 74.6%。其次是中南部平原区,山地丘陵区环境磷风险较低。总体上河北果园土壤磷高于环境风险阈值的样本占了 33.6%,平均含量是临界值的 2.5 倍。第二次土壤普查时高于土壤有效磷环境临界值的样本仅占 1.4%。

另外,不同土壤质地土壤磷的移动扩散不同。在砂壤等轻质土壤上,如果土壤含水量较高土壤磷的移动扩散性较强^[21]。河北果园土壤质地为砂壤、轻壤的,占调查区域样本的 80% 以上。在这种土壤质地下,土壤有效磷高于环境风险临界值的样本占了 35.7%,平均含量为 120 mg P·kg⁻¹ 以上。而质地黏重的果园土壤高于环境风险临界值的比重较低(表 6)。

由此可见,目前河北果园土壤磷存在较大的潜在环境风险,对土壤环境和周围水体造成威胁很大。在果园土壤磷风险临界值(50 mg P·kg⁻¹)水平,果园磷的投入约为 500 kg P₂O₅·ha⁻¹(图 2),即果园磷肥投入一般不超过 500 kg P₂O₅·ha⁻¹ 为好,在土壤有效磷含量超过 50 mg·kg⁻¹ 时,可以不施或少施磷肥,以免对

表 5 不同区域果园土壤环境磷负荷状况

Table 5 The load status of soil environmental phosphorus in orchards of different regions

区域 Region	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本数 Number of samples above 50 mg P·kg ⁻¹	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本分布频率 Samples distribution frequency above 50 mg P·kg ⁻¹ (%)	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本土壤 有效磷平均含量(范围) Soil available phosphorus average contents above 50 mg P·kg ⁻¹ (range) (mg P·kg ⁻¹)	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本土壤 有效磷平均含量/临界值 Soil available phosphorus average contents above 50 mg P·kg ⁻¹ to load value
冀东北区 Northeast region in Hebei	235	74.6	139.7 (50~383)	2.8
冀中南平原区 Central-south region in Hebei	64	15.4	87.4 (50~290)	1.7
冀北、西北山地丘陵区 North, Northwest mountainous region in Hebei	3	2.4	70.7 (70~72)	1.4
太行山地丘陵区 Taihang mountainous region	6	10.2	62.0 (51~89)	1.2
总体 Total	308	33.6	126.7 (50~383)	2.5
第二次土壤普查 ^[2] The Second Soil Survey ^[2]	11	1.4	82.2 (51~137)	1.6

表 6 不同土壤质地果园土壤磷负荷状况

Table 6 The influence of phosphorus nutrient surplus on soil available phosphorus in orchards with different soil textures

质地类型 Soil texture	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本数 Number of samples above 50 mg P·kg ⁻¹	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本分布频率 Samples distribution frequency above 50 mg P·kg ⁻¹ (%)	高于 50 mg P·kg ⁻¹ 样本土壤有效磷平均含量 Soil available phosphorus average contents above 50 mg P·kg ⁻¹ (mg P·kg ⁻¹)
轻壤、砂壤 Light loam and sandy loam	252	35.7	122.9
重壤、黏壤 Heavy loam and clay loam	5	5.0	70.4

果园土壤环境造成负面影响。

3 讨论

果园生产体系磷养分盈余及磷素负荷量与施磷肥

之间存在显著正相关。磷肥的过量施用是磷盈余量及负荷增加的主要原因,加强磷养分资源的有效管理是必要的。在不同区域不同果园磷肥投入越高,磷养分盈余量越大,相应地产生的果园土壤磷素负荷越高。

冀东北区和冀中南平原区磷肥投入水平很高, 其果园磷养分盈余量较高。而太行山山地丘陵区及冀北、西北山地丘陵区磷肥投入水平较低, 其果园磷养分盈余量也较低。磷肥投入水平高低不仅与果树生产的经济效益有关, 而且与当地社会、经济发展水平有关。不同区域经济发展水平位次为京津东>冀中南>冀北、西北区域, 果园施磷水平也是京津东>冀中南>冀北、西北区域。可见, 发展高效经济作物推动当地社会经济的发展, 反过来驱动了投入的增加。经济发展较快区域磷肥高投入带来的社会风险不容忽视。另外, 有机肥提供的磷对土壤磷素的贡献越来越大, 尤其在集约化水平高的区域, 畜禽粪肥使用量高的区域对土壤构成的影响亦是不可忽视的重要方面。

随着果园土壤有效磷积累, 土体磷淋失及其对水体富营养化影响, 越来越引起人们的重视。英国洛桑试验站 Broadbalk 长期定位试验发现, 当土壤 Olsen-P 超过土壤磷素淋失临界值 ($60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时, 排出的总磷含量呈直线增加^[22]。钟晓英等^[23], 赵小蓉等^[24]研究中国 23 个土壤磷素淋失风险阈值时, 指出北方石灰性土壤磷淋失风险临界值平均为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 并指出在 pH 6.5 左右临界值最高。本研究区域为北方石灰性果园土壤, 故将土壤磷淋失环境风险临界值确定为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。果园生产体系土壤磷环境风险阈值与果树立地条件有很大关系。土层厚度、土壤酸碱性、土壤质地、土壤有机质含量、地形等因素均影响土壤磷的淋失。Hughes 等^[25]研究认为土壤有机质含量影响土壤磷的吸附与解吸, 在有机质含量低于 10% 的农田, Olsen-P 与土壤磷吸附指数比值可以很好预测土壤磷吸附状态, 并指出土壤磷淋洗临界值为 $35\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Jordan 等^[26]研究北爱尔兰有机质含量较高草地土壤磷淋洗临界值时指出, 土壤 Olsen-P 淋失的风险阈值为 $22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 也说明了土壤磷淋失风险阈值与土壤利用方式和有机质含量等因素有关。河北省果园轻壤、砂壤质地的样本比重较大, 有机质含量偏低, 这种立地条件可能加大磷的淋洗风险, 相应地淋失阈值将降低。河北轻壤、砂壤质地果园土壤有效磷平均含量为 $55.9 \text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于 $50 \text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本占了 35% 以上。另外, 河北省山地、丘陵面积分布较大, 在这些区域, 某些调查点亦存在施磷量大、土壤有效磷含量较高现象。可见, 河北果园土壤磷潜在环境风险将更高。在土壤含磷量高的果园, 应少施或不施磷肥。冀东北区和冀中南平原区果园磷盈余量很高, 应加强这些区域果园磷素的有效管理。另外, 葡萄、桃

等果园磷盈余量较高, 更应重视这些果园的磷肥管理。果园磷养分管理应加大测土配方施肥的力度, 根据土壤养分供应状况、不同果树需求状况以及果树立地条件, 制定适宜目标产量, 优化高效栽培技术, 合理调配磷肥资源, 尽量提高磷肥肥效, 以减轻果园磷素的环境负效应。

果园生产体系磷养分高盈余量, 给果园带来土壤环境磷素高负荷, 若任其发展, 势必对果园生态环境造成不良影响, 如磷素高投入引发的土壤缺素、水体磷富营养化等。这些问题有待进一步深入研究。

4 结论

4.1 河北省果园磷素投入以磷肥为主, 投入品种主要为普钙、二铵和三元复合肥, 总体磷肥投入水平为 $230.6 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$, 有机肥施用种类主要以畜禽粪为主。在全部调查果园中, 磷素平均盈余量为 $269.5 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$, 最大盈余量超过 $1\ 900 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 。其中 80% 的调查样本处于盈余, 盈余量在 $300 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$ 以上样本为 309 个, 占总调查样本的 33.7%。

4.2 河北省果园磷素投入量及盈余量以冀东北区和冀中南平原区较高, 太行山和冀北、西北山地丘陵区均较低。土壤磷环境负荷以冀东北区域最高, 高于风险临界值的样本占本区的 74.6%。其次是中南部平原区, 山地丘陵区环境磷风险较低。在不同果园, 以葡萄、桃等果园磷素投入量及盈余量较高。总体上, 河北果园土壤磷高于环境风险阈值的样本占 33.6%, 平均含量是临界值的 2.5 倍。砂壤、轻壤质地土壤的调查区域土壤有效磷含量高于环境风险临界值的样本占 35.7%, 平均含量为 $120 \text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上。而质地黏重的果园土壤高于环境风险临界值的比重较低。

References

- [1] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 钦绳武, 郑剑英, 王周琼. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 III. 全国和典型地区养分循环和平衡现状. 土壤通报, 1996, 27(5): 193-196.
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, Qin S W, Zheng J Y, Wang Z Q. Study on the nutrient cycling and balance of agricultural ecological system in Chinese typical areas III. The status of nutrient cycling and balance in typical areas and whole nation. *Chinese Journal of Soil Sciences*, 1996, 27(5): 193-196. (in Chinese)
- [2] 李承绪. 河北土壤. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1990.
Li C X. *Hebei Soil*. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)

- [3] 贾文竹, 赵振勋. 河北省土壤耕层养分变化与调控. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
Jia W Z, Zhao Z X. *The Change and Control of Soil Nutrients in Hebei Province*. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [4] 张国印, 王丽英, 孙世友, 王志军, 吴荣秀, 崔瑞秀. 土地利用方式对土壤质量性状的影响. 河北农业科学, 2004, 8(1): 1-5.
Zhang G Y, Wang L Y, Sun S Y, Wang Z J, Wu R X, Cui R X. Effects of different land use on soil quality factors. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2004, 8(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料, 2003. 北京: 中国农业出版社, 2004.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *China Agricultural Statistics Data, 2003*. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2006. 北京: 中国农业出版社, 2006.
The China Agricultural Yearbook Compilation Committee. *China Agricultural Yearbook. 2006*. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 马文奇, 毛达如, 张福锁. 种植结构调整对化肥消费的影响. 磷肥与复肥, 2001, 16(4): 1-3.
Ma W Q, Mao D R, Zhang F S. Effect of adjusting cropping system on the fertilizer consumption in China. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2001, 16(4): 1-3. (in Chinese)
- [8] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化. 土壤, 2000, (4): 188-193.
Si Y B, Wang S Q, Chen H M. The runoff of nitrogen and phosphorus in farmland and water eutrophication. *Soil*, 2000, (4): 188-193. (in Chinese)
- [9] 高 超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析. 农村生态环境, 2000, 16(4): 24-27.
Gao C, Zhang T L. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu lake watershed and its environmental impact. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 24-27. (in Chinese)
- [10] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
Zhang W L, Wu S H, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese)
- [11] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
Zhang W L, Xu A G, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies III. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1026-1033. (in Chinese)
- [12] 曹 宁, 曲 东, 陈新平, 张福锁, 范明生. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 127-133.
Cao N, Qu D, Chen X P, Zhang F S, Fan M S. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in Northwest China. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(7): 127-133. (in Chinese)
- [13] Kyllingsbæk A, Hansen J F. Development in nutrient balances in Danish agriculture 1980-2004. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007 (1): 9114-9119.
- [14] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社, 1999.
The National Agricultural Technology Extension Service Center. *China Organic Fertilizer Nutrients*. Beijing: China Agricultural Press, 1999. (in Chinese)
- [15] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料资源. 北京: 中国农业出版社, 1999.
The National Agricultural Technology Extension Service Center. *China Organic Fertilizer Resources*. Beijing: China Agricultural Press, 1999. (in Chinese)
- [16] 高祥照, 申 眺, 郑 义. 肥料实用手册. 北京: 中国农业出版社, 2002.
Gao X Z, Shen T, Zheng Y. *Fertilizer Practice Book*. Beijing: China Agricultural Press, 2002. (in Chinese)
- [17] 中国化工企业管理协会. 中国肥料实用手册. 北京: 中国国际广播音像出版社, 2006.
China Chemical Industry Management Committee. *China Fertilizer Practice Book*. Beijing: China and International Broadcasting Video Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 张玉星. 果树栽培学各论. 北京: 中国农业科学出版社, 2006.
Zhang Y X. *Fruit Culture Science*. Beijing: China Agricultural Science Press, 2006. (in Chinese)
- [19] 姜远茂, 张宏彦, 张福锁. 北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
Jiang Y M, Zhang H Y, Zhang F S. *The Theory and Practice on*

- Nutrient Resources Integration Management of Defoliation Fruit Trees in the North*. Beijing: China Agricultural University Press, 2007. (in Chinese)
- [20] 张福锁. 测土配方施肥技术要览. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- Zhang F S. *Determining Soil and Collocating Prescription' Technology Outline*. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. (in Chinese)
- [21] 时新玲, 李志军, 王 锐. 土壤磷扩散的影响因素研究. 水土保持通报, 2003, 23(5): 15-18.
- Shi X L, Li Z J, Wang R. Research on impact factors of phosphorus diffusion in soil. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(5): 15-18. (in Chinese)
- [22] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 142-146.
- Lü J L, Fortune S, Brookes P C. Research on phosphorus leaching from soil and its olsen-p “shreshold volume”. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 142-146. (in Chinese)
- [23] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 李浩浩, 李贵桐, 林启美. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值. 生态学报, 2004, 24(10): 2275-2280.
- Zhong X Y, Zhao X R, Bao H J, Li H H, Li G T, Lin Q M. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2275-2280. (in Chinese)
- [24] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 鲍华军, 李浩浩, 熊桂荣, 林启美. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 II. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系. 生态学报, 2006, 26(9): 3011-3017.
- Zhao X R, Zhong X Y, Li G T, Bao H J, Li H H, Xiong G R, Lin Q M. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils II. The relationships between soil properties, P adsorption characteristics and the leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3011-3017. (in Chinese)
- [25] Hughes S, Reynolds B, Bell S A, Gardner C. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils. *Soil Use and Management*, 2000, 16: 206-210.
- [26] Jordan C, McGuckin S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations. *Soil Use and Management*, 2000, 16: 27-35.

(责任编辑 李云霞)