

# 山东省苹果园磷素投入调查及磷环境负荷风险分析

朱占玲, 夏 营, 刘晶晶, 葛顺峰\*, 姜远茂\*

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

**摘 要:** 以山东省苹果园土壤基础地力调查、农户肥料投入量调查和统计数据为基础, 采用磷盈余法从区域角度分析了山东省胶东、鲁中南和鲁西南苹果产区果园生产体系中土壤磷素输入输出特点、磷养分盈余和土壤磷环境负荷风险。结果表明, 山东省苹果园磷肥平均投入量 ( $P_2O_5$ , 下同) 为  $676.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中无机化肥投入的磷为  $477.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 占总投入的比例高达 70.60%。不同产区间磷素投入存在显著差异, 磷投入量以胶东苹果产区最高, 为  $776.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中无机化肥带入的磷占总投入的 69.14%, 为 3 个产区最低; 鲁西南苹果产区磷投入量最低, 为  $348.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 但无机化肥带入的磷占总投入的比例最高 (82.95%)。山东省 97.82% 的苹果园磷素处于盈余状态, 平均盈余量为  $407.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中胶东苹果产区最高 ( $615.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、鲁中南苹果产区次之 ( $342.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 鲁西南苹果产区最低 ( $263.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。胶东、鲁中南和鲁西南苹果产区苹果园土壤 Olsen-P 含量高于风险阈值 ( $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的样本比例分别为 67.34%、40.51% 和 19.13%。整体来看, 山东苹果园土壤 Olsen-P 含量超过风险阈值的样本比例高达 56.69%, 高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量为  $108.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是土壤磷淋失环境风险临界值的 2.17 倍。

**关键词:** 苹果; 果园; 磷素投入; 磷素盈余; 环境负荷

**中图分类号:** S 661.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2017) 01-0097-09

## Analysis of Soil Phosphorus Input and Phosphorus Environment Load Risk in Major Apple Production Regions of Shandong Province

ZHU Zhanling, XIA Ying, LIU Jingjing, GE Shunfeng\*, and JIANG Yuanmao\*

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** Based on the data collection through soil fertility survey of apple orchards, farmer interviewing and agricultural statistics database, the characteristics of P input, surplus and P load were studied using nutrient balance method at major apple production regions in Shandong Province. The results showed that the average application rate of P fertilizer ( $P_2O_5$ ) was  $676.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the P through inorganic fertilizer application was  $477.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (70.60% of the total P input). The characteristic of P

**收稿日期:** 2016-08-29; **修回日期:** 2016-12-05

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目 (ZR2015PC001); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201100); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-28)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: geshunfeng210@126.com; ymjiang@sdau.edu.cn)

input was significantly difference between the three different regions. The highest P input rate ( $776.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was found in Jiaodong apple production region, and the percentage of chemical phosphorus was 69.14%, which was the lowest in the three regions; the lowest P input rate ( $348.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was found in Southwestern area of Shandong, and the percentage of chemical phosphorus was 82.95%, which was the highest in the three regions. P surplus was investigated in the 97.82% of surveyed orchards, with the average amount of  $407.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the highest P surplus rate was found in Jiaodong apple production region ( $615.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), followed by Central south area of Shandong ( $342.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), and South western area of Shandong ( $263.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was the lowest. Soil Olsen-P level in 67.34%, 40.51%, and 19.13% in the surveyed orchards had been over the risk threshold level of Olsen-P ( $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) in Jiaodong, Central south area of Shandong, and South western area of Shandong apple production region, respectively. Overall, up to 56.69% of the apple orchards exist phosphorus environment risk in Shandong Province, and the soil Olsen-P content in these orchards was  $108.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which 2.17 times of the risk threshold level of P.

**Keywords:** apple; orchard; phosphorus input; phosphorus surplus; phosphorus environment load risk

中国苹果园平均纯磷施用量已由 2008 年的  $181.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  增加到 2013 年的  $238.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 呈逐年增加趋势 (国家发展和改革委员会价格司, 2014)。磷肥投入的不断增多、土壤磷的不断累积和土体磷淋失及其对水体富营养化的影响, 越来越引起人们的重视。北京平谷区果树、蔬菜和粮食作物的磷素淋失风险研究表明, 7.7%的粮田、44.0%的菜田和 33.6%的果园土壤磷淋失风险较高, 尤其果菜等经济作物施用有机肥所带来的磷累积问题越来越突出 (柏兆海 等, 2011)。曹宁等 (2006) 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广泛重视。在欧美发达国家, 养分平衡状况已成为养分管理和环境政策制定的重要依据 (Kyllingsbæk & Hansen, 2007)。然而中国在区域尺度上对苹果园磷养分平衡状况及其对土壤磷负荷影响的研究还不够。苹果是中国第一大水果, 山东是中国苹果的优势产区, 2013 年平均单产高达  $30.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (国家数据库), 居全国第一位, 在农民增收致富的过程中发挥了重要作用。

作者拟通过土壤调查与农户调查, 结合相关统计资料, 从大区域尺度上对山东省苹果园磷素平衡盈余状况进行研究, 分析区域磷素投入特征, 探讨磷素投入对土壤磷环境负荷风险的影响, 以期对山东苹果园磷素有效管理提供理论依据, 为实现化肥零增长提供数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

山东省的气候属暖温带湿润半干旱大陆性季风气候, 年降水量在  $550 \sim 950 \text{ mm}$  之间, 全年降水量有 60% ~ 70%集中于夏季; 年平均气温  $11 \sim 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 全年无霜期  $180 \sim 220 \text{ d}$ ; 光照充足, 年光照时数  $2290 \sim 2890 \text{ h}$ ; 山地和丘陵约占总面积的 30%, 平原约占 55%, 其他占 15%; 山东省果树种植面积为  $63.39 \text{ 万 hm}^2$ , 其中苹果为  $30.34 \text{ 万 hm}^2$ , 占全省果园面积的 47.86%; 苹果园土壤类型主

要有潮土、棕壤和褐土。

## 1.2 布点方法

山东省苹果主产区主要分布在胶东半岛（烟台、威海、青岛）、鲁中南（淄博、临沂）和鲁西南（聊城、菏泽），这 3 个区域的苹果种植面积分别占全省苹果总栽培面积的 56.73%、12.62%和 9.31%。确定每个生产区域的调查点数量时综合考虑调查区域苹果园总面积和地形，平原每 200 hm<sup>2</sup> 设置 1 个调查点，丘陵和山地每 266.7 hm<sup>2</sup> 设置 1 个调查点。确定调查点时首先考虑选择盛果期苹果园，然后再综合考虑地形和土壤类型，确保选定的调查点的地形和土壤类型的分布频率基本与该区域一致。最终确定的胶东半岛、鲁中南和鲁西南苹果产区的调查点数量分别为 646、158 和 115 个，总计 919 个。考虑到果树根系较深，土壤采样深度为 0~30 cm。

## 1.3 调查内容及分析方法

采用实地农户问卷的方法，调查近 3 年苹果种植面积、产量水平、地貌类型、土壤类型、土壤质地、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。考虑到农户分散经营的特点，采集调查果园的土壤样品时按照以下方法进行：面积小于 2 000 m<sup>2</sup> 的苹果园，按“S”形选取 7 个采样株，面积为 2 000~6 667 m<sup>2</sup> 的苹果园，按“X”形选取 11 个采样株，面积大于 6 667 m<sup>2</sup> 的苹果园，按“米”字形选取 16 个采样株，每个采样株所占面积内均匀布 3 个采样点（树冠投影处 1 个，树冠投影处内、外 40 cm 各 1 个），避开施肥沟；取 0~30 cm 的土壤样品，所有采样点均匀混合后按四分法取样，装袋带回，经风干后过筛装袋备用。土壤样品 Olsen-P 测定采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> (pH 8.5) 浸提，钼蓝比色法分析。

## 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》和《中国有机肥料资源》（全国农业技术推广服务中心，1999a, 1999b）的参数汇总进行估算（以鲜基计）。

磷素养分投入量计算包括来自化肥和来自有机肥的量，养分的总投入量  $I_p = C_i \times C_{ip} + M_i \times M_{ip}$ ， $C_i$  为  $i$  种化学肥料的投入量； $C_{ip}$  为  $i$  种化学肥料中的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 养分含量； $M_i$  为  $i$  种有机肥料的投入量； $M_{ip}$  为  $i$  种有机肥料 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 养分含量。

根据各产区的平均磷投入量和各产区的苹果种植面积，加权平均得出山东省苹果园磷投入量。

苹果园磷养分盈余量 (kg·hm<sup>-2</sup>) = 磷素养分投入量 (kg·hm<sup>-2</sup>) - 果实收获带走量 (kg·hm<sup>-2</sup>)。其中，每生产 100 kg 产量吸收的磷养分量取值 0.35 kg 进行估算（姜远茂 等，2007）。因此，果实收获带走量 (kg·hm<sup>-2</sup>) = 果实产量 (kg·hm<sup>-2</sup>) / 100 × 0.35。

采用 Excel 2007 和 SPSS121011 进行数据处理和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果园磷养分投入状况

由表 1 和图 1 可见，不同生产区域苹果园化学磷肥投入特点显著不同。

胶东苹果产区化学磷肥投入量 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 平均为 536.89 kg·hm<sup>-2</sup> (表 1)，其中投入量小于 150 kg·hm<sup>-2</sup> 的样本仅占 4.64%，投入量为 150~300 kg·hm<sup>-2</sup> 的样本为 14.09%，300~450 kg·hm<sup>-2</sup> 的样

本为 15.79%，48.76%的苹果园化学磷肥投入量处于 450 ~ 600 kg · hm<sup>-2</sup> 之间，超过 600 kg · hm<sup>-2</sup> 的比例为 16.72%（图 1）。

鲁中南苹果产区化学磷肥投入量平均为 348.42 kg · hm<sup>-2</sup>（表 1）；其中（图 1）53.16%的苹果园投入量处于 300 ~ 450 kg · hm<sup>-2</sup> 之间，小于 300 kg · hm<sup>-2</sup> 的样本占 24.69%，450 ~ 600 kg · hm<sup>-2</sup> 样本为 13.92%，超过 600 kg · hm<sup>-2</sup> 的比例为 8.23%。

鲁西南苹果产区化学磷肥投入量平均为 289.43 kg · hm<sup>-2</sup>（表 1），其中（图 1）70.44%的苹果园投入量分布在 150 ~ 450 kg · hm<sup>-2</sup> 之间，小于 150 kg · hm<sup>-2</sup> 的占 14.77%，450 ~ 600 kg · hm<sup>-2</sup> 的为 9.57%，超过 600 kg · hm<sup>-2</sup> 的仅为 5.22%。从整体来看，山东省苹果园化学磷肥投入量平均为 477.36 kg · hm<sup>-2</sup>，处于较高水平。

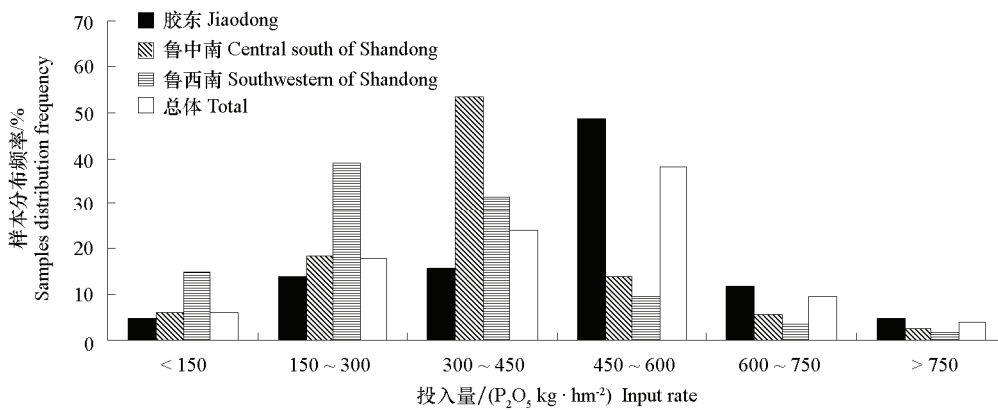
**表 1 山东省不同产区苹果园磷素 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 投入状况**

**Table 1 The phosphorus (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) input status in different production regions of apple orchards in Shandong Province**

区域 Region	来自化肥 Phosphorus from chemical fertilizer			来自有机肥 Phosphorus from manure			总投入/ Total input (kg · hm <sup>-2</sup> )
	投入量/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Input rate	平均/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Average	占总投入/% Percentage of chemical phosphorus	投入量/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Input rate	平均/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Average	占总投入/% Percentage of manure phosphorus	
胶东 Jiaodong	126.32 ~ 1 388.37	536.89 a	69.14	0 ~ 471.43	239.63 a	30.86	776.52
鲁中南 Central south area of Shandong	79.86 ~ 924.62	348.42 b	74.68	0 ~ 365.32	118.12 b	25.32	466.54
鲁西南产区 Southwestern area of Shandong	83.21 ~ 821.07	289.43 c	82.95	0 ~ 323.21	59.47 c	17.05	348.90
总体 Total	79.86 ~ 1 388.37	477.36	70.60	0 ~ 471.43	198.81	29.40	676.17

注：同一列不同小写字母表示在 0.05 水平有显著差异。下同。

Note: Different letters in the same column stand for the significant difference at the 0.05 level. The same below.



**图 1 山东省 3 个产区苹果园来自化肥的磷养分投入分布频率**

**Fig. 1 The sample distribution frequency of chemical phosphorus fertilizer in three apple production regions in Shandong Province**

由表 2 可见，山东省苹果园有机肥施用种类主要是商品有机肥，占 56.53%，其次是鸡粪、羊粪等畜禽粪，生物有机肥比例较低，仅为 2.02%，有 5.32%的苹果园不施有机肥。

表 2 山东省苹果园有机肥投入结构

Table 2 The application structure of organic fertilizer of apple orchards in Shandong Province

有机肥 Organic fertilizer	占比/% Percentage
商品有机肥 Commercial organic fertilizer	56.53
鸡粪 Chicken manure	9.73
羊粪 Sheep manure	9.28
猪粪 Pig manure	6.83
牛粪 Cattle manure	4.72
土杂肥 Miscellaneous	3.21
生物有机肥 Bio-organic fertilizer	2.02
其他 Others	2.36
不施肥 Non-application	5.32

根据有机肥施用量及其磷含量进行计算, 不同产区间有机肥磷的投入存在显著差异 (图 2)。胶东苹果产区有机肥磷的投入量平均为  $239.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 1), 其中小于  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的样本仅占 5.73%, 而超过  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的比例高达 40.71% (图 2)。

鲁中南苹果产区有机肥磷的投入量平均为  $118.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 1), 其中 43.04% 的苹果园有机肥磷投入量处于  $100 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间, 小于  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的占 10.13%, 超过  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的仅为 3.16% (图 2)。

鲁西南苹果产区有机肥磷的投入量平均为  $59.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 1), 其中 41.74% 的苹果园有机肥磷投入量小于  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $50 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  样本为 29.57%, 超过  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的仅为 1.73% (图 2)。

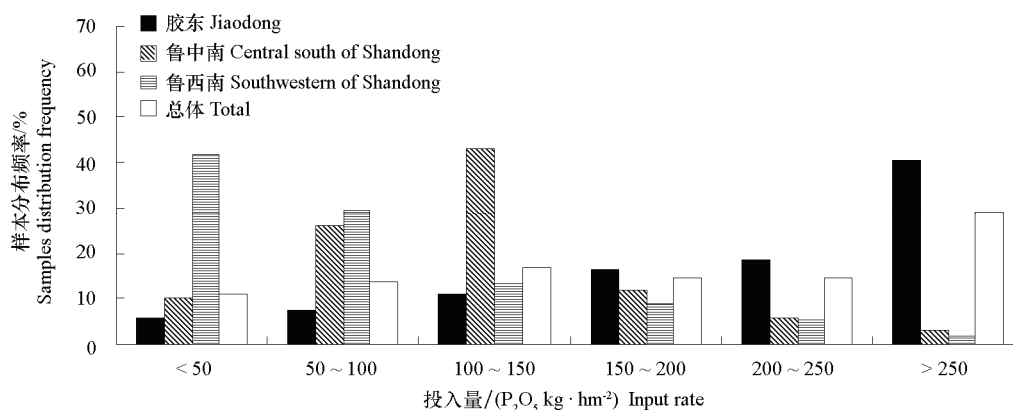


图 2 山东省 3 个产区苹果园来自有机肥的磷养分投入量及分布频率

Fig. 2 The sample distribution frequency of organic phosphorus fertilizer in three apple production regions in Shandong Province

从整体来看, 山东省苹果园来自有机肥磷的投入量平均为  $198.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 1)。

从表 1 可见, 山东省苹果园磷投入水平总体较高, 平均为  $676.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 不同产区间差异显著, 胶东产区最高, 为  $776.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其次为鲁中南产区, 为  $466.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 鲁西南产区最低, 为  $348.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。3 个不同产区中, 来自化肥的磷养分投入均远高于来自有机肥的, 占磷素总投入的比例为 69.14% ~ 82.95%, 以鲁西南苹果产区最高。

## 2.2 苹果园磷养分盈余状况分析

山东省苹果园磷养分盈余量高达 263.92 ~ 615.62 kg · hm<sup>-2</sup>，平均为 407.45 kg · hm<sup>-2</sup>，处于较高水平（表 3）。不同苹果产区间存在显著差异，胶东产区最高，鲁中南产区次之，鲁西南产区最低。胶东产区苹果园存在磷养分盈余的样本比例高达 99.07%，盈余量超过 500 kg · hm<sup>-2</sup>的为 48.28%，平均盈余量为 615.62 kg · hm<sup>-2</sup>，最大盈余量为 1 607.80 kg · hm<sup>-2</sup>；鲁中南产区苹果园平均磷养分盈余量为 342.81 kg · hm<sup>-2</sup>，其中 45.57%的苹果园磷养分盈余量处于 250 ~ 500 kg · hm<sup>-2</sup>之间。鲁西南产区苹果园平均磷养分盈余量为 263.92 kg · hm<sup>-2</sup>，其中 53.04%的苹果园处于 250 ~ 500 kg · hm<sup>-2</sup>之间，超过 500 kg · hm<sup>-2</sup>的仅为 8.70%，为胶东苹果产区的 18%。

**表 3 山东省不同产区苹果园磷养分盈余状况分析**  
**Table 3 The phosphorus surplus status in different production regions of apple orchards in Shandong Province**

区域 Region	样本分布频率/% Samples distribution frequency						盈余量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) Phosphorus surplus	
	< 0	0 ~ 250	250 ~ 500	500 ~ 750	750 ~ 1 000	> 1 000	平均 Average	范围 Range
胶东 Jiaodong	0.93	17.35	33.44	22.45	18.55	7.28	615.62 a	- 268.32 ~ 1 607.80
鲁中南 Central south area of Shandong	3.16	20.25	45.57	16.46	10.13	4.43	342.81 b	- 181.32 ~ 1 095.46
鲁西南 Southwestern area of Shandong	7.83	30.43	53.04	6.96	1.74	0	263.92 c	- 158.63 ~ 910.39
总体 Total	2.18	19.48	37.98	19.48	15.02	5.88	407.45	

注：< 0、0 ~ 250、250 ~ 500、500 ~ 750、750 ~ 1 000、> 1 000 为磷养分投入量 (kg · hm<sup>-2</sup>) 范围。

Note: < 0, 0 ~ 250, 250 ~ 500, 500 ~ 750, 750 ~ 1 000, and > 1 000 were the range of phosphorus input rate (kg · hm<sup>-2</sup>).

## 2.3 苹果园生产体系磷素环境负荷状况

参照前人的研究结果（钟晓英 等，2004；赵小蓉 等，2006；严正娟，2015），将山东省苹果园土壤磷淋失环境风险临界值确定为 Olsen-P 50 mg · kg<sup>-1</sup>。从表 4 可以看出，目前山东苹果园土壤磷存在较大的潜在环境风险，土壤 Olsen-P 含量超过临界值的样本比例高达 56.69%，高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量为 108.34 mg · kg<sup>-1</sup>，是土壤磷淋失环境风险临界值的 2.17 倍。

**表 4 山东省不同产区苹果园土壤磷环境负荷状况**  
**Table 4 The load status of soil environmental phosphorus in apple orchards in Shandong Province**

区域 Region	样本数量 Number	分布频率/% Samples distribution frequency	平均含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) Average content	风险临界值倍数 Multiple of the risk threshold level
胶东 Jiaodong	435	67.34	113.24	2.26
鲁中南 Central south area of Shandong	64	40.51	88.46	1.77
鲁西南 Southwestern area of Shandong	22	19.13	69.38	1.39
总体 Total	521	56.69	108.34	2.17

注：磷淋失风险临界值 (Olsen-P) 为 50 mg · kg<sup>-1</sup>。

Note: The risk threshold level of Olsen-P was 50 mg · kg<sup>-1</sup>.

不同苹果产区土壤磷素环境负荷存在显著差异，以胶东产区最高，高于风险临界值的样本占本区的 67.34%，高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量为 113.24 mg · kg<sup>-1</sup>，是土壤磷淋失环境风险临界值的 2.26 倍；其次是鲁中南产区，高于风险临界值的样本占本区的 40.51%，高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量为 88.46 mg · kg<sup>-1</sup>，是土壤磷淋失环境风险临界值的 1.77 倍；鲁西南产区土

壤磷环境负荷较低, 高于风险临界值的样本仅占本区的 19.13%, 高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量为  $69.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是土壤磷淋失环境风险临界值的 1.39 倍。

### 3 讨论

化肥作为果树增产的决定因子在中国贫瘠的土壤条件下发挥了举足轻重的作用。然而, 中国苹果“上山下滩”的栽培特点是土壤保肥能力较差, 肥料流失严重, 再加上果农对大果和高产的片面追求, 形成了化肥用量不断加大与土壤质量不断下降的恶性循环, 导致了我国苹果园单位面积肥料投入量不断增加。山东省作为中国苹果生产优势产区, 肥料投入一直处于较高水平。对山东省 919 个苹果园的调查分析结果表明, 山东省苹果园平均化学磷投入量高达  $\text{P}_2\text{O}_5$   $477.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比陕西苹果园化肥磷投入量高  $111.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (王小英 等, 2013), 是国外苹果园磷肥推荐投入量 ( $100 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 的 3.18 ~ 4.77 倍 (Porro et al., 2013; Hassine & Mustapha, 2014; Jivan & Sala, 2014), 可见山东省苹果园的化学磷肥投入严重过量。不同区域苹果经济效益位次为胶东苹果产区 > 鲁中南 > 鲁西南, 与各区域的磷肥投入水平一致。可见, 高效集约化经济作物栽培模式一方面推动当地社会经济的发展, 另一方面也反过来驱动了肥料投入的增加, 由此带来的环境风险日益突出。本研究中还发现, 胶东苹果产区有机肥提供的磷所占比例为 30.86%, 而鲁西南仅为 17.05%, 可见在果树效益好、集约化水平高的地区有机肥提供的磷对土壤磷素的贡献越来越大。许多研究表明有机肥的施用可以促进磷素移动性的增加, 从而造成磷的淋失 (朱晓晖, 2011; 李渝 等, 2016)。

作物生产体系磷养分盈余及磷素负荷量与施磷肥之间显著正相关, 磷肥的过量施用是磷盈余量及负荷增加的主要原因 (Peñuelas et al., 2013; Yan et al., 2013; 李渝 等, 2016)。本研究中还发现, 山东省苹果园磷素投入量显著高于苹果果实带走量, 未被植株利用的磷大量残留于土壤中, 造成苹果园土壤磷养分富集, 对土壤环境和地下水安全的影响加大, 尤其是在磷肥投入水平较高的胶东苹果产区, 土壤磷盈余量高达  $\text{P}_2\text{O}_5$   $615.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 远高于河北的  $317.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、陕西的  $303.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和山西的  $330.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (卢树昌, 2009)。

传统观点认为磷在土壤溶液中的扩散速率很慢, 而且施入到土壤中的活性磷很快就被土壤颗粒吸附或者通过化合作用成为结合态磷而被土壤固定, 因此磷素在土壤中一般不容易从农田中损失。但是越来越多的研究证明, 长期过量化肥或有机肥投入, 会导致土壤磷吸附量达到饱和, 进而改变土壤中磷素转化的化学平衡, 降低了土壤对磷的固持能力, 导致磷的流失 (吕家珑 等, 2003; Dou et al., 2009; MacDonald et al., 2011)。钟晓英等 (2004) 和赵小蓉等 (2006) 对中国 23 个土壤磷素淋失风险阈值进行了研究, 指出北方石灰性土壤、潮土等土壤磷淋失风险临界值平均为 Olsen-P  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 严正娟 (2015) 汇总分析中国不同区域菜田土壤磷素淋溶的土壤 Olsen-P “突变点”在  $50 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 超出临界值后土壤磷淋失量显著增加。目前, 山东苹果园土壤 Olsen-P 含量超过临界值的样本比例高达 56.69%, 且高于临界值的样本土壤 Olsen-P 平均含量是土壤磷淋失环境风险临界值的 2.17 倍, 表明土壤磷存在较大的潜在环境风险。不同区域间存在显著差异, 胶东苹果产区土壤磷淋失环境风险最高, 其次是鲁中南苹果产区, 鲁西南苹果产区较低, 这也与磷素投入水平和磷盈余量一致。除了磷投入量会直接影响土壤磷淋失环境风险外, 还与果园立地条件有很大关系, 如土层厚度、土壤酸碱性、土壤质地、土壤有机质含量、地形等因素也会影响土壤磷的淋失 (Wang et al., 2012; Bai et al., 2013)。Hughes 等 (2000) 和 Jordan 等 (2000) 研究认为土壤有机质含量显著影响土壤磷的吸附与解吸, 当有机质含量低于 10% 时, 土壤磷淋洗临界值会降低, 从

而加大土壤磷淋失的风险。山东省苹果园土壤有机质含量普遍偏低 (Ge et al., 2013), 再加上胶东和鲁中南苹果产区多为丘陵山地, 这种立地条件可能会进一步降低磷淋失阈值, 相应地会加大磷的淋洗风险。

因此, 目前山东省苹果园应加大磷养分管理力度, 结合国家测土配方施肥行动, 根据土壤养分供应状况、树体需求状况以及果园立地条件, 确定合理施肥量, 做到有机和无机相结合, 同时配套生草、覆盖等养分高效利用的栽培技术, 提高磷肥肥效, 降低果园磷素的环境负效应。

## References

- Bai Z, Li H, Yang X, Zhou B, Shi X, Wang B, Li D, Shen J, Chen Q, Qin W. 2013. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, 372: 27 - 37.
- Bai Zhao-hai, Wan Qi-yu, Li Hai-gang, Duan Zeng-qiang, Chen Qing. 2011. Evaluation of soil phosphorus accumulation and loss risk on arable land at county level: the example of Pinggu District, Beijing City, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 30 (9): 1853 - 1860. (in Chinese)
- 柏兆海, 万其宇, 李海港, 段增强, 陈清. 2011. 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. *农业环境科学学报*, 30 (9): 1853 - 1860.
- Cao Ning, Qu Dong, Chen Xin-ping, Zhang Fu-suo, Fan Ming-sheng. 2006. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in Northwest China. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 34 (7): 127 - 133. (in Chinese)
- 曹宁, 曲东, 陈新平, 张福锁, 范明生. 2006. 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)*, 34 (7): 127 - 133.
- Dou Z, Romberg C, Toth J, Wang Y, Sharpley A, Boyd S E, Chen C, Williams D, Xu Z. 2009. Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (1): 93 - 101.
- Ge S F, Ren Y H, Peng L, Xu H G, Ji M M, Wei S C, Jiang Y M. 2013. Characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio in Chinese apple orchards. *Open Journal Soil Science*, 3: 213 - 217.
- Hassine H B, Mustapha A B. 2014. Effect of the phosphate fertilization on the production of apple trees planted in calcareous alluvial soil. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2: 812 - 817.
- Hughes S, Reynolds B, Bell S A, Gardner C. 2000. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils. *Soil Use and Management*, 16: 206 - 210.
- Jiang Yuan-mao, Zhang Hong-yan, Zhang Fu-suo. 2007. The northern deciduous fruit trees of nutrient resource integrated management theory and practice. Beijing: China Agricultural University Press: 27 - 30. (in Chinese)
- 姜远茂, 张宏彦, 张福锁. 2007. 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: 27 - 30.
- Jivan C, Sala F. 2014. Relationship between tree nutritional status and apple quality. *Hort Sci (Prague)*, 41: 1 - 9.
- Jordan C, McGuckin S O, Smith R V. 2000. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations. *Soil Use and Management*, 16: 27 - 35.
- Kyllingsbæk A, Hansen J F. 2007. Development in nutrient balances in Danish agriculture 1980—2004. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1: 9114 - 9119.
- Li Yu, Liu Yan-ling, Zhang Ya-rong, Shen Yan, Zhang Wen-an, Jiang Tai-ming. 2016. Response of Olsen-P to P balance in yellow soil upland of southwestern China under long-term fertilization. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27 (7): 2321 - 2328. (in Chinese)
- 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 申艳, 张文安, 蒋天明. 2016. 长期施肥条件下西南黄壤旱地有效磷对磷盈亏的响应. *应用生态学报*, 27 (7): 2321 - 2328.
- Lü Jia-long, Fortune S, Brookes P C. 2003. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-p "shreshold volume". *Journal of Agro-Environment Science*, 22 (2): 142 - 146. (in Chinese)
- 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 2003. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷 "突变点" 研究. *农业环境科学学报*, 22 (2): 142 - 146.



- Lu Shu-chang. 2009. Characteristics of nutrient input and the influences on soil quality intensive orchards of China [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Chinese Agricultural University. (in Chinese)
- 卢树昌. 2009. 我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响[博士论文]. 北京: 中国农业大学.
- MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, Ramankutty N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the work's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 108 (7): 3086 - 3091.
- National Development and Reform Commission, Price Department. 2014. National agricultural cost-benefit compilation 2014. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)
- 国家发展和改革委员会价格司. 2014. 全国农产品成本收益资料汇编 2014. 北京: 中国统计出版社.
- Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, Ciais P, van der Velde M, Bopp L, Boucher O, Godderis Y, Hinsinger P, Llusia J, Nardin E, Vicca S, Obersteiner M, Janssens I A. 2013. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 4: 2934.
- Porro D, Pantezzi T, Pedo S, Bertoldi D. 2013. Interaction of fertigation and water management on apple tree productivity, orchard nutrient status, and fruit quality. *Acta Hort*, 984: 203 - 210.
- The National Agricultural Technology Extension Service Center. 1999a. China organic fertilizer nutrients. Beijing: China Agricultural Press. (in Chinese)
- 全国农业技术推广服务中心. 1999a. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社.
- The National Agricultural Technology Extension Service Center. 1999b. China organic fertilizer resources. Beijing: China Agricultural Press. (in Chinese)
- 全国农业技术推广服务中心. 1999b. 中国有机肥料资源. 北京: 中国农业出版社.
- Wang Xiao-ying, Tong Yan-an, Liu Fen, Zhao Zuo-ping. 2013. Evaluation of the situation of fertilization in apple fields in Shaanxi Province. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19 (1): 206 - 213. (in Chinese)
- 王小英, 同延安, 刘 芬, 赵佐平. 2013. 陕西省苹果施肥状况评价. *植物营养与肥料学报*, 19 (1): 206 - 213.
- Wang Y T, Zhang T Q, O'Halloran I P, Tan C S, Hu Q C, Reid D K. 2012. Soil tests as risk indicators for leaching of dissolved phosphorus from agricultural soils in Ontario. *Soil Science Society of America Journal*, 76 (1): 220 - 229.
- Yan Z, Liu P, Li Y, Ma L, Alva A, Dou Z, Chen Q, Zhang F. 2013. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: over-fertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality*, 42 (4): 982 - 989.
- Yan Zheng-juan. 2015. Effects of manure application on the form and mobility of soil phosphorus in vegetable greenhouse[Ph. D. Dissertation]. Beijing: China Agricultural University. (in Chinese)
- 严正娟. 2015. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[博士论文]. 北京: 中国农业大学.
- Zhao Xiao-rong, Zhong Xiao-ying, Li Gui-tong, Bao Hua-jun, Li Hao-hao, Xiong Gui-rong, Lin Qi-mei. 2006. 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*, 26 (9): 3011 - 3017. (in Chinese)
- 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 鲍华军, 李浩浩, 熊桂荣, 林启美. 2006. 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*, 26 (9): 3011 - 3017.
- Zhong Xiao-ying, Zhao Xiao-rong, Bao Hua-jun, Li Hao-hao, Li Gui-tong, Lin Qi-mei. 2004. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica*, 24 (10): 2275 - 2280. (in Chinese)
- 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 李浩浩, 李贵桐, 林启美. 2004. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值. *生态学报*, 24 (10): 2275 - 2280.
- Zhu Xiao-hui. 2011. Effects of manure application on soil phosphorus components and phosphorus losses of farmland [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. (in Chinese)
- 朱晓晖. 2011. 施用有机肥对土壤磷组分和农田磷流失的影响[博士论文]. 北京: 中国农业科学院.