

减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响

李若楠^{1,2}, 武雪萍¹, 张彦才², 王丽英², 翟凤芝², 陈丽莉², 史建硕², 徐强胜², 黄绍文¹

¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;

²河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要:【目的】针对过量施磷问题, 定位研究日光温室蔬菜生产磷肥减施潜力, 明确适宜施磷范围。【方法】以北方温室蔬菜主栽种类黄瓜和番茄为研究对象, 采用冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄种植模式, 在基础土壤有效磷 ($O_{1sen}-P$) $40.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下, 设计不施磷肥 (P_0)、减量施磷 (P_1) 和农民常规施磷量 (P_2) 3个磷肥用量水平。 P_0 、 P_1 、 P_2 处理对应黄瓜单季施磷肥 (P_2O_5) 0 、 300 、 $675\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 番茄单季施磷肥 (P_2O_5) 0 、 225 、 $675\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。3年6季定位研究蔬菜生产磷素盈亏、土壤有效磷供应与迁移, 分析产量变化, 推荐合理施磷范围。【结果】(1) 农民常规施磷量年盈余磷 $480.0\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 每盈余磷 $100\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$ 主根区 $0-20\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 增加 $2.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 3年 $0-20\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 平均含量 $70.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2010年番茄季 $0-20\text{ cm}$ 土层磷素饱和度 (DPS_{M3}) 为 80% , 磷素土壤深层迁移明显。(2) 减量施磷较农民常规磷量下降 61.1% , 3年磷素盈余量下降 $71.0\%-77.3\%$, $0-20\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 含量下降 $18.6\%-43.5\%$, 3年均值为 $49.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 接近瓜果类蔬菜 $O_{1sen}-P$ 农学阈值, 关键生育期磷素吸收量无显著变化, 产量保持在中高水平不降低; 经过3年种植, $0-20\text{ cm}$ 土层 DPS_{M3} 下降 21 个百分点, $20-60\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 平均含量下降 $9.3\%-30.1\%$, 减施磷肥有效缓解了土壤磷素深层迁移。(3) 不施磷肥导致土壤磷素亏缺, 蔬菜从土壤中每攫取磷 $100\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_0 处理 $0-20\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 含量下降 $3.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 3年 $0-20\text{ cm}$ 土层 $O_{1sen}-P$ 平均含量 $30.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 虽产量没有显著降低, 但是2008年番茄高产下 ($140\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 磷素吸收量较 P_1 、 P_2 处理下降 $19.8\%-30.0\%$, 产量呈降低趋势。(4) 依据上述推荐: 土壤有效磷含量 $\geq 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的温室, 冬春茬黄瓜产量水平 $170\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下施用 P_2O_5 不宜超过 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 秋冬茬番茄产量水平 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下施用 P_2O_5 不宜超过 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。【结论】华北平原温室蔬菜生产减施磷肥潜力较大。对于种植一段时间 (≥ 3 年) 的温室, 较农民常规减施磷 60% , 可以显著改善磷素盈余状况, 缓解土壤有效磷积累, 降低土壤磷素深层迁移量, 保证黄瓜番茄持续中高产水平生产。

关键词: 温室蔬菜; 减量施磷; 土壤有效磷; 磷素盈亏; 产量

Effects of Reduced Phosphorus Fertilization on Soil Phosphorus Accumulation, Leaching and Utilization in Greenhouse Vegetable Production

LI RuoNan^{1,2}, WU XuePing¹, ZHANG YanCai², WANG LiYing², ZHAI FengZhi², CHEN LiLi²,
SHI JianShuo², XU QiangSheng², HUANG ShaoWen¹

¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081; ²Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051)

收稿日期: 2017-03-15; 接受日期: 2017-05-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0201001)、国家科技支撑计划课题 (2015BAD22B03)、“863”计划 (2013AA102901)、国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201203077)、河北省农林科学院科学技术研究与发展计划 (A2015130101)、河北省农林科学院农业资源高效利用与绿色增长创新团队项目 (F17R01)

联系方式: 李若楠, E-mail: liruonan2004@163.com。张彦才与李若楠为本文同等贡献作者。通信作者武雪萍, E-mail: wuxueping@caas.cn

Abstract: 【Objective】 Excessive application of phosphorus fertilizer is commonly observed in vegetable production in China. The purpose of this study was to investigate the potential of phosphorus fertilization reduction in vegetable production and recommend appropriate phosphorus rates for cucumber and tomato. **【Method】** Cucumber and tomato were widely cultivated in North China, and thus were taken as the research objects. In this study, cropping model was the winter-spring cucumber and autumn-winter tomato double cropping system. The basic Olsen-P level was $40.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Three treatments were designed in this experiment, including a non-phosphorus control (P_0), a reduced phosphorus rate (P_1) and a farmers' conventional phosphorus rate (P_2). In cucumber season, the amounts of P_2O_5 applied in P_0 , P_1 and P_2 treatments were 0, 300, $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The corresponding phosphorus amounts in the tomato season were P_2O_5 0, 225, $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The apparent phosphorus balances, soil phosphorus availability and movement and yield changes among 3 years were collected and analyzed to find out the appropriate phosphorus rates. **【Result】**(1) Phosphorus surplus was $P 480.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and the average Olsen-P content in 0-20 cm soil was $70.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in P_2 treatment during 3 years. Due to the surplus application, the Olsen-P in 0-20 cm soil increased by $2.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when phosphorus surplus increased by $P 100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The DPS_{M3} was 80% at 0-20 cm depth in P_2 treatment and phosphorus leached obviously to deeper soil. (2) Compared to P_2 treatment, the phosphorus application rate decreased by 61.1% and the phosphorus surplus among 3 years reduced by 71.0%-77.3% in P_1 treatment; the Olsen-P contents decreased by 18.6%-43.5% with the average of $49.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ among 3 years, which was close to the critical value of the fruit vegetable production; the average of Olsen-P content decreased by 9.3%-30.1% at 20-60 cm soil depth, and the DPS_{M3} decreased by 21 percentage point, which indicated lower phosphorus leaching in P_1 treatment, and no yield reduction was observed. (3) The Olsen-P in 0-20 cm soil decreased by $3.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when phosphorus uptake increased by $P 100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in P_0 treatment. The average Olsen-P content in 0-20 cm soil was $30.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in P_0 treatment. Although no yield decrease was observed, the phosphorus uptake in 2008 tomato season decreased by 19.8%-30.0% in P_0 treatment. (4) Based on this results, when the soil Olsen-P was above $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, less than $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} P_2O_5$ was recommended for cucumber with yield level of $170 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and not more than $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} P_2O_5$ was recommended for tomato with yield level of $100 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. **【Conclusion】** The reduction of phosphorus fertilizer exhibited a great potential in the greenhouse vegetable production in North China Plain. For greenhouse planted for more than 3 years, 60% phosphorus could be saved and significantly decrease the phosphorus surplus, lessen available phosphorus accumulation, reduce phosphorus leaching and keep vegetable yield at high level.

Key words: greenhouse vegetable; reducing phosphorus rate; soil available phosphorus; phosphorus balance; yield

0 引言

【研究意义】 设施蔬菜生产过量施磷问题普遍存在。中国设施蔬菜单季磷肥平均用量为 $1\ 308 \text{ kg } P_2O_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 达蔬菜需磷量的 13.0 倍^[1]。黄绍文等^[2]调查发现中国温室和大棚菜田平均有效磷 (Olsen-P) 含量分别为 201.1 和 $140.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 80% 以上调查田块 Olsen-P 含量超过适宜值上限 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在河北, 设施黄瓜和番茄栽培磷肥用量高达蔬菜需求量的 15.5 和 28.7 倍, 平均土壤 Olsen-P 含量达 150.1 和 $205.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[3-4]。在山东寿光, 设施菜田年均磷素盈余量高达 $1\ 485 \text{ kgP}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷肥利用率仅 8%^[5]。土壤中过量积累的磷素是水体环境的潜在威胁。一些研究显示设施菜田水溶性磷含量高, 磷素吸附饱和度大, 淋失风险较高。严正娟^[6]研究发现中国设施菜田磷素淋失明显, 20—100 cm 土体水溶性磷含量明显增加, 而且随着设施年限的增加而加剧。吕福堂等^[7]调查显示种植 14 年的日光温室土壤磷素已淋溶至 100 cm 深处, 甚

至更深。然而, 与此形成鲜明对比的是 2010 年中国磷矿石储量仅 370 000 万吨, 按照现在年开采量 6 800 万吨计算, 仅够维持 50 年左右^[8]。合理化设施蔬菜生产磷肥用量, 为磷资源可持续利用提供重要途径。

【前人研究进展】 设施蔬菜减磷研究较少, 并且多集中于番茄生产。低产番茄 (约 $50 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 单季较农民常规减施磷量 70%, 不影响番茄植株生长和产量形成, 显著增加番茄 $>2 \text{ mm}$ 根数和根冠比, 改善果实品质^[9]。中产番茄 ($70\text{—}85 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 单季研究表明, 若追求产量, 则以 P_2O_5 用量 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜; 若以产量为兼顾磷淋溶, 则以 P_2O_5 用量 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜^[10]。LIU 等^[11]通过 4 年 (前茬作物分别为玉米、番茄、玉米、苜蓿) 研究表明滴灌番茄产量水平 $89\text{—}94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 施用 $206 \text{ kg } P_2O_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 较不施磷总产量增加 5%, 施磷对商品产量没有显著影响。中低产 ($125\text{—}130 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 冬春茬黄瓜单季优化施用 $458 \text{ kg } P_2O_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 此基础上减施磷 49% 导致产量显著下降^[12]。LIANG 等^[13]盆栽研究显示在黄瓜苗期供给 $240 \text{ mg } P\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,

之后的生长期不施磷肥,有利于黄瓜生长,提高磷素利用效率。【本研究切入点】目前温室蔬菜减量施磷研究少并以单季结果为主,鲜见连续多年中高产水平下定位试验结果。本研究从磷素平衡角度入手,以增加并维持土壤有效磷供应在适宜范围为目标,探讨减施磷肥效应。【拟解决的关键问题】以中国北方温室蔬菜主栽种类黄瓜和番茄为研究对象,在中高产量水平下3年6季定位研究较农民常规施磷减量后土壤磷素供应与迁移、蔬菜磷素吸收、系统磷素盈亏、产量变化,明确华北平原地区温室蔬菜生产减量施磷潜力,推荐适宜磷肥用量。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试温室位于河北省辛集马庄试验站。该区域属于暖温带半湿润大陆季风气候。供试土壤类型为壤质石灰性潮土。耕层土壤基础理化性质如下:有机质 $15.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ $5.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ $60.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $1.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、容重 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、pH 8.1 (2.5 : 1 v/w 25℃)。0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层基础 Olsen-P 含量分别为 40.2、6.0、2.6、2.5、2.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验始于2008年2月,采用该区域典型冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄种植模式。试验共设计3个施磷水平,分别为不施磷肥 P_0 处理、减量施磷 P_1 处理和农民常规施磷量 P_2 处理。 P_1 处理参考温室黄瓜和番茄目标产量、种植茬口、基础土壤 Olsen-P 测试值推荐施磷量。根据前3年供试农户产量水平,拟定冬春茬黄瓜目标产量为 $170 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,秋冬茬番茄目标产量为 $140 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;按照黄瓜每形成 1000 kg 产量吸收 P 0.7 kg ,明确目标产量下黄瓜需 P $119 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [14];根据本课题组研究,番茄每形成 1000 kg 产量吸收 P 0.35 kg ,明确目标产量下番茄需 P $49 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;供试土壤基础 Olsen-P 含量低于黄瓜、番茄土壤有效磷适中范围 $60\text{—}100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据“增加并维持”的施磷策略,按照蔬菜磷需求量的 1.0—2.0 倍推荐施磷量[15];考虑冬春茬种植季温度有利于土壤磷素供应,按照黄瓜磷素需求量的 1.1 倍推荐施磷,施磷肥 $300 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$;由于秋冬茬种植季内温度逐渐降低,土壤供磷能力转弱,按照番茄需磷量的 2 倍推荐施磷,施 $225 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 。 P_2 处理按照调查所得河北设施蔬菜磷肥平均用量设计,单季投入 $675 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ [3]。3 处理氮肥和钾肥

用量一致,黄瓜季施 N $600\text{-K}_2\text{O}$ $525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,番茄季施 N $450\text{-K}_2\text{O}$ $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

试验为随机区组设计,3次重复,小区面积 10.8 m^2 。为防止小区之间土壤养分和水分相互干扰,试验开始前保持原状土,在小区四周开挖沟槽放入 PVC 板进行隔离。供试磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)。在农民常规管理中,一部分磷肥作为追肥施用,本试验为保证结果仅受施肥量影响而与施肥时期无关, P_1 和 P_2 处理过磷酸钙均在蔬菜定植前全部基施入土。供试氮肥和钾肥分别为尿素(含 N 46%)和硫酸钾(含 K_2O 51%)。

试验为膜下滴灌灌水方式。2008、2009 和 2010 年冬春茬黄瓜季总灌水量分别为 4 170、3 420、3 566 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$;定苗水和缓苗水量按照常规灌溉管理,单次水量 $240\text{—}360 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$;之后从第1次采瓜开始每 5—7 d 滴灌 1 次,单次水量 $120\text{—}180 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$;全生育期共灌溉 19—23 次。2008、2009 和 2010 年秋冬茬番茄季总灌水量分别为 1 350、1 260、1 260 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$;定苗水量按照常规灌溉管理,单次水量 $270\text{—}450 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$;从开花期开始滴灌,每 10—15 d 滴灌 1 次,单次水量 $120\text{—}180 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,进入 11 月下旬后不再进行滴灌操作。全生育期共灌溉 6—8 次。

1.3 样品采集与测试分析

供试黄瓜品种为博美 11 号,番茄品种为金棚 1 号。黄瓜定植于 2008 年 2 月 18 日、2009 年 2 月 27 日、2010 年 2 月 20 日,拉秧于 2008 年 7 月 8 日、2009 年 7 月 4 日、2010 年 7 月 7 日。番茄定植于 2008 年 8 月 12 日、2009 年 8 月 10 日、2010 年 9 月 1 日,拉秧于 2008 年 12 月 31 日、2009 年 12 月 27 日、2011 年 2 月 14 日。在黄瓜苗期(2008 年 3 月 11 日、2009 年 3 月 30、2010 年 4 月 1 日)、盛瓜期(2008 年 5 月 15 日、2009 年 5 月 18 日、2010 年 5 月 20 日)、拉秧期(上述拉秧时间)以及番茄苗期(2008 年 9 月 18 日、2009 年 9 月 16 日、2010 年 10 月 2 日)、拉秧期(上述拉秧时间)各小区选取两株代表性样品,分根、茎、叶烘干测定干物重。全生育期各小区选取 5 株植株采集打下叶片,烘干测定干重。关键生育期选取商品果实测定水分含量。植株和果实干样研磨成粉测定全磷含量。每次收获记录各小区产量,实收实产。拉秧期以 20 cm 为间隔取 0—100 cm 土层土样,每小区取 5 钻制备混合样,风干后测定 Olsen-P 含量。2010 年番茄拉秧期测定土壤磷素饱和度。

植株和果实全磷用硫酸-过氧化氢消煮,钼锑抗比

色法测定。土壤 Olsen-P 采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 溶液 (pH 8.5) 浸提, 钼锑抗比色法测定^[16]。土壤磷素饱和度 (DPS) 测定采用 IGE 等^[17]的方法测定, 具体如下: 2010 番茄拉秧期 0—20、20—40、40—60 cm 土层用 M3 浸提剂提取磷 (P_{M3})、钙 (Ca_{M3})、镁 (Mg_{M3}), P_{M3} 采用钼锑抗比色法测定, Ca_{M3} 和 Mg_{M3} 采用 ICP-OES (Optima 7000 DV, PerkinElmer, USA) 测定; 采用 2010 番茄拉秧期 P_1 处理 20—40 cm 土层土壤样品进行磷等温吸附试验, 称取土样 2 g, 分别加入含磷 (P) 量为 0、1、5、15、30、50、100、250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液 20 mL, 在 25°C 下振荡 24 h 过滤, 用钼锑抗比色法测定平衡液中磷浓度。

1.4 计算公式

磷素表观盈亏量 ($\text{kgP}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 施磷量 - 蔬菜磷素吸收量;

单位磷素盈亏下的 Olsen-P 增量^[18] = (2010 年番茄拉秧期土壤 Olsen-P 含量 - 基础土 Olsen-P 含量) / 3 年磷素表观盈亏量 $\times 100\%$

Olsen-P 单位为 $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$, 磷表观盈亏量单位为 $\text{kgP}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

M3 浸提法 DPS 采用薛巧云^[19]等研究所得中国北方石灰性土壤定量关系计算: $\text{DPS}_{M3} = P_{M3} / (0.039Ca_{M3} - 0.462Mg_{M3}) \times 100\%$, P_{M3} 、 Ca_{M3} 、 Mg_{M3} 单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

土壤磷等温吸附试验采用 Langmuir 方程 $C/Q = C/Q_m + 1/kQ_m$ 估算供试土壤磷素最大吸附量, 其中 C 平衡液磷素浓度, 单位 $\text{mgP}\cdot\text{L}^{-1}$; Q 土壤磷吸附量, 单位 $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$; Q_m 土壤磷最大吸附量, 单位 $\text{mgP}\cdot\text{kg}^{-1}$; k 为与吸附能有关的常数, 单位 $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。用土壤可提取磷和磷最大吸附量之比, 即 $\text{DPS}_{KCl} = \text{土壤 Olsen-P 含量} / Q_m \times 100\%$, 估算土壤磷素饱和度。

1.5 数据处理与统计方法

研究数据采用 SAS 8.0 软件 PROC ANOVA 程序分析, 多重比较采用 Tukey 法, 显著性差异水平 0.05。采用 SPSS 非线性回归估计 Langmuir 方程 Q_m 和 k 值。

2 结果

2.1 减量施磷对温室土壤 Olsen-P 含量的影响

温室菜田以表层土壤的 Olsen-P 含量最高, 年季变化最明显 (图 1)。在 0—20 cm 土层, 随着种植年限的增加, P_0 处理 Olsen-P 含量呈降低趋势, 年均降幅 $3.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; P_1 和 P_2 处理 Olsen-P 含量呈波浪式增加, 年均增幅分别为 2.5 和 $13.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在 20—40 cm 土层, 随着种植年限的增加, P_0 处理

Olsen-P 含量先降低之后恢复至基础水平, P_1 、 P_2 处理 Olsen-P 含量均呈增加趋势, 年均增幅分别为 0.8、 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在 40—60 cm 土层, P_0 、 P_1 、 P_2 处理 Olsen-P 年均增幅分别为 1.1、2.0、 $2.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

减量施磷后温室菜田表层土壤有效磷含量降低, 磷素深层迁移量下降。在 0—20 cm 土层, 3 年 P_0 、 P_1 、 P_2 处理平均 Olsen-P 含量分别为 30.5、49.3、 $70.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, P_0 、 P_1 较 P_2 处理 Olsen-P 含量分别下降 36.9%—67.6% 和 18.6%—43.5%, 2010 年黄瓜季开始处理间差异显著。在 20—40 cm 土层, P_0 、 P_1 较 P_2 处理 Olsen-P 含量分别下降 40.7%—55.0% 和 17.1%—51.8%, 种植两年后 P_0 和 P_2 处理 Olsen-P 含量差异显著。在 40—60 cm 土层, P_0 、 P_1 较 P_2 处理 Olsen-P 含量分别下降 4.8%—76.2% 和 2.0%—53.9% (2008、2010 年黄瓜季除外)。60—100 cm 土体 Olsen-P 含量没有明显变化。

2.2 减量施磷对温室土壤磷素饱和度的影响

温室菜田以表层土壤磷素饱和度最高。供试 0—20 cm 土层基础 DPS_{M3} 为 36.3%, 经过 3 年种植, P_0 处理 0—20 cm 土层 DPS_{M3} 较基础下降 6.7 个百分点。减量施磷下土壤磷素饱和度降低 (图 2)。2010 年番茄收获后, P_0 、 P_1 较 P_2 处理 0—20 cm 土层 DPS_{M3} 分别下降 50.4、21.1 个百分点。20—40 cm 和 40—60 cm 土层 DPS_{M3} 低于 10%, 处理间未有显著差异。根据 Langmuir 方程估算 2010 年番茄收获后 20—40 cm 土层 Q_m 为 $396.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, k 为 0.139, DPS_{KCl} 为 2.2%。供试条件下, DPS_{KCl} 估算土壤磷素饱和度较 DPS_{M3} 低。

2.3 减量施磷对温室蔬菜关键生育时期磷素吸收的影响

苗期和盛瓜/果期是蔬菜磷素需求的关键时期, 苗期要保证土壤磷素一定的供应强度, 而盛瓜/果期则需保证磷素供应充足。虽然 P_1 较 P_2 磷肥用量下降了 61.1%, 但是 3 年黄瓜和番茄关键生育时期磷素吸收量没有显著差异 (表 1)。2008 年番茄季 P_0 较 P_2 处理总磷吸收量显著下降, 降幅 30.0%, P_0 较 P_1 处理总磷吸收量下降 19.8%, 其余种植季 P_0 、 P_1 与 P_2 处理磷素吸收量未有显著差异。

2.4 减量施磷对温室蔬菜磷素平衡的影响

减量施磷后温室黄瓜、番茄生产磷素盈余量显著降低 (表 2)。连续 3 年 P_0 处理磷素一直呈亏缺状态, 磷亏缺量为 $99.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, P_1 、 P_2 处理磷素出现盈余, 磷盈余量分别 129.1、 $480.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 3 年 P_1 较 P_2 处理磷素盈余量下降 71.0%—77.3%。

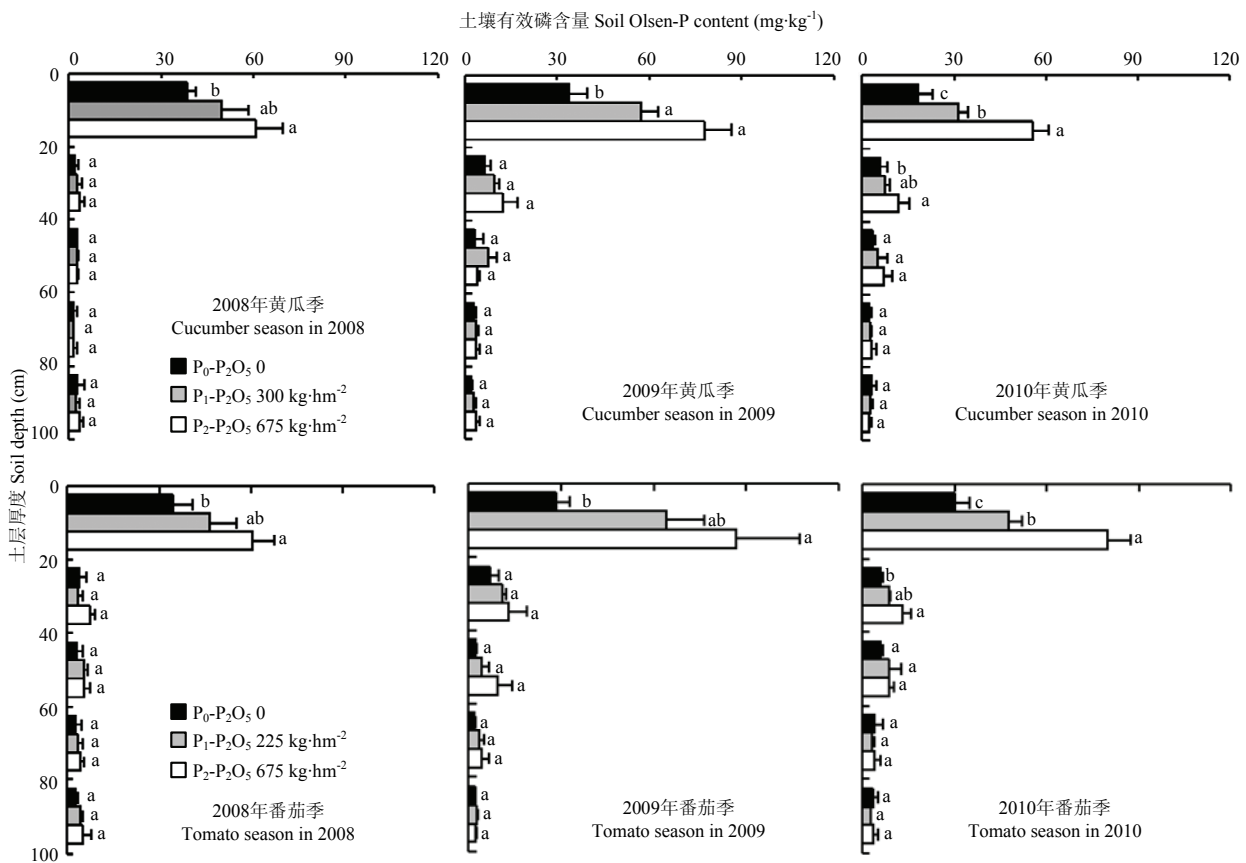


图 1 减量施磷对 0—100 cm 土体 Olsen-P 含量的影响

Fig. 1 Olsen-P contents as affected by different phosphorus application rates at 0-100 cm soil depth

表 1 减量施磷对温室黄瓜-番茄关键生育时期磷素吸收的影响

Table 1 Phosphorus uptakes at key growing stages as affected by different phosphorus application rates (kg P·hm⁻²)

| 种植茬口 Cropping season | 年份 Year | 关键生育时期 Critical growing stage | P ₀ -P ₂ O ₅ 0 | P ₁ -P ₂ O ₅ 300/225 | P ₂ -P ₂ O ₅ 675/675 | |
|---------------------------------|---------|-------------------------------|---|---|---|-----------|
| 冬春茬黄瓜 Winter-spring cucumber | 2008 | 苗期 Seedling stage | 2.2±0.5a | 1.9±0.5a | 2.1±0.1a | |
| | | 盛瓜期 Vigorous fruiting stage | 45.7±2.7a | 42.2±3.4a | 48.9±4.0a | |
| | | 全生育期 Whole growing season | 97.0±4.0a | 89.5±5.9a | 111.5±7.9a | |
| | 2009 | 苗期 Seedling stage | 2.2±0.2a | 1.6±0.4a | 1.9±0.1a | |
| | | 盛瓜期 Vigorous fruiting stage | 34.2±4.8a | 36.9±0.4a | 41.9±5.4a | |
| | | 全生育期 Whole growing season | 70.0±6.3a | 71.9±4.7a | 77.2±3.2a | |
| | 2010 | 苗期 Seedling stage | 2.7±0.5a | 2.6±0.3a | 2.9±1.0a | |
| | | 盛瓜期 Vigorous fruiting stage | 27.3±4.1a | 29.0±1.3a | 29.5±4.3a | |
| | | 全生育期 Whole growing season | 61.4±4.5a | 62.5±4.0a | 58.3±4.3a | |
| 秋冬茬番茄 Autumn-winter tomato | 2008 | 苗期 Seedling stage | 3.8±0.8a | 3.0±0.5a | 5.7±1.7a | |
| | | 全生育期 Whole growing season | 25.4±1.0b | 31.7±3.2ab | 36.3±0.9a | |
| | | 2009 | 苗期 Seedling stage | 3.3±1.0a | 3.1±0.9a | 3.3±0.8a |
| | 2009 | 全生育期 Whole growing season | 20.3±0.9a | 22.0±1.4a | 23.2±2.3a | |
| | | 2010 | 苗期 Seedling stage | 5.0±0.7a | 5.5±1.0a | 5.5±0.4a |
| | | | 全生育期 Whole growing season | 23.3±2.9a | 23.0±2.3a | 22.1±2.4a |

同行数据后不同字母代表处理间差异达 5% 显著水平。下同

Data (means±SD, n=3) within rows followed by different letters indicate significant differences between fertilization treatments at the 5% level. The same as below

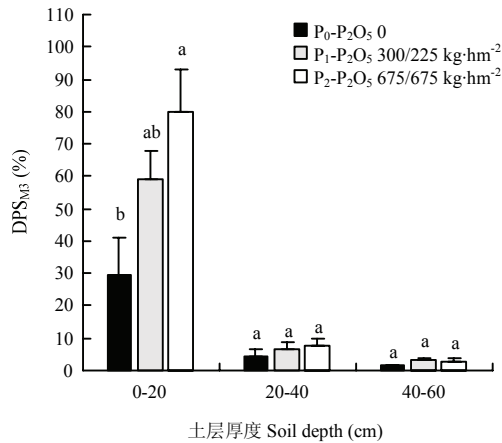


图2 减量施磷对0—60 cm 土体磷素饱和度的影响

Fig. 2 The degree of phosphorus saturation as affected by different phosphorus application rates at 0-60 cm soil depth

表2 减量施磷对温室黄瓜-番茄轮作磷素平衡与去向的影响

Table 2 Apparent phosphorus balances and phosphorus fate as affected by different phosphorus application rates (kg P·hm⁻²)

| 种植茬口 Cropping season | 年份 Year | P ₀ -P ₂ O ₅ 0 | P ₁ - P ₂ O ₅ 300/225 | P ₂ - P ₂ O ₅ 675/675 |
|---|---------|---|--|--|
| 冬春茬黄瓜 Winter-spring cucumber | 2008 | -97.0±4.0c | 41.5±5.9b | 183.3±7.9a |
| | 2009 | -70.0±6.3c | 59.1±4.7b | 217.5±3.2a |
| | 2010 | -61.4±4.5c | 68.5±4.0b | 236.4±4.3a |
| 秋冬茬番茄 Autumn-winter tomato | 2008 | -25.4±1.0c | 66.5±3.2b | 258.4±0.9a |
| | 2009 | -20.3±0.9c | 76.3±1.4b | 271.6±2.3a |
| | 2010 | -23.3±2.9c | 75.2±2.3b | 272.7±2.4a |
| 总磷素平衡 Total apparent phosphorus balance | 3年 | -297.3 | 387.2 | 1440.0 |

表3 减量施磷对温室黄瓜-番茄产量的影响

Table 3 Vegetable yields as affected by different phosphorus application rates (t·hm⁻²)

| 种植茬口 Cropping season | 年份 Year | P ₀ -P ₂ O ₅ 0 | P ₁ - P ₂ O ₅ 300/225 | P ₂ - P ₂ O ₅ 675/675 |
|---------------------------------|---------|---|--|--|
| 冬春茬黄瓜 Winter-spring cucumber | 2008 | 199.9±4.0a | 199.0±6.6a | 203.2±6.5a |
| | 2009 | 172.6±8.5a | 175.2±4.2a | 173.5±2.1a |
| | 2010 | 158.7±8.1a | 158.2±7.1a | 159.3±3.0a |
| 秋冬茬番茄 Autumn-winter tomato | 2008 | 129.1±1.8a | 134.8±9.2a | 138.4±7.6a |
| | 2009 | 89.1±9.6a | 87.1±7.2a | 80.4±6.0a |
| | 2010 | 89.6±7.3a | 89.8±6.0a | 90.2±5.1a |

施磷 50%—70%，单季有效磷下降 33%—37%^[9]。本研究所得与前人结果较一致。由于农民常规施磷量、减量施磷 61.1%为盈余施磷，20 cm 表层土壤 Olsen-P 呈增加趋势，每盈余 100 kgP·hm⁻²，0—20 cm 土层 Olsen-P 增加 1.9—2.7 mg·kg⁻¹。前人在黄壤性水稻

2.5 减量施磷对温室蔬菜产量的影响

供试温室为中高产水平，减量施磷后未显著影响黄瓜、番茄产量（表 3）。3 年 P₀、P₁ 与 P₂ 处理产量没有显著差异。

3 讨论

3.1 温室蔬菜磷素盈亏、土壤磷素供应与利用

YAN 等^[1]研究明确在中国基于瓜果菜产量的土壤 Olsen-P 阈值为 58.0 mg·kg⁻¹，高于该值蔬菜产量对 Olsen-P 的增加不响应。《中国主要作物施肥指南》中给出适宜黄瓜、番茄生长的根层土壤 Olsen-P 含量为 60—100 mg·kg⁻¹^[20]。本研究较农民常规施磷减量 61.1%后，3 年总磷素盈余量下降 73.1%，土壤有效磷积累显著缓解，0—20 cm 土层 3 年平均 Olsen-P 含量下降 29.7%，在 50 mg·kg⁻¹ 的相对适宜值，蔬菜磷素吸收未受显著影响。研究表明设施番茄较农民常规减

土^[18]、黄潮土^[21]、黑土^[22]、紫色土^[23]上的长期研究表明土壤每盈余 100 kgP·hm⁻²，有效磷分别提高 2.0—4.0、1.4—2.2、19.6、3.9—6.2 mg·kg⁻¹。本试验与在黄壤性水稻土^[18]、黄潮土^[21]上的研究结果较接近。

在供试土壤上,不施磷肥导致土壤磷素亏缺,蔬菜从土壤中每攫取 $P\ 100\ kg\cdot hm^{-2}$, $0\text{—}20\ cm$ 土层 Olsen-P 含量下降 $3.4\ mg\cdot kg^{-1}$ 。长期研究显示土壤每亏缺 $P\ 100\ kg\cdot hm^{-2}$, 黄潮土^[21]、黑土^[22]、紫色土^[23]有效磷含量分别降低 $0.47\text{—}0.68$ 、 $0.70\text{—}2.14$ 、 $0.44\ mg\cdot kg^{-1}$ 。本研究不施磷肥单位磷亏缺下的 Olsen-P 降幅较高,这与土壤 Olsen-P 仍处于前期快速下降阶段有关。在黄壤性水稻土和黄潮土上的研究均显示不施磷肥土壤的 Olsen-P 在试验初期快速下降,之后稳定在某一水平^[18, 21]。不施磷肥 3 年 $0\text{—}20\ cm$ 土壤 Olsen-P 平均含量仅 $30.5\ mg\cdot kg^{-1}$, 2008 年番茄季磷素吸收显著下降,表明经过 2008 年黄瓜高产 $200\ t\cdot hm^{-2}$ 后,番茄持续高产 $140\ t\cdot hm^{-2}$, 使得 P_0 处理土壤磷素供应强度不足。此时观察到番茄产量呈降低趋势,但未见显著减产,这可能与氮素是决定产量水平的首要因素,供试条件下氮素供应充足有关。此外,也与 P_0 处理土壤磷素未到极缺乏状态,仍能维持一定的磷素供应有关。而 P_0 处理试验中后期磷素吸收并未明显下降,与 2009 年番茄、2010 年黄瓜和 2010 年番茄处于中产水平有关,在该产量水平下 P_0 处理土壤磷素供应强度满足了蔬菜需求。该结果也说明,高产和中产水平下蔬菜对土壤磷素供应强度的要求不同,适宜黄瓜番茄生产的中等土壤磷素水平可适当下调至 $40\text{—}50\ mg\cdot kg^{-1}$ 。

3.2 温室菜田磷素运移分析

温室蔬菜生产灌水频繁,一些研究显示土壤磷素存在淋失问题^[6-7, 24]。HECKRATH 等^[25]研究表明黏壤质土磷素淋失临界值为 Olsen-P $60\ mg\cdot kg^{-1}$ 。席雪琴^[26] 对全国不同区域 18 个典型土壤调查发现磷素淋溶阈值在 Olsen-P $14.9\text{—}119.2\ mg\cdot kg^{-1}$, 其中河北潮土磷淋溶阈值为 $14.9\ mg\cdot kg^{-1}$ 。薛巧云等^[19]研究中国典型石灰性土壤发现磷素流失的 DPS_{M3} 和 Olsen-P 临界值分别为 28.1%和 $49.2\ mg\cdot kg^{-1}$ 。本研究施用磷肥后, $20\text{—}60\ cm$ 土层 Olsen-P 含量随着种植年限的增加呈增加态势,表明存在土壤磷素深层迁移。经过 3 年种植, P_2 处理 $0\text{—}20\ cm$ 土层 Olsen-P 含量和 DPS_{M3} 均高于薛巧云等^[19] 所得临界值, P_1 处理 $0\text{—}20\ cm$ 土层平均 Olsen-P 含量接近薛巧云等^[19] 所得临界值,但是 DPS_{M3} 较高,这是磷深层迁移的原因。减量施磷 61.1%后,明显缓解了 $20\text{—}60\ cm$ 土层有效磷积累,尤其是在 $20\text{—}40\ cm$ 土层, Olsen-P 含量较农民常规施磷下降 17.1%—51.8%。然而,无论是农民常规施磷还是减量施磷,经过 3 年后 $20\text{—}40\ cm$ 土层 Olsen-P 含量、 DPS_{M3} 、 DPS_{KCl} 均未超过上述阈值。 $40\text{—}60\ cm$ 土层 Olsen-P 含量随种植年

限而增加可能与土壤中形成优先流,蔬菜按常规水量灌溉定苗缓苗水加速土壤养分移位有关^[27]。

3.3 温室蔬菜适宜磷肥用量推荐

“增加并维持”是生产中常采用的施磷策略之一。其核心是通过合理施磷以保证根层土壤有效磷供应在适宜范围,在满足蔬菜产量的同时充分发挥磷肥肥效^[28-29]。3 年农民常规施磷量达蔬菜吸收量的 5.4 倍,根区 $0\text{—}20\ cm$ 土层 Olsen-P 含量高于 YAN 等^[1] 所得生理阈值和 HECKRATH 等^[25]、薛巧云等^[19] 给出的淋失阈值,磷素系统盈余明显,淋失严重。较农民常规减施磷 60%,黄瓜、番茄施 $P_2O_5\ 300$ 、 $225\ kg\cdot hm^{-2}$, $0\text{—}20\ cm$ 土层 Olsen-P 含量接近适宜范围,保证了 3 年中高产水平,同时养分吸收不降低,表明磷肥用量降至合理范围。徐福利等^[30]模型模拟得到滴灌基础有效磷 $35.3\ mg\cdot kg^{-1}$ 、黄瓜目标产量 $83\text{—}88\ t\cdot hm^{-2}$ 的 P_2O_5 、有机肥用量分别为 $576.6\text{—}991.6\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $41.3\text{—}148.9\ t\cdot hm^{-2}$ 。赵伟等^[9]研究表明基础土壤有效磷 $221\ mg\cdot kg^{-1}$, 施用磷肥 $267\ kg\ P_2O_5\cdot hm^{-2}$, 较农民习惯减施磷 70%, 能保证单季番茄产量 $54\ t\cdot hm^{-2}$ 不降低。何金明等^[10]研究显示基础有效磷 $80.6\ mg\cdot kg^{-1}$, 推荐施 $P_2O_5\ 225\ kg\cdot hm^{-2}$, 可保证单季番茄产量 $80\ t\cdot hm^{-2}$ 。由于本试验基础土壤 Olsen-P 含量偏低而产量水平较高,因此推荐施磷量较上述结论又有所下降。进一步分析,本试验不施磷肥根区土壤 Olsen-P 含量在 $30\ mg\cdot kg^{-1}$ 上下波动,3 年黄瓜、番茄产量没有显著下降,但在番茄高产水平 ($140\ t\cdot hm^{-2}$) 下观察到磷素吸收量显著降低,表明在供试条件下不施磷肥可保证连续 3 年中产水平 (黄瓜 $150\text{—}170\ t\cdot hm^{-2}$, 番茄 $90\text{—}100\ t\cdot hm^{-2}$) 生产。由此可见,供试条件适宜施磷量可在 P_1 处理推荐施磷量基础上进一步下调,华北平原温室黄瓜番茄生产减量施磷潜力较大。

综合上述,在基础土壤 Olsen-P 含量 $40\ mg\cdot kg^{-1}$, 较农民常规减施磷 60%, 磷素盈余量下降 71.0%—77.3%, 主根区 Olsen-P 含量下降 18.6%—43.5%, 3 年均值接近瓜果类蔬菜 Olsen-P 农学阈值,产量保持在中高水平不降低,同时土壤磷素深层迁移缓解。在实际生产中,由于菜农超量施肥,种植一段时间的设施土壤有效磷含量均高于本试验供试水平。调查显示中国北方菜区温室和大棚土壤平均 Olsen-P 含量为 $179.7\text{—}203.7\ mg\cdot kg^{-1}$ ^[12]。因此对于中老年 (≥ 3 年) 温室较农民常规减施磷 60%, 可保证根区磷供应,保持黄瓜、番茄中高产水平不降低。实际生产中常配施有机肥,在本文温室黄瓜番茄总磷推荐量下,

猪粪、鸡粪可按磷计算施用量, 其投入磷量不应超过总磷推荐量。

4 结论

华北平原温室蔬菜生产减施磷肥潜力较大。对于种植一段时间 (≥ 3 年) 的温室, 较农民常规减量施磷 60%, 可以显著改善磷素盈余状况, 缓解 0—20 cm 土层有效磷的积累, 降低土壤磷素深层的迁移量, 并保证黄瓜、番茄产量不降低。建议: 土壤有效磷含量 $\geq 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的温室, 黄瓜产量水平 $170 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下施用磷不宜超过 $300 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 番茄产量水平 $100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下施用磷不宜超过 $225 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

References

- [1] YAN Z, LIU P, LI Y, MA L, aLVA A, DOU Z, CHEN Q, ZHANG F. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982-989.
- [2] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 唐继伟. 中国主要菜区土壤盐分、酸碱性 and 肥力状况. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
HUANG S W, WANG Y J, JIN J Y, TANG J W. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 906-918. (in Chinese)
- [3] 张彦才, 李巧云, 翟彩霞, 陈丽莉, 吴永山, 康富忠. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价. 河北农业科学, 2005, 9(3): 61-67.
ZHANG Y C, LI Q Y, ZHAI C X, CHEN L L, WU Y S, KANG F Z. The condition and appraisal of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei Province. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2005, 9(3): 61-67. (in Chinese)
- [4] ZHANG Y C, LI R N, WANG L Y, ZHAI C X, CHEN L L, WU X P, WU H J, WANG X B, LI Y K. Threshold of soil Olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(20): 2383-2402.
- [5] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.
YU H Y, LI T X, ZHANG X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514-522. (in Chinese)
- [6] 严正娟. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
YAN Z J. Effects of manure application on the form and mobility of soil phosphorus in vegetable greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [7] 吕福堂, 张秀省, 董杰, 赵燕. 日光温室土壤磷素积累, 淋移和形态组成变化研究. 西北农业学报, 2010, 19(2): 203-206.
LV F T, ZHANG X S, DONG J, ZHAO Y. Study on the phosphorus accumulation, leaching and forms varying in greenhouse soil. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 203-206. (in Chinese)
- [8] SATTARI S Z, VAN ITTERSUM M K, GILLER K E, ZHANG F, BOUWMAN A F. Key role of China and its agriculture in global sustainable phosphorus management. *Environmental Research Letters*, doi:10.1088/1748-9326/9/5/054003.
- [9] 赵伟, 刘梦龙, 杨圆圆, 张锋, 杨兆森, 陈志杰. 减施磷肥对番茄植株生长、产量、品质及土壤养分状况的影响. 中国农学通报, 2017, 33(1): 47-51.
ZHAO W, LIU M L, YANG Y Y, ZHANG F, YANG Z S, CHEN Z J. Effects of phosphorus fertilizer reduction on tomato plant growth, yield, quality and soil nutrient. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(1): 47-51. (in Chinese)
- [10] 何金明, 高峻岭, 宋克光, 唐继伟, 李祥云. 磷肥用量对番茄产量、磷素利用及土壤有效磷的影响. 中国农学通报, 2016, 32(31): 40-45.
HE J M, GAO J L, SONG K G, TANG J W, LI X Y. Effect of phosphorus application rate on tomato yield and phosphorus utilization and soil available phosphorus. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(31): 40-45. (in Chinese)
- [11] LIU K, ZHANG T Q, TAN C S, ASTATKIE T. Responses of fruit yield and quality of processing tomato to drip-irrigation and fertilizers phosphorus and potassium. *Agronomy Journal*, 2011, 103(5): 1339-1345.
- [12] 高宝岩, 高伟, 李明悦, 郑春莲. 不同施肥处理和茬口对设施黄瓜产量及养分累积的影响. 北方园艺, 2015, 13: 52-56.
GAO B Y, GAO W, LI M Y, ZHENG C L. Effect of different fertilization treatments and growing seasons on yield and nutrient accumulation under greenhouse condition. *Northern Horticulture*, 2015, 13: 52-56. (in Chinese)
- [13] LIANG L Z, QI H J, XU P, ZHAO X Q, DONG X Y, SHEN R F. High phosphorus at seedling stage decreases the post-transplanting fertiliser requirement of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 2015, 190: 98-103.
- [14] 刘军, 曹之富, 黄延楠, 高丽红. 日光温室黄瓜冬春茬栽培氮磷钾吸收特性研究. 中国农业科学, 2007, 40(9): 2109-2113.
LIU J, CAO Z F, HUANG Y N, GAO L H. Nutrients absorption properties of cucumber in long-season cultivation in solar greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 2109-2113. (in Chinese)
- [15] 陈清, 张福锁. 蔬菜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: 117-132.
- CHEN Q, ZHANG F S. *The Theory and Application of Nutrient Resource Integrated Management in Vegetable Production*. Beijing: China Agricultural University Press, 2007: 117-132. (in Chinese)
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 308-311.
- LU R K. *Methods in Agricultural Soil Chemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Technique Press, 1999: 308-311. (in Chinese)
- [17] IGE D V, AKINREMI O O, FLATEN D N. Environmental index for estimating the risk of phosphorus loss in calcareous soils of Manitoba. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6): 1944-1951.
- [18] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 张文安, 蒋天明. 长期施肥对黄壤性水稻土磷平衡及农学阈值的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1903-1912.
- LIU Y L, LI Y, ZHANG Y R, ZHANG W A, JIANG T M. Effect of long-term fertilization on the P balance and critical value of soil Olsen-P in paddy soil from yellow earth. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1903-1912. (in Chinese)
- [19] XUE Q Y, LU L L, ZHOU Y Q, QI L Y, DAI P B, LIU X X, SUN C L, LIN X Y. Deriving sorption indices for the prediction of potential phosphorus loss from calcareous soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(2): 1564-1571.
- [20] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 122-129.
- ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q. *The Fertilization Guide for Main Crop in China: First Edition*. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 122-129. (in Chinese)
- [21] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 唐忠厚, 陈晓光, 诸葛玉平. 长期施肥条件下黄潮土有效磷对磷盈亏的响应. *华北农学报*, 2015, 30(6): 226-232.
- WEI M, ZHANG A J, LI H M, TANG Z H, CHEN X G, ZHUGE Y P. Response of Olsen-p to P balance in yellow fluvo-aquic soil under long-term fertilization. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(6): 226-232. (in Chinese)
- [22] 展晓莹. 长期不同施肥模式黑土有效磷与磷盈亏响应关系差异的机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- ZHAN X Y. Relationship between available phosphorus and phosphorus balance and its mechanism under different long-term fertilizations in black soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [23] 刘京. 长期施肥下紫色土磷素累积特征及其环境风险[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- LIU J. Phosphorus accumulation characteristics and environmental risks of purple soil under long-term fertilization[D]. Chongqing: Southwest University, 2015. (in Chinese)
- [24] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 王珏, 杨志新. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 14-19.
- YUAN L J, JU X T, ZHANG L J, WANG J, YANG Z X. NPK accumulation in greenhouse soil and its effect on groundwater. *Chinese Journal Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 14-19. (in Chinese)
- [25] HECKRATH G, BROOKES P C, POULTON P R, GOULDING K W T. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1955, 24(5): 904-910.
- [26] 席雪琴. 土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- XI X Q. The critical value of soil P leave for crop and environmental safety in different soil types[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [27] DJODJIC F, BÖRLING K, BERGSTRÖM L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 678-684.
- [28] DELGADO A, SCALENGHE R. Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 552-575.
- [29] LI H, HUANG G, MENG Q, MA L, YUAN L, WANG F, ZHANG W, CUI Z, SHEN J, CHEN X, JIANG R, ZHANG F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant and Soil*, 2011, 349(1): 157-167.
- [30] 徐福利, 王振, 徐慧敏, 万超, 陈志杰. 日光温室滴灌条件下黄瓜氮、磷、有机肥肥效与施肥模式研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 177-182.
- XU F L, WANG Z, XU H M, WAN C, CHEN Z J. Study on the response and fertilization model of cucumber for nitrogen, phosphorus and manure application in greenhouse under drip irrigation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 177-182. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)