

滴灌水肥一体化条件下磷肥减量对黄瓜磷素利用效率和产量的影响

程启鹏^{1, 2, 3}, 熊启中^{1, 2, 3}, 徐雅婷^{1, 2, 3}, 叶新新^{1, 2, 3}, 罗来超^{1, 2, 3},
刘 龙⁴, 郜红建^{1, 2, 3*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036; 2. 长江经济带磷资源高效利用与水环境保护中心, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 4. 安徽省和县土壤肥料工作站, 安徽 马鞍山 238200)

摘 要: 为探究磷肥减量施用对设施黄瓜产量和养分利用效率的影响, 通过田间试验分析水肥一体化条件下磷肥减量 10%、30%、50% 对黄瓜磷素累积吸收量、利用效率和产量的影响差异。结果表明: 在配方施肥基础上, 磷肥减量 10% ~ 50% 时, 0 ~ 20 cm 土层土壤有效磷含量随磷肥减量比例的增加不断降低, 黄瓜植株磷素含量和累积量呈先增加后降低的规律。当磷肥减量 30% 时, 黄瓜磷素总累积量最高 ($7.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 磷肥贡献率、农学效率、偏生产力 and 吸收利用率比配方施肥处理分别提高了 178.7%、388.7%、75.4% 和 162.9%, 产量和产投比分别提高了 22.8% 和 25.1%。综合分析, 水肥一体化条件下, 合理减少磷肥施用可显著提高设施黄瓜生育期磷素吸收累积量, 提高黄瓜磷素利用效率、产量和产投比。

关键词: 磷肥减量; 水肥一体化; 设施栽培; 黄瓜产量; 养分利用

黄瓜是我国设施栽培面积中占比第二的作物, 约占设施栽培总面积的 20%^[1-2]。在设施蔬菜生产过程中, 为追求高的产量和收益, 施肥量远超过蔬菜生产所需, 造成土壤养分盈余。磷是蔬菜生长发育必需的营养元素, 由于磷肥施入土壤后易被固定等原因, 当季磷肥利用率仅为 10% ~ 20%^[3-4]。据统计, 设施蔬菜磷肥平均用量为 $1308 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是蔬菜需磷量的 13 倍, 多余的磷素在土壤中累积, 一方面造成磷肥利用效率低和资源浪费, 另一方面, 盈余的磷素流失进入水体容易引发水体富营养化等问题^[5-7]。在河北, 设施黄瓜磷肥用量高于需求量的 15.5 倍, 平均土壤有效磷含量达 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[8]。在陕西, 设施蔬菜磷肥过量施用 5.01 万 t, 投入过

量的比例为 76.8%^[9]。在山东寿光, 设施蔬菜地的磷素盈余量为 $1485 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥利用率仅为 8%^[10]。

根据蔬菜对磷素的需求, 减少磷肥施用量, 是源头上降低土壤磷素累积, 提高磷素利用效率的重要途径。陈芬等^[11]研究表明, 磷肥减量 20% 并配施有机肥可以提高辣椒产量和品质。赵伟等^[12]指出, 当土壤中有效磷含量较高 ($\geq 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时, 在常规施磷肥 ($891 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的基础上减量 70%, 可以显著提高氮磷钾养分分配。土壤有效磷含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黄瓜目标产量为 $170000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 磷肥减量 50% ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 产量不会降低^[13]。较农户常规施肥, 减量施磷, 提高了番茄果实的全磷含量^[14]。Liang 等^[15]试验发现, 黄瓜初期供给磷 $240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全生育期不施磷肥能够提高磷素利用效率。水肥一体化技术具有节水节肥、提高肥料利用率、减少养分淋失及增产等优点^[16-17], 同传统施肥方式相比, 水资源利用率可提高 40% ~ 60%, 肥料利用率可达 30% ~ 50%^[18]。同时, 水肥一体化技术可使黄瓜产值增加 $2034 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、辣椒增收 $12530 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、葡萄节约成本 $9831 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及菠萝增产 39.04%^[18-20]。

收稿日期: 2021-12-02; 录用日期: 2022-01-23

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1908085QC139); 中国工程科技发展战略安徽研究院咨询项目 (2020-05); 安徽省科技重大专项 (202103a06020012); 长江经济带磷资源高效利用创新平台项目 (KJ20190197)。

作者简介: 程启鹏 (1995-), 硕士研究生, 主要从事养分资源高效利用研究。E-mail: qipcheng@163.com。

通讯作者: 郜红建, E-mail: hjgao@ahau.edu.cn。

当前,设施蔬菜减肥增效多以肥料减量为主,有关水肥一体化与减肥措施结合在一起也有少许研究,但如何确定适宜的肥料减施比率尚待探讨。本研究以长三角地区安徽和县绿色农产品生产加工基地为依托,以设施黄瓜为研究对象,通过田间试验研究水肥一体化条件下不同磷肥减量比例对黄瓜产量、养分利用效率及经济效益的影响,为长三角地区设施蔬菜合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于安徽省和县蔬菜科技示范园(118° 22' E, 31° 45' N)。该地在长江下游北岸,属于北亚热带湿润型季风气候区,年平均气温 15.8℃,年日照时数 2126 h。供试土壤类型为水稻土,已连续种植蔬菜 25 年,耕层土壤含有机质 24.02 g·kg⁻¹、全氮 1.25 g·kg⁻¹、有效磷 136.03 mg·kg⁻¹、速效

钾 193.30 mg·kg⁻¹, pH 值 6.04。塑料大棚长 67 m、宽 9 m。

1.2 试验设计

本试验在各处理等量施用有机肥的基础上,设置 5 个磷肥水平,分别为不施磷肥(T1)、配方施肥(T2)、磷肥减量 10%(T3)、磷肥减量 30%(T4)、磷肥减量 50%(T5)。有机肥为干基猪粪 15000 kg·hm⁻²,全部做基肥,有机肥养分含量为 pH 值 8.17、有机质 414.30 g·kg⁻¹、全氮 23.10 g·kg⁻¹、全磷 9.27 g·kg⁻¹、全钾 16.40 g·kg⁻¹。氮、磷、钾肥基施比例分别为 50%、70% 和 40%。分 3 次追肥,分别为定植期、初瓜期、盛瓜期,氮肥为氮肥总量的 25%、12.5%、12.5%,磷肥为磷肥总量的 10%、10%、10%,钾肥为钾肥总量的 10%、20%、30%,具体施肥情况见表 1。供试肥料有尿素(N 46%)、磷酸二氢铵(N 13%, P₂O₅ 44%)、硫酸钾(K₂O 52%)。

表 1 黄瓜各处理施肥量 (kg·hm⁻²)

处理	有机肥施用量	化肥施用量			化肥基施用量			化肥追施总量		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	15000	225	0	270	112.5	0	108	112.5	0	162
T2	15000	225	195.0	270	112.5	136.50	108	112.5	58.50	162
T3	15000	225	175.5	270	112.5	122.85	108	112.5	52.50	162
T4	15000	225	136.5	270	112.5	95.55	108	112.5	40.95	162
T5	15000	225	97.5	270	112.5	68.25	108	112.5	29.25	162

黄瓜于 2020 年 9 月 4 日定植,次年 1 月 7 日拉秧,品种为皖农 18。栽培方式为垄栽,每个小区 2 畦 3 行,每行种植 12 棵。小区面积为 10 m² (2 m×5 m),各处理重复 3 次,随机区组排列。病虫害等田间管理方式同当地常规管理,尿素、磷酸二氢铵、硫酸钾成本分别为 2.25、2.7、3.6 元·kg⁻¹,有机肥(猪粪) 1650 元·hm⁻¹,地膜 1950 元·hm⁻²,滴灌水管 900 元·hm⁻²,农药 5250 元·hm⁻²,黄瓜价格为 1.4 元·kg⁻¹,人工等未计入成本。

黄瓜幼苗定植和缓苗时单次水量为 260 ~ 300 m³·hm⁻²;从第 1 次摘瓜开始每 7 ~ 10 d 滴灌 1 次,单次滴灌 110 ~ 150 m³·hm⁻²;生育期共滴灌 12 次;黄瓜全生育期总滴灌水量为 2120 m³·hm⁻²。

1.3 测定指标与方法

每次收获记录各小区黄瓜产量,实收实产。土壤有效磷含量分别在苗期、初瓜期、盛瓜期和拉秧

期取 0 ~ 20 cm 耕层土壤,风干研磨后, Olsen-P 法测定^[21];黄瓜植物磷素含量分别取苗期、初瓜期、盛瓜期和拉秧期不同施肥处理的 3 株代表性植株,在 105℃下杀青 30 min,然后在 75℃下烘干,粉碎后采用钼锑抗比色法测定^[21];植株碳是采用碳氮元素分析仪(Vario MAX CN, Elementar Co., Germany)测定。黄瓜不同生育期磷素累积量和磷素利用效率等相关指标计算方法^[22-24]为:

磷素净吸收量(kg·hm⁻²) = 后一生育期磷素总累积量 - 前一生育期磷素总累积量

磷肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施磷肥区作物产量 / 施磷量

磷肥农学效率(kg·kg⁻¹) = (施磷肥区作物产量 - 不施磷肥区作物产量) / 施磷量

磷肥吸收利用率(%) = (施磷肥区作物磷素总累积量 - 不施磷肥区作物磷素总累积量) / 施磷

量 × 100;

磷肥贡献率 (%) = (施磷肥区作物产量 - 不施磷肥区作物产量) / 施磷肥区作物产量 × 100

1.4 数据处理与分析

运用 Excel 2019 进行数据处理和制作表格, Origin 2018 绘制插图, 采用 SPSS 19.0 进行统计分析和方差分析, 组间差异分析采用 Duncan 法, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 磷肥减量对黄瓜磷素含量的影响

黄瓜不同部位磷含量不同, 整体上呈瓜果 > 叶部 > 茎部, 施磷处理不同部位磷含量均高于不施

磷肥处理 (表 2)。在苗期, 无磷肥处理 (T1) 的黄瓜茎、叶磷素含量分别为 6.82、8.25 g · kg⁻¹, 与配方施肥 (T2)、磷肥减量 (T3、T4、T5) 处理均达显著差异水平 (P<0.05)。在初瓜期和盛瓜期, 磷肥减量 30% (T4) 处理黄瓜茎、叶磷含量最高, 配方施肥 (T2) 处理次之; 初瓜期瓜果部磷含量呈 T2>T4>T3>T5>T1 的规律, 盛瓜期磷肥减量 30% (T4) 处理瓜果部磷含量为 11.49 g · kg⁻¹, 与除 T5 处理外的其他处理间差异达到显著水平 (P<0.05)。在拉秧期, 不同处理的黄瓜茎部磷素含量无显著性差异, 叶和瓜果部磷含量以磷肥减量 30% (T4) 处理最高, 瓜果部磷含量呈 T4>T2>T3>T5>T1 的规律。

表 2 不同生育期黄瓜植株全磷的含量 (g · kg⁻¹)

处理	苗期		初瓜期		
	茎	叶	茎	叶	瓜
T1	6.82 ± 0.12b	8.25 ± 0.03c	7.12 ± 0.50a	5.53 ± 0.49b	6.90 ± 1.95c
T2	7.92 ± 0.20a	8.73 ± 0.14a	8.03 ± 0.59a	7.33 ± 0.77a	10.97 ± 0.49a
T3	7.81 ± 0.12a	8.79 ± 0.04a	7.68 ± 1.06a	6.58 ± 1.03ab	9.07 ± 1.00ab
T4	7.98 ± 0.05a	8.44 ± 0.13b	8.11 ± 0.76a	7.52 ± 1.07a	9.18 ± 0.78ab
T5	7.99 ± 0.33a	8.71 ± 0.05a	7.26 ± 1.49a	6.98 ± 0.61ab	8.61 ± 0.83bc

处理	盛瓜期			拉秧期		
	茎	叶	瓜	茎	叶	瓜
T1	5.80 ± 1.29b	6.99 ± 0.51a	8.28 ± 0.18c	6.23 ± 0.76b	8.47 ± 0.52b	8.93 ± 0.88b
T2	8.26 ± 1.54a	8.42 ± 1.50a	9.91 ± 0.56b	6.97 ± 0.69ab	9.71 ± 1.20ab	12.44 ± 2.19a
T3	7.35 ± 1.55ab	7.93 ± 0.96a	9.62 ± 0.35b	8.52 ± 1.13ab	10.98 ± 0.63a	12.08 ± 1.80a
T4	8.32 ± 0.92a	9.31 ± 2.48a	11.49 ± 0.19a	7.59 ± 0.86a	10.85 ± 0.73a	13.11 ± 0.56a
T5	7.45 ± 0.15ab	8.19 ± 1.50a	11.60 ± 0.56a	7.71 ± 0.98ab	8.57 ± 1.43b	10.57 ± 0.45ab

注: 同列中不同字母表示 0.05 水平上差异显著 (n=3)。

2.2 磷肥减量对黄瓜磷素累积量的影响

不同施肥处理的黄瓜植株磷素总累积量随黄瓜生长发育延长呈现不断增加的趋势, 其中苗期至盛瓜期增加较快, 而盛瓜期到拉秧期增加相对缓慢, 在拉秧期达到最大值 (图 1)。在苗期, 磷肥减量 30% (T4) 处理的黄瓜磷素总累积量略高于其他处理, 但无显著性差异 (P>0.05)。在初瓜期, 配方施肥 (T2) 处理的黄瓜磷素总累积量最高, 为 7.17 kg · hm⁻²。在盛瓜期和拉秧期, 黄瓜磷素总累积量表现为: 磷肥减量 30% (T4) > 配方施肥 (T2) > 磷肥减量 50% (T5) > 磷肥减量 10%

(T3) > 不施磷肥 (T1)。在盛瓜期和拉秧期, 磷肥减量 30% (T4) 处理的黄瓜磷素总累积量分别比配方施肥 (T2) 处理高 18.2% 和 29.1%; 分别比磷肥减量 50% (T5) 处理高 24.7% 和 30.9%; 分别比磷肥减量 10% (T3) 高 25.2% 和 35.0%。由此可见, 磷肥合理减量 (30%) 处理有利于黄瓜磷素累积。

不同施肥处理的黄瓜磷素净吸收量随生育期延长呈先增加后降低的趋势 (图 2), 黄瓜磷素净吸收量在初瓜期和盛瓜期达到峰值, 而苗期和拉秧期磷素净吸收量相对较少。在苗期, 磷肥减量 30% (T4) 处理的黄瓜净吸收量最高, 为 1.49 kg · hm⁻²,

比其他施磷处理 (T2、T3、T5) 高 8.0% ~ 36.6%。在初瓜期, 不同施磷处理 (T2、T3、T4、T5) 处理的黄瓜磷素净吸收量都显著大于不施磷肥 (T1) 处理 ($P<0.05$)。在盛瓜期, 磷肥减量 30% (T4) 处理的磷素净吸收量比配方施肥 (T2) 处理高 51.8%, 分别比磷肥减量 10% (T3) 和 50% (T5) 处理高 55.9%、23.8%。在拉秧期, 磷肥减量 30% (T4) 处理的磷素净吸收量比配方施肥处理 (T2) 高 121.3%, 分别比磷肥减量 10% (T3) 和 50% (T5) 处理高 108.3% 和 58.8%, 均达显著性差异水平 ($P<0.05$)。

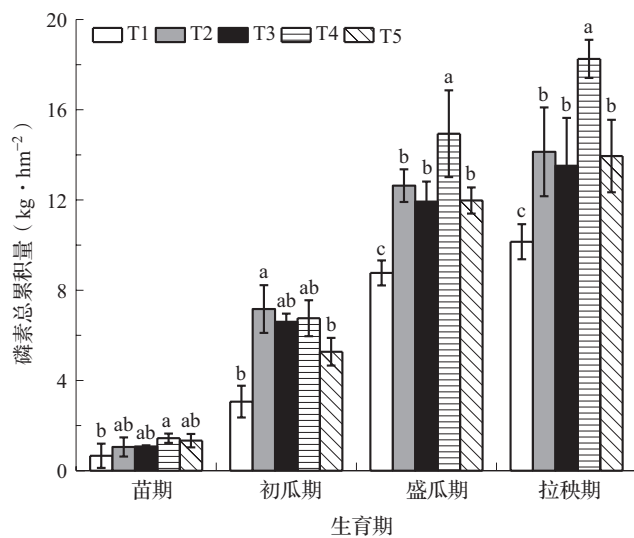


图1 不同生育期黄瓜磷素总累积量

注: 同一生育期不同处理间标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

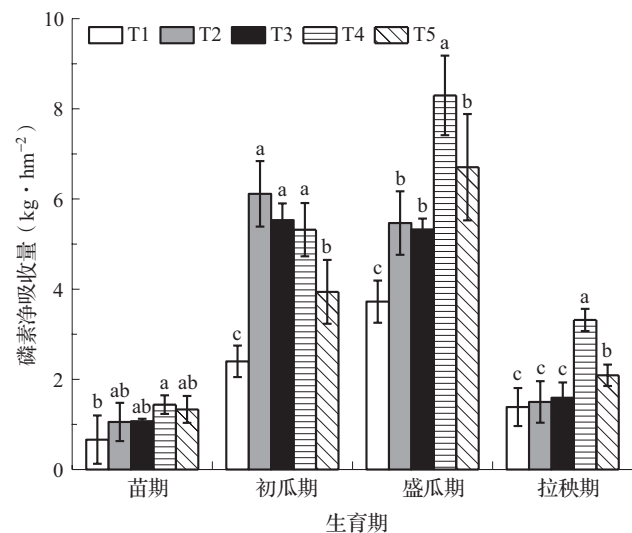


图2 不同生育期黄瓜磷素净吸收量

2.3 磷肥减量对土壤有效磷含量的影响

土壤有效磷含量随磷肥减量比例的增加而逐渐降低, 施磷处理的土壤有效磷含量高于不施磷 (T1) 处理 (图 3)。黄瓜不同生育期不同施肥处理的土壤有效磷含量均呈缓慢增加的趋势 (图 3), 其中以配方施肥 (T2) 处理土壤有效磷含量最高, 在苗期、初瓜期、盛瓜期和拉秧期分别为 201.03、215.24、232.05、261.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在盛瓜期、拉秧期配方施肥 (T2) 处理的土壤有效磷含量与其他施肥处理差异达显著性水平 ($P<0.05$)。土壤有效磷含量以不施磷肥 (T1) 处理最低, 在苗期、初瓜期、盛瓜期和拉秧期分别为 150.3、164.9、177.62 和 179.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别与施肥处理达显著差异水平 ($P<0.05$)。

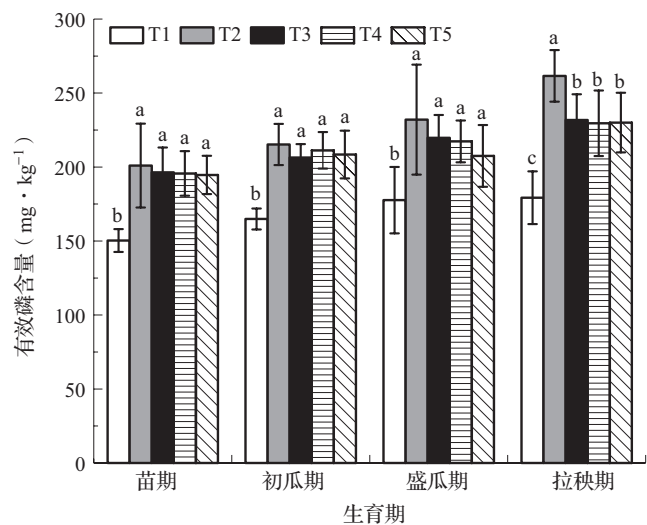


图3 磷肥减量黄瓜不同时期土壤有效磷含量

2.4 磷肥减量对黄瓜植株化学计量比的影响

不同施肥处理的黄瓜植株 (茎、叶、瓜) N:P 和 C:P 不同, 在不同生育期均以不施磷肥 (T1) 处理比值最高 (图 4)。随生育期的推进, 黄瓜植株 N:P 逐渐减少, 从盛瓜期到拉秧期, 黄瓜植株 N:P 速度放缓, 在拉秧期达到最低值; 盛瓜期和拉秧期, 黄瓜植株 N:P 以磷肥减量 30% (T4) 处理最小, 分别为 4.26 和 3.61。黄瓜植株 C:P 随生育期的推进先增加后减少, 在初瓜期达到最大值。在盛瓜期, 黄瓜植株 N:P 和 C:P 均以磷肥减量 30% (T4) 处理最低, 且与不施磷肥 (T1) 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

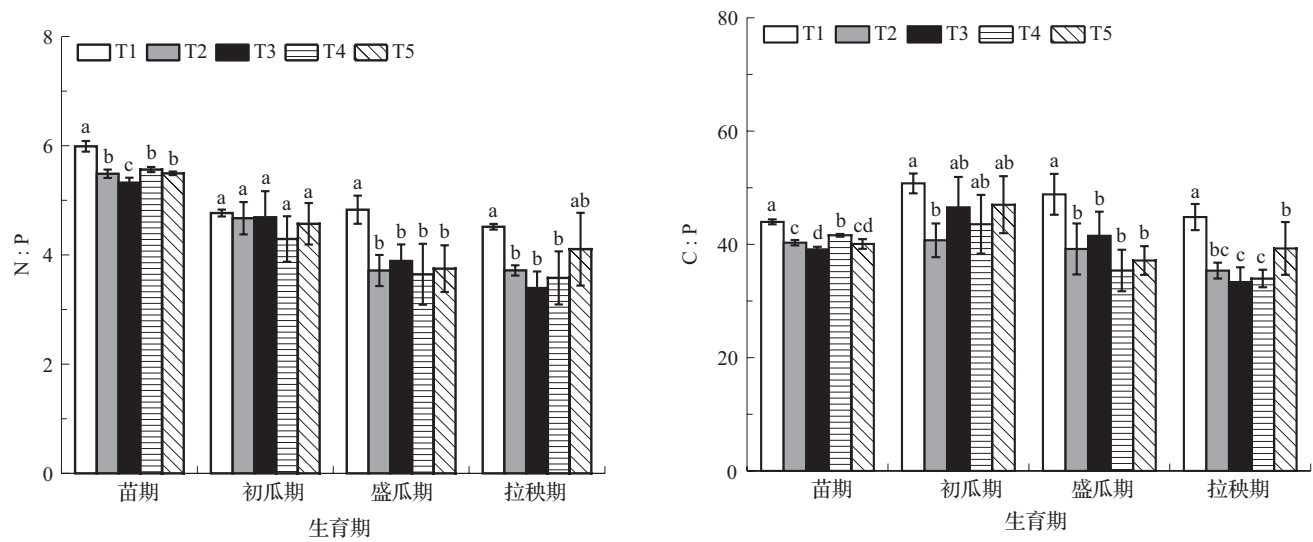


图4 黄瓜茎、叶及瓜果部分化学计量比特征

2.5 磷肥减量对黄瓜产量与经济效益的影响

不同施肥处理的黄瓜产量呈现 $T4>T5>T3>T2>T1$ 的规律 (表3), 其中以磷肥减量 30% (T4) 处理的黄瓜产量最高, 达 $66130\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 以不施磷肥 (T1) 处理的黄瓜产量最低, 为 $48800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。除不施磷肥外, 配方施肥处理 (T2) 处理的成本最高, 磷肥减量 10% (T3) 和 30% (T4)

处理次之, 磷肥减量 50% (T5) 处理投入成本最低。磷肥减量 30% 处理的黄瓜收益最高, 达 $92540\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 不施磷肥处理的黄瓜收益最低, 为 $68320\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从产投比来看, 磷肥减量 30% 处理最高, 达 7.17, 分别比不施磷肥 (T1)、配方施肥处理 (T2)、磷肥减量 10% (T3)、磷肥减量 50% (T5) 处理提高了 28.6%、25.1%、20.5%、3.8%。

表3 不同施肥处理对黄瓜产量及经济效益的影响

处理	产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	增产 (%)	成本 ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	收益 ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	产投比
T1	48800c	—	12252.01	68320	5.58
T2	53870bc	10.45	13170.02	75460	5.73
T3	55730bc	14.14	13107.02	77980	5.95
T4	66130a	35.45	12909.02	92540	7.17
T5	62800ab	28.69	12733.52	87920	6.90

2.6 磷肥减量对黄瓜磷肥利用效率的影响

磷肥减量 30% (T4) 处理的黄瓜磷肥贡献率和磷肥吸收利用率最高, 分别为 26.2% 和 22.1%, 分别比配方施肥 (T2) 处理高 179% 和 163%, 分别比磷肥减量 10% (T3) 处理高 111% 和 125%, 均

达差异显著水平 ($P<0.05$), 分别比磷肥减量 50% (T5) 处理高 18.3% 和 17.9%。磷肥农学效率和磷肥偏生产力随磷肥减量的增加而逐渐提高, 磷肥减量 50% (T5) 处理最高, 与除磷肥减量 30% (T4) 处理外的其他处理间差异达显著水平 ($P<0.05$)。

表4 不同施肥处理对黄瓜磷肥利用效率的影响

处理	磷肥贡献率 (%)	磷肥农学效率 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷肥偏生产力 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷肥吸收利用率 (%)
T2	$9.40\pm0.85\text{b}$	$25.98\pm2.58\text{b}$	$276.24\pm2.58\text{d}$	$8.40\pm1.18\text{c}$
T3	$12.41\pm2.05\text{b}$	$39.51\pm7.41\text{b}$	$317.57\pm7.41\text{c}$	$9.80\pm2.12\text{c}$
T4	$26.20\pm0.93\text{a}$	$126.98\pm6.10\text{a}$	$484.50\pm6.10\text{b}$	$22.09\pm1.41\text{a}$
T5	$22.14\pm4.24\text{a}$	$143.59\pm34.14\text{a}$	$644.11\pm34.14\text{a}$	$18.74\pm2.00\text{a}$

3 讨论

3.1 滴灌水肥一体化条件下磷肥减量对黄瓜磷素吸收累积的影响

磷对作物生长和产量形成十分重要,施用磷肥可以提高作物磷素累积,增加作物产量,提高作物品质^[25],这主要与施用磷肥可增加土壤有效磷含量,进而提高作物吸收利用有关^[26]。张彦才等^[27]指出,施用磷肥可增加黄瓜单株果实数、单果重和产量。刘志平等^[28]研究表明,磷肥能够增加土壤有效磷含量,增加黄瓜产量。李亚星等^[29]提出,磷肥的施用可以提高黄瓜植株磷养分吸收效率和产量。本研究发现,施用磷肥的处理(T2、T3、T4、T5)土壤有效磷含量随黄瓜生育期的推移持续增加,黄瓜各器官磷素累积量也显著提高,在盛瓜期达到吸收高峰,同时增加了黄瓜的产量。这与前人的研究结果一致。

本研究发现,在黄瓜全生育期,磷肥施用量与黄瓜磷素吸收累积呈抛物线关系,且磷肥减量30%(T4)时达到最大值。当施磷量在 $0 \sim 136 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,黄瓜磷素吸收累积量呈上升趋势,这可能由于磷是植物体内三磷酸(ATP)、脱氧核糖核酸(DNA)、磷酸腺苷(ADP)和细胞壁的组分^[30],也是植物核酸、细胞生物膜和多种蛋白质等有机化合物的重要组分,参与作物体内的信号响应、生化合成、能量代谢和转导等进程^[31-32],适量磷素能促进作物对养分的吸取利用和生长^[33],增加果实磷素含量。磷肥用量超过 $136 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,黄瓜对磷素的吸收累积明显下降,这可能是由于植株磷含量过高破坏了植株体内N/P、C/P平衡^[34],降低了植株对磷素的吸收累积有关^[35]。植株体内C/P、N/P可以反映磷养分限制程度,诠释植物生长速率和养分分配关系^[36],也代表作物在吸收养分过程中对氮、碳的同化能力^[37]。N/P是表征植株生产力受元素制约的主要指标^[38],N/P失衡会影响植株体内碳水化合物分配,导致植物叶片光合磷酸化进程被有机磷循环限制^[39]。

3.2 滴灌水肥一体化条件下磷肥减量对黄瓜产量的影响

研究表明,设施菜地土壤有效磷含量 $136 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,在推荐磷肥 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基础上,磷肥减施后黄瓜产量呈先增加后减少,且磷肥减量30%(T4)时产量达到最大值,这与陈芬等^[11]研

究结果相符合。不同施肥处理条件下黄瓜植株N/P不同,以不施磷肥(T1)最高,为5.10,配方施肥(T2)为4.39,磷肥减量10%、30%、50%处理(T3、T4、T5)的N/P分别为4.31、4.25、4.46,由于磷肥减量30%处理的N/P(4.25)与黄瓜最佳N/P最接近(4.16)^[40],植株体内适宜的氮磷比有利于磷素累积和产量的提高^[34, 41],故在磷肥减量30%(T4)处理时黄瓜果实磷素含量和产量最高,这与前人研究结果一致^[29, 42]。不同的C/P会影响植物运输系统,改变作物根系对磷素运输和吸收能力^[43],植株C/P与植物生长速率呈负相关^[44-46]。本研究发现,黄瓜植株C/P表现为:不施磷肥(47.9) > 磷肥减量50%(40.7) > 磷肥减量10%(39.9) > 配方施肥(38.8) > 磷肥减量30%(38.5)。在磷肥减量30%(T4)处理时,植株C/P最低,植株生长速率最高,提高了黄瓜对磷素的吸收累积,进而增加黄瓜产量。

3.3 滴灌水肥一体化条件下磷肥减量对土壤有效磷含量的影响

土壤有效磷含量体现了土壤磷素平衡情况和作物吸收磷素的能力。本研究发现,不施用化学磷肥(T1)处理的土壤有效磷含量随生育期的推进而增加,磷肥减量(T3、T4、T5)处理的土壤有效磷含量低于配方施肥(T2),降低了有效磷在土壤中的富集,但各处理土壤磷素仍处于盈余状态($>200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。一方面,这可能和所有处理均施用有机肥有关,有机肥的施用矿化释放了土壤中的无机磷,同时产生的有机酸可提高土壤中磷酸钙(铝、铁)中磷酸根离子含量,另外,此有机酸能够在土壤铁铝氧化物外侧形成保护,磷酸根的吸附被降低,从而显著提高土壤磷活化系数^[47-48]。另一方面,蔬菜对磷的需求较高,推荐的配方施肥为了保证土壤磷素不亏损,致使磷肥减量后的施磷量仍较高,施用磷肥直接补充了土壤有效磷。本试验有机肥的施用和化学磷肥减施后,仍造成土壤磷素盈余,说明磷肥减量仍有很大的潜力。

4 结论

在基础土壤有效磷含量为 $136.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的设施菜地上,通过滴灌水肥一体化和磷肥减量30%(N-P₂O₅-K₂O=225-136.5-270 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),可显著提高黄瓜植株磷含量及吸收累积量,增加作物产量($12270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和经济效益($17100 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$),同时提高养分利用效率(163%)。

参考文献:

- [1] 杜清洁, 杨亚勇, 张嘉欣, 等. 微孔膜灌溉随水施不同肥量对黄瓜光合参数、养分特征、品质及产量的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26 (7): 45-56.
- [2] 赵昌博, 郑世伟, 边婷, 等. 日光温室黄瓜不同连作茬次土壤的中量与微量元素含量的变化 [J]. 园艺学报, 2021, 48 (9): 1805-1814.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008 (5): 915-924.
- [4] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 增效磷肥对花生生长、产量和磷利用率的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2020, 42 (5): 888-895.
- [5] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 906-918.
- [6] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1416-1432.
- [7] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands [J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [8] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (20): 3944-3952.
- [9] 王小英, 陈占飞, 胡凡, 等. 陕西省农田化肥投入过量与不足的研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (6): 159-165.
- [10] Sattari S Z, van Ittersum M K, Giller K E, et al. Key role of China and its agriculture in global sustainable phosphorus management [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9 (5): 054003.
- [11] 陈芬, 余高, 陈容, 等. 减磷配施有机肥对辣椒生长及光合荧光特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (7): 114-125.
- [12] 赵伟, 杨圆圆, 蒋丽媛, 等. 减施磷肥提高设施番茄氮磷钾生理效率并减少土壤速效磷累积 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (10): 1710-1718.
- [13] 李若楠, 武雪萍, 黄绍文, 等. 不同施磷水平下温室冬春茬黄瓜日产量变化及其与光温环境的关系 [J]. 园艺学报, 2018, 45 (2): 289-298.
- [14] Li H, Huang H Y, Liang B. Canopy uptake of volatilized $^{15}\text{NH}_3$ derived from urea applications by tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in plastic-shed vegetable production systems [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 284: 110132.
- [15] Liang L Z, Qi H J, Xu P, et al. High phosphorus at seedling stage decreases the post-transplanting fertiliser requirement of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 190: 98-103.
- [16] 栗晓玲, 石培泽, 杨秀英, 等. 石羊河流域干旱沙漠区滴灌条件下苹果树耗水规律研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2005 (1): 19-23.
- [17] 刘永华, 沈明霞, 蒋小平, 等. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (11): 76-81, 48.
- [18] 王锐, 孙权. 基于水肥一体化的酿酒葡萄高效栽培与效益分析 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (10): 115-121.
- [19] 邹瑞昌, 冉瑞碧, 王远全, 等. 设施蔬菜水肥一体化技术应用效果研究 [J]. 长江蔬菜, 2015 (6): 54-56.
- [20] 严程明, 张江周, 石伟琦, 等. 滴灌施肥对菠萝产量、品质及经济效益的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (2): 496-502.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 42-50.
- [22] 蒋静静, 屈锋, 苏春杰, 等. 不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (1): 86-97.
- [23] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 磷钾配施对旱砂田西瓜产量、品质及养分利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (3): 687-695.
- [24] 龚海青, 张敬智, 陈晨, 等. 磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2017, 22 (5): 144-152.
- [25] 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (7): 1146-1156.
- [26] 张运红, 黄绍敏, 和爱玲, 等. 磷酸二铵添加增效剂对小麦-花生轮作系统作物产量和磷肥吸收利用的影响 [J]. 麦类作物学报, 2020, 40 (11): 1342-1350.
- [27] 张彦才, 李若楠, 王丽英, 等. 磷肥对日光温室番茄磷营养和产量及土壤酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008 (6): 1193-1199.
- [28] 刘志平, 武雪萍, 李若楠, 等. 温室滴灌条件下施用鸡粪和磷肥对土壤磷素的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (20): 3637-3647.
- [29] 李亚星, 刘善江, 徐秋明, 等. 氮、磷营养过量对土壤养分及黄瓜营养吸收的影响初探 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (1): 98-101.
- [30] 区惠平, 周柳强, 黄金生, 等. 基于甘蔗产量与土壤磷素平衡的磷肥施用量研究 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (13): 2818-2829.
- [31] 高天一, 李娜, 彭靖, 等. 连续施用生物炭对棕壤磷素形态及有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (9): 1451-1460.
- [32] Maathuis F J M. Physiological functions of mineral macronutrients [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12 (3): 250-258.
- [33] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (4): 793-798.
- [34] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥下黄泥田土壤-水

- 稻碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 土壤通报, 2017, 48 (1): 169-176.
- [35] 王凯, 沈潮, 孙冰, 等. 干旱胁迫对科尔沁沙地榆树幼苗 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (7): 2286-2294.
- [36] 张慧, 郭卫红, 杨秀清, 等. 麻栎种源林叶片碳、氮、磷化学计量特征的变异[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (7): 2225-2230.
- [37] Wang M, Murphy M T, Moore T R. Nutrient resorption of two evergreen shrubs in response to longterm fertilization in a bog [J]. *Oecologia*, 2014, 174 (2): 365-377.
- [38] Yuan Z Y, Chen H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. *Nature Communications*, 2011, 2 (1): 344.
- [39] 赵庆雷, 吴修, 袁守江, 等. 长期不同施肥模式下稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究[J]. 草业学报, 2014, 23 (1): 113-122.
- [40] 李家康, 陈培森, 沈桂琴, 等. 几种蔬菜的养分需求与钾素增产效果[J]. 土壤肥料, 1997 (3): 3-6.
- [41] 刘军, 曹之富, 黄延楠, 等. 日光温室黄瓜冬春茬栽培氮磷钾吸收特性研究[J]. 中国农业科学, 2007 (9): 2109-2113.
- [42] 程奕, 孟兆芳, 李淑菊, 等. 不同黄瓜品种养分吸收特性的研究[J]. 天津农业科学, 2004 (4): 28-31.
- [43] 韩博, 李广, 卓玛草, 等. 燕麦碳氮磷含量及化学计量比对盐胁迫的响应[J]. 草业科学, 2020, 37 (12): 2497-2506.
- [44] 唐玥, 童春富, 刘毛亚, 等. 上海金泽水库典型挺水植物碳、氮、磷化学计量特征的季节变化[J]. 生态学报, 2020, 40 (13): 4528-4537.
- [45] Agren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs – theory and observations [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7 (3): 185-191.
- [46] Matzek V, Vitousek P M. N:P stoichiometry and protein:RNA ratios in vascular plants: an evaluation of the growth-rate hypothesis [J]. *Ecology Letters*, 2009, 12 (8): 765-771.
- [47] 郭玉冰, 刘建玲, 郭巨秋, 等. 长期施用磷肥和有机肥对菜地土壤磷素有效性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43 (4): 76-82.
- [48] 李娜, 杨劲峰, 刘侯俊, 等. 长期轮作施肥棕壤磷素对磷盈亏的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1697-1703.

Effects of phosphate fertilizer reduction on phosphorous utilization efficiency and yield of cucumber under fertigation of drip irrigation

CHENG Qi-peng^{1, 2, 3}, XIONG Qi-zhong^{1, 2, 3}, XU Ya-ting^{1, 2, 3}, YE Xin-xin^{1, 2, 3}, LUO Lai-chao^{1, 2, 3}, LIU Long⁴, GAO Hong-jian^{1, 2, 3*} (1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Hefei Anhui 230036; 2. Research Centre of Phosphorous Efficient Utilization and Water Environment Protection along the Yangtze River Economic Belt, Hefei Anhui 230036; 3. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 4. Anhui Hexian Soil Fertilizer Workstation, Maanshan Anhui 238200)

Abstract: To explore the effects of phosphate fertilizer reduction on yield and nutrient utilization efficiency of cucumber in protected facilities, field experiments were conducted to investigate the differences in phosphorus absorption and utilization efficiency as well as cucumber yield under the condition of phosphate fertilizer reduction by 10%, 30% and 50%. Results showed that the available phosphorus contents in 0 ~ 20 cm soil layer decreased with the increase of phosphate fertilizer reduction, the content and accumulation of phosphorus in cucumber plants firstly increased and then decreased as the phosphate fertilizer reduced by 10% ~ 50% on the basis of formula fertilization. When the phosphate fertilizer was reduced by 30%, the total phosphorus accumulation in cucumber reached the highest level ($7.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and the contribution rate, agronomy efficiency, partial productivity and absorption and utilization ratio of phosphate fertilizer were increased by 178.7%, 388.7%, 75.4% and 162.9%, and the yield and output-input ratio were increased by 22.8% and 25.1%, respectively. In summary, reasonably reduction of phosphate fertilizer application significantly increased phosphorus absorption and accumulation in cucumber plants, and increased yield and output-input ratio as well as phosphorus utilization efficiency of cucumber under the water and fertilizer integration condition.

Key words: phosphate fertilizer reduction; water and fertilizer integration; protected cultivation; cucumber yield; nutrient utilization