

张立成, 李娟, 章明清, 等. 不同轮作施肥模式对菜田作物产量及养分吸收的影响 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (10): 1194–1202.

ZHANG L C, LI J, ZHANG M Q, et al. Effects of Crop Rotation and Fertilization on Yield and Nutrient Absorption of Vegetables/Rice [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (10): 1194–1202.

# 不同轮作施肥模式对菜田作物产量及养分吸收的影响

张立成<sup>1</sup>, 李娟<sup>1\*</sup>, 章明清<sup>1</sup>, 姚建族<sup>2</sup>

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 2. 永春县农业技术推广站, 福建 永春 362600)

**摘要:**【目的】探讨菜田不同轮作施肥模式对作物产量稳定性和养分吸收状况的影响。【方法】利用连续6年田间定位试验,测定每个轮作周年内各季作物的产量,根据产量水平及其变异系数,分析菜-菜-稻和菜-菜-菜2种轮作体系分别在推荐施肥和习惯施肥模式下作物的产量稳定性;根据每个轮作周年各季作物农产品和茎叶的养分含量测定结果,分析不同轮作施肥模式对氮、磷、钾养分吸收、积累和利用效率的影响。【结果】菜-菜-稻轮作在推荐施肥模式下四季豆、芥菜、水稻产量分别比习惯施肥模式增产9.07%、7.77%和8.43%。菜-菜-菜轮作在推荐施肥模式下四季豆、芥菜、豇豆产量分别比习惯施肥模式增产7.24%、-0.88%和7.54%。轮作施肥模式主要影响四季豆和豇豆的养分利用效率,菜-菜-稻轮作在推荐施肥模式下四季豆作物吸收氮、磷、钾养分利用效率分别比习惯施肥增加13.50%、10.43%、12.16%;菜-菜-菜轮作在推荐施肥模式下豇豆作物吸收钾养分利用效率比习惯施肥增加12.84%。菜-菜-稻轮作中采用推荐施肥模式各季作物的年度养分积累量显著高于习惯施肥,而菜-菜-菜轮作中推荐施肥与习惯施肥对作物的年度养分积累量差异不显著。【结论】菜-菜-稻轮作结合推荐施肥模式能够促进轮作周年内各季作物高产稳产,并能够提高作物的养分吸收利用率和年度养分积累量,为最佳种植模式。

**关键词:** 轮作; 施肥模式; 产量; 养分吸收; 定位试验

中图分类号: S 158.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 10-1194-09

## Effects of Crop Rotation and Fertilization on Yield and Nutrient Absorption of Vegetables/Rice

ZHANG Licheng<sup>1</sup>, LI Juan<sup>1\*</sup>, ZHANG Mingqing<sup>1</sup>, YAO Jianzu<sup>2</sup>

(1. Soil and Fertilizer Institute of Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China;

2. Agro-technical Extension Station of Yongchun County, Yongchun, Fujian 362600, China)

**Abstract:** 【Objective】 Effects of various types of crop rotation and fertilization on the yield and nutrient absorption of the vegetables and rice grown on the land were studied. 【Method】 Seasonal yields of the vegetables/rice were obtained from same assigned test lots for 6 consecutive years to determine the variation coefficient and yield stability of the vegetable-vegetable-rice (V-V-R) and vegetable-vegetable-vegetable (V-V-V) rotations on soil applied with either the recommended fertilization (RF) or conventional fertilization (CF). Efficiencies on nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) utilization by the vegetables/rice under the treatments were analyzed based on the nutrient contents in the leaves, stems, or grains of the plants. 【Result】 In V-V-R, the yields on the sequential plantings of kidney beans, mustard, and rice increased under RF by 9.07%, 7.77%, and 8.43%, respectively, over CF. Whereas in V-V-V the yield increases or reduction on kidney beans, mustard, and cowpeas were 7.24%, -0.88%, and 7.54%, respectively. On the other hand, the varied crop rotations and fertilizations appeared to mainly affect the nutrient utilization of kidney beans and cowpeas. The N, P, and K uptakes of the kidney beans were 13.50%, 10.43%, and 12.16%, respectively, higher with RF than CF in V-V-R; and that of the cowpea on K at 12.84% was the only significant difference found between RF and CF under V-V-V. The annual nutrient accumulation by the crops was significantly higher under RF than CF under V-V-R but not under V-V-V. 【Conclusion】 Planting vegetables and/or rice in the sequence of V-V-R combined with RF application could result in high and stable annual yields of all crops involved.

收稿日期: 2021-04-19 初稿; 2021-07-01 修改稿

作者简介: 张立成 (1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事施肥与土壤生态环境研究 (E-mail: zlc730@163.com)

\* 通信作者: 李娟 (1977-) 女, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤施肥与生态环境研究 (E-mail: lj-95@163.com)

基金项目: 福建省农业科学院自由探索项目 (ZYTS2019015); 福建省农业科学院青年英才项目 (YC2019005)

Consequently, besides the significant improvements on NPK absorption, utilization, and accumulation of the crops, V-V-R rotation with RF was recommended for the farming where applicable.

**Key words:** Crop rotation; fertilization; yield; nutrient absorption; fixed location experiment

## 0 引言

【研究意义】蔬菜是我国近二、三十年快速发展起来的经济作物。在我国南方地区，为克服连作障碍，蔬菜和水稻轮作是普遍实行的耕作制度。进一步优化菜田轮作施肥模式，利用不同作物对养分吸收强度以及时空差异性，减少菜田养分过度盈余和流失<sup>[1]</sup>，对促进蔬菜产业高质量可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】自 20 世纪中后期我国开始大量使用化肥以来，在蔬菜生产过程中，菜农为追求更高蔬菜产量和经济效益，盲目提高化肥施用量，尤其是蔬菜施肥过程中氮肥施用量普遍过高<sup>[2-3]</sup>。菜田过量施肥导致土壤残留养分增加，氮、磷流失风险指数上升。易引发农业面源污染现象<sup>[4]</sup>，李盟军<sup>[5]</sup>等对菜田连续 3 年的定位监测结果显示，菜农习惯施肥导致总氮年径流流失量占氮肥投入量的 14%。众多的研究表明，菜稻轮作能够维持土壤养分平衡，改善土壤微生态环境，促进作物养分吸收和提高产量水平<sup>[6-7]</sup>。姚金玲等<sup>[8]</sup>在洱海地区采用蚕豆-水稻轮作种植模式的总氮、总磷径流流失量分别为 2 228.10 g·hm<sup>-2</sup> 和 644.40 g·hm<sup>-2</sup>，小于其他种植模式。章明清等研究蔬菜和水稻轮作可以有效减轻蔬菜地土壤养分的过度积累，提高肥料利用效率<sup>[9]</sup>。朱芸<sup>[10]</sup>研究表明，油-稻体系水稻产量较麦-稻体系增产 5.9%。周昱磊等<sup>[11]</sup>研究表明在优化施磷方式下水稻-榨菜轮作模式的水稻产量最高，其次是水稻-小麦轮作，而水稻-闲田轮作模式最低。近年来，国内外长期定位试验表明，施肥是提高土壤肥力和维持农业可持续生产的基础，肥料利用效率是衡量农业生产可持续性的一项重要指数<sup>[12-14]</sup>。为提高化肥利用效率，促进作物高产稳产，相关学者提出了合理轮作和优化养分管理的诸多技术措施<sup>[15-18]</sup>。【本研究切入点】目前，关于轮作施肥模式对作物产量和养分吸收的长期影响，大多集中在大田作物上，对于菜田不同轮作施肥模式的相关研究还鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究以菜田不同轮作施肥模式的连续 6 年定位田间试验为研究对象，探讨菜-菜-稻轮作与菜-菜-菜轮作体系结合不同施肥模式对轮作周年内各季作物产量变化及养分吸收的影响，旨在为当地菜田轮作体系和养分管理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

试验于 2013 年 9 月至 2019 年 12 月在福建省永春县五里街镇埔头村轮作耕种定位点进行蔬菜和水稻轮作试验。试验地属于亚热带季风气候，年均降雨量 1 200 至 1 400 mm，年均温度 24 ℃ 左右。试验地土壤类型为赤红壤，质地为黏质土。试验开始前测得的基础土壤含量为：有机质含量 19.96 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 2.25 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 1.31 g·kg<sup>-1</sup>、全钾 27.86 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 107.73 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 60.35 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 116.00 mg·kg<sup>-1</sup>、土壤 pH 5.54。

### 1.2 试验设计

试验地为一矩形田块，长 26 m，宽 9 m，将其分成 12 个试验小区，每个小区长 5 m，宽 2.8 m，小区之间采用水泥田埂隔开，小区外设有灌溉排水沟。试验地四周设有 1 m 宽隔离保护行。试验地设有菜-菜-稻（芥菜-四季豆-水稻）、菜-菜-菜（芥菜-四季豆-豇豆）2 种轮作方式，并采用推荐和习惯 2 种施肥处理，各个试验处理施肥量如表 1 所示。每个试验处理设有 3 个重复按随机分组布置于试验小区中。每个年度各季作物的供试品种均保持为同一品种，以消除试验过程中品种的差异影响。推荐施肥模式：基于肥料效应函数结合基础土壤肥力水平的推荐方法。习惯施肥模式：施肥量依据当地农户施肥习惯而定。2 种施肥方式的肥料类别均为氮肥施用尿素（N 46%）、磷肥施用过磷酸钙（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%）、钾肥施用氯化钾（K<sub>2</sub>O 60%）。每季作物所施的磷肥全部做基肥，氮、钾肥则分基肥（占施肥量 40%）和追肥（占施肥量 60%）施用。四季豆和豇豆氮钾素追肥分 2 次施用，每次占施肥量的 30%；芥菜氮钾素追肥分 3 次施用，每次占施肥量的 20%；水稻氮素追肥分 2 次施用，分蘖肥占施用量的 50%，穗肥占施用量的 10%，钾素追肥为 1 次施用施肥量的 60%。

### 1.3 采样方法

试验于每个轮作周年内采集每季作物的植株、果实样品。植株样品采集方式：作物收获后在每个小区随机采集植株样品鲜重约 500 g 带回实验室检测分析。果实样品采集方式：四季豆和豇豆的结实期长达一个月左右，因此采用分批次采集每个试验小

表 1 一年三熟制轮作施肥定位试验设计方案  
Table 1 Experimental design of 3-crops rotation and fertilization on vegetables and/or rice

| 处理<br>Treatment | 轮作施肥模式<br>Crop rotation Fertilization mode | N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O施肥量<br>N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O amount of fertilizer/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                           |                        |                    |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|
|                 |                                            | 四季豆 (第1季)                                                                                                                                              | 芥菜 (第2季)                  | 早稻 (第3季)               | 豇豆 (第3季)           |
|                 |                                            | Kidney bean (The first)                                                                                                                                | Mustard leaf (The second) | Early rice (The third) | Cowpea (The third) |
| T1              | 菜-菜-稻 (推荐施肥)<br>V-V-R (RF)                 | 150-45-105                                                                                                                                             | 270-75-150                | 75-0-60                | —                  |
| T2              | 菜-菜-菜 (推荐施肥)<br>V-V-V (RF)                 | 150-45-105                                                                                                                                             | 270-75-150                | —                      | 150-45-105         |
| T3              | 菜-菜-稻 (习惯施肥)<br>V-V-R (PF)                 | 171-67.5-67.5                                                                                                                                          | 286.5-204-189             | 141-45-0               | —                  |
| T4              | 菜-菜-菜 (习惯施肥)<br>V-V-V (PF)                 | 171-67.5-67.5                                                                                                                                          | 286.5-204-189             | —                      | 201-135-135        |

注：四季豆种植时间9月初至11月底，芥菜种植时间为每年的12月初至2月底，早稻和豇豆每年种植时间为4月初至7月底。V-V-V表示菜-菜-稻轮作，V-V-R表示菜-菜-稻轮作，RF表示推荐施肥模式，CF表示习惯施肥模式。  
Note: the planting time of kidney bean is from early September to the end of November, and mustard leaf is from early December to the end of February, rice and cowpea are planted from early April to the end of July. V-V-V means the vegetable-vegetable-vegetable rotation, V-V-R means the vegetable-vegetable-rice rotation, RF means the recommended fertilization, CF means the conventional fertilization.

区果实样品；芥菜和水稻作物的果实均为成熟后一次性采收。植株生物量采集测定方式：作物收获后称量各个试验小区的植株鲜重，并通过测定其样品含水量计算植株干重。

1.4 检测项目与方法

植物样品采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消解，分别测定根系、植株、果实的氮、磷、钾含量。植株样品氮、磷、钾含量的测定方法参照鲍士旦编著的《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>。植株样品前处理方法：将采集的样品放置鼓风烘箱内，在 105 ℃ 下杀青 30 min，然后在 75 ℃ 下烘 24 h。四季豆和豇豆产量测定方法：作物成熟期采用分批次采集果实，累加后计算该季作物的总产量。芥菜产量测定方法：作物成熟后一次性采收芥菜叶片称其鲜重作为芥菜产量。水稻产量测定方法：作物成熟后一次性采收湿谷重，然后将谷粒晒干并称其干重作为水稻产量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件整理试验数据，采用 Matlab 2015b 软件对各处理之间进行差异显著性分析（Duncan’s 新复极差法进行显著性检验）。产量变异系数=试验多年产量标准差/试验多年产量平均值。植株与果实的氮（磷、钾）养分吸收量（kg·hm<sup>-2</sup>）=干物质重×氮（磷、钾）养分含量。作物吸收氮（磷、钾）养分利用效率=果实氮（磷、钾）养分吸收量/（植株+果实）氮（磷、钾）养分吸收量×100%。

2 结果与分析

2.1 不同轮作施肥模式对作物产量的影响

试验统计了 2014—2019 年的不同轮作施肥处理

各季供试作物的年度产量动态如图 1 所示。通过各个试验处理第一季和第二季作物产量动态图 1-a 与图 1-b 可知：2014 年至 2016 年各个处理四季豆和芥菜产量均呈下降趋势。2016 年 T1、T2、T3、T4 处理四季豆产量比 2014 年分别下降 32.44%、32.85%、16.91%、36.25%，芥菜产量比 2014 年分别下降 27.70%、50.65%、55.35%、57.34%。2016—2019 年 T1、T3 处理产量逐渐上升并趋于平稳，T2、T4 处理产量上升后又呈下降变化趋势。2017、2018、2019 年四季豆产量 T1 处理比 2016 年分别增加 35.61%、37.24%、32.20%，T3 处理比 2016 年分别增加 34.20%、32.33%、32.61%，T2 处理比 2016 年分别增加 41.72%、4.02%、5.76%，T4 处理比 2016 年分别增加 68.23%、30.86%、29.60%。第一季和第二季作物产量总的变化趋势为 T1、T3 处理分别高于 T2、T4 处理。经过连续 3 年试验后 T1、T3 处理产量比较稳定，而 T2、T4 处理出现下降趋势。图 1-c 是第三季供试作物水稻产量的动态变化，从图中可知 2014 年至 2019 年水稻产量整体上处于上升趋势，T1 处理产量均要高于 T3 处理。T1、T3 处理水稻产量 2016 年比 2014 年分别增加 14.22%、18.16%，2019 年比 2014 年分别增加 10.62%、20.33%。图 1-d 是第三季供试作物豇豆的产量动态变化，从图中可知 2014 年至 2019 年豇豆产量逐步下降，T2 处理产量均要高 T4 处理。T2、T4 处理水稻产量 2016 年比 2014 年分别下降 21.25%、22.73%，2019 年比 2014 年分别增加 69.47%、65.35%。试验中第一季和第二季作物采用推荐施肥处理的产量较为平稳，而习惯施肥处理的产量则呈现下降变化。通过连续 6 年的作物产量结果可知，虽然受降雨、气

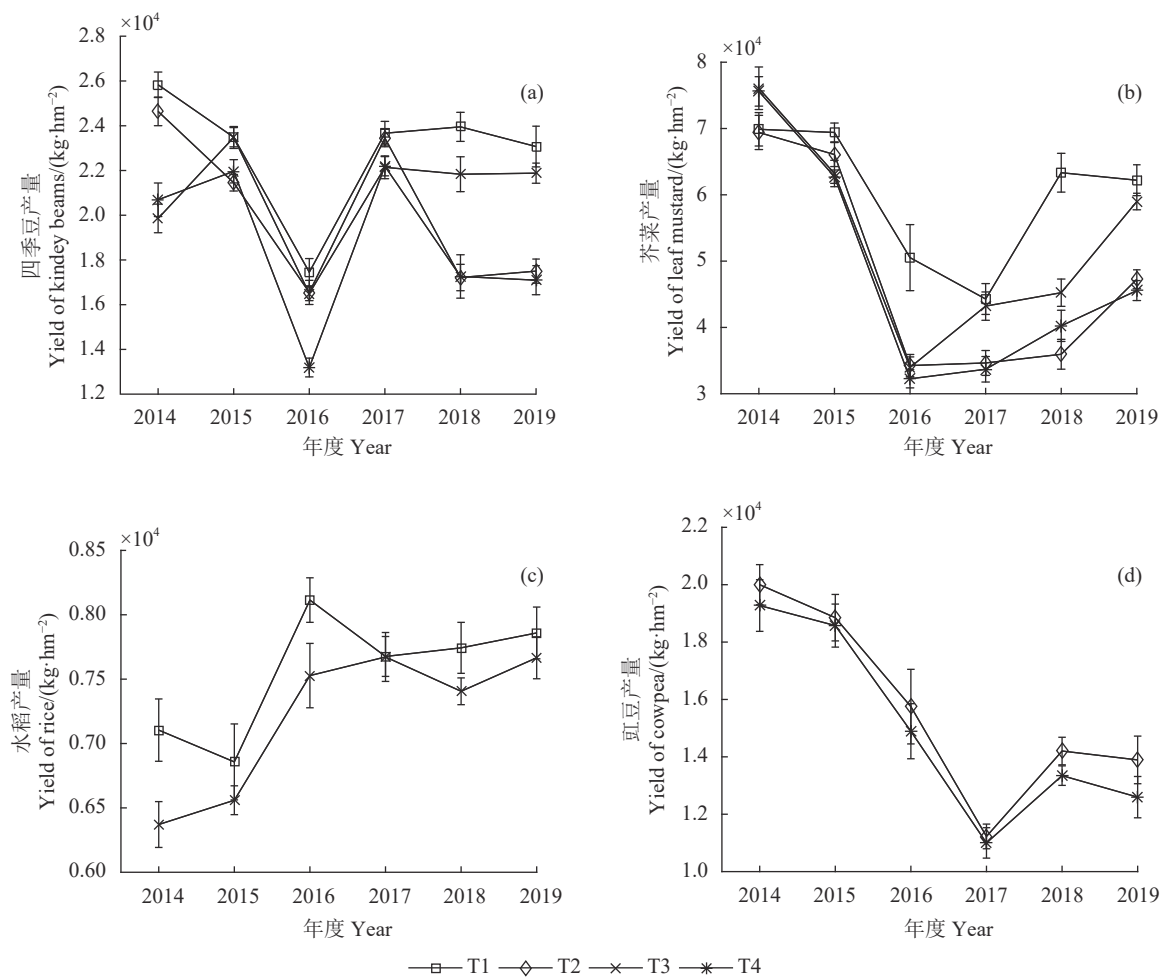


图 1 不同轮作施肥模式下四季豆、芥菜、早稻和豇豆的年度产量动态  
Fig. 1 Annual yields of kidney beans, mustard green, rice, and cowpeas under treatments

候环境等因素的影响，各季作物产量具有年际变化波动，但是年度产量动态仍能体现出不同轮作施肥处理之间的产量变化趋势。

表 2 根据 6 个年度内各处理 3 次重复的试验结果，分别对四季豆、芥菜、早稻和豇豆产量进行方差分析和多重比较。结果表明，不同轮作施肥模式之间四季豆、芥菜、豇豆产量差异极显著，水稻产量差异显著。相同轮作方式不同施肥模式各季作物的 6 年平均产量比较：菜-菜-稻轮作体系下，推荐施肥模式（T1）处理的四季豆、芥菜和早稻产量比习惯施肥模式（T3）处理分别增产 9.07%、7.77% 和 8.43%；菜-菜-菜轮作体系下，推荐施肥模式（T2）处理的四季豆、芥菜和豇豆产量比习惯施肥模式（T4）平均分别增产 7.24%、-0.88% 和 7.54%。2 种施肥模式下不同轮作体系各季作物产量的变异系数显示，菜-菜-稻轮作处理的四季豆和芥菜产量变异系数平均值分别为 9.30% 和 25.89%，菜-菜-菜轮作则分别为 16.94% 和 34.70%。通过对变异系数的分析结果表明，四季豆和芥菜产量在菜-菜-稻轮作体系中具有较好的稳定性。

2.2 不同轮作施肥模式对作物氮、磷、钾养分含量的影响

表 3 为 2014 年至 2019 年测得的不同轮作施肥模式各季作物果实和茎叶中氮、磷、钾含量。第一季作物四季豆中氮、磷、钾含量各处理相比较：T1 处理果实氮含量 4.28%，显著大于 T2、T3 处理；T1 处理植株中氮含量 2.33% 显著小于 T2、T3、T4 处理；T1、T2、T3、T4 处理果实与植株中磷含量均无显著差异；T1 处理果实钾含量 3.10% 显著大于 T2、T3 处理。T2 处理植株钾含量 2.42% 显著大于 T1、T3、T4 处理。第二季作物芥菜中氮、磷、钾含量各处理相比较：T1、T2、T3、T4 处理植株的氮含量和磷含量各处理之间无显著差异；T4 处理钾含量 5.19% 显著高于 T1、T2、T3 处理。第三季作物水稻中氮、磷、钾含量 T1 与 T3 处理相比较：T1 处理水稻籽粒中氮含量 1.53% 显著大于 T3 处理 1.42%，植株中氮含量 T1 与 T3 处理无显著差异；水稻籽粒中磷含量 0.31% T1 小于 T3 处理 0.38%，钾含量 1.03% 小于 T3 处理 1.12%。第三季作物豇豆中氮、磷、钾含量

表 2 不同轮作施肥模式对供试作物产量的影响  
Table 2 Effect on crop yield under treatments

| 试验处理<br>Treatment | 四季豆 Kidney bean                                  |                                       | 芥菜 Mustard leaf                                  |                                       | 早稻 Early rice                                    |                                       | 豇豆 Cowpea                                        |                                       |
|-------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
|                   | 平均产量<br>Average yield/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% | 平均产量<br>Average yield/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% | 平均产量<br>Average yield/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% | 平均产量<br>Average yield/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 变异系数<br>Coefficient of<br>variation/% |
| T1                | 23.25±2.09 a                                     | 8.99                                  | 57.95±13.27 a                                    | 22.90                                 | 7.47±0.45 a                                      | 6.02                                  | —                                                | —                                     |
| T2                | 20.31±3.31 c                                     | 16.30                                 | 47.93±16.11 c                                    | 33.61                                 | —                                                | —                                     | 16.32±4.22 a                                     | 25.86                                 |
| T3                | 21.14±2.03 b                                     | 9.60                                  | 53.45±15.43 b                                    | 28.87                                 | 6.84±0.49 b                                      | 7.16                                  | —                                                | —                                     |
| T4                | 18.84±3.31 d                                     | 17.57                                 | 48.35±17.30 c                                    | 35.78                                 | —                                                | —                                     | 15.09±3.57 b                                     | 23.66                                 |

注：表中四季豆、芥菜和豇豆产量为鲜重产量，早稻则为稻谷干重产量。不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下表同。  
Note: the products of kidney bean and mustard and cowpea are the fresh weight, and that of early rice is the dry weight. Data with different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at  $P<0.05$ . The same as follows.

表 3 2014 至 2019 年不同轮作施肥处理各季作物氮、磷、钾平均含量（单位：%）  
Table 3 Average N, P, and K contents of vegetables/rice under treatments, 2014–2019

| 养分元素<br>Nutriment element | 处理<br>Treatment | 四季豆<br>Kidney bean |             | 芥菜<br>Mustard leaf | 早稻<br>Early rice |             | 豇豆<br>Cowpea |             |
|---------------------------|-----------------|--------------------|-------------|--------------------|------------------|-------------|--------------|-------------|
|                           |                 | 籽粒<br>Grain        | 植株<br>Plant | 植株<br>Plant        | 籽粒<br>Grain      | 植株<br>Plant | 籽粒<br>Grain  | 植株<br>Plant |
| 氮 N                       | T1              | 4.28 a             | 2.33 c      | 3.65 a             | 1.53 a           | 1.02 a      | —            | —           |
|                           | T2              | 3.93 b             | 2.45 b      | 3.71 a             | —                | —           | 3.46 a       | 1.53 a      |
|                           | T3              | 4.02 b             | 2.54 a      | 3.73 a             | 1.42 b           | 0.99 a      | —            | —           |
|                           | T4              | 4.20 a             | 2.42 b      | 3.73 a             | —                | —           | 3.41 a       | 1.59 a      |
| 磷 P                       | T1              | 0.55 a             | 0.31 a      | 0.73 a             | 0.31 b           | 0.16 a      | —            | —           |
|                           | T2              | 0.53 a             | 0.31 a      | 0.67 a             | —                | —           | 0.67 a       | 0.36 a      |
|                           | T3              | 0.53 a             | 0.32 a      | 0.71 a             | 0.38 a           | 0.15 a      | —            | —           |
|                           | T4              | 0.54 a             | 0.29 a      | 0.72 a             | —                | —           | 0.62 a       | 0.37 a      |
| 钾 K                       | T1              | 3.10 a             | 2.22 b      | 5.01 b             | 1.03 b           | 4.03 a      | —            | —           |
|                           | T2              | 2.85 b             | 2.42 a      | 4.99 b             | —                | —           | 2.89 a       | 3.99 a      |
|                           | T3              | 2.89 b             | 2.29 b      | 5.03 b             | 1.12 a           | 3.99 a      | —            | —           |
|                           | T4              | 3.00 a             | 2.31 b      | 5.19 a             | —                | —           | 1.93 b       | 4.01 a      |

T2 与 T4 处理相比较：豇豆籽粒氮、磷含量 T2 与 T4 处理无显著差异；T2 处理豇豆籽粒钾含量 2.89% 显著大于 T4 处理 1.93%。

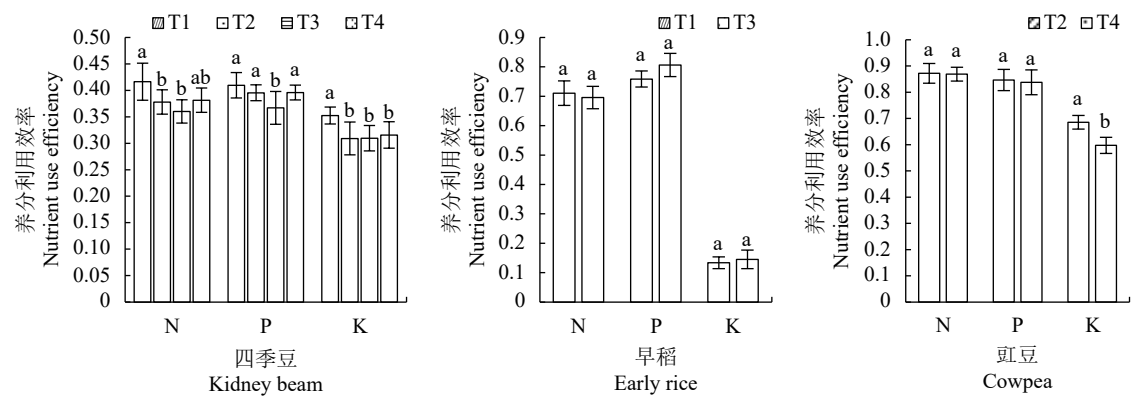
2.3 不同轮作施肥模式对轮作周期内各季作物吸收氮、磷、钾养分利用效率的影响

图 2 为不同轮作施肥模式下作物氮、磷、钾养分利用效率，其中第二季作物为芥菜所吸收的氮、磷、钾养分大部分运移至可食用部分的茎叶，因而不探讨其养分利用效率。第一季作物四季豆，T1 处理的氮、磷、钾养分利用效率均显著高于 T3 处理。T1 处理四季豆氮和钾养分利用效率显著高于 T2 和 T4 处理，四季豆磷养分利用效率，T1、T2、T4 处理之间相比较无显著差异。T2 和 T4 处理四季豆氮、磷、钾养分利用效率无显著差异。第三季作物水稻

在不同轮作施肥模式下 T1 和 T3 处理氮、磷、钾养分利用效率无显著差异。第四季作物豇豆在不同轮作施肥模式下 T2 处理钾养分利用效率显著高于 T4 处理，T2 处理和 T4 处理豇豆氮和磷的养分利用效率无显著差异。从各季作物对氮、磷、钾养分吸收利用整体上来看采用推荐施肥方式养分利用效率高。菜-菜-稻轮作下四季豆作物推荐施肥比习惯施肥氮、磷、钾养分利用效率分别增加 13.50%、10.43%、12.16%。菜-菜-菜轮作下豇豆作物推荐施肥比习惯施肥钾养分利用效率增加 12.84%。

2.4 不同轮作施肥模式对作物吸收氮、磷、钾养分年度累积量的影响

图 3 对试验小区不同轮作施肥模式下各季作物吸收的氮、磷、钾养分进行年度累积量回归分析。



注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。  
Note: Data with different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at  $P<0.05$ .

图 2 不同轮作施肥处理各季作物吸收氮、磷、钾养分利用效率  
Fig. 2 N, P, and K uptake efficiency of vegetables/rice under treatments

分析结果表明连续 6 年不同轮作施肥处理，各季作物吸收的氮、磷、钾养分年度累积量随年份呈现出显著线性相关（ $P<0.01$ ）。同一处理年度内作物吸收的氮、磷、钾养分元素随年份的增加表现出相同的变化趋势。通过决定系数  $R^2$  比较，T1 和 T3 处理年度内各季作物吸收的氮、磷、钾养分含量较稳定，年份间的差异较小（表 4）。连续 6 年不同轮作施肥处理年度累积吸收的氮、磷、钾养分元素结

果：T1>T3>T4>T2，每个试验小区氮素吸收的累积量分别为 7.80、7.38、5.40、5.11 kg；每试验小区磷素吸收的累积量分别为 1.42、1.35、0.91、0.87 kg；每个试验小区钾素吸收的累积量分别为 9.01、8.37、6.45、6.19 kg。表 4 中通过线性回归分析的拟合趋势线的斜率  $b$  值可知：T1 与 T3 处理年平均吸收的氮、磷、钾养分元素显著高于 T2 和 T4 处理。说明菜-菜-稻轮作模式的年度养分吸收量高于菜-菜-菜轮作。

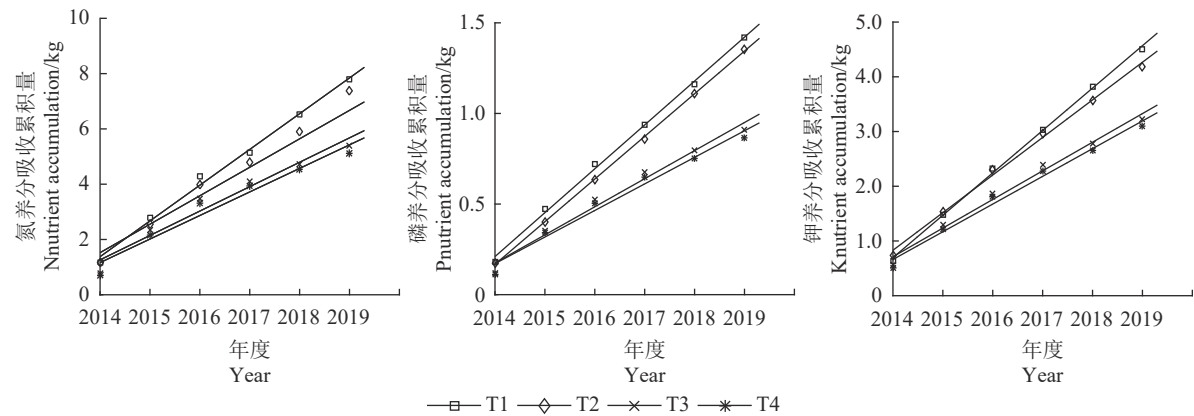


图 3 不同轮作施肥模式对作物吸收氮、磷、钾年度累积量回归分析

Fig. 3 Regression analysis on annual accumulation and NPK absorption of experiment plots of vegetables/rice under treatments

表 4 不同轮作施肥模式处理氮、磷、钾年度养分吸收累积量灰色线性模型  
Table 4 Linear grey model on NPK absorption of vegetables/rice as affected by treatments

| 处理<br>Treatment | 氮养分累积量<br>N nutrient accumulation |       |                                           | 磷养分累积量<br>P nutrient accumulation |       |                                           | 钾养分累积量<br>K nutrient accumulation |       |                                           |
|-----------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------------|
|                 | $y=a+bt$                          | $R^2$ | b的95%置信区间<br>95% confidence interval of b | $y=a+bt$                          | $R^2$ | b的95%置信区间<br>95% confidence interval of b | $y=a+bt$                          | $R^2$ | b的95%置信区间<br>95% confidence interval of b |
| T1              | $y=0.085+1.293t$                  | 0.994 | 1.15~1.43                                 | $y=-0.032+0.242t$                 | 1.000 | 0.23~0.26                                 | $y=-0.158+1.549t$                 | 1.000 | 1.47~1.63                                 |
| T2              | $y=0.311+0.852t$                  | 0.955 | 0.60~1.11                                 | $y=0.025+0.147t$                  | 0.997 | 0.12~0.18                                 | $y=0.0311+1.013t$                 | 0.986 | 0.85~1.18                                 |
| T3              | $y=0.098+1.199t$                  | 0.994 | 1.07~1.33                                 | $y=-0.068+0.235t$                 | 1.000 | 0.23~0.24                                 | $y=-0.286+1.374t$                 | 1.000 | 1.26~1.49                                 |
| T4              | $y=0.380+0.883t$                  | 0.958 | 0.63~1.14                                 | $y=0.020+0.155t$                  | 0.981 | 0.13~0.18                                 | $y=0.379+1.046t$                  | 0.988 | 0.89~1.21                                 |

菜-菜-稻轮作中采用推荐施肥模式对作物的年度养分吸收量显著高于习惯施肥,而菜-菜-菜轮作中推荐施肥与习惯施肥对作物的年度养分吸收量差异不明显。

### 3 讨论

#### 3.1 轮作施肥模式对菜田作物产量的影响

作物产量能够有效反映土壤养分供应能力,为确定适宜施肥量提供参考作用,同时也是农业可持续发展的重要评价指标<sup>[20]</sup>。本研究采用长期定位试验的方式,分别对不同轮作施肥模式下作物产量进行统计分析,连续 6 年的定位试验结果表明,菜-菜-稻轮作结合推荐施肥模式作物产量最高,各季作物平均产量比其他处理增加 5.5%~17.3%,并且年份间产量变异系数小,说明推荐施肥模式下菜-菜-稻轮作的耕种制度作物产量效益最佳,土壤持续生产力稳定。菜-菜-稻轮作是一种水旱交替耕种方式,与持续淹水或持续旱作相比较,水旱交替可以促进土壤磷、钾养分释放,增强作物对养分的吸收<sup>[21]</sup>。顾晓等<sup>[22]</sup>对豇豆-水稻轮作模式进行研究,水稻季减量施肥后,前茬作物残留肥效对水稻的营养生长具有较好的促进作用,其各项生长指标高于对照处理。因此,在轮作施肥过程中要充分考虑后残留养分的影响,通过科学的施肥模式平衡轮作周期内作物施肥量提高养分利用效率。杜加银等<sup>[23]</sup>研究表明,与常规施肥处理相比,在减少氮肥施用量、优化控制磷钾肥施入的条件下,作物地上部氮、钾吸收量均有显著提高,进而促使作物产量增加。本研究中的推荐施肥量根据作物肥料效应函数模型结合试验小区的基础土壤肥力得出。与当地农户的习惯施肥模式相比较,推荐施肥模式减少氮、磷肥投入量提高钾肥投入量,通过优化施肥方式调节土壤养分供应,促进作物增产稳产。山楠等<sup>[24]</sup>采用产量农学效应和农学效率推荐施肥方法与习惯施肥方式相比较减少氮肥用量和提高钾肥用量,在北京大兴区的两个试验点白菜产量分别提高了 13.3% 和 18.0%。本研究中定位试验点当地农户采用的习惯施肥模式,氮、磷肥施入量过多和钾肥偏少现象,而钾素的亏缺则使土壤养分失衡,生产力下降。合理的轮作施肥是保持土壤中的氮、磷、钾养分供应平衡和促进作物产量稳定的重要因素。

#### 3.2 轮作施肥模式对菜田作物养分吸收的影响

氮、磷、钾合理的配施对菜田轮作体系下各季作物的养分吸收与生长发育起重要作用,不同施肥模式下作物的植株形态、生理生化指标以及吸收养分的利用效率差异显著<sup>[25]</sup>。相关的研究表明通过肥

料效应函数模型进行的推荐施肥方法能调节土壤养分含量,提高作物养分吸收,是保障作物高产稳产的有效措施<sup>[26-27]</sup>。在田间试验中,作物产量的形成与营养元素的吸收积累密切相关,康利允等<sup>[28]</sup>研究表明氮、钾合理配施有利于氮磷钾在甜瓜体内积累,进而提高养分向生殖器官的分配比率,促进甜瓜生长发育达到增产效果。武际等<sup>[29]</sup>研究表明,氮、钾养分间存在正交互作用,且合理配施能促进作物养分积累。本研究显示推荐施肥模式下蔬菜作物四季豆吸收氮、磷、钾养分的利用效率分别为 41.63%、40.97%、35.23%,显著高于习惯施肥模式,豇豆吸收钾养分的利用效率为 68.53%,显著高于习惯施肥模式,而施肥模式对水稻吸收养分的利用效率未产生显著影响。这可能与水稻在淹水环境下生长相关,淹水对土壤养分具有消纳调节作用,因而,施肥模式对水稻吸收氮、磷、钾养分的影响较小<sup>[30]</sup>。四季豆和豇豆属于旱地生长作物,当土壤养分供应不平衡,作物吸收的氮、磷、钾养分积累量减少,影响养分向籽粒运移,进而使作物产量下降。水稻和豇豆籽粒所需养分较多,成熟期茎叶储存的氮素养分大部分会向籽粒转移,因而氮的养分利用效率较高,而过量施用氮肥,则会造成作物贪青,成熟期转运量下降,氮养分利用效率低。本研究中的推荐施肥模式通过降低氮、磷肥用量和增加钾肥用量,使土壤养分供应与作物的营养需求相趋于一致,促进了作物的生长发育,进而影响作物的营养器官对各类养分元素的吸收和积累。轮作过程中,不合理的施肥会造成作物减产,肥料养分未能被作物充分吸收利用。农民的习惯施肥模式,存在某元素的施用过量或不足的问题,过量的养分元素会残存于土壤破坏土壤的养分平衡状态,过低的养分元素引起作物生长过程中营养不良使养分吸收积累量下降。轮作体系的推荐施肥模式,肥料养分的分配应向需求较高的作物倾斜,利用后茬作物对前茬作物残留养分的吸收来平衡周年内总养分的消耗与补充<sup>[31]</sup>。作物对养分的吸收、土壤基础养分供给、施肥对养分的补充,三者之间构成一个养分盈余和亏缺的有机整体,而施肥模式对土壤养分元素的收支平衡具有调节作用<sup>[32]</sup>。轮作体系下推荐施肥模式通过协调好各季作物的养分吸收积累和转移利用,促进作物的产量增加。本研究中,推荐施肥模式下,菜-菜-稻轮作周年内各季作物对氮、磷、钾养分吸收的积累量显著高于习惯施肥模式,说明推荐施肥模式对轮作体系中各季作物生长的养分需求与供给相协调,促进了作物的养分吸收。Yang 等<sup>[33]</sup>对玉米-小麦轮作体系采用平衡氮、磷、钾养分供给的推荐

施肥模式, 有利于各季作物对养分的积累, 并能提高肥料利用效率。王丹丹等<sup>[34]</sup>研究表明肥料利用效率的差异与养分积累和转运密切相关, 推荐施肥模式下氮、磷、钾平衡施用可有效提高小麦生育期的养分积累, 并能促进氮、磷、钾养分向籽粒的转运积累量。过量施肥不仅浪费资源还会污染环境, 施肥不足则影响作物的养分吸收和积累, 造成结实率下降。这也进一步说明了推荐施肥模式的重要意义和在农业生产中的实用性。

## 4 结论

连续 6 年的菜田轮作定位施肥试验表明: (1) 菜-菜-稻结合推荐施肥模式的四季豆和芥菜平均产量最高且稳定性最好, 菜-菜-菜轮作结合推荐施肥或习惯施肥模式的四季豆和芥菜产量最低且稳定性较差。(2) 菜-菜-稻轮作结合推荐施肥模式各季作物对氮、磷、钾的养分吸收利率高于其他轮作施肥模式。(3) 推荐施肥模式下菜-菜-稻轮作周年内各季作物对氮、磷、钾养分的年度积累量高于习惯施肥模式。本研究中不同轮作施肥模式的长期定位试验得出菜-菜-稻轮作结合推荐施肥模式是最佳的种植模式。

## 参考文献:

- [1] 王志强, 黄国勤, 赵其国. 新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点简析 [J]. 土壤, 2017, 49 (4): 651-657.  
WANG Z Q, HUANG G Q, ZHAO Q G. Brief analysis on connotation, significance and implementing essentials of rotation fallow under new normal in China [J]. *Soils*, 2017, 49 (4): 651-657. (in Chinese)
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (4): 783-795.  
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (4): 783-795. (in Chinese)
- [3] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (3): 503-517.  
WANG J G, LIN S, LI B G. Nitrogen Cycling and Management Strategies in Chinese Agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (3): 503-517. (in Chinese)
- [4] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 不同施肥模式对菜地氮素径流损失与表观平衡的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (4): 37-42, 50.  
GUO Z, LIU H J, ZHANG Y F, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen loss by surface runoff and the apparent nitrogen balance in the vegetable fields of Taihu lake region, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (4): 37-42, 50. (in Chinese)
- [5] 李盟军, 姚建武, 王荣辉, 等. 不同养分管理措施下常年菜地蔬菜生
- 长及氮素径流特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (5): 1190-1199.
- LI M J, YAO J W, WANG R H, et al. Effects of different nutrition management on vegetable growth and runoff characteristics of soil nitrogen in perennial vegetable field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (5): 1190-1199. (in Chinese)
- [6] WANG S, YANG M, LIAO S P, et al. Yield and the 15 N fate in rice/maize season in the Yangtze River basin [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111 (2): 517-527.
- [7] LINH T B, GUONG V T, TRAN V T T, et al. Effects of crop rotation on properties of a Vietnam clay soil under rice-based cropping systems in small-scale farmers' fields [J]. *Soil Research*, 2017, 55 (2): 162.
- [8] 姚金玲, 郭海刚, 倪喜云, 等. 洱海流域不同轮作与施肥方式对农田氮磷径流损失的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36 (5): 600-613.  
YAO J L, GUO H G, NI X Y, et al. Influence of different crop rotations and fertilization methods on nitrogen and phosphorus runoff losses in Erhai Lake basin, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36 (5): 600-613. (in Chinese)
- [9] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 菜-稻轮作对菜田氮、磷利用特性和富集状况的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (1): 117-126.  
ZHANG M Q, LI J, KONG Q B, et al. Effect of vegetable-paddy rice rotation system on N and P utilization characters and their enrichments in vegetable fields [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (1): 117-126. (in Chinese)
- [10] 朱芸. 油—稻与麦—稻轮作体系水稻产量差异及其养分机制初探 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.  
ZHU Y. Study on rice yield differences and nutrient mechanism between rapeseed-rice and wheat-rice rotation systems [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [11] 周昱磊, 陈轩敬, 杨敏, 等. 不同轮作制度减量施肥对水稻群体质量及产量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2016, 44 (11): 77-82.  
ZHOU Y L, CHEN X J, YANG M, et al. Effects of reducing chemical fertilizer application on rice population quality in different rotation system [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44 (11): 77-82. (in Chinese)
- [12] 王西和, 吕金岭, 刘骅. 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 213-223.  
WANG X H, LÜ J L, LIU H. Potassium balance and use efficiency in grey desert soil under continuous wheat-maize-cotton crop rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 213-223. (in Chinese)
- [13] CHI B J, ZHANG Y J, ZHANG D M, et al. Wide-strip intercropping of cotton and peanut combined with strip rotation increases crop productivity and economic returns [J]. *Field Crops Research*, 2019, 243: 107617.
- [14] GOURAV, SANKHYAN N K, SHARMA R P, et al. Long term effect of fertilizers and amendments on the properties of an acid Alfisol and uptake of primary nutrients and sulfur in maize-wheat rotation in North Western Himalayas [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42 (15): 1770-1788.
- [15] KIANI M, HERNANDEZ-RAMIREZ G, QUIDEAU S, et al.

- Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: Crop rotations and nutrient regimes [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 248: 123–135.
- [16] 俄胜哲, 杨志奇, 罗照霞, 等. 长期定位施肥对黄绵土区作物产量及养分回收率的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35 (1): 55–63.  
E S Z, YANG Z Q, LUO Z X, et al. Effect of long-term fertilization on crop yields and nutrition accumulative recovery rates in Loessial soils region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35 (1): 55–63. (in Chinese)
- [17] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (S1): 139–144.  
CHEN X J, ZHAO Y N, CHAI G Q, et al. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S1): 139–144. (in Chinese)
- [18] MUNKHOLM L J, HECK R J, DEEN B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 127: 85–91.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 黄兴成, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥下黄壤综合肥力演变及作物产量响应 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24 (6): 1484–1491.  
HUANG X C, LI Y, BAI Y J, et al. Evolution of yellow soil fertility under long-term fertilization and response of crop yield [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (6): 1484–1491. (in Chinese)
- [21] ZHANG H, XUE Y G, WANG Z Q, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice [J]. *Crop Science*, 2009, 49 (6): 2246–2260.
- [22] 顾晓, 吴孚桂, 刘慧芳, 等. 豆豉-水稻轮作模式下水稻生长的不均匀性 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40 (7): 1259–1264.  
GU X, WU F G, LIU H F, et al. Heterogeneity of rice growth in the mode of cowpea-rice rotation [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40 (7): 1259–1264. (in Chinese)
- [23] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2013, 19 (3): 523–533.  
DU J Y, RU M, NI W Z. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19 (3): 523–533. (in Chinese)
- [24] 山楠, 串丽敏, 刘继培, 等. 基于产量反应和农学效率的白菜推荐施肥方法可行性研究 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26 (9): 1681–1690.  
SHAN N, CHUAN L M, LIU J P, et al. Availability of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency of Chinese cabbage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (9): 1681–1690. (in Chinese)
- [25] MACHOLDT J, PIEPHO H P, HONERMEIER B. Does fertilization impact production risk and yield stability across an entire crop rotation? Insights from a long-term experiment [J]. *Field Crops Research*, 2019, 238: 82–92.
- [26] 郑宏艳, 刘书田, 侯彦林, 等. 生态平衡施肥模型与肥料效应函数模型关系研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31 (6): 500–505.  
ZHENG H Y, LIU S T, HOU Y L, et al. Relationship of ecological balanced fertilization model and fertilizer effect function method [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31 (6): 500–505. (in Chinese)
- [27] 包启平, 韩晓日, 崔志刚, 等. 东北春玉米氮肥推荐施肥模型研究 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26 (4): 705–716.  
BAO Q P, HAN X R, CUI Z G, et al. Recommended fertilization model for spring maize nitrogen fertilizer in Northeast China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (4): 705–716. (in Chinese)
- [28] 康利允, 常高正, 高宁宁, 等. 不同氮、钾肥施用量对甜瓜养分吸收、分配及产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (9): 1758–1770.  
KANG L Y, CHANG G Z, GAO N N, et al. Effects of different nitrogen and potassium fertilizing amount on nutrition absorption, nutrition distribution and yield of muskmelon [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (9): 1758–1770. (in Chinese)
- [29] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 氮钾配施对弱筋小麦氮、钾养分吸收利用及产量和品质的影响 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2007, 13 (6): 1054–1061.  
WU J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Effects of combined application of nitrogen and potassium on absorption of N and K, grain yield and quality of weak gluten wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (6): 1054–1061. (in Chinese)
- [30] 赵营, 王世荣, 郭鑫年, 等. 施肥对水旱轮作作物产量、氮素吸收与土壤肥力的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2012 (6): 24–28.  
ZHAO Y, WANG S R, GUO X N, et al. Effect of fertilization on crops yield, N uptake and soil fertility in the paddy-dryland crops rotation system [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012 (6): 24–28. (in Chinese)
- [31] SAINJU U M, LENSSEN A W, ALLEN B L, et al. Soil residual nitrogen under various crop rotations and cultural practices [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, 180 (2): 187–198.
- [32] HAQUE M M, BISWAS J C, ISLAM M R, et al. Effect of long-term chemical and organic fertilization on rice productivity, nutrient use-efficiency, and balance under a rice-fallow-rice system [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42 (20): 2901–2914.
- [33] YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 34–42.
- [34] 王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 等. 养分专家系统推荐施肥对冬小麦产量、养分转运及肥料利用的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28 (11): 1692–1702.  
WANG D D, LI L T, HAN B G, et al. Effects of Nutrient Expert recommended fertilization on winter wheat yield, nutrient accumulation, transportation, and utilization [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28 (11): 1692–1702. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)