

## 施肥模式对菜-稻轮作周年氮素吸收及产量的影响

张立成, 李娟\*, 章明清

(福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

**摘要:** 为探明不同施肥模式对菜-稻轮作体系周年氮素吸收及其产量的影响, 以长期定位试验中菜-菜-稻轮作和菜-菜-菜轮作各季作物为研究对象进行田间试验。2种轮作体系分别采用推荐施肥和习惯施肥2种施肥模式, 于2020—2022年对各季作物氮含量和产量进行测定, 研究不同施肥模式和轮作下各季作物周年氮素吸收积累量、氮肥偏生产力及其对产量效益的影响。结果表明, 2个轮作周年内菜-菜-稻轮作方式下推荐施肥模式第二季作物(芥菜)和第三季作物(水稻)氮素年均吸收积累量为415.71 kg/hm<sup>2</sup>, 显著高于习惯施肥模式(381.43 kg/hm<sup>2</sup>)。第一和第二轮作周年, 不同轮作施肥方式下四季豆作物的氮素收获指数为0.61~0.65, 各处理之间无显著差异; 推荐施肥处理水稻作物氮素收获指数分别为0.72和0.73, 显著高于习惯施肥处理(0.62和0.62)。通过各季作物氮素吸收量与产量的相关分析表明推荐施肥处理能够提高作物氮素吸收利用率。菜-菜-稻轮作结合推荐施肥处理的年均产投比(1.79)高于习惯施肥处理(1.47), 菜-菜-菜轮作结合推荐施肥处理的年均产投比(1.56)高于习惯施肥处理(1.36)。因此, 推荐施肥处理作物的周年氮素吸收积累量和产量均高于习惯施肥, 该施肥模式有利于菜-菜-稻轮作方式实现作物高产和氮肥高效利用, 可获得较好的经济效益。

**关键词:** 轮作; 施肥模式; 氮素吸收; 养分管理; 产量效应

土壤氮素养分是作物生长的重要限制因子, 人们为了获得较高的农作物产出, 通过大量施用氮肥来补充土壤氮素养分的消耗<sup>[1]</sup>。长期的耕作过程中由于过量施用氮肥, 使得作物对氮素养分需求量超出了肥料投入量, 导致土壤氮素盈余量增加并引起氮类化合物面源污染现象<sup>[2-3]</sup>。近年来, 相关学者提出通过优化养分管理策略来提高化肥利用效率, 减少过量施肥对耕地土壤的生态环境影响<sup>[4-5]</sup>。前人研究中发现, 通过作物对养分需求量和土壤养分供给量的参数分析构建施肥模型用于指导农业生产中化肥减施增效, 取得了重大成效<sup>[6-8]</sup>。施肥模型是一种高效的养分管理技术, 即在保证作物产量稳定的前提下, 减少肥料投入, 以提高肥料利用率, 降低肥料对土壤环境的影响<sup>[9]</sup>。

菜-稻轮作耕种方式是我国南方地区常见的种植制度, 该种植方式有效提高了土地、光照、热量等自然资源的利用, 土地生产效率明显上升, 同

时, 土壤养分消耗量也相应增加<sup>[10-12]</sup>。轮作种植模式利用不同作物对肥料养分吸收强度的差异特征, 提高了上茬作物施肥后残留养分的吸收利用, 进而能够减少盈余肥料在土壤中的损失<sup>[13-14]</sup>。此外, 菜-稻轮作种植模式下土壤不断地进行着干湿循环交替变化, 而这一过程中土壤物理状态和土壤中的生化反应也会随着发生变化, 进而对作物的养分吸收利用产生影响。章明清等<sup>[15]</sup>研究表明菜-稻轮作可以有效减轻蔬菜地土壤氮、磷养分的过度积累, 降低了土壤氮、磷的流失潜力。Shen等<sup>[16]</sup>研究了长期水稻和蔬菜轮作, 因其季节性的淹水和落干环境变化改变了土壤微生物活动和种群结构, 从而间接地影响到土壤中氮养分元素的存在形态及其有效性。季节性干湿交替变化以及土壤施肥作用下导致水旱轮作体系氮素循环过程复杂<sup>[17]</sup>。水旱轮作体系中不同的施肥方式土壤氮素盈余养分量差异明显, 影响下季作物的氮素吸收<sup>[18]</sup>。因此, 明确长期轮作中不同施肥模式下作物对氮素吸收利用及其影响机制, 对区域内氮肥施用调控和减少土壤氮素损失具有重要意义。因此, 本研究以闽南赤红壤区长期轮作定位试验中各季作物为研究对象, 探讨不同施肥模式下各季作物的氮素吸收特征及其对产量的影响, 为闽南赤红壤区菜-稻轮作氮肥优化

收稿日期: 2023-05-04; 录用日期: 2023-07-03

基金项目: 福建省自然科学基金青年创新项目(2021J05089); 福建省公益项目(2021R1025003)。

作者简介: 张立成(1987-), 助理研究员, 博士, 主要从事平衡施肥与环境领域研究。E-mail: zlc730@163.com。

通讯作者: 李娟, E-mail: lj-95@163.com。

施肥技术的推广应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

长期定位监测试验建立于2013年9月，位于福建省永春县五里街镇埔头村(25°33'02" N, 118°16'28" E)，试验点进行蔬菜-水稻轮作和蔬菜-蔬菜轮作试验。试验地属于亚热带季风气候，年均降水量1200~1400 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性状：有机质19.96

g/kg、全氮2.25 g/kg、全磷1.31 g/kg、全钾27.86 g/kg、碱解氮107.73 mg/kg、有效磷60.35 mg/kg、速效钾116 mg/kg、pH 5.54。试验以四季豆(9至11月)为第一季作物，芥菜(12至翌年3月)为第二季作物，水稻或者豇豆(4至7月)为第三季作物，依次播种3季作物为1个轮作周年。2种轮作方式如图1所示，图1左侧为菜-菜-稻轮作，右侧为菜-菜-菜轮作。试验在2020—2022年2个轮作周年内采集各季作物样品，测定植株和果实样品中的全氮含量，并在作物收获期测定各季作物的产量。

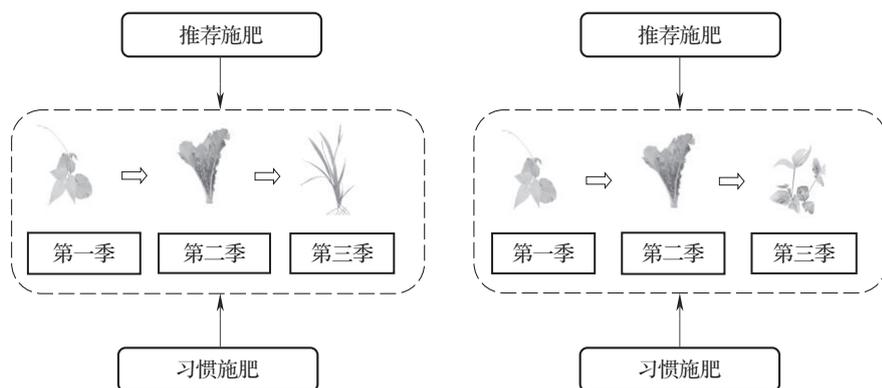


图1 长期定位监测试验菜-菜-稻和菜-菜-菜轮作方式

### 1.2 试验设计

试验地为矩形田块，长26 m，宽9 m，将其分成15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。试验地实施菜-菜-稻(四季豆-芥菜-水稻)、菜-菜-菜(四季豆-芥菜-豇豆)2种轮作方式，分别采用推荐和习惯2种施肥处理，推荐施肥处理施肥量根据试验点土壤理化性质和作物需肥量特征建立的施肥模型得出，该模型是采用贝叶斯模式识别原理的计量施肥系统，习惯施肥处理施肥量根据当地农

户种植习惯得出，各个处理施肥量如表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。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作基肥，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%。

表1 长期轮作定位试验作物的施肥方式及施肥量 (kg/hm<sup>2</sup>)

处理	处理方式		施肥量											
	轮作方式	施肥模式	四季豆 (第一季)			芥菜 (第二季)			水稻 (第三季)			豇豆 (第三季)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
T1	菜-菜-稻	推荐施肥	150.0	45.0	105.0	270.0	75.0	150.0	75.0	0.0	60.0	—		
T2	菜-菜-菜	推荐施肥	150.0	45.0	105.0	270.0	75.0	150.0	—			150.0	45.0	105.0
T3	菜-菜-稻	习惯施肥	171.0	67.5	67.5	286.5	204.0	189.0	141.0	45.0	0.0	—		
T4	菜-菜-菜	习惯施肥	171.0	67.5	67.5	286.5	204.0	189.0	—			201.0	135.0	135.0

注：第三季作物 T1、T3 处理为水稻，T2、T4 处理为豇豆。

### 1.3 采样方法

试验开始前从每1个试验小区按梅花法采集5个土壤样品,将其混匀后总共重约2 kg带回试验室测定基础养分含量。每个轮作周年内在作物收获期采集植株、果实样品。四季豆和豇豆果实样品采集方式:四季豆和豇豆开花结实期均长达1个月左右,因此采用分批次采集每个试验小区果实样品,最后累加计算果实产量。芥菜和水稻的果实样品采样分别在作物成熟期1次采收完成。

### 1.4 检测项目与方法

土壤理化性质以及植株、果实样品中氮含量的检测方法参照《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>,其中植株和果实样品采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消解,采用凯式定氮法分别测定植株、果实全氮含量。基础土壤样品理化性质的测定,土壤样品经 $H_2SO_4-HClO_4$ 消解后,分别采用凯式定氮法测定全氮含量,钼锑抗比色法测定全磷含量,火焰光度计测定全钾含量。采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量,采用碳酸氢钠浸提法测定土壤有效磷含量,采用乙酸铵浸提法测定土壤速效钾含量。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,土壤pH采用电位法测定(水土比2.5:1)。

### 1.5 数据处理

采用Excel 2020整理试验数据,采用Matlab 2015b对各处理组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)。氮素吸收积累量( $kg/hm^2$ )=单位面积植株地上部含氮量×地上部生物量。氮素收获指数=籽粒氮素积累量/植株氮素积累量<sup>[20]</sup>。氮肥偏生产力( $kg/kg$ )=施氮后获得的作物果实产量/氮肥投入量<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同轮作施肥模式对作物氮素吸收积累的影响

图2为2020—2022年测得的不同轮作施肥模式在2个轮作周年内三季作物的氮素吸收积累量。从图2中可知,菜-菜-稻轮作方式,2个轮作周年内均为推荐施肥模式(T1处理)各季作物氮素吸收积累量高于习惯施肥模式(T3处理)。菜-菜-稻轮作方式第一季作物(四季豆)2种施肥模式之间无明显差异,而第二季作物(芥菜)和第三季作物(水稻)氮素吸收积累量差异明显,且2个轮作周年内均表现出相同的结果。菜-菜-稻轮作方式下推荐施肥模式(T1处理)第二季作物和第三季作物氮素年均吸收积累量为 $415.71 kg/hm^2$ ,显

著高于习惯施肥模式(T3处理)的 $381.43 kg/hm^2$ ,推荐施肥模式是习惯施肥模式的1.09倍。2020—2021年轮作周年内菜-菜-菜轮作方式下,推荐施肥模式(T2处理)作物氮素吸收积累量高于习惯施肥模式(T4处理),而在2021—2022年的轮作周年内2种施肥模式氮素吸收积累量无显著差异。2020—2021年轮作周年内菜-菜-菜轮作第二季作物(芥菜)和第三季作物(豇豆)氮素吸收积累量,推荐施肥模式高于习惯施肥模式。2021—2022年轮作周年内第二季作物(芥菜)和第三季作物(豇豆)的氮素吸收积累量在2种施肥模式下无明显差异。

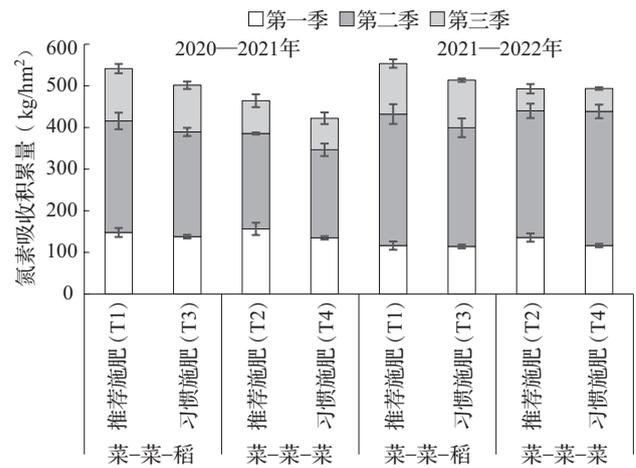


图2 2020—2022年不同轮作施肥模式下作物氮素吸收积累量

### 2.2 不同轮作施肥模式对作物氮素吸收利用的影响

表2和3为不同轮作施肥模式下第一季作物和第三季作物氮素吸收利用结果,第二季作物芥菜收获期由于氮素含量全部在茎叶中,其氮素吸收利用结果不作分析。由表2可知,2020—2022年轮作周年内,相同施肥模式情况下菜-菜-稻轮作四季豆的茎叶和果实干物质积累量显著高于菜-菜-菜轮作。2020—2021轮作周年T2处理四季豆茎叶和果实氮含量分别为1.33%和2.27%,显著高于T1处理。2021—2022轮作周年T2处理四季豆茎叶氮含量(1.19%)显著高于T1处理(1.01%),而T1和T2处理间果实氮含量无显著差异。2020—2021轮作周年T4处理四季豆茎叶氮含量(1.44%)显著高于T3处理(1.35%)。2020—2021轮作周年,不同轮作施肥处理的氮素收获指数在0.61~0.64之间,各处理之间无显著差异。2021—2022轮作周年,不

同轮作施肥处理的氮素收获指数在 0.63 ~ 0.65 之间, 各处理间无显著差异。

表 3 为不同轮作施肥模式下水稻和豇豆的氮素吸收利用结果, 由表 3 可知, 2020—2021 轮作周年内 T1 处理茎叶干物质和茎叶氮含量分别为  $3.82 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$  和 0.82%, 显著低于 T3 处理 ( $4.14 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$  和 1.15%)。T1 处理果实干物质质量为  $6.50 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ , 显著高于 T3 处理 ( $6.21 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ ), 果实氮含量 2 个处理之间无显著差异。

2021—2022 轮作周年内 T1 处理茎叶干物质和茎叶氮含量分别为  $4.13 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$  和 0.76%, 显著低于 T3 处理 ( $4.56 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$  和 1.13%)。T1 处理的果实干物质和果实氮含量与 T3 处理相比较无显著差异。2020—2022 年 2 个轮作周年 T1 处理氮素收获指数分别为 0.72 和 0.73, 显著高于 T3 处理 (0.62 和 0.62)。2020—2022 年 2 个轮作周年内 T2 和 T4 处理各项氮素吸收利用指标均无显著差异。

表 2 不同轮作施肥模式下四季豆氮素吸收利用结果

处理	2020—2021 年					2021—2022 年				
	茎叶干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	果实干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	茎叶氮含量 (%)	果实氮含量 (%)	氮素收获指数	茎叶干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	果实干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	茎叶氮含量 (%)	果实氮含量 (%)	氮素收获指数
T1	4.32 ± 0.36a	4.42 ± 0.28a	1.23 ± 0.03c	2.15 ± 0.17b	0.64a	3.86 ± 0.07b	3.83 ± 0.06b	1.01 ± 0.11b	2.03 ± 0.14b	0.65a
T2	3.73 ± 0.07b	3.91 ± 0.05b	1.33 ± 0.12b	2.27 ± 0.12a	0.64a	3.59 ± 0.07c	3.53 ± 0.05c	1.19 ± 0.06a	2.03 ± 0.11b	0.63a
T3	4.42 ± 0.28a	4.56 ± 0.25a	1.35 ± 0.19b	2.12 ± 0.24b	0.62a	4.15 ± 0.11a	4.06 ± 0.10a	1.10 ± 0.28ab	2.23 ± 0.12a	0.64a
T4	3.67 ± 0.11b	3.84 ± 0.06b	1.44 ± 0.05a	2.14 ± 0.03b	0.61a	3.55 ± 0.14c	3.51 ± 0.04c	1.14 ± 0.24a	2.18 ± 0.12a	0.63a

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

表 3 不同轮作施肥模式下水稻和豇豆氮素吸收利用结果

处理	2020—2021 年					2021—2022 年				
	茎叶干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	果实干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	茎叶氮含量 (%)	果实氮含量 (%)	氮素收获指数	茎叶干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	果实干物质 ( $\times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ )	茎叶氮含量 (%)	果实氮含量 (%)	氮素收获指数
T1	3.82 ± 0.24b	6.50 ± 0.59a	0.82 ± 0.05c	1.25 ± 0.09b	0.72a	4.13 ± 0.26b	6.84 ± 0.44a	0.76 ± 0.09c	1.21 ± 0.03b	0.73a
T2	1.35 ± 0.14c	1.44 ± 0.14c	1.79 ± 0.16a	4.50 ± 0.26a	0.73a	1.01 ± 0.04c	0.90 ± 0.04b	2.51 ± 0.18a	4.67 ± 0.11a	0.62b
T3	4.14 ± 0.14a	6.21 ± 0.51b	1.15 ± 0.15b	1.27 ± 0.10b	0.62b	4.56 ± 0.19a	6.99 ± 0.29a	1.13 ± 0.06b	1.22 ± 0.03b	0.62b
T4	1.33 ± 0.15c	1.34 ± 0.16c	1.88 ± 0.25a	4.39 ± 0.05a	0.70a	0.98 ± 0.04c	0.86 ± 0.01b	2.22 ± 0.25a	4.49 ± 0.44a	0.64b

注: T1、T3 处理第三季作物为水稻, T2、T4 处理第三季作物为豇豆, 以下类同。

### 2.3 不同轮作施肥模式对作物产量及氮肥偏生产力的影响

表 4 为 2020—2022 轮作周年内不同轮作施肥模式下各季作物产量及氮肥偏生产力。通过表 4 中的数据可知, 2 个轮作周年内第一季作物产量: T1 处理显著高于 T2 处理, 年均产量增加 9.8%, T3 处理显著高于 T4 处理, 年均产量增加 12.0%。2 个轮作周年内第二季作物产量: T1 处理显著高于 T2 处理, 年均产量增加 12.1%, T3 处理显著高于 T4 处理, 年均产量增加 9.6%。2 个轮作周年内第三

季作物, T1 处理水稻产量和 T3 处理相比较无显著差异, T2 处理豇豆产量与 T4 处理相比较无显著差异。菜—菜—稻轮作方式下 T1 处理四季豆、芥菜、水稻的氮肥偏生产力均高于 T3 处理; 菜—菜—菜轮作方式下 T2 处理四季豆、芥菜、豇豆氮肥偏生产力均高于 T4 处理。2 个轮作周年内菜—菜—稻轮作方式下推荐施肥处理四季豆、芥菜、水稻氮肥偏生产力平均分别比习惯施肥高 11.71%、8.99%、8.59%。2 个轮作周年内菜—菜—菜轮作方式下推荐施肥处理四季豆、芥菜、豇豆氮肥偏生产力平均

表 4 2020—2022 年不同轮作施肥模式下各季作物的产量及氮肥偏生产力

轮作 周年	处 理	第一季 (四季豆)			第二季 (芥菜)			第三季 (水稻/豇豆)		
		施氮量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	作物产量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥偏 生产力 (kg/kg)	施氮量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	作物产量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥偏 生产力 (kg/kg)	施氮量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	作物产量 ( $\times 10^3$ kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥偏 生产力 (kg/kg)
2020— 2021 年	T1	7.14	22.06 ± 1.39a	3.09a	12.86	49.76 ± 1.80a	3.87a	3.57	7.62 ± 0.63b	2.13a
	T2	7.14	19.48 ± 0.26b	2.73b	12.86	45.71 ± 1.07b	3.56b	7.14	12.16 ± 1.19a	1.70b
	T3	8.14	22.21 ± 1.20a	2.73b	13.64	49.41 ± 1.26a	3.62b	6.71	7.98 ± 0.72b	1.19c
	T4	8.14	19.28 ± 0.28b	2.37b	13.64	46.31 ± 2.68b	3.40c	9.57	12.19 ± 1.45a	1.27c
2021— 2022 年	T1	7.14	19.09 ± 0.29a	2.67a	12.86	62.86 ± 2.14a	4.89a	3.57	8.57 ± 0.36a	2.40a
	T2	7.14	17.57 ± 0.25b	2.46b	12.86	52.74 ± 0.90c	4.10c	7.14	7.64 ± 0.31b	1.07b
	T3	8.14	19.77 ± 0.48a	2.43b	13.64	60.24 ± 1.96b	4.42b	6.71	8.39 ± 0.54a	1.25b
	T4	8.14	17.62 ± 0.21b	2.16c	13.64	52.50 ± 2.23c	3.85c	9.57	7.87 ± 0.14ab	0.82c

分别比习惯施肥高 14.47%、5.73%、32.25%。2 种轮作方式采用推荐施肥处理能够较大幅度地提高第三季作物的氮肥偏生产力。

#### 2.4 不同轮作施肥模式下作物地上部需氮量与果实产量的关系

不同轮作施肥处理四季豆产量与地上部氮素吸收积累量的相关分析表明 (图 3), 四季豆产量与氮素吸收积累量存在线性关系, 4 种处理方式的线

性拟合优度  $R^2$  在 0.9339~0.9687 之间。不同轮作施肥的线性关系式斜率存在差异, 其反映不同轮作施肥模式下四季豆果实产量对氮需求量的差异。以试验小区四季豆生产目标产量 30 kg 进行计算, T1、T2、T3、T4 处理每生产 30 kg 四季豆, 吸收的氮素量分别为 0.196、0.217、0.204、0.262 kg, 表明菜-菜-稻轮作推荐施肥处理在获得相同的作物产量条件下所吸收氮素量小于其他轮作施肥处理。

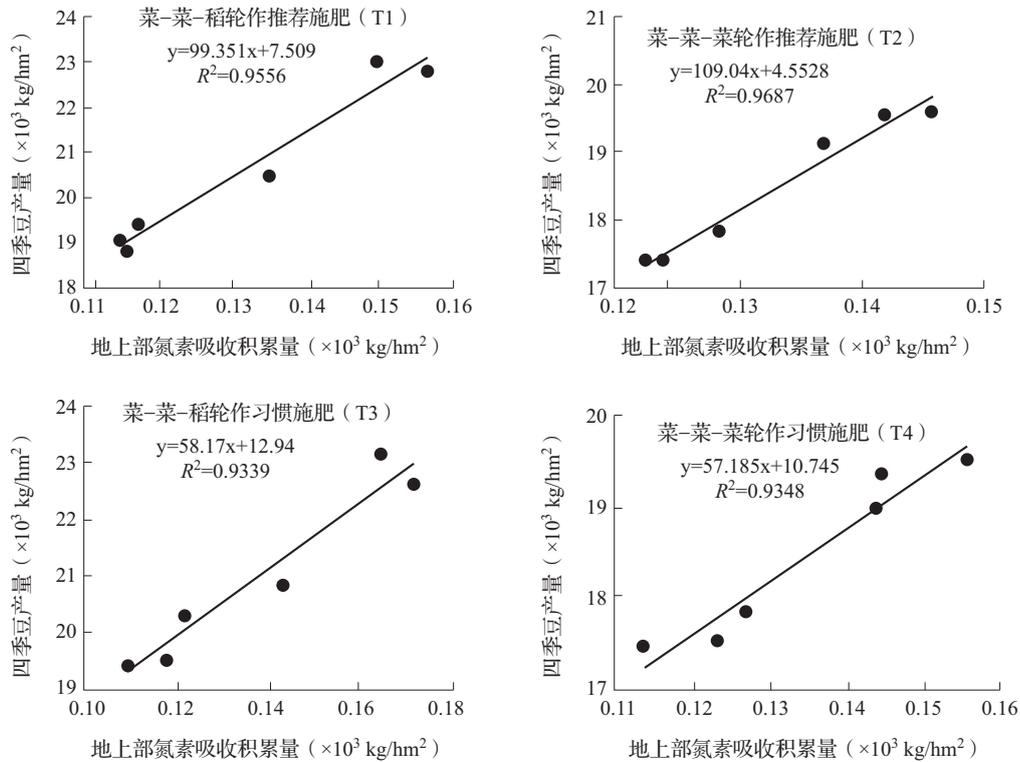


图 3 不同轮作施肥处理地上部氮素吸收积累量与四季豆产量的关系

图4为菜-菜-稻轮作第三季作物水稻产量与地上部分氮素吸收积累量的线性关系, 2种施肥处理下水稻产量和氮素吸收积累量的线性拟合优度 $R^2$ 分别为0.8947和0.9423, 且线性相关性均显著。以试验小区水稻生产的目标产量10 kg进行计算, 则推荐施肥处理(T1)地上部需吸收氮素0.173 kg, 习惯施肥处理(T3)地上部需吸收氮素0.176 kg, 两者未有明显差异。图5为菜-菜-菜轮作第三季作物豇豆产量与地上部分氮素吸收积累量的线性

关系, 2种施肥处理下豇豆产量与氮素吸收积累量的线性拟合优度 $R^2$ 分别为0.8348和0.8881, 且线性相关性显著。以试验小区豇豆生产的目标产量15 kg进行计算, 则推荐施肥处理(T2)地上部氮素吸收量0.138 kg, 习惯施肥处理(T4)地上部氮素吸收量0.145 kg。通过上述比较分析可知推荐施肥处理能够经较低的氮素吸收量获得较高的目标产量, 表明推荐施肥处理提高了氮素的吸收利用效率。

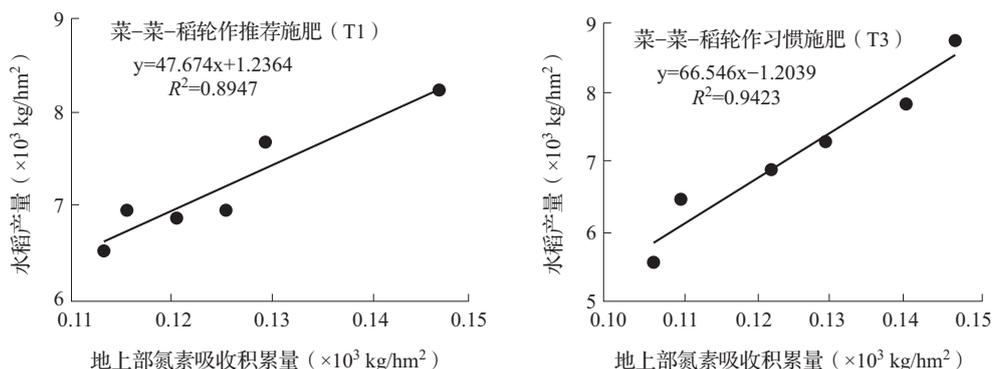


图4 不同轮作施肥处理地上部氮素吸收积累量与水稻产量的关系

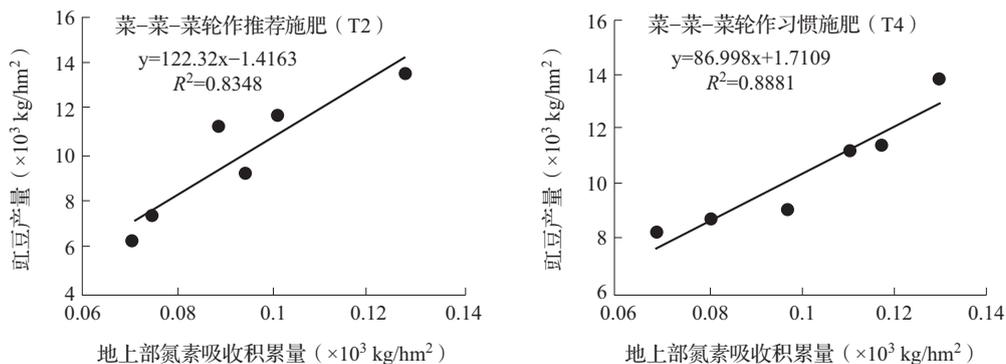


图5 不同轮作施肥处理地上部氮素吸收积累量与豇豆产量的关系

## 2.5 不同轮作施肥模式氮肥投入与产量效益分析

表5为不同轮作施肥模式下氮肥投入的产量经济效益分析, 在试验期间, 调查试验地农户的肥料市场购买价, 结合农产品销售价, 对氮肥投入和作物产出的经济效益进行相关分析。菜-菜-稻轮作方式: 推荐施肥处理周年内氮肥投入为84.00元, 占肥料总投入的50.91%, 2个试验年度内的平均产投比为1.79; 习惯施肥处理周年氮肥投入为110.50

元, 占肥料总投入的55.39%, 2个试验年度内平均产投比为1.47。菜-菜-菜轮作方式: 推荐施肥处理周年内氮素投入为106.00元, 占肥料总投入的55.79%, 2个试验年度内的平均产投比为1.56; 习惯施肥处理周年内氮素投入为132.50元, 占肥料总投入的60.36%, 2个试验年度内的平均产投比为1.36。2种轮作方式均为推荐施肥模式的产投比高, 说明推荐施肥模式具有较好的产量经济效益。

表5 不同轮作施肥模式下氮素投入的产量效益分析

处理	氮肥投入 (元)	肥料 总投入 (元)	2020—2021年				2021—2022年				周年平均 产投比
			第一季 (元)	第二季 (元)	第三季 (元)	产投比	第一季 (元)	第二季 (元)	第三季 (元)	产投比	
T1	84.00	165.00	123.56	139.34	21.34	1.72	106.88	176.00	24.00	1.86	1.79
T2	106.00	190.00	109.08	128.00	68.08	1.61	98.40	147.66	42.80	1.52	1.56
T3	110.50	199.50	124.40	138.32	22.34	1.43	110.72	168.66	23.50	1.52	1.47
T4	132.50	219.50	107.96	129.68	68.28	1.39	98.68	147.00	44.08	1.32	1.36

### 3 讨论

轮作种植模式下土地资源虽然得到了充分利用,但土壤养分消耗量大,为了补充土壤养分含量,人们大量施用化肥,尤其是偏施氮肥,致使土壤氮素养分面临流失风险较大。通过优化施肥方式来提高作物对氮素养分的吸收利用是减少氮素养分流失的重要手段<sup>[22-23]</sup>。本课题组在闽南赤红壤区建立了蔬菜和水稻轮作以及蔬菜和蔬菜轮作的长期定位试验,该定位试验中各季作物分别采用施肥模型计算得出的推荐施肥模式和农户使用的习惯施肥模式进行施肥处理。推荐施肥模式主要是以作物对氮素的收支平衡为基础合理施用氮肥,并协调施用磷肥和钾肥。本研究中采用推荐施肥模式下,2个轮作周年内各季作物对氮素的总吸收量高于习惯施肥模式。推荐施肥模式在一定程度上提高了土壤氮、磷、钾养分的供应平衡,从而使作物生长过程中能获得充分均衡的营养需求,作物生长旺盛,干物质量增加,进而促进了氮素养分的吸收积累。李龙等<sup>[24]</sup>研究表明氮、磷、钾配施处理氮素养分吸收及肥料利用率与常规施肥相比较具有显著地提升的作用,这和本研究结果一致。合理的施肥模式有利于土壤-作物-肥料三元系统的养分循环调控,满足作物对养分的需求,促进植株地上部器官吸收更多的养分,从而达到增产效果<sup>[25]</sup>。巨昇容等<sup>[26]</sup>用<sup>15</sup>N示踪法研究海南辣椒施肥发现,农户习惯施肥处理土壤氮残留占总施氮量的55.9%,氮、磷、钾配施处理氮的土壤残留率较农民习惯施肥减少8%。适量的氮、磷、钾肥配施处理更有利于作物同化产物的积累,增加籽粒中的干物质量。马小艳等<sup>[27]</sup>研究不同轮作施肥模式下小麦产量及其养分吸收,推荐施肥模式能够减少氮素投入25.2%~41.2%,小麦增产3.1%~17.0%,氮素偏生产力增加130.1%~180.3%。本研究中2个

轮作周年的试验结果表明菜-菜-稻轮作方式作物周年内氮素收获指数推荐施肥模式相比农户习惯施肥模式高出14%左右。王乐<sup>[28]</sup>在华北平原地区长期定位试验的结果显示,采用农户习惯施肥,当季作物收获后的氮素盈余值为174 kg/hm<sup>2</sup>。Zhang等<sup>[29]</sup>在我国中部地区的研究中也发现习惯施肥模式下小麦季和玉米季氮素盈余值分别为122和134 kg/hm<sup>2</sup>,采用优化施肥管理模式,整体上各季作物的氮素盈余值下降了42%。董云杰等<sup>[30]</sup>研究不同施肥处理中灌区冬小麦的生长结果显示,与常规施用尿素处理相比,优化施肥处理提高了冬小麦植株的茎叶氮含量和氮积累量,优化施肥处理在拔节期进行追肥,更符合营养生长阶段小麦对养分的需求规律,有利于植株营养器官对氮素的吸收。本研究中,菜-菜-稻轮作方式下四季豆的氮素收获指数显著高于菜-菜-菜轮作方式,2种施肥模式相比,四季豆的氮素收获指数无显著差异。第三季作物水稻和豇豆,推荐施肥模式下的氮素收获指数显著低于习惯施肥模式。通过对各季作物的果实以及茎叶氮素含量进行比较,发现茎叶具有明显的差异,习惯施肥模式下的茎叶氮素含量较高。这可能是习惯施肥模式下相比推荐施肥模式下的作物茎叶易发生早衰现象,推荐施肥模式下促进了茎叶氮素向果实转运量增加,提高了作物的氮素收获指数。不同的施肥方式对作物氮素的吸收具有显著影响,农户习惯施肥方式虽然氮肥施肥量较高,但是普遍存在肥效利用率低的问题。这是因为尽管氮肥供应充足,但是土壤养分供应不平衡,作物对氮素吸收量低的结果<sup>[31-32]</sup>。相关研究表明,基于养分管理的推荐施肥模式能够保证在作物的氮素吸收积累量不减少的条件下,同时又能满足作物生长所需的养分供应,进而有效促进作物的生长。习惯施肥模式下并不能增加作物对氮素养分的吸收,主要增加了土壤耕作层中氮素的残余量和

表观损失量<sup>[33]</sup>。本试验中未对轮作季后茬作物土壤中残余的养分进行探讨,而对于施肥模式影响下轮作体系中土壤盈余氮的含量变化有待进一步研究。

#### 4 结论

推荐施肥模式在菜-菜-稻轮作周年内促进了各季作物对氮素的吸收利用,作物的果实氮素积累量显著高于习惯施肥模式。推荐施肥模式较好地协调了土壤养分供应,提高了氮肥偏生产力,有利于菜-菜-稻轮作实现作物高产和氮肥的高效利用,获得了良好的产量经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 耿赛男,李岚涛,苗玉红,等.大豆和玉米影响后茬作物氮素供应的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2022,28(5):919-932.
- [2] 王敬,程宜,蔡祖聪,等.长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J].土壤学报,2016,53(2):292-304.
- [3] Beillouin D, Trépos R, Gauffreteau A, et al. Delayed and reduced nitrogen fertilization strategies decrease nitrogen losses while still achieving high yields and high grain quality in malting barley [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 101: 174-182.
- [4] Shi Z J, Liu D H, Liu M, et al. Optimized fertilizer recommendation method for nitrate residue control in a wheat-maize double cropping system in dryland farming [J]. *Field Crops Research*, 2021, 271: 108258.
- [5] 张立进,巢思琴,鲁梦珍,等.优化施肥对油菜-水稻复种系统作物产量及氮磷流失的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6):27-34.
- [6] 沈若川,丁文成,高强,等.基于养分专家系统推荐施肥的北方马铃薯适宜氮肥用量研究[J].植物营养与肥料学报,2022,28(5):880-893.
- [7] 陈培钰,石秋环,马君红,等.基于模糊数学法评价肥料运筹模式对豫西烤烟产质量的影响[J].河南农业科学,2023,52(1):42-52.
- [8] Li Q S, Zeng F, Mei H, et al. Roles of motivation, opportunity, ability, and trust in the willingness of farmers to adopt green fertilization techniques [J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6902.
- [9] 章明清,李娟,张立成,等.三元肥料效应模型的整合与优化建模策略[J].土壤学报,2021,58(3):755-766.
- [10] Wang Q, Xu J M, Lin H, et al. Effect of rice planting on the nutrient accumulation and transfer in soils under plastic greenhouse vegetable-rice rotation system in southeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(1): 204-209.
- [11] 李小坤,任涛,鲁剑巍.长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控[J].华中农业大学学报,2021,40(3):13-20.
- [12] 贾雪杰,游明鸿,李达旭,等.减量施肥对金花菜-水稻轮作系统中产量和土壤养分的影响[J].草地学报,2023,31(3):876-883.
- [13] 李小勇,黄威,刘红菊,等.不同轮作模式下氮肥施用对油菜产量形成及养分利用的影响[J].中国农业科学,2023,56(6):1074-1085.
- [14] 杨慧敏,杨云马,黄少辉,等.优化施肥对小麦-玉米轮作体系产量、养分平衡与生态环境效益的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(5):699-709.
- [15] 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.
- [16] Shen J, Tao Q, Dong Q, et al. Long-term conversion from rice-wheat to rice-vegetable rotations drives variation in soil microbial communities and shifts in nitrogen-cycling through soil profiles [J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115299.
- [17] Cai S, Pittelkow C M, Zhao X, et al. Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195(10):289-300.
- [18] Grzebisz W, Ukowiak R, Sassenrath G F. Virtual nitrogen as a tool for assessment of nitrogen management at the field scale: a crop rotation approach [J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 182-194.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2003.
- [20] 刘海红,徐学欣,吴姗姗,等.雨养条件下不同冬小麦品种产量形成及氮素利用特征[J].华北农学报,2019,34(6):133-144.
- [21] 黄晶,刘立生,马常宝,等.近30年中国稻区氮素平衡及氮肥偏生产力的时空变化[J].植物营养与肥料学报,2020,26(6):987-998.
- [22] 武秋甫,王孝忠,陈新平,等.三峡库区典型粮菜轮作系统施肥管理及环境代价评价[J].中国环境科学,2021,41(3):1272-1281.
- [23] Wu M, Liu M, Liu J, et al. Optimize nitrogen fertilization location in root-growing zone to increase grain yield and nitrogen use efficiency of transplanted rice in subtropical China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(9):2073-2081.
- [24] 李龙,肖让,张永玲.氮磷钾配施对制种玉米产量及经济效益的影响[J].作物杂志,2022(5):111-117.
- [25] 左婷,王新霞,侯琼,等.稻-麦轮作体系不同施肥模式对氮肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):213-221.
- [26] 巨昇容,王文斌,耿建梅.海南砖红壤上优化施肥对线椒产量及氮肥利用的影响[J].热带作物学报,2019,40(5):864-868.
- [27] 马小艳,杨瑜,黄冬琳,等.小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析[J].中国农业科学,2022,55(8):1589-1603.



- [28] 王乐. 长期施肥下华北土壤化学肥力指标和作物产量演变及影响因素分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 23-26.
- [29] Zhang Q S, Li T Y, Yin Y L, et al. Targeting hotspots to achieve sustainable nitrogen management in China's smallholder dominated cereal production [J]. *Agronomy*, 2021, 11 (3): 557.
- [30] 董云杰, 呼延艺洁, 王金平, 等. 优化施肥对关中灌区冬小麦产量及氮肥利用的影响 [J]. *西北农业学报*, 2022, 31 (3): 270-278.
- [31] 苏同庆, 邢璐, 王火焰. 氮磷配施和施肥方式对潮土小麦氮吸收利用的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (7): 1-7.
- [32] 刘艳妮, 马臣, 于昕阳, 等. 基于不同降水年型渭北旱塬小麦-土壤系统氮素表观平衡的氮肥用量研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (3): 569-578.
- [33] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28 (1): 68-75.

### Effects of fertilization strategies on annual nitrogen uptake and crop yield in vegetable-rice rotation systems

ZHANG Li-cheng, LI Juan\*, ZHANG Ming-qing (Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou Fujian 350013)

**Abstract:** This study investigated the impacts of various fertilization strategies on the annual nitrogen uptake and crop yield in vegetable-rice rotation systems. Field experiments were conducted on crops across different seasons under both vegetable-vegetable-rice and vegetable-vegetable-vegetable rotations within a long-term positioning test. Two fertilization strategies were established in the two crop rotation system: recommended fertilization and practice fertilization. Nitrogen content and crop yield were measured for each season from 2020 to 2022, providing a basis for understanding differences in annual nitrogen uptake and accumulation, nitrogen fertilizer production, and their effects on economic benefits and crop yield under varying fertilization strategies and rotations. The results revealed that the recommended fertilization strategy led to a higher average annual nitrogen uptake and accumulation in the second (mustard leaf) and third (rice) crop seasons over the two rotation years, with a value of 415.71 kg/hm<sup>2</sup>. This was notably higher than the 381.43 kg/hm<sup>2</sup> achieved under the practice fertilization strategy. The nitrogen harvest index for kidney bean crops ranged between 0.61 to 0.65 on the first and second rotation anniversaries, and no significant differences were found between the different treatments. In contrast, the nitrogen harvest index for rice crops was significantly improved with the recommended fertilization strategy, with values of 0.72 and 0.73 for the first and second rotation anniversaries respectively. This showed considerable improvement over the practice fertilization strategy, which only achieved values of 0.62 for both rotation anniversaries. It was found that the recommended fertilization strategy significantly improved the nitrogen uptake of the third crop in both crop rotation methods. Furthermore, a correlation analysis between nitrogen uptake and crop yield suggested that the recommended fertilization strategy enhanced crop nitrogen uptake and utilization efficiency. The recommended fertilization strategy, combined with a vegetable-rice rotation, resulted in a higher annual output-to-input yield ratio of 1.79, compared to the value of 1.47 achieved with practice fertilization. Similarly, the average annual output-to-input yield ratio for the vegetable-vegetable rotation was higher when using the recommended fertilization strategy (1.56), compared to the practice fertilization strategy (1.36). The findings indicated that the recommended fertilization strategy resulted in a higher annual nitrogen uptake, accumulation, and crop yield compared to practice fertilization. This fertilization model could improve crop yield and nitrogen fertilizer efficiency in vegetable-rice rotations, leading to superior crop yield benefits.

**Key words:** crop rotation; fertilization mode; nitrogen uptake; nutrient manage; yield effect