植物营养与肥料学报 2013,19(1):117-126
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0114

菜-稻轮作对菜田氮、磷利用特性和富集状况的影响

章明清[1], 李 娟[1], 孔庆波[1], 姚宝全[2], 陈燕花[1]
(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所,福州 350013; 2 福建省农田建设与土壤肥料技术站,福州 350003)

摘要:菜田氮、磷污染治理的最佳途径是提高化肥利用率。本研究开展了四季豆(*Phaseolus vulgaris*)-瓢瓜(*Lagenaria sicerariae*)-早稻轮作中不同氮、磷肥用量的3年定位田间试验。结果表明,经济施肥量为四季豆N 155 kg/hm^{2}和P_2O_5 79 kg/hm^2、瓢瓜N 247 kg/hm^{2}和P_2O_5 130 kg/hm^2,早稻不施肥。取得最佳经济效益的施肥处理,净增收比其他氮、磷水平提高1.6%～46.8%,氮肥利用率从四季豆和瓢瓜连作的45.1%提高到四季豆-瓢瓜-早稻轮作的65.6%,磷肥利用率则从17.9%提高到26.5%。四季豆-瓢瓜-早稻轮作的土壤硝态氮和有效磷含量分别为四季豆和瓢瓜连作的27.5%和87.0%,为基础土壤硝态氮和有效磷含量的63.7%和93.9%。养分吸收特性分析表明,四季豆的氮、磷最大吸收速率分别是早稻的25.1倍和2.5倍,瓢瓜则分别是早稻的18.4倍和1.2倍;四季豆的氮、磷最大吸收量分别是早稻的1.7倍和2.2倍,瓢瓜则分别是早稻的2.5倍和1.9倍。因此,菜-稻轮作体系利用了蔬菜和水稻在氮、磷吸收强度上的差异,较蔬菜连作促进了氮、磷高效利用,从而削减菜田过高的氮、磷富集,降低了土壤氮、磷流失潜力。

关键词:蔬菜;早稻;轮作;氮磷;利用率;富集
中图分类号:S153.6$^+$1;S344.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)01-0117-10

Effect of vegetable-paddy rice rotation system on N and P utilzation characters and their enrichments in vegetable fields

ZHANG Ming-qing[1], LI Juan[1], KONG Qing-bo[1], YAO Bao-quan[2], CHEN Yan-hua[1]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;*
2 Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Increasing chemical fertilizer recovery is the best method of controlling N and P non-point pollution in vegetable fields. A 3-year orientation field experiment was carried out in kidney bean (*Phaseolus vulgaris*)-gourd ladle melon (*Lagenaria sicerariae*)-early rice rotating system in Pinghe County. The results show that the economic application rates of N and P for kidney bean are N 155 kg/ha and P_2O_5 79 kg/ha, and N 247 kg/ha and P_2O_5 130 kg/ha for gourd ladle melon, but no fertilization for early rice in the rotating system. Under the optimum benefit treatment, the net income is increased by 1.6%-46.8% compared with other application rates of N or P. In the treatment, the N fertilizer recovery is increased from 45.1% in the kidney bean-gourd ladle melon continuous cropping to 65.6% in the kidney bean-gourd ladle melon-paddy rice rotation, and the P fertilizer recovery is increased from 17.9% to 26.5%. The soil nitrate N and available P contents in the kidney bean-gourd ladle melon-early rice rotation are about 27.5% and 87.0% of those in the kidney bean-gourd ladle melon continuous cropping when the gourd ladle melon and paddy rice are harvested respectively, and are about 63.7% and 93.9% of those in base soils. Under the balanced fertilization, the nutritive peculiarity analysis shows that maximum uptake rates of N and P of kidney bean are 25.1 and 2.5 times of those of early rice, and are 18.4 and 1.2 times of those

收稿日期:2012-07-13 **接受日期**:2012-09-27
基金项目:国际植物营养研究所(IPNI, Fujian-10);福建省自然科学基金(2011J01112)资助。
作者简介:章明清(1963—),男,福建永春人,博士,研究员。主要从事平衡施肥和施肥与环境领域研究。Tel:0591-87572840
E-mail:zhangmq2001@163.com

of gourd ladle melon respectively. The maximum uptake amounts of N and P of kidney bean are 1.7 and 2.2 times of those of early rice, and are 2.5 and 1.9 times of those of gourd ladle melon. The N and P uptakes are different in vegetable and rice, compared with vegetable continuous cropping system, the recoveries of N and P are enhanced in the vegetable – paddy rice rotating system, and the exorbitant enrichments and runoff amounts of N and P are reduced.

Key words: vegetable; early rice; rotation; N and P; recovery; enrichment

过去20多年来,我国蔬菜产业得到巨大发展。然而在蔬菜栽培中过量施肥现象非常普遍。黄东风等[1]研究表明,福州市郊蔬菜基地以施用化肥为主,每茬蔬菜平均施肥量($N+P_2O_5+K_2O$)在493.6～1212.2 kg/hm^{2}之间,氮磷钾比例平均为1∶0.77∶0.75,磷肥用量明显偏高;每年菜田平均施肥量($N+P_2O_5+K_2O$)达到2002.3～3455.2 kg/hm^{2}之间。长期过量施肥不仅使许多菜田出现土壤环境质量恶化[2-4],而且菜田中过高的氮、磷富集导致大量养分淋溶流失,已严重影响到部分地区的水体水质[4-5]。为此,众多学者提出了许多解决方法,如蔬菜与旱粮轮作[6]、不同旱生蔬菜品种间轮作[7]、旱生蔬菜与水生蔬菜轮作[8]等栽培制度,以及科学的灌溉技术[8]和土壤管理方法[9-13]等。

曹志洪等[14-15]的研究结果显示,稻田生态系统具有吸纳和消解氮、磷污染物的生态功能。水稻是我国南方的主要粮食作物,菜-稻轮作是近年来发展起来的一种重要种植制度,但菜-稻轮作的养分利用特性及其环境效应的研究明显滞后。王强等[16]对大棚茄子-水稻轮作试验、章婧虹等[17]对大棚四季豆-瓢瓜-早稻轮作试验的研究表明,菜-稻轮作可在一个轮作周期中取得最佳经济效益,且明显提高氮、磷、钾化肥表观利用率,减轻菜田氮、磷过度积累;与四季豆与瓢瓜连作相比,显著降低了土壤渗漏水中的氮、磷浓度。沈明星等[18]对大棚番茄-水稻轮作模式常规施肥的研究也表明,菜-稻轮作具有降低氮素面源污染的正向作用。但不同氮、磷肥施用量对菜-稻轮作的产量、经济效益以及氮、磷肥利用特性和土壤速效氮、磷含量影响的定位试验研究报道还很少。为此,在福建省平和县山格镇蔬菜生产基地的灰泥田上设置菜-稻轮作不同氮、磷肥施用量的田间定位试验,旨在为当地集约化菜田氮、磷养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计

2008年8月在平和县山格镇蔬菜生产基地,选择当地代表性的周年轮作制度即四季豆(*Phaseolus vulgaris*)-瓢瓜(*Lagenaria siceraria*)-水稻轮作,设置田间定位试验。其中,四季豆每年种植时间为9月初,11月中旬收获;瓢瓜每年种植时间为12月初,第2年4月底收获;轮作水稻在每年5月初插秧,8月中旬收获。氮、磷各设5个水平,共10个处理(表1),各处理施肥水平以蔬菜推荐施肥量的研究结果[19]为依据,设定施肥量范围和间隔幅度。小区之间用水泥田埂隔开,随机区组排列,3次重复,每个小区面积10 m^2,供试土壤为灰泥田。

表1 四季豆-瓢瓜-早稻轮作制田间定位试验设计

Table 1 Field orientation experimental design for the gourd ladle melon rotating system

编号 No.	处理 Treatment	$N-P_2O_5-K_2O$(kg/hm^2) 四季豆 Kidney bean	瓢瓜 Gourd ladle melon	早稻 Early rice	编号 No.	处理 Treatment	$N-P_2O_5-K_2O$(kg/hm^2) 四季豆 Kidney bean	瓢瓜 Gourd ladle melon	早稻 Early rice
1	$N_0P_0K_0$	0-0-0	0-0-0	0-0-0	6	$N_4P_3K_3$	240-90-90	420-180-225	0-0-0
2	$N_0P_3K_3$	0-90-90	0-180-225	0-0-0	7	$N_3P_0K_3$	180-0-90	315-0-225	0-0-0
3	$N_1P_3K_3$	60-90-90	105-180-225	0-0-0	8	$N_3P_1K_3$	180-30-90	315-60-225	0-0-0
4	$N_2P_3K_3$	120-90-90	210-180-225	0-0-0	9	$N_3P_2K_3$	180-60-90	315-120-225	0-0-0
5	$N_3P_3K_3$	180-90-90	315-180-225	0-0-0	10	$N_3P_4K_3$	180-120-90	315-240-225	0-0-0

试验中氮肥用尿素，磷肥用过磷酸钙，钾肥用加拿大氯化钾，试验地不施有机肥。过磷酸钙全部做基肥，氮、钾肥则分基肥和追肥施用，基肥中氮、钾肥各占50%。剩余的氮、钾肥在四季豆做追肥平分2次施用，瓢瓜的追肥则平分3次施用。表2的基础土壤主要肥力指标的常规法[20]测定结果表明，试验田的基础土壤速效氮、磷、钾含量已超过早稻高产临界指标[21]，因而第一轮作周年的早稻不再施肥，同时考虑到每茬蔬菜均施用氮、磷、钾化肥，故第2和第3轮作周年的早稻亦不再施肥。供试四季豆品种为白珍珠，瓢瓜品种为杭州长瓜，早稻品种为金优明100（杂交稻），均为当地大面积种植的良种。试验区周围设置1 m宽以上的保护行，其它的栽培管理措施与大田生产一致。

表2　试验前土壤基础肥力状况

Table 2　Basic fertility conditions of soils at the beginning of the experiment

测定方法 Testing method	pH	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Avail. N (mg/kg)	铵态氮 Ammonium N (mg/L)	硝态氮 Nitrate N (mg/L)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
常规方法[20] Conventional method	5.6	18.6	204.6	—	—	110.8	165.0
ASI 法[22] ASI method	5.8	13.5	—	5.9	47.9	136.5	110.5

注（Note）：ASI 法测定的有效磷和速效钾的单位为 mg/L　The units of available P and K using the ASI method are mg/L.

1.2　样品采集与测定

在试验实施前，按规范采集基础土样2 kg。每季作物收获时，每个小区单收单称，记录每个小区的茎叶产量和农产品产量；按各处理和重复分别取茎叶样品和农产品样品。在定位试验的第3年，对前2个周年取得最高经济效益的处理小区的供试四季豆、瓢瓜和早稻，分别在其生育周期内间隔15 d至30 d采集1次植株样品，每个作物一个生育期共采集6次植株样品。在每个轮作周期的瓢瓜和早稻收获时，按各处理小区取混合土样各2 kg。植株样品用常规方法[20]测定氮、磷含量，即用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮，蒸馏法测氮，钒钼黄比色法测磷。土壤样品分别用常规法[20]和ASI法[22]测定主要肥力指标。其中基础土样的ASI法测定结果见表2。

1.3　数据分析与计算

考虑到定位试验是连续种植作物和施肥，由于氮、磷肥存在后效，计算氮、磷肥利用率则以3个轮作周年为基础。即：四季豆的氮肥或磷肥利用率等于相应施肥区的氮或磷吸收量与对照区氮或磷吸收量之差除以四季豆氮或磷投入量；四季豆和瓢瓜的氮或磷肥综合利用率等于两季蔬菜的氮或磷吸收量与对照区两季蔬菜相应氮或磷吸收量之差除以四季豆和瓢瓜氮或磷投入量；四季豆、瓢瓜和早稻的氮或磷肥综合利用率等于三季作物的氮或磷吸收量与对照区三季作物相应氮或磷吸收量之差除以三季作物氮或磷投入量；施用氮肥或磷肥的产量效益等于作物产量乘以产品价格减去化肥成本；施用氮肥或磷肥的净增收等于氮肥或磷肥处理产量效益减去对照区产量效益。试验结果采用MATLAB软件进行统计分析，并用MATLAB语言编程绘图。

1.4　蔬菜和水稻氮、磷吸收动态模型

章明清等[23]在研究水稻一个生育期的氮、磷、钾吸收动态时，建立了如下模型：

$$U(t)=kt^{(n+3)}\left[\frac{1}{(n+1)(n+3)}-\frac{t}{Tc^{\frac{1}{m}}(n+1)(n+4)}-\frac{t^{m}}{Tc(n+m+1)(n+m+3)}+\frac{t^{m+1}}{Tc^{1+\frac{1}{m}}(n+m+1)(n+m+4)}\right] \quad (1)$$

式中：U 表示养分吸收量（g/m^2），t 表示种植时间（d），k 表示根系养分吸收常数[$g/(d^{(n+3)}\cdot m^2)$]，n、m 为调节系数（无量纲），T_c 是与最大养分吸收量时间有关的参数（d）。本文应用该模型研究供试四季豆、瓢瓜和早稻的氮、磷吸收动态及其吸收特征参数。

2　结果与分析

2.1　不同氮、磷水平对菜-稻轮作产量和经济效益的影响

3年定位试验表明，不施肥处理的四季豆、瓢瓜

和早稻的平均产量分别为 13483 ± 2051 kg/hm^2、40017 ± 2991 kg/hm^2 和 5710 ± 551 kg/hm^2，分别只有四季豆和瓢瓜最高产量的 63.9% 和 65.5% 以及早稻最高产量的 80.3%，表明土壤对蔬菜产量的贡献率明显低于早稻，施肥对蔬菜产量的增产效果显著高于早稻。

表 3 的试验结果显示，尽管供试土壤的速效氮磷含量较高，但氮、磷肥当季施用量与四季豆和瓢瓜产量均呈现出抛物线型关系。与对照区相比，四季豆和瓢瓜的鲜重产量都有显著水平的增产效果；两季蔬菜连续施用氮肥或磷肥，氮、磷后效使早稻产量亦呈现抛物线型关系。结果表明，在试验设计的氮、磷肥施用范围内，四季豆和瓢瓜均可达到最高产量，同时氮肥或磷肥后效也能够使轮作早稻获得该试验地条件下的最高产量水平。其中，早稻最高产量达到 7107 kg/hm^2，与福建早稻平均产量相近[24]。

以每公斤 N 4.3 元、P_2O_5 5 元、四季豆和瓢瓜 1 元、稻谷 2 元的当地平均市场价计算施肥效益（表 3）。与氮或磷肥对照区相比，增施氮肥或磷肥对四季豆和瓢瓜都具有显著水平的净增收作用；氮、磷肥后效对轮作早稻的净增收效果亦达到显著水平。在一个轮作周期中，净增收的绝大部分都来自两季蔬菜。表 3 的结果还表明，在该菜稻轮作中，N_2 和 P_2 水平处理使供试蔬菜和早稻均可取得较高产量和最佳经济效益。氮肥和磷肥在一个轮作周年的最高净增收分别达到 15769 元/hm^2 和 16253 元/hm^2，比其他施氮水平和施磷水平分别高出 1.6% ～ 37.5% 和 14.9% ～ 46.8%。

表 3 不同氮、磷肥用量对四季豆－瓢瓜－早稻轮作制产量和净增收的影响

Table 3 Effects of different N and P rates on the yields and net incomes in the kidney bean-gourd ladle melon-early rice rotating system

作物 Crop	养分 Nutr.	项目 Item	施肥水平 Fertilizer application rate				
			X_0	X_1	X_2	X_3	X_4
四季豆 Kidney bean	N	产量 Yield(t/hm^2)	15.59 bB	18.90 aA	19.85 aA	21.09 aA	19.66 aA
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	15590	2948 bB	3646 aA	3626 aA	2935 bB
瓢瓜 Gourd ladle melon	N	产量 Yield(t/hm^2)	47.58 c	54.17 bB	59.11 aA	58.32 aA	54.79 bB
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	47580	6141 cB	10623 aA	9382 bA	5404 dC
早稻 Early rice	N	产量 Yield(kg/hm^2)	5950 dB	6501 cB	6767 bA	7107 aA	6899 bA
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	11900	768 dD	1500 cC	2514 aA	2098 bB
合计 Total	N	净增收 Net income (Yuan/hm^2)	75070	9857 bB	15769 aA	15522 aA	10437 bB
四季豆 Kidney bean	P	产量 Yield(t/hm^2)	17.29 bB	20.00 aA	20.54 aA	21.09 aA	20.50 aA
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	17290	2560 cC	2955 bB	3354 aA	2615 cC
瓢瓜 Gourd ladle melon	P	产量 Yield(t/hm^2)	48.32 cC	56.10 bB	61.05 aA	58.32 aB	54.37 bB
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	48320	7471 cB	12126 aA	8892 bB	4843 dC
早稻 Early rice	P	产量 Yield(kg/hm^2)	6317 cC	6723 bB	6903 aA	7107 aA	6912 aA
		净增收 Net income (Yuan/hm^2)	12634	812 cC	1172 bB	1580 aA	1190 bB
合计 Total	P	净增收 Net income (Yuan/hm^2)	78244	10843 cC	16253 aA	13826 bB	8648 dC

注(Note)：X_1、X_2、X_3 和 X_4 施肥水平的净增收是指增产效益与肥本之差 Net incomes mean the value of the benefit in X_1, X_2, X_3 and X_4 levels minus fertilizer cost respectively.

尽管根据表 3 的产量结果可建立氮或磷的一元二次肥效模型，但定位试验中连续种植作物和施用不同用量氮、磷肥，由于肥料存在后效，不能根据当季施肥量和产量建立的肥效模型，得到该轮作制的作物经济施肥量。因此，采用陶其骧等[25]提出的轮作制肥效模型建模和推荐施肥方法，分别建立本试验的轮作制氮肥和磷肥肥效模型，得到四季豆氮肥肥效模型：$Y = 15637 + 61.004N - 0.1825N^2$，$F = 36.6^*$；四季豆和瓢瓜氮肥综合肥效模型：$Y = 63007 + 78.390N - 0.09224N^2$，$F = 759.3^{**}$；四季

豆磷肥肥效模型：$Y = 17435 + 87.880P - 0.5233P^2$，$F = 33.5^*$；四季豆和瓢瓜磷肥综合肥效模型：$Y = 65757 + 144.01P - 0.3327P^2$，$F = 92.6^*$，其中，Y 表示产量，N、P 分别表示 N、$P_2O_5$ 施肥量，单位为 kg/hm^2。因此，该试验条件下的氮、磷肥经济施肥量分别为：四季豆 N 155 kg/hm^2 和 P_2O_5 79 kg/hm^2；瓢瓜 N 247 kg/hm^2 和 P_2O_5 130 kg/hm^2；早稻不施肥。

2.2　菜－稻轮作对氮、磷养分利用率的影响

根据农产品和茎叶产量及其样品氮、磷含量测定结果计算供试蔬菜和早稻的氮、磷吸收量，用差减法分别计算四季豆的氮、磷利用率，四季豆-瓢瓜连作以及四季豆-瓢瓜-早稻轮作的氮、磷肥综合利用率，结果见表 4 和表 5。

表 4　不同氮肥用量对四季豆－瓢瓜－早稻轮作制的氮素吸收及其利用率的影响

Table 4　Effect of different N application rates on the N uptakes and its recoveries in the kidney bean－gourd ladle melon－early rice rotating system

种植方式 Planted pattern	项目 item	氮肥施用水平 N applied level				
		N_0	N_1	N_2	N_3	N_4
四季豆 Kidney bean	氮投入(kg/hm^2) N application rate	0	60	120	180	240
	吸氮量(kg/hm^2) N uptake	158	192	212	222	223
	氮肥利用率(%) N recovery		56.1	44.9	35.2	27.1
四季豆－瓢瓜 Kidney bean－gourd ladle melon	两季蔬菜氮投入(kg/hm^2) N application rate in the rotating system	0	165	330	495	660
	两季蔬菜吸氮量(kg/hm^2) N uptake in the rotating system	399	483	548	566	511
	氮肥综合利用率(%) N multi recovery		50.5	45.1	31.6	16.8
四季豆－瓢瓜－早稻 Kidney bean－gourd ladle melon－early rice	三季作物氮投入(kg/hm^2) N application rate in the rotating system	0	165	330	495	660
	三季作物吸氮量(kg/hm^2) N uptake in the rotating system	509	633	725	752	699
	氮肥综合利用率 N multi recovery(%)		75.0	65.6	49.1	28.8

结果表明，在不同氮、磷施用水平下，与四季豆-瓢瓜连作相比，四季豆-瓢瓜-早稻轮作明显提高了氮、磷肥利用率。在 N_1、N_2、N_3 和 N_4 水平下，氮肥综合利用率分别比四季豆－瓢瓜连作提高了 24.5、20.5、17.5 和 12.0 个百分点；在 P_1、P_2、P_3 和 P_4 水平下，磷肥综合利用率则分别提高了 11.5、8.6、7.9 和 5.6 个百分点。但是，无论是四季豆氮、磷利用率还是两季或三季作物的氮、磷综合利用率，与氮肥或磷肥施用量均呈现负相关关系。高量施用氮、磷肥如 N_4 或 P_4 水平的氮、磷肥处理无论是四季豆、四季豆－瓢瓜连作还是四季豆－瓢瓜－早稻轮作，氮肥利用率均低于 30%，磷肥利用率则低于 10%。

取得最佳经济效益的 N_2 和 P_2 施肥水平，氮肥利用率从当季四季豆和四季豆-瓢瓜连作的 44.9% 和 45.1% 提高到四季豆－瓢瓜－早稻轮作的 65.5%，比两季蔬菜连作提高了 20.4 个百分点；磷肥利用率从四季豆和四季豆-瓢瓜连作的 15.0% 和 17.9% 提高到四季豆－瓢瓜－早稻轮作的 26.5%，比两季蔬菜连作提高了 8.6 个百分点。因此，与四季豆-瓢瓜连作相比，四季豆-瓢瓜-早稻轮作促进了氮、磷养分高效利用。

表5 不同磷肥用量对四季豆-瓢瓜-早稻轮作制的磷素吸收及其利用率的影响

Table 5 Effect of different P application rates on P uptakes and its recoveries in the kidney bean-gourd ladle melon-early rice rotating system

种植方式 Planted pattern	项目 Item	磷肥施用水平 P applied level				
		P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
四季豆 Kidney bean	磷(P_2O_5)投入(kg/hm²) P_2O_5 application rate	0	30	60	90	120
	吸磷量(kg/hm²) P uptake	32	34	36	36	34
	磷肥利用率(%) P recovery		18.4	15.0	11.4	4.6
四季豆-瓢瓜 Kidney bean-gourd ladle melon	两季蔬菜磷(P_2O_5)投入(kg/hm²) P_2O_5 application rate in the rotating system	0	90	180	270	360
	两季蔬菜吸磷量(kg/hm²) P uptake in the rotating system	75	86	89	88	80
	磷肥综合利用率(%) P multi recovery		27.7	17.9	10.7	3.1
四季豆-瓢瓜-早稻 Kidney bean-gourd ladle melon-early rice	三季作物磷(P_2O_5)投入(kg/hm²) P_2O_5 application rate in the rotating system	0	90	180	270	360
	三季作物吸磷量(kg/hm²) P uptake in the rotating system	107	122	127	128	120
	磷肥综合利用率(%) P multi recovery		39.2	26.5	18.6	8.7

注(Note): P_2O_5 与 P 的转化系数为 0.4266 The inversion coefficient between P_2O_5 and P is 0.4266.

2.3 供试蔬菜和早稻氮、磷吸收特性的差异

表3的试验结果表明,在土壤碱解氮 204.6 mg/kg 和有效磷 110.8 mg/kg 的菜田上,施用氮、磷肥对秋季四季豆和冬春季瓢瓜均具有显著增产效果,但轮作早稻仅靠吸收利用残留于菜田的氮、磷养分,就可达到该试验地的最高产量水平,表明供试蔬菜和早稻在氮、磷需肥特性上有明显差异。

根据式(1)养分吸收动态模型,建立平衡施肥条件下的四季豆、瓢瓜和早稻的氮、磷吸收动态(图1),分别得到氮、磷的最大吸收速率和最大吸收量等养分吸收特征参数(表6)。结果表明,供试四季豆和瓢瓜的氮、磷需肥强度明显高于早稻。四季豆的氮、磷最大吸收速率分别是早稻的25.1倍和2.5倍,瓢瓜则分别是早稻的18.4倍和1.2倍;四季豆的氮、磷最大吸收量分别是早稻的1.7倍和2.2倍,瓢瓜则分别是早稻的2.5倍和1.9倍。根系养分吸收 CDE 机理模型[26]的研究表明,由于田间条件下土壤溶液养分浓度一般都较低,根系养分吸收速率与土壤溶液养分浓度成正相关。表明种植四季豆和瓢瓜时要求土壤溶液有较高的氮、磷浓度,因而需要施用较多的肥料;而水稻的需肥强度较低,残留于菜田土壤的氮、磷养分(例如,本试验田)就可满足生长需要。因此,正是蔬菜和早稻氮、磷需肥特性的这种差异,构成了菜-稻轮作实现氮、磷高效利用的植物营养学基础。

2.4 菜-稻轮作对土壤速效氮、磷含量的影响

在轮作制中,瓢瓜和早稻收获时各处理土样速效氮、磷含量测定结果(表7)表明,由于连续施用 N_1 ~ N_4 处理水平的氮肥或 P_1 ~ P_4 处理水平的磷肥,与基础土壤相比,四季豆和瓢瓜连作的土壤硝态氮和有效磷均出现明显积累。其中,N_2 和 P_2 施肥水平在瓢瓜收获时的土壤硝态氮和有效磷含量比基础土壤分别提高了 131.9 % 和 7.8 %,表明两季蔬菜连作既使采用经济施肥量,也不足以降低菜田氮、磷积累和流失潜力。但是,菜-稻轮作体系中通过早稻对土壤中速效氮、磷养分的吸收利用,明显降低了土壤硝态氮和有效磷含量。其中 N_2 和 P_2 施肥水平在早稻收获时土壤硝态氮和有效磷含量分别只有瓢瓜收获时的27.5%和87.0%,为基础土壤硝态氮和有效磷含量的63.7%和93.9%。

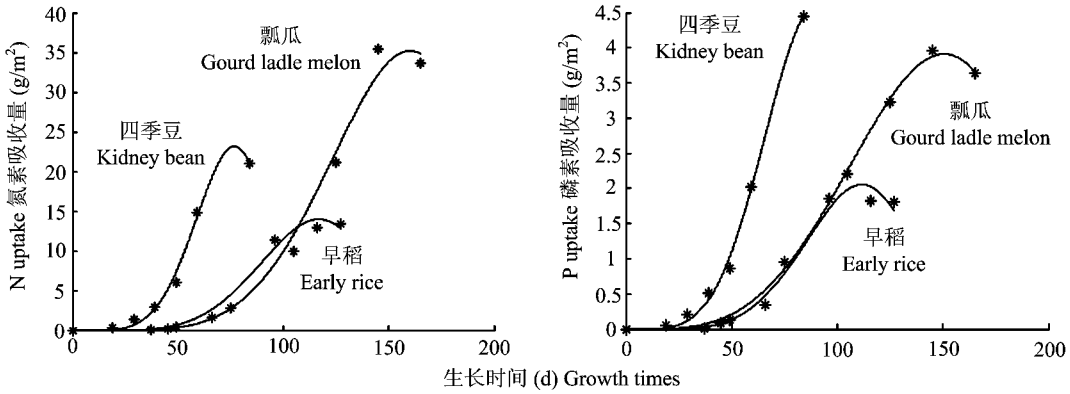

图 1　四季豆-瓢瓜-早稻轮作制氮、磷吸收动态

Fig. 1　N and P uptakes in the kidney bean-gourd ladle melon-early rice rotating system

表 6　平衡施肥对四季豆、瓢瓜和早稻氮、磷吸收动态及其对特征参数的影响

Table 6　Effects of the balanced fertilization on N and P uptakes and their characteristic parameters in the kidney bean and gourd ladle melon and early rice

作物 Crop	养分 Nutr.	氮、磷吸收动态模型参数 N and P uptake dynamic model parameter				F 值 F value	最大吸收速率 Max. uptake velocity [g/(m²·d)]	最大吸收量 Max. uptake (g/m²)
		k	n	m	T_c			
四季豆	N	6.6799×10^{-8}	2.9014	1.0172	82.81	289.4**	0.7489	23.15
Kidney bean	P	1.0962×10^{-7}	2.0875	1.0415	107.83	645.5**	0.1161	4.58
瓢瓜	N	1.0222×10^{-9}	2.9606	1.0225	179.57	150.1**	0.5496	35.20
Gourd ladle melon	P	2.1419×10^{-7}	1.1959	1.3736	981.78	1115.2**	0.0534	3.91
早稻	N	2.9391×10^{-9}	2.9355	1.0174	127.09	145.4**	0.0298	13.98
Early rice	P	7.2284×10^{-10}	2.8758	1.0027	113.29	104.5**	0.0458	2.05

注(Note)：**—表示达极显著水平 Indicate significantly at the 1% level.

表 7　菜-稻轮作对土壤硝态氮和有效磷含量的影响

Table 7　Effects of the vegetable and early rice rotating system on soil NO_3^--N and available P in soils

氮肥试验 N experiment				磷肥试验 P experiment			
		土壤硝态氮 Soil NO_3^--N (mg/L)				土壤有效磷 Soil available P (mg/L)	
编号 No.	处理 Treatment	菜-菜连作 Vegetable-vegetable continuous cropping	菜-菜-稻轮作 Vegetable-vegetable-rice rotation	编号 No.	处理 Treatment	菜-菜连作 Vegetable-vegetable continuous cropping	菜-菜-稻轮作 Vegetable-vegetable-rice rotation
1	$N_0P_0K_0$	31.1 eE	31.6 cB	1	$N_0P_0K_0$	103.5 eE	100.1 dC
2	$N_0P_3K_3$	30.8 eE	28.9 cB	7	$N_3P_0K_3$	102.4 eE	98.7 dC
3	$N_1P_3K_3$	83.9 dD	29.8 cB	8	$N_3P_1K_3$	120.6 dD	112.9 cC
4	$N_2P_3K_3$	111.1 cC	30.5 cB	9	$N_3P_2K_3$	147.2 cC	128.1 bB
5	$N_3P_3K_3$	138.3 bB	35.4 bB	5	$N_3P_3K_3$	178.8 bB	153.7 aA
6	$N_4P_3K_3$	204.7 aA	50.9 aA	10	$N_3P_4K_3$	231.5 aA	162.8 aA

注(Note)：表中菜-菜连作是指四季豆和瓢瓜连作，菜-菜-稻轮作是指四季豆-瓢瓜-早稻轮作 The vegetable-vegetable continuous cropping means kidney bean and gourd ladle melon rotation, and the vegetable-vegetable-rice rotation mean kidney bean-gourd ladle melon-early rice rotating system. 基础土壤硝态氮和有效磷含量分别为 47.9mg/L 和 136.5mg/L. NO_3^--N and available P in basis soils are 47.9 mg/L and 136.5 mg/L, respectively.

3 讨论与结论

3.1 菜－稻轮作对作物产量和经济效益的影响

菜田氮、磷过度积累是由于不合理的栽培制度和过量施肥引起的。为此，众多学者提出了诸如蔬菜与旱粮轮作[6]、不同旱生蔬菜品种间轮作[7]、旱生蔬菜与水生蔬菜轮作[8]等合理的栽培制度等。但是，蔬菜生产模式的选择不但要适应当地农业生产条件，而且还要适应当地市场条件。水稻是我国南方的主要粮食作物，菜－稻轮作具有普遍适用性。

王强等[16]和章婧虹等[17]的试验研究表明，推荐施肥可使菜稻轮作实现高产稳产。3年定位田间试验表明，氮、磷肥施用量与四季豆和瓢瓜产量均呈现抛物线型关系，施于两季蔬菜的氮、磷肥后效对轮作早稻产量亦表现出抛物线型关系。在推荐施肥量时，菜稻轮作可取得较高产量和最佳经济效益，净增收比其他氮、磷施用水平分别提高1.6%～37.5%和14.9%～46.8%。经济施肥量分别为四季豆N 155 kg/hm^{2}和P_2O_5 79 kg/hm^2、瓢瓜N 247 kg/hm^{2}和P_2O_5 130 kg/hm^{2}和早稻不施肥。

3.2 菜－稻轮作对氮、磷肥利用率的影响

治理菜田氮、磷流失导致面源污染的难度在于，既要限制过高的化肥投入量，防止氮、磷面源污染，又要充分考虑当地农村经济条件和现有种植结构，最大限度地照顾菜农经济利益。在这一两难矛盾中，最佳解决途径是提高化肥利用率。王强等[16]对大棚茄子－水稻轮作制研究表明，茄子季不同氮肥用量的表观利用率在9.98%～13.62%之间，水稻季则分别为19.9%～24.9%；章婧虹等[17]对四季豆－瓢瓜－早稻轮作制试验表明，在推荐施肥下，四季豆和瓢瓜的两季蔬菜氮、磷肥综合利用率分别为52.2%和28.5%，四季豆－胡瓜－早稻轮作的3季作物则分别提高到59.1%和34.9%。氮、磷肥不同用量的3年定位试验表明，四季豆－瓢瓜－早稻轮作在施用N_1至N_4水平氮肥时，四季豆和瓢瓜连作的氮肥综合利用率为16.8%～50.5%，四季豆－瓢瓜－水稻轮作则提高到28.8%～75.0%；在施用P_1至P_4水平的磷肥时，四季豆和瓢瓜连作的磷肥综合利用率为3.1%～27.7%，四季豆－瓢瓜－水稻轮作则提高到8.7%～39.2%。在取得最佳经济效益（N_2、P_2处理）的前提下，氮肥利用率从两季蔬菜连作的45.1%提高到四季豆－瓢瓜－水稻轮作的65.6%，磷肥利用率从两季蔬菜连作的17.9%提高到四季豆－瓢瓜－水稻轮作的26.5%。

氮、磷吸收特性分析表明，四季豆的氮、磷最大吸收速率分别是早稻的25.1倍和2.5倍，瓢瓜则分别是早稻的18.4倍和1.2倍；四季豆的氮、磷最大吸收量分别是早稻的1.7倍和2.2倍，瓢瓜则分别是早稻的2.5倍和1.9倍。表明种植蔬菜时需要施用较多的肥料，而菜－稻轮作模式利用了蔬菜和早稻在氮、磷营养特性上的差异，促进了氮、磷养分高效利用。

3.3 菜－稻轮作对消减土壤氮、磷积累的作用

大棚茄子－水稻轮作研究结果[16]表明，在茄子季由于高施肥量，导致土壤中速效养分大量积累，耕层土壤碱解氮比试验前提高了17.0%～32.4%，有效磷和速效钾含量也明显增加，但与早稻轮作后土壤速效氮、磷、钾分别比茄子季后下降了18.1%～25.9%、2.1%～34.6%和64.6%～76.2%。推荐施肥在四季豆－瓢瓜－早稻轮作制中，四季豆季后土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度分别比基础土壤提高了3.3%和177.8%，胡瓜季后则分别提高了55.6%和192.6%，但早稻季后土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度分别比基础土壤下降了14.9%和7.4%[17]。不同氮、磷肥用量定位试验表明，取得最佳经济效益的N_2和P_2施肥水平，在四季豆和瓢瓜连作后，土壤硝态氮和有效磷含量分别提高到基础土壤的2.32倍和1.08倍。但四季豆－瓢瓜－早稻轮作后土壤硝态氮和有效磷含量分别降低到30.5 mg/L和128.1 mg/L，只有瓢瓜季后的27.5%和87.0%，为基础土壤的63.7%和93.9%。

结果表明，四季豆和瓢瓜连作即使采用经济施肥量，也不足以削减菜田氮、磷积累数量，四季豆－瓢瓜－早稻轮作则有利于削减菜田土壤氮、磷过度累积，降低土壤氮、磷流失潜力。

3.4 “菜稻轮作结合推荐施肥”技术模式的应用

施肥是提高蔬菜产量和增加菜农收入的不可缺少的生产措施，但在当前的蔬菜生产中超高量施用氮肥和磷肥是普遍现象，不仅浪费了肥料资源，造成蔬菜减产和降低产品品质，而且对农业环境构成威胁。在防治氮、磷面源污染和最大限度地照顾菜农经济利益的两难矛盾中，提高化肥利用率是最佳解决途径。研究表明，“菜稻轮作结合推荐施肥”技术模式在取得最佳经济效益的同时，促进了氮、磷养分高效利用，显著降低因种植蔬菜施用氮、磷肥造成土壤过高的氮、磷积累，起到了控制菜田氮、磷流失的作用，在我国南方具有广阔的推广应用前景。

由于蔬菜种类繁多，种植结构复杂，菜－稻轮作

模式的推广应用还需在以下几方面进行深入研究。首先要进一步深入研究菜－稻轮作技术模式的氮、磷高效利用机理与潜力；其次在蔬菜方面，要以获得较高产量和最佳经济效益为目标，研究和提出不同蔬菜品种在不同产量和土壤肥力水平下的配套施肥技术；在轮作水稻方面，要以获得较高产量和氮、磷养分损失最小化为目标，探讨在什么条件下轮作水稻可以不施氮、磷肥和在什么条件下需要施用适量氮、磷肥。同时考虑到我国人多地少，为保证粮食安全，菜－稻轮作周期以一个周年为佳。这样，有利于在菜农的经济收入（种菜）、口粮安全（种稻）和农业环境保护（菜－稻轮作）等三个方面实现协调统一。

参 考 文 献：

[1] 黄东风，邱孝煊，李卫华，等. 福州市郊蔬菜施肥现状及菜地土壤养分累积特征分析[J]. 福建农林大学学报（自然科学版），2009，38(6)：633-638.
Huang D F，Qiu X X，Li W H *et al*. Fertilization status quo and nutrient accumulation of vegetable field soil in the suburb of Fuzhou city[J]. J. Fujian Agric. For. Univ.（Nat. Sci. Ed.）. 2009，38(6)：633-638.

[2] 余海英，李延轩，周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(4)：642-650.
Yu H Y，Li Y X，Zhou J M. Salt accumulation，translocation and ion composition in greenhouse soil profiles[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2007，13(4)：642-650.

[3] 刘兆辉，江丽华，张文君，等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报，2008，45(2)：296-303.
Liu Z H，Jiang L H，Zhang W J *et al*. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shangdong[J]. Acta Pedol. Sin.，2008，45(2)：296-303.

[4] 余海英，李延轩，周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报，2006，43(4)：571-576.
Yu H Y，Li Y X，Zhou J M. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects[J]. Acta Pedol. Sin.，2006，43(4)：571-576.

[5] 张维理，武淑霞，冀宏杰，Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅰ. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学，2004，37(7)，1008-1017.
Zhang W L，Wu S X，Ji H J，Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. Ⅰ. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. Sci. Agric. Sin.，2004，37(7)：1008-1017.

[6] 孟艳玲，刘子英，李季. 菜粮轮作对温室土壤盐分和硝酸盐含量的影响[J]. 河南农业科学，2006，10：81-87.
Meng Y L，Liu Z Y，Li J. Effect of vegetable-grain rotating system on salt and nitrate content in greenhouse soil[J]. Henan Agric. Sci.，2006，10：81-87.

[7] 施毅超，胡正义，龙为国，等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报，2011，19(3)：548-553.
Shi Y C，Hu Z Y，Long W G *et al*. Effect of crop rotation on ion accumulation in secondary salinization soil of vegetable field in greenhouse[J]. Chin. J. Eco-Agric.，2011，19(3)：548-553.

[8] 江解增，缪旻珉，曾晓萍，曹光亮. 设施内蔬菜水旱轮作新模式[J]. 中国蔬菜，2011，9：46-49.
Jiang J Z，Miao M M，Zeng X P，Chao G L. Rice field-upland field rotation new models in greenhouse vegetable[J]. China Veget.，2011，9：46-49.

[9] 张维理，冀宏杰，kolbe H.，徐爱国. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. Ⅱ. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学，2004，37(7)，1018-1025.
Zhang W L，Ji H J，Kolbe H，Xu A G. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the lleviating strategies. Ⅱ. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China[J]. Sci. Agric. Sin.，2004，37(7)：1018-1025.

[10] Jiao Y，Willian H，Whslen J K. Agricultural practices influence dissolved nutrients leaching through intact soil cores[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，2004，68：2058-2068.

[11] Gaynor J D，Finflay W L. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production[J]. J. Environ. Qual.，2002，24：734-741.

[12] Lamb J A，Dowdy R H，Anderson J L *et al*. Water quality in an irrigated sandy soil：Ridge tillage in rotated corn and soybean compared with full-width tillage in continuous corn[J]. Soil Till. Res.，1998，48：167-177.

[13] Nissen T M，Wander M M. Management and soil-quality effects on fertilizer-use efficiency and leaching[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，2003，67：1524-1532.

[14] 曹志洪，林先贵，杨林章，等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能Ⅰ. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报，2005，42(5)：799-804.
Cao Z H，Lin X G，Yang L Z *et al*. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment. Ⅰ. Characteristics of soil P losses from paddy field to water bodies with runoff[J]. Acta Pedol. Sin.，2005，42(5)：799-804.

[15] 曹志洪，林先贵，杨林章，等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 Ⅱ. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报，2006，43(2)：256-260.
Cao Z H，Lin X G，Yang L Z *et al*. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment. Ⅱ. Characteristics of nitrogen accumulation，movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection[J]. Acta Pedol. Sin.，2005，43(2)：256-260.

[16] 王强，徐建明，姜丽娜，等. 平衡施肥对大棚茄子-水稻轮

作土壤中作物生产和土壤养分的影响[J]. 浙江大学学报(农业和生命科学版), 2012, 38(2): 197-203.
Wang Q, Xu J M, Jiang L N *et al*. Effects of balanced fertilization on crop production and soil nutrient status under long-term greenhouse[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. & Life Sci.), 2012, 38(2): 197-203.

[17] 章婧虹, 章明清, 张群林, 等. 蔬菜经济施肥模式对菜稻轮作土柱渗漏水氮磷浓度的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(2): 181-186.
Zhang J H, Zhang M Q, Zhang Q L *et al*. Effect of rotational planting of vegetable and rice with economic vegetable fertilization on N and P in leached water of soil pillar[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2012, 27(2): 181-186.

[18] 沈明星, 吴彤东, 谢正荣, 等. 大棚作物-水稻种植模式对稻谷产量和氮磷面源污染的影响[J]. 上海农业学报, 2009, 25(3): 79-81.
Shen M X, Wu T D, Xie Z R *et al*. The effects of greenhouse crops-rice cropping pattern on rice yield and non-point source pollution of nitrogen[J]. Acta Agric. Shanghai, 2009, 25(3): 79-81.

[19] 孔庆波, 姚宝全, 章明清, 等. 福建主要蔬菜氮磷钾营养特性及其施肥指标体系研究. Ⅲ. 氮磷钾最佳用量和比例[J]. 福建农业学报, 2011, 26(4): 620-626.
Kong Q B, Yao B Q, Zhang M Q *et al*. Nutritive characters and fertilization index of nitrogen, phosphor, potassium for major vegetable species in Fujian. Ⅲ. The optimal amount and the ratio of N, P and K for application[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2011, 26(4): 620-626.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146-196.
Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 146-196.

[21] 李娟, 章明清, 孔庆波, 等. 福建早稻测土配方施肥指标体系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 938-946.
Li J, Zhang M Q, Kong Q B *et al*. Soil testing and formula fertilization index for early rice in Fujian province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 938-946.

[22] 加拿大钾磷研究所北京办事处主编. 土壤养分状况系统研究法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992. 1-54.
PPI/PPIC Beijing Office. Systematics approach for soil nutrients status[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1992. 1-54.

[23] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 水稻根长增长和养分吸收动态及其模拟模型[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 554-562.
Zhang M Q, Li J, Kong Q B *et al*. Dynamics of rice root length and nutrient uptake and their simulation models[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 554-562.

[24] 徐志平, 姚宝全, 章明清, 等. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究 Ⅰ. 土壤基础肥力对作物产量的贡献率及其施肥效应[J]. 福建农业学报, 2008, 23(4): 396-402.
Xu Z P, Yao B Q, Zhang M Q *et al*. Soil testing and fertilizer formulation for major crops in Fujian Ⅰ. Effects of soil condition and fertilization on crop yield[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2008, 23(4): 396-402.

[25] 陶其骧, 刘光荣, 李祖章, 等. 油-稻-稻种植制钾肥合理投入的研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 122-124.
Tao Q X, Liu G R, Li Z Z *et al*. Studies on reasonable input K fertilizer in rotating system of oil crop-rice-rice[J]. Chin. J. Soil Sci., 1995, 26(3): 122-124.

[26] 徐明岗, 姚其华, 吕家珑. 土壤养分运移[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 159-192.
Xu M G, Yao Q H, Lu J L. Nutrients transportion in soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 159-226.