

基于大蒜 || 蚕豆间作模式环境效益分析

汤秋香^{1,2}, 任天志^{1*}, 雷宝坤³, 翟丽梅¹, 胡万里³, 罗新华⁴, 张继宗¹, 刘宏斌¹

(1.中国农业科学院农业资源与区划研究所, 北京 100081; 2.新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; 3.云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 4.云南省大理州环境监测站, 云南 下关 671000)

摘要:于滇北洱海流域田间小区试验研究了大蒜 || 蚕豆间作模式的环境效益, 分析了不同种植模式的经济效益、作物养分利用状况、土壤养分残留状况、地下水氮磷含量、后茬水稻田土壤养分和田面水氮磷含量的变化。结果显示: 大蒜 || 蚕豆土地当量比(LER)为 1.15, 增产效果显著。大蒜 || 蚕豆间作模式显著提高大蒜和蚕豆对氮的吸收利用, 降低土壤硝态氮残留量, 也显著降低地下水的硝态氮和可溶性氮的残留量, 并且减少了后茬的土壤中无机氮残留, 降低后茬水稻泡田期的氮磷流失风险。研究结果证实大蒜 || 蚕豆间作模式是适宜当地种植的经济、环境效益双赢模式。本研究对推广合理的间作种植模式, 减少农田氮磷流失等面源污染具有重要参考价值。

关键词:大蒜; 蚕豆; 间作系统; 环境效益; 经济效益; 洱海流域

中图分类号: S181 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)04-0816-11 doi:10.11654/jaes.2013.04.024

Economic and Environmental Benefits of Vicia fava and Garlic Intercropping Mode

TANG Qiu-xiang^{1,2}, REN Tian-zhi^{1*}, LEI Bao-kun³, ZHAI Li-mei¹, HU Wan-li³, LUO Xin-hua⁴, ZHANG Ji-zong¹, LIU Hong-bin¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regionalization, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Agronomy, Xinjiang University Agriculture, Wulumuqi 830052, China; 3. Institute of Agriculture Environmental Resources Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4. Dali Environmental Monitoring Station, Yunnan Province, Xiaguan 671000, China)

Abstract: We research for the environmental benefit intercropping patterns of vicia fava and garlic in Northern Yunnan Province Erhai Lake Basin. economic benefits, crop nutrient utilization, soil nutrient residue, groundwater nitrogen and phosphorus contents of intercropping patterns, and paddy field soil nutrient and the nitrogen and phosphorus contents of surface water in next season. The results showed that: the land equivalent ratio(LER) is greater than 1 of intercropping patterns of vicia fava and garlic, that means high efficiency intercropping than monoculture. The intercropping patterns of vicia fava and garlic significantly increased the nitrogen absorption and utilization, reduced soil nitrate residues, simultaneously, reduced nitrate and soluble nitrogen residues in groundwater. And intercropping mode could reduce the residual of inorganic nitrogen in the soil in the next quarter, also, reduced nitrogen and phosphorus loss risk in surface water of the next season. In this study, the intercropping modes of vicia fava and garlic was not only had better economic benefits but also had better environmental benefits in the local. It would provide reference for popularizing the reasonable planting structure and reducing the loss of nitrogen and phosphorus in farmland, reducing non-point source pollution of farmland.

Keywords: garlic; vicia fava; intercropping system; environmental benefits; economic benefits; Erhai lake basin

洱海流域农田种植结构日趋单一, 不仅破坏了农田生物多样性, 削弱了农田自身抗御病虫害灾害的能力, 增加了农田氮、磷污染负荷, 加剧了环境风险, 而

且农业增收也极易受到市场波动影响。间作人工复合生态系统是国内外农业生产中日益广泛应用的多熟种植模式, 间作优势已被大量试验研究所证实^[1-5]。豆科作物能够通过生物固氮来获得高产而倍受人们关注, Hauggaard-Nielsen 等研究表明豌豆 || 大麦间作是增加 N₂ 固定的有益模式^[6]。Michael 等研究表明间作第二年淋溶液中 NO₃-N 浓度高于单作^[7]。Ghosh 等采用 N、P 匮乏土壤进行大豆 || 高粱研究, 结果表明, 生

收稿日期: 2012-05-08

基金项目: 国家“十一五”水专项项目(2008ZX07105-002)

作者简介: 汤秋香, 女, 河南开封人, 博士, 研究方向为农田生态环境。

E-mail: tangqiuxiang2004_2@163.com

* 通信作者: 任天志 E-mail: rentz@mail.caas.net.cn

长在一起的植物个体,其根系生长发育,相互交错穿插,吸收土壤介质中的营养物质和元素,引起养分吸收竞争^[8]。Searle 等在玉米单作、玉米||大豆间作、玉米||花生间作、大豆单作和花生单作试验结果中发现花生和大豆与玉米间作明显减少土壤残留氮累积^[9]。肖焱波等通过根系分隔和¹⁵N 标记土壤的盆栽试验,研究间作蚕豆和小麦对不同氮素来源利用的差异。结果表明,根系不分隔的处理小麦生长改善,其生物量、吸氮量都高于其他 2 种分隔方式,小麦的竞争促进了蚕豆固定更多的空气氮^[10]。张恩和等盆栽试验结果表明,不同作物间对土壤磷形态的影响差异较大,单作大豆形成 Ca₂-P 的比例显著提高,形成 Ca₈-P 和 Al-P、Fe-P 的比例也比相应单作小麦少^[11]。李隆等通过研究小麦||大豆间作中养分吸收和利用效率的变化,结果表明,间作作物氮、磷、钾养分吸收总量高于相应单作,而间作氮、磷和钾的利用效率比单作低。间作优势主要表现在养分吸收量的增加^[12]。Zhang 等的研究表明蚕豆、玉米根系间的相互作用促进作物对氮素的吸收,间作在一定程度上可以减少硝态氮的淋失^[13]。目前,洱海流域高需肥作物大蒜种植面积日益增加,而且经济效益驱使超负荷施用氮磷肥,这势必造成过量施肥现象日趋普遍。因此,本文从作物养分吸收、土壤养分残留、经济效益、地下水氮和磷变化、以及对下茬氮磷流失影响等方面对大蒜||蚕豆模式进行了分析研究。旨在以大蒜||蚕豆模式增加生物多样性,减少农田面源污染,为洱海流域种植结构调整、控制农田面源污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2009 年 4 月至 2011 年 5 月在洱海北部地区上关镇北邑村试验田进行。该研究区域属低纬度高原季风性气候。年降雨量在 800~1100 mm 之间,多

集中在 4—9 月;年日照时间 2440 h,无霜期 240 d,2 月、8 月时有低温天气,年平均气温在 15 ℃左右;年平均相对湿度为 69%。

试验设置(表 1):大蒜(CK)、大蒜(习惯施肥)、大蒜(优化施肥)、蚕豆单作(习惯施肥)、大蒜||蚕豆(优化施肥)、大蒜||蚕豆(CK)6 个处理,3 次重复,采用随机区组设计,小区规格为 5 m×6 m=30 m²,采用条带间作模式,间作比例为:大蒜带宽:蚕豆带宽=3:1,大蒜和蚕豆同期播种。其中大蒜品种为四川温江“红七星”,蚕豆品种为“云豆 06”。

磷肥(普通过磷酸钙,有效成分 12%)、钾肥(硫酸钾,有效成分为 50%)和有机肥(N 1.485%,P 2.418%,K 1.446%,有机质 47.671%)全部作为底肥。氮肥(尿素,有效成分为 46%)以 90 kgN·hm⁻² 作为底肥,其余氮肥进行条带追施,分两次施用(在间作区分条带撒施),12 月份一次(大蒜 3 叶期),3 月中下旬一次(大蒜鳞芽花芽分化期)。该试验田的土壤肥力背景值分别为:全氮 3.5 g·kg⁻¹、无机氮 21.2 mg·kg⁻¹、速效磷 26.8 mg·kg⁻¹、有机质 58.6 g·kg⁻¹、pH 值为 6.9。

1.3 样品采集

1.3.1 采样方法

于播种前取土壤样,依作物关键生育时期取植株样和土壤样,大蒜的关键生育时期分别为:幼苗期(越冬前)、鳞芽花芽分化期(1 月下旬)、蒜薹伸长期(2 月下旬)、鳞茎膨大期(3 月下旬)、收获期(4 月下旬)。采用 5 点取样法采集 0~20、20~40、40~60 cm 层次的混合土壤样,并采集对应植株样。新鲜土样、植株样低温冷藏迅速带回实验室分析。

1.3.2 植株养分含量

测定植株地上部含水量、氮磷养分含量。作物收获时将植株秸秆和籽粒分开测定含水量、全氮和全磷。

1.3.3 土壤测试指标

新鲜土样含水量、土壤容重、Olsen-P、NO₃⁻-N、

表 1 施肥量

Table 1 The amount of fertilizer

类别 Types	有机肥/kg·hm ⁻² Organic fertilizer	化肥/kg·hm ⁻² Available fertilizer		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
大蒜(CK)	0	0	180	150
优化施肥大蒜 Optimization of fertilization of garlic	36 000	375	180	150
习惯施肥大蒜 Habits fertilization of garlic of household	36 000	680	180	150
大蒜 蚕豆(大蒜带)Garlic Vicia fava intercropping(garlic band)	36 000	300	180	150
大蒜 蚕豆(蚕豆带)Garlic Vicia fava intercropping(Vicia fava band)	36 000	90	180	150
大蒜 蚕豆(CK)Garlic Vicia fava intercropping	0	0	180	150
蚕豆 Vicia fava	36 000	90	180	150

NH_4^+-N 、pH、全氮、全磷、有机质。

1.3.4 地下水样的采集及测试指标

采集时间为苗期和收获前,用土钻在土壤中钻100 cm深,插入直径×长度为5 cm×105 cm,周壁带孔底端用纱布封住的PVC管,周壁与土壤密封,收集地下水。测试指标:硝态氮、可溶性氮和可溶性磷。

1.3.5 田面水的采集和测定

水样采集频率为20 d采集1次,当降雨强度达到30 mm·d⁻¹时,须及时采样。分田面水和沟渠水,采用自制长柄广口塑料瓶进行5点混合方式取样,样品放入250 mL塑料瓶冷冻保存。水样测试指标:铵态氮、硝态氮、总氮、总磷、可溶性氮和可溶性磷。

1.4 测定方法

1.4.1 植株样品测定方法

植株样品的测定方法^[14]:采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,用凯氏定氮法测定植株全氮,钼黄比色法测定植株全磷。

1.4.2 土壤样品测试方法^[14]

土样含水量测定:将新鲜土壤混合均匀,称取10.00 g左右土壤放入铝盒中,105℃烘24 h,测含水量。

鲜土样铵态氮测定:0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,靛酚蓝比色法。

鲜土样硝态氮测定:0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,紫外分光光度计法。

土壤全氮测定:用凯氏定氮法测定。

土壤速效磷测定:0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法。

土壤有机质测定:重铬酸钾容量法-外加热法。

土壤pH值的测定:电位法。

1.4.3 水样测试方法^[14]

总氮:碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法。

总磷:过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法。

可溶性总氮:0.45 μm滤膜过滤,碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法。

可溶性总磷:0.45 μm滤膜过滤,过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法。

硝态氮:中速定性滤纸过滤,紫外分光光度计法。

铵态氮:中速定性滤纸过滤,靛酚蓝比色法。

1.5 计算方法

硝态氮量(kg·hm⁻²)=硝态氮浓度(mg·kg⁻¹)×土层厚度(cm)×容重(g·cm⁻³)×0.1

铵态氮含量(kg·hm⁻²)=铵态氮浓度(mg·kg⁻¹)×土层厚度(cm)×容重(g·cm⁻³)×0.1

1.6 数据处理

数据经Excel2003整理后,采用SPSS17.0统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 作物经济效益和土地当量比分析

本文依经济效益=总产值-投入成本计,投入成本包括大蒜单位面积产值、蚕豆单位面积产值、单位面积人工投入费和单位面积肥料投入费。计算分析结果(表2)显示:大蒜||蚕豆减量施氮肥较大蒜单作优化施肥经济效益减少2.6%,产量减少2.7%,较大蒜单作习惯施肥经济效益减少7.1%,产量减少7.9%;大蒜

表2 不同种植模式下作物经济效益

Table 2 Economic benefits of difference planting patterns

作物 Crops	处理 Treatments	产量 Yield/ kg·hm ⁻²	总产值 GDP/ 元(RMB)·hm ⁻²	投入成本 Input costs/ 元(RMB)·hm ⁻²	经济效益 Economic benefits/ 元(RMB)·hm ⁻²	产投比 Output ratio
大蒜 Garlic	GN0	20 190d	166 800d	19 125a	147 675d	8.7c
	GN2	28 935a	238 500a	19 125a	219 375a	12.5b
	GN1	27 390b	228 360b	19 125a	209 235b	11.9b
	GFI	26 640c	218 760c	14 960b	203 790c	14.6a
	CKI	14 940e	123 780e	13 725c	110 055e	9.0c
蚕豆 Vicia faba	FM	3555g	14 220g	4500d	9720g	3.2e
	GFI	5340f	21 360f	4500d	16 860f	4.7d
	CKI	1695h	6780h	4500d	2280h	1.5f

注:GN0 大蒜单作不施氮肥模式;GN2 大蒜单作习惯施肥模式;GN1 大蒜单作优化施肥模式;FM 蚕豆单作模式;GFI 大蒜||蚕豆模式;CKI 大蒜||蚕豆不施氮肥模式。同列数据后不同字母表示5%差异显著水平。下同。

Note:GN0:The monoculture of garlic and no N fertilizer;GN2:The monoculture of garlic and conventional fertilization;GN1:The monoculture of garlic and optimum fertilization;FM:The monoculture of vicia faba;GFI:Garlic and vicia faba intercropping;CKI:Garlic and vicia faba intercropping and no N fertilizer. Different letters in same column mean significant at 5% level. The same below.

单作优化施肥蚕豆经济效益较蚕豆单作增加 73.5%, 产量增加 50.2%。大蒜||蚕豆模式使产投比增加,且显著高于其他模式($P<0.05$)。

笔者采用土地当量比衡量该间作模式增产程度。土地当量比即同一农田中两种或两种以上作物间混作时的收益与各个作物单作时的收益之比率。在本文中,大蒜与蚕豆间作时,其土地当量比(LER)=(大蒜间作时的产量÷大蒜单作时的产量)+(蚕豆间作时的产量÷蚕豆单作时的产量)。(LER-1)×100%则是间混作的增产率^[2]。

$$\text{LER} = (26\,640 \times 2/3 \div 27\,390) + (5340 \times 1/3 \div 3555)$$

$$= 1.15$$

$$\text{增产率}(\%) = (\text{LER} - 1) \times 100\%$$

$$= (1.15 - 1) \times 100\% = 15\%$$

该间作模式 LER 为 1.15, 即表示单作时要用 1.15 hm^2 的土地才能达到间作时 1 hm^2 土地的产量。(LER-1)×100%则是间混作的增产率。本间作模式增产率为 15%。上述 LER 大于 1, 且增产率为 15%, 即表示大蒜||蚕豆间作比单作效率高。

2.2 作物养分吸收利用分析

2.2.1 不同种植模式下作物养分吸收利用状况

大蒜对氮素的吸收利用中,习惯施肥最高,但与大蒜||蚕豆间作中大蒜的氮素利用无显著差异($P>0.05$)。优化施肥明显低于上述两种模式,磷吸收量以习惯施肥最低,大蒜单作优化施肥最高,但与大蒜||蚕豆模式无显著差异($P>0.05$)(图 1)。蚕豆对氮的吸收利用中,大蒜||蚕豆中蚕豆对氮磷的吸收利用明显高于蚕豆单作(图 2)。

2.2.2 不同生育时期作物养分吸收利用状况

2.2.2.1 不同种植模式下大蒜氮素吸收利用状况

在大蒜苗期(12 月 10 日左右),大蒜单作习惯施

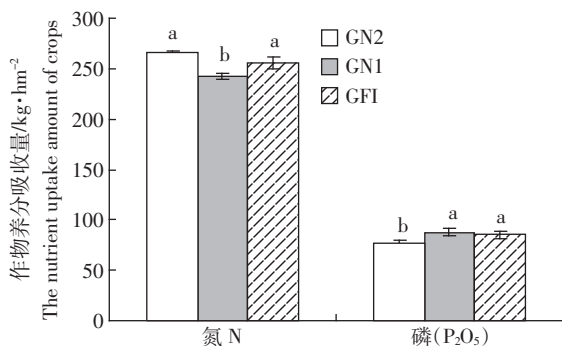


图 1 不同种植模式下大蒜养分利用状况图

Figure 1 The nutrient utilization amount of garlic in difference patterns

肥模式下大蒜秸秆对氮素的利用显著高于其他两种模式(图 3)。在鳞茎膨大期(3 月 20 日左右),大蒜||蚕豆模式中大蒜秸秆的氮吸收量显著高于其他两种模式($P<0.05$)。收获期蒜头中氮吸收利用量远高于鳞茎膨大期(图 4)。在鳞茎膨大期,大蒜单作习惯施肥氮吸收量显著高于其他两种模式,大蒜收获期三种模

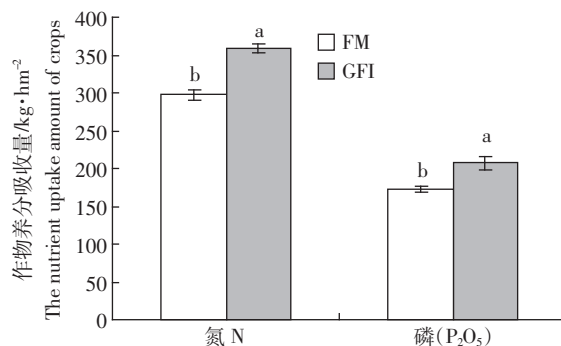


图 2 不同种植模式下蚕豆养分利用状况

Figure 2 The nutrient utilization amount of vicia fava in difference patterns

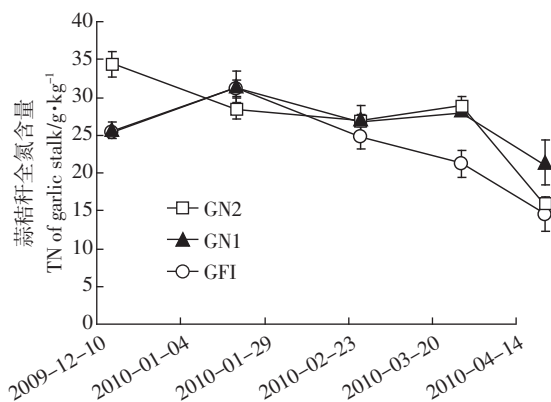


图 3 大蒜秸秆氮利用状况

Figure 3 Nitrogen uptake and utilization status of garlic straw

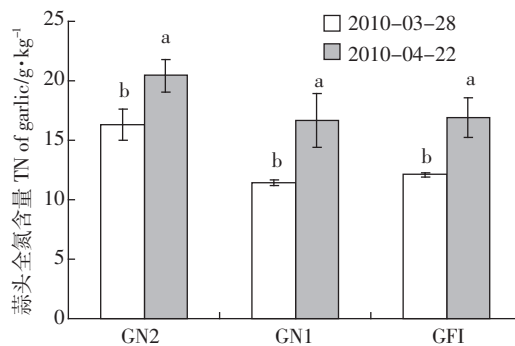


图 4 大蒜氮利用状况

Figure 4 Nitrogen uptake and utilization status of garlic

式无显著差异($P>0.05$)。

2.2.2.2 不同种植模式下大蒜磷素吸收利用状况

在蒜秸秆对磷的吸收利用中,总体的趋势先升高后降低(图5)。在前期生长中,大蒜单作优化施肥和 大蒜||蚕豆模式中磷吸收量无显著差异($P>0.05$),但二者显著高于大蒜单作习惯施肥模式中大蒜对磷的吸收利用量($P<0.05$)。在大蒜的生长后期,大蒜||蚕豆模式中大蒜对磷的吸收量显著高于其他两种单作模式($P<0.05$),说明间作模式能显著提高大蒜生育后期秸秆对磷的吸收量。在蒜头磷吸收中(图6),收获期大于鳞茎膨大期,但种植模式之间大蒜对磷的吸收利用无显著差异($P>0.05$)。

2.2.2.3 不同种植模式下蚕豆氮素吸收利用状况

蚕豆秸秆对氮的吸收总体呈下降趋势(图7),两种模式下无显著差异($P>0.05$)。蚕豆籽粒对氮的吸收呈上升趋势(图8),相同时期不同模式间无显著差异($P>0.05$)。

2.2.2.4 不同种植模式下蚕豆磷素吸收利用状况

蚕豆秸秆对磷的吸收总体呈下降趋势(图9),不

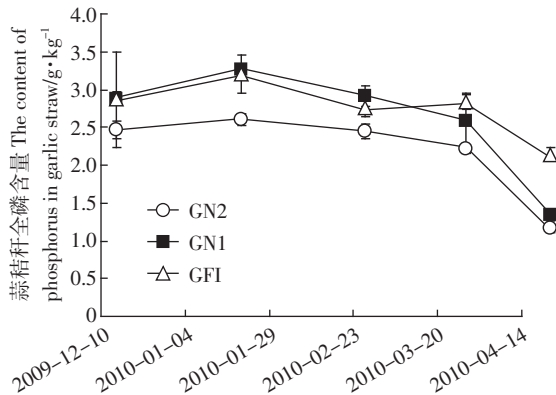


图5 大蒜秸秆磷利用状况

Figure 5 The phosphorus utilization status of garlic straw

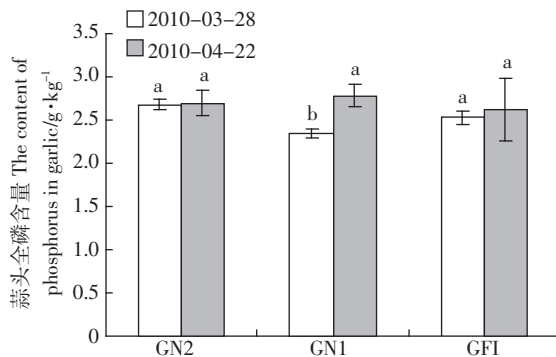


图6 大蒜磷利用状况

Figure 6 The phosphorus utilization status of garlic

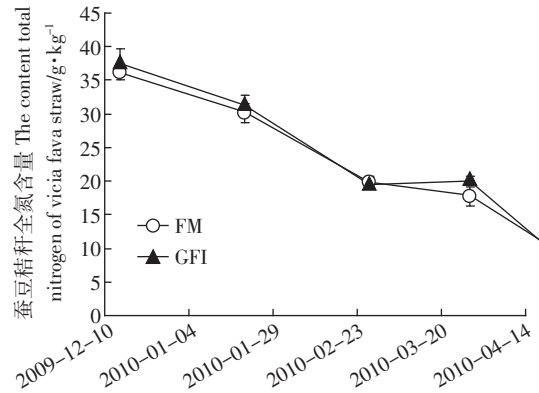


图7 蚕豆秸秆氮利用状况

Figure 7 The nitrogen utilization of vicia fava straw

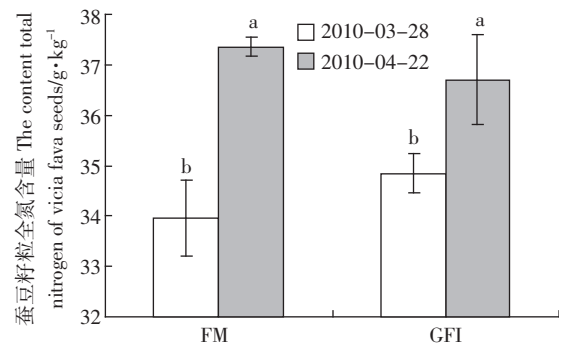


图8 蚕豆籽粒氮利用状况

Figure 8 The nitrogen utilization of vicia fava seed

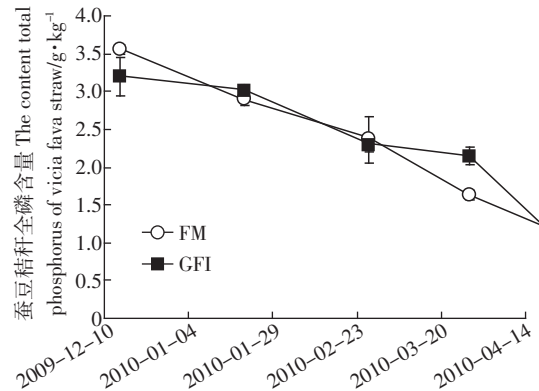


图9 蚕豆秸秆对磷利用状况

Figure 9 The phosphorus utilization of vicia fava straw

同模式间无显著差异($P>0.05$)。蚕豆籽粒对磷的吸收呈略下降趋势(图10),处理间差异不显著($P>0.05$)。

2.3 土壤养分累积特性分析

2.3.1 不同种植模式下土壤养分状况

土壤无机氮浓度反映了当时土壤供氮强度,还反映了施氮水平对农田生态环境的影响。试验表明,土

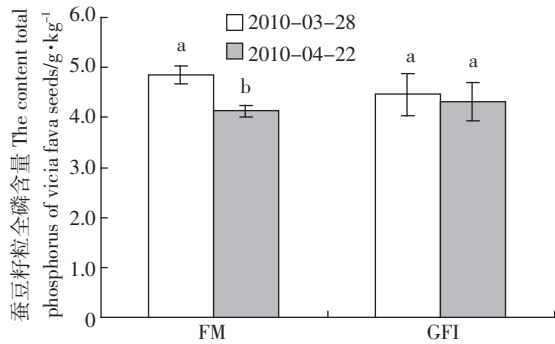


图 10 蚕豆籽粒对磷利用状况

Figure 10 The phosphorus utilization of vicia fava seed

壤中无机氮主要以硝态氮为主。从整个生育期看,施肥量显著影响土壤中硝态氮含量。

针对全生育期不同处理土壤无机氮和速效磷平均值分析结果(表 3)表明:0~20 cm 土层中,大蒜单作习惯施肥模式中土壤硝态氮含量显著高于其他模式,其次是大蒜单作优化施肥,大蒜||蚕豆的硝态氮含量低于大蒜单作优化施肥,但高于蚕豆单作模式;铵态氮含量以大蒜单作优化施肥最高,其次是大蒜单作习惯施肥,大蒜||蚕豆模式显著低于上述两种模式。在 20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层中模式间差异具有与表层土相同的规律。

表 3 不同种植模式全生育期土壤养分残留状况(mg·kg⁻¹)
Table 3 The residues of nitrogen and phosphorus in soil of different cropping patterns(mg·kg⁻¹)

土层 The depth of soil/cm	处理 Treatments	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available phosphorus
0~20	GN0	15.69f	3.95d	33.85f
	GN2	177.53a	18.92b	56.29a
	GN1	75.20b	20.30a	37.51d
	FM	35.18d	3.60e	36.89e
	GFI	70.90c	11.33c	41.31b
	CKI	21.94e	3.07f	39.15c
20~40	GN0	11.35f	2.64f	21.97b
	GN2	106.72a	8.48b	27.53a
	GN1	38.84b	10.76a	21.90c
	FM	16.96d	3.39e	21.01d
	GFI	37.80c	5.42c	21.92c
	CKI	14.31e	3.51d	19.99e
40~60	GN0	10.29f	2.67e	15.03e
	GN2	113.86a	17.04a	27.29a
	GN1	38.22b	7.51b	15.99d
	FM	22.40d	2.32f	18.35b
	GFI	33.56c	6.31c	17.31c
	CKI	11.06e	4.30d	16.05d

土壤中速效磷含量均以大蒜单作习惯施肥模式最高,其他模式在不同土层变化不一。

经总体分析,大蒜||蚕豆模式能显著($P<0.05$)降低硝态氮和铵态氮含量。对土壤中速效磷的影响不大。

2.3.2 不同模式下硝态氮相对累积量

利用公式硝态氮相对累积量(%)=(某一层硝态氮绝对累积量/整个剖面的硝态氮累积量)×100%,对计算结果进行比较分析,结果(表 4)表明:大蒜单作优化施肥和大蒜||蚕豆模式下表层硝态氮累积量显著高于其他模式,而大蒜||蚕豆模式在 20~40 cm 土层显著低于对照模式,40~60 cm 土层中显著低于大蒜单作习惯施肥和大蒜单作优化施肥等模式,说明能显著降低深层硝态氮累积量(40~60 cm)。

表 4 硝态氮累积量(%)

Table 4 Nitrate nitrogen accumulation(%)

处理 Treatments	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
GN0	42.0e	30.4a	27.6c
GN2	44.6d	26.8b	28.6b
GN1	49.4a	25.5c	25.1d
FM	47.2b	22.8d	30.0a
GFI	49.8a	26.6b	23.6e
CKI	46.4c	30.3a	23.4e

2.3.3 不同种植模式下土壤养分变化动态

在 0~20 cm 土层中(表 5),大蒜单作习惯施肥模式在整个生育期硝态氮含量均显著高于其他模式($P<0.05$),苗期和鳞芽分化期大蒜单作习惯施肥模式硝态氮含量较高,鳞茎膨大期和收获期略低,但仍高于其他模式;大蒜优化施肥模式较习惯施肥模式能显著降低硝态氮残留。在苗期,大蒜||蚕豆模式与大蒜单作优化施肥模式硝态氮含量无显著差异($P>0.05$),但在鳞芽分化期、鳞茎膨大期和收获期硝态氮含量大蒜||蚕豆模式均显著低于大蒜单作优化施肥模式,说明大蒜||蚕豆模式具有降低硝态氮残留的作用。

在 20~40 cm 土层中(表 6),大蒜单作习惯施肥模式在整个生育期硝态氮含量均显著高于其他模式($P<0.05$),苗期大蒜单作习惯施肥模式硝态氮含量显著高于其他模式,其他模式之间无显著差异($P>0.05$)。鳞芽分化期、鳞茎膨大期和收获期均以大蒜习惯施肥模式最高,大蒜优化施肥模式硝态氮含量显著低于大蒜习惯施肥模式($P<0.05$),大蒜||蚕豆模式硝态氮含量显著低于大蒜单作优化施肥模式,说明大蒜||蚕豆模式能有效降低作物生长后期硝态氮残留。

在 40~60 cm 土层中(表 7),苗期、鳞芽分化期、

表 5 不同种植模式和时期 0~20 cm 土层土壤养分残留量(mg·kg⁻¹)
Table 5 The amount of nitrogen and phosphorus in 0~20 cm layer soil of different cropping patterns with the different stages(mg·kg⁻¹)

取样时间 Sampling time	处理 Treatments	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available phosphorus
2009-12-14	GN0	18.30±2.45ijkl	2.83±1.33b	36.50±8.81b
	GN2	192.77±3.59ab	7.90±0.71b	42.80±7.04b
	GN1	43.75±6.26ghijkl	1.84±0.68b	54.53±3.63ab
	FM	19.35±3.03ijkl	3.23±1.98b	36.90±5.27b
	GFI	50.13±2.78fghijkl	2.48±0.88b	42.77±6.46b
2010-01-21	CKI	28.44±2.77ghijkl	2.10±0.80b	47.80±5.62b
	GN0	25.10±3.13hijkl	3.30±0.93b	27.63±0.58b
	GN2	236.40±7.65a	12.43±2.08ab	49.80±5.39ab
	GN1	83.86±15.52efgh	19.74±2.93ab	33.87±5.87b
	FM	73.05±7.36efghijk	2.28±0.48b	34.67±4.56b
2010-02-27	GFI	111.62±2.79def	16.02±4.18ab	43.43±0.96b
	CKI	39.56±6.36ghijkl	1.42±0.41b	34.93±8.14b
	GN0	14.59±2.04jkl	3.16±0.55b	38.90±5.53b
	GN2	174.95±3.73abc	31.05±4.43ab	103.97±21.70a
	GN1	76.33±2.47efghij	9.66±1.69ab	44.23±6.29b
2010-03-29	FM	29.58±5.60ghijkl	2.95±0.66b	47.77±2.82b
	GFI	90.99±22.32efg	7.88±0.29b	51.03±5.38ab
	CKI	14.75±1.17jkl	3.21±0.02b	40.20±6.58b
	GN0	7.82±0.37l	2.52±0.73b	39.10±6.39b
	GN2	129.68±5.46cde	27.79±3.52ab	52.47±5.70ab
2010-04-21	GN1	83.38±4.26efgh	13.51±3.53a	27.03±1.47b
	FM	23.80±8.48hijkl	4.23±1.05b	38.17±2.24b
	GFI	78.26±3.80efghi	21.84±2.27ab	38.60±2.12b
	CKI	9.54±1.55l	2.67±1.12b	41.77±7.50b
	GN0	12.63±0.30kl	7.92±2.37b	27.10±3.79b
2010-01-21	GN2	153.83±6.02bcd	15.42±2.58ab	32.40±0.70b
	GN1	88.71±5.51efg	14.77±2.09ab	27.90±1.39b
	FM	30.11±8.91ghijkl	5.29±2.90b	26.97±2.69b
	GFI	58.48±4.34fghijkl	8.44±0.49ab	30.70±4.97b
	CKI	17.39±1.38ijkl	5.95±1.25b	31.07±1.68b

鳞茎膨大期和收获期中,大蒜单作习惯施肥模式硝态氮含量均显著高于其他模式($P<0.05$),其他模式间无显著差异($P>0.05$)。

铵态氮在整个生育期、不同作物间及种植体系间无显著差异($P>0.05$)。不同作物、不同种植体系及不同生育时期土壤速效磷残留无显著差异($P>0.05$)。

2.4 不同种植模式地下水氮磷含量差异分析

不同种植模式下硝态氮和可溶性氮浓度差异显著($P<0.05$)。大蒜(习惯施肥)模式中硝态氮和可溶性氮浓度均最高,大蒜(优化施肥)其次,大蒜 || 蚕豆模式高于对照模式排第三。大蒜 || 蚕豆模式能显著降低

表 6 不同种植模式和时期 20~40 cm 土层土壤养分残留量(mg·kg⁻¹)

Table 6 The amount of nitrogen and phosphorus in 20~40 cm layer soil of different cropping patterns with the different stages(mg·kg⁻¹)

取样时间 Sampling time	处理 Treatments	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available phosphorus
2009-12-14	GN0	16.70±3.51d	2.20±1.07a	26.43±2.80abc
	GN2	106.02±4.30ab	1.98±0.55a	33.60±6.35ab
	GN1	46.76±6.98bcd	1.04±0.93a	28.604.37abc
	FM	22.54±6.26d	1.10±0.99a	25.53±6.85abc
	GFI	59.25±2.14bcd	2.00±0.10a	31.30±5.85abc
2010-01-21	CKI	17.38±5.10d	2.09±0.82a	25.97±5.80abc
	GN0	17.83±3.16d	1.55±0.83a	28.33±6.48abc
	GN2	171.24±4.69a	22.91±6.79a	39.23±3.47a
	GN1	51.61±3.74bcd	6.14±2.90a	30.50±5.48abc
	FM	24.01±4.52d	0.66±0.12a	24.57±1.92abc
2010-02-27	GFI	55.19±2.63bcd	3.94±0.65a	25.90±2.65abc
	CKI	27.57±7.30cd	0.63±0.21a	22.97±5.52abc
	GN0	11.47±0.81d	1.19±0.91a	23.93±1.95abc
	GN2	102.27±3.96abc	7.15±1.64a	25.43±3.24abc
	GN1	27.16±4.14cd	2.36±0.49a	21.20±3.60abc
2010-03-29	FM	15.28±1.73d	2.50±1.00a	21.57±0.62abc
	GFI	26.51±3.97cd	4.04±0.68a	20.90±1.88abc
	CKI	11.87±1.84d	1.30±0.65a	19.13±1.73abc
	GN0	2.83±1.16d	1.70±0.77a	21.10±1.60abc
	GN2	78.56±3.88bcd	4.29±1.61a	27.03±2.88abc
2010-04-21	GN1	40.49±3.11bcd	28.90±10.68a	18.97±2.67abc
	FM	9.66±3.60d	3.16±0.71a	20.90±0.98abc
	GFI	25.98±2.77cd	7.40±2.05a	17.57±2.09abc
	CKI	4.07±1.14d	1.90±0.51a	16.20±1.46bc
	GN0	7.94±1.08d	6.54±2.99a	10.07±0.67c
2010-01-21	GN2	75.51±2.46bcd	6.06±2.34a	12.37±2.36bc
	GN1	28.19±7.34bcd	15.37±2.77a	10.23±0.27c
	FM	13.32±0.60d	9.56±1.61a	12.47±2.15bc
	GFI	22.07±6.20d	9.72±1.10a	13.93±1.94bc
	CKI	10.68±1.70d	11.60±1.46a	15.67±0.74bc

地下水的硝态氮和可溶性氮的残留量($P<0.05$),说明间作模式可提高肥料利用率,减少土壤中养分残留,从而降低地下水中的氮含量。蚕豆单作模式地下水硝态氮浓度低于大蒜 || 蚕豆模式,位居第四,蚕豆单作模式可溶性氮浓度略低于大蒜 || 蚕豆模式,但无显著差异($P>0.05$)。地下水可溶性磷含量总体较小,不同模式变化不一(表 8)。

2.5 不同种植模式对下季农田氮磷流失的影响

2.5.1 土壤氮磷残留变化动态

不同模式总体表现为:泡田期硝态氮残留最高,且各模式之间差异较大($P<0.05$),大蒜(习惯施肥)-

表 7 不同种植模式和时期 40~60 cm 土层土壤
养分残留量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 7 The amount of nitrogen and phosphorus in 40~60 cm layer
soil of different cropping patterns with the different stages($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

取样时间 Sampling time	处理 Treatments	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available phosphorus
2009-12-14	GN0	16.77±2.71d	1.44±0.82b	20.13±5.89ab
	GN2	137.55±12.39ab	6.93±3.49ab	29.77±9.14ab
	GN1	25.60±7.44d	0.77±0.43b	17.23±1.78ab
	FM	26.48±8.23d	0.62±0.17b	19.23±2.35ab
	GFI	34.71±2.59d	2.28±1.29b	21.13±4.15ab
	CKI	16.56±2.81d	1.18±0.52b	14.70±1.84ab
2010-01-21	GN0	15.94±2.35d	0.96±0.49b	17.83±2.49ab
	GN2	159.68±17.21a	30.03±8.79a	35.87±6.28ab
	GN1	50.52±8.67cd	7.55±3.95ab	18.77±4.37ab
	FM	25.40±6.60d	1.04±0.66b	19.23±4.39ab
	GFI	49.28±4.35cd	6.56±2.81ab	20.17±1.65ab
	CKI	18.84±4.76d	0.38±0.13b	15.10±2.43ab
2010-02-27	GN0	10.47±1.92d	1.86±0.88b	14.87±3.12ab
	GN2	123.86±8.13abc	18.22±6.45ab	45.63±10.36a
	GN1	50.04±7.78cd	5.18±1.98ab	17.47±0.71ab
	FM	19.84±6.39d	1.80±1.47b	24.87±5.13ab
	GFI	39.62±5.79d	3.58±1.23b	18.60±1.86ab
	CKI	9.12±0.78d	4.55±1.59ab	24.63±3.53ab
2010-03-29	GN0	1.49±0.71d	0.66±0.23b	11.73±1.22ab
	GN2	75.20±4.31bcd	8.57±2.15ab	16.67±2.76ab
	GN1	21.08±3.32d	10.40±2.91ab	15.60±6.34ab
	FM	6.69±1.77d	0.83±0.41b	12.67±1.31ab
	GFI	15.78±4.57d	6.09±3.58ab	10.80±1.55ab
	CKI	3.61±0.55d	2.36±0.46b	14.60±1.92ab
2010-04-21	GN0	6.79±1.11d	8.44±3.61ab	10.60±1.60ab
	GN2	72.99±9.81bcd	21.47±8.83ab	8.50±0.83b
	GN1	43.88±4.11d	13.65±1.35ab	10.87±2.43ab
	FM	33.56±7.53d	7.30±2.22ab	15.77±4.54ab
	GFI	28.39±6.47	13.03±0.51ab	15.83±1.89ab
	CKI	7.14±0.45d	13.03±1.33ab	11.23±0.50ab

表 8 不同种植模式下地下水氮磷浓度差异

Table 8 The difference of nitrogen and phosphorus concentrations
in groundwater of different cropping patterns($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	硝态氮 Nitrate nitrogen	可溶性氮 Soluble nitrogen	可溶性磷 Soluble phosphorus
GN0	2.57d	3.46d	0.12c
GN2	15.01a	37.12a	0.23b
GN1	9.71b	14.77b	0.12c
FM	4.60d	11.68c	0.13c
GFI	7.12c	12.26c	0.08d
CKI	3.99d	6.43d	0.33a

水稻模式硝态氮残留量显著高于其他模式($P<0.05$),其次是大蒜(优化施肥)-水稻,大蒜 || 蚕豆-水稻模式排第三,其他模式差异不显著($P>0.05$)。在水稻生育期内硝态氮残留量均较小,且不同模式间差异不显著($P>0.05$)。在收获期不同模式汇集一点,说明水稻季有效地降低了上季作物的硝态氮残留量(图 11)。

水稻季土壤中铵态氮残留量总体高于硝态氮残留量。土壤中铵态氮残留量整个生育期基本呈下降趋势,泡田期最高,收获期最低(图 12)。不同模式之间存在差异($P<0.05$),在水稻生育进程中,大蒜单作习惯施肥-水稻模式的铵态氮残留量显著高于其他模式($P<0.05$),其次是大蒜单作优化施肥-水稻模式,大蒜 || 蚕豆-水稻模式略高于对照模式排第三,大蒜 || 蚕豆-水稻模式能显著降低水稻生育进程中铵态氮的残留。收获期,不同模式之间铵态氮残留差异不显著($P>0.05$)。

在泡田期,不同模式之间速效磷存在显著差异

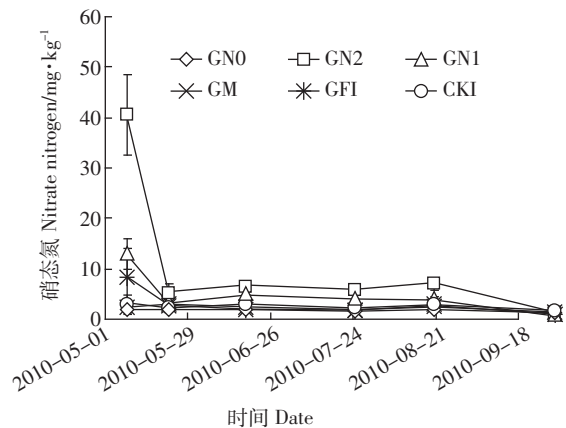


图 11 0~20 cm 土层硝态氮残留变化

Figure 11 The changes of nitrate nitrogen in 0~20 cm soil layer

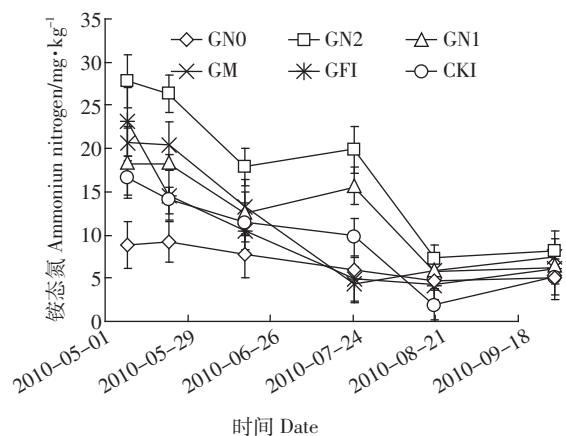


图 12 0~20 cm 土层铵态氮残留变化

Figure 12 The changes of ammonium nitrogen in 0~20 cm soil layer

($P < 0.05$), 大蒜(习惯施肥)-水稻显著高于其他模式, 其次是蚕豆-水稻模式, 大蒜 || 蚕豆(优化施肥)-水稻模式排第三, 但大蒜 || 蚕豆(优化施肥)-水稻模式与大蒜(优化施肥)-水稻模式差异不显著($P > 0.05$)。速效磷整个生育期变化较为平缓(图 13), 且不同模式高低不一, 差异不显著($P > 0.05$)。

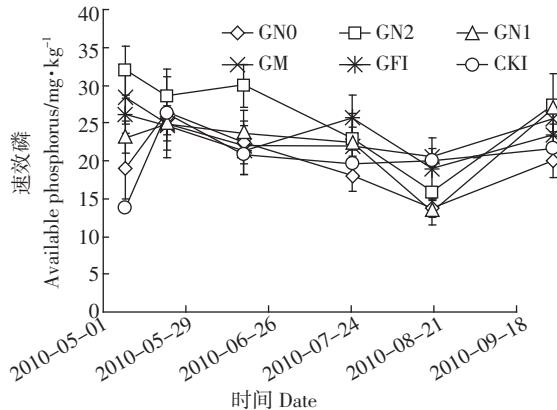


图 13 0~20 cm 表层土速效磷残留变化

Figure 13 The changes of available phosphorus in 0~20 cm soil layer

2.5.2 田面水氮磷浓度变化动态

总体分析, 不同种植模式田面水可溶性氮浓度均呈下降趋势, 在泡田期可溶性氮浓度最高, 且不同模式差异显著($P < 0.05$), 大蒜单作习惯施肥-水稻模式下可溶性氮浓度最高, 显著高于其他模式($P < 0.05$), 其次是大蒜单作优化施肥-水稻模式, 大蒜 || 蚕豆-水稻模式略高于蚕豆-水稻模式但差异不显著($P > 0.05$), 排第三, 对照模式最低。在水稻生育进程中可溶性氮浓度较低, 且变化缓和(图 14), 不同模式之间差异不显著($P > 0.05$)。

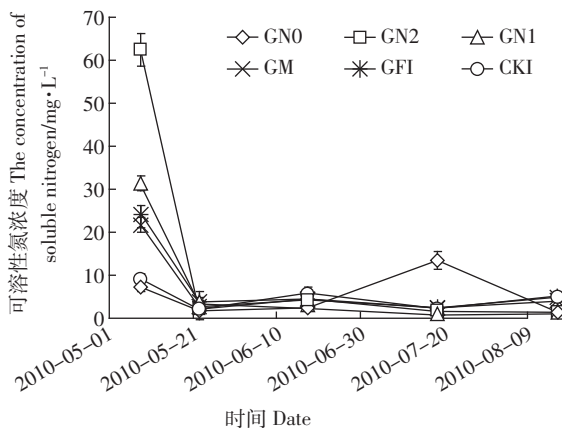


图 14 田面水可溶性氮浓度变化

Figure 14 The concentrations of soluble nitrogen changes with times in surface water

可溶性磷浓度随生育期的推移呈下降趋势, 且含量较低(图 15)。在泡田期, 大蒜 || 蚕豆-水稻模式和大蒜单作习惯施肥-水稻模式显著高于其他模式, 但二者无显著差异($P > 0.05$)。水稻幼苗期大蒜单作习惯施肥-水稻模式下可溶性磷浓度最高, 大蒜单作不施氮肥-水稻模式次之。在分蘖期、穗分化期和结实期中, 不同模式下田面水可溶性磷含量均较低, 且不同模式之间差异不显著($P > 0.05$)。

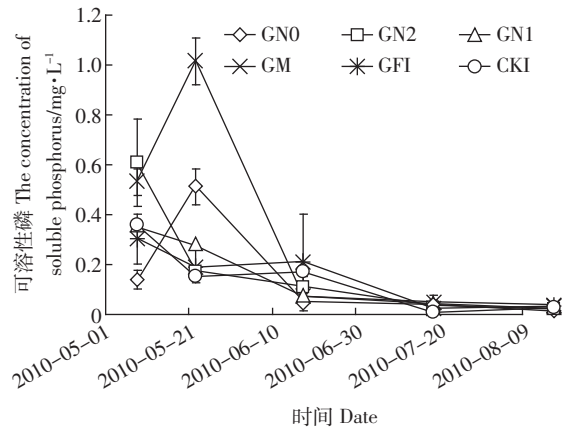


图 15 田面水可溶性磷浓度变化

Figure 15 The concentrations of soluble phosphorus changes with times in surface water

3 讨论

3.1 环境友好型种植模式降低土壤养分残留且具有产量优势原因探索

环境友好型种植模式较大蒜农户习惯施肥量降低氮盈余 45%, 磷盈余降低 1%。前人研究表明, 间作系统中豆科作物具有很好的固氮潜力^[10]。蚕豆 || 玉米间作互惠系统不但能同时提高玉米和蚕豆的产量^[15-17]。且可以促进蚕豆结瘤固氮^[18-19], 此外可减少土壤剖面无机氮残留^[20]。在豆科 || 大蒜间作系统中氮的来源有三项: 肥料氮、土壤氮和空气氮。间作显著降低了氮素的盈余量, 这与蚕豆具有固氮作用从而降低氮肥的施用量密切相关。至于降低多少施肥量最为适宜, 是今后需要补充研究的内容。由于豆科作物的固氮作用, 豆科与非豆科作物间作在间作种植方式中占绝对统治地位, 对其研究较多, 大量研究结果表明养分吸收与间作的产量优势之间存在明显的正相关关系^[21-22]。

研究发现, 大蒜 || 蚕豆模式下的土地当量比(LER)大于 1, 即表示间作比单作效率高, 增产率为 15%。具有一定产量优势。间作产量优势的产生往往是以营养优势为基础的。与蚕豆相比, 大蒜是优势组

分,其氮素吸收能力优于蚕豆,间作后二者营养吸收具有互补性,蚕豆利用生物固氮并把土壤中一部分氮节约下来供给大蒜或直接传递转移供给大蒜,减少了土壤氮素的竞争。大蒜通过降低土壤氮素刺激蚕豆根瘤固定更多氮素,使两种作物都拓宽了养分利用的空间生态位(Space niche)。从生态学角度分析^[23],在资源可利用性减少的情况下,物种的生态位宽度(Niche-breadth)应该增加,使单位面积的报酬达到最大。间作后在两种作物根系分泌物作用下,改变根际微生态条件是否是提高蚕豆固氮效率的一个机理还有待于进一步研究。

3.2 合理调整种植结构保证经济、环境效益的双赢

洱海流域农田大水漫灌现象普遍,水肥管理不配套,特别是在水旱过渡期(泡田期),串水串肥现象严重,人为排水普遍。加之田埂过低,暴雨径流带走大量氮、磷养分。在本研究中,田面水中可溶性氮、磷的浓度均在泡田期呈现最高^[24],该时期成为农田养分流失的关键时期。是控制农田面源污染的重要时期。本研究中,环境优化型种植模式能显著降低农田氮、磷流失量,但经济效益略为降低,可能与施肥量减少太多有关,环境友好型种植模式中大蒜施氮肥量仅为习惯施肥量的44%,为优化施肥量的80%。因此,探索合理的施肥量保证经济效益是后续的研究内容。

洱海流域农田种植结构日趋单一,不仅破坏了农田生物多样性,削弱了农田自身抗御病虫害灾害能力,增加了农田氮、磷污染负荷,加剧了环境风险,而且农业增收也极易受到市场波动影响^[25]。例如2005年、2006年大蒜销售价尚可维持在3~4元·kg⁻¹,而2007年、2008年受到国内外市场影响,大蒜销售价仅在1元·kg⁻¹,严重降低了农民收入,影响了农村社会经济可持续发展。合理调整种植模式有利于经济效益和环境效益的双赢。

4 结论

(1)本研究中,大蒜||蚕豆模式比单作效率高,间作的增产率为15%。大蒜||蚕豆减量施肥肥较大蒜单作优化施肥经济效益减少2.6%,产量减少2.7%;大蒜单作优化施肥蚕豆经济效益较蚕豆单作增加73.5%,产量增加50.2%。

(2)大蒜||蚕豆间作模式显著提高作物对氮的吸收利用,降低土壤硝态氮残留量和地下水的硝态氮、可溶性氮的残留量。该间作模式亦能降低下茬作物泡田期氮磷流失风险和全生育期土壤中无机氮残留。

参考文献:

- [1] 李 隆. 间作物种间促进与竞争作用研究[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 1999.
Li L. Interspecific facilitative and competitive interactions between intercropped species[D]. Beijing: China Agricultural University, 1999.
- [2] 刘广才. 不同间套作系统种间营养竞争的差异性及其机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学博士论文, 2005.
Liu G C. Difference and its mechanism of interspecific nutrition competition in different intercropping systems[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005.
- [3] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001a, 71: 123-137.
- [4] Vandermeer J. The ecology of intercropping[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1989: 68-103.
- [5] Francis C A. Multiple cropping systems[M]//. Macmillan Publishing Company, New York. Vandermeer J H. The ecology of intercropping. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [6] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113: 64-71.
- [7] Michael C Dougherty, Nareesh V Thevathasan, Andrew M Gordon, et al. Nitrate and Escherichia coli NAR analysis in tile drain effluent from a mixed tree intercrop and monocrop system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131, 77-84.
- [8] Ghosh P K, Tripathi A K, Bandyopadhyay K K, et al. Assessment of nutrient competition and nutrient requirement in soybean/sorghum intercropping system[J]. *European Journal Agronomy*, 2009, 31: 43-50.
- [9] Searle P G E, Comudom Y, Shedden D C, et al. Effect of maize+legume intercropping systems and fertilizer nitrogen on crop yields and residual nitrogen[J]. *Field Crops Research*, 1999, 4: 133-145.
- [10] 肖焱波, 李 隆, 张福锁. 小麦||蚕豆间作中的种间氮营养差异比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 396-400.
XIAO Y B, LI L, ZHANG F S. The nutritional difference between nitrogen species in the faba bean and wheat intercropping [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 396-400.
- [11] 张恩和, 张福锁, 黄 鹏. 小麦大豆间套种植对磷素在土壤中的转化及有效性的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 130-132.
ZHANG E H, ZHANG F S, HUANG P. The effectiveness of wheat and soybean planting for the transformation of phosphorus in the soil[J]. *Soil*, 2000, 31(3): 130-132.
- [12] 李 隆, 李晓林, 张福锁, 等. 小麦大豆间作条件下作物养分吸收利用对间作优势的贡献[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 140-146.
LI L, LI X L, ZHANG F S, et al. The contribution of intercropping advantages of crop nutrient absorption and utilization in wheat and soybean intercropping, [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 140-146.
- [13] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in in-

- lercroppina systems enhances crop productivity and nutrients use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248:305–312.
- [14] 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, 2001.
- LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [15] Li L, Yang S C, Li X L, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean[J]. *Plant and Soil*, 1999, 212:105–114.
- [16] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and fababean[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2003, 65:61–71.
- [17] Li L, Li S M, Zhou L L, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *PNAS*, 2007, 104(27):11192–11196.
- [18] 房增国. 豆科 || 禾本科间作的氮铁效应及对结瘤固氮的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
- Fang Z G. N and Fe effects on nodulation and nitrogen fixation of grass and legumes intercropping[D]. Beijing:China Agricultural University, 2004.
- [19] Fan Fen-liang, Zhang Fu-suo, Song Ya-na, et al. Nitrogen fixation of fababean interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283:275–286.
- [20] Li W X, Li L, Sun J H, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105:483–491.
- [21] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping:Non-nitrogen nutrition[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34:319–334.
- [22] Stern W R. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34:335–356.
- [23] 骆世明, 彭少麟. 农业生态系统分析. 种群系统的动态模拟[M]. 广州:广东科学技术出版社, 1996:259–269.
- LUO S M, PENG S L. Analysis on agro-ecosystems and the dynamic simulation population system[M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press, 1996:259–269.
- [24] 胡万里, 段宗颜, 陈拾华, 等. 云南大田不同轮作模式养分平衡现状研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(3):594–597.
- HU Wan-li, DUAN Zong-yan, CHEN Shi-hua, et al. Study on nutrient balance of different rotation models in field of Yunnan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(3):594–597.
- [25] 程磊磊, 尹昌斌, 胡万里, 等. 云南省洱海北部地区农田面源污染现状及控制的补偿政策[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4):471–474.
- CHENG Lei-lei, YIN Chang-bin, HU Wan-li, et al. Subsidy policy for agricultural nonpoint pollution control in northern area of Erhai Lake of Yunnan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(4):471–474.