

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 Jin-ling, GUO Hai-gang, NI Xi-yun, 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.

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

姚金玲¹, 郭海刚², 倪喜云³, 王 风^{1,4}, 郑宏艳¹, 杨怀钦³, 杨苏树³, 任天志^{1,5*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 大理州农业科学推广研究院, 云南 大理 671005; 4. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004; 5. 中国农业科学院科技管理局, 北京 100081)

摘 要:为了探讨洱海流域不同轮作与施肥方式对农田土壤径流氮磷损失的影响,在洱海地区利用田间小区试验,研究了7种轮作模式(大蒜-玉米、大麦-水稻、油菜-水稻、蚕豆-烤烟、大蒜-烤烟、蚕豆-水稻、大蒜-水稻)和3种施肥方式(速效肥、缓释掺混肥、不施肥)下的作物产量以及地表径流氮磷损失特征。与习惯施肥处理(CF)相比,施用缓释掺混肥(BB)能够减少肥料使用量,氮、磷肥减少量分别为9.85%~47.49%和10.81%~63.33%;同时部分作物产量有明显提高,大麦-水稻轮作下水稻产量提高19.69%,蚕豆-水稻轮作下蚕豆产量提高16.99%,大蒜-水稻轮作下大蒜产量提高24.32%,油菜-水稻轮作下油菜产量提高35.79%。7种轮作模式下施用BB肥均能降低土壤径流中氮磷损失,BB处理较CF处理土壤径流总氮和总磷流失量分别降低10.72%~28.80%和17.13%~47.87%。种植烤烟施肥量偏高,易造成土壤径流氮磷流失,总氮和总磷流失量分别达到5 907.00 g·hm⁻²和821.25 g·hm⁻²;油菜-水稻轮作易造成土壤径流磷损失,总磷流失量达到1 045.77 g·hm⁻²。研究表明,在洱海地区,施用相应作物专用BB肥能够有效降低土壤径流氮磷损失,蚕豆-水稻轮作是一种较好的减少氮磷面源污染的种植模式。

关键词:洱海;轮作模式;施肥方式;氮磷流失;农田径流

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0600-14

doi: 10.13254/j.jare.2019.0039

Influence of different crop rotations and fertilization methods on nitrogen and phosphorus runoff losses in Erhai Lake basin, China

YAO Jin-ling¹, GUO Hai-gang², NI Xi-yun³, WANG Feng^{1,4}, ZHENG Hong-yan¹, YANG Huai-qin³, YANG Su-shu³, REN Tian-zhi^{1,5*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Dali Academy of Agricultural Sciences, Dali 671005, China; 4. Dali Agro-Environmental Science Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China; 5. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study explored the influence of different crop rotations and fertilization methods on the nitrogen and phosphorus runoff losses in Erhai Lake basin. Field plot experiments were conducted to investigate the crop yields and characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses under seven different rotation systems: Garlic-corn, barley-rice, oilseed rape-rice, broad bean-tobacco, garlic-tobacco, broad bean-rice, and garlic-rice, combined with three fertilization methods: Fast-release fertilizer (CF), slow-release bulk blending fertilizer (BB), and no fertilizer (CK). Compared with CF, application of BB reduced the amount of nitrogen and phosphorus fertilizer by 9.85%~47.49% and 10.81%~63.33%, respectively, and there were obvious yield increases: 19.69% for rice in the barley-rice rotation, 16.99% for

收稿日期:2019-01-19 录用日期:2019-05-27

作者简介:姚金玲(1985—),女,黑龙江五大连池人,助理研究员,从事农业面源污染防治技术研究。E-mail:yaojl139@163.com

*通信作者:任天志 E-mail:rentianzhi@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800103);农业部财政专项

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0800103); Finance Project of Ministry of Agriculture

broad beans in the broad bean-rice rotation, 24.32% for garlic in the garlic-rice rotation, and 35.79% for oilseed rape in the oilseed rape-rice rotation. Under the seven rotation systems, the total amounts of nitrogen and phosphorus runoff losses in BB treatments were lower by 10.72%~28.80% and 17.13%~47.87%, respectively, than those in the CF treatments. Higher amounts of fertilizer applied to flue-cured tobacco resulted in increased runoff losses of nitrogen and phosphorus of $5\,907.00\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $821.25\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The oilseed rape-rice rotation resulted in high runoff loss of phosphorus ($1\,045.77\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$). Our results indicated that BB fertilizers specifically tailored for targeted crops and soils could effectively reduce the nitrogen and phosphorus runoff losses. Broad bean-rice is a good rotation system for decreasing non-point pollution from nitrogen and phosphorus in Erhai Lake basin.

Keywords: Erhai Lake; rotation systems; fertilization methods; nitrogen and phosphorus losses; agricultural runoff

随着洱海流域社会经济发展,农业、旅游业、工业等排放的氮磷污染物增加了洱海水体的污染负荷,导致洱海水质下降。在农业方面,洱海地区主要种植水稻、玉米、烤烟,且农民传统施肥以速效肥为主,面源污染问题突出,特别是夏季降雨频繁,往往造成农田氮磷养分随径流流失进入洱海水域,引起水体富营养化。研究表明,洱海流域总氮(TN)和总磷(TP)径流流失量分别为 $6.82\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为施肥总量的8.92%和16.27%^[1]。选择适宜的种植模式^[2-3]、农田和水体之间设置过渡带^[4-6]等可以减少农田氮磷流失,控制农田面源污染;而施用缓释掺混肥(BB肥)和包膜肥料能够在保证作物养分需求的条件下降低土壤氮磷流失^[1,7-8]。关于洱海流域种植模式或施肥方式对土壤径流氮磷流失的影响已有部分报道^[1-2,9];汤秋香等^[2]研究发现蚕豆和大蒜按1:3比例间作在14种间作模式中,是兼顾经济和环境效益的环境友好型种植模式;陈安强等^[9]研究发现农田沟渠出水径流氮、磷浓度从高到低依次为菜地、稻田和苗木地;在大蒜-水稻轮作模式中利用BB肥替代常规速效肥能够显著降低土壤径流氮磷流失^[1]。因此,在研究中将适合当地的种植模式和施肥方式结合起来,可能有助于进一步降低农田径流氮磷流失,但是目前缺乏这部分研究。本研究针对洱海流域多种作物轮作模式,通过田间试验,以不同种植模式(大蒜-玉米、大麦-水稻、油菜-水稻、蚕豆-烤烟、大蒜-烤烟、蚕豆-水稻、大蒜-水稻)和不同施肥方式(速效肥、缓释BB肥、不施肥)为研究对象,分析种植模式和施肥方式对作物产量和农田径流中氮磷流失的影响,为洱海流域农作物种植结构优化调整、示范推广环境友好型种植模式和施肥方式提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区域

试验地点在大理市洱源县,海拔1980 m,北纬

25°53′34″,东经100°10′27″,属典型低纬高原中亚热带西南季风气候类型,气候温和,日照充足,有干湿季之别而无四季之分;年均气温14.6℃,常年主导风向为西南风;洱海流域雨量充沛,多年平均降雨量为908.8 mm,其中85%~96%的降雨集中在5—10月^[10]。

1.2 试验设计

试验共设置7种轮作模式:大蒜-玉米、大麦-水稻、油菜-水稻、蚕豆-烤烟、大蒜-烤烟、蚕豆-水稻、大蒜-水稻。第一季作物生长期为2009年9月至2010年4月,第二季作物生长期为2010年5—9月。试验开始前试验田的基本理化性状见表1,指标测定参考本实验室常用方法^[11]。每种模式设置3个施肥处理,完全随机设计,1次重复,共建造21个田间试验小区和径流池,每个小区连接径流池,方便收集小区径流。试验小区24 m²,长6 m,宽4 m,地下0.5 m深作垫层和砖混防渗透结构。径流池容积为1.5 m³,小区与径流池不漏水、不渗水。3个施肥处理分别为习惯施肥处理(CF,按当地农民的生产习惯施肥);缓释掺混肥处理(BB,施用缓释掺混肥,即BB肥)和对照处理(CK,不施用任何肥料)。禁用高残毒农药,其他管理措施完全相同,具体施肥量见表2,施肥时间为每季作物播种前或随播种一起施入。

CF处理除施用水稻专用复合肥(氮:磷:钾=14:6:5)、烤烟专用复合肥(氮:磷:钾=10:10:15)外,其他种植模式以尿素含N 46%、普钙含P₂O₅ 16%为主,并辅助施入部分农家肥补充氮磷钾。BB肥处理按照农民习惯施入部分农家肥,剩余部分由相应作物的缓释肥提供,缓释掺混肥含N 30%、P₂O₅ 46%、K₂O 50%。缓释掺混肥为无机包膜型缓释肥料,缓释机理是土壤水分将肥料包膜中的可溶性组分溶解,膜孔被水膨润并逐渐扩大,水分进入包膜内并溶解可溶性组分形成高浓度养分溶液,包膜内水分不断增加形成水气压差,使包膜内养分不断向膜外扩散,实现肥料有效组分的缓慢释放^[12]。

表1 试验开始前不同轮作模式土壤理化性状

Table 1 Soil physicochemical properties in different rotation systems before experiments

轮作模式 Rotation	全氮 TN/mg·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	铵态氮 NH ₄ -N/mg·kg ⁻¹	全磷 TP/mg·kg ⁻¹	可溶性磷 Soluble P/mg·kg ⁻¹	有机质 OM/g·kg ⁻¹
大蒜-玉米	2 286.67	30.51	1.97	1 296.67	36.93	43.37
大麦-水稻	2 906.67	5.25	1.28	990.12	20.07	55.03
油菜-水稻	3 220.35	1.23	4.25	1 366.67	38.42	63.37
蚕豆-烤烟	2 473.33	10.94	3.25	913.33	30.90	38.33
大蒜-烤烟	3 080.13	20.91	5.69	1 066.67	35.71	47.15
蚕豆-水稻	1 696.67	7.81	2.13	1 366.67	35.23	33.83
大蒜-水稻	1 630.05	8.59	4.23	1 926.67	45.17	36.31

1.3 地表径流的采集和分析

在产生地表径流时收集径流池中径流水,测定农田地表径流量,分析径流水中全氮(TN)、硝态氮(NO₃-N)、铵态氮(NH₄-N)、全磷(TP)、可溶性磷(PO₄³⁻)含量。全氮、硝态氮、铵态氮、全磷和可溶性磷分别采用凯氏定氮法、双波长紫外分光光度法、靛酚蓝比色法、钒钼黄比色法、钼锑抗比色法测定。测定频率:干旱季节降雨产生径流及时取样,连阴雨产生径流时7~10 d 取样1次,避免产生的径流溢出径流池。每次采集完毕后,把收集的径流排干并清洗径流池。盖好遮雨板防止降水进入径流池。通过测定径流量和径流液中各组分的浓度,来计算径流液氮磷损失强度。试验期间,在水稻、玉米、烤烟生长期即第二季作物生长期能够收集到地表径流水,其他时间降雨少,未收集到地表径流水。第二季作物生长期为5—10月,降雨量分别为49、79、205、126、130、197 mm。氮(磷)径流流失率为总氮(总磷)的径流流失量与整个轮作周期内的总施氮量(总施磷量)的比值。

1.4 数据处理

采用Origin 8.6作图。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式作物产量

不同的轮作模式各处理作物产量见表3,7种不同轮作模式中施肥组CF和BB处理作物产量高于CK处理,施肥后作物产量提高。BB处理较CF处理无明显减产现象,且某些作物BB处理作物产量高于CF处理。大蒜-玉米、大麦-水稻轮作模式中BB处理较CF处理大蒜、大麦产量出现部分减产情况,减产率为1.57%、3.41%;油菜-水稻轮作模式,BB处理较CF处理油菜产量增加35.79%,产量增幅最大;其他轮作模式中BB处理较CF处理增产率为0.24%~24.32%。

表2 不同轮作模式各处理施肥情况

Table 2 Fertilization status under different treatments in different rotation systems

轮作模式 Rotation	处理 Treatments	施肥量折纯 Net input/kg·hm ⁻²			
		第一季作物 1 st crop		第二季作物 2 nd crop	
		N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
大蒜-玉米	CF	531.30	226.35	462.30	190.35
	BB	462.30	202.35	358.80	154.35
	CK	0	0	0	0
大麦-水稻	CF	320.55	189.75	55.50	48.00
	BB	298.35	177.75	36.00	9.00
	CK	0	0	0	0
油菜-水稻	CF	462.30	214.35	184.50	118.65
	BB	393.30	190.35	171.90	106.65
	CK	0	0	0	0
蚕豆-烤烟	CF	117.30	214.35	111.15	99.60
	BB	117.30	166.35	88.65	65.10
	CK	0	0	0	0
大蒜-烤烟	CF	531.30	226.35	118.65	107.10
	BB	463.80	204.75	103.65	92.10
	CK	0	0	0	0
蚕豆-水稻	CF	0	240.00	69.00	48.00
	BB	18.00	96.60	36.00	9.00
	CK	0	0	0	0
大蒜-水稻	CF	828.00	168.00	69.00	48.00
	BB	450.00	89.70	21.00	9.00
	CK	0	0	0	0

第一季作物中有3种轮作模式种植大蒜、2种轮作模式种植蚕豆;第二季作物中有4种轮作模式种植水稻、2种轮作模式种植烤烟。从表3可见,不同的种植模式中,即使相同处理同一种作物的产量也有差异,CK处理大蒜产量最低为10.59 t·hm⁻²,最高为14.48 t·hm⁻²;水稻产量最低为4.40 t·hm⁻²,最高为7.31 t·hm⁻²。施肥处理中,大蒜产量在15.42~20.56 t·

表3 不同轮作模式各处理作物产量
Table 3 Crop output under different treatments in different rotation systems

种植模式 Rotation	处理 Treatments	产量 Yield/ t·hm ⁻²		较CK组产量变化 Yield change comparing with CK/%		较CF组产量变化 Yield change comparing with CF/%	
		第一季作物	第二季作物	第一季作物	第二季作物	第一季作物	第二季作物
		1 st crop	2 nd crop	1 st crop	2 nd crop	1 st crop	2 nd crop
大蒜-玉米	CF	16.57	13.17	56.47	93.68	0	0
	BB	16.31	13.64	54.01	100.59	-1.57	3.57
	CK	10.59	6.80	0	0	-36.09	-48.37
大麦-水稻	CF	5.56	5.08	26.08	15.45	0	0
	BB	5.37	6.08	21.77	38.18	-3.41	19.69
	CK	4.41	4.40	0	0	-20.68	-13.39
油菜-水稻	CF	0.95	10.50	46.15	89.53	0	0
	BB	1.29	10.89	98.46	96.57	35.79	3.71
	CK	0.65	5.54	0	0	-31.58	-42.24
蚕豆-烤烟	CF	3.09	3.67	16.60	57.51	0	0
	BB	3.36	3.92	26.79	68.24	8.74	6.81
	CK	2.65	2.33	0	0	-14.24	-36.51
大蒜-烤烟	CF	20.51	3.35	41.64	55.81	0	0
	BB	20.56	3.63	41.99	68.84	0.24	8.36
	CK	14.48	2.15	0	0	-29.40	-35.82
蚕豆-水稻	CF	3.65	5.62	6.10	24.89	0	0
	BB	4.27	5.85	24.13	30.00	16.99	4.09
	CK	3.44	4.50	0	0	-5.75	-19.93
大蒜-水稻	CF	15.42	9.75	8.90	33.38	0	0
	BB	19.17	10.42	35.38	42.54	24.32	6.87
	CK	14.16	7.31	0	0	-8.17	-25.03

hm⁻²之间,水稻产量在 5.08~10.89 t·hm⁻²之间。引起产量差异的原因与施肥品种、施肥量和基础土壤性质相关。

2.2 不同轮作模式地表径流氮磷流失总量

不同轮作模式各处理地表径流氮磷流失总量见表4。在7种不同的轮作模式中,地表径流氮流失总量总体呈现CF>BB>CK。试验期间收集的地表径流发生在第二季作物生长期,CK处理地表径流总氮流失总量在玉米生长季为 1 541.55 g·hm⁻²,水稻生长季为 1 456.80~2 396.10 g·hm⁻²,烤烟生长季为 2 705.70~3 034.65 g·hm⁻²;7种不同的种植模式,烤烟生长季CK处理总氮流失总量在CK处理中最多;4种植水稻的轮作模式中,大蒜-水稻轮作模式总氮流失总量为 2 396.10 g·hm⁻²,在CK处理中流失量最多。CF处理中,烤烟生长季总氮流失总量最多,达到 5 907.00 g·hm⁻²,水稻生长季总氮流失总量为 2 228.10~3 523.80 g·hm⁻²,玉米生长季总氮流失总量为 2 824.50 g·hm⁻²,不同轮作模式CF处理总氮流失总量存在差异。BB处理中,大蒜-烤烟轮作模式总氮流失总量最多为 4 797.60 g·

hm⁻²,其他6种轮作模式总氮流失总量在 1 761.15~2 963.85 g·hm⁻²之间。相比CF处理,施用BB肥减少了总氮流失量。从表4计算可知,不同种植模式中BB处理相比CF处理总氮流失量减少了 10.72%~28.80%。然而,BB处理氮流失率相比CF处理并没有明显降低,在整个轮作期氮流失率为 0.31%~3.26%,CF处理氮流失率为 0.28%~3.23%。同一种种植模式,BB处理和CF处理氮流失率差异不大;不同种植模式,BB处理和CF处理氮流失率差异较大。在7种轮作模式中大蒜-水稻轮作模式径流硝态氮流失总量最低;大麦-水稻轮作模式硝态氮流失量最高。从表4计算可知,大蒜-玉米、油菜-水稻、蚕豆-烤烟和大麦-水稻轮作硝态氮占总氮比例较高,最低为 30.54%,最高为 81.40%;大蒜-烤烟、蚕豆-烤烟和大蒜-水稻轮作硝态氮占总氮比例较低,在 2.24%~16.78%之间;不同种植模式中BB处理相比CF处理硝态氮流失量减少 18.87%~58.81%。铵态氮也是总氮流失的一种形式,但是占比较低。从表4计算可知,铵态氮占总氮百分比为 0.62%~14.75%,主要集中在

表4 不同轮作模式各处理地表径流氮磷流失总量

Table 4 Loss amount of nitrogen and phosphorus in surface runoff under different treatments in different rotation systems

种植模式 Rotation	处理 Treatments	总氮 TN/g·hm ⁻²	硝态氮 NO ₃ -N/g·hm ⁻²	铵态氮 NH ₄ -N/g·hm ⁻²	总磷 TP/g·hm ⁻²	可溶性磷 Soluble P/g·hm ⁻²	氮流失率 N loss rate/%	磷流失率 P loss rate/%
大蒜-玉米	CF	2 824.50	1 584.15	22.20	541.41	395.80	0.28	0.13
	BB	2 521.65	1 171.80	15.60	344.04	185.40	0.31	0.10
	CK	1 541.55	787.35	11.10	221.64	136.35	—	—
大麦-水稻	CF	2 762.40	2 248.50	407.55	223.35	207.60	0.73	0.09
	BB	2 310.20	1 767.15	136.05	185.10	175.50	0.69	0.10
	CK	1 853.10	1 377.30	61.35	102.00	87.60	—	—
油菜-水稻	CF	2 963.55	1 605.45	282.45	1 045.77	909.72	0.46	0.31
	BB	2 393.55	1 258.65	127.80	600.47	550.85	0.42	0.20
	CK	1 936.80	938.25	79.95	330.87	289.68	—	—
蚕豆-烤烟	CF	4 162.65	2 097.30	256.05	439.38	409.25	1.82	0.14
	BB	2 963.85	1 701.45	184.65	335.85	328.49	1.44	0.15
	CK	2 705.70	826.35	65.55	208.46	202.32	—	—
大蒜-烤烟	CF	5 907.00	991.35	449.10	821.25	768.45	0.91	0.25
	BB	4 797.60	642.90	237.75	604.20	568.50	0.85	0.20
	CK	3 034.65	326.40	186.45	553.65	509.10	—	—
蚕豆-水稻	CF	2 228.10	224.70	221.70	644.40	577.95	3.23	0.22
	BB	1 761.15	92.55	166.35	345.60	256.65	3.26	0.33
	CK	1 456.80	40.35	121.35	291.75	186.00	—	—
大蒜-水稻	CF	3 523.80	163.80	387.30	500.10	466.05	0.39	0.23
	BB	2 697.60	77.85	229.05	260.70	246.45	0.57	0.26
	CK	2 396.10	53.85	169.20	219.45	199.50	—	—

在2.42%~10.99%之间;不同种植模式中BB处理相比CF处理铵态氮流失量减少24.97%~66.62%。

7种不同的轮作模式中,3个处理CF、BB和CK总磷流失量存在差异,CF处理最高,BB处理次之,CK处理最低。CK处理中,大蒜-烤烟轮作模式总磷流失量最大,为553.65 g·hm⁻²,大麦-水稻轮作模式最小,为102.00 g·hm⁻²。CF处理和BB处理中,油菜-水稻轮作总磷流失量最大,分别为1 045.77 g·hm⁻²和600.47 g·hm⁻²;大麦-水稻轮作总磷流失量最小,分别为223.35 g·hm⁻²和185.10 g·hm⁻²。BB处理磷流失率为0.10%~0.33%,CF处理为0.09%~0.31%。同一种种植模式,BB处理和CF处理磷流失率差异不大;不同种植模式,BB处理和CF处理磷流失率差异较大。可溶性磷流失量规律和总磷相似,CF处理最高,CK处理最低;不同种植模式中BB处理相比CF处理总磷流失量减少17.13%~47.87%。从表4计算可知,可溶性磷占总磷比例在53.89%~97.81%之间;7种不同的轮作模式下,3个处理中大麦-水稻轮作可溶性磷流失量最小,分别为207.60、175.50 g·hm⁻²和87.60 g·hm⁻²;CF处理中,油菜-水稻轮作模式可溶性磷流失量最大,为

909.72 g·hm⁻²;BB处理中,大蒜-烤烟轮作模式可溶性磷流失量最大,为568.50 g·hm⁻²;CK处理中,大蒜-烤烟轮作模式可溶性磷流失量最大,为509.10 g·hm⁻²。不同种植模式中BB处理相比CF处理总磷流失量减少。

2.3 不同轮作模式地表径流氮流失特征

不同轮作模式地表径流总氮流失特征如图1所示。在7种不同的轮作模式中,CF、BB和CK处理总氮流失量在不同时期存在差异,总体呈现CF>BB>CK。除大麦-水稻轮作模式,其他6种轮作模式均在施肥后第1次地表径流采集中总氮流失量较高或最高,地表径流总氮流失量总体呈现逐渐下降趋势。大麦-水稻轮作模式在最后一次地表径流采集中总氮流失量最大,其他3次采集总氮流失量较小,低于383.85 g·hm⁻²。油菜-水稻轮作模式在第一次径流采集中总氮流失量最大,5次采集基本呈现递减趋势,且第2次径流采集中总氮流失量小于第3次和第4次。大蒜-烤烟轮作模式在第1次采集中总氮流失量在所有种植模式和处理中最大。蚕豆-水稻轮作模式在4次径流采集中总氮流失量都比较小,且第3次

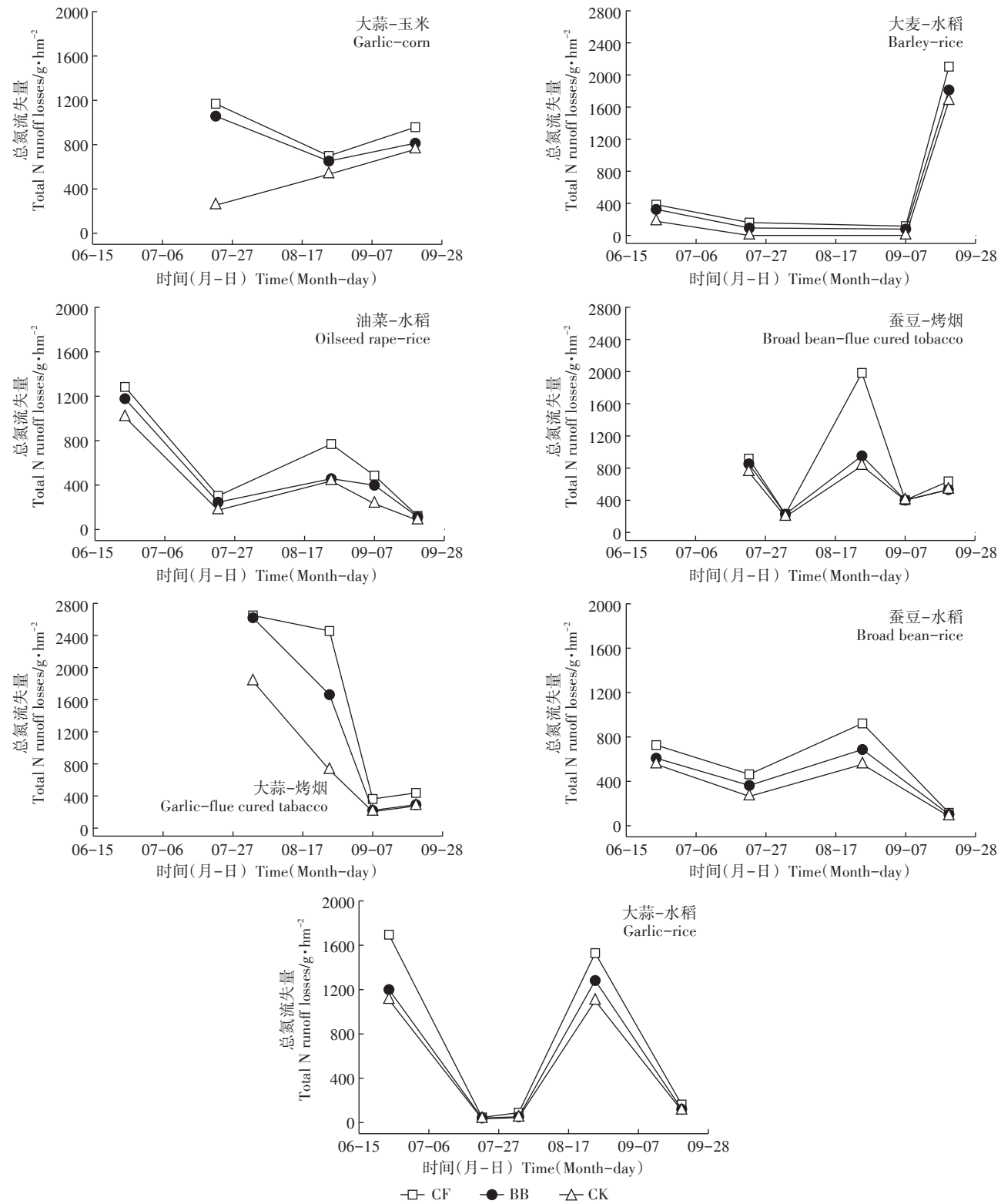


图1 不同轮作模式各处理地表径流总氮流失特征

Figure 1 Dynamics of total nitrogen loss in surface runoff under different treatments in different rotation systems

总氮流失量最大。大蒜-水稻轮作模式在5次径流采集中,第1次和第3次的总氮流失量明显较大,其他3次径流总氮流失量低于163.20 g·hm⁻²。大蒜-玉米轮

作模式3次径流采集中总氮流失量保持在252.6~1169.4 g·hm⁻²之间。蚕豆-烤烟轮作模式5次径流采集中总氮流失量在195.00~1982.85 g·hm⁻²之间波动。

不同轮作模式地表径流硝态氮流失特征如图2所示。在7种不同的轮作模式中,3个处理的硝态氮流失量在不同时期存在差异,总体呈现CF>BB>CK,地表

径流硝态氮流失规律和总氮流失规律基本一致。7种不同的轮作模式中除大麦-水稻轮作模式,其他6种轮作模式均在施肥后第1次地表径流采集中硝态

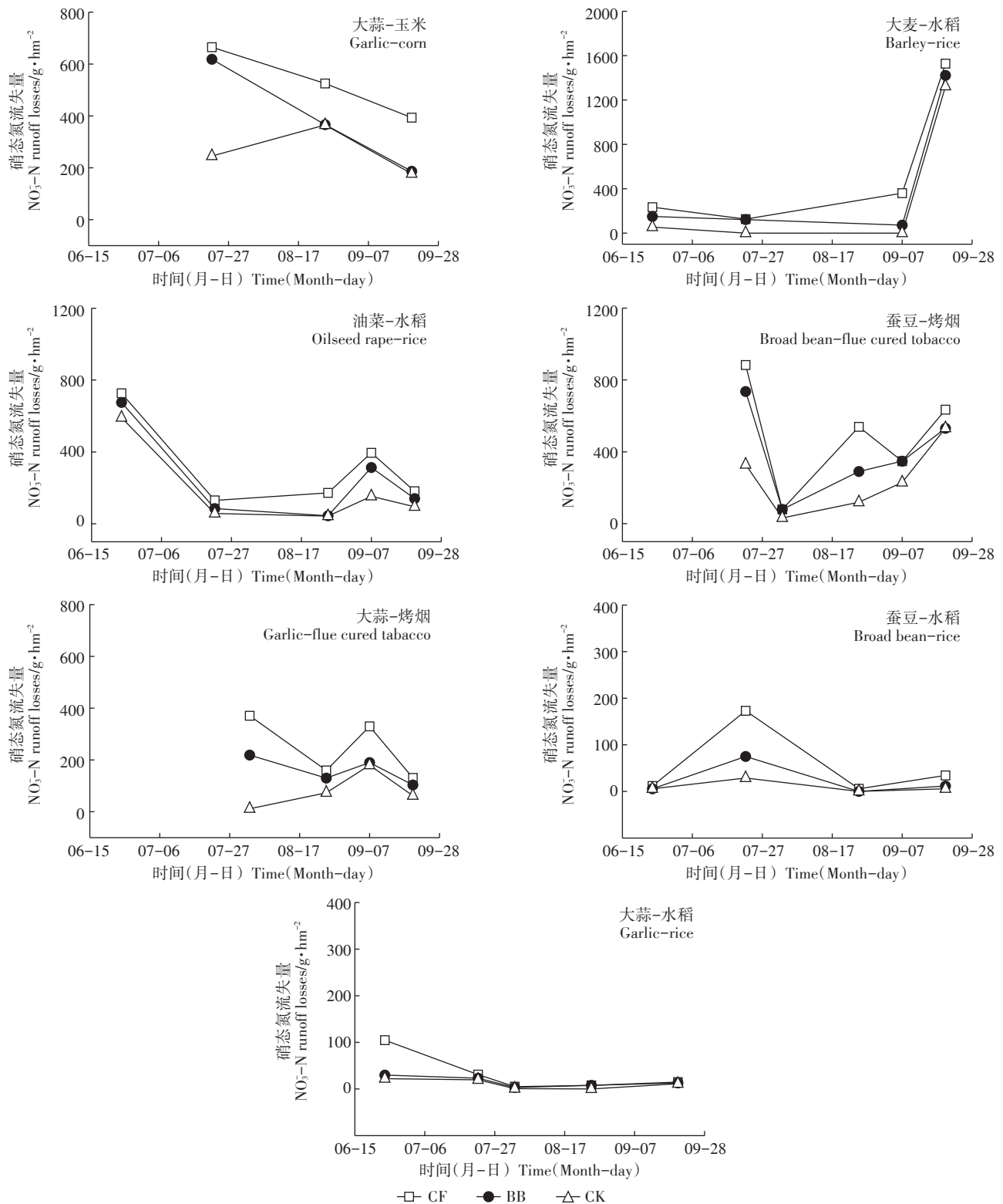


图2 不同轮作模式各处理地表径流硝态氮流失特征

Figure 2 Dynamics of nitrate nitrogen loss in surface runoff under different treatments in different rotation systems

氮流失量较高或最高,地表径流硝态氮流失量总体呈现逐渐下降趋势。大蒜-玉米轮作径流硝态氮流失量在3次采集中呈递减趋势。大麦-水稻轮作模式在最后一次地表径流采集中硝态氮流失量最大,其他3次采集硝态氮流失量较小,低于 $360.45\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。油菜-水稻轮作除第1次径流硝态氮流失量较大外,其他4次采集低于 $395.40\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。蚕豆-烤烟轮作模式第1次采集径流硝态氮流失量最大,剩余4次采集呈逐渐增加趋势。大蒜-烤烟轮作模式3个处理硝态氮流失量低于 $400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。蚕豆-水稻轮作模式,地表径流硝态氮流失量在第2次采集中最大,其他3次采集小于 $34.50\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-水稻轮作在第1次采集中CF处理径流硝态氮流失量较大,其他4次采样和处理都低于 $30.90\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

不同轮作模式地表径流铵态氮流失特征如图3所示。在7种不同的轮作模式中,径流铵态氮流失量都比较小,其中大蒜-玉米、蚕豆-烤烟和蚕豆-水稻3种轮作模式径流铵态氮流失量很小,在几次采样中变化不明显,铵态氮流失量低于 $86.55\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大麦-水稻轮作模式CF处理径流铵态氮流失量最大,BB和CK处理低于 $59.10\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。油菜-水稻轮作模式,第2次采集中径流铵态氮流失量最大,其他采集中低于 $76.5\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-烤烟轮作模式第1次采集中径流铵态氮流失量最大,其他3次采样铵态氮流失量低于 $115.95\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-水稻轮作模式第4次采集中径流铵态氮流失量最大,其他4次采样铵态氮流失量低于 $105\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.4 不同轮作模式地表径流总磷和可溶性磷流失变化特征

不同轮作模式地表径流总磷流失特征如图4所示。在7种不同的轮作模式中,径流总磷流失量较小,整体呈现 $\text{CF}>\text{BB}>\text{CK}$,每个处理总磷径流流失随采样时间波动,均不高于 $400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-玉米轮作模式CF处理最高,但是不高于 $237.11\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大麦-水稻轮作模式在4次采样中径流总磷流失量变化很小,且在第4次采集中总磷流失量最大,但是不高于 $108.75\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。油菜-水稻轮作模式各处理径流总磷流失量变化明显,在5次采样中CF和BB处理呈先降低后升高的趋势,CK处理总体呈升高趋势。蚕豆-烤烟轮作模式径流总磷流失量变化较小,不高于 $152.34\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-烤烟轮作模式径流总磷流失量整体呈下降趋势,在第1次采集中总磷流失量最大。蚕豆-水稻轮作模式径流总磷流失量总体呈现先升

高后降低的趋势。大蒜-水稻轮作模式径流总磷流失量第1次采样CF处理最大,为 $285.75\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,第4次采样总磷流失量较高,在 $120.30\sim 164.10\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,其他采集中均不高于 $82.50\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

不同轮作模式地表径流可溶性磷流失特征如图5所示。7种不同的轮作模式中径流总可溶性磷流失量较小,整体呈现 $\text{CF}>\text{BB}>\text{CK}$,可溶性磷变化趋势与总磷变化趋势基本一致,可溶性磷流失量略小于总磷流失量。

3 讨论

3.1 不同施肥方式对作物产量的影响

本研究中常规施肥和施缓释肥都能够提高作物的产量,而缓释肥处理在输入氮磷低于常规施肥处理的情况下,作物产量并没有显著降低,甚至某些处理作物产量有一定程度的增加。产生上述结果主要有两方面原因,一方面对于中高地力的土壤减少20%~30%的肥料并不会显著影响作物的产量,部分减量施肥既能保证作物产量,也能提高肥料农学效率^[13-16];另一方面,施用缓释肥,肥料的释放速率和作物生长对营养的需求相匹配,能够满足作物生长中后期对肥料的需求,作物吸收养分较为平缓,减少了养分流失,提高了肥料的利用效率,从而增加作物产量^[16-18]。但是,肥料的施用量不能过低,王道中等^[15]研究发现对于低肥力的土壤,减少30%的肥料,作物产量明显降低,因此减量施肥一定要因地制宜。

土壤的基础地力也是影响作物产量的重要因素。在本研究的7种轮作模式中土壤的基础生产力即CK处理同一作物的产量不同,在4种植植水稻的模式中,CK处理水稻产量为 $4.40\sim 7.31\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大蒜-水稻轮作模式由于第一季作物大蒜期施入的肥料量最大(考虑本试验田基础土壤总氮量较低,见表1),可能残留在土壤中的养分较多,使第二季作物种植前土壤的基础地力较高,施入少量的氮磷肥料即能获得较高的产量;油菜-水稻模式由于第一季作物油菜生长期施入的肥料比大蒜-水稻模式大蒜生长期少,水稻种植前土壤的基础地力较低,需要施入较多的肥料,才能获得较高产量;大蒜-水稻、油菜-水稻两种模式相比,油菜-水稻模式水稻季CF和BB处理氮肥投入量分别是大蒜-水稻模式水稻季的2.67、8.19倍,但是作物产量无明显差别。这是因为这两种轮作模式相比,大蒜-水稻模式大蒜季CF和BB处理氮肥投入量分别是油菜-水稻模式油菜季的1.79、1.14倍,导致大蒜-

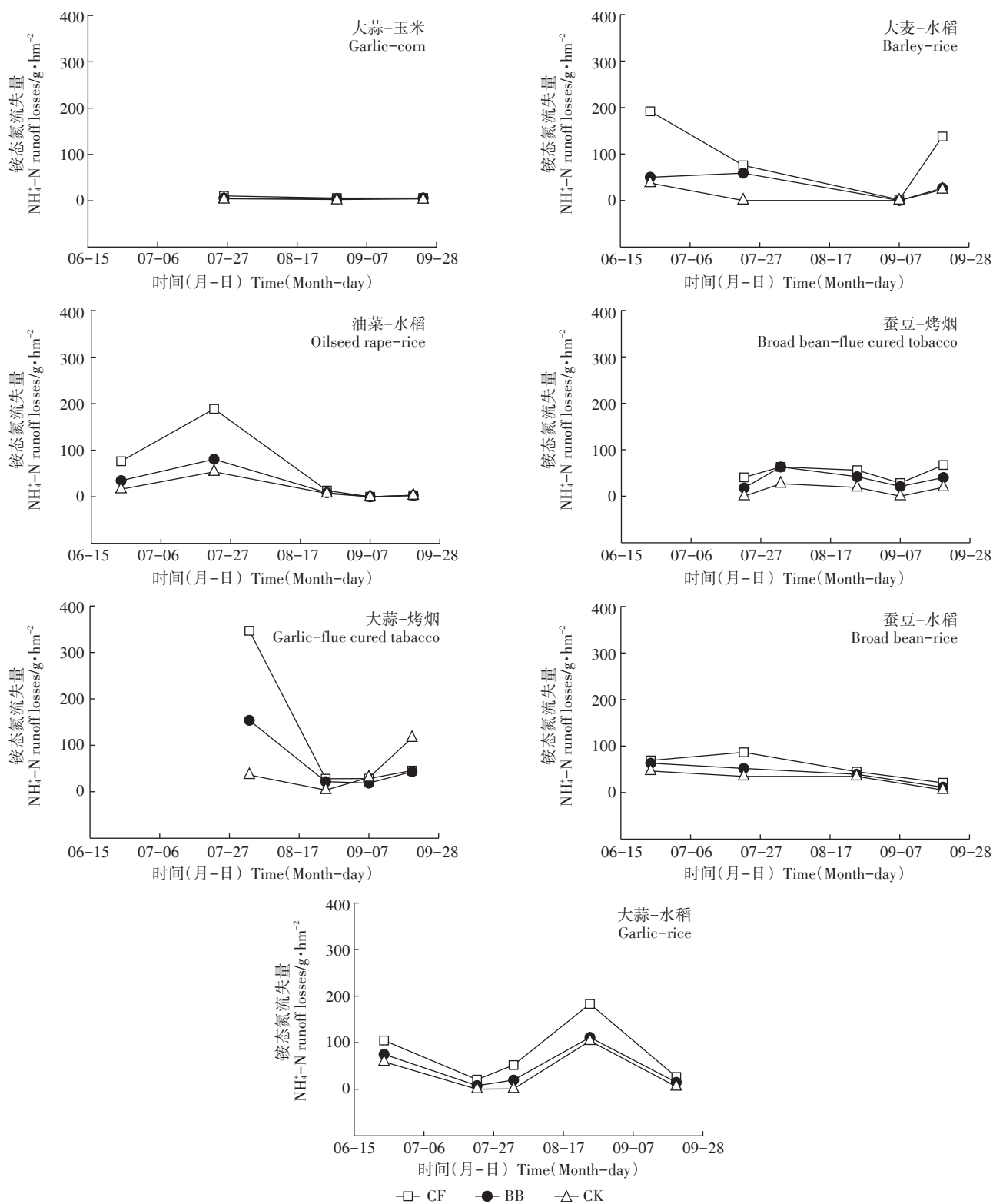


图3 不同轮作模式各处理地表径流铵态氮流失特征

Figure 3 Dynamics of ammonium nitrogen loss in surface runoff under different treatments in different rotation systems

水稻模式在水稻植前土壤中残留的营养较高。这说明第一季作物施入的肥料会部分转入第二季供作物使用。因此,在施肥过程中要充分考虑土壤的基础地

力^[19],平衡一个轮作期两种作物的施肥量,采用测土配方施肥,科学投入肥料,才能在保证作物产量的前提下提高肥料的利用效率。而采用缓释肥料可以减

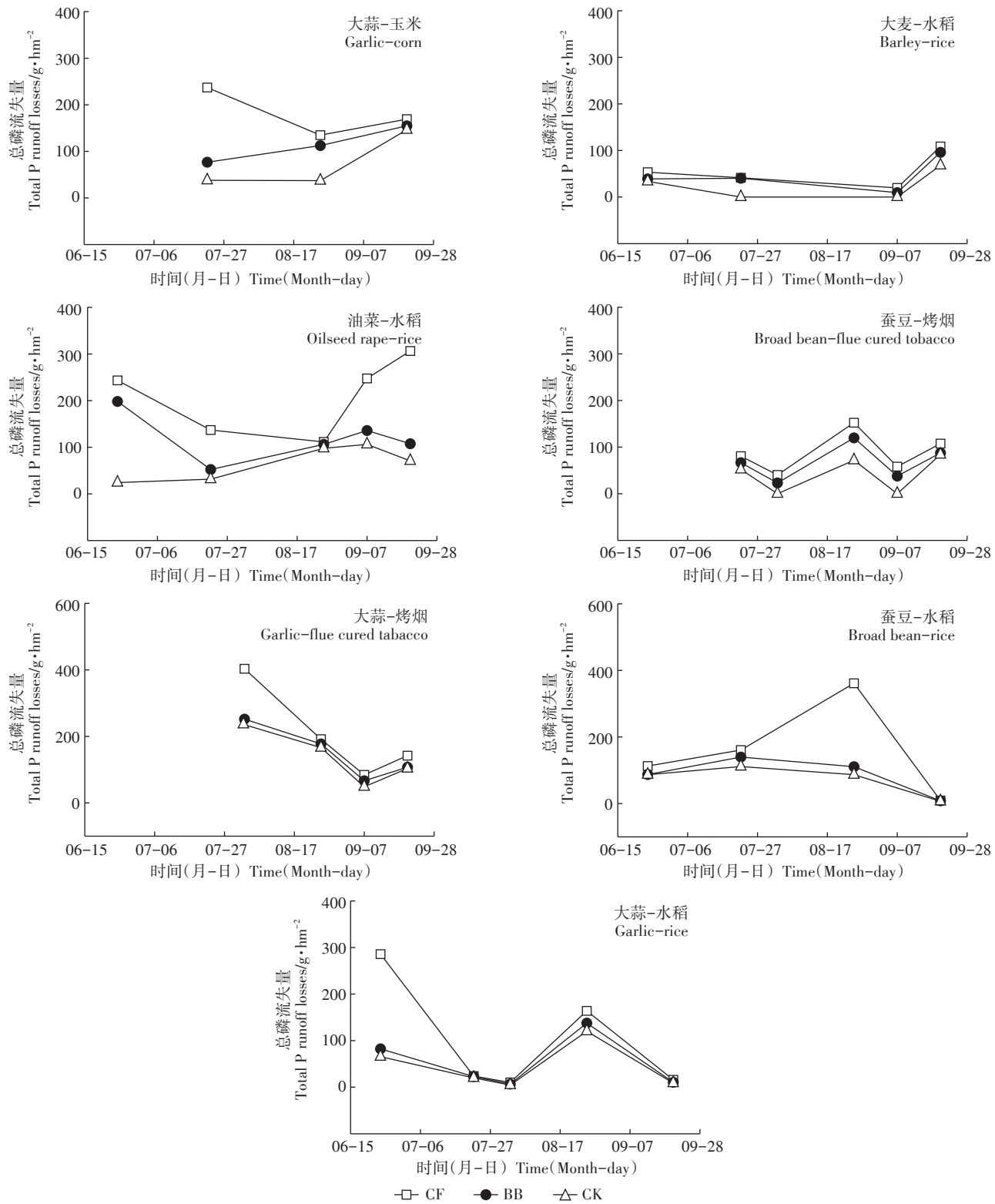


图4 不同轮作模式各处理地表径流总磷流失特征

Figure 4 Dynamics of total phosphorus loss in surface runoff under different treatments in different rotation systems

少肥料输入量,提高作物的肥料利用效率^[1,16-17],施肥类型结合土壤地力,从而保证了作物产量和肥料的高效利用。

3.2 不同轮作模式和施肥方式对径流氮磷流失的影响
地表径流是土壤氮磷养分流失的主要途径,而影响土壤径流氮磷流失的因素很多,包括土壤质地、降

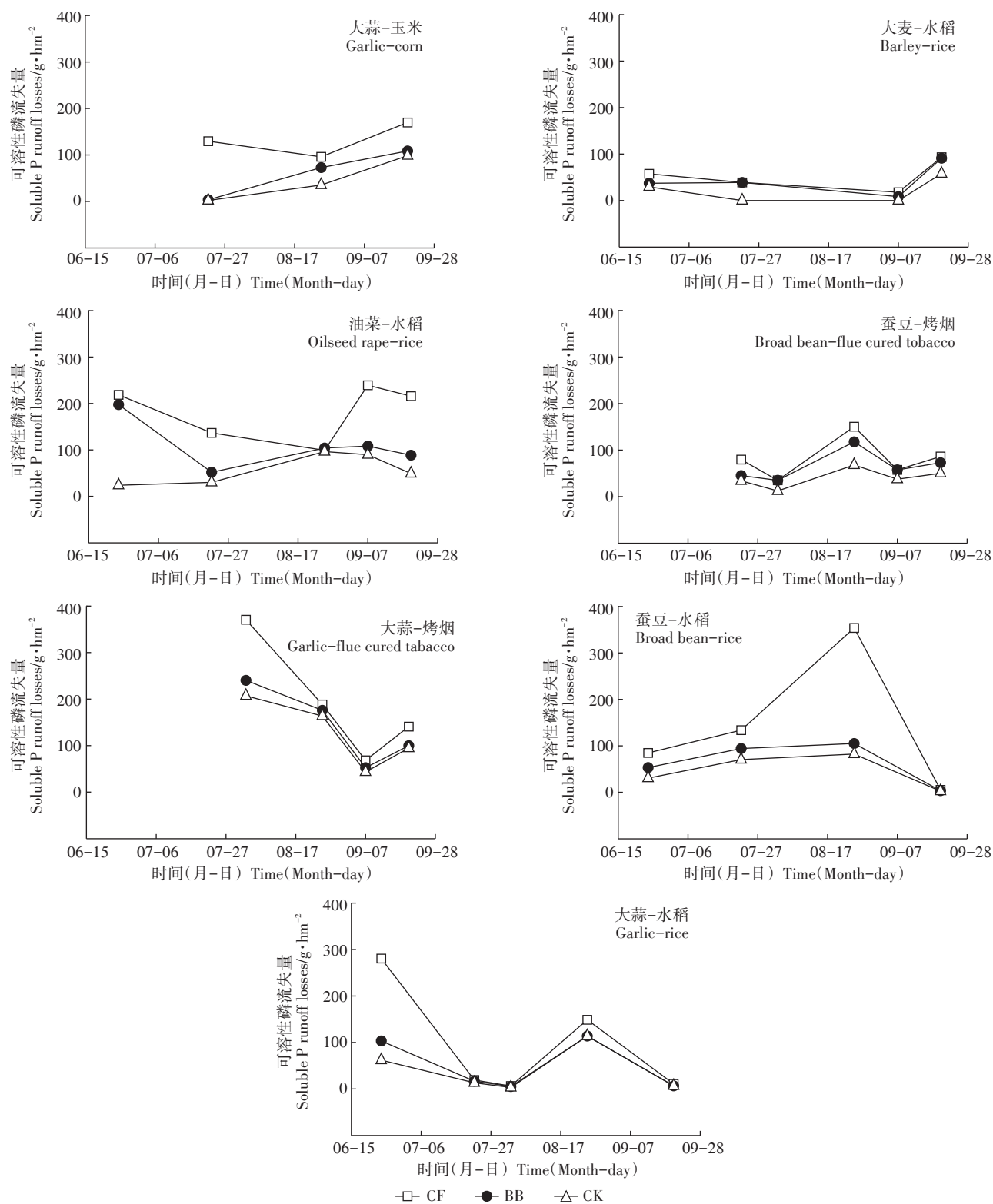


图5 不同轮作模式各处理地表径流可溶性磷流失特征

Figure 5 Dynamics of soluble phosphorus loss in surface runoff under different treatments in different rotation systems

水量、灌水量、施肥类型、施肥量、作物类型等^[9, 18, 20-24]。本研究中,不同处理间土壤径流氮磷流失与土壤质地、施肥类型、施肥量和轮作模式密切相关。大蒜-

烤烟轮作模式 CK、BB 和 CF 处理分别和其他轮作模式对应的处理相比,土壤径流中总氮的流失量最大,主要因素可能在于土壤的质地、基础地力和烤烟的产

量。大蒜-烤烟轮作模式CK处理径流总氮流失量相比其他模式CK处理大,这说明种植大蒜-烤烟的土壤含有大量的氮磷营养成分,土壤的养分本底值高。此外,烤烟的产量与其他作物相比偏低,烤烟对养分的需求量较低,而施肥量属于高水平^[25],导致土壤径流氮磷流失偏高。玉米季虽然施肥量最高,但是土壤径流氮磷流失反而偏低,这是因为玉米产量也是最高的,玉米对养分的需求高,从而减少了土壤养分的流失。因此,施肥要结合土壤基础地力和作物对养分的需求,合理配施,避免作物来不及消耗,导致土壤养分流失。

对于不同轮作模式,李学艳等^[26]研究草地、苹果、青花和马铃薯套种玉米四种轮作模式,结果表明马铃薯套种玉米总氮流失量居于中间,总磷流失量最小;种植绿肥作物三叶草、黑麦草、苕子等可以降低径流氮磷流失20.6%~52.8%^[23]。本研究中蚕豆-水稻轮作模式径流总氮流失最小,总磷流失处于中间;大麦-水稻轮作模式径流总磷流失量最小,总氮流失量处于中间。出现这种结果的原因一方面与轮作模式有关,另一方面与施肥量有关。大麦-水稻轮作模式大麦期施用的肥料量高于蚕豆-水稻,因此在保证作物正常生长的情况下应尽量减少施肥量。

叶玉适等^[27]研究水肥耦合对杭州稻田氮磷迁移影响发现,溶解性氮是降雨径流流失氮素的主要形态,其中硝态氮约占40%~80%,铵态氮约占3.4%~27%;而本研究径流中硝态氮占总氮比例集中在10.08%~81.37%,铵态氮占总氮比例集中在2.42%~14.76%,与其研究结果一致。本研究径流中溶解性磷占总磷比例为53.89%~97.81%,这与金春玲等^[20]研究洱海地区溶解性磷占总磷63.01%的结果相似。宁建凤等^[28]研究广东稻田磷径流负荷发现,常规施肥条件下总磷年径流负荷为1.10~6.68 kg·hm⁻²,而本研究中常规施肥总磷流失量为223.35~1 045.77 g·hm⁻²,相比宁建凤等研究结果偏低,主要原因在于本研究径流产生在第二季作物,第一季作物不产生径流,而宁建凤等研究的是双季稻,第一季水稻总磷流失负荷远高于第二季水稻。本试验的BB处理和CF处理氮流失率和磷流失率在同一种轮作模式下差异不大,主要原因在于BB处理的肥料施用量较CF处理的肥料施用量低,导致流失率没有总量上差异明显。不同种植模式下,氮流失率和磷流失率差异比较大,可能由于不同模式下总的施肥量与种植作物类型存在差异,而且不同作物产量差异较大,对土壤养分的消耗必然存在

差异。

耿飏等^[29]调查发现过度施用化肥和少施有机肥是洱海流域水质富营养化主要原因,而本研究中使用缓释肥降低了肥料输入量,提高了肥料利用效率,有助于缓解洱海水域水质富营养化。施用缓释肥土壤径流氮磷流失小,这是由缓释肥释放的特点所决定,其在田间条件下释放高峰期与作物需肥高峰期相吻合,氮磷养分释放速率较慢,满足了作物生育后期对养分的需求,减少了氮磷养分的径流流失^[8,18,21]。本研究中径流总氮和总磷流失量BB处理比CF处理分别降低了10.72%~28.80%和17.13%~47.87%;焉莉等^[21]发现与常规施肥相比,缓释肥处理可以明显降低总氮流失17.60%,这与本研究的结果一致。

除施用缓释肥降低径流氮磷流失外,其他施肥措施如包膜尿素^[8]、施用控释肥^[18]、秸秆还田^[21]、有机物料替代部分无机肥^[30]、添加生物炭^[31]等都能够有效降低径流氮磷流失。这是因为施用有机肥可以改善土壤的团聚结构,秸秆还田能够增加土壤孔隙度,从而降低土壤径流氮磷损失^[32]。同时,在施肥管理上采用穴施、区外设置植草缓冲带和秸秆覆盖也能有效减少氮磷径流流失^[24]。因此,在今后的研究中将缓释肥和其他施肥措施结合有助于进一步降低土壤径流氮磷流失。

4 结论

(1)在7种不同的轮作模式中施肥组CF和BB处理作物产量高于CK处理;与CF处理相比,施用BB肥降低了肥料输入量,但是无明显减产现象,且某些作物BB处理产量高于CF处理。

(2)在洱海地区蚕豆-水稻种植模式施肥量较低,雨季土壤径流氮磷流失最小,总氮、总磷径流流失量分别为2 228.10 g·hm⁻²和644.40 g·hm⁻²;大蒜-烤烟种植模式施肥量偏高,易造成雨季土壤径流氮磷流失,总氮、总磷径流流失量最大,分别为5 907.00 g·hm⁻²和821.25 g·hm⁻²。

(3)与传统施肥CF处理相比,施用BB肥土壤径流氮磷损失有所降低,且肥料输入量低,并且能够保证作物产量,因此,在洱海流域采用BB肥种植蚕豆-水稻是一种良好的种植模式。

参考文献:

- [1] 姚金玲, 张克强, 郭海刚, 等. 不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):

- 2287-2296.
- YAO Jin-ling, ZHANG Ke-qiang, GUO Hai-gang, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses during rice-garlic rotation in Erhai Lake basin under different fertilization methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2287-2296.
- [2] 汤秋香, 刘宏斌, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区环境友好型种植模式筛选[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12):2375-2383.
- TANG Qiu-xiang, LIU Hong-bin, LEI Bao-kun, et al. Screening of environment-friendly cropping mode in the northern region of Erhai Lake[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12):2375-2383.
- [3] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地地表径流氮磷流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6):550-558.
- LIU Fang-yi, XIA Ying, HUANG Min, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges reservoir area of Hubei Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6):550-558.
- [4] 王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3):291-298.
- WANG Xiao-ling, LI Jian-sheng, LI Song-min, et al. Study on the interception effects of ecological pond on nitrogen and phosphorus in the rainfall runoff of rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(3):291-298.
- [5] 张闻涛. 洱海缓冲带对农业径流中氮磷的去除效果及机理分析[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- ZHANG Wen-tao. Effect and mechanism of nitrogen and phosphorus removal from agricultural runoff by the buffer zone of Erhai Lake[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [6] 余冬立, 阿力木·阿布来提, 韩笑, 等. 不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10):3425-3432.
- SHE Dong-li, ALIMU A Bulaiti, HAN Xiao, et al. Effects of vegetative filter strip on overland flow nitrogen and phosphorus intercepting under different inflow conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10):3425-3432.
- [7] 王睿, 刘汝亮, 赵天成, 等. 缓-控释肥侧条施用对水稻产量与农学性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(6):1-5.
- WANG Rui, LIU Ru-liang, ZHAO Tian-cheng, et al. Effect of side bar application of slow-controlled release fertilizers on rice yield and agronomic characters[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(6):1-5.
- [8] 斯圆丽, 朱少威, 王季丰, 等. 施用包膜尿素对水稻生长和氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018(3):48-53.
- SI Yuan-li, ZHU Shao-wei, WANG Ji-feng, et al. Effects of coated urea application on rice growth and runoff losses of nitrogen and phosphorus from paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018(3):48-53.
- [9] 陈安强, 雷宝坤, 刘宏斌, 等. 洱海近岸不同种植类型农田沟渠径流氮磷流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(8):697-705.
- CHEN An-qiang, LEI Bao-kun, LIU Hong-bin, et al. Characteristics of N and P losses from ditch runoff in farmlands different in planting patterns offshore of Lake Erhai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8):697-705.
- [10] 黄慧君, 王永平, 李庆红. 洱海流域近50年气候变化特征及其对洱海水资源的影响[J]. 气象, 2013, 39(4):436-442.
- HUANG Hui-jun, WANG Yong-ping, LI Qing-hong. Climatic characteristics over Erhai Lake basin in the late 50 years and the impacts on water resources of Erhai Lake[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(4):436-442.
- [11] 郭海刚. 华北地区冬小麦牛场废水灌溉模式研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2012.
- GUO Hai-gang. Dairy wastewater irrigation pattern of winter wheat in north China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [12] 刘书起, 甄英肖, 董建普. 无机包膜肥料的制备及电导法对其养分释放率的测定[J]. 现代农业科技, 2010(19):241-242.
- LIU Shu-qi, ZHEN Ying-xiao, DONG Jian-pu. The preparation of inorganic coated fertilizer and determination of nutrient releasing rate by electric conductivity[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(19):241-242.
- [13] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11):1626-1634.
- ZHU Jian, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effects of straw-returning on double cropping rice yield and runoff loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11):1626-1634.
- [14] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- LI Juan. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2016.
- [15] 王道中, 张成军, 郭熙盛. 减量施肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1):161-165.
- WANG Dao-zhong, ZHANG Cheng-jun, GUO Xi-sheng. Effects of lower fertilizer on rice growth and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1):161-165.
- [16] 吕亚敏. 化肥减施对稻田氮磷流失及水稻产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- LÜ Ya-min. Effects of fertilization reduction on rice yield and nitrogen and phosphorus losses from paddy field[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2018.
- [17] 钱银飞, 谢江, 陈先茂, 等. 节肥控污施肥模式对双季稻田氮磷径流损失的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(11):40-44.
- QIAN Yin-fei, XIE Jiang, CHEN Xian-mao, et al. Effects of optimal fertilization practice on nitrogen and phosphorus runoff loss in double-cropping paddy rice field[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(11):40-44.
- [18] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 等. 不同类型肥料对东北地区稻田氮磷损失和水稻产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10):63-70.
- LIU Ru-liang, WANG Fang, WANG Kai-jun, et al. Effects of fertilizers on nitrogen and phosphorus leaching and yield of rice in northeast

- China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10):63-70.
- [19] 陈 乾. 菜地环保施肥及其径流氮磷减排技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- CHEN Qian. Environmental friendly fertilization and runoff N/P emission reduction technology in vegetable fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [20] 金春玲, 高思佳, 叶碧碧, 等. 洱海西部雨季地表径流氮磷污染特征及受土地利用类型的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1891-1899.
- JIN Chun-ling, GAO Si-jia, YE Bi-bi, et al. Nitrogen and phosphorus pollution characteristics of surface runoff and the impacts of land use on runoff water quality in rainy season in the western Erhai Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11): 1891-1899.
- [21] 焉 莉, 冯国忠, 卢文喜, 等. 干旱年际施肥方式对径流淋溶氮磷流失的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(9):32-35.
- YAN Li, FENG Guo-zhong, LU Wen-xi, et al. The effect of fertilization method on nitrogen and phosphorus loss by runoff and leaching in dry years[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(9):32-35.
- [22] 陈秋会, 席运官, 王 磊, 等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1550-1558.
- CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan, WANG Lei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farm-land in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1550-1558.
- [23] 李太魁, 张香凝, 寇长林, 等. 丹江口库区坡耕地柑橘园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2):94-98.
- LI Tai-kui, ZHANG Xiang-ning, KOU Chang-lin, et al. Effects of green manure planting on nitrogen and phosphorus losses along with runoff from citrus orchards on sloping land in the Danjiangkou reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 94-98.
- [24] 廖 敏, 叶照金, 黄 宇, 等. 长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7342-7350.
- LIAO Min, YE Zhao-jin, HUANG Yu, et al. Influence of different fertilization management modes on phosphorus loss in run-off from nursery land in the catchment area of Hexi reservoir in Changxing County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21):7342-7350.
- [25] 汤 宏, 曾掌权, 李向阳, 等. 水磷耦合烤烟养分吸收分配规律研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2):294-302.
- TANG Hong, ZENG Zhang-quan, LI Xiang-yang, et al. Studies on nutrients uptake and distribution of flue-cured tobacco with water-phosphorus coupling[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2):294-302.
- [26] 李学艳, 全 勇, 龚声信, 等. 昭通渔洞水库流域不同作物种植模式对地表径流、渗漏水中氮磷流失量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7):1481-1484.
- LI Xue-yan, QUAN Yong, GONG Sheng-xin, et al. Effects of different crop planting patterns on nitrogen and phosphorus loss in surface runoff and leakage water in Yudong reservoir in Zhaotong[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(7):1481-1484.
- [27] 叶玉适, 梁新强, 金 熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 105-112.
- YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):105-112.
- [28] 宁建凤, 姚建武, 艾绍英, 等. 广东典型稻田系统磷素径流流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3):257-268.
- NING Jian-feng, YAO Jian-wu, AI Shao-ying, et al. Characteristics of phosphorus runoff losses from typical paddy fields in Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3):257-268.
- [29] 耿 飏, 罗良国. 农户减少化肥用量和采用有机肥的意愿研究——基于洱海流域上游面源污染防治的视角[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4):74-82.
- GENG Biao, LUO Liang-guo. Farmers' willingness to reduce fertilizer input and adopt organic fertilizer base on the perspective of non-point source pollution prevention and control in the upper reaches of Erhai water shed[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(4):74-82.
- [30] 姜利红, 谭力彰, 田 昌, 等. 不同施肥对双季稻田径流氮磷流失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):33-38.
- JIANG Li-hong, TAN Li-zhang, TIAN Chang, et al. Effects of fertilizer applications on runoff nitrogen and phosphorus loss in double cropping paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):33-38.
- [31] 李 茵. 生物质炭及减量施肥对茶园地表径流氮磷流失和土壤培肥效应的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- LI Hui. Effects of biomass and reduced fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in the surface runoff and soil fertility effect of tea garden [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [32] 高林林. 典型紫色土坡耕地不同施肥处理径流的氮素流失特征研究[D]. 南充:西华师范大学, 2018.
- GAO Lin-lin. Study on nitrogen loss characteristics of runoff in typical purple soil slope[D]. Nanchong: China West Normal University, 2018.