

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.

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

姚金玲¹, 张克强^{1,3}, 郭海刚^{1,2}, 王 风^{1,3}, 张贵龙¹, 任天志^{1*}

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 3.农业部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004)

摘 要:为寻找洱海流域水稻-大蒜轮作农田的合理施肥方式,以减少氮磷径流损失,研究了不同施肥方式对水稻-大蒜产量和地表径流氮磷损失的影响。结果表明:在等量氮肥输入的条件下,与习惯施肥(CF)相比,50%有机-无机配施(50%O)、100%缓释掺混肥(100%BB)处理下水稻-大蒜产量无显著差异,而100%有机肥处理(100%O)水稻-大蒜产量显著降低。CF和100%BB处理水稻氮(磷)肥农学利用效率高于其他处理,CF和50%O处理大蒜氮肥农学利用效率显著高于其他处理,100%BB处理大蒜磷肥农学利用效率最高。与CF相比,水稻季100%BB处理径流总氮、总磷流失量和氮、磷损失率最低,总氮流失量和氮损失率分别降低55.34%和86.95%,总磷流失量和磷损失率分别降低70.14%和89.07%。径流中硝态氮和铵态氮流失量之和占总氮流失量的13.19%~21.69%,磷流失以可溶态速效磷为主,占总磷流失量的83.25%~90.93%。研究表明,100%BB处理方式能够在保证作物产量的同时显著降低氮磷径流损失,是较为理想的施肥方式。

关键词:洱海;施肥方式;水稻-大蒜轮作;氮磷削减

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)11-2287-10 **doi:**10.11654/jaes.2017-0537

Nitrogen and phosphorus runoff losses during rice-garlic rotation in Erhai Lake basin under different fertilization methods

YAO Jin-ling¹, ZHANG Ke-qiang^{1,3}, GUO Hai-gang^{1,2}, WANG Feng^{1,3}, ZHANG Gui-long¹, REN Tian-zhi^{1*}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2.Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3.Dali Agro-Environmental Science Station, Ministry of Agriculture, Dali 671004, China)

Abstract: Rice-garlic rotation is the most common planting pattern in the Erhai Lake basin. Nitrogen and phosphorus runoff losses under conventional fertilization methods are the main factors that contribute to water eutrophication in Erhai Lake. In this experiment, the effects of different fertilization methods on the yields of rice and garlic and the surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus were studied. The results showed that when nitrogen fertilizer input amount was equal, the yields of rice and garlic under the treatments of 50% organic-inorganic fertilizer(50%O) and 100% slow-release bulk blending fertilizer(100%BB) were not significantly different from those of conventional fertilization(CF), whereas those of 100% organic fertilizer(100%O) treatment were significantly lower. The agronomic efficiencies of nitrogen and phosphorus for rice under CF and 50%O treatments were significantly higher than those of other treatments. The agronomic nitrogen use efficiencies for garlic under the addition of CF and 50%O were significantly higher than those under other treatments, but the highest agronomic phosphorus use efficiency for garlic was obtained under 100%BB treatment. During the rice season, the runoff loss amounts and

收稿日期:2017-04-11 录用日期:2017-07-24

作者简介:姚金玲(1985—),女,黑龙江五大连池人,博士研究生,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:引进国际先进农业科学技术计划(948项目)(2014-S4,2016-X53);中国农业科学院基本科研业务费(Y2016PT48)

Project supported: Introducing the International Advanced Agricultural Science and Technology Program(2014-S4,2016-X53); Basic Research and Business Expenses of Chinese Academy of Agricultural Sciences(Y2016PT48)

loss rates of nitrogen and phosphorus under 100%BB treatment were the lowest, resulting in 55.34% and 86.95% reduction, respectively, for nitrogen, and 70.14% and 89.07% reduction, respectively, for phosphorus, compared with CF treatment. The runoff losses of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were 13.19%~21.69% of that of total nitrogen losses, whereas 83.25%~90.93% of total phosphorus losses were soluble phosphorus.

Keywords: Erhai Lake; fertilization method; rice–garlic rotation; nitrogen and phosphorus reduction

随着洱海农灌、旅游等多功能效益的综合利用开发,洱海周边经济取得长足发展,但是不合理的开发利用使水质和生态环境受到严重破坏,水体富营养化加剧,洱海流域时常爆发大规模的蓝藻水华现象^[1-2]。有研究发现,不恰当的农田耕作及施肥管理是造成农田氮磷流失、加剧洱海富营养化的重要原因^[3-4]。而我国主要粮食作物氮肥利用率仅为30%~35%,每年农田氮肥损失率为33.3%~73.6%^[5-6],滇池地区稻田每年径流损失总氮(TN)和总磷(TP)分别为5.07~113.16 kg·hm⁻²和0.115~10.14 kg·hm⁻²^[7];洱海地区水稻–大蒜轮作方式养分盈余量,TN和TP分别为1 258.8 kg·hm⁻²和1 472.7 kg·hm⁻²^[8]。洱海地区水稻季降雨频繁,农民传统施肥以速效肥为主,往往造成稻田氮磷养分随径流流失进入洱海水域,造成水体富营养化。水稻–大蒜轮作是洱海流域农田氮磷流失风险最高的种植方式^[3],如何在这种方式下减少氮磷流失是一个急需解决的问题。降低施肥用量能够减少土壤氮磷流失,但是作物产量会受到影响。通过有机肥无机肥配施或施用缓释掺混肥(BB肥),能够保证肥料输入量,同时又能降低土壤氮磷流失^[9-10]。目前,针对洱海流域水稻–大蒜轮作不同施肥方式下农田径流流失的研究比较薄弱,尤其是施用新型的缓释BB肥下水稻–大蒜产量和农田径流损失的研究鲜有报道。本研究针对洱海流域水稻–大蒜轮作种植区,通过田间试验,以不同施肥方式(速效肥、有机肥和缓释BB肥)下水稻–大蒜轮作农田为研究对象,分析不同施肥方式对水稻–大蒜产量,以及农田径流水中氮磷损失的影响,以期找出能够合理控制氮磷损失的施肥方式,为洱海流域水稻–大蒜种植体系的氮磷减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域和供试土壤

试验地点位于农业部大理农业环境科学观测实验站内。该地区位于我国云南省境内,气候属典型的低纬高原中亚热带西南季风气候类型,海拔1980 m,北纬25°53′34″,东经100°10′27″,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,但85%~96%的降雨集中在5~10月份^[11]。采集土样为0~20 cm土壤,质地为壤土,供试土壤基本理化性质:全氮4.80 g·kg⁻¹,全磷0.99 g·kg⁻¹,硝态氮21.64 mg·kg⁻¹,铵态氮14.22 mg·kg⁻¹,速效磷33.9 mg·kg⁻¹,有机质74.4 g·kg⁻¹,pH值6.98。

1.2 试验设计

结合对当地土壤类型、农民习惯和作物生长适应性等条件的分析,试验点实施水稻–大蒜轮作方式。试验共设置6个处理,每个处理3次重复,建造18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。径流池长宽各1 m,深1 m,径流池壁采用砖混防渗透结构。

6个处理如下,CK:空白,不施任何肥料;CF:习惯施肥,农家乐复混肥和尿素;100%O:100%有机肥,大稼宝精制有机肥;80%O:有机–无机配施,80%大稼宝精制有机肥+20%无机氮肥;50%O:有机–无机配施,50%大稼宝精制有机肥+50%无机氮肥;100%BB:100%专用缓释BB肥。除空白外,其他处理氮肥施入量等同习惯施肥。表1是水稻–大蒜轮作期不同处理施肥类型和施肥量,其中,农家肥N:P₂O₅:K₂O=0.79:0.83:0.72,大稼宝精制有机肥N:P₂O₅:K₂O=2.4:2.3:5.7,农家乐复混肥N:P₂O₅:K₂O=14:6:5,水稻专用缓释BB肥N:P₂O₅:K₂O=24:6:10,大蒜专用缓释BB肥N:P₂O₅:K₂O=18:5:15。

1.3 田间管理

水稻试验时间为2010年5月至2010年10月,插秧时间为2010年5月27日,按当地农民习惯插秧密度为行距×墩距=13.32 cm×10 cm,每丛2苗,667 m²基本苗10万苗,品种云梗25号。按当地传统方法进行浇水、插秧、打农药和除草等田间管理。10月25日成熟收获,不同小区分开收割、脱谷、晒干、称重。施肥时期及方法:有机肥、复混肥、BB肥100%作中层肥一次施用,尿素70%作中层肥、30%作分蘖肥施用。

大蒜试验期,2010年11月6日种植大蒜,667 m²基本苗5.63万苗,品种为四川温江蒜,11月15日大

表 1 水稻-大蒜轮作期不同处理施肥类型和施肥量

Table 1 Fertilization type and amount of different treatments during rice-garlic rotation period

处理	农家肥/kg·hm ⁻²	有机肥/kg·hm ⁻²	尿素/kg·hm ⁻²	复混肥/kg·hm ⁻²	BB 肥/kg·hm ⁻²	合计折纯/kg·hm ⁻²	
						氮	磷
CK	0	0	0	0	0	0	0
CF	0+30 000	0+0	75+150	300+1200	0+0	76.50+624.75	7.86+140.15
100%O	0+0	3 187.52+26 031.65	0+0	0+0	0+0	76.50+624.75	32.00+261.42
80%O	0+0	2 550.32+20 833.24	33.32+270.93	0+0	0+0	76.50+624.75	25.61+209.21
50%O	0+0	1 593.75+13 020.91	83.15+679.22	0+0	0+0	76.50+624.75	16.01+130.76
100%BB	0+0	0+0	0+0	0+0	318.88+3 470.85	76.50+624.75	8.35+75.77

注: +号前代表水稻季施肥量, +号后代表大蒜季施肥量

蒜出苗, 12 月 14 日追施尿素后灌水, 并用 50% 扑草净 120 g + 40% 乙莠粉剂 140 g 兑水 60 kg 喷施土壤表面进行化除; 2011 年 1 月 12 日追施抽苔肥后灌水, 3 月 5 日人工拔除杂草, 5 月 6 日收获并取土样和作物样。施肥时期及方法: 农家肥、复混肥、有机肥、缓释 BB 肥一次性作底肥使用, 尿素 50% 作退母肥、50% 作抽苔肥施用。

1.4 地表径流的采集和分析

农田径流, 在产生地表径流水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 pH 值、总氮、硝态氮(NO₃⁻)、铵态氮(NH₄⁺)、总磷、速效磷(PO₄³⁻)含量。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。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。在一年的水稻-大蒜轮作周期里, 在水稻生长期能够收集到地表径流水, 大蒜生长期降雨少, 没有收集到地表径流水。水稻季试验期间, 降雨主要集中在 5~10 月份, 降雨量分别为 49、79、205、126、130、197 mm。

1.5 作物和土壤样品测定和分析

作物收获后, 测定水稻、大蒜产量及农田土壤理化指标。基础土样采集一个(0~20 cm), 作物收获后各处理取土壤样, 每个小区 3 点采集 0~20 cm 土样, 混合均匀后带回室内。分析有机质、pH 值、全氮、全磷、速效氮、速效磷等。硝态氮、铵态氮含量测定用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提(水土比 5:1), 硝态氮采用双波长紫外分光光度法测定, 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定; 速效磷含量采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗比色法测定; pH 值采用 1:1 土水比, pH 计测定; 土壤有机质、全氮、全磷含量分别采用 K₂Cr₂O₇ 容量-外加热法、凯氏定氮法、钒钼黄比色法测定。

1.6 作物氮(磷)肥农学利用效率和氮磷流失率

氮(磷)肥农学利用效率(kg·kg⁻¹)=[施氮(磷)区产量-无氮(磷)空白区产量]/施氮(磷)量^[12];

氮(磷)素流失量(g·hm⁻²)=径流水氮素浓度(mg·L⁻¹)×径流量(L·m⁻²)×10^[13-14];

氮(磷)素流失率(%)=[施肥处理氮(磷)素径流流失量-不施肥处理氮(磷)素径流流失量]/施氮(磷)量×100%^[13-14]。

1.7 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行方差分析以及 LSD 检验, 用 Origin 8.6 作图。

2 结果与分析

2.1 轮作期不同施肥方式对水稻和大蒜产量及氮(磷)肥农学利用效率的影响

2.1.1 对水稻和大蒜产量的影响

不同施肥方式水稻产量见图 1。水稻产量总体呈现 100%BB、CF>50%O>80%O>100%O、CK。100%BB 和 CF 处理间无显著差异, 但显著高于其他处理组, 50%O 处理显著高于 80%O、100%O 和 CK 处理, 80%O 处理显著高于 100%O 和 CK 处理, CK 和 100%O 处理无显著差异(P<0.05)。其中, 100%BB 处理水稻产量最高, 为 11.65 t·hm⁻², CK 水稻产量最低, 为 8.66 t·hm⁻²。与 CF 处理水稻产量相比, 100%BB 处理产量不下降, 有机肥处理和不施肥处理产量显著下降。100%BB 水稻产量比 CF、50%O、80%O、100%O、CK 处理分别增加了 0.82%、7.08%、18.81%、24.61%、25.64%, 100%BB 显著提高了水稻产量, 这与王睿等^[9]的研究是一致的。

不同施肥方式大蒜产量见图 1。大蒜产量总体呈现 50%O、CF、100%BB>80%O、100%O、CK。50%O、CF 和 100%BB 处理间无显著差异, 但显著高于其他处理

组,80%O、100%O、CK 处理无显著差异($P<0.05$)。其中,50%O 处理大蒜产量最高,为 $11.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,CK 大蒜产量最低,为 $8.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CF 处理相比,50%O 和 100%BB 处理大蒜产量不下降,80%O、100%O 和 CK 处理产量显著下降。50%O 处理大蒜产量比 CF、100%BB、80%O、100%O、CK 处理分别增加了0.50%、7.83%、23.17%、25.36%和 26.80%。

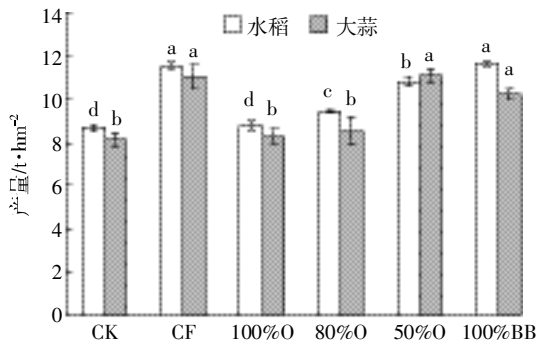


图1 不同施肥处理水稻和大蒜产量

Figure 1 Yield of rice and garlic under different treatments

2.1.2 对水稻和大蒜氮(磷)肥农学利用效率的影响

不同施肥方式下水稻和大蒜氮(磷)肥农学利用效率见表2。水稻氮、磷肥农学利用效率均在 100%BB 处理最高,分别为 39.05 、 $357.78 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CF 和 100%BB 处理间无显著差异,50%O、80%O 和 100%O 处理显著低于 CF 和 100%BB 处理,100%O 处理最低,且随着有机肥施入比例的增加,氮(磷)肥农学利用效率显著降低。这一方面是由于只经过短时间的矿化作用,有机肥释放的促进作物生长发育的无机态养分不能够满足作物所需;另一方面,有机肥处理组磷肥输入量高于 CF 处理,但作物产量并无显著增加,导致

表2 水稻和大蒜氮(磷)肥农学利用效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Agronomic nitrogen(phosphorus) use efficiency of rice and garlic($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理	水稻		大蒜	
	氮	磷	氮	磷
CK	—	—	—	—
CF	37.80a	367.90a	4.67a	20.81c
100%O	1.58d	3.78d	0.26d	0.61e
80%O	10.40c	31.08c	0.64c	1.93d
50%O	28.27b	135.07b	4.76a	22.73b
100%BB	39.05a	357.78a	3.37b	27.77a

注: 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in a row indicate significant differences ($P<0.05$).

了水稻磷肥农学利用效率低。

大蒜氮肥农学利用效率在 50%O 处理最高,为 $4.76 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CF 和 50%O 处理间无显著差异,100%BB 处理显著低于 CF 和 50%O 处理,但显著高于 80%O 和 100%O 处理。大蒜磷肥农学利用效率在 100%BB 处理最高,为 $27.77 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他处理,CF 和 50%O 处理显著高于 80%O 和 100%O 处理。50%O 处理大蒜氮(磷)肥农学利用效率较高,这表明水稻季的有机肥在大蒜季开始发挥作用,而且大蒜季 50%O 处理磷肥输入量较低,在一定程度上提高了磷肥农学利用效率。

2.2 轮作期不同施肥方式对土壤中氮磷含量的影响

不同施肥方式下水稻生长季结束后土壤中氮磷含量见表3,大蒜生长季结束后土壤中氮磷含量见表4。水稻生长季结束后,各处理间土壤中全氮含量保持在 $4.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,全磷含量在 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。与水稻种植前相比,土壤中全氮和全磷含量无显著变化。大蒜生长季结束后,各处理间土壤中全氮、全磷含量亦分别保持在 4.80 、 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,与大蒜种植前相比,土壤中全氮含量无显著变化,土壤中全磷含量在施肥组略有增加。在短期的一个轮作周期施肥处理下,土壤中全氮、全磷含量无显著变化。

CK 处理全氮和全磷含量与水稻种植前相比略有

表3 水稻收获后土壤氮磷含量

Table 3 Nitrogen and phosphorus contents in soil after rice harvest

处理	硝态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g P} \cdot \text{kg}^{-1}$
CK	2.94	7.38	26.47	4.71	0.98
CF	2.95	6.94	25.23	4.85	1.01
100%O	3.09	7.40	22.70	4.81	1.03
80%O	2.87	6.41	17.63	4.84	1.00
50%O	2.81	7.77	16.27	4.76	0.99
100%BB	3.42	6.62	13.03	4.83	1.01

表4 大蒜收获后土壤中氮磷含量

Table 4 Nitrogen and phosphorus contents in soil after garlic harvest

处理	硝态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g P} \cdot \text{kg}^{-1}$
CK	7.29	2.23	30.45	4.62	0.97
CF	16.41	2.70	37.40	4.77	1.03
100%O	12.80	3.74	22.10	4.68	1.07
80%O	9.90	2.71	20.67	4.79	1.06
50%O	16.98	2.93	21.44	4.78	1.03
100%BB	38.41	6.28	25.18	4.82	1.00

降低,但无显著差异。水稻生长季结束后土壤中硝态氮和铵态氮含量比水稻种植前明显降低,硝态氮含量低于 $3.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮含量低于 $7.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各处理间硝态氮和铵态氮含量无显著差异,这与各处理间施用等量的氮肥有关。而大蒜收获后,各处理土壤中硝态氮与大蒜种植前相比明显增加,100%BB 处理含量为 $38.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增加量最多,这与大蒜期施用氮肥量大,100%BB 处理土壤中残留了较多的硝态氮有关。各处理土壤中铵态氮含量低于 $6.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于种植大蒜前。土壤铵态氮和硝态氮含量受温度影响,温度高,硝态氮含量较高,铵态氮含量较低;反之,硝态氮含量较低,铵态氮含量较高。水稻生长季结束后土壤中速效磷含量比水稻种植前降低,100%BB 处理降低量最大,其速效磷含量显著低于其他处理组;有机肥和无机肥混施组 80%O 和 50%O 处理,土壤中速效磷含量显著低于 CK、CF 和 100%O 处理。大蒜生长季结束后土壤中速效磷含量高于大蒜种植前,CF 处理含量最大;有机肥和无机肥混施组 100%O、80%O 和 50%O 处理,以及 100%BB 处理,土壤中速效磷含量显著低于 CK、CF 处理。这表明有机无机配施以及施用缓释 BB 肥能够降低土壤中速效磷含量,原因在于有机物、缓释肥能够在降低磷释放的同时吸附速效磷。

2.3 水稻生长季不同施肥方式对地表径流中氮磷流失总量的影响

水稻生长季地表径流中氮磷流失总量见表 5。地表径流中总氮流失总量,CK、100%BB、有机肥、CF 处理呈逐渐递增的趋势,施用缓释 BB 肥和有机肥能够显著降低地表径流中氮的流失,氮损失率变化特征与总氮流失总量相似。CF 处理总氮流失总量显著高于其他处理组($P<0.05$);50%O 和 80%O 处理间无显著差异,但显著高于 100%O、100%BB 和 CK 处理;100%O 和 100%BB 处理无显著差异,但显著高于 CK。这说明只要施肥增加了土壤中的氮含量就会增

加氮的径流损失。与 CF 处理相比,50%O、80%O、100%O、100%BB 和 CK 处理总氮流失量分别减少了 2 760.92、2 912.29、3 575.27、3 774.87 和 4 339.83 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,即分别降低了 40.47%、42.69%、52.41%、55.34% 和 63.62%。径流中硝态氮流失总量和铵态氮流失总量与总氮的流失特征相似,与 CF 处理相比,50%O、80%O、100%BB、100%O 和 CK 处理硝态氮流失总量分别降低了 57.71%、62.43%、62.70%、66.59% 和 81.50%,铵态氮流失总量分别降低了 25.37%、42.61%、51.06%、53.17% 和 71.35%。硝态氮流失总量 CF 处理显著大于其他处理,50%O 处理显著大于 80%O、100%BB、100%O 和 CK 处理,80%O、100%BB 处理间无显著差异,但显著大于 CK、100%O 处理。铵态氮流失总量特征和硝态氮流失总量特征相似,CF 处理显著大于其他处理,CK 处理显著低于其他处理。在施肥组中,100%O 处理硝态氮和铵态氮流失总量最小,但 100%BB 和 100%O 处理铵态氮流失总量无显著差异,这表明施用有机肥和缓释 BB 肥能够降低土壤径流中氮损失的风险。

土壤径流中总磷流失总量 CF、80%O、100%O、50%O、100%BB 和 CK 处理呈逐渐递减的趋势,施用缓释 BB 肥和有机肥能够显著降低土壤径流中磷的流失。与 CF 处理相比,80%O、100%O、50%O、100%BB 和 CK 总磷流失总量分别减少了 471.05、479.50、552.41、921.26 和 1 042.66 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别降低了 35.86%、36.50%、42.05%、70.14% 和 79.38%。CF 处理磷流失总量显著高于其他处理,CK 处理显著低于其他处理,100%BB 处理显著低于有机肥处理组,80%O 和 100%O 处理间无显著差异。径流磷损失率和总磷损失量变化特征不一致,这主要是因为各处理的磷输入量不一致,总趋势为 100%BB 处理损失率最低,CF 处理损失率最大,有机肥施用量越大径流磷损失率越低。径流中速效磷流失总量处理间变化特征和总磷流失量特征相似,径流中速效磷流失总量占总磷流失总

表 5 水稻生长季地表径流中氮磷流失总量

Table 5 Nitrogen and phosphorus loss mount by surface runoff during rice growing season

处理	硝态氮/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	铵态氮/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	速效磷/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	总氮/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	总磷/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	氮损失率/%	磷损失率/%
CK	175.80e	151.60e	244.10f	2 481.51d	270.89e	—	—
CF	950.22a	529.21a	1 198.68a	6 821.34a	1 313.55a	5.67a	13.27a
100%O	317.43d	247.83d	694.32c	3 246.07c	834.05b	1.00d	1.76d
80%O	356.96c	303.71c	752.46b	3 909.05b	842.50b	1.87c	2.23c
50%O	401.85b	394.96b	683.02d	4 060.42b	751.14c	2.06b	3.00b
100%BB	354.41c	258.99d	331.56e	3 046.47c	392.29d	0.74e	1.45e

量的83.25%~90.93%,土壤径流中磷的流失以速效磷为主。虽然CF处理施入的磷肥量是施肥组中最低的,但是其土壤径流总磷流失总量反而是最大的,这与磷肥施入的形态有关,有机肥能够吸附磷、缓释BB肥能够减少磷的释放,施用有机肥和缓释BB肥这些措施能够有效缓解土壤径流中磷的损失。

2.4 水稻生长季不同施肥方式对地表径流氮素流失规律的影响

2.4.1 对总氮流失规律的影响

水稻生长季不同施肥方式下地表径流中总氮流失规律如图2a所示。水稻施用基肥以后,地表径流中总氮流失量随着时间推移总体呈逐渐下降的趋势,整个水稻生长季CF处理总氮流失量显著高于其他处理组($P<0.05$),CK处理总氮流失量最低。施肥后第一次采样中,CF>50%O>80%O>CK、100%O、100%BB,50%O和80%O处理间无显著差异,但是显著高于CK、100%O、100%BB,而CK、100%O、100%BB处理间无显著差异,总氮最高流失量达到2107.54 g·hm⁻²(CF处理)。这表明在等量氮输入的条件下,有机肥施用越多,降低土壤氮径流损失的效果越显著,同样施用缓释BB肥也能有效降低土壤径流氮流失。在第二次采样中,所有处理总氮流失量显著下降,100%O、80%O、50%O处理间无显著差异,但是显著大于CK和100%BB处理,而100%BB处理显著高于CK处理。在水稻生长前期,水稻根系不发达,对肥料的吸附和利用量较低,土壤径流氮流失主要以化学肥料中的氮流失为主,随着水稻的逐渐生长,对肥料的利用量提高,土壤径流中氮流失降低;有机肥在水稻生长期会不断释放营养来补充水稻营养需求,所以在第二次采样中三个有机肥处理间差异不显著。在第三次采样中总氮流失量80%O、50%O、100%BB和100%O处理显著高于CK处理,但是显著低于CF处理。从前三次的采样结果可以看到,有机-无机配施降低氮流失的效果体现较慢,而施用100%有机肥和100%缓释BB肥的降低效果显著。在随后几次采样中总氮流失量差异逐渐缩小,最后一次采样中总氮流失量所有处理显著高于前一次,这主要是因为这个阶段降雨量较大,导致径流量比较大,而作物此时已经基本成熟,对氮磷的营养吸收很低,上述两方面原因造成了径流流失加大。

2.4.2 对硝态氮和铵态氮流失规律的影响

水稻生长季不同施肥方式下地表径流中硝态氮流失规律如图2b所示。水稻施用基肥以后,地表径流

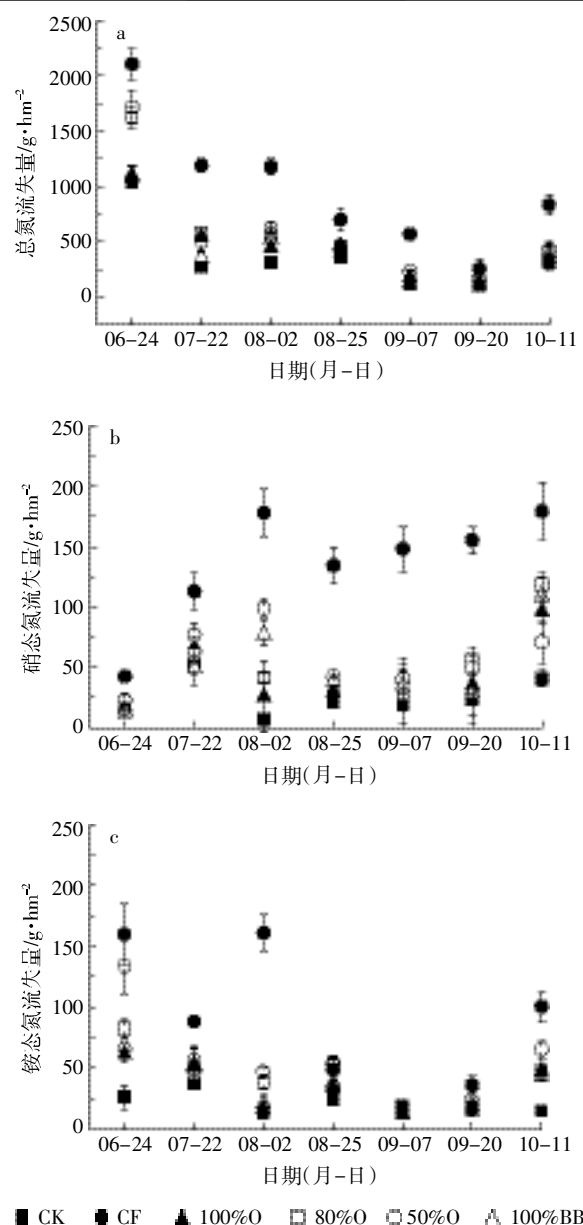


图2 水稻生长季不同施肥方式下地表径流总氮、硝态氮和铵态氮流失规律

Figure 2 Total N, nitrate N and ammonium N loss law in surface runoff under different treatments during rice growing season

中硝态氮流失量随着时间总体呈先增加再降低最后再增加的趋势,整个水稻生长季CF处理显著高于其他处理($P<0.05$),CK处理硝态氮流失量最低。CF、50%O和100%BB处理硝态氮流失变化趋势相似,在前三次采样中硝态氮流失量增加显著,在第四次采样中明显下降,但是50%O和100%BB处理硝态氮流失量显著低于CF处理,施用有机肥和缓释BB肥能够显著降低硝态氮流失量。CK、100%O和80%O处理硝态氮流失量变化趋势相似,在第二次采样中流失量增

加,第三次采样中流失量降低,随后几次采样中呈增加趋势。从图 2b 中,可以明显看到,在第一次采样中,80%O 和 50%O 处理硝态氮流失量显著高于 100%O 处理,而在第三次采样中,处理间硝态氮流失量差异明显,有机肥施用量越多硝态氮流失量越少,这表明施用无机肥增加了硝态氮流失量。

水稻生长季不同施肥方式下地表径流中铵态氮流失规律如图 2c 所示。水稻施用基肥以后,地表径流中铵态氮流失量随着时间总体呈先降低再增加的“凹”型趋势。整个水稻生长季 CK 处理铵态氮流失量最低,在整个水稻生长季波动不大,基本维持在 20 ~ 30 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。CF 处理铵态氮流失量显著高于其他处理 ($P<0.05$),在第三次采样中铵态氮流失量显著增加,在随后几次采样中基本符合整体“凹”型趋势。50%O 处理初始铵态氮流失量比较大,显著高于 80%O 和 100%O 处理,这表明有机-无机配施,无机肥用量大会增加铵态氮流失量,这与硝态氮在第三次采样中的流失特征相似。

2.5 水稻生长季不同施肥方式对地表径流磷素流失规律的影响

水稻生长季不同施肥方式下地表径流中总磷流失规律如图 3a 所示。水稻施用基肥以后,地表径流中总磷流失量呈先增加后降低的趋势,整个水稻生长季 CF 处理显著高于其他处理组 ($P<0.05$),CK 处理总磷流失量最低,100%BB 处理的总磷流失量在施肥组中最低,高于 CK 处理,但和 CK 处理接近。在整个水稻生长季 CK 和 100%BB 处理总磷流失量波动不大,基本维持在 40~70 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。CF 处理总磷流失量最大,在前三次采样中总磷流失量呈递增趋势,最高达到 300.10 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ (第三次),随后下降。100%O、80%O 和 50%O 处理总磷流失量变化特征相似,呈先增加后降低趋势,总磷流失量高峰期达到 195.17 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ (80%O 处理),有机肥三个处理总磷流失量显著高于 CK 和 100%BB 处理。这表明施用缓释 BB 肥能够显著降低土壤中的总磷流失,而施用有机肥也能在一定程度上减少总磷流失。在最后一次采样中总磷流失量增加,是因为这次收集径流期间降雨量比较大。

水稻生长季不同施肥方式下地表径流中可溶性磷流失规律如图 3b 所示。水稻施用基肥以后,地表径流中速效磷流失量呈先增加后降低的趋势,整个水稻生长季 CF 处理显著高于其他处理 ($P<0.05$),CK 处理总磷流失量最低,100%BB 与 CK 处理速效磷流失特征相似。从图 3a 和 3b 中可知,各处理速效磷流失量

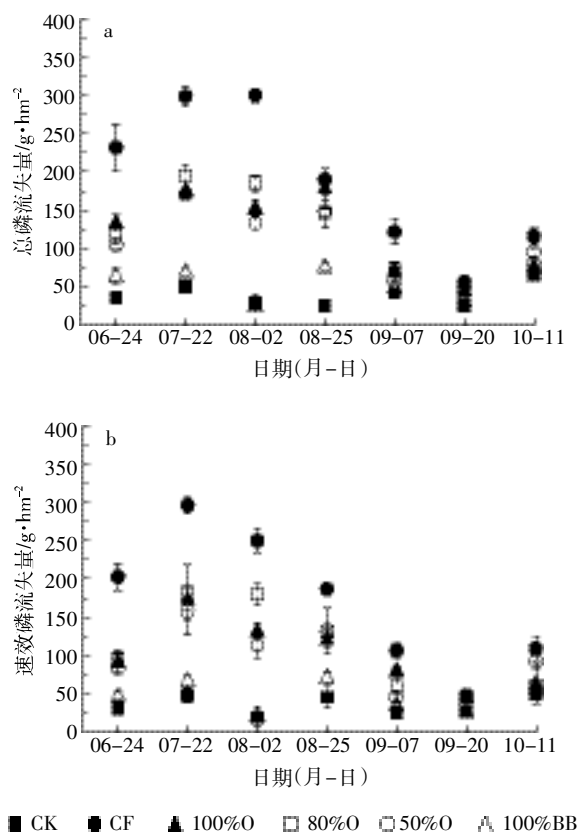


图 3 水稻生长季不同施肥方式下地表径流总磷和速效磷流失规律

Figure 3 Total P and available P loss law in surface runoff under different treatments during rice growing season

变化特征与总磷相似,而流失的总磷中以速效磷为主,占 80%以上。

3 讨论

3.1 不同施肥方式下水稻和大蒜产量及氮(磷)农学利用效率

施肥是影响作物产量的重要因素。本研究中,习惯施肥 CF 和 100%BB 处理水稻籽粒产量最高,50%O 处理产量下降不明显,而 100%O 处理产量下降明显。这表明短期施用有机肥在增加水稻籽粒产量方面无明显优势,短期内化学肥料是增加产量的有效手段。在大蒜生长季,50%O、CF 和 100%BB 处理的大蒜产量相当,这是由于有机肥发挥效用是一个长期的过程,在当季难以发挥增产效果。有机-无机配施对作物产量的影响已经有一些报道^[10,15-17],研究发现长期有机-无机配施能够提高水稻产量,增加土壤肥力。本试验中 50%O 处理水稻产量比 100%O 处理增加 23.24%,但是短期施用有机肥还不能显示出有机肥对

土壤肥力的提升。有机肥中养分释放速率较慢,难以及时补充作物生长需求,会导致试验初期有机-无机配施处理作物产量低于单施化肥处理^[10]。本试验中100%O处理水稻产量比习惯单施化肥CF处理减少23.98%,施用有机肥比例过高引起肥料中矿质养分含量降低,不利于作物增产。氮(磷)肥农学利用效率是单位施肥量对作物籽粒产量增加的反映。本试验中有机肥组水稻氮(磷)肥农学利用效率最低,80%O和100%O处理大蒜氮(磷)肥农学利用效率最低。这表明有机肥的施用并不是越多越好。研究发现水稻产量并非随有机肥比例的增加而增加,有机-无机配施应该存在最适比例^[16,18-21]。大蒜生长季对速效氮磷等营养成分的需求量远远大于水稻,50%O、CF和100%BB处理,大蒜产量无显著差异,但是80%以上有机肥组产量明显降低,有机肥施用比例过高不能满足大蒜生长对速效养分的需求,影响作物产量。一定比例的有机-无机配施,既能补充土壤速效养分的不足,又能发挥有机肥持久释放养分的能力,有助于作物产量的提高。此外,有机肥处理组比CF和100%BB处理磷肥输入量大,但是水稻和大蒜产量并未增加,磷肥农学利用效率显著下降,这增加了土壤磷流失的风险。与CF处理相比,100%BB处理水稻和大蒜产量不下降,在保证氮肥输入的同时,100%BB比CF处理施用的磷肥量低,磷肥农学利用效率高,这对降低土壤磷流失起到很重要的作用。

3.2 不同施肥方式下径流中氮磷削减效果

本研究中水稻生长季不同施肥方式下总氮流失总量为2 481.51~6 821.34 g·hm⁻²,占肥料中总氮量的3.24%~8.91%。李娟等^[13]研究报道水稻季不同施肥处理下总氮流失量为8.81~15.78 kg·hm⁻²,流失量占施氮量的2.58%~4.96%。夏小江^[14]报道了不同耕作方式下水稻田总氮流失量为4.82~11.09 kg·hm⁻²,径流氮素损失量为0.75%~3.76%。而本试验中氮磷流失总量相比这两个研究结果偏低,但是流失量占肥料输入量相对较高。这一方面是由于本试验中水稻季施肥量较低,另一方面是由于本试验的氮肥农学利用率较其他研究偏高^[12]。在稻田径流氮流失风险方面,闻轶^[22]发现不施肥组氮素损失量为3.27 kg·hm⁻²,常规无机肥处理组氮素流失量为12.77 kg·hm⁻²,有机肥处理组比无机肥处理组氮素流失量降低39.70%,有机肥的缓释作用有效降低氮素的径流损失。这与本试验结果相似,在本试验中100%O和100%BB处理总氮流失量无显著差异,氮素削减效果明显,比习惯施肥CF处

理降低了52.41%和55.34%,这表明有机肥和缓释BB肥的缓释作用能有效降低径流中氮素损失。在水稻生长季,氮素径流流失主要集中在施肥后的一个半月内,本试验不同施肥处理下前三次采样中径流氮素损失量达到总损失量的64.78%~70.50%,这与朱利群等^[23]研究结果相似。水稻种植前施用基肥以后,土壤中养分含量高,而水稻还在发芽和生长前期,对养分的需求量比较少,这就导致了大量养分存留于土壤中,水稻来不及吸收就随着径流流失。施用有机肥和缓释BB肥在降低氮素流失上作用明显,但是不能解决水稻生长前期氮素流失比例较大的问题,这主要是施肥期和水稻用肥期相矛盾所致。在水稻生长季径流总氮流失量受到降雨量的影响^[24],在水稻收获前的几次采样中总氮流失量有增加趋势,主要是因为这个时期降雨强度较大,径流量较大,导致径流中带走的氮素含量增加。在本试验中水稻田的氮素径流流失与水稻生长期、施肥种类以及降雨强度有关,水稻生长前期氮素流失量大,施用缓释BB肥能有效降低氮素流失,但随着降雨强度的增大,氮素流失量也增大。

水稻生长季硝态氮在施肥一个月后流失量增大,施肥初期流失量较小;而铵态氮正好相反,在施肥初期流失量较大,随后下降。这与所施用肥料中氮素以酰胺态或有机态为主有关。这种形态的氮素需要在土壤中经过水解或矿化后才能释放出铵态氮,铵态氮再接触氧化后才能转变成硝态氮。后期径流中硝态氮和铵态氮流失量增加主要是降雨增加导致,这与总氮流失量大是一致的。稻田排水中硝态氮和铵态氮流失量随生育进程的变化是肥料在土壤-水稻系统中向铵态氮、硝态氮转化的过程,同时受到了水稻吸收和降雨量的共同影响。在水稻生长季速效氮素(硝态氮+铵态氮)在径流氮素损失中占比达到13.19%~21.69%,占比较小,这表明水稻田氮素流失的主要形态绝大部分是颗粒态或有机态,氮素的流失以雨水冲刷为主^[25]。

不同施肥方式下水稻生长季CF和100%BB处理总氮、总磷输入量大体一致(表1),但是CF处理流失量最大,达到1 313.55 kg·hm⁻²,100%BB处理总磷流失量仅392.29 kg·hm⁻²,削减效果达到70.14%,缓释BB肥处理有效降低了径流中磷的损失。三个有机肥处理总磷削减效果明显低于100%BB处理,这是由于在本研究中,施肥组中氮素输入量保持一致,导致有机肥处理组总磷输入量显著高于100%BB处理,磷肥农学利用率下降,带来了径流中磷素流失的风险。100%O处理输入的总磷量显著高于50%O处理,但

是总磷流失量并没有显著增加,这表明高量有机肥能够增加土壤对磷素的吸附,减少磷素随径流的流失。在水稻不同生长阶段,总磷的流失量主要集中在7月和8月。这个阶段温度高、湿度大、降雨量集中,土壤中磷素的矿化作用明显,过多的磷素随着径流流失。速效磷的流失规律和总磷流失规律相似,流失总量占总磷流失量的83.25%~90.93%,这表明洱海水稻田中磷素流失以可溶态为主。

100%BB处理氮磷输入量和CF处理基本一致,但是氮磷削减效果最为明显,这与丁志磊等^[25]研究结果是一致的。100%O处理在氮素削减效果上和100%BB处理差异不明显,氮素削减效果显著,这与已报道的研究结果^[3,10]相似。但是由于有机肥处理组总磷输入量过高,磷肥农学利用率低,磷素削减效果不佳,施用有机肥需要调整有机肥中氮磷的配比,减少有效养分的损失。在本试验不同施肥处理中,100%BB处理在不影响作物产量的同时,氮(磷)肥农学利用率高,且能够有效降低土壤径流中氮磷的流失,是一种环境友好型施肥方式。

4 结论

在洱海流域水稻-大蒜轮作农田采用100%BB施肥方式(施用100%专用缓释掺混肥),能够在保证作物产量的同时显著降低土壤径流氮磷流失,缓解水体富营养化,是一种环境友好型施肥方式。

参考文献:

- [1] 宋岸,肖举强.洱海流域富营养化成因及教训[J].广东化工,2010,8(37):133-134.
SONG An, XIAO Ju-qiang. On the reasons and lessons of eutrophication in the Erhai Lake[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2010, 8(37):133-134.
- [2] 张娇,陈莉琼,陈晓玲.基于FAI方法的洱海蓝藻水华遥感监测[J].湖泊科学,2016,28(4):718-725.
ZHANG Jiao, CHEN Li-qiong, CHEN Xiao-ling. Monitoring the cyanobacterial blooms based on remote sensing in Lake Erhai by FAI[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(4):718-725.
- [3] 汤秋香,任天志,雷宝坤,等.洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):608-615.
TANG Qiu-xiang, REN Tian-zhi, LEI Bao-kun, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in different crop rotation systems in the North of Erhai Lake Basin[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):608-615.
- [4] 栾玉泉,谢宝川.洱海流域环境保护和综合管理[J].大理学院学报,2007,12(6):38-40.
LUAN Yu-quan, XIE Bao-chuan. Environment protection and comprehensive administration of the basin of Erhai[J]. *Journal of Dali University*, 2007, 12(6):38-40.
- [5] 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与实践:源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,32(5):881-888.
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):881-888.
- [6] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):778-783.
- [7] 程文娟,史静,夏运生,等.滇池流域农田土壤氮磷流失分析研究[J].水土保持学报,2008,22(5):52-55.
CHENG Wen-juan, SHI Jing, XIA Yun-sheng, et al. Farmland runoff of nitrogen and phosphorus in Dianchi Watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):52-55.
- [8] 汤秋香,翟丽梅,雷宝坤,等.洱海流域北部农田养分平衡及残留特性研究[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2163-2170.
TANG Qiu-xiang, ZHAI Li-mei, LEI Bao-kun, et al. Nutrient balance and soil nutrient status in farmland of the northern watershed of Lake Erhai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2163-2170.
- [9] 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.
- [10] 刘守龙,童成立,吴金水,等.等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J].土壤学报,2007,44(1):106-112.
LIU Shou-long, TONG Cheng-li, WU Jin-shui, et al. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):106-112.
- [11] 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.
- [12] 王小燕,马国辉,狄浩,等.纳米增效尿素对水稻产量及氮肥农学利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1479-1485.
WANG Xiao-yan, MA Guo-hui, DI Hao, et al. Effects of NMUrea on rice yield and agronomic nitrogen efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(6):1479-1485.
- [13] 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 field[D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2016.
- [14] 夏小江.太湖地区稻田氮磷养分径流流失及控制技术[D].南京:南京农业大学,2012.

- XIA Xiao-jiang. Study on nitrogen and phosphorus runoff losses from paddy field and control technology in Tai Lake area[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [15] 董春华, 高菊生, 曾希柏, 等. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2):336-345.
- DONG Chun-hua, GAO Ju-sheng, ZENG Xi-bai, et al. Effects of long-term organic manure and inorganic fertilizer combined application on rice yield and soil organic carbon content in reddish paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):336-345.
- [16] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):516-523.
- HOU Hong-qian, LIU Xiu-mei, LIU Guang-rong, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3):516-523.
- [17] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014(2):314-324.
- GAO Ju-sheng, HUANG Jing, DONG Chun-hua, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014(2):314-324.
- [18] 王传雷, 瞿和平, 万一花, 等. 有机无机肥配合施用长期定位试验[J]. 湖北农业科学, 2003(5):58-59.
- WANG Chuan-lei, QU He-ping, WAN Yi-hua, et al. Long-term experiment of combined application of organic and inorganic fertilizer[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003(5):58-59.
- [19] 宋永林, 袁锋明, 姚造华. 北京褐潮土长期施肥条件下对冬小麦产量及产量变化趋势影响的定位研究[J]. 北京农业科学, 2001(1):29-32.
- SONG Yong-lin, YUAN Feng-ming, YAO Zao-hua. Long-term fertilization effects on yield and yield changing trend of winter wheat in purple moisture soil in Beijing[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 2001(1):29-32.
- [20] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68:219-246.
- [21] 郑兰君, 曾广永, 王鹏飞. 有机肥、化肥长期配合施用对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2001, 17(3):48-50.
- ZHENG Lan-jun, ZENG Guang-yong, WANG Peng-fei. Impacts of combined application of organic and in-organic fertilizers on rice yield and soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(3):48-50.
- [22] 闻轶. 稻田氮素流失特征及土壤微生物多样性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- WEN Yi. Study on nitrogen loss characteristics and soil microbial diversity from paddy field[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2010.
- [23] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):6-10.
- ZHU Li-qun, XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):6-10.
- [24] 丁志磊, 祖艳群, 陈建军, 等. 施用不同比例缓释肥对农林复合系统地表径流氮磷流失过程的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(2):335-340.
- DING Zhi-lei, ZU Yan-qun, CHEN Jian-jun, et al. The influence of application of slow-release fertilizer in different proportions on nitrogen and phosphorus loss and runoff of agroforestry systems[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2016, 31(2):335-340.
- [25] 王艳华, 邱现奎, 胡国庆, 等. 控释肥对坡地农田地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):10-14.
- WANG Yan-hua, QIU Xian-kui, HU Guo-qing, et al. Effect of controlled release fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland in slope field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):10-14.