

农田氮素管理模式对洱海流域大蒜生长和氮素流失风险的影响

刘培财¹, 雷宝坤², 翟丽梅¹, 倪喜云³, 罗兴华³, 胡万里², 刘宏斌^{1*}

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 3.大理农业环境保护监测站, 云南 大理 671000)

摘要:为探求能有效提高洱海流域土壤生产力并降低氮素流失风险的适宜氮素管理模式,采用田间试验方法,研究了5种氮素管理模式对大蒜农艺性状、产量与经济效益、氮素利用率、土壤硝态氮含量及氮素表观平衡的影响。结果表明,与习惯施肥处理相比,优化施肥结合免耕秸秆覆盖可提高大蒜产量7.9%,增加经济效益14.1%,氮肥利用率增加约20个百分点,达42.3%,降低0~30 cm土壤无机氮残留44.3%;优化施肥结合秸秆翻埋和优化施肥处理的大蒜产量较习惯施肥处理无显著性差异,但经济效益分别增加5.7%和3.4%,氮肥利用率分别增加约11和13个百分点,分别为32.7%和34.5%,0~30 cm土壤无机氮残留分别降低60.9%和41.1%;氮素调控处理产量较习惯施肥无显著性差异,经济效益降低3.2%,氮肥利用率提高18个百分点,为40.3%,0~30 cm土壤无机氮残留降低53.0%;与习惯施肥处理相比,单施牛粪处理虽然可降低0~30 cm土壤无机氮残留92.4%,但大蒜减产22.8%,经济效益降低19.1%。综合研究结果可知,有机无机配施结合免耕秸秆覆盖或秸秆翻埋是洱海流域氮素管理的优化模式,是保证作物产量、提高经济效益、降低环境风险的重要措施。

关键词:洱海; 氮素; 管理模式; 大蒜; 硝酸盐

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)07-1364-07

Effects of Nitrogen Managements on Growth of Garlic and Risk of Nitrogen Loss in Field of Erhai Lake Basin, China

LIU Pei-cai¹, LEI Bao-kun², ZHAI Li-mei¹, NI Xi-yun³, LUO Xing-hua³, HU Wan-li², LIU Hong-bin^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2. Agricultural Environment & Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3. Monitoring Station of Agricultural Environment Protection, Dali 671000, China)

Abstract: Soil degradation and lake eutrophication caused by irrational agricultural nitrogen management is becoming more and more serious, it is necessary to seek the appropriate nitrogen managements to effectively enhance the soil productivity and reduce the risk of nitrogen loss. A field experiment was carried out to study the effects of 5 nitrogen managements on agronomic characteristics, yield and economic benefit, nitrogen use efficiency of garlic, soil nitrate residue and nitrogen balance in Erhai Lake basin. The results indicated that, compared with conventional fertilization treatment, the yield and economic benefit for the treatment of optimized fertilization combined with no-tillage and straw mulching increased by 7.9% and 14.1% respectively, nitrogen use efficiency increased by 20 percentage points, about 42.3%, and 0~30 cm soil nitrate residue reduced by 44.2%. No significant difference was found for the yield among conventional fertilization, optimized fertilization combined straw burying and optimized fertilization treatments, but the economic benefit of the latter two treatments increased by 5.7% and 3.4% respectively, nitrogen use efficiency increased about 11 and 13 percentage points respectively, about 32.6% and 34.5%, and 0~30 cm soil nitrate residue reduced 41.0% and 61.0% respectively. There were no significant difference for the yield between nitrogen regulation treatment and conventional fertilization treatments, but economic benefit reduced by 3.2%, nitrogen use efficiency increased 18 percentage points, about 40.3%, and 0~30 cm soil nitrate residue reduced 53.0%. Though 0~30 cm soil nitrate residue was cut down by

收稿日期: 2010-11-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07105-002); 中法国际合作项目(2008CA029)

作者简介: 刘培财(1985—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 主要从事农业与环境方面研究。E-mail: meil1020@163.com

* 通讯作者: 刘宏斌 E-mail: liuhongbin2002@126.com

92.4% with the treatment of cow manure only, but the garlic yield and economic benefit reduced by 22.8% and 19.1%, respectively. In conclusion, optimized application of fertilizer combined with no-tillage and straw mulching or straw burying could ensure the garlic yield, increase the economic benefit and reduced effectively the risk of nitrogen loss, was a good choice for the nitrogen management in Erhai Lake Basin.

Keywords: Erhai Lake; nitrogen; management; garlic; nitrate

洱海为云南省第二大高原湖泊,是大理市主要饮用水源地,是整个流域乃至大理经济社会发展的重要基础,是大理人民的“母亲湖”。近几年全湖水质基本保持在Ⅲ类,部分季节与局部区域甚至出现Ⅳ类,主要入湖河流均有不同程度污染,洱海水质的恶化已经对大理州社会经济的可持续发展产生了重大影响,切实有效地控制洱海污染已经刻不容缓。调查发现,农田面源污染在流域污染贡献率较大,是流域污染的主要源头之一,而造成流域农田面源污染的主要原因是大蒜种植。近年来,由于农户对大蒜产量的追求,长期不合理的施用氮肥,导致土壤生产力下降和水体富营养化等一系列环境问题日益加剧。众多研究也表明,农业是一个主要的非点状污染源,农业面源污染是导致水体富营养化的主要原因^[1],而农田氮素流失是造成农业面源污染的重要因素之一^[2]。2010 年 2 月全国污染源普查公报显示:农业源污染物排放对水环境的影响较大,农业源是总氮、总磷排放的主要来源,其排放量分别为 270.46、28.47 万 t,分别占排放总量的 57.2%和 67.4%。其中种植业总氮流失量为 159.78 万 t,总磷流失量为 10.87 万 t,分别占农业源的 59.1%和 38.2%。因此,防治农田氮素流失是防治水体污染的关键。

目前,农田氮素流失防治主要是从氮素的控源减排着手,即控制源头污染和流失途径排放两个方面。源头控制主要通过改进肥料与施肥方式、优化施肥量与施肥时期,流失途径控制则是通过节水灌溉、覆盖与轮作等^[3-6]。研究表明,深施或条施、穴施比撒施显著降低氮素流失量,其中肥料条施和穴施分别可减少氮的流失 50.1%和 52.4%^[7-8];洞庭湖双季稻种植,施用等 N 量控释氮肥 TN 径流流失比尿素降低 24.5%^[9];

地表覆膜和秸秆覆盖分别可降低氮流失量 60.3%和 59.8%^[10]。但这些研究主要是仅基于其中的某一方面对氮素流失进行简单研究,同时忽略了对土壤生产力的影响,而较为系统全面的研究较少。本研究同时从源头和流失途径控制着手,兼顾产量、经济效益和环境效益,优化水肥管理,防治氮素流失,为提高洱海流域土壤生产力,防治土壤氮素流失,保护洱海水质提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验地位于大理州洱海北部河流入湖区的上关镇兆邑村,地理坐标 N25°57′55.9″,E100°06′09.7″,临近罗时江,地下水位较低,土壤为水稻土。流域季风气候明显,干湿季分明,降雨主要集中在 5—10 月,占全年降雨量的 85%~95%,近 15 a 平均降雨量 1 117 mm,最大单次降雨量 113.8 mm。年平均气温 15 ℃左右,最冷月份(1 月)平均气温 5 ℃左右,最热月份(7 月)平均气温 25 ℃左右。试验期流域气候异常干旱,降雨量极少。本研究中土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验于 2009 年 10 月—2010 年 4 月进行,供试大蒜品种为四川温江红七星。供试肥料为:尿素(N, 46%)、过磷酸钙(P₂O₅, 12%)、硫酸钾(K₂O, 50%)、牛粪(含水量 75%,有机质 14.7%,全氮 0.32%,全磷 0.33%,全钾 0.27%),牛粪、磷肥和钾肥均作为底肥,氮肥作为基肥和追肥。秸秆为风干水稻秸秆。以大蒜季不同氮素管理模式设置 7 个处理,3 次重复,小区面积 24 m²,随机区组排列,种植密度 180 万株·hm⁻²。习惯施肥量和牛粪用量是根据洱海流域 300 农户调

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil studied

土壤层次 Soil depth/cm	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	OM/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	TK/g·kg ⁻¹
0~10	4.26	6.64	80.86	4.41	1.28	16.79
10~20	5.25	6.29	80.42	4.42	1.47	18.09
20~30	3.38	5.37	55.28	3.18	1.17	18.47

查所得,优化施肥是根据洱海流域土壤基本条件和大蒜养分需求确定;氮素根层调控是根据不同生育期习惯、优化和调控 3 个处理大蒜植株长势的对比和 0~30 cm 土层硝态氮含量确定调控施肥量,最终整个生育期化肥氮(N)用量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施肥时期与其他处理相同;免耕秸秆覆盖是将水稻秸秆均匀覆盖于大蒜免耕播种后的土壤表层,厚度约 5 cm,秸秆翻埋是将秸秆直接翻埋在土壤 30 cm 处,施肥同优化施肥。试验处理见表 2。

1.3 样品采集与测试

试验采集样品包括土样、植株样和水样。土样采集时间为翻耕前(基础土样,S 形 9 点混合)、花芽鳞芽分化初期(第一次追肥前)、抽薹初期(第二次追肥前)、鳞茎膨大初期、收获前,层次为 0~10、10~20、20~30 cm;植株样采集时间为幼苗期、花芽鳞芽分化期、抽薹期、鳞茎膨大期,采取整株采集方法,根据作物不同生育期大小,选取若干株有代表性的单株,现场称鲜重;100 cm 渗滤水样采集时间为苗期(种植后 60 d)和收获前,用土钻在土壤中钻 100 cm 深,插入直径、长度分别为 5 cm、105 cm,周壁带孔底端用纱布封住的 PVC 管,将管壁与土壤密封,收集渗滤水。

土壤硝态氮测定,采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KCl}$ 浸提-紫外分光光度计法;植株样全氮测定,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-凯氏定氮法;水样硝态氮测定,采用紫外分光光度计法。

1.4 数据分析

(1)氮肥利用率(REN)= $(\text{UN}-\text{U}_0)/\text{FN} \times 100$ 。 U_0 代表不施氮区氮素吸收量; UN 代表施氮区氮素吸收量; FN 代表施氮区氮肥用量。

(2)氮素表观平衡=(土壤 N_{min} 起始总量+施氮量+N 矿化量)-(土壤 N_{min} 残留总量+作物吸氮量)

(3)土壤有机氮表观矿化量(CK 处理)=(根层土

壤 N_{min} +作物氮素吸收) t_2 -(根层土壤 N_{min} +作物氮素吸收) t_1 。 t_1 为某一时间段的起始时刻, t_2 为结束时刻。下同。

(4)牛粪氮素表观矿化量=(单施牛粪处理土壤 N_{min} -CK 处理土壤 N_{min} +单施牛粪处理作物氮素吸收-CK 处理作物氮素吸收) t_2 -(单施牛粪处理土壤 N_{min} -CK 处理土壤 N_{min} +单施牛粪处理作物氮素吸收-CK 处理作物氮素吸收) t_1 。

(5)无机氮残留量=土层厚度(cm)×土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)×无机氮浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/10。各土层土壤容重按 $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 计算。

采用 Microsoft Excel 2007 制作图表,采用 SPSS-10.0 软件进行(One-Way ANOVA)数据差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮素管理模式下大蒜农艺性状、产量比较

由图 1、图 2 可知,在整个生育期,与习惯施肥相比,优化施肥、氮素调控和秸秆翻埋的单株干重、SPAD 值及产量差异均不显著;免耕秸秆覆盖各阶段农艺性状值较高,在鳞茎膨大期单株干重增长趋势明显高于习惯施肥,产量最高,较其他各处理差异显著,产量较习惯施肥提高达 7.9%;秸秆翻埋处理的各农艺性状略低于其他处理,产量较习惯施肥降低 8.5%;优化施肥和氮素调控产量较习惯施肥仅降低 4.0%、7.1%,差异不显著;单施牛粪处理的单株干重、SPAD 值和产量均显著低于其他处理,其中产量较习惯施肥下降达 22.8%。

2.2 不同氮素管理模式下氮肥利用率和经济效益

由表 3 可知,各处理独蒜和瓣蒜比例均显著高于习惯施肥,其中秸秆翻埋显著高于其他处理,单施牛粪次之,免耕秸秆覆盖、优化施肥和氮素调控处理之

表 2 试验处理设计($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 2 The design of experiment treatments($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	秸秆 Straw	牛粪 Cow manure	化肥 Fertilizer		
			N	P_2O_5	K_2O
空白 Check(CK)		0	0	180	150
单施牛粪 Cow manure(CM)		36 000	0	180	150
习惯施肥 Conventional fertilization(CON)		36 000	675	180	150
优化施肥 Optimized fertilization(OPT)		36 000	375	180	150
免耕秸秆覆盖 No-tillage and straw mulching(NTC)	15 000	36 000	375	180	150
秸秆翻埋 Straw burying(BS)	4 500	36 000	375	180	150
氮素调控 Nitrogen level regulation(NR)		36 000	调控	180	150

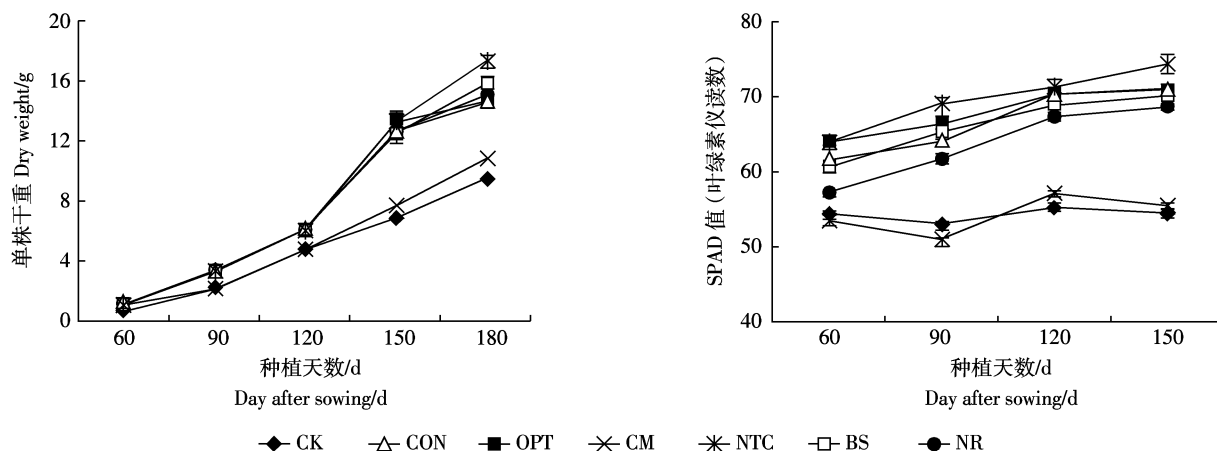
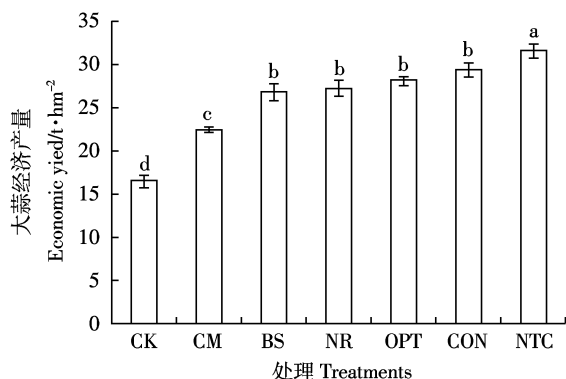


图 1 不同处理大蒜生物性状

Figure 1 The biological traits of garlic of different treatments

图 2 不同处理大蒜经济产量($P<5\%$)Figure 2 The economic yield of garlic in different treatments($P<5\%$)

间差异不显著。以单施牛粪处理为对照,计算大蒜氮肥利用率,习惯施肥氮肥利用率显著低于其他处理,仅为 21.9%;免耕秸秆覆盖的氮肥利用率显著高于其他处理,较习惯施肥提高 20 个百分点,达 42.34%;秸秆翻埋氮肥利用率略低于优化施肥,但差异不显著,

两者较习惯施肥分别提高约 11 和 13 个百分点;氮素调控的氮肥利用率较习惯施肥提高 18 个百分点,达 40.32%。各处理经济效益差异显著,其中免耕秸秆覆盖效益最高,较习惯施肥提高达 14.1%,优化施肥和秸秆翻埋分别提高 3.4%和 5.7%,氮素调控和单施牛粪分别降低 3.2%和 19.1%。

2.3 不同氮素管理模式土壤氮素流失风险

由图 3 可知,整个生育期习惯施肥处理 0~30 cm 土层硝酸盐浓度均最高,其中 0~10 cm 土层达 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮素流失风险较高,由于底肥用量过高,种植 60 d 时出现累积峰,此时正值大蒜苗期,土壤裸露较多,流失风险很高。从图 4 可以看出,习惯施肥 100 cm 处渗滤水 NO_3^--N 浓度较其他处理差异极为显著,后期达 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这也说明其氮素淋失风险很高。优化施肥和氮素调控整个生育期 0~30 cm 土层 NO_3^--N 浓度和 100 cm 处渗滤水 NO_3^--N 浓度均显著低于习惯施肥;免耕秸秆覆盖 0~10 cm 土层 NO_3^--N 浓度较

表 3 不同处理下大蒜的吸氮量、氮素利用率和经济效益

Table 3 N uptake, N use efficiency and economic benefit of different treatments

处理 Treatments	产量 Yield/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$		独/瓣 One-C/C	N 肥利用率/% N use efficiency/%	经济效益/万元· hm^{-2} Economic benefit
	独蒜 One-clove	瓣蒜 Clove			
空白(CK)	9.3	7.4	1.26c	—	7.7a
牛粪(CM)	13.0	9.8	1.33c	—	13.0b
习惯施肥(CON)	12.8	16.7	0.77a	21.8a	16.0cd
优化施肥(OPT)	14.3	14.0	1.02b	34.5b	16.6d
免耕覆盖(NTC)	15.9	15.9	1.00b	42.3c	18.3e
秸秆翻埋(BS)	16.2	10.8	1.50d	32.6b	16.9d
氮素调控(NR)	13.4	14.0	0.96b	40.3c	15.5c

注:有机肥 $100 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 秸秆 $300 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 尿素 $3 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硫酸钾 $3 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 普钙 $1 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 蒜种 $30\,000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 种植、管理和收获人工 $24\,000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 翻地旋地 $3\,000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$; 独蒜 $10 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 丫蒜 $5 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; 表中数据后标注不同字母 a、b 等为多重比较 $P<5\%$ 水平上的差异。

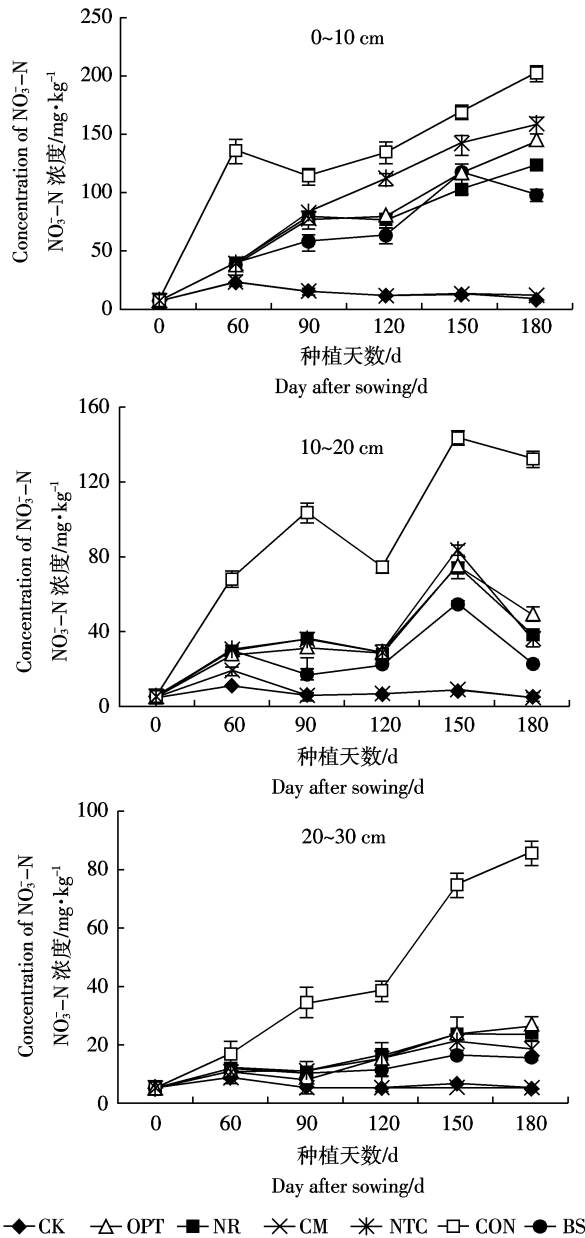
图3 不同土壤层次不同处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的动态变化

Figure 3 Dynamic of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations at different soil layer under different treatments

高, 180 d 达 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于优化施肥等处理, 但此时 10~30 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度显著低于优化施肥, 免耕秸秆覆盖苗期 100 cm 处渗滤水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度略高于优化施肥, 差异不显著, 但显著低于习惯施肥, 收获期则显著低于优化施肥和习惯施肥; 秸秆翻埋能有效降低土壤 0~30 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度, 整个生育期均显著低于单施牛粪和空白以外的各个处理, 秸秆翻埋苗期 100 cm 处渗滤水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度显著高于优化施肥, 但显著低于习惯施肥, 收获期则显著低于优化施肥和习惯施肥; 单施牛粪处理整个生育期 0~30

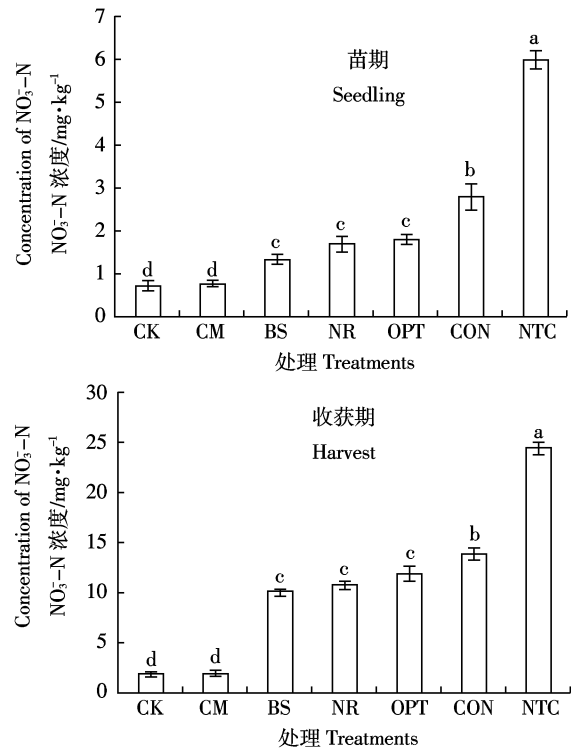


图4 苗期和收获期不同处理 100 cm 处渗滤水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度
Figure 4 $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in filtration water at soil depth of 100 cm at seedling and harvest stages in different treatments

cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度和 100 cm 处渗滤水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度均与空白相当, 远低于其他处理。

2.4 氮素表观平衡

相对土壤无机氮含量的变化, 氮素表观平衡更能准确反映氮素利用及土壤氮素累积和损失的总体情况^[1], 其值越高说明氮素损失量越大。试验中氮素的输入主要包括化肥氮、土壤和牛粪有机氮矿化、播前土壤 $N_{\min}$ (土壤无机氮含量)、蒜种带入的氮, 氮素的输入主要来自肥料投入; 氮素的输出主要包括作物带走的氮和土壤残留的无机氮。在整个大蒜生育期 0~30 cm 土层矿化氮量为 $22.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 牛粪矿化氮量为 $57.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 播种前土壤 $N_{\min}$ 为 $70.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 蒜种带入的氮为 $60.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

由表 4 可知, 免耕秸秆覆盖吸氮量最高, 和习惯施肥显著高于其他处理, 优化施肥、氮素调控和秸秆翻埋吸氮量差异不显著。习惯施肥氮素吸收比例最低, 仅 29.3%, 其他处理氮素吸收比例较高, 均高于 40%; 由于大蒜季土壤铵态氮含量很低, 土壤 $N_{\min}$ 残留以硝酸盐为主, 习惯施肥的硝酸盐残留显著高于其他处理, 达 $504 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 优化施肥、免耕覆盖、氮素调控、秸秆翻埋和单施牛粪处理均显著降低 0~30 cm 土层硝酸盐残留, 较习惯施肥分别降低 41.1%、44.3%、

表 4 0~30 cm 土壤-大蒜系统氮素表观平衡
Table 4 Apparent balance of nitrogen in 0~30 cm soil-garlic system

处理 Treatments	氮输入量 N Input/kg·hm ⁻²	吸收氮 N uptake		土壤 N _{min} 残留 Soil N _{min} residue		氮素表观平衡 Apparent balance	
		kg·hm ⁻²	%	kg·hm ⁻²	%	kg·hm ⁻²	%
单施牛粪(CM)	211	113a	53.3	39a	18.3	60c	28.5
习惯施肥(CON)	886	260c	29.3	504e	56.9	122d	13.8
优化施肥(OPT)	586	242b	41.3	297d	50.7	47b	8.0
免耕覆盖(NTC)	586	271c	46.3	281d	48.0	34a	5.7
秸秆翻埋(BS)	586	235b	40.1	197b	33.5	154e	26.4
氮素调控(NR)	511	233b	45.7	237c	46.3	41ab	8.0

53.0%、60.9%和 92.4%，土壤硝酸盐残留为氮素的主要去向，各处理硝酸盐残留比例均较高，其中习惯施肥最高(56.9%)、秸秆翻埋较低(33.5%)、单施牛粪最低(约为 18.3%)，这部分氮极易向环境流失；各处理氮素表观平衡量比例均较低，其中单施牛粪、秸秆翻埋和习惯施肥较高，分别为 28.5%、26.4%和13.8%。

3 讨论

大蒜季洱海流域气候异常干旱，加之喷灌的灌溉方式，造成了不同处理氮素在浅层土壤残留量较大。由于大蒜经济效益较高而化肥成本相对低得多，农户习惯施肥投入化肥氮达 675 kg·hm⁻²，虽然大蒜产量较高，但氮肥利用率很低，仅为 22%，氮素大量残留于耕层，达 58%，仅 0~10 cm 土层残留量达 30%，具有极大的径流流失风险^[12]。大量研究表明，施肥量是影响土壤氮素流失的一个重要因素，高强度的化肥施用是造成农田氮素大量流失的主要原因^[13]，优化施肥和氮素根层动态调控可显著降低氮素投入量，且大蒜产量与习惯施肥差异不显著，从而显著提高了氮效率和有效降低土壤硝酸盐残留，其中氮素调控的氮肥利用率达 40%。相对空白处理牛粪处理产量提高显著，独头蒜比例较高，其中独头蒜比例可能与蒜种冷藏期和土壤养分有关，养分供应充足不利于独头蒜的形成，但影响独头蒜比例的具体原因有待进一步研究。另外，牛粪处理土壤硝酸盐残留很低，洱海流域牛数量达 12 万头，为农户分散式厩式养殖，大量牛粪的放置处理问题已成为影响洱海水质的因素，增加牛粪用量对部分化肥有机替代，在保证产量同时可以极大降低奶牛养殖和农田大量施肥带来的环境风险。

免耕秸秆覆盖能显著提高氮素利用率和土壤含水量，在整个大蒜生育期气候较干旱的情况下，免耕秸秆覆盖耕层土壤含水量均最高，0~10 cm 土层比各处理含水量高达 10%，尤其在鳞茎膨大期土壤含水量较高较大促进了鳞茎膨大和产量提高。众多研究也表

明，秸秆覆盖能有效地改善土壤理化性状，促进作物的生长，提高作物的产量^[14-15]。在各处理灌溉水量相同的情况下，免耕和覆盖秸秆能减少径流量和氮素淋失，使大量氮素残留在大蒜根层，达总残留量的 73%，能很好地促进大蒜生长，但浅层氮素的高残留能增加径流中氮素的浓度，具有一定的环境风险，为了减少肥料的损失，秸秆覆盖措施应配套相应的肥料深施器械。秸秆翻埋措施在大理地区应用广泛，但是这方面研究较少，秸秆翻埋能显著增加独头蒜比例，可能与其提高 0~30 cm 土层温度有关，另外秸秆翻埋可以增加土壤有机质和微生物量，改善耕作层土壤物理性状，在保证产量和经济效益的同时能有效的降低土壤硝酸盐残留量，但其氮素损失量很大，达 24%。众多研究表明^[16-18]，损失原因主要有两个方面，其一，与翻埋秸秆增加碳源促进微生物对氮素的固持有关；其二，秸秆翻埋下“碳-氮-水”的有机结合促进了氮素反硝化和 N₂O 排放，这对大气环境有一定影响。因此，秸秆翻埋措施应注意秸秆与氮肥量的合理配施、因地制宜，但是在洱海流域洱海水质污染问题亟待解决的情况下秸秆翻埋也不失为一种有效措施。

4 结论

(1)不同氮素管理模式对大蒜产量的影响：免耕秸秆覆盖在减少氮素投入 44.4%条件下较习惯施肥提高产量约 7.9%；秸秆翻埋、优化施肥和氮素调控在分别减少氮素投入 44.4%、44.4%和 55.6%的条件下较习惯施肥产量仅降低 4.0%、7.1%和 8.5%，差异不显著；单施牛粪较习惯施肥产量降低达 22.8%。

(2)不同氮素管理模式对肥料利用率和经济效益的影响：优化施肥、氮素调控、免耕秸秆覆盖和秸秆翻埋均可以提高氮素利用率，其中氮肥利用率分别为 34.5%、40.3%、32.7%和 42.3%，较习惯施肥分别提高约 13、18、11 和 20 个百分点；免耕覆盖、秸秆翻埋和优化施肥处理经济效益较习惯施肥分别提高 14.1%、

5.7%和3.4%,氮素调控和单施牛粪分别降低3.2%和19.1%。

(3)不同氮素管理模式对氮素流失风险的影响:优化施肥、免耕秸秆覆盖、氮素调控和秸秆翻埋均可以显著降低0~30 cm土壤硝酸盐残留,较习惯施肥分别降低41.1%、44.3%、53.0%和60.9%,均可以显著降低氮素流失风险;单施牛粪较习惯施肥0~30 cm土壤硝酸盐残留降低达92.4%,能极大降低氮素流失风险。

综上所述,有机无机肥配施结合免耕秸秆覆盖或秸秆翻埋是洱海流域保证作物产量、提高经济效益、有效降低氮素流失风险和防治洱海面源污染的氮素管理优化模式。

参考文献:

- [1] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Farmland nitrogen, phosphorus and loss eutrophication of water body[J]. *Soils*, 2000, 32(4): 188-193.
- [2] 全为民,严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effect of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291-299.
- [3] 谢红梅,朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 349-352.
XIE Hong-mei, ZHU Bo. Research progress on non-point source pollution of nitrogen in agro-ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3): 349-352.
- [4] 金洁,杨京平. 从水环境角度探析农田氮素流失及控制对策[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 579-582.
JIN Jie, YANG Jing-ping. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 579-582.
- [5] 陈治平,郭枫,袁静. 稻田氮素流失及控制措施研究进展[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(2): 138-140.
CHEN Zhi-ping, GUO Feng, YUAN Jing. Research advance on nitrogen losses and its control methods in the paddy field[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2008, 14(2): 138-140.
- [6] 宁建凤,邹献中,杨少海. 农田氮素流失对水环境污染及防治研究进展[J]. 广州环境科学, 2007, 22(1): 5-10.
NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai. Progress in the research on water pollution from farm land nitrogen loss and its control[J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2007, 22(1): 5-10.
- [7] 赵茜,宣岩芳,曹林奎. 农田土壤氮素流失规律及其控制技术研究进展[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(4): 424-428.
ZHAO Qian, XUAN Yan-fang, CAO Lin-kui. Research progress on the laws and control technologies of nitrogen loss in farmland[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2009, 27(4): 424-428.
- [8] 陈炎辉,杨舜成,王果. 不同施用方式下酸性土坡地污泥氮素随径流迁移的研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 15-19.
CHEN Yan-hui, YANG Shun-cheng, WANG Guo. Nitrogen transport along with runoff from sloping plots amended with sewage sludge applied in different ways[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 15-19.
- [9] 程文娟,史静. 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. Factors influencing phosphorus loss by runoff process from farmlands in the Dianchi watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 52-55.
- [10] 彭树初,陈雄鹰,胡明勇. 长沙市平原旱地土壤氮磷径流特征研究[J]. 湖南农业科学, 2009, 4(6): 61-64.
PENG Shu-chu, CHEN Xiong-ying, HU Ming-yong. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus loss from dry-land soil by runoff in Changsha plain[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009, 4(6): 61-64.
- [11] 陈清,张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 91-115.
CHEN Qing, ZHANG Fu-suo. Theories and practices of nutrient management on vegetables[M]. Beijing: The Press of China Agricultural University, 2006: 91-115.
- [12] 段亮,段增强,常江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 813-818.
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, CHANG Jiang. Surface management and fertilization modes on phosphorus runoff from upland in Taihu lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 813-818.
- [13] 段惠惠,张乃明,张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 48-51.
DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan. Effect of fertilizer application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 48-51.
- [14] 刘超,汪有科,湛景武. 秸秆覆盖量对夏玉米产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 64-66.
LIU Chao, WANG You-ke, ZHAN Jing-wu. The influence of straw mulch amount to summer maize yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(4): 64-66.
- [15] 张虎,常江. 秸秆堆腐还田对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(8): 1399-1401.
ZHANG Hu, CHANG Jiang. Effect of overrotten straw returned into soil on soil fertility and crop growth[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005, 33(8): 1399-1401.
- [16] 王改玲,郝明德,陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及N₂O排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 840-844.
WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 840-844.
- [17] 张乐. 不同C源对外源N土壤微生物固持的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
ZHANG Le. The effect of different sources on microbe immobilization by supplemental N[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2008.
- [18] 邹国元,张福锁,陈新平. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping. Effect of straw addition on denitrification in upland soil[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6): 47-50.