

刘红江, 郭 智, 郑建初, 等. 不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 783-789.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.010

不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响

刘红江, 郭 智, 郑建初, 盛 婧, 张岳芳, 陈留根

(江苏省农业科学院循环农业研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 本研究以武运粳 30 号为试验材料, 设置不施氮肥(N0)、当地水稻栽培农民习惯施肥量(N1)、氮肥减量 18.2%(N2)、氮肥减量+脲酶抑制剂(N3)、硫包衣尿素(N4)、树脂包膜尿素(N5)、脲醛尿素(N6)、草酰胺(N7)等 8 个处理(N3 处理~N7 处理施氮量同 N2 处理), 研究不同类型缓控释肥料对水稻产量及稻田氮素地表径流流失的影响。结果表明:(1)与 N1 处理相比较, 氮肥减量的 N3、N6 和 N7 处理能够确保水稻产量。(2)N6 和 N7 处理水稻生物产量相对较低, 较高的经济系数是其产量不减的重要原因。(3)试验年度稻田共产生地表径流 6 次, 累计地表径流量为 $3.68 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。(4)稻季农田地表径流总氮流失量平均为 $11.34 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 氮肥减量条件下, 通过不同缓控释肥的使用大部分能够显著降低稻季农田地表径流总氮质量浓度和总氮流失量。(5)氮肥减量的 N4 和 N5 处理使农田地表径流总氮素流失率显著降低。使用不同缓控释肥使水稻氮素偏流失率大部分得到显著降低。说明, 氮肥减量条件下, 脲醛尿素(N6)和草酰胺(N7)替代普通尿素在保证水稻产量的同时, 减少了农田地表径流氮素流失量, 降低了水稻氮素偏流失率。

关键词: 缓控释肥; 水稻产量; 地表径流; 氮素流失

中图分类号: S145.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)04-0783-07

Effects of different types of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen loss of surface runoff

LIU Hong-jiang, GUO Zhi, ZHENG Jian-chu, SHENG Jing, ZHANG Yue-fang, CHEN Liu-gen

(Recycling Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to reveal the effects of different types of controlled release fertilizers on rice yield and nitrogen loss of surface runoff in a wheat-rice double cropping system, a field experiment was carried out with Wuyunjing 30 as tested material. Eight treatments such as no nitrogen fertilizer (N0), local farmer accustom nitrogen fertilizer application (N1), nitrogen reduction 18.2% (N2), nitrogen reduction 18.2% and urease inhibitor (N3), sulfur coated urea (N4), resin coated urea (N5), urea formaldehyde (N6), oxalic amide (N7) were conducted. The results showed that rice yield could be assured under the treatments of N3, N6, and N7 compared with that under the treatment of N1. The biomass yield of rice under the treatments of N6 and N7

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0200805); 中央财政农业技术推广基金项目[TG(16)014]; 公益性行业(农业)科研专项(20153122)

作者简介: 刘红江(1979-), 男, 江苏建湖人, 博士, 副研究员, 主要从事农业生态和水稻栽培生理生态研究。(E-mail) Lihongjiang2004@sohu.com

通讯作者: 陈留根, (E-mail) chenliugen@sina.com.cn

was relatively low, and the higher economic coefficient was an important reason for normal output. There were six times of surface runoff in this rice season, and the accumulative surface runoff was $3.68 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. The average total nitrogen loss of surface runoff was $11.34 \text{ kg}/\text{hm}^2$. In the condition of nitrogen reduction, total nitrogen concentration and total nitrogen loss of surface runoff could be significantly decreased through the use of some controlled release fertilizers. In the

condition of nitrogen reduction, the total nitrogen loss rate was effectively decreased under the treatments of N4 and N5. Most of the rice nitrogen drift loss rate significantly decreased by using controlled release fertilizers. In conclusion, in the condition of nitrogen reduction, replacing ordinary urea with urea formaldehyde (N6) and oxalic amide (N7) could ensure rice yield, reduce the loss of nitrogen in surface runoff, and decrease the rate of nitrogen drift loss in rice.

Key words: controlled release fertilizer; rice yield; surface runoff; nitrogen loss

水稻是中国最主要的粮食作物之一,确保水稻高产稳产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1-2]。氮肥的合理施用对提高水稻产量发挥着重要作用,朱兆良院士的研究结果表明,施用氮肥对水稻增产的贡献率达到 50% 以上^[3]。为了获得水稻高产,中国农田化肥的投入量在持续增加,长江中下游地区部分稻田的氮肥施用量达到 3.0×10^5 kg/hm²^[4]。过量的氮肥投入并不能保证水稻进一步增产,还会降低肥料利用效率,相关研究结果表明,中国农田氮肥利用率在 20%~35%,约为发达国家的一半^[5-8]。大量不能被作物吸收利用的氮肥,会通过地表径流、渗漏和氨挥发等途径进入周围的环境中去,带来农业面源污染等问题^[3,9]。已有研究结果表明,缓控释肥料,由于其养分释放规律能够与作物养分吸收需求相对同步,可以减少肥料施用量以及施肥次数,同时提高肥料利用效率^[10-13]。关于缓控释肥料的施用对水稻产量、养分吸收利用、土壤肥力等^[13-17]影响的研究已有相关报道。到目前为止,关于不同类型缓控释肥料对水稻产量形成以及农田氮素径流损失影响的比较研究相对较少。为此,本研究于 2016 年在苏州市相城区望亭镇项路生态农场试验田设置了不同类型缓控释肥料等 8 个处理,研究其对水稻产量形成及农田氮素地表径流流失的影响,以期为提高农业资源利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究于 2016 年 6 月—2016 年 11 月在江苏省苏州市相城区望亭镇项路生态农场 (31°27'N, 120°25'E) 进行,该地属于亚热带季风海洋性气候区,年均降水量 1 100 mm,年均温度 15.7℃,年日照时间大于 2 000 h,年平均无霜期长达 233 d,轮作制度为水稻和冬小麦轮作。试验田土壤类型为潜育型水稻土,基本理化性状为:全氮 1.72 g/kg,总磷 0.43 g/kg,速效氮 46.2 mg/kg,速效磷 16.9 mg/kg,速效

钾 165.3 mg/kg,有机质 23.7 g/kg,容质量 1.25 g/cm³,pH 6.9。

1.2 供试材料

上季小麦收获后,将秸秆机械切碎后耕翻还田。试验采用随机区组设计,以不施氮肥(N0)作为空白对照;并以当地水稻栽培农民常用(化学氮、磷、钾肥投入量分别为 330.0 kg/hm², 67.5 kg/hm², 90.0 kg/hm²)施肥量为施肥对照(N1);在施肥对照基础上,设置减少 18.2% 施氮量的氮肥减量处理(N2);氮肥减量+脲酶抑制剂(N3);有效含氮量 37% 的硫包衣尿素(N4),由汉枫缓释肥料(江苏)有限公司提供;有效含氮量 42% 的树脂包膜尿素(N5),由金正大集团提供;有效含氮量 38% 的脲醛尿素(N6);有效含氮量 31.8% 的草酰胺(N7);共 8 个处理。N2 至 N7 处理氮、磷、钾肥投入量分别为 270.0 kg/hm², 67.5 kg/hm², 90.0 kg/hm²。N1 和 N2 处理氮肥运筹为基肥:分蘖肥:穗肥 1:穗肥 2=3:2:3:2(质量比),穗肥于水稻倒 4 叶期和倒 2 叶期分 2 次施用。磷肥、钾肥和缓控释肥均作为基肥施用。常规肥料为:含氮(N)量 46% 的尿素,含磷(P₂O₅)量 15% 的过磷酸钙,含钾(K₂O)量 60% 的氯化钾。详细的肥料运筹情况见表 1。

供试水稻品种为:武运粳 30 号。2016 年 6 月 18 日机械插秧,栽插规格行距为 30.0 cm,株距为 13.3 cm,每穴 3~4 苗,11 月 5 日收获;水分管理为 6 月 18 日—7 月 21 日采用浅水(4~5 cm)湿润灌溉,7 月 22 日—8 月 10 日进行 2 次脱水烤田,8 月 11 日到收割前 14 日采用干湿交替水分管理方式。其他田间管理措施,参照当地优质高产水稻栽培技术。

1.3 测定内容与计算方法

1.3.1 水稻生物产量和经济系数 成熟期,在各小区普查 100 穴水稻穗数的基础上,根据平均穗数,取代表性的水稻植株 5 穴,分样、烘干,测算叶片、茎鞘和穗等器官的干物质量,折算水稻生物产量。水稻经济系数=产量÷生物产量。

表 1 试验用肥料运筹情况

Table 1 The fertilizer application in this research

处理	基肥 (kg/hm ²)			普通尿素 (kg/hm ²)		
	尿素	过磷酸钙	氯化钾	分蘖肥	穗肥 1	穗肥 2
N0	—	450.0	150.0	—	—	—
N1	216.0	450.0	150.0	144.0	216.0	144.0
N2	175.5	450.0	150.0	117.0	175.5	117.0
N3	407.0	450.0	150.0	180.0	—	—
N4	507.0	450.0	150.0	180.0	—	—
N5	447.0	450.0	150.0	180.0	—	—
N6	493.5	450.0	150.0	180.0	—	—
N7	589.5	450.0	150.0	180.0	—	—

N0:不施氮肥,空白对照;N1:施肥对照,当地水稻栽培施肥量;N2:N1减少18.2%施氮量;N3:N2+脲酶抑制剂;N4:有效含氮量37%的硫包衣尿素;N5:有效含氮量42%的树脂包膜尿素;N6:有效含氮量38%的脲醛尿素;N7:有效含氮量31.8%的草酰胺。采用田间小区试验,各试验小区面积均为40 m²,小区间筑土埂隔开,埂上覆膜,防止窜水窜肥,每次田间灌水深度4~5 cm,各小区基本一致。为了让径流自由发生,各小区排水口设置为5 cm高的平水口。当降雨和烤田期间有径流发生时,各小区在径流的前期、中期和后期分别在小区的排水口取水样68次,每次间隔10 min左右,当降雨时间较长时采样间隔适当调整,混匀后运回实验室,经定量滤纸过滤后测定其氮素含量。试验重复3次。

1.3.2 水稻产量及其构成因素 成熟期,根据普查的水稻平均穗数,各处理取代表性植株10穴,脱粒,通过水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空瘪粒,计算水稻穗粒数、结实率和千粒质量。

1.3.3 稻田地表径流量及总氮流失量 本试验所有小区地势平坦,田面处在同一水平面,每次灌水深度相当。因此,当稻田有径流发生时,设定为单位面积农田的地表径流量基本一致。通过设置在试验小区总排水沟的明渠流量计量地表径流总水量,测算出各试验小区地表径流量。同时采集各小区水样,随即带回实验室分析总氮含量。

总氮含量用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[18]。

1.3.4 稻田地表径流总氮流失率 稻田地表径流总氮流失率为地表径流总氮流失量与稻季氮肥施用量的比值。

1.3.5 水稻氮素偏流失率 水稻氮素偏流失率,为地表径流总氮流失量与水稻产量的比值。

1.4 数据分析方法

用Excel 2003软件作图,用SPSS 13.0软件进行统计分析,各处理间的比较采用最小显著差数(LSD)法,超过 $LSD_{0.05}$ 和 $LSD_{0.01}$ 水平的分别视为差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 不同类型缓控释肥对水稻产量形成的影响

2.1.1 不同类型缓控释肥对水稻产量及其构成因

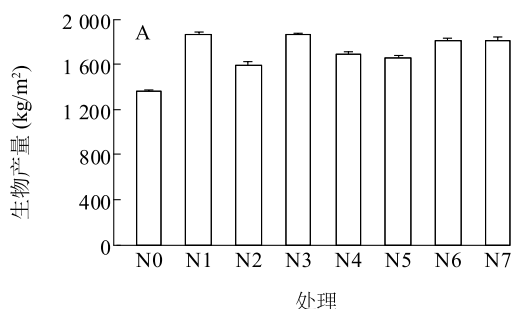
素的影响 不同类型缓控释肥对水稻产量及其构成因素的影响如表2所示。从产量看,N3处理水稻产量最高,不施氮肥的N0水稻产量最低。与N1施肥对照相比较,氮肥减量的N2、N4和N5处理水稻产量明显降低,差异均达显著水平;与N1施肥对照相比较,N6和N7处理水稻产量有所增加,但处理间的差异不明显。说明与N1施肥对照相比较,N2处理水稻产量显著降低,但是通过缓控释肥料的使用能够明显提高水稻产量,其中N3、N6和N7处理增产效果显著。

从水稻产量构成因素看,N1、N3和N6处理的有效穗数较多,不施氮肥的N0有效穗数显著低于其他处理。水稻每穗粒数以N7处理最多,其次为N3处理,N0处理最少,N4处理较N1施肥对照显著下降,N7处理较N1施肥对照显著增加。水稻结实率以N7处理最高,N1施肥对照最低,但不同处理之间的差异不显著。水稻千粒质量,N0不施氮肥对照和N1施肥对照相对较高,并显著大于其他处理,N2~N7 6个处理的水稻千粒质量基本接近。说明与N1施肥对照相比较,N3处理水稻产量显著提高,主要是因为其有效穗数和每穗粒数均表现为较高;N4和N5处理水稻产量显著降低,主要是因为其有效穗数和千粒质量均显著降低,每穗粒数和结实率处理间的差异不大。

2.1.2 不同类型缓控释肥对水稻生物产量和经济系数的影响 不同类型缓控释肥对水稻生物产量的

影响如图 1A 所示。不同处理水稻生物产量由高到低依次为 N1>N3>N7>N6>N4>N5>N2>N0, N1 施肥对照水稻生物产量最高, 不施氮肥的 N0 水稻生物产量最低。N1 施肥对照较 N3、N7、N6、N4、N5、N2 和 N0 处理水稻生物产量分别高 0.2%、2.6%、3.1%、10.2%、12.6%、17.1% 和 37.3%, 处理间的差异大部分达到显著水平。说明氮肥减量会降低水稻的生物产量。

由图 1B 可知, 不同处理水稻的经济系数由高到低依次为 N0>N6>N7>N3>N2>N4>N5>N1, 以不施氮肥的 N0 最高, N1 处理最低。处理间的差异大部分达到显著水平。说明缓控释肥尿甲醛 N6 和草酰胺 N7 处理水稻产量较高, 与其经济系数较高有关。



N0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 处理见表 1 注。

图 1 不同类型缓控释肥对水稻生物产量 (A) 和经济系数 (B) 的影响

Fig.1 Effects of different types of controlled release fertilizer on biomass yield (A) and economic index (B) of rice

2.2 地表径流量

通过农田排水沟渠安装的流量计计量农田地表径流量。由图 2 可知, 2016 稻季试验田共产生地表径流 6 次, 地表径流水总量为 $3.68 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 单次农田地表径流量最大值出现在 7 月上旬, 达到 $1.02 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 整个稻季来看, 农田地表径流主要发生在水稻生育前期、中期, 到水稻生育后期则相对减少。地表径流水量的多少与试验地点的降雨强度密切相关。

2.3 不同类型缓控释肥对稻田地表径流总氮质量浓度和总氮流失量的影响

不同类型缓控释肥对农田地表径流总氮质量浓度的影响如图 3 A 所示, 从不同处理来看, 稻田地表径流流失总氮质量浓度均为水稻生育前期最高, 随着水稻生育进程的推进呈逐渐下降的趋势。从整个稻季来看, 不同处理稻田地表径流流失总氮平均质

表 2 不同类型缓控释肥对水稻产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different types of controlled release fertilizer on rice yield and yield components

处理	1 m ² 有效穗数	每穗粒数	结实率 (%)	千粒质量 (g)	1 m ² 产量 (g)
N0	307.5c	116.6e	0.777a	27.8a	772.9e
N1	369.2a	129.2c	0.773a	27.6a	1 016.5b
N2	345.0b	123.4d	0.779a	26.9b	890.6d
N3	370.8a	134.7ab	0.780a	27.0b	1 051.5a
N4	343.3b	129.1c	0.785a	27.0b	938.3c
N5	345.8b	122.3d	0.800a	27.0b	914.5cd
N6	360.8a	131.8bc	0.796a	27.2b	1 028.0ab
N7	345.8b	137.5a	0.802a	26.9b	1 026.5ab

N0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 处理见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

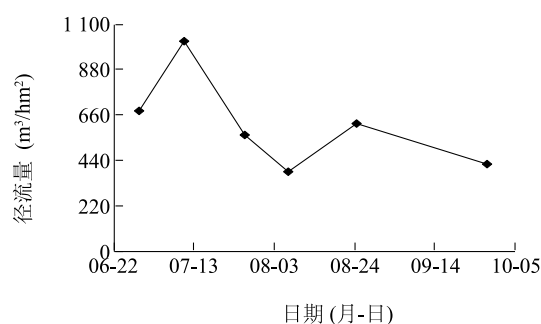
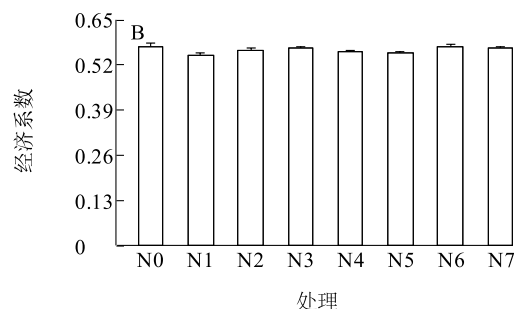


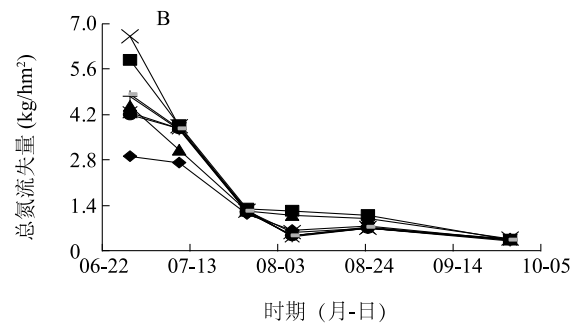
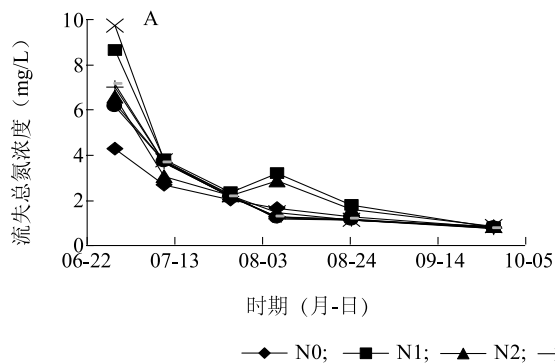
图 2 2016 年稻季农田地表径流量季节变化趋势

Fig.2 Variation of surface runoff in rice season in 2016

量浓度由高到低依次为 N1 (3.42 mg/L) > N3 (3.19 mg/L) > N2 (2.87 mg/L) > N7 (2.70 mg/L) > N6 (2.66 mg/L) > N4 (2.55 mg/L) > N5 (2.53 mg/L) > N0 (2.12 mg/L), 除不施氮肥的 N0 处理外, 缓控释肥的使用降低了稻季农田地表径流总氮质量浓度。

由图 3B 可知,不同处理稻田地表径流总氮流失量,六月底七月初由于氮肥作为水稻基肥和分蘖肥的大量施用,以及该时段本地区降雨量较大,因此稻田总氮流失量大,仅不施氮肥的 N0 相对较低。七月底八月初, N1 和 N2 处理,由于将氮肥作为水稻穗肥在此时间段施用,因此其总氮流失量明显大于其他处理。不同处理稻田地表径流水体总氮流失量,由高到低依次为 N1 (13.68 kg/hm²) > N3 (13.30 kg/hm²) > N7 (11.34 kg/hm²) > N2 (11.30 kg/hm²) > N6 (11.18 kg/hm²) > N4 (10.76 kg/hm²) > N5 (10.66

kg/hm²) > N0 (8.52 kg/hm²), N3、N7、N2、N6、N4、N5 和 N0 处理较 N1 处理总氮流失量分别减少 2.9%、20.7%、21.1%、22.3%、27.1%、28.4% 和 60.7%, 除不施氮肥的 N0 外,缓控释肥的使用降低了稻季农田地表径流总氮流失量,处理间的差异大部分达到显著水平。从不同处理总氮流失量的季节性变化来看,六月底七月初发生的 2 次径流总氮流失量超过整个稻季农田地表径流总氮流失量的 60%。因此,该时间段需要通过相关栽培技术措施的调节,有效减少稻田地表径流总氮流失量。



N0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 处理见表 1 注。

图 3 不同类型缓控释肥对稻田地表径流总氮质量浓度 (A) 和总氮流失量 (B) 的影响

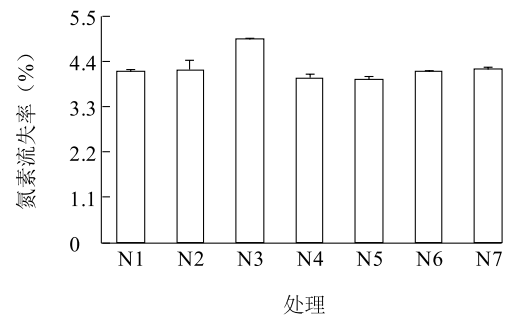
Fig.3 Effect of different types of controlled release fertilizer on total nitrogen concentration (A) and total nitrogen loss (B) of surface runoff in rice season

2.4 不同类型缓控释肥对稻田地表径流总氮流失率的影响

稻田地表径流总氮素流失率为地表径流总氮流失量占当季稻田氮肥施用量的比例,由图 4 可知,不同处理稻田地表径流水体总氮流失率,由高到低依次为 N3 (4.93%) > N7 (4.20%) > N2 (4.18%) > N1 (4.15%) > N6 (4.14%) > N4 (3.99%) > N5 (3.95%)。N3 处理显著大于其他处理,说明施用脲酶抑制剂虽然减缓了尿素的水解速度,减轻了其集中形成铵态氮和硝态氮的气态损失,但是却增加了氮素的径流损失率。此外,与 N1 处理相比较, N6 和 N7 处理未能明显减少农田地表径流总氮流失率; N4 和 N5 处理使农田地表径流总氮流失率显著降低。

2.5 不同类型缓控释肥对水稻氮素偏流失率的影响

将稻田每生产单位质量谷物的氮素流失量定义为氮素偏流失率,由图 5 可知,不同处理水稻氮素偏流失率,由高到低依次为 N1 (1.35 g/kg) > N2

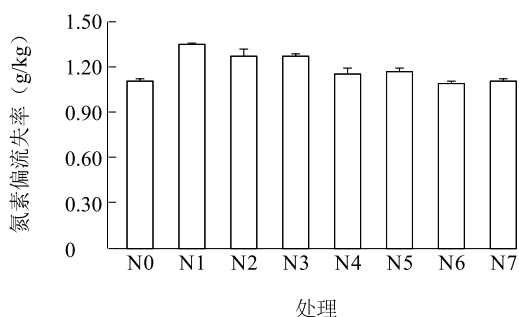


N0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 处理见表 1 注。

图 4 不同类型缓控释肥稻田地表径流总氮流失率

Fig.4 Effects of different types of controlled release fertilizer on total nitrogen loss rate of surface runoff in rice season

(1.27 g/kg) > N3 (1.26 g/kg) > N5 (1.17 g/kg) > N4 (1.15 g/kg) > N7 (1.10 g/kg) > N0 (1.09 g/kg) > N6 (1.08 g/kg), 与 N1 处理相比较,氮肥减量处理 (N2)、使用抑制剂处理 (N3), 以及通过硫包衣尿素处理 (N4)、包膜尿素处理 (N5)、尿甲醛处理 (N6) 和草酰胺处理 (N7) 等的替代施用, 均能显著减少水稻氮素偏流失率。



N0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 处理见表 1 注。

图 5 不同类型缓控释肥对水稻 N 素偏流失率的影响

Fig.5 Effects of different types of controlled release fertilizer on nitrogen drift loss rate of rice

3 讨论

缓控释氮肥由于改变了内核尿素粒子与交界环境的扩散通量,有效控制了氮素释放速率^[19],有利于水稻生育后期土壤氮素供应,有效增加水稻叶片叶绿素含量,促进了水稻花后的干物质生产,能有效提高水稻产量^[2]和氮素利用效率^[20]。因此,通过使用缓控释氮肥,可以减少水稻氮肥施用量和施肥次数,实现稻作生产节本增效^[21]。本研究结果表明,与农民习惯施肥量比较,在减少氮肥施用量条件下,通过添加脲酶抑制剂,以及使用脲醛尿素和草酰胺能够保证水稻高产,与多数研究中通过缓控释肥的施用,在氮肥适当减量条件下,能够提高水稻产量的结果^[22-23]基本一致。而本研究在氮肥减量施用 18.2% 条件下,不同类型缓控释肥对水稻产量的影响明显不同,硫包衣尿素和包膜尿素处理增产效果不明显,主要原因是其有效穗数相对较少。这可能与本研究氮肥减量幅度相对较大有关。曾建华等^[24]的研究结果表明,控释掺混肥养分减量 10% 能够保证水稻产量,当减量 20% 时,水稻明显减产。因为有些缓控释氮肥减量施用后,会使氮在水稻苗期的释放量过低,而氮肥基肥供应不足影响了水稻苗期的生长和分蘖的快速发生^[25],最终使水稻穗数减少,影响了水稻产量。缓控释肥的养分释放特征除了与自身特性直接相关外,还受土壤特性以及温度和光照等^[26-27]因素的影响。本研究在氮肥减量条件下,用脲醛尿素和草酰胺替代普通尿素保证了水稻高产,可能是其更适应本生态位的基本特点,其养分释放规律与水稻养分需求特性基本吻合,促

进了水稻的生产发育。关于硫包衣尿素和包膜尿素的养分释放特征,以及如何通过栽培措施的调节提高硫包衣尿素和包膜尿素施用下的水稻产量,有待于进一步研究。

关于稻田氮素流失量定位监测研究已有较多报道。前人研究结果^[28]表明,中国稻田氮肥损失率高达 50% 以上,其中,稻麦轮作区氮肥径流和淋溶损失接近氮肥施用的 6%^[29]。刘红江等^[30]研究发现,太湖流域稻麦农田氮素径流流失量约为 30.6 kg/hm²,占氮素投入量的 6.2%,稻季氮素的径流流失量远远大于麦季,通过秸秆还田和合理氮肥运筹可以有效减少稻田氮素流失量。关于缓控释氮肥对稻田氮素流失的影响,纪雄辉等^[31]的研究结果表明,控释氮肥能够显著降低施肥后 15 d 内稻田田面水和径流的氮质量浓度,显著减轻水稻生育前期的总氮径流损失。本研究结果表明,不同处理稻季农田地表径流总氮流失量平均为 11.34 kg/hm²,氮肥减量条件下,通过缓控释肥的使用均能够显著降低稻季农田地表径流总氮质量浓度和总氮流失量。这主要是因为,与普通速效型尿素比较,缓控释肥通过包膜以及抑制剂的使用,减缓了尿素的水解速度,控制了水稻生育前期的土壤氮素养分释放速率,减少硝化反硝化作用引起氮素损失的同时,减轻了水稻生育前期的氮素径流流失风险^[32]。长期监测试验结果也表明,稻季氮素径流流失主要集中在水稻生育前期,占稻季氮素总流失量的 60% 以上^[33]。因此,本研究不同类型缓控释肥料均能有效减少稻田氮素径流损失。本研究硫包衣尿素和包膜尿素对控制稻田氮素流失的效果相对更好,可能与其氮素养分在本研究条件下释放相对偏慢有关,但是这也影响了水稻前期的生长发育,从而影响了水稻产量。关于不同类型缓控释肥稻田施用后,氮素的渗漏和气态等途径的损失值得进一步深入研究。

在减少氮肥施用量条件下,通过施用缓控释肥料脲醛尿素和草酰胺,以及增施脲酶抑制剂,能够保证水稻产量。不同类型缓控释肥料均能显著降低稻田地表径流总氮流失量和水稻氮素偏流失率。硫包衣尿素和包膜尿素能够显著降低农田地表径流总氮流失率。脲醛尿素和草酰胺替代普通尿素在保证水稻产量的同时,减少了农田地表径流氮素流失量,降低了水稻氮素偏流失率,具有示范推广应用的潜力。就硫包衣尿素和包膜尿素而言,在减少稻田地表径

流总氮流失的同时,如何通过合理栽培措施的调节提高水稻产量值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] HORIE T, SHIRAIWA T, HOMMA K, et al. Can yields of low-land rice resume the increases that they showed in the 1980s [J]. *Crop Science*, 1999, 32:1552-1559.
- [2] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科技出版社,2000.
- [3] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783
- [4] 郑永美,丁艳锋,王强盛,等.起身肥对水稻分蘖和氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2008,34(3):513-519.
- [5] 崔玉亭,程 序,韩纯儒,等.苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J].生态学报,2000,20(4):658-662.
- [6] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [7] 叶 青,曹国军,耿玉辉.控释氮肥在小麦玉米轮作体系中的养分高效利用研究[J].江苏农业科学,2016,44(8):124-129.
- [8] PENG S B, BUREH R J, HUANG J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96:37-47.
- [9] 刘红江,郭 智,郑建初,等.不同栽培技术对水稻产量及地表径流 NPK 流失的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(9):1790-1796.
- [10] 景旭东,刘 源,林海琳,等.共轭酱渣废油包膜肥对玉米生长的影响及膜层结构分析[J].江苏农业学报,2016,32(3):563-569.
- [11] 王春梅,赵贵哲,刘亚青,等.含氮、磷包膜缓释肥的制备及其缓释性能研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(4):1027-1031.
- [12] 李子双,谭德水,李洪杰,等.不同控释肥对冬小麦产量及氮素利用的影响[J].山东农业科学,2017,49(8):73-77.
- [13] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.控释尿素在水及不同类型土壤中的养分释放特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):636-641.
- [14] 张 萌,马智黠,徐永康,等.贵州春马铃薯生物效应及土壤肥力对不同类型缓释肥的响应[J].南方农业学报,2017,48(5):793-799.
- [15] GENG J B, SUN Y B, ZHANG M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184:65-73.
- [16] 李 敏,郭熙盛,叶舒娅,等.硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):808-815.
- [17] 程金秋,朱 盈,魏海燕,等.缓控释肥料在水稻上的应用效果综述[J].江苏农业科学,2017,45(17):11-15.
- [18] 鲍士旦,史瑞和.土壤农化分析[M].北京:中国农业科技出版社,2005:69-74.
- [19] TRINH Y H, KUSHAARI K, SHUIB A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and decay release[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 130:34-42.
- [20] MALHI S, OLIVER E, MAYERLE G, et al. Improving effectiveness of seedrow-placed urea with urase inhibitor and polymer coating for durum wheat and canola[J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2003, 34(11/12):1709-1727.
- [21] 侯红乾,黄永兰,冀建华,等.缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J].中国水稻科学,2016,30(4):389-396.
- [22] 许仙菊,马洪波,宁运旺,等.缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):307-316.
- [23] 陈建生,徐培智,唐拴虎,等.一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J].应用生态学报,2005,16(10):1868-1871.
- [24] 曾建华,潘孝忠,吉清妹,等.控释掺混肥不同施用量对水稻产量的影响[J].广东农业科学,2014(24):72-75.
- [25] ZHAO S P, ZHAO X Q, SHI W M. Genotype variation in grain yield response to basal N fertilizer supply among different rice cultivars[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(59):12298-12304.
- [26] 张敬昇,李 冰,王昌全,等.控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):110-118.
- [27] WANG B, LI Y E, WAN Y F, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016(215):100-109.
- [28] 宋勇生,范晓晖.稻田氮挥发研究进展[J].生态环境,2003,12(2):240-244.
- [29] 向平安,周 燕,江巨鳌,等.洞庭湖区氮肥外部成本及稻田氮素经济生态最佳投入研究[J].中国农业科学,2006,39(12):2531-2537.
- [30] 刘红江,郑建初,陈留根,等.秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J].生态环境学报,2012,21(6):1031-1036.
- [31] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等.施用尿素和控释肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J].中国农业科学,2006,39(12):2521-2530.
- [32] DI H J, CAMERON K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 109(3):202-212.
- [33] 郭 智,肖 敏,陈留根,等.稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征[J].生态环境学报,2010,19(7):1622-1627.

(责任编辑:陈海霞)