

不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响

金树权, 陈若霞, 汪峰, 姚红燕, 谌江华

(宁波市农业科学研究院生态环境研究所, 浙江 宁波 315040)

摘要: 通过构建包括不同氮肥类型、氮肥用量、施肥方式和施肥次数的6种氮肥运筹模式,分析了不同氮肥运筹模式对稻田田面水各形态氮浓度变化和水稻产量的影响。结果表明:不同时期施用缓控释肥和尿素后,总氮和铵态氮浓度均在1天达到峰值,硝态氮浓度在2~3天达到峰值,之后逐渐下降趋于稳定。铵态氮为各处理施肥后初期的主要氮形态,1天时铵态氮占总氮比例达50.6%~92.8%,而硝态氮仅占3.8%~22.6%。田面水总氮和铵态氮峰值浓度大小与氮肥类型、施用用量和施肥方式均存在相关性,等氮量施用条件下,田面水总氮和铵态氮峰值浓度大小顺序为撒施尿素处理>撒施缓控释肥处理>侧深施缓控释肥处理,在N施用量48 kg/hm²条件下,撒施尿素处理、撒施缓控释肥处理、侧深施缓控释肥处理的总氮和铵态氮平均峰值浓度分别为38.44,16.44,7.55 mg/L和34.39,13.00,3.82 mg/L。等氮施用量和相同施肥次数条件下,基肥采用侧深施缓控释肥的处理4,5,6比相应的撒施缓控释肥的处理1,2,3的产量分别提高2.8%,3.5%,2.7%。基肥采用侧深施缓控释肥和“一基一穗”2次施肥的处理6的水稻产量,在氮肥总施用量减少30%条件下,仅比基肥采用撒施缓控释肥和“一基一穗一穗”3次施肥的处理1的水稻产量减少0.3%。侧深施缓控释肥可以有效降低施肥初期田面水铵态氮峰值浓度,从而减少氨挥发和降低径流流失风险,并在一定程度减量条件下不会对水稻产量产生影响。

关键词: 氮肥管理; 田面水; 氮浓度; 水稻产量

中图分类号:S153.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0242-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.035

Effects of Different Nitrogen Fertilizer Application Modes on the Variation of Nitrogen Concentration in Paddy Field Surface Water and the Yield of Rice

JIN Shuquan, CHEN Ruoxia, WANG Feng, YAO Hongyan, CHEN Jianghua

(Ecolgoy and Environmental Institute, Ningbo Academy of Agricultural Science, Ningbo, Zhejiang 315040)

Abstract: The effects of different nitrogen application modes on the variation of nitrogen concentrations in paddy field surface water and rice yield were analyzed, through constructing six nitrogen application modes with different fertilizer types, fertilizer amounts, fertilization modes and times. The results showed that after slow-controlled fertilization and urea application, the concentration of total nitrogen and ammonium reached peak in 1 day, and the concentration of nitrate reached peak in 2 ~ 3 days, and then gradually decreased to a stable level. Ammonium nitrogen was the main form of nitrogen in the initial stage after fertilization, and the proportion of ammonium nitrogen in total nitrogen concentration reached 50.6% ~ 92.8% in 1 day, while nitrate nitrogen only accounted for 3.8% ~ 22.6%. The peak concentration of total nitrogen and ammonium nitrogen in surface water was correlated with fertilizer type, fertilizer amount and fertilization mode. Under the condition of equal nitrogen fertilization, the order of peak concentration of total nitrogen and ammonium nitrogen in surface water was as follows: Spraying urea treatment > spraying slow-release fertilizer treatment > side-deep application of slow-release fertilizer treatment. Under 48 kg/hm² N fertilization condition, the average peak concentrations of total nitrogen and ammonium nitrogen in the treatments of spraying urea, spraying slow-release fertilizer, and side-deep application of slow-release fertilizer were 38.44, 16.44, 7.55 mg/L, and 34.39, 13.00 and 3.82 mg/L, respectively. Under the same amount of nitrogen application and times of fertilization, the yields of treatments 4, 5, and 6 with side-deep slow-release fertilizer were 2.8%, 3.5%, and 2.7% higher than those of treatments 1, 2 and 3 with corresponding spraying slow-release fertilizer, respectively. Under the condition that the total amount of nitrogen fertilizer was reduced by 30%, the

收稿日期:2019-07-07

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200800)

第一作者:金树权(1981—),男,博士,副研究员,主要从事农业面源污染控制与河湖水环境治理研究。E-mail:jinsuq@126.com

通信作者:陈若霞(1962—),女,硕士,研究员,主要从事水稻减肥减药栽培技术研究。E-mail:crx900@163.com

yield of rice of treatment 6 with side-deep application of slow-release fertilizer during base fertilizer period and two-times fertilization only decreased by 0.3% compared with that treatment 1 with spraying slow-release fertilizer during base fertilizer period and three-times fertilization. The results showed that side deep application of slow-release fertilizer could effectively reduce the peak concentration of ammonium nitrogen in surface water at the initial stage of fertilization, thus reducing the risk of ammonia volatilization and runoff loss, and would not affect rice yield under certain reduction conditions.

Keywords: nitrogen fertilizer management; surface water of paddy field; nitrogen concentration; yield of rice

农业面源污染目前已经成为全世界关心的重要环境问题之一^[1-2],而农田氮素流失作为农业面源污染的重要来源尤其受到关注^[3-5]。目前,由于过量或不合理施用肥料,我国稻田氮肥利用率仅有 30%~35%^[6],大量氮肥施入稻田后通过径流、淋洗、氨挥发、N₂O 排放等途径排放到大气和水环境中,引发一系列如水体富营养化、温室效应等环境问题^[7-9]。

已有研究^[10-13]表明,农田氮素损失主要受氮肥类型、用量、施肥方式和次数等各种因素影响,尿素等化肥施入农田后,在厌氧或好氧条件下均能首先转化为铵态氮,化肥施入后早期铵态氮浓度过高存在较大的径流流失风险和氨挥发损失。王强等^[14]指出,施氮后总氮和铵态氮在 1 天后达到极大值,施氮后 9 天内是防止氮大量流失的关键时期;俞映倬等^[15]研究表明,田面水铵态氮与稻田氨挥发通量呈极显著相关关系。可见施肥后初期是水稻田农业面源污染控制的关键时期,如何降低施肥后初期的田面水总氮和铵态氮浓度十分重要。缓控释肥能够控制肥料中养分释放速度,可以减少氮素损失,提高水稻氮素利用率。近年来,随着现代农业技术不断提升和务农劳动力的日益缺乏,采用插秧机械侧深施一体化机械操作越来越受到欢迎,目前水稻侧深施技术研究较多关注对产量的影响^[16-17],而对田间氮素的变化研究相对较少。

本研究以减少田间氮素损失和水稻不减产为双重目标,通过构建包括不同氮肥类型、氮肥用量、施肥方式和施肥次数的 6 种氮肥运筹模式,跟踪分析不同氮肥运筹模式对稻田田面水各态氮浓度变化和水稻产量的影响,以为农业面源污染减排工作提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2018 年 6 月 18 日至 11 月 21 日在浙江省宁波市鄞州区邱隘镇上万龄村(121°39.607'E, 29°49.735'N)进行。水稻田前茬无作物,单季种植。供试水稻品种为“甬优 1540”,籼粳杂交品种,5 月 24 日播种育苗,6 月 18 日机械移栽,采用井关 PZ60ADLF 型带侧深施肥功能的插秧机,缓控释肥

可与插秧同步进行,分别在 6 月 18 日、7 月 4 日和 7 月 27 日施用基肥、分蘖肥和穗肥,田间种植密度 30 cm×22 cm。供试土壤为水稻土,pH 为 5.67,有机质含量为 35.3 g/kg,全氮含量为 2.97 g/kg,碱解氮含量为 249.7 mg/kg,有效磷含量为 65.6 mg/kg,速效钾含量为 159.6 mg/kg。

试验中采用缓控释肥(N:P₂O₅:K₂O 为 20:14:16)和尿素(N=46%)2 种氮肥,共设置 6 个氮肥运筹模式处理和 1 个不施肥处理,各处理重复 3 次,其中处理 1,2,4,5 采用“一基一蘖一穗”3 次施肥,处理 3,6 采用“一基一穗”2 次施肥,各处理在穗肥期统一追施氯化钾。各处理氮肥类型、用量、施用方式和次数的运筹方案见表 1。

表 1 不同处理的氮肥运筹方案

处理	单位:kg/hm ²			
	基肥	蘖肥	穗肥	总量
处理 1(100%NSS-3)	96(SS)	72(SU)	72(SU)	240
处理 2(70%NSS-3)	48(SS)	48(SU)	72(SU)	168
处理 3(70%NSS-2)	96(SS)	0	72(SU)	168
处理 4(100%NDS-3)	96(DS)	72(SU)	72(SU)	240
处理 5(70%NDS-3)	48(DS)	48(SU)	72(SU)	168
处理 6(70%NDS-2)	96(DS)	0	72(SU)	168
处理 7(0N)	0	0	0	0

注:SS 代表撒施缓控释肥;DS 代表侧深施缓控释肥;SU 代表撒施尿素;-2,-3 代表施肥次数。

1.2 采样与测定方法

水样采集与测定:分别于 2018 年 6 月 18 日、7 月 3 日和 7 月 29 日进行基肥,分蘖肥和穗肥的施用,施肥后统一在 1(次日),2,3,5,7,9,11 天上午 9:00 左右进行各小区田面水取样,过滤后进行水质总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)测定,其中 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,铵态氮采用纳氏试剂分光光度法测定,硝态氮采用紫外分光光度法^[18]测定。

1.3 数据处理

常规数据处理采用 Excel 2007,方差分析采用 SPSS 19.0 处理,采用 LSD 法进行差异显著性分析(P<0.05),制图采用 Origin 7.5 软件。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥运筹模式对田面水总氮浓度变化的影响

从图 1 可以看出,不同肥料处理的田面水总氮浓度均在施肥 1 天后达到浓度峰值,此后逐渐降低。田面水总氮的峰值浓度大小受肥料类型影响很大,如处理 2 在基肥期和蘖肥期分别撒施等氮量(N 施用量 48 kg/hm^2)的缓控释肥和尿素,施肥 1 天后基肥期撒施缓控释肥处理的田面水总氮峰值浓度为 16.44 mg/L 显著低于蘖肥期撒施尿素处理的 38.04 mg/L ,降低幅度达 56.2% 。同时,田面水总氮的峰值浓度与肥料施用量相关,如高 N 量(96 kg/hm^2)撒施缓控释肥的基肥期处理 1 和减半 N 量(48 kg/hm^2)撒施缓控释肥的基肥期处理 2 的田面水总氮峰值浓度

分别为 $21.42, 16.44 \text{ mg/L}$,降低幅度为 23.3% ;而分蘖期撒施尿素处理 1,4(N 施用量 72 kg/hm^2)和低氮量蘖肥期撒施尿素的处理 2,5(N 施用量 48 kg/hm^2)的田面水总氮峰值浓度分别为 $50.68, 52.90 \text{ mg/L}$ 和 $38.04, 37.76 \text{ mg/L}$,平均下降了 26.6% 。田面水总氮的峰值浓度还与氮肥施用方式相关,撒施缓控释肥的处理 1(N 施用量 96 kg/hm^2)、处理 2(N 施用量 48 kg/hm^2)和侧深施缓控释肥的处理 4(N 施用量 96 kg/hm^2)、处理 5(N 施用量 48 kg/hm^2)的田面水总氮峰值浓度分别为 $21.42, 16.44 \text{ mg/L}$ 和 $10.66, 7.55 \text{ mg/L}$ 。可见,在低施肥量(48 kg/hm^2)条件下,采用缓控释肥加侧深施肥处理,可大幅度降低田面水总氮浓度峰值,与等氮量的撒施缓释肥处理相比,降低幅度为 54.1% ,与撒施尿素处理相比,降低幅度达 80.2% 。

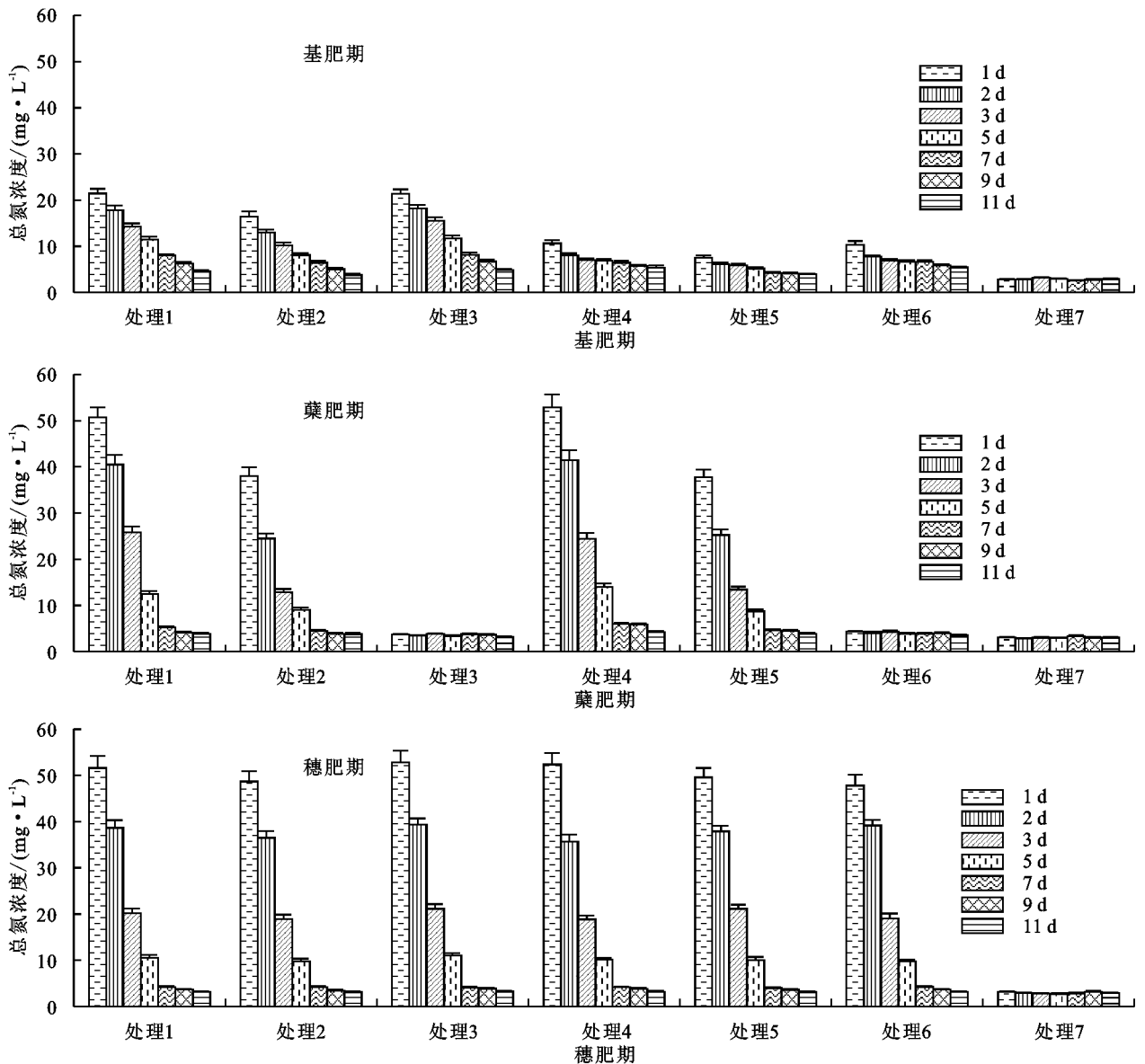


图 1 不同施肥期的稻田田面水总氮浓度动态变化

蘖肥期和穗肥期的撒施尿素各处理田面水总氮浓度前 7 天下降最快,之后趋于稳定(图 1);7 天时田

面水总氮浓度仅为峰值浓度的 $7.6\% \sim 12.1\%$,浓度值范围为 $3.98 \sim 5.95 \text{ mg/L}$ 。相同时间间隔比较,基

肥期的撒施缓控释肥处理 1,2,3 在 7 天时田面水总氮浓度为峰值浓度的 29.3%~31.4%,浓度值范围为 6.43~8.13 mg/L;基肥期的侧深施缓控释肥处理 4,5,6 在 7 天时田面水总氮浓度为峰值浓度的 53.8%~56.4%,浓度值范围为 4.19~6.61 mg/L。11 天时,基肥期采用侧深施缓控释肥处理 4,5,6 的田面水总氮浓度略高于相应的撒释处理 1,2,3。

2.2 不同氮肥运筹模式对田面水铵态氮浓度变化的影响

与田面水总氮浓度变化相似,不同施肥处理的田面水铵态氮浓度均在施肥后 1 天达到浓度峰值,此后逐渐降低(图 2)。同样,田面水铵氮的峰值浓度

大小与肥料类型,肥料用量和施肥方式等相关。蘖肥和穗肥期的撒施尿素各处理田面水铵态氮浓度前 7 天下降最快,之后趋于稳定,7 天时田面水铵态氮浓度为峰值时的 3.3%~5.7%,浓度值范围为 1.55~2.16 mg/L。相同时间间隔比较,基肥期的撒施缓控释肥处理 1,2,3 在 7 天时田面水铵态氮浓度为峰值浓度的 15.4%~19.4%,浓度值范围为 3.66~4.81 mg/L。基肥期的侧深施肥处理 4,5,6 在 7 天时的田面水铵态氮浓度为峰值时的 41.1%~50.6%,浓度值范围为 2.64~3.74 mg/L。11 天时,采用侧深施缓控释肥处理的田面水铵态氮浓度略高于相应的撒施处理。

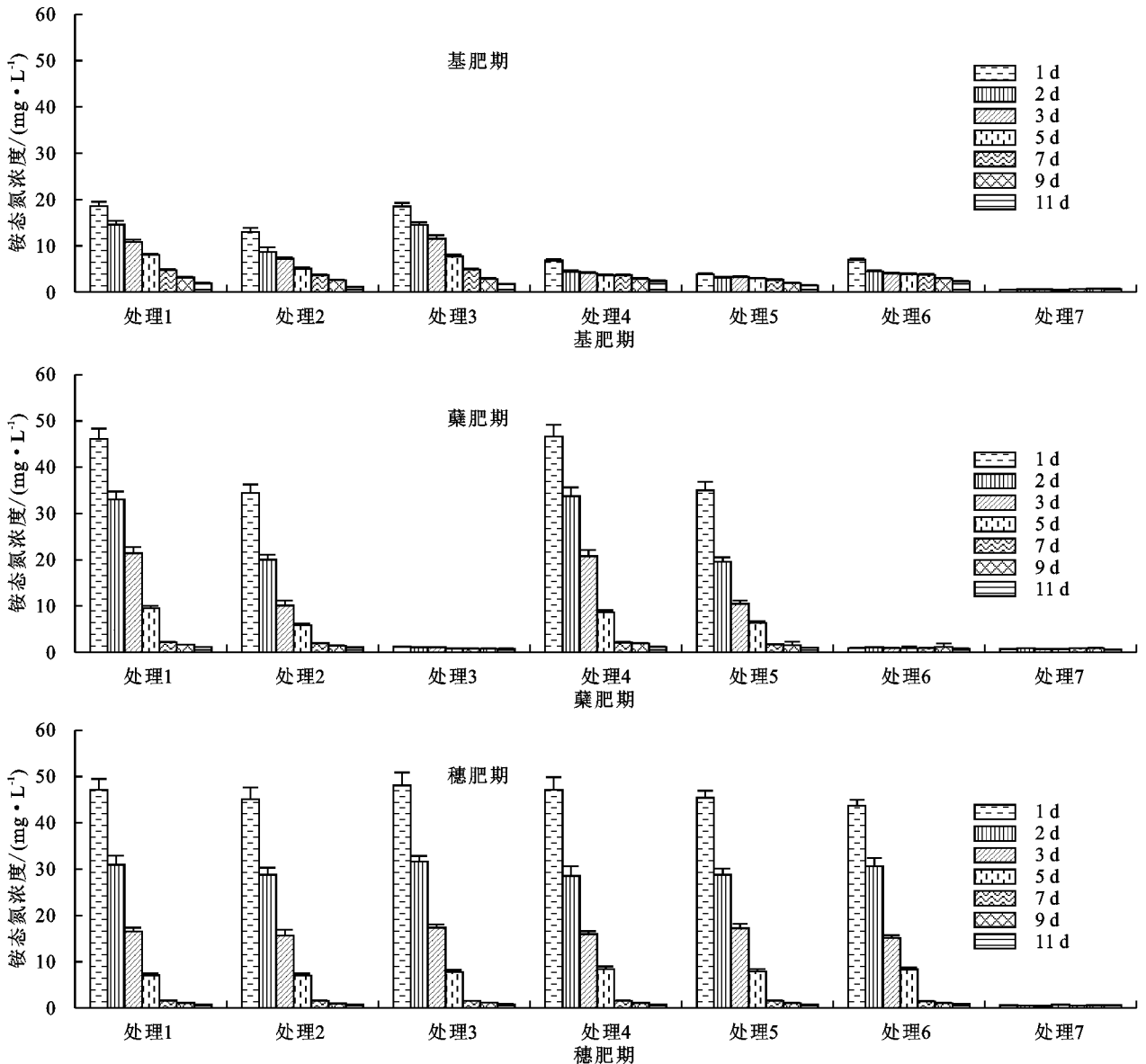


图 2 不同施肥期的稻田田面水铵态氮浓度动态变化

2.3 不同氮肥运筹模式对田面水硝态氮浓度变化的影响

不同肥料处理的田面水硝态氮浓度与总氮和铵态氮浓度变化存在较大的差异,各肥料处理的硝态氮

浓度在 2~3 天时达到浓度峰值,之后逐渐下降并在 7 天后趋于稳定(图 3)。各施肥处理的硝态氮峰值浓度范围为 1.37~4.85 mg/L,而研究期间不施肥处理 7 的硝态氮浓度范围为 0.01~0.74 mg/L。

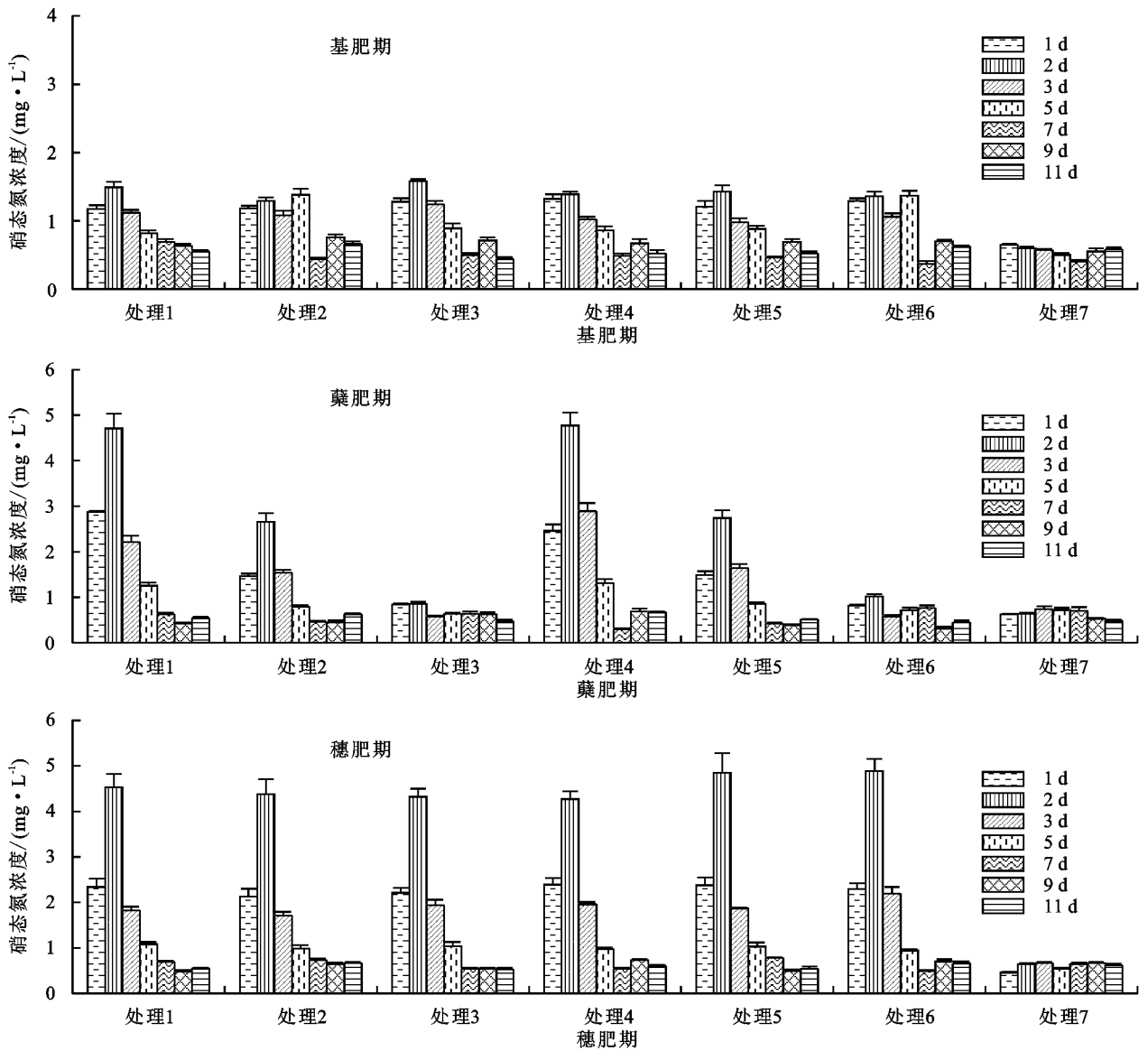


图 3 不同施肥期的稻田田面水硝态氮浓度动态变化

2.4 不同氮肥运筹模式对水稻产量的影响

由表 2 可知,不施肥处理 7 的有效穗,每穗粒数和产量等指标均低于各施肥处理,可见不施肥将对水稻的穗粒结构和产量产生较大影响,与处理 1 相比产量减少 16.7%。在氮肥总用量减少 30% 情况下,采用基肥撒施缓控释肥的处理 2,3 比处理 1 产量减少 1.9%,2.9%,采用基肥侧深施缓控释肥的处理 5,6 比处理 4 产量减少 1.3%和 3.0%。等氮施用量和相

同施肥次数条件下,采用基肥侧深施缓控释肥的处理 4,5,6 比相应的撒施缓控释肥的处理 1,2,3 的产量分别提高 2.8%,3.5%和 2.7%,可见基肥采用侧深施方式可一定程度提高水稻产量。进一步比较,基肥采用侧深施缓控释肥和“一基一穗”2 次施肥的处理 6 的水稻产量,在氮肥总施用量减少 30% 条件下,仅比基肥采用撒施缓控释肥和“一基一穗”3 次施肥的处理 1 的水稻产量减少 0.3%,未对产量产生显著影响。

表 2 不同氮肥运筹模式对水稻穗粒结构及产量的影响

处理	有效穗数/(穗·m ⁻²)	每穗粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	产量/(t·hm ⁻²)	产量增幅/%
处理 1	221.2c	314.4c	82.7a	21.9a	9.30cd	0
处理 2	217.4bc	319.2c	82.3a	21.9a	9.12b	-1.9
处理 3	206.8b	322.2c	82.2a	22.5b	9.03b	-2.9
处理 4	213.6bc	338.4d	82.9a	21.9a	9.56e	2.8
处理 5	223.5c	301.0b	80.7a	22.8c	9.44de	1.5
处理 6	214.4bc	334.8d	82.0a	21.8a	9.27c	-0.3
处理 7	193.2a	274.6a	87.5b	22.8c	7.75a	-16.7

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平上显著。

3 讨论

已有研究^[19-20]表明,水稻田面水总氮和铵态氮浓度一般在施肥后 1~2 天达到峰值浓度,本研究中各处理在施用缓控释肥和尿素后,田面水总氮和铵态氮浓度均在 1 天达到最高,此结论与相似研究^[19-20]基本一致。从田面水中氮的形态组成比例和铵态氮浓度值来看,施用肥料后铵态氮是最主要的氮形态,施肥后 1 天时,各时期各施肥处理田面水铵态氮浓度占总氮比例为 50.6%~92.8%,而硝态氮浓度仅占 3.8%~22.6%。其中基肥期撒施缓控释肥后 1 天田面水铵态氮浓度范围为 13.00~18.59 mg/kg,占总氮比例为 79.1%~86.8%,基肥期侧深施缓控释肥后 1 天田面水铵态氮浓度范围为 3.82~6.94 mg/kg,占总氮比例为 50.6%~67.0%,蘖肥和穗肥期撒施尿素后 1 天田面水铵态氮浓度范围为 34.39~48.11 mg/kg,比例达 88.2%~92.8%,不施肥处理铵态氮浓度比例仅为 18.8%~21.3%,可见铵态氮是施肥后初期田面水的最主要的氮形态,而采用缓控释肥能降低初期铵态氮浓度,采用侧深施缓控释肥方式能进一步降低初期田面水铵态氮浓度。进一步比较图 1 和图 2 可以看出,在等施氮量(N 施用量 48 kg/hm²)条件下,田面水总氮和铵态氮峰值浓度大小顺序均为撒施尿素处理>撒施缓控释肥处理>侧深施缓控释肥处理,蘖肥期撒施尿素的处理 2、基肥期撒施缓控释肥的处理 2、基肥期侧深施缓控释肥处理 5 的田面水总氮和铵态氮浓度分别为 38.44,16.44,7.55 mg/L 和 34.39,13.00,3.82 mg/L。田面水铵态氮浓度与氨挥发存在正相关关系^[15,21],田面水铵态氮浓度过高将导致大量氨挥发;另外,施肥后总氮和铵态氮浓度过高,存在强降雨条件下地表径流氮流失的风险^[14,22]。

从不同氮肥运筹模式和水稻产量的相关性可以看出,不施肥处理会对水稻的穗粒结构和产量产生影响,导致水稻减产损失,本研究中不施肥处理 7 比处理 1 减量 16.7%,如果长期不施肥减产幅度将进一步扩大^[23-24]。本研究在等氮肥施用量和相同施肥次数条件下,基肥采用侧深施方式比撒施方式可相应提高水稻产量 2.7%~3.5%,这可能是由于采用基肥侧深施方式能减少氮的挥发、地表径流等损失,而更多被作物吸收,采用侧深施方式可提高氮肥利用效率。本研究中,采用“一基一穗”2 次和基肥侧深施方式的处理 6,在氮肥总施用量减少 30%条件下,与采用“一基一穗”3 次和基肥撒施方式的处理 1 比较产量仅减少 0.3%,该结果表明,基肥采用侧深施方式可有效提高氮利用效率,一定程度肥料减量和减少施肥次数条件下不会对水稻产量产生显著影响,这一结论与相关研究^[25-26]一致,当然,这一研究结果需要长期定位试验进一步进行论证。

4 结论

(1)各处理施用缓控释肥和尿素后,总氮和铵态氮均在 1 天达到浓度峰值,硝态氮在 2~3 天达到浓度峰值,之后逐渐下降趋于稳定,铵态氮为各处理施肥后初期的主要氮形态,1 天时铵态氮占总氮浓度比例达到 50.6%~92.8%,硝态氮仅占 3.8%~22.6%。

(2)田面水总氮和铵态氮峰值浓度大小与氮肥类型、用量和施肥方式均存在相关性,在等氮量施用条件下,田面水总氮和铵态氮峰值浓度大小顺序为撒施尿素处理>撒施缓控释肥处理>侧深施缓控释肥处理。

(3)等氮施用量和相同施肥时间条件下,基肥采用侧深施方式比撒施方式提高水稻产量 2.7%~3.5%。

(4)基肥采用侧深施缓控释肥和“一基一穗”2 次施肥处理 6 的水稻产量,在氮肥总施用量减少 30%条件下,仅比基肥采用撒施缓控释肥和“一基一穗”3 次施肥的处理 1 的水稻产量减少 0.3%,未对产量产生显著影响。

参考文献:

- [1] Xiang C Y, Wang Y, Liu H W. A scientometrics review on nonpoint source pollution research [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 400-408.
- [2] 武淑霞,刘宏斌,刘申,等. 农业面源污染现状及防控技术[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(5): 23-30.
- [3] 张红举,陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. *水资源保护*, 2010, 26(3): 87-90.
- [4] 丁燕,杨宪龙,同延安,等. 小麦-玉米轮作体系农田氮素淋失特征及氮素表观平衡[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1914-1921.
- [5] Daniels M B, Sharpley A, Harmel R D, et al. The utilization of edge-of-field monitoring of agricultural runoff in addressing nonpoint source pollution [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(1): 1-8.
- [6] 张智,王伟妮,李昆,等. 四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 234-241.
- [7] Fu J, Wu Y L, Wang Q H, et al. Importance of sub-surface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 627-635.
- [8] 薛建福,濮超,张冉,等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 1-9.
- [9] Fu J, Wu Y L, Wang Q H, et al. Importance of sub-surface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213(1): 627-635.
- [10] 斯林林,周静杰,吴良欢,等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5383-5390.
- [11] 张亦涛,王洪媛,刘申,等. 氮肥农学效应与环境效应国际研究发展态势[J]. *生态学报*, 2015, 36(15): 4594-4608.

- [12] 侯朋福,薛利祥,俞映惊,等.缓控释肥侧深施对稻田氮挥发排放的控制效果[J].环境科学,2017,38(12):5326-5332.
- [13] 薛利红,俞映惊,杨林章.太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J].环境科学,2011,32(4):1133-1138.
- [14] 王强,杨京平,陈俊,等.非完全淹水条件下稻田表面水体中三氮的动态变化特征研究[J].应用生态学报,2004,14(7):1182-1186.
- [15] 俞映惊,薛利红,杨林章.太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氮挥发特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1682-1689.
- [16] 马昕,杨艳明,刘智蕾,等.机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1095-1103.
- [17] 鲁立明,陈少杰,蒋琪.侧深施肥技术对机插早稻产量的影响[J].中国稻米,2018,24(6):93-94.
- [18] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [19] 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损失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):105-118.
- [20] Zhang S J, Wang L, Ma F, et al. Reducing nitrogen runoff from paddy fields with arbuscular mycorrhizal fungi under different fertilizer regimes [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016,46:92-100.
- [21] Xu J Z, Peng S Z, Yang S H, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements [J]. Agricultural Water Management,2012,104:184-192.
- [22] Huang N B, Sun B L, Li R R, et al. A field-scale observation method for non-point source pollution of paddy fields [J]. Agricultural Water Management,2014,146:305-313.
- [23] 李忠芳,张水清,李慧,等.长期施肥下我国水稻土基础地力变化趋势[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1394-1402.
- [24] Wei H Y, Chen Z F, Xing Z P, et al. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. Journal of Integrative Agriculture,2018,17(10):2222-2234.
- [25] Pan S G, Wen X C, Wang Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China [J]. Field Crops Research,2017,203(1):139-149.
- [26] Ke J, He R C, Hou P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2018,265(1):402-412.
- (上接第 241 页)
- [22] Li M Z, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research,2009,113(1):41-47.
- [23] 王勇,宋尚有,樊廷录,等.黄土高原旱地秋覆膜及氮肥秋基春追比例对春玉米产量和品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(3):460-470.
- [24] 郭雪姣,艾应伟,王克秀,等.不同年限铁路边坡人工土壤团聚体中碳氮磷分布特征[J].水土保持学报,2015,29(4):207-211,217.
- [25] 刘晓利,何园球,李成亮,等.不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J].土壤学报,2009,46(2):255-262.
- [26] 郭天雷,史东梅,卢阳,等.几种保护措施对紫色丘陵区坡耕地土壤团聚体结构及有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):197-203.
- [27] 王秀娟,解占军,董环,等.秸秆还田对玉米产量和土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J].玉米科学,2018,26(1):108-115.
- [28] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J].生态学报,2006,26(2):364-372.
- [29] 任江波,李钠钾,秦平伟,等.不同覆盖材料对土壤理化性状和微生物量碳氮含量的影响[J].西南农业学报,2018,31(10):2140-2145.
- [30] Hargreaves P R, Brookes P C, Gjs R, et al. Evaluating soil microbial biomass carbon as an indicator of long-term environmental change [J]. Soil Biology & Biochemistry,2003,35(3):401-407.
- [31] 付鑫,王俊,赵丹丹.地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):239-243.
- [32] 孙元宏,高雪莹,赵兴敏,等.添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响[J].土壤学报,2017,54(4):1009-1017.
- [33] Gu C, Liu Y, Mohamed I, et al. Dynamic changes of soil surface organic carbon under different mulching practices in citrus orchards on sloping land [J]. PLoS One, 2016,11(12):e0168384.
- [34] Sainju U M, Caesartonthat T, Jabro J D. Carbon and nitrogen fractions in dryland soil aggregates affected by long-term tillage and cropping sequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(5):1488-1495.
- [35] Park E J, Woo J S, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability [J]. Soil Biology and Biochemistry,2007,39(11):2758-2768.