

控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响^①

李玉浩¹, 何杰¹, 王昌全^{1*}, 李冰¹, 梁靖越¹, 李新悦¹, 张敬昇¹, 尹斌²

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为发挥控释氮肥与速效氮肥各自优势, 从土壤氮素供应与作物生长角度探索其适宜配比, 通过盆栽试验研究了不同控释氮肥配比(0, 10%, 20%, 40%, 80%, 100%)尿素处理对土壤无机氮含量、微生物数量及水稻株高、干物质累积和产量构成的影响。结果表明, 配施 40% 控释氮肥处理对水稻生育中后期土壤无机氮影响最优, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较单施尿素处理分别提高 10.11%~17.02% 和 12.17%~17.21%。拔节至成熟期, 40% 控释氮肥处理土壤细菌数量最多, 与单施尿素处理差异显著; 放线菌数量以 20%~40% 控释氮肥处理较为丰富; 真菌数量在 80% 控释氮肥处理下最大。水稻生育中后期, 40% 控释氮肥处理的水稻株高和干物质质量较单施尿素处理提高 4.73%~10.18% 和 13.7%~17.88%; 水稻产量以 40% 控释氮肥处理最高, 较单施尿素和单施控释氮肥分别提高 13.59% 和 11.4%, 且水稻有效穗数、千粒重和穗粒数显著高于单施尿素处理。综上, 40% 控释氮肥 + 60% 尿素处理增加了土壤中无机氮含量, 促进土壤微生物繁殖, 水稻株高和干物质积累量大, 优化了产量构成因子, 达到了水稻增产目标, 是值得推荐的控释氮肥配施处理。

关键词: 控释氮肥; 土壤无机氮; 土壤微生物; 水稻产量

中图分类号: S146 文献标识码: A

众所周知, 农业生产中使用化肥不合理, 不仅会造成肥料养分的流失, 也可能导致作物产量降低。据世界粮农组织统计, 亚洲三分之一的水稻种植区域在中国, 其施肥管理对保障粮食安全和促进肥料高效利用具有重要现实意义^[1-2]。水稻氮肥的施用对其生长发育、产量和品质形成至关重要, 稻田中常规尿素施用, 具有成本低、养分供应快、适应能力强等特点^[3], 但往往存在随水流失严重、肥料利用率低等问题, 控释氮肥能有效避免常规尿素氮素释放过快造成的氮素流失^[4]。但控释氮肥的价格普遍较高^[2], 且受温度、气候限制较大^[5]。因此, 将常规尿素与控释氮肥进行配比施用, 优势互补, 可以在降低施肥成本的同时使氮肥养分得到充分利用^[5]。土壤无机氮是植物能直接吸收的氮素形态, 能促进植物生长; 土壤微生物是土壤养分转化的重要媒介, 常常作为评定土壤养分的因素之一^[6]。因此, 本文采用不同比例控释掺混氮肥处理, 探究水稻各生育期土壤无机氮含量、微生物数量, 以及水稻生长、干物质积累与产量构成等的变化特征, 以此从土壤养分供应和水稻生长发育角度, 探索

适宜的控释氮肥配施尿素比例, 为控释氮肥在水稻生产上的合理施用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试土壤

盆栽试验于 2016 年 5–9 月在四川农业大学资源学院盆栽研究室进行。供试土壤取自四川农业大学崇州市桤泉镇试验基地 0~30 cm 耕层, 土壤类型为水稻土。土壤基础养分含量为有机质 26.96 g/kg, 全氮 1.33 g/kg, 碱解氮 58.25 mg/kg, 有效磷 12.45 mg/kg, 速效钾 95.04 mg/kg, pH 6.45。

1.2 供试水稻

供试水稻品种为 F 优 498, 由四川农业大学水稻研究所提供, 生育期约为 130 d。

1.3 供试肥料

控释氮肥由南京土壤研究所研制, 氮质量分数为 41.4%, 氮素释放时间约为 90 d。

尿素由四川美丰化工有限公司生产, 氮质量分数为 46.4%。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301701)资助。

* 通讯作者(w.changquan@163.com)

作者简介: 李玉浩(1997—), 男, 山东泰安人, 本科生, 主要研究方向为土壤氮素转化。E-mail: talyh2016@163.com

磷源、钾源分别为分析纯 KH_2PO_4 和 KCl ，由北京鹏彩精细化工有限公司生产。

1.4 试验设计

盆栽塑料盆内径 35 cm、高 33 cm，每盆装过 1 mm 筛的风干土 15 kg。设计 7 个处理：CK(不施氮肥)，T1(100% 尿素)，T2(10% 控释氮肥 + 90% 尿素)，T3(20% 控释氮肥 + 80% 尿素)，T4(40% 控释氮肥 + 60% 尿素)，T5(80% 控释氮肥 + 20% 尿素)，T6(100% 控释氮肥)。施氮量保持一致(CK 不施氮)，以 $\text{N}0.15 \text{ g/kg}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 0.075 \text{ g/kg}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 0.06 \text{ g/kg}$ 施入土壤，混合均匀。试验于 2016 年 5 月 25 日播种，每盆移栽长势均匀良好的水稻 4 株。每个处理重复 12 次，共计 84 盆，随机摆放。盆栽试验进行过程中，水稻拔节期前进行淹水处理，拔节期后对每个盆栽每周浇水 2~3 次，每次 1 L，除草。

1.5 样品采集与测定

在水稻分蘖期(播种后 33 d)、拔节期(播种后 62 d)、孕穗期(播种后 81 d)、成熟期(播种后 126 d)采集土样，对每个处理 3 个盆栽的水稻根系带土样挖出，抖掉根系外围土，取根表附近土样，装入无菌袋中，放入 4℃ 冰箱中冷藏保鲜，用以测定土壤微生物数量及无机氮含量。对每盆 4 株水稻植株量取株高后，于 65℃ 烘干至恒重，称量，记录。

土壤细菌、放线菌、真菌数量采用涂抹平板计数法测定，分别用牛肉膏蛋白胨培养基、高氏 I 号培养基及马丁氏培养基进行分离培养，然后测定数量^[7]，以每克干土中微生物菌落数表征微生物数量。

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别采用靛酚蓝比色法和紫外双波段比色法测定^[8]。

干物质量烘干处理后直接称量。

水稻成熟期测定水稻籽粒产量，统计相关产量构成因子。

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据处理分析，采用单因素方差分析($P < 0.05$)、LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对单季稻土壤无机氮含量的影响

2.1.1 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水稻全生育期内，土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量先增加后减少，成熟期含量最低，且施氮处理显著增加土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(表 1)。水稻分蘖期，施氮处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随控释氮肥配施比例升高而下降，单施尿素 T1 处理与配施 40%~100% 控释氮肥

处理差异显著。拔节至孕穗期，土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随控释氮肥配施比例升高呈现先上升后下降，均在 T4 处理达到峰值，且配施 20% 以上控释氮肥处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均显著高于单施尿素 T1 处理。水稻成熟期，配施 40%~100% 控释氮肥处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于其余处理，但各处理间无显著差异。

表 1 不同处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响(mg/kg)
Table 1 Effects of different treatments on ammonium nitrogen contents in soils

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	8.21 ± 0.10 c	6.66 ± 0.61 c	4.06 ± 0.46 d	2.78 ± 0.44 c
T1	17.52 ± 0.46 a	18.23 ± 0.27 b	11.97 ± 0.67 c	8.14 ± 0.68 b
T2	17.51 ± 0.36 a	18.45 ± 0.09 b	12.27 ± 0.33 c	7.90 ± 0.47 b
T3	17.13 ± 0.33 a	19.89 ± 0.23 a	14.75 ± 0.31 b	8.85 ± 0.42 b
T4	15.56 ± 0.27 b	20.28 ± 0.35 a	16.18 ± 0.54 a	9.81 ± 0.22 a
T5	15.08 ± 0.30 b	19.99 ± 0.30 a	15.63 ± 0.37 ab	10.17 ± 0.45 a
T6	14.95 ± 0.48 b	19.74 ± 0.21 a	15.03 ± 0.41 b	9.99 ± 0.47 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

2.1.2 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由表 2 可知，随水稻生育期推进，土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量先增加后减少，孕穗期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高，施肥处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较 CK 处理显著增多。分蘖期，水稻土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随控释氮肥比例升高而下降。拔节期， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随控释氮肥添加比例先升高后下降，以 T5 处理最优，T4 处理次之。孕穗至成熟期，添加 40%~100% 控释氮肥处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于其余处理，且均以 T4 处理含量最高。

表 2 不同处理对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响(mg/kg)
Table 2 Effects of different treatments on nitrate nitrogen contents in soils

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	3.97 ± 0.06 d	4.79 ± 0.16 d	10.86 ± 0.16 d	7.15 ± 0.26 c
T1	6.23 ± 0.25 a	8.56 ± 0.66 c	22.03 ± 0.28 c	8.73 ± 0.25 b
T2	6.20 ± 0.24 a	8.69 ± 0.50 c	22.04 ± 0.32 c	8.99 ± 0.29 b
T3	6.09 ± 0.24 ab	9.13 ± 0.16 bc	22.78 ± 0.46 b	9.07 ± 0.04 b
T4	5.92 ± 0.18 ab	10.40 ± 0.22 a	24.08 ± 0.39 a	9.94 ± 0.24 a
T5	5.68 ± 0.10 b	10.42 ± 0.36 a	23.94 ± 0.32 a	9.90 ± 0.32 a
T6	5.33 ± 0.18 c	9.79 ± 0.39 ab	23.91 ± 0.18 a	9.68 ± 0.35 a

2.2 不同处理对水稻土壤微生物数量的影响

2.2.1 细菌 由表 3 可知，水稻全生育期内，施氮处理显著增加土壤细菌数量。分蘖期，单施尿素 T1 处理显著高于配施 40%~100% 控释氮肥处理。拔节

至成熟期,土壤细菌数量随控释氮肥配施比例升高呈现先上升后下降,均在 T4 处理达到峰值,且与单施尿素处理差异显著。水稻各生育期细菌数量总和随配

施比例升高呈先上升后下降趋势,T4 处理下达到峰值,与其余处理差异显著,较单施尿素和单施控释氮肥处理分别提高 13.86% 和 2.62%。

表 3 不同处理对土壤细菌数量的影响($\times 10^6$ cfu/g)
Table 3 Effects of different treatments on bacteria numbers in rice rhizosphere soils

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期	总量
CK	19.99 ± 2.41 e	17.03 ± 1.41 d	15.50 ± 1.45 e	8.93 ± 0.90 e	61.45 ± 1.52 e
T1	36.42 ± 1.10 a	27.41 ± 4.86 c	21.76 ± 1.25 d	13.53 ± 1.52 d	96.61 ± 3.78 d
T2	33.24 ± 2.25 ab	25.32 ± 3.97 c	28.99 ± 1.54 c	16.56 ± 1.84 c	104.10 ± 4.97 c
T3	31.86 ± 2.05 bc	38.70 ± 1.37 ab	30.38 ± 0.92 bc	18.36 ± 0.52 bc	119.29 ± 2.09 b
T4	28.40 ± 1.44 cd	42.31 ± 2.35 a	35.35 ± 1.51 a	22.59 ± 1.38 a	128.65 ± 2.26 a
T5	29.79 ± 1.36 bcd	33.99 ± 2.48 b	33.34 ± 2.43 ab	21.73 ± 2.21 ab	118.86 ± 3.52 b
T6	27.07 ± 1.73 d	24.90 ± 0.60 c	29.59 ± 2.39 c	20.04 ± 2.01 ab	104.11 ± 4.53 c

2.2.2 放线菌 由表 4 可知,水稻生育期内土壤放线菌变化整体呈现“升-降-升”趋势,成熟期数量最多。CK 处理土壤放线菌数量显著小于施肥处理。分蘖期,单施尿素 T1 处理放线菌数量最多,显著高于配施 40%~100% 控释氮肥处理,但配施控释氮肥处理间无显著差异。拔节期,T3 处理放线菌数量最多,

显著高于其余处理;孕穗到成熟期,配施 20%~100% 控释氮肥处理较单施尿素 T1 处理均显著增加土壤放线菌数量,且均以 T3 处理最高,T4 处理次之。随控释氮肥配施比例升高,各生育期土壤放线菌总量先升高后降低,以 T3 处理数量最多,其次为 T4 处理,均与单施尿素 T1 处理差异显著,分别提高 12.52% 和 7.48%。

表 4 不同处理对土壤放线菌数量的影响($\times 10^5$ cfu/g)
Table 4 Effects of different treatments on actinomycetes numbers in rice rhizosphere soils

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期	总量
CK	19.20 ± 1.88 c	24.38 ± 1.81 d	22.34 ± 1.97 d	27.28 ± 1.31 d	93.21 ± 3.15e
T1	28.29 ± 1.48 a	30.54 ± 0.68 c	27.74 ± 1.25 bc	35.84 ± 1.49 bc	122.41 ± 3.22 cd
T2	26.71 ± 1.26 ab	29.93 ± 0.77 c	25.93 ± 1.85 c	34.47 ± 3.32 c	117.04 ± 5.41 d
T3	26.94 ± 1.48 ab	37.61 ± 1.90 a	32.25 ± 1.86 a	43.14 ± 2.24 a	139.94 ± 2.74 a
T4	23.13 ± 1.74 b	34.81 ± 1.36 b	32.23 ± 1.21 a	42.13 ± 2.91 a	132.30 ± 2.24 b
T5	23.82 ± 2.24 b	33.45 ± 1.98 bc	30.07 ± 1.39 ab	39.60 ± 1.81 ab	126.94 ± 3.56 bc
T6	22.92 ± 0.31 b	31.74 ± 1.94 bc	29.54 ± 1.22 ab	40.09 ± 1.87 a	124.28 ± 4.01 cd

2.2.3 真菌 与土壤细菌和土壤放线菌的数量相比,土壤真菌的数量相对较少(表 5)。分蘖期,单施尿素 T1 处理,水稻土壤真菌数量最高;除单施控释氮肥 T6 处理外,其余控释氮肥处理真菌数量无显著差异。拔节期,配施 40%~100% 控释氮肥处理真菌

数量较单施尿素显著增加。孕穗到成熟期,施氮处理真菌数量均在 T5 处理最大,其次为 T4 处理。各生育期土壤真菌总量以 T4 和 T5 处理最多,与其余处理差异显著,且分别较单施尿素 T1 处理提高 19.89% 和 23.9%。

表 5 不同处理对土壤真菌数量的影响($\times 10^4$ cfu/g)
Table 5 Effects of different treatments on fungi numbers in rice rhizosphere soils

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期	总量
CK	2.55 ± 0.19 d	2.28 ± 0.30 c	1.75 ± 0.34 c	1.11 ± 0.15 d	7.69 ± 0.12 d
T1	4.29 ± 0.17 a	3.46 ± 0.16 b	2.60 ± 0.21 b	1.65 ± 0.13 c	12.00 ± 0.40 c
T2	3.93 ± 0.25 ab	3.62 ± 0.35 b	2.94 ± 0.29 b	1.59 ± 0.09 c	12.08 ± 0.63 c
T3	3.88 ± 0.24 ab	3.91 ± 0.55 b	2.70 ± 0.10 b	2.81 ± 0.41 a	13.3 ± 0.88 b
T4	3.67 ± 0.17 bc	4.61 ± 0.29 a	3.64 ± 0.39 ab	3.05 ± 0.19 a	14.98 ± 0.26 a
T5	3.71 ± 0.21 bc	4.87 ± 0.45 a	4.08 ± 0.94 a	3.12 ± 0.28 a	15.77 ± 1.01 a
T6	3.41 ± 0.10 c	4.82 ± 0.22 a	3.47 ± 0.16 ab	2.14 ± 0.24 b	13.83 ± 0.06 b

2.3 不同处理对水稻生长的影响

2.3.1 株高 由表 6 可知,水稻株高随生育期推进而逐渐增加,施肥处理与 CK 处理水稻株高差异显著。分蘖期,施氮处理水稻株高总体随控释氮肥配施比例升高而下降,配施 0~20% 控释氮肥处理显著高于配施 40%~100% 控释氮肥处理。拔节期,水稻株高随控释氮肥配施比例升高呈现先上升后下降,配施 40% 控释氮肥处理达到峰值。孕穗期,控释氮肥添加比例越高,株高值越大,T6 处理下达到峰值。

成熟期,T5 处理下水稻株高最高,但配施 20%~80% 控释氮肥无显著差异。

2.3.2 干物质积累 水稻全生育期内,施氮处理较 CK 处理水稻干物质质量积累显著增加(表 7)。分蘖期,单施尿素 T1 处理干物质积累量最多,与配施 40%~100% 控释氮肥处理差异显著。拔节至成熟期,水稻干物质积累量随控释氮肥配施比例增加呈先升高后下降趋势,均在 T4 处理达到峰值,且与单施尿素 T1 处理差异显著。

表 6 不同处理对水稻株高的影响(cm)
Table 6 Effects of different treatments on plant heights of rice

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	53.69 ± 1.56 c	82.73 ± 2.04 d	86.80 ± 1.52 f	93.63 ± 1.65 c
T1	62.95 ± 1.52 a	94.76 ± 2.69 c	99.99 ± 1.43 e	110.59 ± 1.36 b
T2	62.73 ± 2.46 a	98.73 ± 1.22 b	103.32 ± 1.00 d	108.59 ± 1.04 b
T3	62.29 ± 0.95 a	103.10 ± 1.17 a	106.50 ± 1.11 c	113.65 ± 1.15 a
T4	61.03 ± 0.86 b	105.50 ± 1.00 a	108.91 ± 1.35 b	116.09 ± 1.63 a
T5	59.16 ± 0.43 b	104.76 ± 2.19 a	110.81 ± 1.17 ab	117.72 ± 3.15 a
T6	58.73 ± 1.01 b	103.73 ± 1.58 a	113.10 ± 1.64 a	117.50 ± 1.06 a

表 7 不同处理对水稻干物质积累的影响(g/株)
Table 7 Effects of different treatments on dry matter accumulation of rice

处理	分蘖期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	4.66 ± 0.30 d	18.06 ± 0.41 d	27.74 ± 1.04 d	41.16 ± 3.13 d
T1	7.31 ± 0.49 a	24.17 ± 1.41 c	39.04 ± 1.41 c	72.25 ± 0.91 c
T2	7.12 ± 0.14 ab	24.84 ± 1.29 bc	42.22 ± 2.33 b	73.37 ± 3.12 c
T3	6.87 ± 0.38 ab	26.65 ± 0.50 ab	44.98 ± 1.18 ab	83.29 ± 1.96 ab
T4	6.63 ± 0.19 b	28.01 ± 1.14 a	48.95 ± 0.47 a	87.98 ± 2.32 a
T5	5.81 ± 0.06 c	25.90 ± 0.52 abc	47.08 ± 3.12 a	84.03 ± 0.97 ab
T6	5.54 ± 0.10 c	26.52 ± 0.98 ab	45.53 ± 0.32 ab	80.76 ± 2.15 b

2.3.3 产量及其构成因子 由表 8 可知,不同处理对水稻籽粒产量影响显著,施氮处理均显著增加籽粒产量,其中配施 40% 控释氮肥处理水稻产量最高,相较于单施尿素和单施控释氮肥分别增长 15.7% 和 12.9%。产量构成因子中,千粒重和有效穗数均随控

释氮肥添加比例增加而呈现先升高后下降规律,在 T4 处理达到峰值,且均与单施尿素 T1 处理差异显著。添加 40%~100% 控释氮肥处理对水稻穗粒数影响较优,与单施尿素 T1 处理差异显著,增加 13.83%~16.54%。

表 8 不同处理对产量构成因子的影响
Table 8 Effects of different treatments on yields and yield components of rice

处理	籽粒产量(g/株)	千粒重(g)	有效穗数($\times 10^4$ 穗/hm ²)	穗粒数
CK	26.64 ± 3.78 d	27.50 ± 0.20 d	5.15 ± 0.55 c	177.59 ± 5.52 e
T1	47.83 ± 1.96 bc	28.41 ± 0.13 c	7.15 ± 0.19 b	207.24 ± 3.30 c
T2	46.01 ± 1.32 c	28.29 ± 0.25 c	7.50 ± 0.17 ab	198.43 ± 1.95 d
T3	52.56 ± 1.48 ab	29.12 ± 0.45 ab	7.86 ± 0.09 ab	218.74 ± 4.29 b
T4	55.35 ± 1.74 a	29.41 ± 0.52 a	8.11 ± 0.21 a	236.72 ± 2.73 a
T5	52.35 ± 2.74 ab	28.70 ± 0.16 bc	7.52 ± 0.37 ab	235.91 ± 4.94 a
T6	49.04 ± 2.07 bc	28.47 ± 0.09 c	7.57 ± 0.23 ab	241.42 ± 2.06 a

3 讨论

大量研究表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是植物吸收利用土壤氮素的主要形态, 是土壤无机氮的主要组成成分, 对其生长发育起着重要作用^[9]。本试验表明, 单施尿素处理在水稻分蘖期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较高, 分别较配施 40% 控释氮肥增加 12.6% 和 5.24%, 这是由尿素的快速分解供氮导致的^[3], 与王寅等^[5]的研究结果类似。尿素的快速供氮致使土壤中无机氮含量迅速上升, 但水稻生育前期需氮较少, 可能造成氮素的大量流失, 同时过高的氮素水平将会对水稻的生长产生抑制作用^[10-14]; 且单施尿素处理不具有持续供氮能力, 水稻生育中后期无机氮含量过低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 较配施 40% 控释氮肥处理分别降低 17.02% ~ 26.02% 和 8.5% ~ 12.17%, 可能无法为水稻生长提供充足养分。添加控释氮肥处理较单施尿素处理则体现出较好的氮素后移效果^[15], 且添加 40% 及以上控释氮肥处理的效果较优, 配施 40% 控释氮肥处理下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量相较单施尿素处理分别增加 20.52% 和 12.17%。有研究表明, 控释氮肥与尿素合理配施能有效调节氮素供应速率, 使肥料供氮与作物需氮规律更匹配^[16], 相较单施尿素能够明显提高氮素利用率, 增加作物产量^[17]。本研究中, 相较单施尿素处理的氮素供应短暂性和单施控释氮肥的前期供氮不足, 添加 40% 控释氮肥处理能持续供氮, 使水稻生育期内保持较为充足的氮素水平, 有利于维持土壤良好的肥力状况, 促进水稻优良发育, 增加产量。

土壤微生物能够促进土壤物质循环, 加快土壤氮素的转化^[18-20], 从而提高土壤肥力水平^[21]。本研究结果表明, 单施尿素处理能有效促进水稻分蘖期土壤微生物生长繁殖, 这可能是水稻生育前期无机氮含量较高的原因, 配施 20% ~ 80% 控释氮肥处理使水稻生育中后期土壤微生物数量丰富, 其中细菌、放线菌和真菌数量分别以配施 40%、20% 和 80% 控释氮肥处理最多。这可能是因为控释氮肥处理在水稻生育中后期土壤无机氮供应水平增加, 从而为土壤微生物生长繁殖提供了充足的氮源^[22-23]。同时, 也有研究表明, 控释氮肥配施速效氮肥既能保证土壤氮素养分丰富且持续, 能促进水稻优良生长, 还能增加根际分泌物^[24]及土壤孔隙度, 为微生物生长繁殖提供更为适宜的生长条件^[25-26]。综合来看, 配施 40% 控释氮肥处理, 不仅促进了水稻生育中后期土壤氮素供应, 增加了无机氮含量, 而且对增加土壤微生物数量的效果最优,

细菌、放线菌、真菌各生育期总量较单施尿素处理分别提高 24.9%、7.48%、19.89%。

已有研究表明, 控释氮肥能有效延长养分释放周期, 促进作物产量构成因子, 实现增产目标^[27-28]。本试验中, 配施 40% 及以上控释氮肥处理在水稻生育中后期的株高及干物质累积量显著优于单施尿素处理, 其可能原因是这些配比处理下水稻能更好地将土壤养分转化为作物生长所需营养物质, 加之土壤无机氮供应与土壤微生物数量之间的相互促进作用, 为水稻生长发育提供了充足的营养条件, 特别是为提高水稻株高和穗部发育提供动力, 从而能够促进干物质的积累, 为水稻高产打下了坚实的基础^[29], 本试验中配施 40% 控释氮肥处理下, 水稻干物质积累量最大, 成熟期较单施尿素和单施控释氮肥处理增加 17.88% 和 8.2%, 水稻产量较单施尿素处理增长 13.4%, 水稻千粒重和有效穗数均为最高值, 且穗粒数亦显著高于单施尿素处理。这说明配施 40% 控释氮肥处理能有效提高干物质积累, 优化产量构成因子, 显著增产, 这与相关研究结果趋势类似^[30-31]。

4 结论

控释氮肥和尿素的合理配施, 可以利用尿素前期释放氮素较快、后期控释氮肥缓释的特点, 保持水稻生长过程中氮素的充分供应, 促进水稻产量增加。本试验中, 40% 控释氮肥 + 60% 尿素处理下水稻土壤无机氮适量、微生物量适宜, 有利于植株对氮素的利用, 且显著提高水稻干物质质量的积累, 符合水稻的生长发育规律, 产量相较于单施尿素和单施控释氮肥分别增长 15.7% 和 12.9%, 对于水稻的增产有显著的促进效果。

参考文献:

- [1] 杨越超, 张民, 陈剑秋, 等. 控释氮肥对水稻秧苗形态特征和生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1126-1135
- [2] 尹娟, 勉韶平. 稻田中氮肥损失途径研究进展[J]. 农业科学研究, 2005, 26(2): 76-80
- [3] 祝丽香, 毕建杰, 王建华, 等. 控释尿素与尿素配施对杭白菊产量和氮肥利用率的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(4): 782-790
- [4] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 177-184
- [5] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528

- [6] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451
- [7] 严君, 韩晓增, 王树起, 等. 不同形态氮素对种植大豆土壤中微生物数量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 341-347
- [8] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 60-64
- [9] 苗艳芳, 李生秀, 徐晓峰, 等. 冬小麦对铵态氮和硝态氮的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 564-574
- [10] 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
- [11] Ribaud M O, Heimlich R, Claassen R, et al. Least-cost management of nonpoint source pollution: Source reduction versus interception strategies for controlling nitrogen loss in the Mississippi Basin[J]. Ecological Economics, 2001, 37(2): 183-197
- [12] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮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
- [13] 王素萍, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1449-1456
- [14] Chen L, Fu B, Zhang S, et al. A comparative study on nitrogen-concentration dynamics in surface water in a heterogeneous landscape[J]. Environmental Geology, 2002, 42(4): 424-432
- [15] 郑宾, 赵伟, 徐铮, 等. 不同耕作方式与氮肥类型对夏玉米光合性能的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 925-934
- [16] 马立锋, 苏孔武, 黎金兰, 等. 控释氮肥对茶叶产量、品质和氮素利用效率及经济效益的影响[J]. 茶叶科学, 2015(4): 354-362
- [17] 宋付朋, 张民, 史衍玺, 等. 控释氮肥的氮素释放特征及其对水稻的增产效应[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 619-627
- [18] Burger M, Jackson L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(1): 29-36
- [19] 罗兰芳, 聂军, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对稻田土壤微生物生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2925-2932
- [20] Zhu Y G, Duan G L, Chen B D, et al. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system[J]. Science China Earth Science, 2014, 57(5): 888-896
- [21] 孟庆英, 朱宝国, 王囡囡, 等. 控释尿素与常规尿素不同配施对根际土壤微生物数目、土壤氮素及玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1173-1176
- [22] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 731-739
- [23] 许仁良, 王建峰, 张国良, 等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3584-3590
- [24] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 氮素营养水平对小麦根际微生物及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 129-131
- [25] 张敬昇, 王昌全, 李冰, 等. 控释掺混尿素对稻、麦土壤氮与酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1899-1908
- [26] 李鑫, 周冀衡, 贺丹锋, 等. 干旱胁迫下枸溶性钾肥配施对烤烟土壤理化性质、微生物数量及根系生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(12): 2434-2440
- [27] 赵聪, 申亚珍, 杜昌文, 等. 改性聚丙烯酸酯包膜控释肥料的控释性能研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 767-774
- [28] 付月君, 王昌全, 李冰, 等. 控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 648-652
- [29] 王楷, 王克如, 王永宏, 等. 密度对玉米产量(>15000 kg·hm⁻²)及其产量构成因子的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3437-3445
- [30] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706
- [31] 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

Effects of Controlled Release Nitrogen Fertilizer Combined with Urea on Soil Inorganic Nitrogen, Microorganism and Rice Growth

LI Yuhao¹, HE Jie¹, WANG Changquan^{1*}, LI Bing¹, LIANG Jingyue¹, LI Xinyue¹,
ZHANG Jingsheng¹, YIN Bin²

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A pot experiment of different controlled release nitrogen fertilizer (0, 10%, 20%, 40%, 80% and 100%) combined with different urea using were conducted to explore the proper combined proportion of controlled and fast release nitrogen fertilizer based on soil nitrogen supply and the growth of crop, in which inorganic nitrogen content and microbial biomass in soils as well as height, dry matter accumulation and yield components of rice were analyzed. The results showed the application of 40% controlled-release nitrogen fertilizer had the best effect on soil inorganic nitrogen in the middle and late stages of rice growth, soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents were respectively increased by 10.11%–17.02% and 8.8%–19.96% compared to the treatment of single urea using. From the jointing stage to mature stage, combined application of 40% controlled-release nitrogen fertilizer had the highest biomass of bacterial, significantly high than in single urea using. The most abundant actinomycete number was found in the treatment of 20%–40% controlled-release nitrogen fertilizers. Fungi number was the highest under the combined treatment of 80% controlled release nitrogen. In the treatment of 40% controlled release nitrogen fertilizer, rice plant height and dry matter were increased by 4.73%–10.18% and 13.7%–17.88% compared to the treatment of single urea using during the middle and late stages. Rice grain yield was the highest with 40% controlled-release nitrogen application, increased respectively by 13.59% and 11.4% compared to single urea using and 100% controlled-release nitrogen application. The effective panicle number, 1 000 grain weight and grain number per panicle were in the optimum levels under the application of 40% controlled release nitrogen. In summary, 40% combined application of controlled-release nitrogen fertilizer increases the content of soil inorganic nitrogen, promotes the reproduction of soil microbial, increases rice plant height and dry matter accumulation, optimizes rice yield components, thus 40% controlled release nitrogen with urea is recommendable in rice fertilizer management.

Key words: Controlled release nitrogen fertilizer; Soil inorganic nitrogen; Soil microorganism; Rice yield