

控释尿素减施对双季稻田土壤剖面养分分布特征的影响

田 昌^{1,2}, 周 旋³, 谢桂先^{1,2}, 刘 强^{1,2}, 荣湘民^{1,2}, 张玉平^{1,2}, 谭力彰¹, 彭建伟^{1,2}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128;

2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 3. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘要: 为探讨双季稻田控释尿素施用对养分在土壤剖面的垂直分布与迁移的影响, 通过长期田间定位试验, 研究比较普通尿素(U)和控释尿素(CRU)减施稻田剖面的养分累积和分布。结果表明: 随着土层深度的增加, 土壤全氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、有机质、全磷、速效磷和全钾含量呈下降趋势, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量先下降后升高, 速效钾含量呈上升趋势, 土壤 pH 升高且趋于稳定。施肥会降低 0—20 cm 土层 pH 和速效钾含量。与 U 处理相比, 0—20 cm 土层 CRU 处理全氮含量提高 7.72%~19.45%, 且随着施 N 量的增加呈上升趋势; 40—60 cm 土层 CRU 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降低 6.99%~19.23%。施用 CRU 可以有效降低土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向下淋溶, 提高 0—40 cm 土层全氮和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, 避免土壤 N 素流失。施用 CRU 对不同深度土层有机质、速效磷、全磷、速效钾、全钾和 pH 的影响不显著, 但减量过大会导致有机质降低。CRU 减量 10%~20% 处理显著提高双季稻成熟期 N、P、K 的吸收量。相关分析表明, 不同用量控释尿素处理早、晚稻成熟期 N、P、K 吸收量与籽粒产量均呈显著正相关。总之, CRU 处理有效地控制 N 素向下淋溶, 减少因 N 肥施用带来的潜在面源污染, 而 CRU 减施可更好地维持和提高土壤的养分水平和肥力, 促进养分累积, 实现生态与经济效益的双赢。

关键词: 双季稻田; 控释尿素; 减量施肥; 土壤养分; 剖面分布

中图分类号: S511.4⁺2; S147.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0216-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.034

Effects of Controlled-release Urea Application on Nutrient Distribution of Soil Profile from Double-rice Cropping Field

TIAN Chang^{1,2}, ZHOU Xuan³, XIE Guixian^{1,2}, LIU Qiang^{1,2},

RONG Xiangmin^{1,2}, ZHANG Yuping^{1,2}, TAN Lizhang¹, PENG Jianwei^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128; 2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128; 3. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125)

Abstract: To investigate the effects of controlled-release urea on vertical distribution and migration of nutrients in the profile of double-rice cropping field, a long-term field experiment was conducted to compare common urea (U) and reduction of controlled-release urea (CRU) in nutrient accumulation and distribution of paddy field profile. Results showed that with the increase of soil depth, total N, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, organic matter, total P, available P and total K content in soil decreased; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content first decreased and then increased; available K content increased; soil pH increased to be stable. Fertilization could reduce pH and available K content in 0—20 cm soil. Compared with U treatment, total N content in 0—20 cm soil under CRU treatments increased by 7.72%~19.45%, and increased with the increase of N fertilizer rate; soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content in 40—60 cm under CRU treatments reduced by 6.99%~19.23%. Application of CRU could effectively reduce soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ leaching, and increase total N and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content in 0—40 cm soil, to prevent soil N loss. Application of CRU had no significant effect on organic matter, available P, total P, available K, total K and pH in different depths of soil, but more reduction of CRU resulted in the decrease of organic matter.

收稿日期: 2018-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目“长江中下游水稻湖南化肥农药减施增效技术集成研究与示范”(2016YFD0200809); 湖南省科技厅重点项目“化肥污染控制关键技术集成示范”(2016NK2112); 湖南省教育厅平台项目“控释氮肥减量下南方稻田 N_2O 排放特征及对水分管理的响应”(16K040)

第一作者: 田昌(1986—), 男, 湖南浏阳人, 博士研究生, 实验师, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: chtian12@126.com

通信作者: 谢桂先(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: xieguixian@126.com

刘强(1953—), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: lq8053@hunau.net

Reduced of CRU by 10%~20% treatments significantly increased N, P, K uptakes of double-cropping rice at maturity. Correlation analysis showed that N, P, K uptakes at maturity by different rates of CRU treatments was significantly positively related with grain yield in early- and late-rice. In conclusion, CRU treatments can effectively reduce N leaching and the potential non-point source pollution by N fertilizer application, and can improve soil nutrient levels and fertility, and finally promote nutrients accumulation, to realize win-win situation of ecological and economic benefits.

Keywords: double-rice cropping field; controlled-release urea; reduction fertilization; soil nutrients; profile distribution

长期重施化肥会造成土壤结构变劣、酶活性降低、养分失调及综合肥力下降^[1-2]。其中,过量施用的氮(N)肥大多残留在土壤剖面或者以硝态氮(NO_3^- -N)的形态淋溶损失^[3]。如何在保障土壤供肥能力的同时,提高肥料利用率,减少肥料残留所引起的土壤环境污染,实现均衡施肥备受关注。

控释N肥能通过各种包膜技术控制养分释放,协调养分的释放时间和强度,使养分供应同步作物需求^[4],显著减少肥料养分的挥发和淋失,大幅度提高肥料利用率,增加土壤酶活性和微生物数量,减少养分流失对地下水等造成的污染风险^[5-6]。此外,合理减少N肥施用同样可以降低N素流失造成的环境污染风险^[7],改善农田生态环境^[8],提高N肥利用率^[9],增加经济效益。

我国南方双季稻区大部分土壤缺N,且高温多雨的气候会加快土壤有机N的矿化速率及N素损失风险^[10]。稻季施肥在生育前期N素易通过氨挥发或径流等途径损失,减少总N供应能力;稻田中的干湿交替极易影响硝化作用,进而影响控释N肥在稻季土壤中的释放,因此能明显降低稻田土壤中 NO_3^- -N含量,减少 NO_3^- -N向深层土壤渗漏,减轻对地下水的污染风险^[11]。土壤剖面的养分分布累积特征在一定程度上表征土壤的养分供应能力,进而反映土壤的可持续利用能力。长期不合理施肥不仅影响作物生长和土壤养分含量,还影响养分在土体中的垂直分布^[7]。虽然养分适度下移会提高底层土壤养分含量,有利于培肥土壤,但如果下移超过根系吸收范围,将加重养分淋失,对土壤环境及地下水安全造成潜在的威胁。因此,充分了解土壤养分的空间变异是合理施肥的基础^[12]。目前,关于控释尿素减量施用条件下稻田土壤剖面养分分布与累积的研究鲜有报道。本文采用长期定位试验开展普通尿素和控释尿素减量施用下稻田养分垂直分布特征的系统研究,旨在了解长江中游双季稻区田间土壤养分的迁移分布规律,探究控释尿素及其减量施肥对稻田养分垂直分布的影响,以期为合理施用N肥、土壤培肥和防止农田N素流失提供科学理论依据和技术方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点为湖南省浏阳市沿溪镇花园村,于2013年开始进行定位试验。研究区属亚热带季风性湿润气候,双季稻生长季累计降水量1270.7 mm,平均气温24.7℃。供试土壤为河流冲积物发育的潮沙泥田。

1.2 供试材料

试验选择湖南典型双季稻田作为供试土壤,其0—20 cm土层土壤基本理化性状为:有机质含量16.62 g/kg,全氮含量1.21 g/kg,全磷含量0.54 g/kg,全钾含量11.51 g/kg,碱解氮含量48.93 mg/kg,速效磷含量21.25 mg/kg,速效钾含量155.68 mg/kg,pH 5.61。供试早、晚稻品种分别为中早39和泰优390。供试肥料:氮肥为普通尿素和树脂包膜尿素(控释期3个月),N含量分别为46%和42%;磷肥为过磷酸钙, P_2O_5 含量为12%;钾肥为氯化钾, K_2O 含量为60%。

1.3 试验设计

小区试验共设置6个处理,分别为普通尿素(U:早、晚稻N用量分别为150,180 kg/hm²)、等N量控释尿素(CRU1:早、晚稻N用量分别为150,180 kg/hm²)、控释尿素减N 10%(CRU2:早、晚稻N用量分别为135,162 kg/hm²)、控释尿素减N 20%(CRU3:早、晚稻N用量分别为120,144 kg/hm²)、控释尿素减N 30%(CRU4:早、晚稻N用量分别为105,126 kg/hm²)及不施N肥(CK)。各处理早、晚稻 P_2O_5 用量分别为72,60 kg/hm², K_2O 用量分别为90,105 kg/hm²。N肥、钾肥作基肥(60%)和分蘖肥(40%)两次施用,磷肥作基肥一次性施用。小区面积20 m²(4 m×5 m),3次重复,随机区组排列。早、晚稻栽插株行距分别为16.7 cm×20.0 cm和20.0 cm×20.0 cm,每穴2苗。早稻于2016年3月27日、4月28日、5月10日、7月23日进行早稻的播种、施基肥移栽、追肥和收获,晚稻于6月26日、7月27日、8月6日、11月5日进行播种、施基肥移栽、追肥和收获。田间管理同当地大面积生产方式。

1.4 测定项目与分析方法

水稻收获后分别采集试验地各处理 0—20, 20—40, 40—60 cm 土样, 风干过筛备用。采用常规分析方法测定土壤基本理化性质。于水稻成熟期, 各小区取代表性稻株 5 穴, 剪去根后, 分秸秆和穗部烘干称重并粉碎, 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 凯氏定氮法测定 N 含量, 钒钼黄比色法测定 P 含量, 火焰光度法测定 K 含量。成熟期各小区单收, 按实收株数计产。N、P、K 素吸收量分别为成熟期单位面积植株(秸秆和穗)N、P、K 积累量的总和。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理和分析, 处理间差异显著性分析采用 LSD 检验法。

2 结果与分析

2.1 土壤全 N、 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 含量与分布

土壤 N 素盈亏状况与作物吸 N 量、生产与代谢、群体发育及产量构成紧密相关^[13], 土壤无机 N 可作为土壤供 N 能力的重要指标, 表征着较为活跃的土壤 N 部分。由表 1 可知, 随着土壤剖面加深, 土壤全 N 和 $NO_3^- - N$ 含量呈下降趋势, $NH_4^+ - N$ 含量先下降后升高。0—20, 20—40, 40—60 cm 3 个土层全 N 含量均以 CRU1 处理最高, 显著高于 U 处理 ($P < 0.05$)。0—20, 20—40 cm 土层全 N 含量 CRU 处理均高于 U 处理, 且随着施 N 量的增加呈上升趋势。与 U 处理相比, 0—20 cm 土层 CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理全 N 含量分别提高 19.45%, 17.29%, 17.30% 和 7.72%。说明施用 CRU 可以有效降低 N 流失, 提高 0—20 cm 土层全 N 含量。0—20, 20—40 cm 土层 $NH_4^+ - N$ 含量处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 40—60 cm 土层 $NH_4^+ - N$ 含量以 U 处理最高, CK 处理最低; CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理 $NH_4^+ - N$ 含量较 U 处理分别降低 15.43%, 6.99%, 10.63% 和 19.23%。说明施用 CRU 可以有效降低 $NH_4^+ - N$ 向下淋溶, 减少土壤 N 素流失。3 个土层 $NO_3^- - N$ 含量 U 处理均低于 CRU 处理。与 U 处理相比, 0—20 cm 土层 CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理 $NO_3^- - N$ 含量分别提高 90.81%, 128.28%, 100.00% 和 19.22%。说明施用 CRU 可以有效降低 N 的流失, 提高 0—20 cm 土层 $NO_3^- - N$ 含量。

2.2 土壤有机质含量与分布

由表 2 可知, 随着土壤剖面加深, 土壤有机质含量呈下降趋势。3 个土层有机质含量处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。0—20, 20—40 cm 土层均以 CRU4 处理有机质含量最低; 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层各处理有机质含量分别为 15.85~17.36, 10.21~

13.87, 6.44~7.40 g/kg。说明施用 CRU 对不同深度土层有机质含量的影响不显著, 但过度减量会导致有机质含量下降。

表 1 不同处理下土壤剖面的 N 含量

土层深度/cm	处理	全 N/ (g · kg ⁻¹)	$NH_4^+ - N$ / (mg · kg ⁻¹)	$NO_3^- - N$ / (mg · kg ⁻¹)
0—20	CK	1.13c	7.38a	5.85bc
	U	1.09c	8.29a	3.94c
	CRU1	1.31a	10.06a	7.51ab
	CRU2	1.28ab	9.72a	8.99a
	CRU3	1.28ab	8.02a	7.87ab
	CRU4	1.18bc	8.63a	4.70c
	CK	0.61c	6.12a	2.30b
	U	0.68bc	5.90a	2.19b
20—40	CRU1	0.90a	7.16a	3.25ab
	CRU2	0.84a	6.37a	4.44a
	CRU3	0.80ab	6.06a	2.66b
	CRU4	0.67bc	5.83a	1.93b
	CK	0.52c	4.85b	1.22ab
	U	0.54bc	8.11a	1.03b
	CRU1	0.64a	6.86ab	1.65a
	CRU2	0.61ab	7.54ab	1.07b
40—60	CRU3	0.57bc	7.24ab	1.12b
	CRU4	0.51c	6.55ab	1.23ab

注: 表中数字后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。下同。

2.3 土壤全 P 及速效 P 含量与分布

由表 2 可知, 随着土壤剖面加深, 土壤全 P 和速效 P 含量呈下降趋势。3 个土层全 P 含量差异变化幅度较速效 P 含量小, 且全 P 和速效 P 含量处理间差异不大。0—20, 20—40, 40—60 cm 土层各处理的全 P 含量分别为 0.51~0.55, 0.38~0.42, 0.36 mg/kg; 速效 P 含量分别为 18.43~24.50, 2.50~7.51, 1.03~4.11 mg/kg。说明施肥可以有效提高 0—20 cm 土层速效 P 含量, 但施用不同用量 CRU 对不同深度土层速效 P 和全 P 含量的影响差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 土壤全 K 及速效 K 含量与分布

由表 2 可知, 随着土壤剖面加深, 土壤全 K 含量呈下降趋势, 而速效 K 含量呈上升趋势。3 个土层全 K 含量差异变化幅度较速效 K 含量小, 且全 K 含量处理间差异不大。0—20, 20—40 cm 土层均以 CK 处理的速效 K 含量最高, 与施 N 处理差异显著 ($P < 0.05$)。0—20, 20—40, 40—60 cm 土层各处理的全 K 含量分别为 11.03~11.97, 11.96~12.81, 12.39~13.55 mg/kg; 速效 K 含量分别为 161.68~219.20, 89.91~138.92, 74.95~99.59 mg/kg。说明施 N 肥会降低 0—40 cm 土层速效 K 含量, 而施用不同用量 CRU 对不同深度土层速效 K 和全 K 含量的影响差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.5 土壤剖面 pH 的变化

由表 2 可知, 随着土壤剖面加深, 土壤 pH 升高而趋于稳定。3 个土层 pH 大小差异不大。0—20,

20—40, 40—60 cm 土层各处理 pH 分别为 5.47~5.77, 6.40~6.53, 6.23~6.43。说明施 N 肥会降低 0—20 cm 土层 pH, 而施用不同用量 CRU 对不同深度土层 pH 的影响差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同处理下土壤剖面的基本理化性质

土层深度/cm	处理	全 P/ (g·kg ⁻¹)	速效 P/ (mg·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	速效 K/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH
0—20	CK	0.53a	22.45a	11.03a	219.20a	15.94a	5.67a
	U	0.53a	24.50a	11.76a	165.79b	16.88a	5.63a
	CRU1	0.51a	18.43a	11.64a	161.68b	17.01a	5.57a
	CRU2	0.55a	19.82a	11.97a	164.57b	17.08a	5.53a
	CRU3	0.53a	23.09a	11.20a	165.37b	17.36a	5.47a
	CRU4	0.51a	21.55a	11.38a	161.68b	15.85a	5.77a
20—40	CK	0.43a	4.36a	12.12a	138.92a	13.87a	6.47a
	U	0.40a	3.46a	12.13a	96.74b	12.38a	6.50a
	CRU1	0.38a	4.43a	12.81a	107.99b	12.28ab	6.43a
	CRU2	0.42a	6.80a	11.96a	97.14b	13.02a	6.53a
	CRU3	0.39a	7.51a	12.43a	89.91b	13.44a	6.40a
	CRU4	0.39a	2.50a	12.12a	91.92b	10.21b	6.50a
40—60	CK	0.36a	1.09a	13.05a	99.59a	6.67a	6.43a
	U	0.36a	4.11a	13.19a	84.01a	7.12a	6.23b
	CRU1	0.36a	3.85a	12.58a	76.05a	6.85a	6.30ab
	CRU2	0.36a	1.22a	12.39a	93.64a	7.25a	6.27ab
	CRU3	0.36a	1.03a	13.55a	90.59a	7.40a	6.30ab
	CRU4	0.36a	2.50a	13.13a	74.95a	6.44a	6.23b

2.6 水稻产量和养分吸收

由表 3 可知,早、晚稻产量均以 CRU2 最高。与 U 处理相比,CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理早稻产量分别提高 9.4%, 14.9%, 8.4%, 6.5%, 晚稻产量分别提高 15.2%, 20.9%, 11.7%, 6.6%, 且 CRU2 处理早、晚稻产量均显著高于 U 处理。早、晚稻 N 素吸收量均以 CK 处理最低, CRU2 处理最高。说明 N 肥施用能显著增加水稻植株 N 素吸收量。与 U 处理相比, CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻 N 素吸收量提高 5.54%~21.85%, 晚稻显著提高 14.77%~34.01%。说明 CRU 养分释放缓慢, 利于

作物吸收, 为高产奠定基础。早、晚稻 CRU 处理 P 素吸收量均以 CRU4 最低, CRU2 最高; 早稻 P 素吸收量较 U 处理提高 0.30%~12.36%, 晚稻提高 2.73%~23.80%。早、晚稻 CRU 处理 K 素吸收量均以 CRU4 最低, CRU2 最高; 早稻 K 素吸收量较 U 处理显著提高 15.10%~25.58% ($P<0.05$)、晚稻提高 4.19%~36.68%。双季稻 CRU 处理 N 素吸收量和 P 素吸收量随着施 N 量的增加先升高后降低, 而 K 素吸收量呈上升趋势。CRU 能有效提高水稻的 N 素利用效率, 促进 N 吸收, 且减量施用效果更好, 尤其以 CRU1 效果最佳。

表 3 不同处理下早、晚稻的养分吸收

稻季	处理	籽粒产量/ (t·hm ⁻²)	籽粒 N 含量/ (g·kg ⁻¹)	秸秆 N 含量/ (g·kg ⁻¹)	N 素累积量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒 P 含量/ (g·kg ⁻¹)	秸秆 P 含量/ (g·kg ⁻¹)	P 素累积量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒 K 含量/ (g·kg ⁻¹)	秸秆 K 含量/ (g·kg ⁻¹)	K 素累积量/ (kg·hm ⁻²)
早稻	CK	4.5c	8.22b	8.22b	57.30d	2.63a	1.35a	17.78b	2.85a	20.77b	105.98b
	U	5.5b	10.49a	10.49a	91.86c	2.70a	1.62a	23.02a	2.28ab	20.08b	113.94b
	CRU1	6.0a	10.95a	10.95a	108.70ab	2.63a	1.49a	24.22a	2.36ab	22.97a	143.09a
	CRU2	6.3a	11.20a	11.20a	111.93a	2.77a	1.50a	25.86a	2.02b	23.16a	142.69a
	CRU3	5.9ab	10.61a	10.61a	103.91b	2.76a	1.50a	24.75a	1.92b	22.83a	138.66a
	CRU4	5.8ab	10.42a	10.42a	96.94c	2.60a	1.45a	22.94a	1.66b	22.73a	131.16a
	CK	5.2e	5.08d	4.04c	44.83e	2.33a	1.67a	19.70c	3.06a	18.23a	99.57c
	U	6.2d	7.78c	5.51b	80.81d	2.38a	1.44a	23.25bc	2.97ab	16.47b	115.83b
晚稻	CRU1	7.1ab	7.73c	6.93a	105.59a	2.16a	1.72a	27.96ab	2.66c	18.00a	150.04a
	CRU2	7.5a	7.48c	6.77a	108.30a	2.30a	1.49a	28.77a	2.96ab	17.64ab	158.32a
	CRU3	6.9bc	8.77a	6.84a	99.70b	2.25a	1.72a	25.34ab	2.71bc	17.54ab	118.65b
	CRU4	6.6c	8.27b	6.81a	92.75c	2.20a	1.68a	23.88bc	2.83abc	16.54b	110.98b

由图 1 可知,不同施肥处理下早、晚稻植株对 N、P、K 的吸收量与籽粒产量均呈显著的正相关关系, 且随着籽粒产量的增加而增加。说明充足的 N、P、K

肥供应是水稻高产栽培的基础。各处理 N、P、K 吸收量与籽粒产量的相关系数分别为 $R_N^2=0.9819^{***}$ 、 $R_P^2=0.9603^{***}$ 、 $R_K^2=0.8412^*$ (早稻), $R_N^2=0.9730^{***}$ 、

$R_p^2=0.9451^{**}$ 、 $R_k^2=0.7161^*$ (晚稻)。说明施肥有利于满足双季稻对 N、P、K 素的养分需求,且影响程度表现为 $N>P>K$ 。

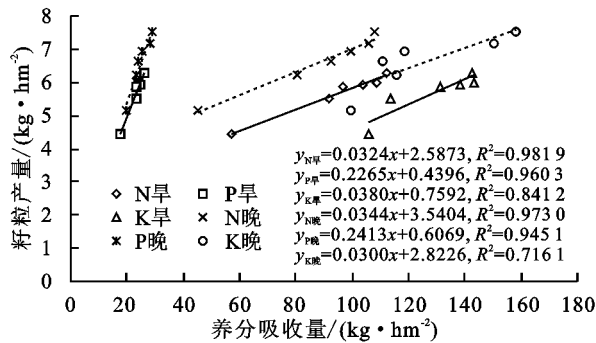


图 1 水稻 N、P、K 吸收量与籽粒产量的关系

3 讨论

3.1 施肥对土壤剖面养分含量及分布的影响

相关研究^[12]表明,土壤中速效 N、P、K 多分布在 0—40 cm 土层,且随土层深度增加呈递减趋势。由于施肥量和施肥措施不同,将在 40 cm 以下土层出现富集。速效养分的主要损失途径是淋洗出 0—100 cm 土体,累积于深层土壤中或进入地下水,且在紫色土、水稻土和红壤中,有机质、速效 N、速效 K 的含量与剖面深度呈极显著负相关^[14]。左海军等^[15]指出,NO₃⁻-N 在深层土壤中大量累积,而 NH₄⁺-N 则主要集中分布在土壤表层。本研究中,随着土层深度的增加,土壤全 N、NO₃⁻-N、有机质、全 P、速效 P 和全 K 含量均呈下降趋势,与上述结论相符。而 NH₄⁺-N 含量先下降后升高,单施化肥只能维持土壤 N 素肥力,偏施 N 肥可使土壤 N 素的作物有效性降低;长期不施肥情况下由于没有肥料的施入,作物生物量小,残茬归还土壤的 N 不抵作物吸收带出的 N 量,土壤全 N 含量越来越低,N 库减小。

胡诚等^[2]通过长期定位试验发现,土壤剖面养分移动性大小表现为:N>P>K,施肥主要影响土壤耕层有效 P 含量,对其他土层影响不明显;单施 N 肥未提高 0—20 cm 土层有效 P 含量;田伟等^[1]指出,长期大量施用化肥造成 N 素养分下淋累积,土壤耕层有效 P 显著提高。本研究中,随着土层深度的增加,速效 K 含量呈上升趋势,土壤 pH 升高且趋于稳定,与上述结论一致;施肥会提高 0—20 cm 土层速效 P 含量,而降低 0—20 cm 土层 pH 和速效 K 含量。

3.2 控释肥对土壤剖面养分含量及分布的影响

0—40 cm 土层无机 N 含量的变化随着 N 肥种类、施 N 量和施 N 时期等的不同而有所差异^[4]。张庆利等^[11]采用淋溶试验发现,控释肥对土壤 pH 变化的影响较小;大多数 N 肥在淋洗后土壤中各层速

效 N 含量较淋洗前有所降低,而控释 N 肥处理土壤表层能持续保持较高的有效 N 含量;刘飞等^[12]发现,控释 N 肥可显著降低 N 素的淋失,在一定程度上抑制 P、K 的淋失,从而提高耕层土壤速效 N 含量;王素萍等^[6]研究发现,控释 N 肥处理较常规尿素处理使油菜成熟期耕作层土壤 NO₃⁻-N 含量和无机 N 总量分别增加 149.3%~296.1% 和 40.5%~145.9%,而对 NH₄⁺-N 含量无显著影响;薛高峰等^[16]研究发现,包膜控释尿素一次基施时 0—40 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量较单施基肥处理高,60—100 cm 土层无明显差异,但 60 cm 土层显著低于普通尿素处理;李敏等^[13]指出,施用控释尿素能有效提高稻田耕层土壤 N 素养分含量;胡斌等^[17]研究发现,玉米生长中后期 0—20 cm 土层控释 N 肥一次基施处理保持较高 NO₃⁻-N 含量,20 cm 以下土层中显著低于常规施肥处理。本研究结果表明,施用 CRU 可以有效降低土层 NH₄⁺-N 向下淋溶,提高 0—40 cm 土层全 N 和 NO₃⁻-N 含量,避免土壤 N 素流失;而施用 CRU 对不同深度土层有机质、速效 P、全 P、速效 K、全 K 和 pH 的影响不显著。

3.3 控释肥减量对土壤剖面养分含量及分布的影响

相关研究表明,施用 N 肥会提高土壤无机 N 含量,且用量越高,无机 N 含量越高,向深层淋洗的可能性越大,其中土壤剖面 NO₃⁻-N 含量随着施 N 量的增加而增加^[18]。刘飞等^[12]研究发现,控释肥减量 20% 处理未显著降低耕层土壤养分含量,而使耕层以下 NO₃⁻-N 含量减少 14.36%,N 肥表观利用率提高 10.22%;冯爱青等^[5]研究发现,推荐施 N 量及减 N 30% 控释 N 肥施用显著提高无机 N 含量,推荐施 N 量控释 N 肥和普通尿素处理土壤有效 P 含量显著降低,减 N 50% 控释 N 肥处理土壤速效 K 含量显著降低;黄巧义等^[9]研究发现,水稻收获后等 N 量 CRU 处理土壤碱解 N 含量与常规分次施肥处理基本一致,而减 N 40% 处理土壤碱解 N 含量显著降低;何杰等^[19]研究发现,40% 控释氮肥+60% 尿素处理能显著提高水稻生育中后期土壤无机 N 含量,油菜蕾薹期到成熟期土壤无机 N 含量随控释 N 肥添加量的增加而增大,40% 控释氮肥+60% 尿素和 CRU 处理间无显著差异。本研究中,施用 CRU 可以有效降低 N 的流失,提高 0—20 cm 土层全 N 含量,且随着 N 肥用量的增加而呈上升趋势,对土壤耕层培肥和作物生产有重要作用。施用不同用量 CRU 对不同土层深度 pH、有机质、速效 P、全 P、速效 K 和全 K 含量的影响不显著,但减量过大会导致有机质降低,可能是由于减量处理会刺激土壤中有机质的矿化作用。

3.4 控释减量对水稻产量和养分吸收的影响

控释 N 肥缓慢释放有利于土壤对 N 素的保持,满足作物后期对养分的需求。Jarosiewicz 等^[20]认为,施用控释 N 肥可以提高 N 利用率至 60%~80%,在达到相同作物产量的情况下,降低施肥量 10%~50%,同时能保证土壤后期速效 N 的供应,减少土壤中 N 淋溶。这可能是由于包膜控释尿素利于养分利用率增加,大大降低 N 素向土壤深层移动的数量,从而明显减少 NO_3^- -N 向土壤深层渗漏数量,减轻地下水的污染风险^[16]。杨俊刚等^[3]研究发现,等 N 量控释 N 肥较普通尿素处理显著提高土壤中无机 N 素的累积,减少 N 素损失,提高 N 素有效利用,从而促进作物地上部及根系的生长;刘飞等^[12]研究发现,与普通肥料相比,控释 N 肥提高耕层土壤速效 N 含量,显著降低 N 素淋失,使耕层以下土层的 NO_3^- -N 含量平均减少 28.60%,N 肥表观利用率平均提高 16.32%,也在一定程度上抑制 P、K 的淋失,分别平均减少 5.72%和 7.03%,使 P、K 利用率分别平均提高 8.67%和 10.01%。本研究中,减 N 10%CRU 处理显著提高双季稻产量和水稻成熟期 N、P、K 的吸收量。相关分析表明,控释尿素 N 用量与早、晚稻成熟期 N、P、K 吸收量和籽粒产量呈显著正相关。主要是因为控释 N 肥能够协调养分释放速率,在水稻生育中后期 N 素养分稳定释放,且肥效持续时间长,达到养分释放与水稻养分需求的同步,可使水稻产量和 N 肥利用率大幅度提高。

4 结论

(1)控释尿素合理施用能明显提高稻田 0—20 cm 土壤全 N、 NO_3^- -N 和有机质含量,但控释尿素过量减施则相反。

(2)随着土壤剖面加深,土壤全 N、 NO_3^- -N 和有机质含量逐渐下降,N 素淋失风险减小。

(3)控释尿素减 N 10%能显著提高双季稻产量和水稻成熟期 N、P、K 的吸收量,且控释尿素 N 用量与水稻成熟期 N、P、K 吸收量和籽粒产量呈显著正相关。

参考文献:

[1] 田伟,李刚,陈秋会,等. 等氮条件下化学肥料与有机肥连续大量施用下的环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2017,33(5):440-445.

[2] 胡诚,宋家咏,李晶,等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2012,21(4):673-676.

[3] 杨俊刚,倪小会,徐凯,等. 接触施用包膜控释肥对玉米

产量、根系分布和土壤残留无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010,16(4):924-930.

- [4] 石岳峰,张民,张志华,等. 不同类型氮肥对夏玉米产量、氮肥利用率及土壤氮素表观盈亏的影响[J]. 水土保持学报, 2009,23(6):95-98.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李娟,彭金灵,康娟,等. 减施氮肥对稻田土壤剖面养分分布特征的影响[J]. 热带作物学报, 2012,33(8):1378-1383.
- [8] 田发祥,纪雄辉,石丽红,等. 不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J]. 农业现代化研究, 2010,31(2):220-223.
- [9] 黄巧义,唐拴虎,张发宝,等. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017,25(6):829-838.
- [10] 王桂良,崔振岭,陈新平,等. 南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015,26(8):2337-2345.
- [11] 张庆利,张民,田维彬. 包膜控释和常用氮肥氮素淋溶特征及其对土水质量的影响[J]. 生态环境学报, 2001,10(2):98-103.
- [12] 刘飞,张民,诸葛玉平,等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011,17(6):1351-1358.
- [13] 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.
- [14] 朱海滨,杨应明,张晓龙,等. 不同土壤类型养分垂直分布特征[J]. 中国烟草科学, 2014,35(5):55-60.
- [15] 左海军,张奇,徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008,30(12):83-89.
- [16] 薛高峰,张贵龙,孙焱鑫,等. 包膜控释尿素(追施)对冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(2):377-384.
- [17] 胡斌,李絮花,闫童,等. 控释氮肥对土体中无机氮淋溶分布及夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2014,28(4):110-114.
- [18] 高亚军,李生秀,李世清,等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005,19(6):61-64.
- [19] 何杰,李冰,王昌全,等. 不同施氮处理对水稻油菜轮作土壤氮素供应与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017,50(15):2957-2968.
- [20] Jarosiewicz A, Tomaszewska M. Controlled-release NPK fertilizer encapsulated by polymeric membranes [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003,51(2):413-7.