

控释尿素与黄腐酸提高稻麦轮作系统产量和效益的协同效应

姚媛媛, 王晓琪, 杨越超*, 程冬冬, 陈宝成, 刘燕, 唐亚福, 马金昭

(土肥资源高效利用国家工程实验室/山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要:【目的】控释尿素和黄腐酸均已被证实可以提高作物的养分吸收和肥料利用率。本试验研究了控释尿素与黄腐酸配合施用进一步提升肥料效益的效果。【方法】在山东济南粘质水稻土上进行水稻-小麦轮作田间小区试验。试验设不施氮(CK)、普通尿素(U)、控释尿素(CR-U)、控释尿素减量40%(60% CR-U)、控释尿素配施黄腐酸(CR-U+F)和控释尿素减量40%配施黄腐酸(60% CR-U+F)6个处理。于水稻和小麦苗期、拔节期、灌浆期/抽穗期和完熟期采集植株和土壤样品,测定植株叶片光合特性、氮素吸收量和籽粒产量,以及土壤pH和有效氮、磷、钾养分含量。【结果】1)在水稻季和小麦季,CR-U处理较U处理显著增产10.5%和9.8%,氮素利用率分别提高了64.8%和42.0%,农学效率提升了52.2%和47.1%,周年经济效益增加2804元/hm²。2)CR-U+F处理较CR-U处理的水稻产量显著增加7.3%,氮素利用率显著提高32.5%;在小麦季产量显著增加4.4%,氮素利用率显著提高18.3%。60%CR-U+F处理较60%CR-U处理显著提高小麦产量5.0%,但对于水稻无显著增产作用。3)周年经济效益方面,CR-U+F处理较CR-U处理增收2337元/hm²;60%CR-U+F处理较60%CR-U处理增收1823元/hm²,较U处理经济效益也提高了547元/hm²。【结论】综合稻麦轮作系统周年数据,控释尿素显著提高稻麦关键生育期的叶片光合速率,黄腐酸降低了作物蒸腾速率,提高作物对氮素的利用率。控释尿素与黄腐酸配施后二者协同增效作用显著,大幅提升稻麦产量、氮素利用率和经济效益,从而实现了养分的高效利用。**关键词:**控释尿素;黄腐酸;稻麦轮作;产量;光合特性;氮素利用率;土壤养分

Yield and economic profit synergism of controlled release urea and fulvic acid in rice-wheat rotation system

YAO Yuan-yuan, WANG Xiao-qi, YANG Yue-chao*, CHENG Dong-dong, CHEN Bao-cheng, LIU Yan,
TANG Ya-fu, MA Jin-zhao

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources /College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract:【Objectives】Controlled-release urea and fulvic acids have been proved to raise yield and fertilizer efficiencies in rice and wheat production. Their synergism was studied in this paper for further improving fertilizer use efficiency and grain yield.【Methods】A field plot experiment was conducted in the rice wheat rotation system on paddy soil in Jinan, Shandong Province. The experiment treatments included no nitrogen fertilizer control (CK), common urea (U), controlled-release urea (CR-U), controlled-release urea plus fulvic acid (CR-U+F), and 40% less CR-U (60% CR-U) and 40% less CR-U+F (60% CR-U+F). At the seedling, jointing, grain-filling/heading, ripening stage of wheat and rice, plant and soil samples were collected to measure photosynthetic rate, soil nitrogen contents, soil pH, available P and K contents, and the yield.【Results】Compared with U treatment, CR-U treatment increased rice yield by 10.5% and wheat yield by 9.8%, increased nitrogen utilization by 64.8% in rice and 42.0% in wheat, improved agronomic efficiency by 52.2% and 47.1%, and increased annual economic benefit by 2804 yuan/hm², respectively. Compared with CR-U treatment, CR-U+F treatment increased

收稿日期: 2019-08-19 接受日期: 2019-11-27

基金项目: 泰山产业领军人才(LINY201609); 山东省重点研发计划(2017CXGC0306); 十三五科技部重点研发计划(2017YFD0200702)。

联系方式: 姚媛媛 E-mail: yaoyuanyuanzq@163.com; *通信作者 杨越超 E-mail: yangyuechao2010@163.com

the yield and nitrogen use efficiency by 7.3% and 32.5% in rice, and 4.4% and 18.3% in wheat, respectively. 60% CR-U+F treatment improved wheat yield by 5.0% but no obvious effect on rice yield, compared with 60% CR-U treatment. CR-U+F treatment increased the annual net income by 2337 yuan/hm² than CR-U treatment; 60% CR-U+F treatment increased the income by 1823 yuan/hm² than 60% CR-U treatment, and increased net income by 547 yuan/hm² than U treatment. **【Conclusions】** Controlled release nitrogen synchronizes N supply with crop nitrogen requirement, and significantly increases leaf photosynthetic rate during key growth stages of rice and wheat. Fulvic acid reduces crop transpiration rate and increases crop nutrient utilization efficiency. Controlled-release urea and fulvic acid synergistically increase the rice yield, nitrogen utilization efficiency and economic benefit, thus achieving high efficiency nutrient utilization.

Key words: controlled release urea; fulvic acid; rice-wheat rotation; yield; photosynthetic characteristics; nitrogen utilization efficiency; soil nutrient

稻麦轮作系统链接着两个截然不同的土壤环境, 可均衡高效利用温度、降水和土壤养分资源, 是我国广泛应用的农业耕作制度^[1-3]。氮素是水稻和小麦生长过程中最活跃的养分因子^[4-5], 对作物产量的形成起着关键作用。目前, 我国水稻和小麦过量施肥率超过 25%, 氮肥利用率仅有 27.3% 和 38.2%^[6-7], 远低于世界平均氮素利用率水平 50% 以上。不合理的氮肥施用不仅浪费肥料, 还会通过挥发、径流和淋溶等途径造成大气、地表和地下水污染^[8]。因此, 提高氮素利用率对于提高粮食产量、降低农业面源污染、维护国家粮食安全具有重要意义。

控释尿素通过减缓氮素的释放速率来维持较长时间的养分供应^[9]。大量水稻、小麦田间试验已证实, 控释尿素能够提高氮素利用率, 降低人工成本, 甚至在减少氮肥投入 1/3 的基础上还能够保持作物平产甚至增产^[10-11]。由于养分释放缓慢, 还降低了氮素的固定、挥发及淋失, 减轻了环境风险^[12-14]。黄腐酸是广谱生物刺激素^[15], 其可通过调控叶片气孔开闭增强作物的光合作用, 其中的活性基团可吸附多种盐基离子, 改善土壤物理性质, 加速团聚体的形成, 最终提高作物对肥料的利用率^[16]。但二者配施后对稻麦周年轮作系统的影响鲜有研究。因此, 本文通过田间小区试验, 研究了控释尿素和黄腐酸的协同增效作用, 为进一步提高控释尿素的效益提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 6 月至 2019 年 6 月在济南市济阳县水稻科技示范基地进行 (E117°22'、N36°98'),

该地属暖温带半湿润季风气候, 月平均气温和降水如图 1 所示。供试土壤类型为发育在黄河冲积母质上的粘壤水稻土, 水稻种植前土壤基本理化性状为: pH 7.1 (水土比 2.5 : 1), 有机质 13.5 g/kg, 硝态氮 15.4 mg/kg, 铵态氮 12.3 mg/kg, 全氮 1.33 g/kg, 有效磷 19.7 mg/kg, 速效钾 114 mg/kg。

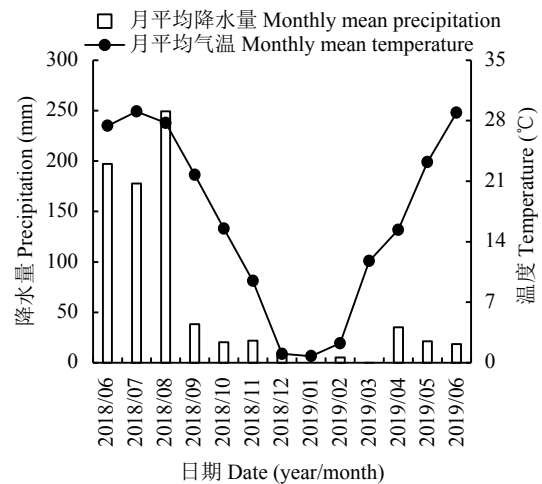


图 1 2018 年 6 月—2019 年 6 月试验地区月平均气温和降水量

Fig. 1 Monthly mean temperature and precipitation during June/2018–June/2019 at the experimental site

供试肥料包括控释期 3 个月的树脂包膜尿素 (N 43%)、普通尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 15.5%) 及氯化钾 (K₂O 60%), 上述肥料均由金正大生态工程集团股份有限公司提供。供试黄腐酸以秸秆为原料腐熟发酵制成, 属生化黄腐酸, 由山东泉林嘉有肥料有限责任公司提供。供试水稻品种为 ‘圣稻 14’, 生育期约 156 天, 属中晚熟常规粳稻; 供试小麦品种为 ‘山农 20’, 生育期约 240 天, 属于半冬性中

晚熟品种。

1.2 试验方法及设计

采用田间小区试验, 小区长宽均为 4 m。试验开始前在各小区筑起 30 cm × 30 cm 的土垅, 以保证单独排灌。试验共设 6 个处理, 不施氮对照 (CK); 普通尿素 (U); 控释尿素 (CR-U); 减量 40% 控释尿素 (60% CR-U); 控释尿素 + 腐殖酸 (CR-U+F); 减量 40% 控释尿素加腐殖酸 (60% CR-U+F), 每个处理重复 3 次, 随机排列, 每个处理具体养分投入量和比例见表 1。普通尿素处理的氮肥 60% 基施; 40% 追施, 水稻于苗期和拔节期各追施 20%; 小麦于拔节期和抽穗期各追施 20%。控释尿素处理的氮肥和磷钾肥一起一次性基施于 15 cm 土层。黄腐酸溶解于 1000 mL 水中, 均匀喷洒于土壤表层。

水稻行距 30 cm、株距 15 cm, 小麦行距为 20 cm。稻麦轮作系统整个生育期内的灌溉、除草、病虫害防治等均按照当地农民常规管理方式。

1.3 样品采集及测定

水稻季于苗期 (2018 年 7 月 14 日)、拔节期 (2018 年 8 月 19 日)、灌浆期 (2018 年 9 月 16 日) 和完熟期 (2018 年 10 月 20 日) 进行植株和土壤样品的采集; 小麦季于苗期 (2018 年 11 月 19 日)、拔节期 (2019 年 3 月 11 日)、抽穗 (2019 年 4 月 15 日) 和完熟期 (2019 年 6 月 10 日) 进行植株和土壤样品的采集。

土壤 pH 采用 pH 计测定, 水土比 2.5 : 1; 土壤硝态氮与铵态氮采用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提, 流动注射分析仪 (AA3-A001-02E, Bran + Luebbe, 德国) 测定; 土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 全自动智能化学分析仪 (Smart Chem 200, Alliance, 法国) 测定; 土壤速效钾采用 1 mol/L CH₃COONH₄ 浸

提, 火焰光度计 (Model 410, Sherwood, 英国) 测定。叶片光合速率 (P_n) 采用便携式光合仪 (Li-6400XT, LI-COR, 美国) 测定; 植株叶片 SPAD 值采用叶绿素仪 (SPAD-502, Minolta, 日本) 测定; 植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消化, 凯氏定氮法测定; 在完熟期对中间三行水稻或小麦全部收割, 实打实收并统计测产。控释尿素 25℃ 静水释放率参考《缓释肥料》(GB/T23348-2009) 国家标准^[17]。控释尿素田间养分释放率采用埋袋法测定^[18]。

氮肥利用率 (%) = (施氮区地上部分吸氮量 - 对照区地上部分吸氮量) / 施氮量 × 100

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量

增产幅度 (%) = (施氮区作物籽粒产量 - 对照区作物籽粒产量) / 对照区作物籽粒产量 × 100^[3]。

1.4 数据分析

数据通过 Excel 2016 和 SAS 8.0 软件进行处理和统计分析, 采用 ANOVA 进行方差分析, 不同处理间采用 Duncan's Multiple Range Test 方法检验各处理平均数在 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 控释尿素在 25℃ 静水和田间土壤条件下的氮素释放特性

供试控释尿素的理论释放期为 3 个月。控释尿素在 25℃ 静水条件下的释放曲线呈“S”型 (图 2): 肥料在前一个月释放缓慢, 该时间段内养分共计释放 21.7%。30~70 天为养分快速释放阶段, 40 天内共有 50.7% 的氮素被释放。随后 70~100 天养分又

表 1 试验处理氮磷钾肥和黄腐酸用量

Table 1 NPK fertilizer and fulvic acid use level in each treatment of the experiment

处理 Treatment	试验设计 Experimental design	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg/hm ²)		黄腐酸 Fulvic acid (kg/hm ²)	
		水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat
CK	不施氮 No N control	0-90-150	0-120-150	0	0
U	普通尿素 Common urea	180-90-150	180-120-150	0	0
CR-U	控释尿素 Controlled-release urea	180-90-150	180-120-150	0	0
60% CR-U	CR-U 的氮量减少 40% CR-U nitrogen reduced by 40%	108-90-150	108-120-150	0	0
CR-U+F	控释尿素 + 黄腐酸 CR-U + Fulvic acid	180-90-150	180-120-150	40	45
60% CR-U+F	CR-U + 黄腐酸, 氮量减少 40% CR-U + Fulvic acid, Reducing 40% of N input	108-90-150	108-120-150	40	45

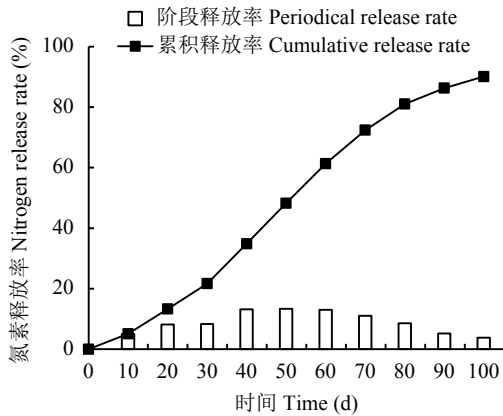


图 2 控释尿素在 25 °C 静水条件下的累积释放率

Fig. 2 Cumulative release rate of controlled-release urea in water at 25 °C

进入缓慢释放阶段, 30 天内氮素累计释放 17.7%。90 天内, 控释尿素氮素累积释放 90.1%, 符合“规定释放期内肥料养分释放总量不能低于 80%”的缓控释肥料行业评价标准 (GB/T 23348-2009)。

肥料在田间条件下的养分释放特性更能代表其实际供肥速率和肥效长短。水稻季控释尿素在土壤中的养分释放规律与 25 °C 静水条件下基本相似 (图 3), 在前 30 天氮素累计释放 21.2%, 释放高峰期同样出现在 30~70 天, 该阶段氮素累计释放 48.3%。小麦季前 100 天由于降水稀少和土壤低温, 控释尿素在该时间段内氮素仅释放了 16.8% (图 4)。当小麦度过越冬期进入返青期后, 随着降雨量、灌溉量以及温度的提升, 控释尿素在第 100~200 天出现释放高峰, 该阶段内氮素累计释放 67.6%。

2.2 不同处理对稻麦产量及产量构成因素的影响

周年轮作系统中水稻和小麦产量受氮肥类型、

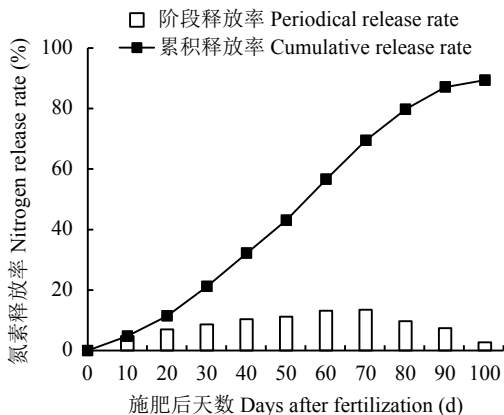


图 3 水稻季控释尿素在土壤中的氮素释放率

Fig. 3 Cumulative release rate of controlled-release urea in mesh bags buried in rice field

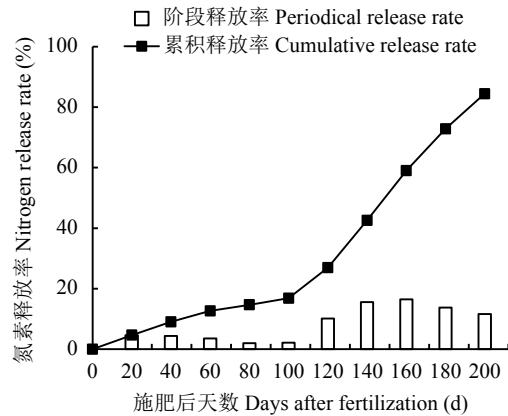


图 4 小麦季控释尿素在土壤中的氮素释放特性

Fig. 4 Cumulative release rate of controlled-release urea in mesh bags buried in wheat field

施氮量和黄腐酸用量 3 个因素共同影响 (表 2)。氮肥类型及施氮量主要影响了作物的有效分蘖数和穗粒数。但除 CK 处理外, 所有施肥处理的千粒重均无显著差异。在水稻季, CR-U 处理较 U 处理水稻产量显著提高 10.5%, 60% CR-U 处理即在减氮 40% 条件下, 产量与全量普通尿素处理也无显著差异。施用黄腐酸后, CR-U+F 处理较 CR-U 处理产量显著提高 7.3%, 但 60% CR-U+F 处理与 60% CR-U 处理产量无显著差异。小麦季, CR-U 处理较 U 处理显著增产 9.8%, 但 60% CR-U 处理产量较 U 处理降低了 6.1%。控释尿素与黄腐酸配施后, CR-U+F 处理在 CR-U 处理基础上进一步增产 4.4%, 并较 U 处理产量提高了 14.7%。此外, 60% CR-U+F 处理较 60% CR-U 处理也显著增产 5.0%, 且与 U 处理产量无显著差异。

2.3 不同处理对稻麦氮素利用状况的影响

U 处理在水稻季和小麦季的氮肥利用率分别仅有 24.8% 和 31.5%, 超过 70% 的氮素未被作物利用而损失掉 (表 3)。与 U 处理相比, CR-U 处理氮素利用率在水稻季显著提高 64.8%, 在小麦季显著提高 42.0%, 因此, 施用控释尿素能够提高氮素利用率, 从而减少氮素损失。控释尿素与黄腐酸配施后, 在控释尿素基础上进一步提高了氮素利用率, 这主要由于施用黄腐酸促进了作物对氮素的吸收。在水稻季和小麦季, CR-U+F 处理较 CR-U 处理总吸氮量分别显著提高 11.7% 和 6.9%, 从而使作物氮素利用率分别提高了 32.5% 和 18.3%, 而 60% CR-U+F 处理也较 60% CR-U 处理分别提高了氮素利用率 19.6 和 2.4 个百分点。氮肥农学效率受氮肥类型、氮素用量和黄腐酸施用 3 个因素共同影响, CR-U、60% CR-

表 2 不同处理的水稻和小麦产量及产量构成
Table 2 Yield and yield components of rice and wheat under different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	千粒重 (g) 1000-grain weight	穗粒数 Grain number per panicle	有效穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Effective panicles	产量 (kg/hm^2) Yield	较 U 处理增产 (%) Increment vs. U treatment
水稻 Rice	CK	23.2 b	111.4 c	283.7 c	5298.2 d	
	U	23.7 a	117.8 b	305.0 bc	6625.9 c	
	CR-U	23.7 a	123.9 a	341.7 a	7318.5 b	10.5
	60% CR-U	23.8 a	112.8 c	314.0 abc	6464.8 c	-2.4
	CR-U+F	23.7 a	125.1 a	318.7 ab	7851.9 a	18.5
	60% CR-U+F	23.7 a	115.1 bc	300.0 bc	6833.3 c	3.1
小麦 Wheat	CK	37.7 b	37.2 c	455.7 d	5492.6 e	
	U	39.5 a	38.2 bc	487.0 bc	6942.6 c	
	CR-U	38.8 a	40.0 ab	527.7 a	7625.9 b	9.8
	60% CR-U	38.9 a	38.6 abc	468.0 cd	6520.4 d	-6.1
	CR-U+F	38.9 a	40.4 a	512.3 ab	7961.1 a	14.7
	60% CR-U+F	38.9 a	37.4 c	493.3 bc	6846.3 c	-1.4

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一作物不同处理间在0.05水平差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments for the same crop at the 0.05 probability level.

表 3 不同处理下水稻和小麦的氮素利用率
Table 3 Fertilizer use efficiency of rice and wheat under different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	生物量 (kg/hm^2) Biomass	总吸氮量 (kg/hm^2) N accumulation	氮素利用率 (%) NUE	农学效率 (kg/kg) NAE	偏生产力 (kg/kg) NFPF
水稻 Rice	CK	11091 e	129.8 e			
	U	13033 d	174.3 d	24.8	7.4	36.8
	CR-U	14148 b	203.2 b	40.8	11.2	40.7
	60% CR-U	12657 d	171.4 d	38.6	10.8	59.9
	CR-U+F	14839 a	227.1 a	54.1	14.2	43.6
	60% CR-U+F	13100 c	192.6 c	58.2	14.2	63.3
小麦 Wheat	CK	11013 c	131.4 e			
	U	12943 b	188.1 c	31.4	8.1	38.6
	CR-U	14433 a	211.9 b	44.7	11.9	42.4
	60% CR-U	12706 b	170.0 d	35.7	9.5	60.4
	CR-U+F	14906 a	226.6 a	52.9	13.7	44.2
	60% CR-U+F	13343 b	172.5 d	38.1	12.5	63.4

注 (Note): NUE—Nitrogen use efficiency; NAE—Nitrogen agronomic efficiency; NFPF—Nitrogen partial factor productivity. 同列数据后不同小写字母表示同一作物不同处理间在0.05水平差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments for the same crop at the 0.05 probability level.

U、CR-U+F 和 60% CR-U+F 处理在水稻季和小麦季氮肥农学效率较 U 处理均有所提高。氮肥偏生产力能够代表单位氮肥所能生产的作物籽粒量。相同施氮量条件下, 控释尿素每千克氮素较普通尿素能够额外产出 10.5% 的水稻和 9.9% 的小麦, 且施用黄腐

酸后, 能够在控释尿素基础上进一步提高氮肥的农学效率和氮肥的偏生产力。

2.4 不同处理对水稻灌浆期和小麦抽穗期叶片光合速率及 SPAD 值的影响

作物产量的 90% 以上源自于叶片的光合作用,

水稻的灌浆期和小麦的抽穗期是作物通过光合作用进行产量积累的关键时期, 该阶段叶片光合速率的高低是影响产量的关键。表 4 表明, CR-U 处理较 U 处理分别显著提高水稻和小麦叶片光合速率 21.9% 和 29.7%, 并使水稻叶片气孔导度增加了 15.0%, 从而提高了叶片进行气体交换的能力。胞间 CO₂ 浓度会随光合效率的增加而降低, CR-U 处理叶片胞间 CO₂ 浓度在水稻季和小麦季分别较 U 处理显著降低 20.1% 和 22.5%, 但本试验条件下, 施用黄腐酸对叶片光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度没有显著影响。蒸腾作用是作物水分吸收和运输的主要动力, 单独施用控释尿素能够提高叶片的蒸腾作用, 从而加速水分的吸收和运输, 但施用黄腐酸降低了叶片的蒸腾作用。叶片 SPAD 值主要受肥料类型影响, 施用控释尿素的处理小麦和水稻叶片 SPAD 值均显著高于 CK 和 U 处理。

2.5 不同处理对土壤 pH 及速效养分供应强度的影响

硝态氮是干旱与半干旱土壤中有效氮素的主要存在形式, 同时其含量也是对土壤氮素丰缺程度的重要反映。水稻季土壤硝态氮含量呈现先降低后升高的趋势, 肥料类型对土壤硝态氮含量影响显著 (表 5)。苗期 U 处理硝态氮含量显著高于施用控释尿素的处理, 但苗期水稻需氮量低, 土壤中过量的氮素不仅

无法被完全吸收而造浪费, 还容易发生烧苗等问题。随着水稻生长, 在拔节期、灌浆期和完熟期, CR-U 处理和 CR-U+F 处理土壤中硝态氮含量均显著高于 U 处理, 甚至在减氮 40% 的条件下, 60% CR-U 处理和 60% CR-U+F 处理土壤硝态氮含量与 U 处理也无显著差异。小麦各处理土壤硝态氮含量与水稻季基本一致 (表 6)。

水稻季土壤铵态氮含量因肥料类型不同而呈现明显差异 (表 5)。水稻为喜铵作物, U 处理水稻苗期土壤中铵态氮含量最高, 但随后迅速下降, 在拔节期较施用控释尿素的处理降低了 23.2%~34.6%, 在灌浆期降低了 22.9%~30.0%, 在完熟期降低了 25.0%~29.4%。而控释尿素即使在减氮 40% 的条件下, 土壤铵态氮含量仍显著高于 U 处理, 从而保证了水稻拔节期和灌浆期等需氮关键时期的氮素供应。但不同施肥处理对小麦季土壤铵态氮含量没有显著影响。整个轮作周年中施用黄腐酸对土壤中硝铵态氮含量影响不显著。磷钾养分在施用量相同的条件下, 各处理土壤中有有效磷和速效钾含量呈现不断下降的趋势, 施用黄腐酸的处理在一定程度上提高了土壤中的有效磷含量, 但所有处理土壤 pH 和速效钾含量差异均不显著。

2.6 不同处理对轮作周年经济效益的影响

经济效益是农民最为关注的问题。通过对轮作

表 4 不同处理水稻和小麦叶片光合特性及 SPAD 值

Table 4 Photosynthetic characteristics of rice and wheat leaves under different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	光合速率 P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 G_s [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO ₂ 浓度 C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	SPAD
水稻 Rice	CK	20.5 b	0.68 b	297.0 a	7.0 c	41.4 b
	U	20.3 b	0.71 b	281.0 a	8.2 ab	40.9 b
	CR-U	24.8 a	0.82 a	224.4 c	9.2 a	45.7 a
	60% CR-U	21.1 b	0.76 b	272.1 ab	9.0 a	46.6 a
	CR-U+F	24.3 a	0.80 a	243.1 bc	7.8 bc	46.1 a
	60% CR-U+F	21.5 b	0.75 b	272.7 ab	7.6 bc	45.3 a
小麦 Wheat	CK	20.1 b	0.46 ab	286.8 a	6.8 b	41.3 b
	U	19.8 b	0.43 b	269.4 ab	8.1 ab	41.3 b
	CR-U	25.7 a	0.54 ab	208.9 c	8.6 a	45.3 a
	60% CR-U	23.4 ab	0.52 ab	250.2 ab	9.0 a	45.6 a
	CR-U+F	25.1 a	0.56 a	230.2 bc	7.3 b	45.3 a
	60% CR-U+F	22.6 ab	0.53 ab	267.1 ab	7.0 b	44.4 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一作物不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments for the same crop at the 0.05 probability level.

表 5 水稻季不同生育期 0—20 cm 土壤 pH 及速效养分含量

Table 5 pH and nutrient contents in 0—20 cm soil layer in different growth stages of rice under different treatments

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	pH	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
苗期 Seedling	CK	7.15 a	12.5 c	18.8 d	40.9 bc	176.7 a
	U	7.08 a	21.9 a	39.1 a	39.5 c	174.7 a
	CR-U	7.16 a	16.5 b	31.3 bc	40.9 bc	181.7 a
	60% CR-U	7.08 a	16.3 b	26.3 c	38.1 c	175.0 a
	CR-U+F	7.13 a	17.6 b	32.3 b	47.1 ab	164.0 a
	60% CR-U+F	7.23 a	16.3 b	28.0 bc	47.7 a	156.7 a
拔节期 Jointing	CK	7.17 a	9.5 c	12.8 b	37.0 c	145.0 a
	U	7.13 a	12.5 b	15.7 b	34.2 abc	128.0 a
	CR-U	7.15 a	15.0 a	24.0 a	38.2 ab	143.7 a
	60% CR-U	7.09 a	16.5 a	20.4 a	34.9 bc	154.3 a
	CR-U+F	7.04 a	14.9 a	21.2 a	40.7 a	138.0 a
	60% CR-U+F	7.18 a	14.5 a	21.2 a	40.0 a	151.3 a
灌浆期 Seed filling	CK	7.11 a	7.4 c	14.9 b	32.8 abc	120.3 b
	U	7.10 a	10.1 b	17.8 b	32.4 bc	134.0 ab
	CR-U	7.13 a	13.3 a	25.4 a	32.0 bc	139.7 ab
	60% CR-U	7.14 a	10.1 b	23.1 a	30.5 c	153.0 a
	CR-U+F	7.10 a	15.0 a	25.4 a	40.3 a	138.3 ab
	60% CR-U+F	7.14 a	10.7 b	23.6 a	39.6 ab	129.0 b
完熟期 Ripening	CK	7.17 a	15.7 c	15.1 b	24.9 bc	98.0 a
	U	7.19 a	22.8 b	16.4 b	26.1 bc	114.3 a
	CR-U	7.18 a	28.7 a	21.9 a	22.5 c	109.0 a
	60% CR-U	7.12 a	24.5 ab	23.2 a	27.6 ab	116.7 a
	CR-U+F	7.16 a	24.8 ab	22.1 a	29.0 ab	103.3 a
	60% CR-U+F	7.12 a	27.5 ab	23.2 a	31.2 a	92.3 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一生育时期不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments for the same growth stage at the 0.05 probability level.

系统周年经济效益进行计算 (表 7), 发现各处理每公顷产出的经济收入由大到小为 CR-U+F > CR-U > 60% CR-U+F > 60% CR-U > U > CK。充足的氮素供应是作物高产的保证。综合产量、氮素利用率和土壤养分供应状况发现, 等氮条件下, 控释尿素因其释放周期长、供氮效果好, 从而促进了水稻和小麦的生长; 而 U 处理氮素利用率低, 稻麦需肥关键时期养分供应不足, 产量降低, 因此每公顷经济效益也较 CR-U 处理降低了 2804 元。控释尿素与黄腐酸配施后, 经济效益在相同肥料基础上有进一步的提升。CR-U+F 处理较 CR-U 处理增收 2337 元/hm²,

60% CR-U+F 处理也能较 60% CR-U 处理增收 1823 元/hm², 甚至在氮素施用量降低 40% 的条件下, 60% CR-U+F 处理经济效益较 U 处理仍提高了 547 元/hm²。

3 讨论

控释尿素在土壤中的养分释放过程仅受温度和饱和蒸汽压两个外界因素影响^[19-20]。在水稻季, 6—10 月份供试地点平均气温为 24.3℃, 雨热同季, 水分充沛 (图 1), 因而控释尿素在土壤中的养分释放规律与 25℃ 静水条件下基本相似。控释尿素在前

表 6 小麦季不同生育期 0—20 cm 土壤 pH 及速效养分含量

Table 6 pH and nutrients content in 0–20 cm soil layer in different growth stages of wheat under different treatments

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	pH	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
苗期 Seedling	CK	7.04 a	21.8 c	13.0 b	40.5 a	146.3 ab
	U	6.98 a	70.2 a	19.8 a	37.3 a	146.0 ab
	CR-U	7.03 a	54.9 b	22.5 a	41.1 a	134.6 b
	60% CR-U	7.02 a	49.5 b	22.7 a	39.5 a	155.7 ab
	CR-U+F	6.99 a	57.1 b	23.8 a	40.5 a	151.3 ab
	60% CR-U+F	7.05 a	50.6 b	20.5 a	41.5 a	164.7 a
拔节期 Jointing	CK	7.08 a	5.0 c	7.1 c	31.3 b	128.7 a
	U	7.19 a	37.1 b	10.7 b	31.0 b	125.0 a
	CR-U	7.12 a	56.2 a	13.3 a	31.4 b	132.0 a
	60% CR-U	7.08 a	43.4 b	13.0 a	32.8 ab	117.0 a
	CR-U+F	7.12 a	54.1 a	12.3 a	34.9 ab	122.3 a
	60% CR-U+F	7.18 a	58.3 a	12.3 a	36.7 a	135.3 a
抽穗期 Heading	CK	7.21 a	5.9 d	7.3 b	28.5 b	108.3 a
	U	7.18 a	12.3 c	10.0 a	29.5 b	107.7 a
	CR-U	7.22 a	20.0 a	11.3 a	29.3 b	120.7 a
	60% CR-U	7.13 a	14.3 bc	10.3 a	31.2 ab	101.0 a
	CR-U+F	7.25 a	18.6 ab	11.6 a	34.6 a	118.3 a
	60% CR-U+F	7.21 a	14.5 bc	10.2 a	34.7 a	112.3 a
完熟期 Ripening	CK	7.15 a	12.4 c	9.9 b	28.1 b	107.7 a
	U	7.24 a	22.0 b	11.8 a	30.6 ab	101.7 a
	CR-U	7.24 a	32.6 a	13.5 a	29.4 ab	106.0 a
	60% CR-U	7.12 a	26.3 ab	12.7 a	27.6 b	100.3 a
	CR-U+F	7.18 a	32.3 a	13.4 a	32.0 a	101.7 a
	60% CR-U+F	7.15 a	28.7 ab	12.1 a	32.7 a	98.3 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一生育时期不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments for the same growth stage at the 0.05 probability level.

30 天释放缓慢, 而释放高峰期出现在 30~70 天。凌启鸿等^[21]对水稻精确施氮进行了研究, 发现水稻移栽后至拔节期, 其吸氮量占整个生育期吸氮总量的 25%~35%, 在拔节期至抽穗期占吸氮总量的 45.7%~52.5%, 而抽穗期至成熟期占吸氮总量的 13.4%~29.3%。因此, 控释尿素在土壤中的养分释放规律符合水稻的氮肥需求规律。Ding 等^[22]也对 2000—2016 年间的 489 项水稻试验结果进行了 Meta 分析, 发现在相同施氮量条件下施用控释尿素的处理较施用普通尿素的处理增产幅度可达 7.4 个百分点。在小麦季, 由于种植后的前 4 个月降水稀少, 平均气温

也仅为 3.4℃ (图 1), 因此控释尿素在该时间段内氮素释放十分缓慢。当小麦度过越冬期后, 随着降雨量及温度的提升 (2019 年 3 月至 2019 年 6 月的月平均气温为 19.8℃), 控释尿素在第 100 天至 200 天进入快速释放阶段, 这也为小麦拔节、抽穗和灌浆等需肥关键时期提供了充足的氮素供应。因此, 虽然小麦有着长达 8 个月的生育周期, 但控释期仅为 3 个月的控释尿素就能基本满足小麦整个生育期对氮素的需求, 这也与 Zheng 等^[20]的观点一致。

虽然控释尿素已经在多类农业种植系统中被证实能够控制氮素释放以提高作物产量、养分利用率

表 7 不同处理的周年经济效益

Table 7 Annual revenue, cost and net profit in rice-wheat rotation system under different treatments

处理 Treatment	氮肥折价 N cost (yuan/hm ²)	其他费用 Other cost (yuan/hm ²)	水稻产量 Rice yield (kg/hm ²)	水稻产值 Rice income (yuan/hm ²)	小麦产量 Wheat yield (kg/hm ²)	小麦产值 Wheat income (yuan/hm ²)	纯收入 Net return (yuan/hm ²)
CK	0	9000	5298	15894	5493	12084	18978
U	1565	9400	6626	19878	6943	15274	24186
CR-U	2743	9000	7318	21956	7626	16777	26990
60% CR-U	1829	9000	6465	19394	6520	14345	22911
CR-U+F	2743	9000	7852	23556	7961	17514	29327
60% CR-U+F	1829	9000	6833	20500	6846	15062	24733

注 (Note): 小麦 Wheat: 2.2 yuan/kg; 水稻 Rice: 3 yuan/kg; 普通尿素 Common urea: 2 yuan/kg; 控释尿素 Controlled-release urea: 3.2 yuan/kg; 磷钾肥 Phosphorous and potassium fertilizer: 500 yuan/hm²; 黄腐酸 Fulvic acid: 100 yuan/hm²; 其他费用包括租地、播种、施肥、灌溉、农药、田间管理总计约 400 元 Other costs 400 yuan including land lease, pesticide and labor for sowing, fertilization, irrigation and field management.

并降低劳动成本。但作为肥料, 控释尿素仅能作为养分供应的来源, 其增产效应存在阈值, 作物的产量也不能因其施用量的提高而无限增加^[20]。因此, 更多思路与技术亟待革新以缓解人口急剧膨胀和粮食日益短缺之间的矛盾。2012 年, 生物刺激素被定义为“一种施用于植物表面或根际后能够刺激植物提高养分吸收效率、非生物胁迫耐受性以及作物品质的物质和/或微生物”。黄腐酸作为生物刺激素的重要“成员”, 已被证实能够改善土壤结构, 促进根系伸长, 增加叶绿素含量, 并最终提高作物产量和氮肥利用率^[15]。大田试验中, 控释尿素与黄腐酸配施后, 在控释尿素基础上促进了作物对氮素的吸收, 从而使作物产量和氮素利用率得到了进一步提升。控释尿素通过养分缓慢释放, 确保溶液离子不会因施肥产生剧烈变动; 黄腐酸能够与尿素络合形成腐脲^[16], 进一步降低尿素的水解速度并提高土壤缓冲能力。二者协同增效, 优势互补, 在合理氮素供应基础上增强氮素固定, 最终实现养分高效利用。本试验条件下, 还发现施用黄腐酸后使水稻、小麦不同生育期土壤有效磷含量也得到了显著提升。这可能由于黄腐酸将部分固定态的磷溶解并释放到了土壤中, 且黄腐酸中的阴离子也会与磷酸根竞争固相表面专性吸附点位从而减少了土壤对磷的吸附^[23]。研究还发现, 施用黄腐酸在一定程度上降低了植株叶片的蒸腾速率。一方面蒸腾作用是作物进行水分和养分运输的动力, 蒸腾作用的降低也意味着作物对养分吸收动力的降低; 但另一方面, 蒸腾速率的降低能够减少水分蒸发, 从而增强作物抵御逆境胁迫的能力, 李绪行等^[24]也证实黄腐酸能够增强小麦的抗旱

能力。

传统的矿物源黄腐酸主要来源于风化煤和泥炭等不可再生资源, 虽然在作物生产中具有良好的生物刺激作用, 但其不可再生的性质限制了其在农业生产中的大面积应用。供试黄腐酸以小麦秸秆为原料腐熟发酵制成, 属于生化黄腐酸, 不仅与矿源黄腐酸具有相似的生理活性, 还具有可再生、成本低及环境友好等优势。通过前期表征工作^[25-26], 证实供试黄腐酸分子量主要集中在 500~3000 Da, 较小的分子量使其更容易被作物所吸收。其组成主要包含氨基酸、多糖和木质素衍生物, 并富含较多羧基、酚羟基等活性官能团, 各种基团能够通过离子交换、螯合络合以及电位吸附等方式固定土壤中的多种元素, 并促进土壤团聚体形成, 从而进一步改善土壤物理结构。在 2015 年, 农业农村部制订并发布了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》, 将化肥减量增效作为调控化肥施用政策的首要目标, 本试验条件下发现黄腐酸配施控释尿素具有增加作物产量、提高氮素利用率和经济效益的潜力, 在未来研究中, 将进一步研究能否通过施用黄腐酸减少控释尿素用量, 开发更简易的二者配施方式, 并深入探究黄腐酸的增产机理。

4 结论

控释尿素通过合理的氮素供应, 改善了土壤氮素供应状况, 满足了稻麦整个生育期对氮素的需求, 并提升了作物关键阶段的叶片光合能力, 最终使小麦和水稻产量、氮素利用率较普通尿素有了显著提升。黄腐酸配合控释尿素增强了作物对氮素的

吸收, 提高了水稻和小麦各生育期土壤有效磷含量, 在不减少氮素投入的前提下, 较控释尿素单独施用显著提高水稻产量 7.3%、小麦产量 4.4%, 提高水稻氮素利用率 32.5%、小麦氮素利用率 18.3%, 周年经济效益增加了 2337 元/hm²。在控释尿素减量 40% 条件下与黄腐酸配施, 水稻产量与全量普通尿素处理也无显著差异。综合来看, 控释尿素与黄腐酸配施后能够协同增效, 促进氮素高效吸收, 从而为解决作物氮素利用率低的问题提供有效的技术途径和理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(6): 1611–1621.
Yang J C, Du Y, Liu H. Cultivation approaches and techniques for annual super-high-yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze river[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1611–1621.
- [2] 唐玉姝, 慈恩, 颜廷梅, 等. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 1000–1006.
Tang Y S, Ci E, Yan T M, *et al.* Relationship between soil enzyme activity and soil fertility of paddy fields under wheat-rice cropping system in a long-term experiment in Taihu lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 1000–1006.
- [3] 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.
Xu X J, Ma H B, Ning Y W, *et al.* Effects of slow-released nitrogen fertilizers with different application patterns on crop yields and nitrogen fertilizer use efficiency in rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 307–316.
- [4] 曹小闯, 李晓艳, 朱练峰, 等. 水分管理调控水稻氮素利用研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3882–3890.
Cao X C, Li X Y, Zhu L F, *et al.* Effects of water management on rice nitrogen utilization: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3882–3890.
- [5] Yin X, Luo W, Wang S, *et al.* Effect of nitrogen starvation on the responses of two rice cultivars to nitrate uptake and utilization[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 690–698.
- [6] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. *土壤*, 2017, (6): 1067–1077.
Yan X, Jin J Y, Liang M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China[J]. *Soils*, 2017, (6): 1067–1077.
- [7] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3227–3238.
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3227–3238.
- [8] Geng J, Sun Y, 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(7): 65–73.
- [9] 陈剑秋, 张民, 杨越超. 包膜控释尿素养分释放特性的研究[J]. *化肥设计*, 2006, 44(2): 57–59.
Chen J Q, Zhang M, Yang Y C. Study on nutrient releasing characteristics of membrane wrapping control releasing fertilizer[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2006, 44(2): 57–59.
- [10] Yang Y, Zhang M, Li C, *et al.* Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2307–2317.
- [11] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 162–167.
Zheng W K, Li C L, Dou X X, *et al.* Effects of different types of controlled release urea on wheat yield and biochemical properties of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 162–167.
- [12] Wang B, Li Y, Wan Y, *et al.* Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215(1): 100–109.
- [13] Zhang W, Dou Z, He P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2013, 110(21): 8375–8380.
- [14] 高杨, 王霞, 宋付朋, 等. 模拟降雨条件下树脂包膜控释尿素对土壤氮素流失的控制效应[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 9–12.
Gao Y, Wang X, Song F P, *et al.* Effects of controlled release urea coated by polymer on nitrogen loss of soil under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 9–12.
- [15] Calvo P, Nelson L, Kloepper J. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1–2): 3–41.
- [16] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 959–968.
Li Z L, Liu Z G, Zhang M, *et al.* Effects of controlled release urea combined with fulvic acid on wheat yield and soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 959–968.
- [17] 颜晓, 张民, 魏宗强, 等. 控释尿素养分速测及在田间土壤中氮素释放率研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 167–171.
Yan X, Zhang M, Wei Z Q, *et al.* Fast measurement for nutrition release rate of controlled release urea and study of its nitrogen release rate in the field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 167–171.
- [18] Wilson M, Rosen C, Moncrief J. A comparison of techniques for determining nitrogen release from polymer-coated urea in the field[J]. *Hortscience*, 2009, 44(2): 492–494.
- [19] 段路路, 张民, 刘刚, 等. 缓控释肥料养分释放特性评价及快速测定方法研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 299–307.
Duan L L, Zhang M, Liu G, *et al.* Evaluation of nutrient characteristics of slow and control-release fertilizers and fast measurement method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 299–307.
- [20] Zheng W, Liu Z, Zhang M, *et al.* Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-

- released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 106–115.
- [21] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457–2467.
Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G, *et al.* Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457–2467.
- [22] Ding W, Xu X, He P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2008, 227(2): 11–18.
- [23] 陈琪, 刘之广, 张民, 等. 包膜磷酸二铵配施黄腐酸提高小麦产量及土壤养分供应强度[J]. *土壤学报*, 2018, 55(60): 1472–1484.
Chen Q, Liu Z G, Zhang M, *et al.* Effects of application of coated diammonium phosphate in combination with fulvic acid improving wheat yield and soil nutrient supply intensity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(60): 1472–1484.
- [24] 李绪行, 殷蔚意, 邵莉楣, 等. 黄腐酸增强小麦抗旱能力的生理生化机制初探[J]. *植物学通报*, 1992, 9(2): 44–46.
Li X X, Yin W Y, Shao L M, *et al.* Preliminary investigation of physiological and biochemical mechanisms on drought-resistance of wheat enhanced by leaf-spraying fulvic acid[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9(2): 44–46.
- [25] Yao Y Y, Wang C, Wang X Q, *et al.* Activation of fulvic acid-like in paper mill effluents using H₂O₂/TiO₂ catalytic oxidation: characterization and salt stress bioassays[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 378: 120702.
- [26] Yao Y Y, Wang X Q, Yang Y C, *et al.* Molecular composition of size-fractionated fulvic acid-like substances extracted from spent cooking liquor and its relationship with biological activity[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53: 14752–14760.