植物营养与肥料学报 2013,19(4):808-815
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0405

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

李 敏[1,2,3], 郭熙盛[1,3*], 叶舒娅[1,3], 刘 枫[1,3], 袁嫚嫚[1,3], 黄义德[2]
(1 安徽省农业科学院土壤肥料研究所,安徽合肥 230031; 2 安徽农业大学,安徽合肥 230036;
3 安徽养分循环与资源环境省级实验室,安徽合肥 230031)

摘要: 本试验以控释期为90d的硫膜(SPCU)和树脂膜(PCU)控释尿素为材料,通过盆栽试验,研究了硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用效率的影响。结果表明,与普通尿素(U)一次基施相比,控释尿素各处理均能显著提高水稻子粒产量、氮肥表观利用率和农学效率,增幅分别达15.1%～51.4%、64.5%～141.1%和5.4～18.2 kg/kg;显著提高水稻生育中后期叶片净光合速率;提高水稻生育中后期的SPAD值。与普通尿素分次施用相比,树脂膜控释尿素及硫膜控释尿素和普通尿素以7∶3比例一次性施入的处理能显著提高水稻子粒产量、氮肥农学效率以及水稻收获后的土壤全氮和碱解氮含量,其增幅分别为7.9%～31.7%、3.3～13.0 kg/kg、2.2%～17.6%和13.2%～22.0%;显著提高叶片中后期的净光合速率,且以树脂膜控释尿素100%一次基施的处理最高。施用树脂膜控释尿素的各处理较普通尿素均能显著提高水稻的氮肥生理效率。树脂膜控释尿素比硫膜控释尿素表现出更好的水稻增产效应和氮肥利用效率,更能有效延缓叶片衰老,实现水稻氮素的高效利用。

关键词: 硫膜控释尿素; 树脂膜控释尿素; 水稻产量; 光合特性; 氮肥利用率
中图分类号: S145.5; S511.01 **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-505X(2013)04-0808-08

Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice

LI Min[1,2,3], GUO Xi-sheng[1,3*], YE Shu-ya[1,3], LIU Feng[1,3], YUAN Man-man[1,3], HUANG Yi-de[2]
(*1 Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2 Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3 Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui, Hefei 230031, China*)

Abstract: Using sulfur- and polymer-coated controlled release urea (SPCU, PCU) with a releasing period of 90 days as experimental materials, a pot experiment was conducted to study the effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea on yield and photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice. Compared with the conventional urea (U), the controlled release urea significantly increases the grain yields by 15.1%-51.4%, and increases the nitrogen apparent efficiencies and nitrogen agronomic efficiencies by 64.5%-141.1% and 5.4-18.2 kg/kg, respectively. The controlled release urea could greatly improve the net photosynthetic rate in flat leaves of rice and enhance SPAD during the middle-late growth stages. Compared with the conventional urea split, the polymer-coated controlled release urea and the 70% sulfur-coated controlled release urea combined with 30% conventional urea markedly increase the grain yields by 7.9%-31.7%, and the nitrogen agronomic efficiencies and soil total N and available N are increased by 3.3-13.0 kg/kg and 2.2%-17.6% and 13.2%-22.0%, respectively, and the net photosynthetic rate in flat leaves at the middle-late growth stages are also significantly increased. The effect of the 100% polymer-coated controlled release urea is most important. Compared with the conventional urea and the conventional urea split, the polymer-coated controlled release urea could significantly increase nitrogen fertilizer physiological efficiency of rice. The polymer-coated controlled release urea

收稿日期: 2012-09-28 **接受日期**: 2013-03-22
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD11B02;2012BAD04B09);国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B06-02);安徽省农科院科技创新团队项目(11C0202)资助。
作者简介: 李敏(1979—),女,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事新型肥料研究。E-mail:limin791025@126.com
* 通信作者 Tel:0551-65145710,E-mail: 1078681598@qq.com

produces better rice yield and has higher nitrogen fertilizer efficiency and effective photosynthetic characteristics, compared with the sulfur-coated controlled release urea.

Key words: sulfur-coated controlled release urea; polymer-coated controlled release urea; rice yield; photosynthetic characteristics; nitrogen fertilizer efficiency

尿素是一种速效氮肥,施入土壤后很快溶解,一部分会在脲酶的作用下转化为氨态氮挥发损失掉,而另一部分则随淋溶和径流损失,进入土壤深层或流入江河。我国稻田氨挥发损失量一般占施氮量的9%～60%[1];稻麦轮作区氮肥淋溶和径流损失相当于氮肥施用量的6%[2]。稻田氮肥损失远远大于旱地,旱地氮肥利用率为40%～60%,而稻田只有20%～40%[3]。我国稻田中氮肥损失高达50%以上[1],稻田氮素损失不仅造成氮肥利用率降低,生产成本上升,而且通过挥发、淋溶和径流损失还会造成湖泊富营养化等环境污染问题[4-9]。因此提高氮肥利用率、降低环境污染已成为全球亟待解决的重大课题。控释氮肥的施用能够有效降低稻田土壤氨挥发损失,提高水稻氮肥利用率,减少农业面源污染,已成为众多学者近十多年来研究的热点。郑圣先等[10]研究表明,控释氮肥能明显地降低稻田氨挥发、淋失和硝化—反硝化的损失,氮肥利用率和农学效率显著地高于尿素。鲁艳红等[11]研究证明,施用等氮量控释氮肥的处理比施用尿素处理总径流损失量降低24.5%到27.2%。纪雄辉等[12]的研究也表明,控释氮肥能显著降低双季稻施用尿素15d内表层水和径流液中的氮素浓度,从而显著消减整个水稻生育期总氮的径流损失。

以往控释氮肥在水稻上的相关研究多集中在单一控释氮肥增产和环境效应方面,而本研究通过网室盆栽试验,研究不同类型包膜控释尿素及其与普通尿素的配施比例对水稻产量和氮肥利用率以及水稻叶片不同生育时期光合特性和水稻氮素吸收利用的影响,以期为包膜控释尿素在水稻高产、优质、高效生产中的应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

盆栽试验于2011年6～9月在安徽合肥安徽省农业科学院土壤肥料研究所网室中进行。合肥地处安徽省中部,中纬度地带,北纬32°、东经117°,位于江淮之间,全年气温冬寒夏热,春秋温和,属于暖温带向亚热带的过渡带气候类型,为亚热带湿润季风气候。年平均气温15.7℃,降水量近1000 mm,日照约2100 h。

供试氮肥为普通尿素(U)、硫膜控释尿素(SPCU)和树脂膜控释尿素(PCU)。普通尿素为颗粒尿素(含N 46%);硫膜控释尿素(含N35%)和树脂膜控释尿素(含氮42%)由山东金正大生态工程有限公司生产,控释期为3个月。磷肥为过磷酸钙(含$P_2O_5$12%),钾肥为氯化钾(含K_2O 60%)。供试水稻品种为新两优6号。供试土壤为水稻土,采自肥东八斗农田耕层0～20 cm,土壤有机质含量16.2 g/kg、全氮0.95 g/kg、全磷0.45 g/kg、碱解氮85.6 mg/kg、速效磷23.3 mg/kg、速效钾142.1 mg/kg, pH值5.14。

1.2　试验设计

试验共设9个处理:1)不施氮肥(CK, No N);2)普通尿素100%一次性基施(U1, urea 100% basal application);3)普通尿素按基肥:分蘖肥6:4施用(U2, urea, basal:topdressing=6:4);4)普通尿素和硫膜控释尿素以7:3配比一次性施入(SPCU1, 70% urea + 30% sulfur-coated urea, basal application);5)普通尿素和硫膜控释尿素以3:7配比一次性配施入(SPCU2, 30% urea + 70% sulfur-coated urea, basal application);6)硫膜控释尿素100%一次性基施(SPCU3, 100% sulfur-coated urea, basal application);7)普通尿素和树脂膜控释尿素以7:3配比一次性施入(PCU1, 70% urea + 30% polymer-coated urea, basal application);8)普通尿素和树脂膜控释尿素3:7配比一次性配施(PCU2, 30% urea + 70% polymer-coated urea, basal application);9)树脂膜控释尿素100%一次性基施(PCU3, 100% polymer-coated urea, basal application),每个处理3次重复,随机区组排列。试验用塑料桶高33 cm,直径20 cm×20 cm,用土量15 kg,施肥量为N 160 mg/kg、P_2O_5 55 mg/kg, K_2O 110 mg/kg。除无氮对照外,其他各处理氮、磷、钾用量相等。

于2011年6月3日移栽水稻秧苗,秧龄35d,6月13日追施分蘖肥,9月22日收获并计产。水稻

生长期间,灌溉时保持水层 3 cm,分蘖末期适当晒田,减少无效分蘖的发生,整个水稻生育期统一进行病虫害防治。

1.3 测定项目与方法

包膜控释尿素氮素累积释放率的测定 按照国标 GB/T 23348-2009 的方法进行,称取控释包膜尿素约 10g(称准至 0.01g),放入小网袋中,将其封口,置于 250 mL 玻璃瓶中,注入 200 mL 水,加盖密封后在 25℃的培养箱中培养,取样时间为 24 h、3 d、5 d、7 d、10 d、14 d、28 d、42 d、5 6 d、84 d,测定总氮含量,计算氮素累积释放率。取样时,应注意使瓶内的液体浓度保持一致,移入 250 mL 容量瓶前需将瓶上下颠倒三次,冷却至室温后定容至刻度线,从而用来测定氮释放量。然后,再将 200 mL 水注入装有肥料小袋的瓶中,加盖密封后放入恒温培养箱中继续培养,3 次重复,同时做普通尿素空白对照。氮素累积释放率(%) = n 天氮的累积溶出量/试样中氮量 ×100。

产量及产量构成因素的测定 水稻收获时,以盆为单位,把水稻装入网袋中,自然风干后测定穗数、穗粒数、千粒重及粒重。

光合速率及叶绿素含量的测定 分别于分蘖始期、分蘖盛期、抽穗期和灌浆期,用 TPS-1 便携式光合作用测定仪,于晴天的 9:00 ~ 11:00 点分别测定剑叶的净光合速率,并同时用 SPAD-502 型叶绿素仪测定顶三叶的 SPAD 值(叶绿素含量),3 次重复,求其平均值。

土壤养分含量 有机质含量用重铬酸钾外加热法;全氮用半微量凯氏法;全磷用 $HClO_4$-H_2SO_4 消解,比色法测定;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 0.5 mol/L$NaHCO_3$ 浸提,比色法测定;速效钾用 1 mol/L NH_4Ac 浸提,火焰光度法测定;pH 用电极法测定,土水比为 1:2.5[13]。

氮肥表观利用率(NFUE,%) =(施氮处理地上部吸氮总量 - 无氮处理地上部吸氮总量)/施氮量 ×100

氮肥生理效率(NPUE,kg/kg) =(施氮处理子粒产量 - 无氮处理子粒产量)/(施氮处理地上部吸氮总量 - 无氮处理地上部吸氮总量)

氮肥农学效率(NAE,kg/kg) =(施氮处理子粒产量 - 无氮处理子粒产量)/施氮处理氮肥用量

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 及 SPSS13.0 软件进行计算与统计分析,Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 包膜控释尿素氮素累积释放曲线

从图 1 可以看出,25℃条件下,普通尿素(U)在水中几分钟就完全溶解,而硫膜(SPCU)和树脂膜(PCU)控释尿素的控释期长达 90 d。包膜控释尿素氮素累积释放率随培养时间的推移呈增加趋势,硫膜控释尿素在整个培养期间的氮素累积释放率均高于树脂膜控释尿素。硫膜控释尿素 28 d 时的氮素累积释放率达到 67.7%,显著高于树脂膜控释尿素,而在浸提 28 d 之后,树脂膜控释尿素的氮素释放速率迅速增加,而硫膜控释尿素的释放速率增加较小,说明硫膜控释尿素培养前期氮素释放率高,树脂膜控释尿素培养中后期氮素释放率高。

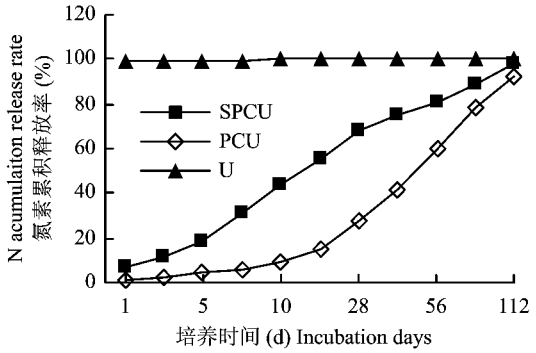

图 1 包膜控释尿素氮素累积释放率

Fig.1 The N accumulation release rate of the controlled release urea in water

2.2 不同氮肥处理对水稻子粒产量及产量构成因素的影响

表 1 显示,不同氮肥处理对水稻产量及产量构成因素有显著影响。施氮处理的水稻子粒产量均高于对照,且差异达显著水平。施用硫膜控释尿素各处理的水稻子粒产量显著高于普通尿素一次基施(U1)处理,与分次施用普通尿素 U2 处理相比,硫膜控释尿素处理中,SPCU2 处理的子粒产量与之达到显著差异水平,SPCU3 和 SPCU1 处理与 U2 的差异不显著,且均显著低于 SPCU2 处理。施用树脂膜控释尿素各处理的水稻子粒产量均显著高于 U1 和 U2 处理,其增幅分别达 24.0% ~ 36.4% 和 7.8% ~ 31.7%,且随着树脂模控释尿素配施比例的增加而增大,PCU3 处理的产量最高,显著高于其他配施处理。在配施普通尿素比例等量的条件下,树脂膜控释尿素对水稻的增产效果显著优于硫膜控释尿素。

表 1　不同氮肥处理对水稻子粒产量及产量构成因素的影响

Table 1　Effects of different treatments on grain yield and its components of rice

处理 Treatment	子粒产量(g/pot) Grain yield	千粒重(g) 1000-grain weight	每盆有效穗数(No./pot) Spikes per pot	穗粒数(No./ear) Kernels per ear
CK	66.1 f	25.3 c	17.0 h	167.6 d
U1	85.0 e	25.5 bc	24.7 fg	191.8 c
U2	97.7 d	25.4 bc	23.3 g	219.4 a
SPCU1	97.8 d	25.0 c	26.7 ef	199.6 bc
SPCU2	108.0 c	27.3 a	29.3 cd	195.4 c
SPCU3	99.5 d	25.6 bc	23.0 g	192.7 c
PCU1	105.4 c	25.4 bc	30.7 bcd	204.8 b
PCU2	121.2 b	25.1 c	31.3 bc	203.8 b
PCU3	128.7 a	26.3 b	35.3 a	212.6 a

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Data followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

产量构成因素中,与对照相比,施氮处理的水稻每盆有效穗数和穗粒数均达到显著性差异,千粒重除 SPCU2 处理达到显著差异外,其他处理无显著差异。与 U1 相比,施用硫膜控释尿素配施普通尿素处理的每盆有效穗数除 SPCU3 外,增幅分别为 8.1% 和 18.9%,SPCU2 处理达显著差异水平;施用树脂膜控释尿素的增幅为 24.3%～43.2%,差异达到显著水平,并随普通尿素配施比例的减小而增大,PCU3 处理最高。与 U2 相比,施用硫膜控释尿素配施普通尿素处理的每盆有效穗数除 SPCU3 外,增幅分别为 14.3% 和 25.7%,差异显著;施用树脂膜控释尿素处理的增幅为 31.5%～51.4%,差异亦达显著水平。施用硫膜控释尿素各处理穗粒数与 U1 处理无显著差异;施用树脂膜控释尿素处理则均显著高于 U1。除 PCU3 外各施用控释尿素处理的穗粒数均显著低于 U2。从上述产量和产量构成因素的结果可以看出,控释尿素是通过提高每盆有效穗数来提高水稻产量。

2.3　不同氮肥处理对水稻各生育期光合特性的影响

2.3.1 水稻各生育期剑叶净光合速率　由表 2 可以看出,施氮可以显著提高水稻各生育期剑叶的净光合速率(Pn)。从分蘖始期开始,施用包膜控释尿素各处理水稻的净光合速率呈先升后降的单峰变化趋势,SPCU2、PCU2 和 PCU3 处理生育后期保持较高的叶片净光合速率。分蘖始期 U1 处理的叶片净光合速率显著高于其他施氮处理,进入分蘖盛期施用控释尿素处理显著高于 U1,抽穗期则显著高于 U1 和 U2,灌浆期除 PCU1 处理外,均显著高于 U1 和 U2。说明施用控释尿素有利于提高水稻生育中后期叶片的净光合速率。且从分蘖盛期开始,树脂膜控释尿素处理的水稻叶片净光合速率显著高于硫膜

表 2　不同处理对水稻各生育期剑叶净光合速率的影响 [CO_2 μmol/(m^2·s)]

Table 2　Effects of different treatments on the net photosynthetic rate(Pn) in flat leaves at different growth stages of rice

处理 Treatment	分蘖始期 Initial tillering	分蘖盛期 Full tillering	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling
CK	14.4d	15.1f	11.2e	10.8f
U1	23.2 a	19.5e	12.2d	12.9e
U2	20.1b	21.3d	13.2d	16.4 c
SPCU1	20.1b	21.4d	15.0 c	14.8d
SPCU2	18.4bc	25.7b	17.2b	21.7 a
SPCU3	18.3bc	23.5 c	14.9 c	19.9b
PCU1	19.3b	23.8 c	16.7b	16.3 cd
PCU2	18.2bc	29.2 a	22.7 a	22.0a
PCU3	16.3 c	30.8 a	23.7 a	22.9 a

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Data followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

控释尿素对应的各处理,说明树脂膜控释尿素对提高水稻叶片净光合速率的作用优于硫膜控释尿素;硫膜控释尿素处理中水稻叶片净光合速率 SPCU2 显著高于其他处理,树脂膜控释尿素处理中 PCU3 最高,但与 PCU2 差异不显著。

2.3.2 水稻各生育期叶绿素含量(SPAD 值) 施氮对水稻各生育期叶绿素含量(SPAD 值)的影响显著(表3)。自分蘖始期始至灌浆期止,水稻叶片的 SPAD 值呈先升后降趋势。分蘖始期 U1 和 PCU1 处理显著高于其他施氮处理;分蘖盛期除 SPCU1 外,其他控释尿素处理的水稻叶片的 SPAD 值显著高于 U1;抽穗期及灌浆期 PCU2 和 PCU3 显著高于 U1 和 U2 处理,说明控释尿素有利于维持水稻生育后期的叶绿素含量。施用树脂膜控释尿素,随着控释尿素比例的增加,水稻叶片的 SPAD 值呈上升趋势;施用硫膜控释尿素,则随着控释尿素比例的增加,呈先增加后降低趋势,且树脂膜控释尿素处理的 SPAD 值高于对应的硫膜控释尿素处理。树脂膜控释尿素比硫膜控释尿素更有利于保持水稻生育后期的叶绿素含量。

表3 不同处理对水稻各生育时期 SPAD 值的影响

Table 3 Effects of different treatments on SPAD at different growth stages of rice

处理 Treatment	分蘖始期 Initial tillering	分蘖盛期 Full tillering	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling
CK	31.6 d	35.4 d	36.5 d	37.1 e
U1	36.5 a	37.4 c	40.9 d	37.4 cd
U2	34.7b c	38.4 bc	41.1 bcd	38.6 bc
SPCU1	35.2 b	38.6 bc	42.7 b	38.5 c
SPCU2	34.1 c	39.3 b	42.4 bc	39.7 b
SPCU3	34.0 c	39.2 b	40.5 d	38.8 bc
PCU1	36.5 a	39.3 b	42.5 bc	38.7 bc
PCU2	34.8 bc	39.7 ab	45.0 a	40.8 a
PCU3	34.8 bc	40.9 a	45.8 a	41.1 a

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平 Data followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.4 不同氮肥处理对水稻氮素累积和氮肥利用率的影响

不同处理对水稻氮肥利用率的影响结果见表4。子粒吸氮量 PCU2 和 PCU3 显著高于其他处理,但两者之间无显著差异;秸秆吸氮量 SPCU3 最高,显著高于其他处理。施用控释尿素各处理水稻吸氮总量高于施用普通尿素处理,PCU2 和 PCU3 的吸氮总量显著高于其他处理;硫膜控释尿素处理中 SPCU2 的吸氮总量显著高于其他处理。氮肥表观利用率的高低顺序为:PCU3 > PCU2 > SPCU2 > SPCU3 > PCU1 > SPCU1 > U2 > U1,控释尿素处理的氮肥表观利用率比 U1 增加 64.5% ~ 141.1%,比 U2 增加 4.3% ~ 52.9%;同样配比条件下,树脂膜控释尿素处理的氮肥表观利用率比硫膜控释尿素高 0.9% ~ 41.7%。氮肥农学效率为控释尿素处理显著高于 U1,树脂膜控释尿素处理显著高于 U2,硫膜控释尿素仅 SPCU2 处理显著高于 U2,但显著低于 PCU2 和 PCU3 处理。施用硫膜控释尿素的氮肥生理效率与普通尿素无显著差异,树脂膜控释尿素处理显著高于普通尿素处理。说明施用树脂膜控释尿素比硫膜控释尿素对提高水稻的氮肥利用率更有效。

2.5 不同氮肥处理水稻收获后的土壤养分含量

不同处理水稻收获后土壤养分含量变化见表5。由表5可以看出,施氮能显著提高土壤全氮、碱解氮、速效磷含量,对全磷、有机质和 pH 无显著影响。土壤全氮含量为 PCU3 处理最高,其次为 PCU2,二者均显著高于其他处理;SPCU3 和 SPCU2 处理的土壤全氮显著高于施用尿素处理,但两者之间则无显著差异。碱解氮以 PCU3 处理最高,且显著高于其他处理。有机质含量以 PCU2 最高,但与 PCU3 和 SPCU3 无显著性差异。施用硫膜控释尿素的 SPCU2 和 SPCU3 处理能显著提高土壤速效磷含量,但施氮则显著降低了土壤速效钾含量。综上所述,与普通尿素相比,除 SPCU1 处理外,施用控释尿素显著提高了土壤全氮和碱解氮含量,树脂膜控释尿素的效果优于硫膜控释尿素,树脂膜控释尿素处理中 PCU3 效果最好。

3 讨论

3.1 不同氮肥处理对水稻产量及其构成因素的影响

从本试验的水稻子粒产量结果可以看出,施用

表 4　不同处理对水稻氮肥利用率的影响

Table 4　Effects of different treatments on nitrogen fertilizer efficiency of rice

处理 Treatment	子粒吸氮量 Grain N uptake (g/pot)	秸秆吸氮量 Plant N uptake (g/pot)	吸氮总量 Total N uptake (g/pot)	氮肥表观利用率 NFUE (%)	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮肥生理效率 NPUE (kg/kg)
CK	0.86 f	0.39 f	1.25 e	—	—	—
U1	1.27 e	0.62 e	1.89 d	26.5 d	7.9 e	29.6 c
U2	1.53 cd	0.72 cd	2.26 c	41.8 c	13.1 d	31.3 c
SPCU1	1.54 cd	0.76 c	2.30 c	43.6 c	13.3 d	30.2 c
SPCU2	1.76 b	0.81 b	2.57 b	54.9 b	17.5 c	31.8 c
SPCU3	1.47 d	0.89 a	2.36 c	45.1 c	14.0 d	29.0 c
PCU1	1.58 c	0.72 cd	2.31 c	44.0 c	16.4 c	37.2 b
PCU2	1.89 a	0.82 b	2.71 a	60.6 ab	23.0 b	37.9 b
PCU3	1.97 a	0.82 b	2.79 a	63.9 a	26.1 a	40.7 a

注(Note)：NFUE—氮肥表观利用率 Nitrogen apparent efficiencies；NAE—氮肥农学效率 Nitrogen agronomic efficiencies；NPUE—氮肥生理效率 Nitrogen physiology efficiencies. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 5　不同处理水稻收获后土壤养分变化

Table 5　Effects of different treatments on changes of soil nutrients after rice harvesting

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
CK	14.0 c	0.87 f	0.38 a	84.0 e	15.6 d	110.7 a	5.74 bc
U1	14.1 c	0.90 e	0.38 a	99.8 d	20.8 c	89.7 bc	5.77 bc
U2	14.4 bc	0.91 e	0.38 a	98.2 d	20.9 c	91.4 b	5.80 bc
SPCU1	14.2 c	0.91 e	0.38 a	95.9 d	20.4 c	84.7 cd	5.70 bcd
SPCU2	14.4 bc	0.95 c	0.38 a	114.7 b	22.0 b	86.4 bcd	5.84 b
SPCU3	15.1 a	0.94 cd	0.38 a	107.5 c	23.7 a	74.7 e	5.99 a
PCU1	14.5 bc	0.93 d	0.37 a	111.5 bc	20.6 c	83.0 d	5.57 d
PCU2	15.3 a	0.97 b	0.37 a	111.2 bc	20.0 c	83.0 d	5.67 cd
PCU3	14.8 ab	1.07 a	0.38 a	119.8 a	20.2 c	88.9 bcd	5.65 cd

注(Note)：同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

树脂膜控释尿素比施普通尿素(U1)和(U2)的产量增幅分别达 24.0%～51.4% 和 7.9%～31.7%；施硫膜控释尿素水稻产量比 U1 和 U2 增幅分别达 15.0%～27.1% 和 0.04%～10.5%。施用树脂膜控释尿素处理的水稻产量显著高于施用普通尿素，这与符建荣等的研究结果一致[14]。树脂膜控释尿素对水稻的增产效果高于硫膜，这和马富亮在小麦试验中的研究结果一致[15]，这与硫膜和树脂膜控释尿素本身氮素释放特性有关。硫膜控释尿素前期氮素释放率高，树脂膜控释尿素中后期释放率高，说明树脂膜控释尿素能有效控制氮肥释放，使氮肥释放后移，氮素积累高于硫膜控释尿素，为水稻高产提供重要保障。

水稻的产量形成主要取决于单位面积穗数、每

穗粒数和千粒重。符建荣研究指出,应用尿素和控释氮肥混施或全量施用控释尿素通过提高单位面积穗数、每穗实粒数来提高水稻产量[14]。纪雄辉两年试验研究表明,施用控释氮肥通过提高水稻单位面积穗数、每穗实粒数提高水稻产量[16]。本试验结果表明,施用控释尿素对水稻千粒重的影响不大(仅 SPCU2 显著高于其他处理),但对有效穗数和穗粒数有显著影响。在施用硫膜控释尿素的处理中,仅 SPCU2 的有效穗数显著高于普通尿素处理;而施用树脂膜控释尿素的处理有效穗数均显著高于普通尿素,且树脂膜控释尿素处理显著高于对应的硫膜控释尿素。水稻穗粒数以 U2 处理最高,但与 PCU3 无显著差异,树脂膜控释尿素处理的穗粒数显著高于 U1,而硫膜控释尿素与 U1 无显著差异。说明树脂膜控释尿素是通过提高水稻的有效穗数和穗粒数提高产量,而硫膜控释尿素(SPCU2 处理)则是通过提高千粒重和有效穗数来提高水稻产量。

3.2 不同氮肥处理对水稻光合特性的影响

叶绿素是植物代谢过程中进行光合作用、同化物质的基础,是光合作用的重要色素,担负着光合作用过程中原初反应时对太阳光量子的捕获和传递。在高光强条件下,叶绿素含量在一定范围内与水稻剑叶光合速率呈正相关[17]。聂军等[18]研究发现,施用控释尿素较普通尿素更能有效提高水稻生育中后期叶片叶绿素含量和净光合速率,延长水稻生育后期功能叶的光合功能,延缓水稻叶片衰老,提高水稻产量。本试验与其研究结果一致,水稻进入分蘖盛期后,施用控释尿素的水稻叶片净光合速率显著高于施用普通尿素,施用树脂膜控释尿素的水稻叶绿素含量高于普通尿素处理。水稻生长进入生育中后期,施用树脂膜控释尿素(PCU2 和 PCU3)的叶片净光合速率和叶绿素含量显著高于施普通尿素(U2),而施硫膜控释尿素与普通尿素(U2)对叶片叶绿素含量的影响无显著差异。这与两种控释尿素的供氮特征有关,说明树脂膜控释尿素较硫膜控释尿素更有利于提高水稻生育中后期叶片净光合速率和叶绿素含量,可延缓叶片衰老。

3.3 不同氮肥处理对水稻氮肥利用率和土壤养分的影响

氮肥表观利用率是描述水稻氮肥吸收利用特征的主要指标,反应作物对肥料氮的回收利用效果;氮肥农学效率是氮肥施肥量对作物子粒产量增加的反应;氮肥生理效率指因施氮增加的吸氮量转化为产量或干物质的效率,三者是从不同侧面反应作物对氮肥吸收、利用程度。评价一种肥料的利用效率,只有采用 2 个以上肥料利用指标,即肥料回收效率、农学效率或生理效率,才能准确反应作物对肥料的吸收和利用状况[19]。有研究表明,采用速效肥料与树脂包膜控释肥合理配施或单独施用树脂包膜控释肥,其肥料表观利用率、氮素农学效率和生理效率均高于尿素和硫铵分次施肥[14]。本试验条件下,施用控释尿素各处理的氮肥表观利用率和农学效率显著高于普通尿素(U1);SPCU2、PCU2 和 PCU3 处理显著高于 U2。施树脂膜控释尿素的氮肥生理效率显著高于普通尿素(U1 和 U2),硫膜控释尿素则与普通尿素无显著差异。两种控释尿素相比,树脂膜控释尿素的氮肥表观利用率和农学效率显著优于对应的硫膜控释尿素处理,这可能是树脂膜控释尿素在水稻生长中后期持续释放大量氮素,更能有效提高水稻叶片叶绿素含量和净光合速率,延缓叶片衰老,使水稻对肥料氮的依赖性逐渐增强,增强肥料氮的作用,提高水稻吸氮总量,从而有效提高氮素利用率。

本试验结果表明,施用控释尿素较普通尿素更能有效提高土壤全氮、碱解氮含量,且树脂膜效果优于硫膜控释尿素,各处理以 PCU3 效果最佳。这与王鑫等的研究,即保护地菜地施用包膜控释尿素较普通尿素能够明显提高土壤全氮、碱解氮含量的结果一致[20]。原因可能在于包膜控释尿素较普通尿素能够增强土壤多酚氧化酶和脲酶活性,这些酶和土壤养分之间存在显著的相关性。而树脂膜控释尿素较硫膜控释尿素在水稻生长中后期持续保持大量氮素供应,更有利于土壤氮素在耕层富集。

综上所述,硫膜和树脂膜控释尿素在提高水稻生育中后期叶片叶绿素和净光合速率,延缓水稻叶片衰老,增加水稻产量,提高土壤养分含量和氮素利用率方面均起到较好的效果,树脂膜控释尿素优于硫膜控释尿素。硫膜控释尿素中以普通尿素和硫膜控释尿素以 3∶7 配比一次性配施入(SPCU2 处理)效果最好,树脂膜控释尿素中以树脂膜控释尿素 100% 一次性基施(PCU3 处理)效果最好。两种包膜控释尿素相比,树脂膜控释尿素在水稻上施用具有更好的综合效应,更能实现水稻的高产、高效。

参考文献:

[1] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 240-244.
Song Y S, Fan X H. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(2): 240-244.

[2] 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.
Xiang P A, Zhou Y, Jiang J A *et al.* Studies on the external costs of and the optimum use of nitrogen fertilizer based on the balance of economic and ecological benefits in the paddy field system of the Dongting Lake area[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(12): 2531-2537.

[3] Vlek P L G, Byrnes B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[J]. Fert. Res., 1986, 9(1-2): 131-I 47.

[4] 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，2005，6(2)：76-80，98.
Yin J, Mian S P. Review of losses pathways of fertilizer N from paddy field and the measurements for its reduction[J]. J. Agric. Sci., 2005, 26(2): 76-80, 98.

[5] 赵东，颜廷梅，乔俊，等. 太湖地区稻田氮素损失特征及环境效应分析[J]. 生态环境学报，2012，21(6):1149-1154.
Zhao D, Yan T M, Qiao J *et al.* Characteristics of N loss and environmental effect of paddy field in Taihu area[J]. Ecol. Environ. Sci., 2012, 21(6):1149-1154.

[6] 宋永生，范晓晖. 太湖地区稻田氮素平衡及其环境效应的研究[J]. 井冈山学院学报(自然科学)，2006，27(2)：38-40.
Song Y S, Fan X H. Environmental effect and balance of nitrogen in paddy fields in the Taihu Lake region[J]. J. Jinggangshan Univ., (Nat. Sci. Ed.), 2006, 27(2): 38-40.

[7] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境，2000，9(1)：1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(1): 1-6.

[8] Reddy K R, Patrick W H, Broadbent F E. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments[J]. Crit. Rev. Environ. Tech., 1984, 13(4): 273-309.

[9] 樊小林，刘芳，廖照源，等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(2)：463-473.
Fan X L, Liu F, Liao Z Y *et al.* The status and outlook for the study of controlled release fertilizers in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 463-473.

[10] 郑圣先，刘德林，聂军，等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(2)：137-142.
Zheng S X, Liu D L, Nie J *et al.* Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(2): 137-142.

[11] 鲁艳红，纪雄辉，郑圣先，廖玉林. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(3)：490-495.
Lu Y H, Ji X H, Zheng S X, Liao Y L. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on reducing nitrogen runoff loss and increasing nitrogen recovery efficiency of rice plant[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 490-495.

[12] 纪雄辉，郑圣先，鲁艳红，廖玉林. 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.
Ji X H, Zheng S X, Lu Y H, Liao Y L. Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer application regulation in rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(12): 2521-2530.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.
Lu R K. Analytical methods for soli and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.

[14] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2001，7(2)：145-152.
Fu J R. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(2): 145-152.

[15] 马富亮，宋付朋，高杨，邹朋. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报，2012，23(1)：67-72.
Ma F L, Song F P, Gao Y, Zou P. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(1): 67-72.

[16] 纪雄辉，郑圣先，聂军，等. 稻田土壤上控释氮肥的氮素利用率与硝态氮的淋溶损失[J]. 土壤通报，2007，38(3)：467-471.
Ji X H, Zheng S X, Nie J *et al.* Nitrogen recovery and nitrate leaching from a controlled release nitrogen fertilizer in an irrigated paddy soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(3): 467-471.

[17] 孟军，陈温福，徐正进，等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J]. 沈阳农业大学学报，2001，32(4)：247-249.
Meng J, Chen W F, Xu Z J *et al.* Study on photosynthetic rate and chlorophyll content[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2001, 32(4): 247-249.

[18] 聂军，郑圣先，戴平安. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学，2005，19(3)：255-261.
Nie J, Zheng S X, Dai P A *et al.* Regulation of senescence and photosynthetic function of rice leaves by controlled release nitrogen fertilizer[J]. Chin. J. Rice Sci., 2005, 19(3): 255-261.

[19] 李方敏，樊小林，刘文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(4)：494-500.
Li F M, Fan X L, Liu W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 494-500.

[20] 王鑫，徐秋明，曹兵，等. 包膜控释尿素对保护地菜地土壤肥力及酶活性的影响[J]. 水土保持学报，2005，19(5)：77-80，84.
Wang X, Xu Q M, Cao B *et al.* Effects of controlled release coated urea on soil fertility and enzyme activities of protected vegetable field[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(5): 77-80, 84.