

控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响

郑圣先, 聂军, 戴平安, 郑颖俊

(湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125)

摘要: 采用微区和小区试验的方法,研究了控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征及对根系衰老过程中膜脂过氧化产物和活性氧清除酶活性的影响。研究表明,施用控释氮肥,明显地增加杂交水稻生育后期的根干重、根长和根长密度,而根半径减小;提高根系活力和吸收面积,使杂交水稻生育后期根系中MDA含量降低和SOD、POD和CAT的活性提高。控释氮肥中,氮的逐渐释放,可减少具有强烈伤害的活性氧产物速率及其累积数量,提高活性氧清除酶的活性,在很大程度上延缓了杂交水稻生育后期根系的衰老和吸氮能力的衰退。

关键词: 控释氮肥; 杂交水稻; 根系; 衰老

中图分类号: S145.5

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2006)02-0188-07

Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice

ZHENG Sheng-xian, NIE Jun, DAI Ping-an, ZHENG Ying-jun

(Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: Controlled release nitrogen fertilizers (CRNF) are physically prepared from the granules of the soluble nitrogen fertilizers by coating them with film-forming materials to reduce their dissolution rate. These fertilizers are made to release nitrogen nutrient gradually to synchronize with the nitrogen requirement of crop plants during different growth stages. This study quantified the effect of CRNF on root morphological and physiological characteristics during late growth stages of hybrid rice, and lipid peroxidative products, active oxygen scavenging enzymes in root system during the root senescence process of hybrid rice. The results showed that the CRNF could increase the root dry weight, root length, and root length density, while the root radius became smaller during later growth stages of hybrid rice. At the meantime, the CRNF decreased the MDA contents but increased active oxygen scavenging enzyme activities. The CRNF could also increase the activity of SOD, POD and CAT during root senescence process, and the gradually release of nitrogen nutrient from the CRNF could decrease the production and accumulation of active oxygen in the root system, thus enhance the activities of active oxygen scavenging enzymes. Therefore, the CRNF could significantly retard the senescence and decline of nitrogen absorbing capacity of the root systems through regulating nitrogen release rate from CRNF during late growth stages of hybrid rice.

Key words: controlled release nitrogen fertilizer(CRNF); hybrid rice; root system; senescence

控释氮肥是在速溶性颗粒氮肥表面涂覆一层能降低氮溶解速率的包膜材料制备而成,它具有调节

和控制氮释放的功能。近年来的研究证明,控释氮肥氮的释放速率与水稻不同生育期阶段对氮素养分

收稿日期: 2005-01-14

修改稿收到日期: 2005-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(30270770); 农业科技成果转化资金项目(02EFN214301156); 湖南省农科院重点学科项目(03-05)资助。

作者简介: 郑圣先(1950—),男,湖南常德人,研究员,主要从事植物营养与施肥和新型肥料研究。

的需求基本同步,一次性全量基施,可以满足水稻全生育期对氮的生理需求^[1];它可以通过调节养分释放模式提高氮素利用率和减少对环境的污染^[2-4]。但在水稻控释氮肥研究中,大多只涉及到水稻地上部分氮的吸收、利用和产量效应^[5]。

水稻根系是吸收养分和水分的重要器官,同时也是一些生长调节剂合成代谢光合产物的重要器官。我国杂交水稻的育成及其生理特点的研究表明,杂交水稻根系的形态与机能具有明显的超亲优势^[6]。过去,对杂交水稻根系的研究,主要涉及杂交水稻根系性状与地上部关系^[7],根系营养物质成分,根系生化生理^[8-9],土壤营养环境与根系生长的关系,根系生长与产量的关系等^[10]。关于控释氮肥对杂交水稻根系生长发育的影响尚不清楚。本试验研究了控释氮肥施用对杂交水稻根系的影响及其延缓根系衰老的生理基础,从根系衰老调控的角度为杂交水稻高产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2002~2003年在长沙县干杉乡试验点进行。2002年供试土壤为第四纪红土发育的红黄泥田,测定土壤pH 6.3,有机质29.9 g/kg,全N 1.8 g/kg,速效N 155.9 mg/kg,速效P 18 mg/kg和速效K 60 mg/kg;2003年供试土壤同样为第四纪红土发育的红黄泥田,pH 5.3,有机质32.2 g/kg,全N 1.9 g/kg,速效N 171.6 mg/kg,速效P 12.9 mg/kg和速效K 64.0 mg/kg。

田间小区与微区试验设3个处理:1)对照(不施氮肥,施磷、钾肥,以CK表示);2)大粒尿素(N 120 kg/hm²,以Urea表示);3)控释氮肥(N 120 kg/hm²,以CRNF表示)。用于¹⁵N标记控释氮肥(¹⁵N丰度5.06%)和¹⁵N标记大粒尿素(¹⁵N丰度5.01%)试验的微区设置在相应的小区内。微区是用直径30cm的无底不锈钢圆筒嵌于土做成,每筒植稻3穴,每穴2株。各处理均施P 32.3 kg/hm²和K 93.4 kg/hm²。按照目前水稻产区农民常规的施肥方法,尿素处理的氮70%作基肥深施入10 cm土层;余下30%的氮在分蘖始期施入,并结合中耕混入土中。控释氮肥一次性全量基肥施入5cm深的土层内,3个处理的磷、钾肥于插秧前2 d全部作基肥施入,并立即用铁齿耙耙入土内,小区面积20 m²,重复4次,随机区组排列。微区内施入肥料用手混入土中。供试水稻为杂交早稻组合八两优100。在整个生育期

内,管理措施完全相同,分别于分蘖始期、幼穗分化期、孕穗期、齐穗期、乳熟期、蜡熟期和成熟期采取各小区植株样,烘干,测定植株的干重、含氮量。从微区采取的地上部和根系经80℃烘干至恒重密封后放入-5℃低温冰箱内备¹⁵N分析之用。

为了研究单位面积根系生长发育情况,按插秧规格埋入20 cm×20 cm×30 cm大小的0.055 mm孔径有底尼龙网袋,将原来的泥土重新放入网袋中,抚平,中间插1穴水稻,分别在抽穗期、乳熟期、蜡熟期和成熟期取样时把网袋与泥土一起取出,分离根系与植株。每次取3袋,一部分用于根形态学特征的测定,另一部分用于根系生理学特征、膜脂过氧化产物和活性清除酶活性的测定。

控释氮肥的田间原位埋入试验。插秧后当天把分别装有3 g控释氮肥的30个0.055 mm孔径尼龙网袋埋入4个重复相应的小区与插秧垂直方向的5 cm土层中,按生育期间隔每次取3袋,测定全氮量。积温是按施肥之日起日平均气温累加计算的。

1.2 根系形态生理特征的测定

根鲜重与干重:把从田间取回的根系置于2 mm尼龙筛内,用去离子水徐徐冲洗净根表泥土,用滤纸吸收根表水分后称其鲜重,然后放入烘箱内经80℃烘干12 h称重。

根长:用ZG-1植物根系长度测试仪测定。根长度为网袋内1茺水稻根系的总长度。

根半径:应用公式 $r_0 = (FW/(\pi \cdot Lr))^{1/2}$ 计算^[11]。式中FW为根鲜重,Lr为根长。

根长密度:应用公式 $Lv = Lr/Vs$ 计算^[11]。式中Lr为根长度,Vs为土壤体积。

根系活力用TTC还原法测定^[12];根系总吸收面积、活跃吸收面积和比表面积采用华东师大生物与生理教研室介绍的方法测定^[13]。丙二醛(MDA)含量用硫代巴妥酸(TBA)比色法测定^[13];超氧化歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)采用林植芳等的方法测定^[14]。其中SOD对氮蓝四唑(NBT)光还原的抑制作用,以抑制50%的酶量为1个SOD酶单位;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法,以1 mL酶液在1 min内氧化1 μg愈创木酚为1个酶的活性单位;过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾法,以1 min分解H₂O₂的mg数表示。

1.3 土壤和植株分析

土壤中的pH、有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾和植株中全氮均采用常规分析^[15]。植株和根系¹⁵N质谱分析由河北省农林科学院农业物理生理

生化研究所完成。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥的释放速度与杂交水稻各生育期对氮素养分的需求及其对产量及其构成的影响

在淹水稻田条件下,控释氮肥中氮的释放速率主要由温度决定^[16]。在两年种植杂交水稻期间,土壤均处于淹水状态,因此,土壤水分不会影响到控释氮肥的释放速率。应用累积氮释放量与施肥时间和积温(ACAT)的关系作图(图 1A, B)显示,随着时间

的变化和积温的增加,控释氮肥的累积 N 释放量逐渐增加。两年平均,当施肥后 21 d(移栽至幼穗分化期)或积温达到 320 °C 时,控释氮肥的累积 N 释放量 51.1 kg/hm²,达到施入肥料 N 总量的 42.6%; 45 d(幼穗分化期至齐穗期)或积温达到 1105 °C 时,累积 N 释放量为 110.3 kg/hm²,达到施入肥料 N 总量的 91.9%; 76 d(齐穗期至成熟期)或积温达到 1958 °C 时,累积 N 释放量为 119.7 kg/hm²,达到施入肥料 N 总量的 99.8%。

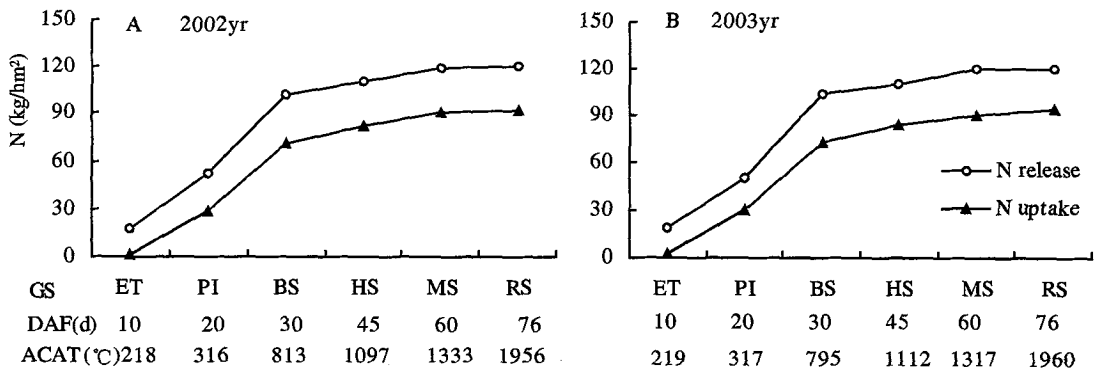


图 1 控释氮肥中累积氮释放量与杂交稻吸收来自控释氮肥氮的关系

Fig.1 Relation of cumulative N release and uptake by hybrid rice from controlled release N fertilizer

(ET—分蘖始期 Early tillering stag; PI—幼穗分化期 Panicle initiation; BS—孕穗期 Booting stage; HS—抽穗期 Heading stage; MS—乳熟期 Milk stage; RS—成熟期 Ripening stage; GS—生育期 Growth stage; DAF—施肥后天数 Day after fertilization; ACAT—积温 Accumulative air temperature)

在施 N 量 120 kg/hm² 的条件下,两年试验中,杂交水稻生育前期(移栽至幼穗分化期)稻株吸收来自尿素中的氮量为 N 29.91 kg/hm²,占本田杂交水稻全生育期吸收肥料 N 量的 53.0%;生育中期(幼穗分化期至齐穗期)吸收 N 25.47 kg/hm²,占 45.2%;生育后期(齐穗期至成熟期)吸收 N 1.01 kg/hm²,仅占 1.8%。而施用控释氮肥处理的杂交水稻,生育前期稻株吸收来自控释氮肥中 N 量平均为 N 28.97 kg/hm²,占本田杂交水稻全生育期吸收肥料 N 总量的 31.3%;生育中期为 N 53.70 kg/hm²,占 58.2%;生育后期为 N 9.67 kg/hm²,占 10.5%。上述结果说明,控释氮肥的 N 释放速度基本上与杂交水稻各生育期对氮素养分需求同步^[5]。水稻生育中期稻株吸收氮量迅速增加,而在整个生育期,水稻的累积吸收氮量要低于控释肥料的累积释放氮量,这与作者以前的试验所得的结论一致^[1]。控释氮肥在杂交水稻抽穗后仍可提供 9.67 kg/hm² 的氮,这部分氮无疑给植株根系生长提供了良好的氮素营养条

件。

试验还看出,控释氮肥区的子粒产量、有效穗和实粒数高于尿素区(表 1),说明施用控释氮肥的增产作用,主要是通过延缓后期根系衰老和改善光合产物的运转的分配而实现的。

2.2 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态学特征的影响

不同处理中杂交水稻生育后期的根干重、根长、根长密度和根半径的两年测定结果(图 2)看出,控释氮肥对杂交早稻生育后期的根系生长有明显的影。在田间条件下,施用尿素和控释氮肥的根干重、根长、根长密度均比对照处理增加,而根半径减小。在相同施氮水平条件下,控释氮肥处理杂交早稻后期的根系发达,其根干重、根长和根长密度值均大于尿素处理,与尿素处理的差异达到显著水平或极显著水平;而根半径均小于尿素处理。说明控释氮肥能明显延缓了根系的衰老,延长了根系吸收土壤养分的能力。

表 1 控释氮肥对杂交水稻产量和产量构成的影响

Table 1 Effect of controlled release nitrogen fertilizer on yield components of hybrid rice.

年份 Year	处理 Treatment	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	有效穗 Available panicle (No./hill)	实粒数 Full grains per panicle (grains/panicle)	千粒重 1000-grain weight (g)
2002	CK	6937.8 c	11.8 c	81.7 b	27.0
	Urea	7734.0 b	12.9 b	90.3 a	28.0
	CRNF	8566.7 a	17.9 a	91.7 a	28.3
2003	CK	6010.9 C	8.4 b	92.9 C	27.3
	Urea	7651.4 B	9.7 a	106.6 B	28.1
	CRNF	8392.4 A	10.0 a	113.0 A	28.4

注:不同大小字母表示差异分别达到1%和5%显著水平,下同。

Note: Different capitals and small letters mean significant at 1% and 5% levels, respectively, same as follows.

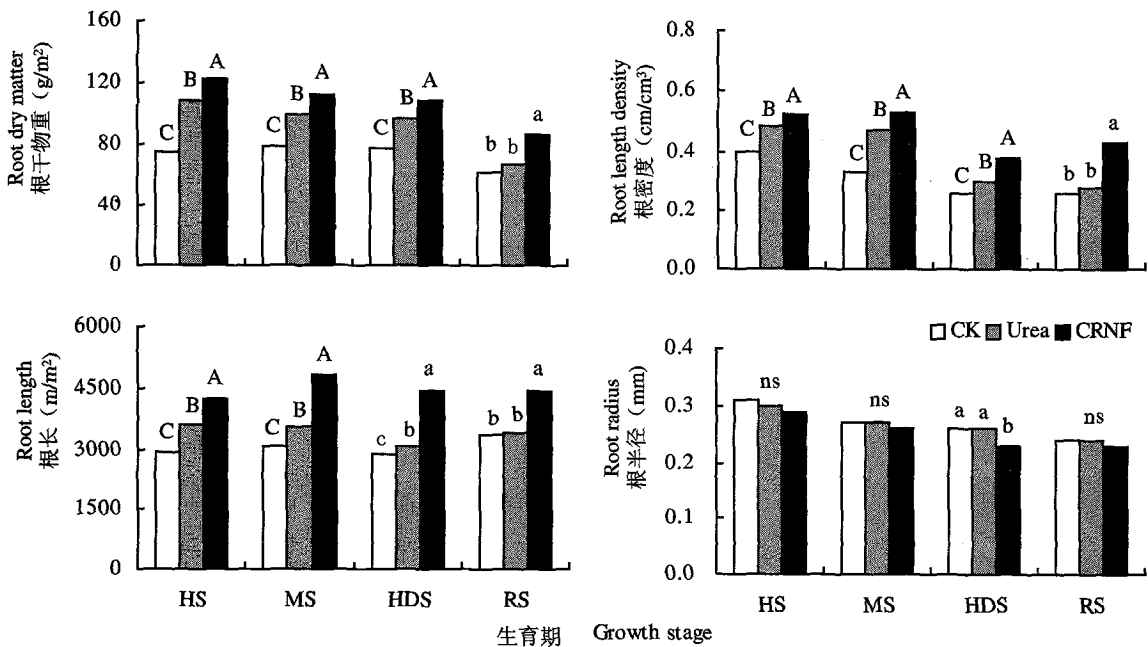


图 2 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态学特征的影响

Fig.2 Effects of controlled release nitrogen fertilizer on root morphological characteristics of hybrid rice during late growth stage

(HS—抽穗期 Heading stage; MS—乳熟期 Milk stage; HDS—腊熟期 Hard dough stage; RS—成熟期 Ripening stage;下同 Same as follows.)

2.3 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系生理学特性的影响

测定结果表明,杂交水稻抽穗后的根系 TTC 还原力逐渐降低,成熟期达到最低值。尿素处理根系活力下降速度快,而控释氮肥处理能提高根系活力,延缓 TTC 还原力下降。抽穗后控释肥料处理的根系活力均明显高于尿素处理,与尿素处理的差异达到极显著水平(图 3)。

尿素处理与控释氮肥处理之间,不仅在根系活力方面存在差异,而且在根系吸收面积方面也有不同。图 3 可见,控释氮肥处理的根系总吸收面积、活

跃吸收面积和比表面积均高于尿素处理,达到显著水平或极显著水平。控释氮肥处理的根系发达,根细且长、根长密度大,因而在生长环境中,其根系的几何分布范围广,这就扩大了摄取养分范围和吸收面积。

尿素和控释氮肥处理之间根系的吸氮能力存在明显差异。¹⁵N示踪结果(表 2)表明,尿素处理抽穗期植株从土壤中吸收的肥料¹⁵N为 34.49 kg,占该期植株吸氮总量的 37.9%,此后植株从土壤中吸收的肥料¹⁵N仅为 0.73 kg/hm²,到成熟期,植株吸收的总氮量中主要来自土壤氮。控释氮肥在提高水稻后期

根系吸氮能力的作用远远大于尿素。在水稻生育后期,控释氮肥处理的植株无论是吸氮总量,还是从吸

收来自肥料¹⁵N量均高于尿素处理。

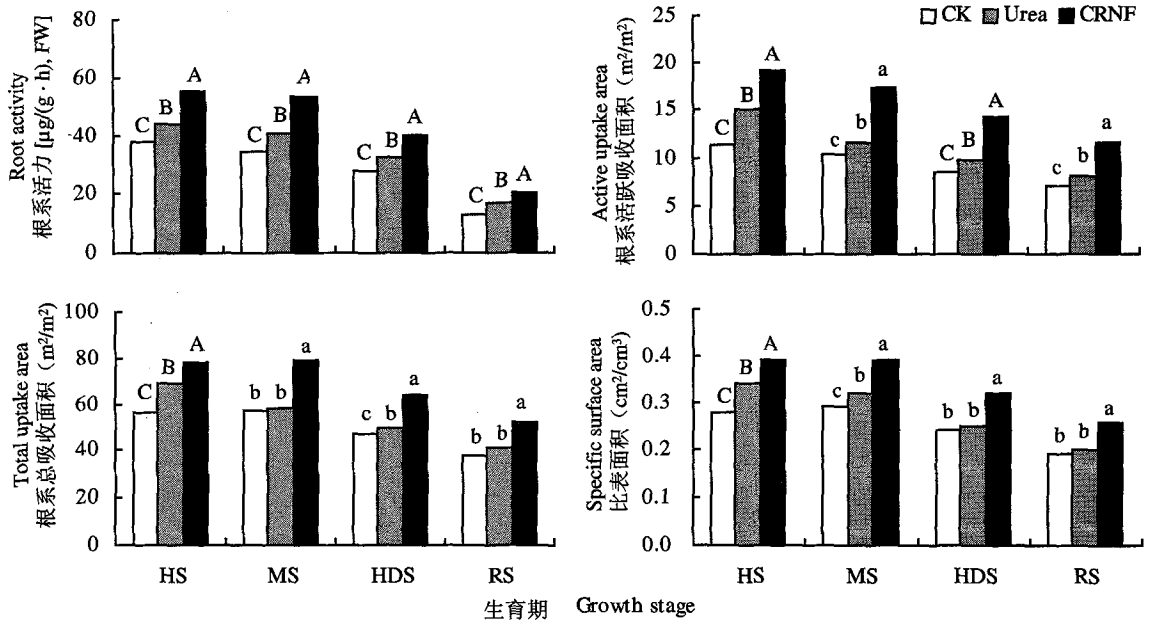


图3 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系生理特征的影响

Fig.3 Effects of controlled release nitrogen fertilizer on root physiological characteristics of hybrid rice during late growth stage

表2 控释氮肥对杂交水稻生育后期植株吸氮能力的影响

Table 2 Effect of controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen absorbing capacity of hybrid rice during late growth stages

处理 Treatment	抽穗期 Heading stage			成熟期 Ripening stage		
	总吸 N 量 Total N uptake (kg/hm^2)	来自土壤 N N from soil N (kg/hm^2)	来自肥料 ¹⁵ N ¹⁵ N from fertilizer (kg/hm^2)	总吸 N 量 Total N uptake (kg/hm^2)	来自土壤 N N from soil N (kg/hm^2)	来自肥料 ¹⁵ N ¹⁵ N from fertilizer (kg/hm^2)
Urea	90.1	56.52**	34.49	96.22	61.00*	35.22
CRNF	117.06**	39.92	77.14**	141.21**	54.87	86.83**

* , ** 分别表示达到 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著性 Mean significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.4 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系中 MDA 含量和 SOD、POD、CAT 活性的影响

施用氮肥使杂交水稻生育后期根系衰老过程中 MDA 含量均有所降低,但氮肥种类不同,MDA 含量的降低程度也不同。由表 3 可见,由于尿素处理的土壤中在生育后期提供给植株吸收的氮极少(表 2),抽穗后的各阶段根系中 MDA 含量虽比对照不施氮肥处理降低,但其含量仍处于较高水平;而控释氮肥处理,土壤供氮时间长,抽穗后仍提供相当量的氮素供给根系吸收,在很大程度上抑制了 MDA 含量

的提高,使其脂质氧化产物 MDA 含量及增加速率保持在较低水平。与尿素处理相比,控释肥料处理在抽穗期、乳熟期、蜡熟期和成熟期,根系中 MDA 含量分别下降 23.3%,15.1%,8.8%和 6.1%,差异均达到极显著水平。

表 3 还看出,随着杂交水稻后期根系衰老的进程,SOD 活性逐渐下降。尿素处理根系内 SOD 活性下降速率快,而控释氮肥处理能延缓根系 SOD 活性的衰退速率。抽穗后控释氮肥处理根系内 SOD 活性均高于对照和尿素处理,分别达到显著或极显著水平。

表 3 控释氮肥对杂交水稻后期根系中 MDA 含量和 SOD、POD、CAT 活性的影响

Table 3 Effects of controlled release nitrogen fertilizer on MDA content and activities of SOD、POD、CAT in the root system of hybrid rice during late growth stage

处理 Treatment	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milk stage	蜡熟期 Hard dough stage	成熟期 Ripening stage
MDA($\mu\text{mol/g}$, FW)				
CK	30.2 aA	40.3 aA	54.3 aA	63.4 aA
Urea	25.8 bB	37.8 bA	44.3 bB	52.6 bB
CRNF	19.8 cC	32.1 cB	40.4 cC	49.4 cC
SOD(U/mg, protein)				
CK	27.8 cC	32.4 cC	24.3 cC	13.3 cC
Urea	29.2 bBC	37.3 bB	32.1 bB	20.6 bB
CRNF	32.2 aA	45.5 aA	36.9 aA	26.2 aA
POD(U/g, FW)				
CK	432.4 cC	588.8 cC	524.9 cC	787.7 cC
Urea	445.5 bBC	606.7 bB	562.1 bB	856.8 bB
CRNF	490.1 aA	699.0 aA	660.7 aA	945.2 aA
CAT[$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$, FW]				
CK	121 cC	220 cC	443 cC	397 cC
Urea	126 bBC	234 bBC	480 bB	463 bB
CRNF	136 aA	264 aA	523 aA	488 aA

杂交水稻抽穗后根系中 POD 活性逐渐升高,成熟期达到最大值, CAT 活性抽穗至蜡熟期逐渐增大,成熟期降低。尿素和控释氮肥处理的根系维持较高的 POD 和 CAT 活性,表明氮肥对提高这两种酶的活性均有作用。从不同处理间来看,控释氮肥处理杂交水稻生育后期根系内 POD 和 CAT 活性显著高于对照和尿素处理,分别达到显著或极显著水平。杂交水稻生育后期根系中 SOD、POD 和 CAT 活性的提高,有助于维持灌浆后根系适宜的吸收能力,延缓根系的衰老。

3 讨论

控释肥料通过表面的包膜层来调节肥料颗粒内部速效养分的释放速率,使肥料中营养元素的供应与作物对养分的需求基本同步^[1],实现动态平衡。已有研究证明,控释肥料能显著提高水稻氮素吸收利用,减少氨挥发、氮的淋溶和硝化—反硝化等途径的损失^[3-4],延缓水稻生育后期叶片的衰老^[17]。另一方面,控释肥料一次性全量基肥施用,能有效地解决水稻生长季节需要多次追肥的问题。本研究表明,尿素基肥深施加追肥对杂交水稻生育前期和生育中期植株和根系的生长发育有利,但由于尿素的氨挥发、硝化—反硝化和氮淋溶等损失严重,尿素的供氮量难以满足杂交水稻生育后期的氮需要,表现

根系吸氮速度减慢,根系衰老加速,叶色变浅。控释氮肥施入土壤后由于具有逐步释放的特点,其养分释放速度能较好地与杂交水稻前中后期对氮素养分的需求相配。两年试验表明,控释氮肥的氮素利用率平均为 75.2%,比尿素(N 利用率 38.8%)高出 36.4 个百分点。而且控释氮肥的氮素利用率受年际间气候条件变化影响较小。

根系形态是影响吸收效率的一个重要因素,其中根系构型在养分高效利用中起着决定性作用^[18]。已有研究证实,氮素的根系形态特征(包括根长、根长密度及半径等因子)在决定养分吸收效率方面具有重要作用。本研究发现,施控释氮肥增加了杂交水稻生育后期根长和根长密度,而根半径减小。

根吸收功能的发挥与根系活力有关。TTC 还原量通常作为衡量根系活力的一个有效指标。本研究发现,施控释氮肥的杂交水稻生育后期的根系活力比施尿素的显著增加。施控释氮肥的根系总吸收面积、活跃吸收面积和比表面积均高于尿素处理。因施控释氮肥处理的根系发达、根细且长、根系密度大,因而在生长环境中,其根系的几何分布范围广,这扩大了摄取养分范围和吸收面积。¹⁵N 示踪结果表明,在生育后期,施控释氮肥的植株无论是吸氮总量,还是从吸收来自肥料¹⁵N 量均高于施用尿素的。

丙二醛(MDA)是细胞脂质过氧化产物的重要指

标。脂质过氧化产物中的MDA可与细胞内蛋白质、核酸、磷脂及含氮化合物发生反应,发生交联使多种酶和膜系统遭到损害^[8-9,14]。本研究发现,控释氮肥处理的土壤供氮时间长,抽穗后仍能提供适量的氮素供给根系吸收,在很大程度上就抑制了MDA含量的提高,使根系内MDA含量及增加速度保持较低水平。

SOD、POD和CAT是生物体内活性氮清除酶系统的重要保护酶。这些酶具有清除生物体内氧自由基的功能,保护生物体内免受自由基的损害^[14]。本研究条件下,控释氮肥在抽穗后可提供适量氮供给根系吸收,维持SOD、POD和CAT活性和减少了MDA积累,从而调节体内的活性氧代谢平衡,延缓根系衰老。

参考文献:

- [1] 郑圣先, 袁军, 熊金英, 等. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 11-16.
Zheng S X, Jie J, Xiong J Y *et al.* Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 11-16.
- [2] 戴平安, 袁军, 郑圣先, 肖剑. 不同土壤肥力条件下水稻控释氮肥及其氮素利用的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 115-119.
Dai P A, Nie J, Zheng S X, Xiao J. Efficiency of nutrient utilization of controlled release nitrogen fertilizer for rice at different soil fertility levels [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 115-119.
- [3] 刘德林, 袁军, 肖剑. ¹⁵N标记水稻控释氮肥对提高氮素利用效率的研究[J]. 激光生物学报, 2002, 11(2): 88-92.
Liu D L, Nie J, Xiao J. Study on ¹⁵N labeled rice controlled release fertilizer in increasing nitrogen utilization efficiency [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, 11(2): 88-92.
- [4] 郑圣先, 刘德林, 袁军, 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 Nutrition And Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 137-142.
- [5] Zheng S X, Nie J, Xiao J *et al.* Effects of film-degrade rice controlled release fertilizer on the nitrogen uptake and yield of the hybrid rice [J]. *Hunan Agricultural Science and Technology Newsletter*, 2002, 3(2): 4-10.
- [6] 袁隆平. 杂交水稻育种栽培学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 15-16.
Yuan L P. *Breeding and culture of hybrid rice* [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1988. 15-16.
- [7] 石庆华, 黄英金, 李木英, 等. 水稻根系性状与地上部的相关及根系性状的遗传与研究[J]. 中国农业科学, 1997, 30(4): 61-67.
Shi Q H, Huang Y J, Li M Y *et al.* Studies on the heredity of root characteristics and correlation between the characteristics of roots and upperground parts in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(4): 61-67.
- [8] Deng H D. Biochemical basis of heterosis in rice [A]. Klaus Lampe. Hybrid rice [M]. Manila, Philippines: International Rice Research Institute, 1988. 55-66.
- [9] Kita A S. Physiological bases of heterosis in rice [A]. Klaus Lampe. Hybrid rice [M]. Manila, Philippines: International Rice Research Institute, 1988. 67-77.
- [10] 郎有忠, 杨建昌, 朱庆森. 亚种间杂交稻根系形态生理特征及其与子粒充实度关系的研究[J]. 作物学报, 2003, 29(2): 230-235.
Lang Y Z, Yang J C, Zhu Q S. Studies on the morphological and physiological characteristics of the root system of interspecific hybrid rice and their relationship with grain plumpness [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(2): 230-235.
- [11] Jen H C, Barber S A. Soil and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with uptake model [J]. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 1032-1036.
- [12] 西北农业大学植物生理生化教研室. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1987. 47-48.
Teaching and Research Dept. of Plant Physiol. and Bioch., Northwest Agric. Univ. A guide for plant physiological experiment [M]. Xian: Shaanxi Science and Technology Press. 1987. 47-48.
- [13] 华东师范大学生物与生理教研室. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 人民教育出版社, 1989. 66-73.
Teaching and Research Dept of Biol. and Plant Physiol., East China Normal Univ. A guide for plant physiological experiment [M]. Beijing: People and Education Press, 1989, 66-73.
- [14] 林植芳, 李双顺, 林桂株. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J]. 植物学报, 1984, 26(6): 605-615.
Lin Z F, Li S S, Lin G Z. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1984, 26(6): 605-615.
- [15] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002.
Soil Society of China. Method of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2002.
- [16] 郑圣先, 肖剑, 易国英. 控释肥料养分释放动力学及其机理研究. 第1报: 温度对包膜型控释肥料养分释放的影响[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(4): 15-17.
Zheng S X, Xiao J, Yi G Y. Nutrient-releasing kinetics of controlled release fertilizer and its mechanism. Part 1: Effects of temperature on nutrients release of film-coated controlled release fertilizer [J]. *Phosphate and Compound Fertilizer* 2002, 17(4): 15-17.
- [17] 袁军, 肖剑, 戴平安, 郑圣先. 控释氮肥对水稻氮代谢关键酶活性及糙米蛋白质含量的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2003, 29(4): 318-321.
Nie J, Xiao J, Dai P A, Zheng S X. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on key enzymes actives of nitrogen metabolism and protein contents in brown rice [J]. *J. of Hunan Agric. Univ.*, 2003, 29(4): 318-321.
- [18] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. *Plant physiology*, 1955, 109: 7-13.