

供氮形态和水分胁迫对苗期水稻吸收氮素营养的影响

陈晓远,高志红,李玉华

(韶关学院 英东生物工程学院,广东 韶关 512005)

摘要:为探讨不同形态氮素营养对水分胁迫条件下水稻幼苗吸收氮素的影响,采用室内营养液培养及聚乙二醇(PEG6000)模拟水分胁迫处理的方法,在苗期设置3种供氮形态(NH_4^+-N 、 NO_3^--N 以及 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 相同浓度下等体积混合)和2种水分条件(非水分胁迫及水分胁迫)的耦合处理进行研究。结果表明,在非水分胁迫条件下,全 NO_3^--N 营养水稻比全 NH_4^+-N 营养水稻的氮素消耗多。在水分胁迫条件下,全 NO_3^--N 营养水稻的氮素消耗略有增加;同时供应 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 显著促进水稻对氮素的消耗;对全 NH_4^+-N 营养水稻氮素消耗的影响不明显。在水分胁迫条件下,同时供应 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 增加水稻的氮素积累;对全 NH_4^+-N 营养水稻的氮素含量没有明显影响。在非水分胁迫条件下, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 混合营养水稻的氮素利用率在3种供氮形态处理中最高。水分胁迫后复水,同时供应 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 显著提高水稻的氮素利用率;水分胁迫对全 NH_4^+-N 营养水稻的氮素利用率没有明显的影响,但明显降低全 NO_3^--N 营养水稻的氮素利用率;无论是非水分胁迫,还是水分胁迫条件下,全 NO_3^--N 营养水稻的氮素利用率均为最低。

关键词:水稻;氮素形态;水分胁迫;氮素利用效率

中图分类号:S143.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2008)01-0163-05

Effects of Nitrogen Forms and Water Stress on Nitrogen Uptake of Rice Plants at the Seedling Stage

CHEN Xiao-yuan, GAO Zhi-hong, LI Yu-hua

(College of Yingdong Bioengineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)

Abstract: By using the method of nutrient solution culture and simulated water stress with PEG6000, the effects of different nitrogen forms (NO_3^--N , NH_4^+-N and the mixture of NO_3^--N and NH_4^+-N) and water statuses (non-water stress and water stress condition) on N uptake of rice plant at the seedling stage were studied. The results showed that: Under non-water stress, N consumption of NO_3^--N supplied rice plant was higher than that of NH_4^+-N supplied rice plant. Under water stress, supply of mixture of NO_3^--N and NH_4^+-N significantly promoted N consumption of rice plant, and N consumption of rice plant supplied with NO_3^--N had a little increase. Water stress had no significant effect on N consumption of NH_4^+-N supplied rice plant. Under water stress, supply of mixture of NO_3^--N and NH_4^+-N increased N content of rice plant, but it had no significant effect on N content of NH_4^+-N supplied rice plant. Under non-water stress, the nitrogen-use efficiency of rice plants was higher under the supply of mixture of NO_3^--N and NH_4^+-N than the other two treatments. After water recovery, supply of mixture of NO_3^--N and NH_4^+-N significantly promoted nitrogen-use efficiency of rice plants. Water stress had no significant effect on nitrogen-use efficiency of NH_4^+-N supplied rice plant, but significantly reduced in NO_3^--N supplied rice plant. Under non-water stress or water stress, the nitrogen-use efficiency of NO_3^--N supplied rice plant was the lowest among the three nitrogen forms treatments.

Key words: Rice; Nitrogen form; Water stress; Nitrogen use efficiency

氮是植物生长发育不可缺少的营养元素,是植物体内许多重要有机化合物的组成成分。氮素主要

以 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 2种形态被植物吸收,并参与植物体内各种代谢过程。研究表明,水稻具有一定

收稿日期:2007-11-08

基金项目:广东省自然科学基金(33135)

作者简介:陈晓远(1968-),男,内蒙古丰镇人,教授,博士,主要从事作物水分关系研究工作。

的抗旱性,并且这种抗旱性与其氮素营养有关,但目前的研究较多集中在优化施氮水平上^[1],而利用供氮形态调控水稻抗旱性尚少见报道^[2]。一般认为,水稻是喜铵植物,并且其对铵态氮的吸收多于硝态氮^[3]。但是,近几年大量的试验结果显示,单一的 NH_4^+-N 或 NO_3^--N 营养均会引起水稻生物量积累的减少,同时供应两种形态氮素比供应单一形态氮素更能促进植物生长^[4],并更好地调节植物水分关系^[5,6],当 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比例为 50/50 和 75/25 时,水稻表现出最佳的生物效应^[1,7]。在水分胁迫条件下,全 NO_3^--N 营养水稻植株的含氮量呈下降趋势,而水分胁迫对全 NH_4^+-N 营养水稻植株的含氮量影响不大^[8]。随着水稻节水灌溉和水稻旱作技术的兴起,对水稻氮素形态营养特性和水稻水分生理的研究越来越受到重视^[9,10]。然而,目前对于不同供氮形态和水分胁迫双因素耦合作用对水稻吸收氮素营养的影响仍缺乏了解^[3]。因此,本试验拟通过研究供氮形态和水分胁迫耦合作用下苗期水稻氮素消耗、植株体内氮素含量及氮素利用效率的变化动态,探讨供氮形态在调控旱作水稻氮素营养方面的作用。

1 材料和方法

1.1 试验方法

供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为金优 402。营养液采用国际水稻研究所(IRRI)的常规营养液配方^[11],并略做改进。试验设 6 个处理:供氮形态为 40 mg/L NH_4^+-N [(NH_4)₂SO₄], 40 mg/L NO_3^--N ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) 和 20 mg/L NH_4^+-N + 20 mg/L NO_3^--N [(NH_4)₂SO₄ 和 ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2) 3 种;2 个水分水平为,非水分胁迫,分别以 NO_3^-- , NH_4^+ 和 $\text{NO}_3^--\text{NH}_4^+$ 表示;水分胁迫,PEG6000(化学纯)浓度为 5%(水势约相当于 -0.05 MPa),分别以 $\text{NO}_3^-- + \text{PEG}$, $\text{NH}_4^+ + \text{PEG}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{NH}_4^+ + \text{PEG}$ 表示。此外,添加 Na_2SiO_3 以保持营养液中的 SiO_2 浓度为 0.2 mmol/L,添加 1 mg/L 的双氰胺以抑制硝化作用。$

水稻种子先经 55℃ 水浸泡 15 min 后,用清水浸种。24 h 后,置于清洁湿纱布上,在 32℃ 条件下于人工气候箱内催芽 2 d,再用砂培法于温室内育苗,培养温度为,白天 30℃,夜晚 27℃。培养至一叶一心期,挑选生长一致的幼苗,移栽至打好孔的 PVC 板上,用海绵固定后,进行营养液培养。每天更换 1 次营养液,调节营养液 pH 至 (5.0 ± 0.05)。待水稻幼苗生长至三叶一心(苗龄 25 d)时进行水分胁迫处理,持续处理 5 d,然后解除胁迫(营养液更换为非水

分胁迫营养液)继续培养 5 d。所有处理均重复 3 次,每个重复定苗 24 株。

在水分胁迫处理前 1 d 进行取样测定,连续取样测定 11 d。每次采样每个处理随机取 3 个重复。

1.2 测定项目

1.2.1 NH_4^+-N 及 NO_3^--N 的吸收量 每天 8:00 - 9:00 点换营养液时称量并采集营养液(30 mL),测定其中的 NH_4^+-N (靛酚蓝比色法)和 NO_3^--N (紫外可见分光光度法)的浓度。根据 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的变化,计算水稻对氮素(纯氮)的消耗量。

1.2.2 植株中铵态氮含量 参照鲁如坤^[12]方法略作改进。取新鲜水稻植株,称重后剪碎,于研钵中加水研磨,移至干燥的三角烧瓶中,加水定容至 20 mL,振荡 1~3 min,放置澄清后,取上清液 2 mL,注入 20 mL 刻度试管,加入 1 mL pH 5.0 柠檬酸缓冲液,摇匀,加入 1 mL 水合茚三酮乙醇溶液,充分摇匀,置于温水浴中,在 80℃ 下保持 30 min 取出冷却,用 pH 5.0 柠檬酸缓冲液稀释至 10 mL 摇匀,再转入比色管与系列标准色阶比较定量。

1.2.3 植株中硝态氮含量 取新鲜水稻植株,称重后剪碎,于研钵中加少量蒸馏水研磨,移至干燥的三角烧瓶中,加入蒸馏水 20 mL,振荡 1~3 min,放置澄清后,取上清液 2 mL,加入冰醋酸溶液 18 mL,再加 0.4 g 混合粉剂,剧烈摇动 1 min,静置 10 min,将容量瓶中悬浊液过量地倾入离心管中,使部分流出管外,白色粉末即可去除。离心 5 min (4 000 r/min),取清液以分光光度计于 520 nm 处测定光密度值。从工作曲线中查得组织提取液所含硝态氮含量。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫和供氮形态耦合作用对水稻植株氮素消耗的影响

在营养液培养条件下,一般以营养液中养分含量的变化来表征植物对养分的消耗量(即营养液的初始氮素含量 - 营养液的剩余氮素含量)。表 1 显示,在非水分胁迫条件下,3 种不同氮素形态处理之间的氮素消耗量(NH_4^+-N 和 NO_3^--N 折合为纯氮的量)差异显著 ($p < 0.05$),3 种氮素形态处理的平均日氮素消耗量分别达到营养液中初始氮素含量的 45.93%、41.70% 和 81.63%。在植株生长过程中,虽然全 NH_4^+-N 营养和全 NO_3^--N 营养的植株日氮素消耗量变化均较小,但是,全 NO_3^--N 营养植株的平均日氮素消耗量仍比全 NH_4^+-N 营养植株的增加 77.74%。显然,在单一的供氮形态处理中,水稻吸收 NO_3^--N 比吸收 NH_4^+-N 的量要多。虽然 NH_4^+-N

和NO₃⁻-N混合营养水稻植株的日氮素消耗量之间波动较大,但仍可发现该处理的水稻是以吸收NO₃⁻-N为主的。

在水分胁迫条件下,胁迫第1天后,全NH₄⁺-N营养植株的氮素消耗量比胁迫前增加了37.32%,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养植株的氮素消耗量比胁迫前下降了29.62%,全NO₃⁻-N营养植株的氮素消耗量比胁迫前下降了5.92%。全NH₄⁺-N营养植株的氮素消耗量从胁迫第2天开始下降到胁迫前1天的水平,并且在以后的8 d时间内,氮素消耗量的日变化均维持在一个较小的水平(表1),即在这8 d的生长期间,全NH₄⁺-N营养植株的氮素日消耗量几乎是恒定的,解除水分胁迫并没有明显地增加氮素的消耗量。然而,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养植株的氮

素消耗量则从水分胁迫第2天开始迅速增加,胁迫第2天和第3天分别比胁迫第1天增加了31.75%和102.23%,表明NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养处理可以减轻水分胁迫对水稻氮素吸收的影响。水分胁迫解除后,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养植株的氮素消耗量急速下降,比1 d前降低了55.27%。全NO₃⁻-N营养植株的氮素消耗量从水分胁迫第3天开始小幅增加,直到试验结束。由此可见,在水分胁迫条件下,同时供应NH₄⁺-N和NO₃⁻-N促进水稻对氮素的消耗;在非水分胁迫(或水分胁迫解除)条件下,全NO₃⁻-N营养处理促进水稻对氮素的消耗。在试验期间,NH₄⁺+PEG处理植株的氮素消耗量除了在胁迫第1天增加外,其余时间均与NH₄⁺处理近似,说明水分胁迫对全NH₄⁺-N营养植株氮素消耗量的影响不明显。

表1 水分胁迫和供氮形态对水稻氮素消耗的影响

Tab.1 Effects of N form and water stress on nitrogen consumption of rice plant											mg/L
处理 Treatment	氮素消耗量 Nitrogen consumption										
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d	11 d
NH ₄ ⁺	18.25c	18.26d	18.31d	18.36e	18.37d	18.39d	18.33d	18.37d	18.29d	18.31d	18.81d
NO ₃ ⁻ -NH ₄ ⁺	25.46b	11.41f	11.35e	11.60f	11.90e	14.83e	24.89c	19.62c	23.46c	19.06c	11.85e
NO ₃ ⁻	36.27a	32.73b	32.70b	32.79c	32.79c	31.93c	31.43b	31.45b	32.17b	33.09b	31.77b
NH ₄ ⁺ +PEG	18.25c	25.06c	18.53d	19.44d	18.98d	18.60d	18.33d	18.33d	18.33d	18.33d	18.33d
NO ₃ ⁻ -NH ₄ ⁺ +PEG	25.46b	17.92e	23.61c	36.24b	34.88b	34.16b	15.28e	9.31e	9.35e	9.48e	26.68c
NO ₃ ⁻ +PEG	36.27a	34.12a	34.50a	36.68a	36.81a	36.56a	38.20a	38.58a	37.55a	38.77a	38.74a

注:从取样第2天开始进行水分胁迫,取样第7天解除水分胁迫。同一列数据后标有相同小写字母者表示平均数差异未达5%显著水平。余表同。
Note: Water stress from the second sampling day to the sixth sampling day, and water recovery from the seventh sampling day. Means with the same letters in the same column indicate no significant difference at 5% level. The same as in tables below.

2.2 水分胁迫和供氮形态耦合作用对水稻植株中氮素含量的影响

因取样测定时间间隔为1 d,故本研究以植株中的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量表示水稻的氮素含量(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N折合为纯氮的量)。从表2可以看出,无论是在非水分胁迫条件下,还是在水分胁迫条件下,不同氮素形态营养水稻植株的氮素含量变化动态几乎是一致的,都是呈先升后降再升的变化规律,并且同时在第5天(胁迫第4天)和第8天(解除胁迫后1 d)出现了峰值,水稻氮含量由高到低的顺序依次是:全NH₄⁺-N营养处理、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养处理、全NO₃⁻-N营养处理。水分胁迫对单供NH₄⁺-N营养水稻氮素含量没有明显影响,但对单供NO₃⁻-N营养水稻的影响较复杂:在实施水分胁迫的前3 d,NO₃⁻+PEG营养水稻的N含量与NO₃⁻营养水稻的N含量无显著差异,但在胁迫第4天,NO₃⁻+PEG营养水稻的N含量突然增大,达到NO₃⁻营养水稻的4.9倍;此后,又急剧下降到NO₃⁻营养水稻的水平;水分胁迫解除的当天,再次增大到NO₃⁻营养水稻的1.78倍;然后又下降到

接近NO₃⁻营养水稻的水平。
NO₃⁻+PEG营养水稻的N含量与NO₃⁻-NH₄⁺+PEG营养水稻的N含量在多数取样时间均高于NO₃⁻-NH₄⁺营养水稻的N含量,增加幅度在13.40%~177.58%,并且在试验的最后1天(水分胁迫解除后5 d)仍比后者高56.15%,表明在水分胁迫条件下,同时供应NH₄⁺-N和NO₃⁻-N有利于水稻氮素的积累。

2.3 水分胁迫和供氮形态耦合作用对水稻氮素利用效率的影响

表3显示,在非水分胁迫条件下,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养水稻的氮素利用效率(植株干质量和氮素消耗量的比值)在3种供氮形态营养处理中是最高的(第1天和第7天除外)。无论是非水分胁迫,还是水分胁迫条件下,全NO₃⁻-N营养水稻的氮素利用效率都是最低的。水分胁迫对单供NH₄⁺-N营养水稻的氮素利用效率总体上没有明显的影响,但水分胁迫明显降低单供NO₃⁻-N营养水稻的氮素利用率。水分胁迫同样降低NH₄⁺-N和NO₃⁻-N混合营养水稻的氮素利用率,然而,当水分胁迫解除

后, $\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+$ + PEG 处理的氮素利用效率则迅速提高并超过 $\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+$ 处理的水平, 最高可达后者的 2 倍多 (如在水分胁迫解除后第 2、3 和 4 天)。说明在水分胁迫 - 复水的水分变动条件下, 同时供应 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以显著提高水稻的氮素利用效率。

表 2 水分胁迫和供氮形态对水稻植株中氮素($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 折合纯氮之和) 含量的影响

Tab. 2 Effects of N form and water stress on N content of rice plant μg/ g											
处理 Treatment	氮素含量 Nitrogen content										
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d	11 d
NH_4^+	83. 46a	44. 18b	77. 57a	101. 42b	215. 12b	115. 53b	138. 81a	200. 89b	62. 11a	25. 59a	5. 67c
$\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+$	4. 45c	46. 99a	31. 69d	55. 16c	89. 80d	30. 29d	98. 17c	87. 00e	30. 79d	15. 30d	6. 50b
NO_3^-	5. 88b	7. 46e	6. 72e	6. 30d	15. 76f	9. 77e	45. 36f	94. 19d	28. 23e	10. 06e	6. 06b
$\text{NH}_4^+ + \text{PEG}$	83. 46a	42. 04c	74. 30b	109. 37a	243. 15a	128. 31a	132. 71b	214. 81a	58. 55b	20. 95b	5. 99b
$\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+ + \text{PEG}$	4. 45c	39. 71d	39. 32c	55. 54c	108. 27c	84. 08c	90. 26d	107. 83c	43. 74c	17. 35c	10. 15a
$\text{NO}_3^- + \text{PEG}$	5. 88b	8. 16e	5. 98e	6. 17d	77. 20e	8. 07e	80. 70e	86. 91e	23. 15f	10. 86e	5. 56c

表 3 水分胁迫和供氮形态对水稻氮素利用效率的影响

Tab. 3 Effects of N form and water stress on nitrogen-use efficiency of rice plant g/ g											
处理 Treatment	氮素利用效率 Nitrogen-use efficiency										
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d	11 d
NH_4^+	13. 70a	25. 74b	25. 66b	19. 61c	34. 83b	30. 40b	35. 47b	34. 29c	38. 27c	32. 76d	46. 79b
$\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+$	9. 03b	40. 31a	46. 69a	59. 49a	60. 55a	43. 83a	20. 90d	42. 30b	37. 09d	41. 97b	80. 15a
NO_3^-	7. 99c	10. 08e	11. 93d	13. 11d	9. 45f	15. 03c	21. 64d	20. 98e	25. 80e	32. 03d	35. 56f
$\text{NH}_4^+ + \text{PEG}$	13. 70a	14. 77d	26. 44b	19. 55c	25. 29c	29. 03b	32. 74c	32. 20d	40. 38b	39. 29c	45. 84c
$\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+ + \text{PEG}$	9. 03b	22. 88c	17. 79c	21. 52b	12. 90e	15. 81c	40. 58a	97. 78a	86. 63a	91. 80a	26. 98e
$\text{NO}_3^- + \text{PEG}$	7. 99c	8. 50f	11. 89d	13. 36d	14. 40d	13. 68d	18. 33e	16. 85f	24. 50f	22. 44e	28. 13d

3 讨论

近年来的研究表明, 植物生长在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 混合营养中能够表现出最佳的生物学效应^[11, 13- 15]。在本研究的非水分胁迫处理中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 混合营养水稻的苗期生物量明显大于单一供 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 营养的水稻生物量。说明水稻不仅能够吸收利用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 而且在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 混合营养中, 可以通过 2 种不同形态氮素的相互作用, 而促进 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收 (一般认为是由于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的存在而刺激了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收)^[16]。由此可见, 水稻虽然是喜铵植物, 但苗期必须供应适量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 以促进根系的生长^[9]。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以在作物体内大量存在而不像 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 积累容易造成作物伤害。同时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在体内的迅速积累可以使作物体内渗透势很快下降而较好地适应水分胁迫环境。因而, 适当增加 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的供应比例, 可有效地清除作物在水分胁迫下的生长障碍。在水分胁迫条件下, 水稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 营养的响应不同于非水分胁迫条件。钱晓晴等^[7]对模拟水分胁迫条件下水稻氮素营养特征的研究认为, 当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比例为 50/ 50 时, 植株生长最好。本试验也有类似的结果。

关于在水分胁迫和供氮形态耦合作用下, 水稻

对氮素的吸收情况, 国内外尚少见报道^[8, 14]。水稻植株氮素含量表征了水稻的氮素生理利用效率^[17]。在本试验中, 在非水分胁迫条件下, 全 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 营养水稻比全 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 营养水稻的氮素消耗多。在水分胁迫条件下, 同时供应 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 显著促进水稻对氮素的消耗, 增加水稻的氮素积累。水分胁迫后复水, 同时供应 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 显著提高水稻的氮素利用率。而水分胁迫对全 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 营养水稻植株的含氮量没有显著的影响, 这与周毅等^[8]的结果较为一致。说明 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 配比既有利于保证一定的生物量, 又有利于维持水稻较高的氮素利用率。水分胁迫对全 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 营养水稻的氮素利用率没有明显的影响, 但明显降低全 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 营养水稻的氮素利用率。无论是非水分胁迫, 还是水分胁迫条件下, 全 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 营养水稻的氮素利用率均为最低。在本试验的 2 种水分条件下, 完全铵态氮处理的植株氮素消耗量在试验期间几乎没发生变化, 植株体内的氮素含量也最多, 这种现象与周毅等^[17]认为完全硝态氮处理植株的氮素含量最多不一致, 原因可能是由于不同水稻品种之间的氮素营养特性具有差异所致^[17, 18]。

综上所述, 水稻氮素消耗、体内氮素含量和氮素利用效率的高低受水分条件和培养液中氮素形态的综合影响。有时, 氮素消耗增加和氮素利用效率提高的方向并不一致, 如在 2 种水分条件下, 完全硝态

氮处理的氮素消耗量均为最多,但其氮素利用效率却都是最低的,因此,只有针对水稻的不同生长阶段以及水分条件来调节 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的配比,才能优化水稻的供氮形态和水平,提高水稻的氮素利用效率和用水效率。

参考文献:

- [1] 钱晓晴,沈其荣,王娟娟,等. 模拟水分胁迫条件下水稻的氮素营养特性[J]. 南京农业大学学报,2003,26(4):9 - 12.
- [2] 陈 贵,周 毅,郭世伟,等. 局部根系水分胁迫下不同形态氮素营养对水稻幼苗生长的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(6):638 - 644.
- [3] 宋 娜,郭世伟,沈其荣. 不同氮素形态营养及水分胁迫对分蘖期水稻水分吸收及光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2003,29(4):64 - 69.
- [4] Feil B. Growth and ammonium:Nitrate uptake ratio of spring wheat cultivars under a homogeneous and a spatially separated supply of ammonium and nitrate[J]. J Plant Nutri,1994,17(5):717 - 728.
- [5] Hogh-Jensen H,Schjoerring J K. Effects of drought and inorganic N form on nitrogen fixation and isotope discrimination in *Trifolium repens*[J]. Plant Physiol Biochem,1997,35(1):55 - 62.
- [6] Schortemeyer M,Feil B,Stamp P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system[J]. Ann Bot,1993,72:107 - 115.
- [7] 钱晓晴,沈其荣,徐国华. 配合使用 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 对旱作水稻生长与水分利用效率的影响[J]. 土壤学报,2003,40(6):895 - 900.
- [8] 周 毅,郭世伟,高迎旭,等. 供氮形态和水分胁迫耦合作用对磷在苗期 - 分蘖期水稻植株不同部位含量与分配的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(5):505 - 511.
- [9] 周 毅,郭世伟,宋 娜,等. 供氮形态和水分胁迫对苗期 - 分蘖期水稻光合与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(3):334 - 339.
- [10] 周 毅,郭世伟,陈 贵,等. 胁迫萌发与不同水分胁迫强度下水稻对供氮形态的响应[J]. 南京农业大学学报,2003,29(1):57 - 62.
- [11] 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京:北京农业大学出版社,1994.
- [12] 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.
- [13] Khalifa K H,Zidan A. Effect of nitrate addition on efficient use of ammonium sulfate fertilizer on corn under saline condition. Field experiment[J]. Commun Soil Sci Plant Annual,2001,32(15/16):2373 - 2393.
- [14] Guo S,Bruck H,Sattelmacher B. Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Plants[J]. Plant and Soil,2002,239(2):267.
- [15] 孙传范,戴廷波,荆 奇,等. 不同生育时期增铵营养对小麦生长及氮素利用的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(5):753 - 757.
- [16] Walch-Liu P,Neumann G,Bangerth F, et al. Rapid effects nitrogen forms on leaf morphogenesis in tobacco[J]. J Exper Bot,2000,51:227 - 237.
- [17] 周 毅,郭世伟,宋 娜,等. 水分胁迫和供氮形态耦合作用下分蘖期水稻的光合速率、水分与氮素利用[J]. 中国水稻科学,2006,20(3):313 - 318.
- [18] 钱晓晴,沈其荣,柏彦超,等. 旱作条件下不同水稻品种的响应特征[J]. 作物学报,2004,30(6):555 - 562.