

施氮对不同生态类型谷子品种形态建成的影响

刘天鹏¹, 许岩², 董孔军¹, 何继红¹, 任瑞玉¹, 张磊¹, 杨天育^{1,2}

(1. 甘肃省农业科学院作物研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学生命科技学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用完全随机设计, 在室温盆栽条件下研究了不同施氮水平(N_0 、 N_1 、 N_2)对中国(G_0)、波兰(G_1)、肯尼亚(G_2) 3个不同生态类型谷子品种地上、地下形态建成及生长速度的影响。结果表明, 不同施氮水平对3个不同生态型谷子品种的形态建成有明显影响, 对3叶期后第28天、第35天谷子的出叶数和株高有极显著影响, 对单株叶面积、地上干物质、根长有显著影响, 而对根数、根重影响不明显。不同生态型谷子品种地上、地下部所测性状均受品种、氮肥两因素交互作用的极显著影响, G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 、 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 、 G_2N_0 、 G_2N_1 、 G_2N_2 间存在不同程度的差异。 G_2 在不同施氮水平下, 出叶数、株高、单株叶面积、地上生物量、根数、根长、根重、株高增长率、出叶速率、单株穗粒重、单株生物量较 G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 、 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 均表现出相对高的性状值, 为氮肥高效利用品种。

关键词: 谷子; 品种; 生态类型; 形态建成; 施氮水平

中图分类号: S515 文献标志码: A 文章编号: 1001-1463(2017)11-0020-05

doi:10.3969/j.issn.1001-1463.2017.11.007

Effects of Nitrogen Application on the Morphological of Foxtail Millet Cultivars with Different Ecological Types

LIU Tianpeng¹, XU Yan¹, DONG Kongjun¹, HE Jihong¹, REN Ruiyu¹, ZHANG Lei¹, YANG Tianyu^{1,2}

(1. Institute of Crop, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In pot experimentat greenhouse, the effects of different nitrogen proportion (N_0 、 N_1 、 N_2) on the morphological and growth rate of three foxtail millet varieties (G_0 、 G_1 、 G_2) is studied by complete randomized design. The result shows that under different nitrogen proportion, the morphological traits had great variation among three foxtail millet varieties with different ecological types. The leaf number and plant height had significant different; leaf area per plant, dry matter of upper part and root length had great different, but there is not obvious difference in root weight and root number after 28 days or 35 days at the three-leaf stage. The result also shows that the characters of the upper and underground part are extremely affected by the interaction between cultivar and nitrogen proportion, and there is different difference among G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 、 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 、 G_2N_0 、 G_2N_1 、 G_2N_2 . In comparison with G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 、 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 , variety G_2 is a highly efficient use of nitrogen cultivar, because it had a larger value in traits of the leaf number, plant height, leaf area per plant, dry matter of upper part, root number, root length, root weight, growth rate of plant height, leaf number grain weight per plant, and biomass per plant.

Key words: Foxtail millet; Cultivar; Ecological types; Morphology; Nitrogen proportion

氮素是作物从土壤中吸收最多的大量元素, 与作物生长发育和器官建成有密切关系^[1]。目前我国氮肥当季利用率多在50%以下^[2-3], 农业生产中存在不合理过量施用氮肥引起的生产成本提高、水土污染等人们广泛关注的问题^[4-5]。有研究

表明, 可以利用生物固有的生物学特性挖掘作物自身对土壤氮素的高效利用, 选育耐低氮、氮吸收利用率高的品种来提高氮素的利用率^[6-7], 并在小麦、水稻、玉米、大豆、油菜等作物已经获得了一批具有耐低氮特性的实用价值的种质资源^[8-13]。

收稿日期: 2017-05-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD01B05-9)、国家科技支撑计划项目(2014BAD07B01)、国家现代农业产业技术体系(CARS-06-13.5-A9)。

作者简介: 刘天鹏(1987—), 男, 甘肃定西人, 研究实习员, 主要从事小杂粮遗传育种及生态生理研究。联系电话: (0)13993184051。

通信作者: 杨天育(1968—), 男, 甘肃渭源人, 研究员, 主要从事小杂粮作物遗传育种与种质资源研究。E-mail: 13519638111@163.com。

谷子是起源于我国的古老作物,已有8700多年的栽培历史,因具有营养丰富平衡、耐旱耐瘠、耐储存,粮饲兼用等特点,被誉为中华民族的哺育作物,在我国北方旱作农业生产中占有重要地位^[14]。

科技工作者在施用氮肥对谷子生长发育的影响方面开展了研究。古世禄^[15]研究表明,施氮能提高谷子的光合能力,增加干物质的生产。梁银丽等^[16]发现,施氮既促进了谷子根系的生长并使其能有效利用土壤深层水分,也提高了土壤抗蚀能力及蓄水保水能力,改变了土壤和植株的水分状况。霍剑锋等^[17]研究证实,施氮量对谷子叶片净同化率的影响较大,氮素供应充足时光合作用直接产物的转化就比较快,光合作用效率高。严昌荣等^[18]的研究表明,一定施氮水平内随施肥量增加春谷的株高、单位面积穗数和千粒重都有增加。但前人对低氮条件下不同生态类型谷子品种地上、地下部形态响应研究较少。我们通过盆栽试验,研究了不同氮水平供应对不同生态类型谷子品种形态建成的影响,旨在探明不同生态型谷子对不同氮水平供应的响应,为筛选耐低氮和氮高效利用谷子品种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用3个不同生态类型谷子品种,分别用 G_0 、 G_1 、 G_2 表示, G_0 是豫谷1号(中国), G_1 是129-96(波兰), G_2 是130-96(肯尼亚),均由甘肃省农业科学院作物研究所提供。

1.2 试验方法

试验采用完全随机设计,设品种(G_i)、氮素(N_j)两个因素,各因素分别设3个水平,其中不同氮水平为 $N_0=0$ g/kg 沙子、 $N_1=0.10$ g/kg 沙子、 $N_2=0.20$ g/kg 沙子。两因素组合分别为 G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 、 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 、 G_2N_0 、 G_2N_1 、 G_2N_2 ,共9个处理。

试验在夜间温度23℃、白天温度在31℃、空气湿度75%的温室内进行,选取饱满、均匀、无破损的谷种,播种到直径15 cm的塑料钵中,每钵装筛过的沙子1.8 kg,钵下封口以免水肥流失,每钵定苗5株。谷子出苗后3叶期开始,标记植株并在第7天(T_7)、14天(T_{14})、21天(T_{21})、28天(T_{28})、35天(T_{35})分别统计出生叶片及测量株高。3叶期后第35天拔取5个株样,用蒸馏水小

心冲洗并用吸水纸吸去残留水分后,采用水盘网格法^[18]测定根长、根数,采用烘干称重法测定地上部和地下部干物质重量,同时用叶面积仪(Li-3000C型)测定单株叶面积。生长率、出叶速率= $(T_n-T_{n-7})/T_n$, T_n 代表谷子三叶期后第7天、14天、21天、28天、35天的株高、出叶数,其中 $n=14$ 、21、28、35。

1.3 数据分析

试验采用Excel、SPSS软件进行数据整理及分析。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对不同生态类型谷子品种地上部形态建成的影响

从表1可以看出,3叶期后,3个不同生态类型谷子品种每隔7 d(T_7)、14 d(T_{14})、21 d(T_{21})、28 d(T_{28})、35 d(T_{35})测定的出叶数和株高存在极显著差异,第35天测定的单株叶面积和单株地上部分干物质也存在极显著差异,说明3个不同类型谷子品种对施氮的响应有明显遗传差异。从表1还可以看出,3叶期后,不同施氮水平下第7天(T_7)、第14天(T_{14})、第21天(T_{21})测定的出叶数和株高品种间没有显著差异,而在第28天(T_{28})、第35天(T_{35})却有极显著变化,说明不同生态类型谷子品种生长后期的氮素供应产生了较显著的效应,这种情况同样在3叶期第35天测定的单株叶面积和地上干物质两个指标上表现出来,进一步说明随着不同生态类型谷子品种生长发育推进,表型分化加剧,品种对氮素才有逐渐增加的需求。从3个不同谷子品种和不同施氮量的交互作用来看,3叶期后不同时期测定的出叶数和株高以及第35天测定的单株叶面积、地上干物质重在品种和施氮量上均存在显著或极显著的交互作用,表明谷子地上部形态的建成受品种和氮素两方面因素的显著影响。

从多重比较结果可以看出, G_0N_0 、 G_0N_1 、 G_0N_2 三个组合在 T_7 时期的出叶数及 T_{14} 、 T_{21} 、 T_{28} 、 T_{35} 时期的株高、单株叶面积、地上干物质均无显著差异,只有 T_{14} 、 T_{21} 、 T_{28} 、 T_{35} 时期的出叶数有显著差异,说明施氮0 g(N_0)、0.10 g(N_1)、0.20 g(N_2)对豫谷1号(G_0)地上部分形态建成影响较小。其他6个组合在不同时期测定的出叶数、株高,以及单株叶面积、地上干物质均不同程度的存在显著或极显著差异,且 G_1N_0 、 G_1N_1 、 G_1N_2 、 G_2N_0 、

表 1 不同施氮水平下各生态类型谷子种质地上部分性状的变化

品 种	氮 素	出叶数/行					株高/cm					单株叶面积 /cm ²	地上干物质 /(g/株)
		T ₇	T ₁₄	T ₂₁	T ₂₈	T ₃₅	T ₇	T ₁₄	T ₂₁	T ₂₈	T ₃₅		
G ₀	N ₀	3.0±0.0a	3.2±0.2a	4.1±0.2a	4.3±0.0a	5.0±0.3a	4.90±0.32a	5.10±0.31a	5.33±0.64a	5.05±0.42a	5.25±0.30a	2.04±0.33a	0.03±0.02a
	N ₁	2.9±0.2a	3.9±0.5b	5.9±0.5b	6.4±0.4b	6.4±0.4b	11.46±0.32b	14.51±0.61a	15.17±0.78a	14.99±1.09a	14.90±0.92a	3.14±1.17a	0.05±0.03a
	N ₂	3.0±0.2a	3.3±0.3bc	3.7±0.3a	4.6±0.2a	5.0±0.3a	9.81±0.72b	11.80±1.21a	12.00±1.08a	11.52±0.67a	11.94±0.82a	3.95±0.28a	0.03±0.02a
G ₁	N ₀	4.2±0.2b	5.8±0.4c	6.8±0.4c	7.8±0.4c	8.2±0.2c	27.33±2.48cd	48.00±8.37b	63.96±3.67b	75.31±4.77b	82.11±7.55b	120.79±14.84d	1.16±0.23b
	N ₁	5.1±0.2de	6.4±0.5de	7.6±0.7cd	9.0±0.6de	8.9±0.7cd	28.83±1.76cd	56.43±3.55bc	68.84±7.58bc	71.44±9.84b	71.18±9.94b	92.21±23.73c	1.73±0.51bc
	N ₂	4.9±0.2cd	6.9±0.2ef	8.1±1.0d	8.1±1.0cd	8.1±1.0c	31.11±1.98de	55.95±3.61bc	74.42±7.65bc	91.72±6.53c	106.25±5.25c	54.61±17.23b	1.63±0.17bc
G ₂	N ₀	5.2±0.2c	7.4±0.4f	9.4±0.4e	9.4±0.4e	9.4±0.4d	33.28±0.60e	66.97±1.66d	93.85±3.89d	130.00±6.23f	150.39±4.69e	117.41±8.93d	4.86±1.38d
	N ₁	4.7±0.3de	6.2±0.2cd	7.9±0.2d	9.1±0.4e	9.8±0.2d	27.39±4.71cd	51.70±10.05bc	77.43±11.59c	104.42±8.41d	113.70±13.19cd	198.19±27.04e	2.33±0.68c
	N ₂	5.4±0.4e	7.4±0.4f	9.6±0.4e	11.3±0.9f	13.2±1.0e	26.17±3.84c	60.11±8.84cd	92.61±9.14d	117.39±7.51e	123.22±7.92d	233.75±3.52f	4.70±0.23d
F _C		193.57**	243.55**	169.21**	177.45**	190.79**	217.13**	207.64**	359.20**	719.23**	656.68**	344.86**	115.17**
F _N		3.48	3.49	1.24	8.29**	10.36**	0.22	0.51	2.32	6.24**	10.79**	4.37*	4.85*
F _{GxN}		7.55**	8.95**	14.47**	11.37**	18.20**	7.73**	4.79**	3.88*	9.35**	16.18**	30.81**	7.84**

G₂N₁、G₂N₂ 6 个组合相互间在出叶数、株高、单株叶面积、地上干物质上存在显著或极显著差异，其中 G₂(130-96)在不同施氮水平下，大多数指标均表现出较高的性状值，尤其是 G₂N₀、G₂N₂ 2 个组合的性状值更高，说明 G₂ 是一个既耐底氮又有着高效氮肥利用率的品种。

2.2 施氮水平对不同生态类型谷子种质地下部形态建成的影响

表 2 结果显示，3 个不同生态类型谷子品种间在根数、根长、根干重 3 个地下部分性状指标上存在极显著差异，说明 3 个品种对氮素供应的响应存在明显的遗传差异。从不同施氮水平看，氮肥施用量的不同仅对根长有显著的影响。从不同生态类型品种与施氮量间的交互作用分析看，地下部分的形态建成也受品种和施氮量双因素的显著影响。多重比较结果显示，9 个组合间不同程度存在显著差异。G₀N₀、G₀N₁、G₀N₂ 3 个组合除根长在 G₀N₀、G₀N₁ 与 G₀N₂ 间存在显著差异外，根数和

根干重在 3 个组合间差异不显著，说明 N₂ 水平下对 G₀ 根的伸长生长有明显的影 响；G₁ 表现出 N₀ 水平下根数、根长、根干重均较 N₁、N₂ 水平下高，说明极低氮水平更利于 G₁ 地下部分的生长；G₂ 在 N₀、N₁、N₂ 均表现出较高的地下部分性状，其中根长在 N₀、N₁、N₂ 无显著差异，根数在 N₀ 与 N₁、N₂ 有显著差异，而在 N₁、N₂ 间无显著差异，根干重 N₀、N₁ 与 N₂ 有显著差异，而在 N₀、N₁ 间无显著差异，说明 G₂ 整体上表现出对不同氮素水平的广泛适应性。

2.3 施氮水平对不同生态型谷子品种生长速度的影响

不同处理下不同类型谷子品种生长速度的变化见图 1。可以看出，3 叶期后从第 7 天至第 14 天(T₇₋₁₄)、第 14 天至第 21 天(T₁₄₋₂₁)、第 21 天至第 28 天(T₂₁₋₂₈)、第 28 天至第 35 天(T₂₈₋₃₅)，不同生态类型谷子品种在不同施氮水平下生长速率及出叶速率总体上有逐渐降低的趋势。图 1(A)显示，3 叶期后不施氮情况下(N₀)，G₀ 在 T₇₋₁₄、T₂₁₋₂₈ 表现出较快的生长率，但出叶速率却在 T₁₄₋₂₁、T₂₈₋₃₅ 表现出较高的速率，说明低氮水平下 G₀ 生长中心有着相互衔接的特征；N₁、N₂ 水平下，G₀ 在 T₇₋₁₄、T₁₄₋₂₁、T₂₁₋₂₈ 和 T₂₈₋₃₅ 表现出快速生长向停止生长或缓慢生长的现象，在 N₁ 水平下出叶速率也表现出相同的趋势；但在 N₂ 水平下，出叶速率在 T₂₁₋₂₈ 最高，说明高氮水平利于 G₀ 生育后期的叶片发育。图 1(B、C)反映出，3 叶期后 G₁、G₂ 在 T₇₋₁₄、T₁₄₋₂₁、T₂₁₋₂₈ 到 T₂₈₋₃₅ 先表现出快速生长，而后生长速度逐渐降低乃至停止生长的现象，说明 G₁、G₂ 有着相同的生长特性，但 G₂ 在不同施氮水平下不同阶段均表现出比 G₀、G₁ 相对较高的生长率和

表 2 不同施氮水平下各生态类型谷子种质地下部分性状的变化

品种	氮素	根数 /条	根长 /cm	根干重 /(g/株)
G ₀	N ₀	3.0±0.0a	11.67±1.53a	0.01±0.00a
	N ₁	3.0±0.0a	13.33±1.53a	0.02±0.01a
	N ₂	3.0±0.0a	42.33±5.69b	0.04±0.02a
G ₁	N ₀	12.5±1.3cd	65.67±13.05c	0.54±0.13c
	N ₁	10.1±1.4b	43.67±1.53b	0.42±0.14bc
	N ₂	10.4±0.8bc	40.67±3.06b	0.26±0.32ab
G ₂	N ₀	11.5±1.6bc	74.00±17.44c	0.88±0.20d
	N ₁	14.7±2.2d	63.67±12.90c	0.90±0.19d
	N ₂	14.5±2.1d	76.67±11.72c	1.46±0.31e
F _C		155.35**	59.12**	110.30**
F _N		0.14	4.59*	2.15
F _{GxN}		4.20*	6.37**	7.18**

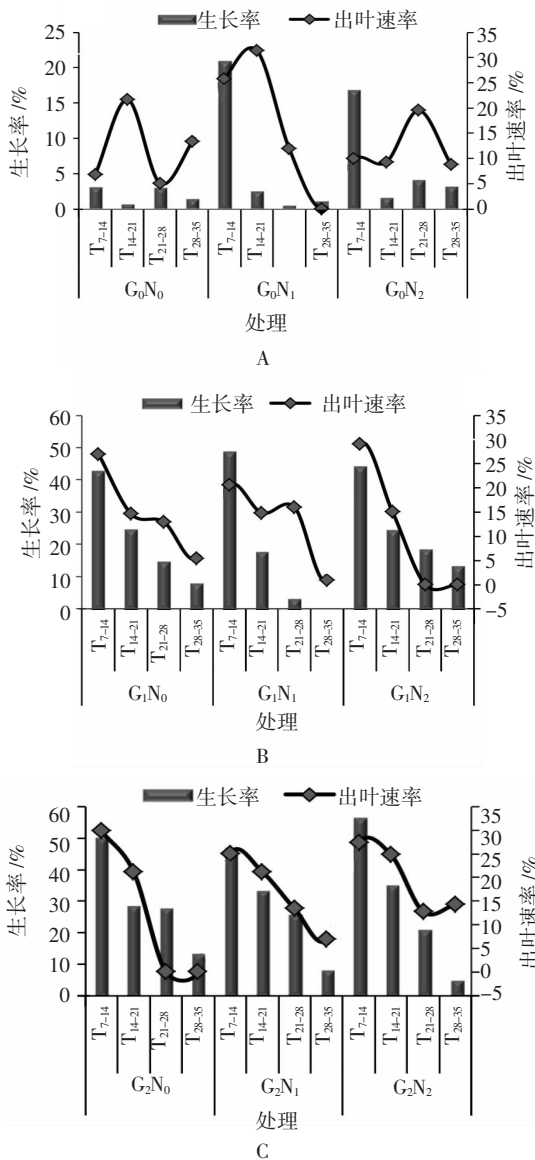


图1 不同处理下不同类型谷子种质生长速度变化

出叶速率,进一步说明 G₂ 是一个既耐低氮又有着氮肥高效利用的谷子品种。

2.4 施氮水平对不同生态型谷子品种单株穗粒重及单株生物量的影响

不同生态类型谷子品种在不同氮素水平下的单株穗粒重,除 G₀ 没有抽穗以外, G₁、G₂ 均抽穗结实。经多重比较, N₁ 水平下, G₁N₁ > G₁N₀ > G₁N₂, 但不存在显著差异; N₂ 水平下, G₂N₂ > G₂N₁ > G₂N₀, 且 G₂N₁ 与 G₂N₂、G₂N₀ 间存在显著差异。不同生态类型谷子品种在不同氮素水平下的单株生物量,经多重比较, G₀N₀、G₀N₁、G₀N₂ 不存在显著差异, G₁N₀、G₁N₁、G₁N₂ 亦不存在显著差异,但 G₁N₁ > G₁N₂ > G₁N₀, G₂N₁ 与 G₂N₀、G₂N₂ 间存在显著

差异。对单株穗粒重及单株生物量进行方差分析,可以看出, G₂ 在不同氮水平下较 G₀、G₁ 均表现出较高的生物产量,进一步说明 G₂ 较 G₀、G₁ 耐低氮条件。

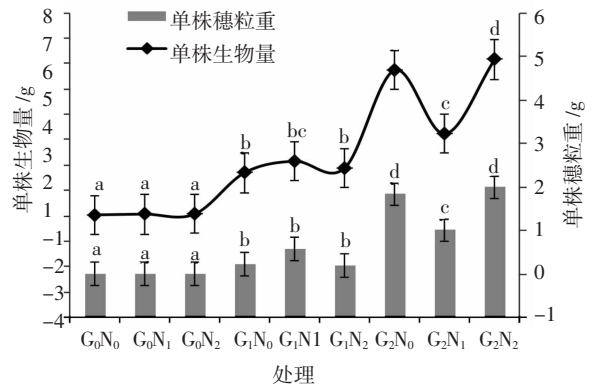


图2 不同氮素水平下各生态类型谷子品种单株产量差异

3 小结与讨论

研究表明,外界胁迫会导致植株形态学和生理化参数发生相应的改变,与植株抗逆境能力高度相关的部分植株性状和生理生化参数,可作为耐胁迫能力强弱的参考和鉴定指标 [20-21]。在作物养分胁迫研究中,也有人建议把与吸收率有关的根系形态学和生理学特征作为切入点 [22]。我们在研究中选取地上株高、出叶数、叶面积和地上干物质重以及地下根数、根长和根干重作为谷子对低氮响应的指标进行观测,结果表明,低氮条件下谷子的株高、叶面积、干物质、根长、根数明显降低,且地上部分受抑制程度要大于根部。这与在其他作物的研究结果类似,如乔振江等 [23] 研究表明低磷条件下会对大豆植株干物质积累产生影响,陈磊等 [24] 研究表明不同磷供应对小麦根系形态有不同的影响。

不同基因型对作物养分的响应存在较大差异。张志良、鲍士旦等 [25-26] 认为,碳水化合物和氮的平衡决定作物根的生长,不同品种在氮磷作用下,根数与氮含量有关,根长与氮和磷共同影响。张定一等 [27] 研究发现,在氮营养缺乏的土壤环境中,增加氮素供应会促进不同基因型植物生物量的增加;王新超等 [28] 以 6 个茶树品种为试验材料,在 4 种施氮条件下研究发现,随着氮供应量增加,各种生物量、新梢生长量都显著增加;Stanturf 等 [29] 发现氮肥增加能显著提高甘蔗叶片生物量。可见,通过研究不同养分供应条件下不同基因型的差别可以筛选出有利于在缺素土壤上能

获得较高产量的基因型。我们的研究表明, 3个不同生态类型的谷子品种对低氮的响应也是不同的, 低氮条件下肯尼亚品种 G₂ 株高、叶面积、地上干物质重、总根数下降幅度明显低于其他 2 个品种, 显示出在低氮条件较高的氮素利用率, 因此可认为 G₂ 是一个既耐低氮又有着高效氮肥利用率的谷子品种。我们的研究还显示, 不同生态类型的谷子品种对于氮肥需求是不同, 谷子不同生长阶段所需的氮肥也各不相同。谷子在 3 叶期后第 7 d 至 14 d 的株高与出叶数明显高于其它阶段, 据此可以推断, 谷子在 3 叶期后第二周对于氮肥的需求最大, 在该阶段合理使用氮肥能有效促进谷子生长发育。

参考文献:

- [1] 丁玉川, 陈明昌, 程斌, 等. 北方春大豆磷高效基因型的筛选[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 597-600.
- [2] 李峰, 潘晓华. 植物适应氮胁迫的根系形态及生理特性研究进展[J]. 中国农业通报, 2002, 18(5): 65-71.
- [3] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤氮素的植物营养学研究[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 417-421.
- [4] CHAPIN F S H I. The mineral nutrition of wild plants[J]. Annual Review of Ecology and Systematic, 1980, 11: 233-260.
- [5] FIST A J, SMITH F W, EDWARDS D G. External phosphorus requirements of five tropical grain grown in flowing-solution culture[J]. Plant and Soil. 1987(99): 75-84.
- [6] LIU H, LIU J F, LIU B J. Differences of root morphology and physiological characteristics between two rape genotype peps with different P-efficiency[J]. Plant Nutria Fret. Sic., 2005(1): 40-45.
- [7] 张子文, 伊霞, 胡博, 等. 缺氮条件下燕麦根轴细胞的程序性死亡[J]. 中国农业学报, 2010, 26(8): 175-178.
- [8] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态研究[J]. 生态科学, 1998, 17(2): 37-42.
- [9] 曹翠玲, 李生秀, 苗方. 氮素对某些生理生化过程影响的研究进展[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(4): 96-101.
- [10] 王利, 杜森, 王激清, 等. 中国氮肥消费状况及其发展展望[J]. 化肥工业, 2006, 33(4): 1-6.
- [11] 谢河山, 王艳鹏, 程萍, 等. 珠江三角洲叶菜类蔬菜硝酸盐污染现状及对策[J]. 广州农业科学, 2000(5): 26-28.
- [12] 易则夫. 氮肥用量与有机无机复混肥料对茼蒿的产量和品质的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.
- [13] 田霄鸿, 聂刚, 李生秀. 不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 263-267.
- [14] 刁现民. 中国谷子产业与未来发展[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 20-30.
- [15] 古世禄. 谷子研究新进展[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1996: 171-181.
- [16] 梁银丽, 康绍忠. 坡地施肥水平对谷子根系生长和生产力的作用[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 53-57.
- [17] 霍剑锋, 车文春, 孟宪瑞. 栽培措施对谷子叶片光合效率的影响[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1993, 14(2): 43-48.
- [18] 严昌荣, 梅旭荣, 居辉, 等. 施肥对春谷子生长发育及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 142-144.
- [19] CHAPIN F W. Effects of increased fertilizer riles on nitrogen content of runoff and percolate from monolith lysimeters[J]. J. Environ Quall, 1977, 6(2): 211-217.
- [20] 郭程瑾, 张立军, 崔喜荣, 等. 氮胁迫条件下中国春一代换系小麦苗期耐低氮特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 29-37.
- [21] 李淑文, 文宏达, 周彦珍, 等. 不同氮效率小麦品种氮素吸收和物质生产特性[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 1992-2000.
- [22] 张丽梅, 贺立源, 李建生, 等. 不同耐低磷基因型玉米磷营养特性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 110-115.
- [23] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5578-5587.
- [24] 陈磊, 王盛锋, 刘荣乐, 等. 不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 324-331.
- [25] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [27] 张定一, 张永清, 杨武德, 等. 不同基因小麦对低氮胁迫的生物学响应[J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1349-1354.
- [28] 王新超, 杨亚军, 陈亮, 等. 不同品种茶树氮效率差异研究[J]. 茶叶科学, 2004, 24(2): 93-98.
- [29] STANTURF B, GEORGE E, MARSCHNER H, et al. Effects of varied soil nitrogen supply on Norway spruce (*Picea abies* Karst) I. Shoot and roil growth and nutrient uptake[J]. Plant and Soil, 1996, 184(2): 291-298.

(本文责编: 陈珩)