

史俊,杨鹤同,徐超,等. 氮素营养对铁皮石斛生长和生理的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):119-122.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.029

氮素营养对铁皮石斛生长和生理的影响

史俊,杨鹤同,徐超,席刚俊

(江苏农林职业技术学院,江苏镇江 212400)

摘要:为研究氮素营养对铁皮石斛生长的影响,以铁皮石斛组培苗为试验材料,对不同氮素水平下铁皮石斛生长指标及根系活力、氮素在植株体内分布、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、丙二醛(MDA)含量、游离脯氨酸(Pro)含量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化酶(POD)活力进行动态测定,观察其动态变化趋势并筛选最佳使用。结果发现,低氮水平有利于根系的生长和根系活力的提高,氮素向根部集中,叶绿素、可溶性蛋白质、游离脯氨酸(Pro)合成及SOD、POD活性受到抑制,植株体内MDA含量较高,当氮素提高后,根系活力下降,叶部含氮量提高,叶绿素、可溶性蛋白质、Pro合成加快,SOD、POD活力提高,植株体内MDA含量下降,但过高的氮素也不利于植株的生长。说明5~10 mmol/L 氮素营养最有利于铁皮石斛组培苗的生长。

关键词:铁皮石斛;氮素营养;生长特性;生理指标

中图分类号:S567.23+9.06

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2018)23-0119-03

铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)为兰科石斛属多年生草本植物,分布于安徽、浙江、福建、广西、四川及云南等地海拔800~1500 m山地覆有苔藓或腐殖质的岩石或树干上^[1],其为富含多糖、生物碱、氨基酸及矿物质等多种有益于人体健康的药用活性成分,具有益胃生津、滋阴清热、抗衰老、抗肿瘤、降血糖、提高免疫力等功效^[1-4],铁皮石斛在自然状态下自身繁殖困难,由于长期毁灭性采挖与生存环境破坏,造成野生资源濒临灭绝,现已将铁皮石斛列为国家二级保护濒危药用植物^[5],是国家重点保护的药用植物品种之一。通过人工手段繁殖和栽培铁皮石斛是满足市场需求的主要手段,同时也对保护野生铁皮石斛资源具有重要意义。

氮素是所有植物体生长发育时期不能缺少的营养元素,是组成植物体内氨基酸、蛋白质、遗传物质以及叶绿素和其他关键有机分子的基本组成成分之一,所有植物体的正常生长发育都需要氮素来维持,但是氮素的过量摄入也会对植物造成严重伤害^[6]。张珂等通过研究水氮互作对菰蓝光合生理影响发现,在适宜的中氮水平下,菰蓝的光合作用最强,而低水平供氮会使菰蓝光合作用受到抑制^[7]。Shu等研究发现,在低氮条件下,高羊茅叶片中叶绿素含量降低,而超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活力却显著增强^[8]。氮素不仅会影响植物体内在的光合作用,而且还通过影响体内一些重要的酶类控制植物的生理生化代谢,进而对其生长发育和产量产生极大的影响^[9]。铁皮石斛的生长离不开氮素营养,但氮素营养提供过多或过

少都会对铁皮石斛生长及生理指标产生不良影响。目前,针对培养基中氮素营养对铁皮石斛组培苗生长及生理指标影响的研究鲜见报道。本研究以铁皮石斛组培苗为材料,在培养基中添加不同浓度的氮素,分析氮素营养对铁皮石斛的生长及生理指标的影响,从而为完善铁皮石斛组培快繁技术及提高田间施肥管理水平提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

铁皮石斛果实于2015年11月采自浙江乐清,经浙江省医学科学院张治国研究员鉴定为铁皮石斛的果实,2015年12月在江苏农林职业技术学院组培中心将铁皮石斛种子消毒后,接种到培养基(N6+NAA 0.1 mg/L+马铃薯汁 80 g/L+琼脂 7 g/L+蔗糖 30 g/L)上培养3个月,形成原球茎后转接到分化培养基(N6+NAA 0.5 mg/L+香蕉泥 80 g/L+琼脂 7 g/L+蔗糖 30 g/L)上培养3个月获得试管苗,选择长势相近、株高2~3 cm的试管苗作为供试材料。

1.2 试验方法

1.2.1 材料处理 基本培养基为N6培养基,添加NAA 1.0 mg/L、琼脂 7 g/L、蔗糖 30 g/L,通过调整(NH₄)₂SO₄和KNO₃浓度设置5种不同的氮素水平,分别为低氮水平(0.01、0.2 mmol/L)、中氮水平(5、10 mmol/L)、高氮水平(35 mmol/L) TN(全氮),分别标记为N1、N2、N3、N4、N5(CK)。将铁皮石斛组培苗接种培养基,每瓶接种18株,每个处理接种5瓶,3个重复,培养室培养50 d,培养条件为:(25±2)℃,光照1000 lx,12 h/d。

1.2.2 形态指标测定 分别随机取10株苗测量株高、根长,统计生根数,称取全株鲜质量、根鲜质量、全株干质量、根干质量等生长指标。

1.2.3 生理指标测定 分别随机选取10株苗,剪取叶片,去除粗大的主叶脉,测定叶绿素、可溶性蛋白、丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)含量及SOD、POD活力,叶绿素、MDA含量测定

收稿日期:2018-07-15

基金项目:江苏省高校自然科学基金(编号:16KJB210017);江苏省

特粮物经产业技术体系中药材推广示范基地建设项目(编号:JATS[2018]230);江苏农林职业技术学院院级项目(编号:2018KJ40)。

作者简介:史俊(1979—),男,江苏扬州人,硕士,讲师,主要从事药用植物育种及栽培研究。E-mail:shijun3322@163.com。

通信作者:席刚俊,讲师,主要从事生物技术研究。E-mail:2469250487@qq.com。

分别采用 80% 丙酮研磨法^[10]、硫代巴比妥酸法^[11]；游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量及 SOD、POD 活力测定参照高俊风的方法^[12]。切取幼苗根尖,TTC 法测定根系活力^[13]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 氮素营养对铁皮石斛组培苗生长的影响

从表 1 可以看出,铁皮石斛的生根数量随着氮素浓度的提高呈现下降—升高—下降的趋势,说明低氮水平有利于铁皮石斛生根,在供氮水平达 10 mmol/L 时,平均株高、平均根鲜质量、平均根干质量、平均全株鲜质量、全株干质量、折干率都达到最大值,并且优于高氮处理 N5,但 N4 处理鲜根占全株的比重最低,而干根占比却不是最低,说明此时更多的水分进入了植株的地上部分,地上部分代谢更加旺盛,发育较快。总体看来,低氮水平促进铁皮石斛地下部分的生长,中氮水平地上部分生长快于地下部分,而当氮素水平达到一定水平后,地下部分生长加速,提高了根占比,但在生根数、根长、株高等表

观生长指标上各处理间均无显著差异,只有在折干率指标上,各处理呈现显著差异,并以 N4 处理最高,由此可见一定量的供氮水平对铁皮石斛组培苗干物质积累影响很大。

2.2 不同氮素水平对铁皮石斛根系活力及有机渗透物的影响

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长情况和活力水平直接影响地上部的营养状况及产量水平。脯氨酸与可溶性蛋白是非常重要的渗透调节物质,是缺氮胁迫下植物生理变化规律的重要参考指标。由表 2 可知,在低氮条件下,铁皮石斛根系活力得到加强,随着氮素增加,铁皮石斛根系活力出现下降趋势,氮素水平最低的为 N1 处理,其根系活力分别是 N3、N4、N5 处理的 1.30、1.40、1.39 倍,并且呈显著差异。不同供氮水平下,铁皮石斛体内的脯氨酸和可溶性蛋白含量存在差异,在中低氮水平(N1~N3)下有机渗透物脯氨酸和可溶性蛋白含量随供氮水平的提高而提高,在高氮水平下,随氮素增加而下降。中氮水平(N3)脯氨酸和可溶性蛋白水平最高,脯氨酸与可溶性蛋白含量分别达到 0.003 3% 和 0.002 3 mg/g,其脯氨酸含量与其他处理呈显著差异。

表 1 氮素营养对铁皮石斛组培苗生长的影响

处理	平均生根数 (条)	平均根长 (cm)	平均株高 (cm)	平均根鲜质量 (g)	平均根干质量 (g)	平均根折干率 (%)
N1	3.16±0.75a	2.49±0.99a	3.97±0.80a	0.070±0.032a	0.006 3±0.002 6a	9.05±1.57ab
N2	3.00±0.78a	2.99±0.95a	4.23±0.68a	0.076±0.017a	0.006 8±0.004 1a	9.05±2.45ab
N3	3.33±0.81a	2.65±0.57a	3.63±1.08a	0.071±0.20a	0.005 8±0.001 7a	8.16±0.27a
N4	3.33±1.03a	3.42±0.83a	4.58±0.51a	0.078±0.023a	0.008 8±0.003 3a	11.35±2.05b
N5(CK)	2.66±0.46a	4.21±1.37a	3.52±1.74a	0.077±0.021a	0.006 7±0.001 1a	8.726±1.14a

处理	平均全株鲜质量 (g)	平均全株干质量 (g)	平均全株折干率 (%)	根占比(鲜) (%)	根占比(干) (%)
N1	0.17±0.04a	0.013±0.004a	7.68±0.78b	41.17±10.05a	48.46±8.32a
N2	0.20±0.066a	0.015±0.005a	7.51±0.80ab	38.31±11.39a	45.95±11.30a
N3	0.19±0.07a	0.012±0.005a	6.43±0.92a	38.08±3.65a	48.33±12.93a
N4	0.23±0.08a	0.018±0.005a	7.90±1.09b	33.68±9.51a	49.44±16.14a
N5(CK)	0.18±0.04a	0.013±0.004a	7.46±1.31a	43.38±8.32a	50.76±16.32a

注:不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。下表同。

表 2 不同供氮水平对铁皮石斛根系活力及有机渗透物的影响

处理	根系活力 [mg/(g·h)]	有机渗透物的含量	
		脯氨酸(%)	可溶性蛋白(mg/g,FW)
N1	206.70±23.10b	0.002 6±0.000 2ab	0.001 46±0.000 22a
N2	180.19±7.04ab	0.002 7±0.000 3b	0.001 74±0.000 65ab
N3	159.52±14.45a	0.003 3±0.000 4c	0.002 31±0.000 42b
N4	147.45±7.54a	0.002 3±0.000 4ab	0.001 96±0.000 75ab
N5(CK)	148.94±11.96a	0.002 0±0.000 3a	0.001 98±0.000 45ab

2.3 不同氮素水平对铁皮石斛叶绿素含量的影响

叶绿素含量直接反映光合作用的强度,氮素是植物体内蛋白质和核酸的重要组成元素,氮素的供应对植物叶绿素的合成有重要的影响。由表 3 可以看出,铁皮石斛叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量都呈现先升高后降低的趋势,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量在 N3 处理时达到最大,分别为 N1 处理叶绿素 a、总叶绿素、叶绿素 b 的 1.44、1.41、1.43 倍,且其叶绿素 a 和总叶绿素含量与最低水平 N1 处理呈显著差异。以上结果表明,氮素的供应对铁皮石斛叶绿素的合成有重要影响,叶绿素的合成需要一定量的氮素供应,但过高的氮

表 3 不同供氮水平对铁皮石斛叶绿素含量的影响

处理	叶绿素 a 含量 (mg/g,FW)	叶绿素 b 含量 (mg/g,FW)	总叶绿素含量 (mg/g,FW)
N1	0.528±0.086a	0.189±0.042a	0.716±0.128a
N2	0.633±0.057ab	0.244±0.005a	0.877±0.053ab
N3	0.761±0.165b	0.266±0.050a	1.027±0.212b
N4	0.742±0.038b	0.247±0.012a	0.989±0.028b
N5(CK)	0.699±0.120ab	0.246±0.044a	0.945±0.164ab

素水平对叶绿素的合成有抑制作用。

2.4 不同氮素水平对铁皮石斛组培苗活性氧清除系统的影响

MDA 作为膜脂过氧化过程中的主要产物之一,其含量的变化可反映细胞膜脂损伤程度^[15]。植物体内存在的 SOD、POD 等抗氧化酶系,对清除植物体内的过量活性氧、维持活性氧的代谢平衡、防御膜脂过氧化等具有积极的作用^[14],从表 4 中可以看出,铁皮石斛植株体内 MDA 的含量随着供氮水平的不断提高而不断降低,SOD 活力随着供氮水平的提高而呈升高—下降—升高的趋势,POD 水平在中低氮水平(N1~N3)下随氮素水平增加而提高,在 N3 时达到最高点后便快速降低。由此可见,低氮胁迫导致铁皮石斛生物膜脂过氧化,SOD、POD 等抗氧化酶活性降低,随着供氮水平的提高,SOD、POD 等抗氧化酶活力增强,MDA 水平下降,但较高的氮素水平首先会抑制铁皮石斛 POD 的活力。

表 4 不同供氮水平对铁皮石斛 MDA 含量及抗氧化酶活力的影响

处理	MDA ($\mu\text{mol/g}$,FW)	抗氧化酶活力	
		SOD(U/g,FW)	POD(U/g,FW)
N1	2.73 \pm 0.04c	17.491 \pm 4.56a	295.764 \pm 95.941b
N2	2.56 \pm 0.65bc	31.693 \pm 16.18ab	303.739 \pm 32.021b
N3	1.98 \pm 0.22ab	22.531 \pm 5.77ab	337.661 \pm 68.540b
N4	1.82 \pm 0.24a	33.522 \pm 13.70ab	174.148 \pm 67.473ab
N5(CK)	1.69 \pm 0.03a	43.707 \pm 19.48b	88.616 \pm 18.528a

2.5 不同氮素水平对铁皮石斛组培苗根茎叶中氮素分布的影响

不同的氮素水平对铁皮石斛根、茎、叶的氮素含量及氮素在根茎叶中的分布有很大影响,从表 5 中可知,总体上来说,铁皮石斛根茎叶中含氮量随着供氮水平的提高而提高,在根、叶中,当供氮水平为 N4 处理时,氮素含量快速提高,分别达到 38.005、45.228 mg/g,并与 N1 和 N2 处理呈显著差异,而茎中的含氮量却在 N4 处理时呈下降趋势,在 N5 处理中又大幅度上升。从氮素在铁皮石斛根茎叶中的分布情况来看,在低氮水平(N1、N2)处理时,根的氮素含量水平显著高于茎,并且 N2 处理时跟中氮素水平显著高于茎叶;在中氮水平(N3、N4)处理时,铁皮石斛根茎叶中的含氮量出现分化,根和叶的含氮量快速增加,并且叶片中含氮量积累速度明显快于根,当氮含量达到 N4 时,叶片中含氮量达到最大值,并与根呈显著差异性;当供氮水平进一步提高时,叶片中的含氮量不再增加,但根和茎中的含氮量继续提高,且根中含氮量提高的速度快于茎,这说明在氮素缺乏的条件下,铁皮石斛首先保证营养吸收器官(根)的活力,其次是营养合成器官(叶片),最后是营养贮存器官(茎)。

3 讨论

氮元素是作物必需的营养元素,也是作物生长的重要限制因子^[16-17]。在植物的生长过程中,氮素营养含量对植物的生长代谢及生长发育有重要影响。氮素营养水平不仅直接影响含氮化合物(叶绿素、生物碱等)的合成,且与非含氮化合物(类胡萝卜素、类黄酮等)的合成也有密切关系^[18]。

在本试验中,不同的供氮水平对于铁皮石斛的生长具有明显的影响,总体呈现先升高再降低再升高的趋势,部分处理间呈现显著差异,在 N4 水平上,其生根数量、根鲜干质量、全

表 5 不同供氮水平对铁皮石斛根、茎、叶中氮素分布的影响

处理	各器官中的氮素含量(mg/g)		
	根	茎	叶
N1	31.290 \pm 1.042a(b)	26.777 \pm 2.359ab(a)	27.831 \pm 1.938a(ab)
N2	33.866 \pm 3.298a(b)	26.761 \pm 2.466ab(a)	26.546 \pm 1.119a(a)
N3	31.540 \pm 2.152ab(a)	27.678 \pm 3.658b(a)	31.306 \pm 3.540a(a)
N4	38.005 \pm 1.503b(b)	21.741 \pm 1.878a(a)	45.288 \pm 4.320b(c)
N5(CK)	49.856 \pm 3.780c(b)	34.304 \pm 4.141c(a)	44.816 \pm 3.345b(b)

注:不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。括号里字母表示横向比较,括号外字母表示纵向比较。

株鲜干质量、平均株高、折干率等方面达到最优,并优于全氮培养的对照,这与尤丽莉等研究^[19]一致。但铁皮石斛的根系活力却随着供氮水平的提高而持续降低,可能是由于在轻易得到氮素供应的条件下,植株减缓了根系的发育。

植物叶片中叶绿素合成、SOD 和 POD 活力也受氮素的影响,低氮条件下,叶绿素合成受到抑制,光合作用下降,SOD 和 POD 活力受到抑制,MDA 水平升高,随着供氮水平的提高,叶片中叶绿素合成抑制逐步解除,光合作用增强,同时 SOD 和 POD 活力增强,MDA 水平逐步下降,由此可以看出,MDA 含量与抗氧化酶活力系统及叶绿素含量呈现动态平衡,在较高的供氮水平下,叶绿素水平的提高减少了叶片光合作用的过剩光能,降低了过量活性氧的产生,从而降低了对细胞质膜的损害及 MDA 的产生,而抗氧化酶 SOD 和 POD 活力的提高又进一步缓解了这一伤害,MDA 水平逐步下降,但过量的氮素并不能进一步提高叶绿素含量,还会对 POD 活力产生影响,这与前人的研究^[20-23]一致。从氮素在植株体内的分布来看,在低水平供氮条件下,植株体内氮素分布较为均一,根部氮素略高于茎叶,在 N4 水平时,氮素快速向根叶转移。这与叶绿素的合成规律一致。

综上所述,铁皮石斛在低氮(N1、N2)水平下,植株体内代谢处于被抑制状态,N3 水平时,植株体内代谢开始恢复,N4 水平时,植株体内代谢水平最高,因此铁皮石斛种苗的最佳的供氮水平为 5~10 mmol/L。

参考文献:

- [1]李娟,李顺祥,黄丹,等.铁皮石斛资源、化学成分及药理作用研究进展[J].科技导报,2011,29(18):74-79.
- [2]中华人民共和国药典委员会.中华人民共和国药典(一部)[M].北京:中国医药科技出版社,2010:524.
- [3]蔡光先,李娟,李顺祥,等.铁皮石斛古代与现代的应用概况[J].湖南中医药大学学报,2011,31(5):77-81.
- [4]谭丹,杨传玉,胡珺,等.贵州不同产地铁皮石斛的单糖组成[J].贵州农业科学,2016,44(9):105-108.
- [5]Chen X M, Wang F F, Wang Y Q, et al. Discrimination of the rare medicinal plant *Dendrobium officinale* based on naringenin, bibenzyl, and polysaccharides[J]. Science China (Life Sciences), 2012, 55(12):1092-1099.
- [6]王铤,尹丽娟,朱瑞良.桧叶白发藓对不同氮源胁迫的形态和生理响应[J].广西植物,2015,35(4):520-525,470.
- [7]张珂,王艺蓉,赵宇隆,等.水氮互作对松蓝光合生理及药材质量的影响[J].生态学杂志,2016,35(12):3279-3285.
- [8]Shu J H, Wu J H, Qin T Y, et al. Research on physiological

卢剑青,艾啸威,胡冬南,等. D-Optional 混料设计优化油茶壳瓶栽海鲜菇配方[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):122-127.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.030

D-Optional 混料设计优化油茶壳瓶栽海鲜菇配方

卢剑青¹,艾啸威¹,胡冬南²,沈勇根¹,周明¹,朱凤妮¹,王强¹

(1. 江西农业大学食品科学与工程学院/江西省天然产物与功能食品重点实验室,江西南昌 330045;

2. 江西农业大学林学院,江西南昌 330045)

摘要:为充分利用油茶壳资源以及降低海鲜菇生产成本,采用 D-Optional 混料设计,针对油茶壳替代棉籽壳的比例,以棉籽壳(A)、油茶壳(B)、混合料(C)为主料,栽培周期、产量、子实体农艺性状为评价指标,研究瓶栽海鲜菇的最优生产配方。通过优化计算,得到了适合工厂化生产的周期短、产量高、农艺性状好、营养价值高的配方:油茶壳添加量 21.8%、棉籽壳添加量 42.8%、混合料添加量 35.4%。该配方栽培周期为 115 d、产量为 216.4 g、子实体农艺性状评分为 8.9 分;该配方比传统未加油茶壳的配方(棉籽壳添加量 65%、混合料添加量 35%)生产周期缩短了 15 d、产量增高了 11.4 g;同时其灰分、粗蛋白及粗纤维含量均显著高于传统未加油茶壳的配方海鲜菇。

关键词:油茶壳;海鲜菇;生产配方;工厂化栽培;优势配方;营养品质;D-Optional 混料设计

中图分类号:S646.1⁺90.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)23-0122-06

油茶(*Camellia Oleifera* Abel)别称茶油树,为山茶科山茶属植物,同油棕、椰子、油橄榄一起被人们誉为世界四大木本油料树种^[1]。据报道,中国是世界上油茶品种最多、种植面积最大、分布最广、茶籽产量亦是最高的国家,已有 26.67 万 hm² 的油茶林种植面积^[2]。油茶壳含油率低、木质素高,将油茶籽带壳加工制油,不仅会增大对设备的损耗,而

且还会降低茶油的品质,所以在制油工业中都是对油茶籽进行脱壳处理,油茶壳成了茶油加工中的主要废弃物。海鲜菇 [*Hypsizygus marmoreus* (Peck) H. E. Bigelow] 是一种珍稀的食用菌,其商品名为真姬菇,别称白玉菇、玉蕈、斑玉蕈或蟹味菇等。海鲜菇整体颜色洁白,菇柄笔直,外形十分美观,口感爽滑、脆嫩,味道鲜美。海鲜菇风味鲜美类似海蟹风味、营养价值高,并且海鲜菇还有着很高的药用价值,经国内外对海鲜菇的研究发现,海鲜菇子实体中含有多种生物活性物质,如具有清除自由基^[3]、抗肿瘤^[4]以及调节免疫活性^[5]等生理功能,近年来广受大众欢迎。将油茶壳废料应用到食用菌生产中作栽培基质,在获得风味独特的食用菌同时,消化油茶加工过程中产生的剩余物,使资源得到充分高效循环利用。大量研究

收稿日期:2017-08-11

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAD14B14)。

作者简介:卢剑青(1994—),男,江西永修人,硕士研究生,主要从事果蔬采后贮藏保鲜与加工研究。E-mail:hnwgif@163.com。

通信作者:沈勇根,硕士,教授,主要从事果蔬采后贮藏保鲜与加工研究。E-mail:137898404@qq.com。

characteristics of tall fescue under nitrogen stress[J]. Agric Sci Tech,2015,16(9):1837-1839.

[9] 宁建凤,郑青松,刘兆普,等. 外源氮对 NaCl 胁迫下库拉索芦荟生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):728-733.

[10] Jensen A. Chlorophylls and carotenoids[M]//Hellebust J A, Craigie J S. Handbook of phycological methods. Cambridge: Cambridge University Press,1978:59-71.

[11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:136-261.

[12] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安:世界图书出版公司,2000:196-197.

[13] 张志良,翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003:114-115.

[14] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2010,48(12):909-930.

[15] Parida A K, Jha B. Antioxidative defence potential to salinity in the euhalophyte *Salicornia brachiata* [J]. Plant Growth Regulation, 2010,149:57-63.

[16] 娄运生,武君,于晋秋,等. 氮对 UV-B 辐射增强条件下大麦

孕穗期叶片生理特性的影响[J]. 中国农业气象,2012,33(2):202-206.

[17] 高菊,王琼,李艳. 施氮对不同强度紫外线辐射下珙桐幼苗水分状况的影响[J]. 绵阳师范学院学报,2013,32(2):69-75.

[18] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2004:130-137.

[19] 尤丽莉,江行玉,邹积鑫. 低氮胁迫对不同木薯品种组培苗生长和根系形态的影响[J]. 热带农业工程,2017,41(1):1-5.

[20] Shimoda S. Contribution of leaf nitrogen to photosynthetic gas exchange in contrasting rice (*Oryza sativa* L.) cultivars during the grain-filling period[J]. Photosynthetica,2012,50(3):387-396.

[21] Li D D, Tian M Y, Cai J, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. Plant Growth Regulation,2013,70(3):257-263.

[22] 李强,罗延宏,余东海,等. 低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(5):1132-1141.

[23] 鱼欢,祖超,杨建峰,等. 施氮量对胡椒叶片叶绿素含量和活性氧代谢的影响[J]. 热带作物学报,2015,36(5):878-882.