网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.005

7个白杨无性系耐低氮性综合评价

火占华,黄景宝,邵雅坤,张静,张春霞
(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】探究低氮胁迫对7个白杨无性系幼苗生长和生理的影响,并从中筛选出耐低氮性较强的优良白杨无性系。【方法】采用盆栽试验,以84K杨、毛白杨30号、秦白杨1号、秦白杨3号、秦白杨5号、西北杨1号和西北杨3号7个白杨无性系幼苗为材料,用1 mmol/L NH_4NO_3(对照组,CK)和0.01 mmol/L NH_4NO_3(低氮,LN)进行氮处理,在处理60 d后测定各白杨无性系幼苗的生长及生理指标,并通过相关性分析、主成分分析、隶属函数分析对7个白杨组无性系幼苗的耐低氮性进行综合评价。【结果】与CK相比,低氮处理7个白杨无性系幼苗的生长指标(苗高增长量、地径增长量、植株生物量)和叶绿素含量、净光合速率、氮积累(NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N)以及多种酶(硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酰胺合成酶(GS))活性均明显下降。低氮胁迫下,7个白杨无性系幼苗的叶片和根系中NH_4^+-N含量下降幅度明显高于NO_3^--N、NO_2^--N,表明7个无性系为更偏向于喜铵的树种。相关性分析结果显示,白杨无性系幼苗的生长和生理指标之间有明显相关性。主成分分析将所有测定指标综合成3个成分因子,并将其分为氮积累因子和氮代谢因子。隶属函数分析结果显示,供试的7个白杨无性系幼苗耐低氮性由强到弱的顺序是84K杨>西北杨3号>西北杨1号>秦白杨1号>秦白杨5号>秦白杨3号>毛白杨30号。【结论】7个白杨无性系幼苗中,84K、西北杨3号和西北杨1号的耐低氮性较强,可作为土壤贫瘠地区的主要推广和人工造林树种。

[关键词] 杨树无性系;低氮胁迫;耐低氮性综合评价
[中图分类号] S792.117 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0033-10

Comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance in 7 poplar clones

HUO Zhanhua, HUANG Jingbao, SHAO Yakun, ZHANG Jing, ZHANG Chunxia
(*College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aimed to explore the growth and physiological response of 7 poplar clones under low nitrogen stress, and to select excellent poplar clones with strong low nitrogen tolerance from them. 【Method】 A pot experiment was conducted on 7 poplar clones, including 84K, Maobaiyang 30, Qinbaiyang 1, Qinbaiyang 3, Qinbaiyang 5, and Xibeiyang 1 and Xibeiyang 3. Seedlings were subjected to two nitrogen treatments: 1 mmol/L NH_4NO_3 (control, CK) and 0.01 mmol/L NH_4NO_3 (low nitrogen, LN). After 60 days of treatment, growth and physiological parameters of poplar clones seedling were measured. Comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance was conducted using correlation analysis, principal component analysis, and membership function analysis. 【Result】 Compared with CK, the growth indicators (seedling height increment, ground diameter increment, plant biomass), chlorophyll content, net photosynthetic rate, nitrogen accumulation (NH_4^+-N, NO_3^--N, NO_2^--N), and the activities of various enzymes (nitrate reductase (NR), nitrite reductase

[收稿日期] 2025-01-03 [修回日期] 2025-02-27
[基金项目] "十四五"国家重点研发计划揭榜挂帅项目"渭河平原白杨大径级工业资源材精准高效培育"(2021YFD2201203)
[作者简介] 火占华(1997—),男,宁夏固原人,硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:huozhanhua2022@163.com
[通信作者] 张春霞(1980—),女,河南焦作人,副研究员,博士,主要从事森林培育研究。E-mail:czhang2012@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

(NiR), glutamate synthase (GOGAT), and glutamine synthase (GS)) of 7 poplar clones under low nitrogen treatment were significantly reduced. Under low nitrogen stress, the decrease in NH_4^+-N content in the leaves and roots of 7 poplar clones seedlings was significantly higher than that of NO_3^--N, NO_2^--N, indicating that the 7 clones were more inclined towards ammonium loving tree species. The correlation analysis results showed that there was a significant correlation between the growth and physiological indicators of poplar clonal seedlings. Principal component analysis integrated all measurement indicators into three component factors and divided them into nitrogen accumulation factors and nitrogen metabolism factors. The results of the membership function analysis showed that the order of low nitrogen tolerance of the 7 tested poplar clones from strong to weak was 84K>Xibeiyang 3>Xibeiyang 1>Qinbaiyang 1>Qinbaiyang 5>Qinbaiyang 3>Maobaiyang 30. 【Conclusion】 Among the 7 clones of poplar seedlings, 84K, Xibeiyang 3, and Xibeiyang 1 have strong low nitrogen tolerance and can be used as the main promotion and artificial afforestation tree species in soil poor areas.

Key words: poplar clones; low nitrogen stress; comprehensive evaluation of low nitrogen resistance

氮(N)是植物体内氨基酸、核酸、蛋白质、叶绿素以及一些植物激素等重要有机分子的组成成分之一,对维持植物正常的生长发育和新陈代谢具有重要作用[1]。土壤中能够被植物直接吸收利用的无机氮包括铵根离子(NH_4^+)和硝酸根离子(NO_3^-),因此在农林业生产上,通过大量施用氮肥来稳定高产[2]。然而过量施用氮肥会导致土壤板结、理化性质变差、有机质含量降低,造成氮素利用效率降低,生产成本增加,加剧环境问题,因此选育耐低氮或氮素高效利用型树种,对于提高贫瘠土地的利用效率,实现减肥增效、降低农林业生产成本非常重要。已有研究表明,植物氮素利用效率受多种生长生理变化(如缺乏氮素直接影响植物叶绿素含量,阻碍植株生长)以及代谢途径(例如参与碳氮平衡调控,影响蛋白质合成和氨基酸代谢)共同影响[3],采用单一少数生理指标难以准确地反映不同植物对低氮的耐受能力,因此有必要采用多种指标进行综合评价。

杨树(*Populus* spp.)是我国主要造林树种之一,其繁殖容易、成活率高、生长迅速、适应性强、用途广泛,具有非常高的生态效益、经济效益和社会效益[4],在我国生态环境建设和经济社会发展过程中发挥着重要作用。近年来,我国杨树人工林面积不断扩大,根据第九次全国森林资源清查结果显示,我国杨树人工林面积是仅次于杉木人工林面积的第二大人工乔木造林树种,面积达到了757.07万hm^2。随着杨树人工林面积的不断扩大,西北地区广阔的土地营造了许多杨树人工林,但在土壤氮素贫瘠的西北地区,需氮量高的杨树生长严重受阻,出现生长缓慢的情况,因此选择耐低氮性强的白杨无性系,营造速生、丰产的白杨人工林,对提高该地区的经济效益和生态效益具有重要意义。故本试验通过对7个白杨无性系幼苗进行不同氮素供应处理,研究低氮对各白杨无性系生长生理指标的影响,并采用多个指标对白杨无性系的耐低氮性进行综合评价,从中筛选出耐低氮性较好的优良白杨无性系,以期为氮素贫瘠地区造林和培育白杨大径材提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的7个白杨无性系分别为84K杨(84K)、毛白杨30号(MB)、秦白杨1号(QB1)、秦白杨3号(QB3)、秦白杨5号(QB5)、西北杨1号(XB1)、西北杨3号(XB3),其插穗均来自陕西省周至县西北农林科技大学渭河试验站,由西北农林科技大学樊军锋老师课题组提供,各白杨无性系的具体遗传背景[5]见表1。

1.2 试验设计

于2022年3月初,在西北农林科技大学渭河试验站苗圃中采集7个供试白杨的1年生枝条,要求插穗枝条无病虫害、叶芽饱满、粗细均匀、长短一致。在陕西省杨陵区杨凌现代农业示范园区温室大棚中扦插繁育,将插穗栽植于直径26 cm、高度15 cm的花盆中进行砂培,每盆1株。待苗高至30 cm左右,选取健康状况良好的扦插苗对其进行氮素处理。使用Long-Ashton(LA)营养液[6]为基础养分,只改变LA营养液中氮素浓度,其他营养成分浓度不变,分别设置对照组(1 mmol/L NH_4NO_3, CK)和低氮(0.01 mmol/L NH_4NO_3(NH_4NO_3浓度为对照组的1.00%),LN)2个处理[7-8],每个处理设置6个重复。处理开始后每隔3 d每盆浇灌1次100 mL对

中国知网 https://www.cnki.net

应处理的LA营养液,为防止溶液渗漏,每个盆下均放有托盘,每次浇完营养液后将渗漏到托盘中的溶液重新倒回盆中,氮素处理60 d后测定生长及生理指标。

表1　供试白杨无性系的遗传背景

Table 1　Genetic background of the tested poplar clones

无性系 Clone	遗传背景 Genetic background
84K	银白杨×腺毛杨(韩国) *P. alba*×*P. glandulosa*(Korea)
毛白杨30号 Maobaiyang 30	毛白杨无性系 *P. tomentosa* NO. 30
秦白杨1号 Qinbaiyang 1	意大利银白杨×84K *P. alba*×84K
秦白杨3号 Qinbaiyang 3	意大利银白杨×84K *P. alba* ×84K
秦白杨5号 Qinbaiyang 5	意大利银白杨×84K *P. alba*×84K
西北杨1号 Xibeiyang 1	意大利银白杨×截叶毛白杨 *P. alba*×*P. tomentosa*
西北杨3号 Xibeiyang 3	意大利银白杨×截叶毛白杨 *P. alba*×*P. tomentosa*

1.3　测定指标及方法

1.3.1　生长指标　采用卷尺测定白杨无性系幼苗苗高,数显游标卡尺测定地径。苗高增长量=氮素处理后苗高−氮素处理前苗高,地径增长量=氮素处理后地径−氮素处理前地径。将采集植株幼苗在105 ℃烘箱中杀青0.5 h,然后于65 ℃下烘干至质量恒定,用电子天平称其质量,则为植株生物量。

1.3.2　生理指标　叶片叶绿素含量采用体积分数80%丙酮提取后,用分光光度计测定[9]。叶片净光合速率(P_n)采用Li-6400便携式光合仪(LI-COR Inc.,Lincoln,NE,USA)进行测定。叶片和根系铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)及亚硝态氮(NO_2^--N)含量参考HUANG等[7]的方法测定。将样品采用H_2SO_4-H_2O_2法[10]消煮后,使用连续流动分析仪(德国布朗-卢比公司生产)测定植株总氮含量。叶片和根系硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性参考文献[11-14]的方法测定。

1.4　数据统计与分析

1.4.1　耐低氮系数　耐低氮系数=低氮处理各指标测定值/对照组各指标测定值。

1.4.2　白杨无性系各指标隶属函数值($U(V_j)$)　其表达式为:

$$U(V_j)=(V_j-V_{min})/(V_{max}-V_{min}),\quad j=1,2,3,\cdots,n。\qquad(1)$$

式中:V_j表示第j个指标测定值,V_{min}表示第j个指标测定值的最小值,V_{max}表示第j个指标测定值的最大值。

1.4.3　白杨无性系各指标权重(W_j)　表达式为:

$$W_j=P_j/\sum_{j=1}^{n}P_j,\ j=1,2,3,\cdots,n。\qquad(2)$$

式中:W_j表示第j个指标的权重,P_j为各白杨无性系第j个指标贡献率。

1.4.4　白杨无性系耐低氮性综合评价　表达式为:

$$D=\sum_{j=1}^{n}[U(V_j)\times W_j],\ j=1,2,3,\cdots,n。\qquad(3)$$

式中:D为低氮胁迫下白杨无性系的耐低氮性综合评价值。

试验数据采用Excel整理,使用SPSS 24.0软件分析,对数据进行T-test检验、Pearson相关性和主成分分析[15]及隶属函数法分析,用单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯氏(Duncan's)新复极差法进行差异显著性分析,并使用Origin绘图。

2　结果与分析

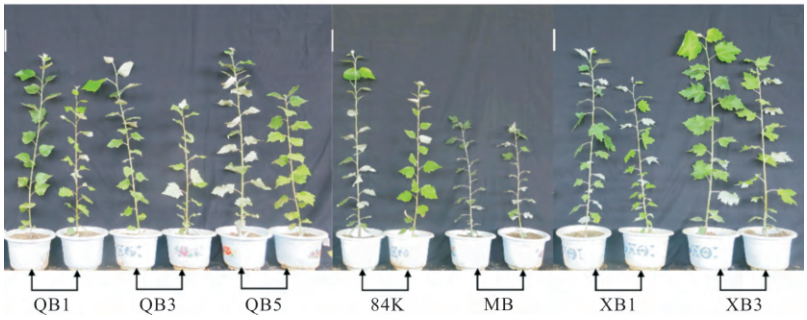
2.1　低氮处理对各白杨无性系幼苗生长的影响

图1和表2显示,与CK相比,低氮(LN)处理各白杨无性系幼苗的苗高增长量、地径增长量、植株生物量均呈下降趋势。其中低氮处理XB3的苗高增长量较CK降幅最少,为18.01%;其次是MB,苗高增长量下降了19.21%;QB1苗高增长量降幅最大,为27.34%。低氮处理QB1、QB3和QB5的地径增长量较CK显著下降了19.85%,18.7%,21.63%。与CK相比,低氮处理7个白杨无性系生物量下降了12.55%~28.83%,其中MB下降幅度最小,其次是XB1和XB3,QB5下降幅度最大。

2.2　低氮处理对各白杨无性系幼苗叶绿素含量和净光合速率的影响

由表3可知,与CK相比,低氮胁迫下所有白杨无性系的叶绿素含量和净光合速率均下降。其中低氮处理XB3叶绿素含量较CK降幅最大,为39.15%;QB1下降幅度最小,为36.32%。另外,低氮处理84K、XB3和XB1 3个无性系的净光合速率降幅较高,分别为30.18%,29.54%,27.28%;QB1号降幅最小,为20.14%。

中国知网　https://www.cnki.net



每组无性系左边为对照组(1 mmol/L NH_4NO_3,CK),右边为低氮处理(0.01 mmol/L NH_4NO_3,LN)。MB. 毛白杨30号;QB1. 秦白杨1号;QB3. 秦白杨3号;QB5. 秦白杨5号;XB1. 西北杨1号;XB3. 西北杨3号。下同。

On the left side of each clone group is the control group (1 mmol/L NH_4NO_3, CK), and on the right side is low nitrogen treatment (0.01 mmol/L NH_4NO_3, LN). MB. Maobaiyang 30; QB1. Qinbaiyang 1; QB3. Qinbaiyang 3; QB5. Qinbaiyang 5; XB1. Xibeiyang 1; XB3. Xibeiyang 3. The same below.

图1 低氮处理对7个白杨无性系幼苗生长表型的影响

Fig. 1 Effects of low nitrogen treatment on growth phenotype of 7 poplar clones

表2 低氮处理对7个白杨无性系幼苗生长指标的影响

Table 2 Effects of low nitrogen treatment on seedling growth indexes of 7 poplar clones

无性系 Clone	苗高增长量/cm Seeding height increment		地径增长量/mm Ground diameter increment		植株生物量/g Total plant biomass	
	CK	LN	CK	LN	CK	LN
84K	40.7±1.41 b	32.1±1.33 b	2.77±0.14 bc	2.39±0.12 b	43.82±1.21 b	33.24±0.70 a
MB	30.2±1.97 d	24.4±2.13 d	2.58±0.13 c	2.20±0.10 c	30.35±0.65 d	26.54±0.49 d
QB1	40.6±2.29 b	29.5±2.76 c	2.67±0.11 c	2.14±0.21 d	37.73±0.63 c	29.95±0.51 c
QB3	40.8±2.50 b	32.4±2.76 b	2.62±0.17 c	2.13±0.15 d	38.93±1.12 c	30.45±0.77 c
QB5	38.6±2.26 c	28.9±3.07 c	2.82±0.18 b	2.21±0.16 c	42.39±1.05 b	30.17±0.47 c
XB1	40.9±1.44 b	30.4±2.65 bc	3.06±0.10 a	2.55±0.15 a	43.17±0.92 b	31.81±0.25 b
XB3	42.2±2.42 a	34.6±2.15 a	3.05±0.16 a	2.52±0.12 a	45.51±1.52 a	33.95±1.85 a

注:CK. 对照组;LN. 低氮处理。数据用"平均值 ± 标准差"表示(n=6)。同列数据后标不同小写字母表示在$P<0.05$水平差异显著。下同。

Note: CK. The control group; LN. Low nitrogen treatment. Data are represented as "average±standard deviation" (n=6). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the $P<0.05$ level. The same below.

表3 低氮处理对7个白杨无性系幼苗净光合速率和叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of low nitrogen treatment on net photosynthetic rate and chlorophyll content of 7 poplar clones seedlings

无性系 Clone	净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Net photosynthetic rate		叶绿素含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll content	
	CK	LN	CK	LN
84K	19.58±0.20 c	13.67±0.18 abc	2.05±0.004 b	1.28±0.004 a
MB	16.94±0.13 e	12.50±0.02 c	1.86±0.054 e	1.16±0.003 d
QB1	18.42±0.30 d	14.71±1.36 a	2.01±0.008 bc	1.28±0.001 a
QB3	17.21±0.49 e	12.99±0.28 bc	1.92±0.002 d	1.22±0.023 c
QB5	18.86±0.10 d	14.26±1.18 ab	1.99±0.008 c	1.26±0.003 b
XB1	20.05±0.15 b	14.58±1.30 ab	2.04±0.029 bc	1.26±0.006 b
XB3	20.85±0.17 a	14.69±0.23 a	2.12±0.041 a	1.29±0.009 a

2.3 低氮处理对各白杨无性系幼苗铵态氮和硝态氮含量的影响

由表4可见,低氮处理白杨无性系叶片和根系的铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、亚硝态氮(NO_2^--N)含量较CK均呈现不同程度的下降,且各无性系之间差异显著($P<0.05$)。与CK相比,低氮胁迫下各无性系的叶片和根系中NH_4^+-N含量降幅分别为56.63%~58.62%,80.30%~83.87%,其中叶片中QB3的NH_4^+-N含量降幅最小,而根系中QB5的降幅最小。与CK相比,低氮处理后白杨无性系叶片和根系NO_3^--N含量变化幅度较小,其中XB3叶片NO_3^--N含量下降幅度最大,为28.91%;QB1叶片的下降幅度最小,为23.71%。低氮处理后白杨无性系幼苗根系NO_3^--N含量较CK下降了

中国知网 https://www.cnki.net

19.18%～29.67%,其中MB的降幅最小,XB1、XB3、QB3的降幅较大;低氮处理白杨无性系叶片和根系中NO_2^--N含量较CK均有所下降,且不同无性系之间差异显著。

表4　低氮处理对7个白杨无性系幼苗铵态氮和硝态氮含量的影响

Table 4　Effects of low nitrogen treatment on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content in 7 poplar clonesseedlings　　μmol/g

处理 Treatment	无性系 Clone	NH_4^+-N含量 NH_4^+-N content		NO_3^--N含量 NO_3^--N content		NO_2^--N含量 NO_2^--N content	
		叶片 Leaves	根系 Roots	叶片 Leaves	根系 Roots	叶片 Leaves	根系 Roots
CK	84K	0.087±0.003 bc	0.215±0.011 a	0.919±0.019 ab	0.087±0.003 bc	0.210±0.002 a	0.070±0.002 bc
	MB	0.074±0.004 d	0.178±0.002 c	0.810±0.016 e	0.073±0.002 d	0.188±0.002 d	0.063±0.002 d
	QB1	0.087±0.002 ab	0.211±0.005 a	0.928±0.017 a	0.089±0.001 ab	0.213±0.003 a	0.072±0.002 ab
	QB3	0.083±0.002 c	0.197±0.002 b	0.858±0.012 d	0.084±0.002 c	0.197±0.001 c	0.068±0.001 c
	QB5	0.087±0.002 ab	0.198±0.005 b	0.884±0.011 c	0.084±0.002 c	0.195±0.002 c	0.068±0.001 c
	XB1	0.087±0.001 b	0.214±0.010 a	0.900±0.006 bc	0.091±0.002 ab	0.202±0.002 b	0.072±0.001 b
	XB3	0.091±0.002 a	0.217±0.010 a	0.934±0.007 a	0.093±0.001 a	0.214±0.003 a	0.075±0.002 a
LN	84K	0.037±0.002 a	0.039±0.001 a	0.666±0.009 b	0.066±0.001 a	0.116±0.001 b	0.047±0.001 a
	MB	0.032±0.002 b	0.033±0.001 a	0.617±0.004 c	0.059±0.002 c	0.109±0.004 c	0.036±0.001 e
	QB1	0.037±0.002 a	0.039±0.001 a	0.708±0.018 a	0.066±0.002 a	0.122±0.003 a	0.043±0.002 bc
	QB3	0.036±0.002 a	0.038±0.001 a	0.631±0.010 c	0.060±0.002 c	0.113±0.002 bc	0.040±0.001 cd
	QB5	0.036±0.001 a	0.039±0.017 a	0.664±0.008 b	0.061±0.001 bc	0.125±0.003 a	0.038±0.001 d
	XB1	0.037±0.003 a	0.036±0.001 a	0.672±0.005 b	0.064±0.002 ab	0.124±0.002 a	0.043±0.001 bc
	XB3	0.038±0.002 a	0.035±0.002 a	0.664±0.012 b	0.066±0.002 a	0.122±0.002 a	0.045±0.002 ab

2.4　低氮处理对各白杨无性系幼苗氮代谢相关酶活性的影响

由表5可知,低氮处理各白杨无性系幼苗叶片硝酸还原酶(NR)活性相比CK均呈下降的趋势,其中QB5下降幅度最大,为37.71%;MB降幅最小,为34.51%。低氮处理MB和QB1根系NR活性与CK相比基本持平,差异不显著。在相同处理下,各无性系叶片NiR活性均大于根系,且低氮处理无性系幼苗叶片NiR活性较CK明显下降,其中QB5叶片NiR活性降幅最大,为30.43%,84K降幅最少,为21.60%。与CK相比,低氮处理84K、MB、QB1根系NiR活性明显降低;低氮处理XB3根系NiR活性显著高于MB,且根系中NiR活性依然维持较高的水平。

表5　低氮处理对7个白杨无性系幼苗NR和NiR活性的影响

Table 5　Effects of low nitrogen treatment on NR and NIR activities in 7 poplar clone seedlings　　μmol/(g·h)

处理 Treatment	无性系 Clone	NR活性 NR activities		NiR活性 NiR activities	
		叶片 Leaves	根系 Roots	叶片 Leaves	根系 Roots
CK	84K	76.78±1.16 b	28.57±0.38 a	0.162±0.007 abc	0.025±0.001 a
	MB	74.73±0.40 c	26.12±0.49 c	0.155±0.007 c	0.020±0.001 c
	QB1	78.18±0.68 a	27.04±0.63 bc	0.164±0.004 abc	0.022±0.001 b
	QB3	75.36±0.57 bc	27.70±0.84 ab	0.155±0.006 bc	0.022±0.001 b
	QB5	76.09±0.92 bc	28.17±0.34 ab	0.161±0.004 abc	0.021±0.001 bc
	XB1	76.58±0.91 b	28.27±0.54 ab	0.165±0.003 ab	0.021±0.001 bc
	XB3	78.87±0.63 a	28.54±1.16 a	0.169±0.001 a	0.025±0.001 a
LN	84K	49.57±1.02 a	28.05±0.24 a	0.127±0.003 ab	0.017±0.001 ab
	MB	48.94±0.91 ab	26.18±1.06 b	0.118±0.001 c	0.016±0.001 b
	QB1	48.83±1.16 ab	26.98±0.99 ab	0.124±0.004 b	0.017±0.001 ab
	QB3	48.35±0.57 ab	26.11±1.11 b	0.117±0.001 c	0.017±0.001 ab
	QB5	47.40±0.94 b	26.85±0.54 ab	0.112±0.001 d	0.016±0.001 ab
	XB1	49.35±0.53 a	27.35±0.66 ab	0.127±0.001 ab	0.017±0.001 ab
	XB3	48.78±0.20 ab	26.75±0.91 ab	0.129±0.001 a	0.017±0.001 a

表6显示,与CK相比,低氮处理白杨无性系叶片和根系中GOGAT活性均有不同程度的下降。7个无性系中,低氮处理84K叶片和根系中GOGAT活性最大,分别为366.73和478.64 μmol/(g·h);而MB叶片GOGAT活性最小,为340.88 μmol/(g·h),QB3根系GOGAT活性最小,为443.58 μmol/(g·h)。与CK

中国知网　https://www.cnki.net

相比,低氮处理白杨叶片和根系GS活性均下降。7个无性系中,低氮处理MB根系GS活性最低,84K最高;QB3叶片的GS活性最低,XB3最高。

表6 低氮处理对7个白杨无性系幼苗GOGAT和GS活性的影响

Table 6 Effects of low nitrogen treatment on GOGAT and GS activities in 7 poplar clone seedlings μmol/(g·h)

处理 Treatment	无性系 Clone	GOGAT活性 GOGAT activities		GS活性 GS activities	
		叶片 Leaves	根系 Roots	叶片 Leaves	根系 Roots
CK	84K	536.71±2.57 b	665.54±4.48 a	74.95±1.32 a	8.03±0.34 abc
	MB	495.70±4.59 c	609.26±5.11 e	70.37±0.97 c	7.87±0.15 abc
	QB1	559.17±3.93 a	653.02±3.11 b	73.18±0.21 ab	8.20±0.15 a
	QB3	538.72±5.02 b	623.10±4.40 d	71.97±1.05 bc	7.72±0.11 c
	QB5	537.44±6.25 b	622.32±4.01 d	72.44±1.54 b	7.82±0.16 bc
	XB1	543.65±5.26 b	647.09±2.91 bc	73.58±1.25 ab	8.09±0.11 ab
	XB3	561.57±3.20 a	644.83±3.46 c	72.88±1.04 ab	8.03±0.14 abc
LN	84K	366.73±4.53 a	478.64±3.89 a	69.33±0.90 ab	6.05±0.05 a
	MB	340.88±3.47 d	450.67±3.45 cd	67.92±1.33 b	5.70±0.06 a
	QB1	364.35±5.06 a	472.67±4.40 a	70.14±1.47 ab	5.87±0.58 a
	QB3	345.95±4.14 cd	443.58±3.55 d	65.63±2.33 c	5.79±0.11 a
	QB5	353.17±4.08 bc	459.93±4.37 b	68.34±0.61 b	5.86±0.07 a
	XB1	359.40±3.51 ab	457.96±5.00 bc	70.87±0.26 a	5.89±0.10 a
	XB3	364.07±5.17 a	464.61±6.01 b	71.43±0.88 a	5.74±0.14 a

2.5 低氮处理对各白杨无性系幼苗总氮含量的影响

由表7可以看出,氮素对供试白杨无性系的氮素积累有显著的调控作用。低氮处理各无性系植株总氮含量相较于CK均呈降低趋势。7个无性系中,CK的XB1和XB3总氮含量明显较高。低氮处理下,XB3总氮含量最高;MB总氮含量最低,较CK下降幅度最大,为35.91%。

表7 低氮处理对7个白杨无性系幼苗植株总氮含量的影响

Table 7 Effects of low nitrogen treatment on total nitrogen content of 7 poplar clone seedlings mg/g

无性系 Clone	CK	LN
84K	42.61±0.61 ab	29.39±0.39 a
MB	38.79±1.11 d	24.86±0.38 d
QB1	41.43±0.06 bc	26.74±0.16 c
QB3	40.06±1.28 cd	26.73±0.50 c
QB5	41.00±0.90 c	27.01±0.36 c
XB1	43.38±0.24 a	28.73±0.17 b
XB3	43.74±1.07 a	29.56±0.15 a

2.6 低氮处理下白杨无性系幼苗各指标间耐低氮系数的相关性

本试验对供试白杨无性系各指标耐低氮系数进行相关性分析,结果(图2)显示,除了根系NR活性(*X*13)与根系NiR活性(*X*15)呈显著负相关外,根系NO_3^--N含量(*X*6)与根系中NR活性(*X*13)、根系NO_3^--N含量(*X*6)与植株生物量(*X*11)、地径增长量(*X*10)与叶片NiR活性(*X*14)、根系NO_2^--N含量(*X*8)与植物总氮含量(*X*20)均呈显著正相关。有2对指标间呈现极显著负相关性,分别是叶片NO_3^--N含量(*X*5)与植物总氮含量(*X*20)、叶片GS活性(*X*18)与根系GS活性(*X*19)。

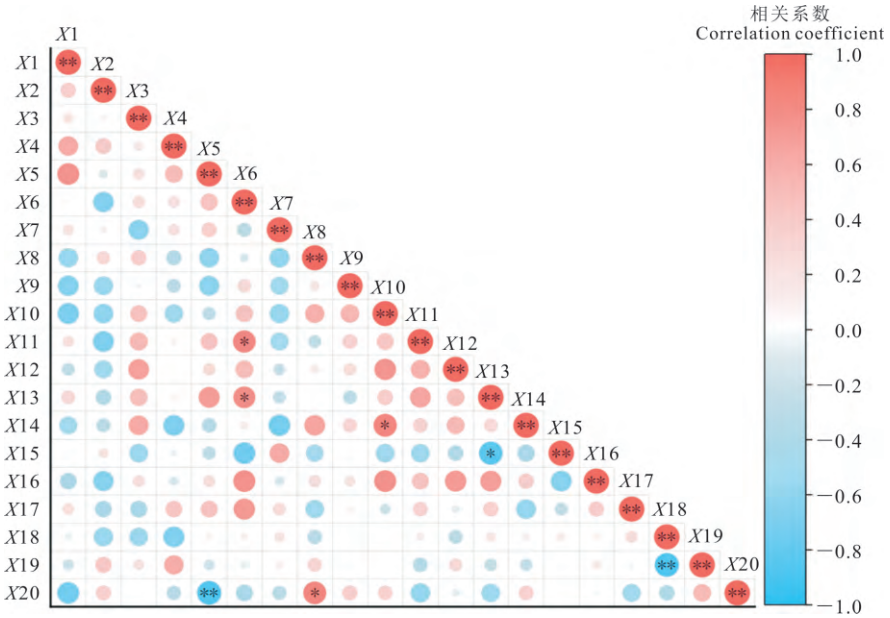
2.7 各白杨无性系幼苗耐低氮性综合评价

2.7.1 主成分分析 对各指标进行主成分分析,结果发现主成分1,2,3的方差贡献率分别为62.98%,13.63%,9.02%,累计方差贡献率达85.63%,表明这3个主成分可以代表所有指标的大部分信息(表8)。主成分1中,各无性系叶片GOGAT活性、根系NO_3^--N含量、叶绿素含量、根系NO_2^--N含量、叶片NH_4^+-N含量和植株总氮含量等指标的载荷值较大,主要反映低氮处理植株体内氮含量的变化,植株体内的氮积累量越大,越有利于植物生长发育,可作为氮积累因子。主成分2中,各无性系叶片中NR和NiR活性载荷较高,表现出氮代谢反应中硝态氮的还原效率,促进硝态氮向铵态氮的转变,进一步提高了植株的氮代谢效率。主成分3中,根系GS活性的载荷值较高,表明其与植株根系NH_4^+-N的同化效率有关,主成分2和3可共同作为氮代谢因子。综上可知,氮积累因子和氮代谢因子可作为供试白杨无性系耐低氮性评价的综合指标。

2.7.2 耐低氮性综合排名 基于白杨无性系各指标的主成分分析得出的3个主成分因子,通过计算可得到7个白杨无性系耐低氮性的综合评价值(*D*)。结果(表9)表明,84K和XB3的*D*值均较大,

中国知网 https://www.cnki.net

分别为0.959和0.855；MB的D值最小，为0.220。



$X1$. 净光合速率；$X2$. 叶绿素含量；$X3$. 叶片 NH_4^+-N 含量；$X4$. 根系 NH_4^+-N 含量；$X5$. 叶片 NO_3^--N 含量；$X6$. 根系 NO_3^--N 含量；$X7$. 叶片 NO_2^--N 含量；$X8$. 根系 NO_2^--N 含量；$X9$. 苗高增长量；$X10$. 地径增长量；$X11$. 植株生物量；$X12$. 叶片 NR 活性；$X13$. 根系 NR 活性；$X14$. 叶片 NiR 活性；$X15$. 根系 NiR 活性；$X16$. 叶片 GOGAT 活性；$X17$. 根系 GOGAT 活性；$X18$. 叶片 GS 活性；$X19$. 根系 GS 活性；$X20$. 植株总氮含量。红色表示正相关，蓝色表示负相关。*表示显著相关（$P<0.05$），**表示极显著相关（$P<0.01$）。

$X1$. Net photosynthetic rate; $X2$. Chlorophyll content; $X3$. NH_4^+-N content in leaves; $X4$. NH_4^+-N content in roots; $X5$. NO_3^--N content in leaves; $X6$. NO_3^--N content in roots; $X7$. NO_2^--N content in leaves; $X8$. NO_2^--N content in roots; $X9$. Seedling height increment; $X10$. Ground diameter increment; $X11$. Total plant biomass; $X12$. NR activity in leaves; $X13$. NR activity in roots; $X14$. NiR activity in roots; $X15$. NiR activity in leaves; $X16$. GOGAT activity in roots; $X17$. GOGAT activity in leaves; $X18$. GS activity in leaves; $X19$. GS activity in roots; $X20$. Total nitrogen content of plants. Red represents positive correlation, and blue represents negative correlation. * indicates a significant correlation ($P<0.05$), and ** indicates a highly significant correlation ($P<0.01$).

图2　低氮胁迫下7个白杨无性系各指标耐低氮系数相关性分析

Fig. 2　Correlation analysis of low nitrogen tolerance coefficients of various indicators in 7 poplar clones under low nitrogen stress

表8　7个白杨无性系幼苗各指标的载荷及主成分特征值和方差贡献率

Table 8　Load, principal component characteristic values, and contribution rates of 7 poplar clones seedlings

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.81	−0.29	−0.37	根系NR活性 NR in roots	0.78	0.05	0.51
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.95	−0.27	−0.10	叶片NiR活性 NiR in leaves	0.76	0.61	0.00
叶片 NH_4^+-N 含量 NH_4^+-N in leaves	0.93	−0.25	−0.11	根系NiR活性 NiR in roots	0.88	0.18	−0.15
根系 NH_4^+-N 含量 NH_4^+-N in roots	0.43	−0.81	0.26	叶片GOGAT活性 GOGAT in leaves	0.98	−0.06	0.11
叶片 NO_3^--N 含量 NO_3^--N in leaves	0.77	−0.42	0.06	根系GOGAT活性 GOGAT in roots	0.78	−0.09	0.44
根系 NO_3^--N 含量 NO_3^--N in roots	0.95	0.02	0.01	叶片GS活性 GS in leaves	0.76	0.28	−0.23
叶片 NO_2^--N 含量 NO_2^--N in leaves	0.68	−0.41	−0.41	根系GS活性 GS in roots	0.63	−0.20	0.67
根系 NO_2^--N 含量 NO_2^--N in roots	0.94	0.16	0.14	植株总氮含量 Total nitrogen of plants content	0.90	0.19	−0.12
苗高增长量 Seeding height increment	0.72	−0.02	−0.30	特征值 Eigenvalue	12.60	2.73	1.80
地径增长量 Ground diameter increment	0.64	0.57	−0.29	方差贡献率/% Variance contribution rate	62.98	13.63	9.02
植株生物量 Total plant biomass	0.88	0.08	−0.17	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	62.98	76.61	85.63
叶片NR活性 NR in leaves	0.40	0.76	0.42				

中国知网　https://www.cnki.net

表9 各白杨无性系耐低氮性的隶属函数值、综合评价值(D)及排名

Table 9 Comprehensive evaluation (D) value and ranking of membership function values for low nitrogen tolerance of various poplar clones

无性系 Clone	$U(V_1)$	$U(V_2)$	$U(V_3)$	D	耐低氮性排序 Low nitrogen tolerance ranking
84K	1.000	0.743	1.000	0.959	1
MB	0	1.000	0.574	0.220	7
QB1	0.845	0.274	0.585	0.727	4
QB3	0.335	0.466	0.388	0.361	6
QB5	0.500	0	0.361	0.406	5
XB1	0.868	0.858	0.338	0.811	3
XB3	0.976	0.861	0	0.855	2

3 讨 论

氮素对林木影响最直观的表现反映在生长速率方面,在植物苗期快速生长阶段氮素供应不足会显著抑制植株株高和地径的生长,植株生物量也随之减少[16-17]。本研究中,与CK相比,低氮处理7个供试白杨无性系幼苗苗高增长量、地径增长量和生物量均呈下降趋势,这是由于低氮影响了幼苗叶绿素合成,致使植株干物质积累缓慢,从而表现为株高降低,同时氮营养元素缺乏会导致生物量相对积累较少,但在低氮处理下,XB3的苗高增长量、地径增长量及生物量与CK相比降幅较小,说明其生长发育受到低氮胁迫的影响较小,相比其他品种更耐低氮胁迫,这与郭晓宵等[18]对小叶杨(*Populus simonii*)的研究结果一致:表明低氮胁迫减缓了杨树无性系幼苗的生长。

氮素参与了植物光合器官的建成,影响着植物对光能的吸收,对光合作用的正常运转起着重要作用[19]。在正常条件下,植物从土壤中汲取氮源,诱导叶片合成更多的叶绿素,增强光合作用;而在低氮环境下,植物的光合作用一般会受到抑制,植物的生物量积累受到了严重的影响[20]。周志强等[21]对黄檗(*Phellodendron amurense*)幼苗的研究发现,供氮量较低时幼苗叶片出现了光抑制现象,而适当增加氮肥会显著提高叶片光合效率。本研究中,对照组(CK)白杨无性系幼苗的净光合速率和叶绿素含量明显高于低氮处理,这可能是因为低氮处理下杨树出现氮素亏缺,其根部向叶片输送的养分减少,进而使叶片叶绿素含量减少,净光合速率也因此受到抑制,说明氮素供应不足能明显抑制杨树幼苗的光合作用。7个无性系中,低氮处理QB1叶片的叶绿素含量和净光合速率与CK相比降幅最小,推测在低氮处理下QB1通过保持较高的净光合速率从而积累较多养分输送给根系用于吸收养分,从而正向反馈于叶片,使叶片维持较高的叶绿素含量和净光合速率来抵御低氮胁迫产生的伤害,使幼苗更好地适应低氮环境。

土壤中的氮源主要以NH_4^+-N和NO_3^--N的形式存在,植物通过根系以铵盐和硝酸盐的形式吸收、运输和同化氮素[22]。因此,测定不同含量氮素供应条件下NH_4^+-N和NO_3^--N含量可以更加直观地反映不同无性系幼苗的氮素利用及分配情况。本研究中,白杨无性系幼苗叶片NO_3^--N含量均高于根系,这可能是植物吸收的硝酸盐被同化利用后,大部分硝酸盐被储存在植物液泡中[23],以供植物对其进行再分配。本研究中,与CK相比,低氮处理7个无性系幼苗植株的总氮含量大幅减少,与MENG等[24]研究的欧美杨(*Populus euramericana*)和小叶杨的结果一致。本研究中,与CK相比,低氮处理7个白杨无性系幼苗的叶片和根系NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N含量都有所下降,但叶片和根系中NH_4^+-N含量下降幅度较大,表明7个白杨无性系幼苗为喜铵树种。

植物氮代谢过程中,GS/GOGAT途径是NH_4^+-N同化的关键枢纽,且植物根系吸收的NH_4^+-N可直接通过GS/GOGAT途径同化后被植物利用,而NO_3^--N不能直接用于合成氨基酸,需要通过NR还原为NO_2^--N,再由NiR降解为NH_4^+-N,并经过同化后被植物用于生长发育[25-27]。因此,NR被称为植物NO_3^--N同化的第一限速酶,而NiR则是保证植物体内NH_4^+-N供应的控制酶。当氮素供应不足时,植物体的氮代谢能力会减弱,直观表现为NR、NiR、GS、GOGAT活性降低。刘鹏等[28]发现,低氮敏感型高粱叶片的NR、GS和GOGAT活性均显著降低;张婷婷等[29]发现,低氮胁迫下马铃薯叶片的NR和NiR活性均显著降低,根系的GS活性显著提高。本研究中,与CK相比,低氮处理7个白杨无性系幼苗

中国知网 https://www.cnki.net

叶片的NR、NiR、GS、GOGAT活性均呈降低趋势，与前人研究结果一致。7个无性系中，低氮处理84K和XB3叶片、根系中的氮代谢酶活性较高，说明其相比其他无性系更耐低氮。

杨树作为速生丰产树种，限制其生长的原因除了品种本身的生长特性差异外，其对生长环境中氮素的要求也较高，在土壤贫瘠的地区建立杨树人工林，氮素必然会成为主要的限制因素[30-31]。本研究测定了低氮条件下白杨无性系幼苗生长和生理指标，并对各指标的耐低氮系数进行了相关性分析，结果表明，只有7对指标之间存在显著或极显著相关性，而且无法准确判断各白杨无性系的耐低氮性强弱。因此，本研究采用主成分分析法和隶属函数法将所有指标降维成3个主成分，以此来综合评价各白杨无性系幼苗的耐低氮性，结果显示，耐低氮性由强到弱的顺序是84K＞西北杨3号＞西北杨1号＞秦白杨1号＞秦白杨5号＞秦白杨3号＞毛白杨30号。

4　结　论

与CK相比，低氮抑制了白杨无性系幼苗的生长、叶绿素含量、净光合速率以及氮积累和多种酶活性。低氮胁迫下7个白杨无性系幼苗叶片和根系NH_4^+-N含量下降幅度明显高于NO_3^--N、NO_2^--N，表明7个无性系为喜铵树种。7个白杨无性系幼苗中，耐低氮性较强的无性系是84K、西北杨3号、西北杨1号，可作为土壤贫瘠地区主要推广和人工造林的树种。

[参考文献]

[1] XIAO C B, SUN D D, LIU B B, et al. Nitrate transporter *NRT1. 1* and anion channel SLAH3 form a functional unit to regulate nitrate-dependent alleviation of ammonium toxicity[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(4): 942-957.

[2] XIAO J, WANG Q, GE X D, et al. Defining the ecological efficiency of nitrogen use in the context of nitrogen cycling[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105493.

[3] 李小冬，蔡璐，张瑜，等. 不同性别杨树应答低氮胁迫的生理学研究[J]. 森林工程，2016，32(6)：24-29，33.
LI X D, CAI L, ZHANG Y, et al. Physiological study on sexual differences in response to nitrogen stress in poplar trees[J]. Forest Engineering, 2016, 32(6): 24-29, 33.

[4] 王明援，刘宁，李波，等. 不同光强对6个欧美杨无性系苗期生长及光合特性的影响[J]. 林业科学研究，2020，33(1)：123-130.
WANG M Y, LIU N, LI B, et al. Effects of light intensity on the growth and photosynthetic characteristics of six *Populus* × *Euramericana* clones at seedling stage[J]. Forest Research, 2020, 33(1): 123-130.

[5] 程玮哲，樊军锋，高建社，等. 基于RSAP标记的10个白杨派无性系指纹图谱构建及遗传分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(9)：85-91.
CHENG W Z, FAN J F, GAO J S, et al. Fingerprinting and genetic analysis of ten poplar clones based on RSAP markers[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(9): 85-91.

[6] 罗杰. 杨树对氮素吸收同化的分子生理机制研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2016.
LUO J. Study on molecular physiological mechanism of nitrogen absorption and assimilation in poplar[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.

[7] HUANG G, SUN Y F, ZHANG X, et al. Adaptation to low nitrogen and salt stresses in the desert poplar by effective regulation of nitrogen assimilation and ion balance[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 193: 14-24.

[8] ZHANG C, LI Y, YANG T L, et al. Overexpression of *PsAMT1. 2* in poplar enhances nitrogen utilization and resistance to drought stress[J]. Tree Physiology, 2023, 43(10): 1796-1810.

[9] 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.
LI H S. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[10] 李朝英，郑路，卢立华，等. 测定植物全氮的H_2SO_4-H_2O_2消煮法改进[J]. 中国农学通报，2014，30(6)：159-162.
LI Z Y, ZHENG L, LU L H, et al. Improvement in the H_2SO_4-H_2O_2 digestion method for determining plant total nitrogen[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(6): 159-162.

[11] LUO J K, SUN S B, JIA L J, et al. The mechanism of nitrate accumulation in pakchoi [*Brassica campestris* l. ssp. chinensis (L.)][J]. Plant and Soil, 2006, 282(1): 291-300.

[12] LUO J, LI H, LIU T X, et al. Nitrogen metabolism of two contrasting poplar species during acclimation to limiting nitrogen availability[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(14): 4207-4224

[13] WANG L, ZHOU Q X, DING L L, et al. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/2/3): 818-825.

[14] SINGH R P, SRIVASTAVA H S. Increase in glutamate synthase (NADH) activity in maize seedlings in response to nitrate and ammonium nitrogen [J]. Physiologia Plantarum, 1986, 66(3): 413-416.

[15] 付江鹏，柳发财，闫宝琴，等. 不同高粱品种适应性综合评价与筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(5)：35-46.
FU J P, LIU F C, YAN B Q, et al. Comprehensive evaluation and screening of adaptability of different *Sorghum* varieties[J].

中国知网　https://www.cnki.net

Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(5):35-46.

[16] 张吉立. 不同硝酸铵处理对草地早熟禾叶绿素含量及生长的影响[J]. 草原与草坪,2018,38(5):83-86,92.
ZHANG J L. Effect of NH_4NO_3 treatment on growth and chlorophyll content of *Poapratensis*[J]. Grassland and Turf,2018,38(5):83-86,92.

[17] YAO X,LAN Y,LIAO L,et al. Effects of nitrogen supply rate on photosynthesis,nitrogen uptake and growth of seedlings in a *Eucalyptus/Dalbergia odorifera* intercropping system[J]. Plant Biology,2022,24(1):192-204.

[18] 郭晓霄,王小华. 低氮胁迫下外源色氨酸对小叶杨生长和氮代谢酶活性的影响[J]. 贵州林业科技,2024,52(3):20-25.
GUO X X,WANG X H. Effects of tryptophan on growth and nitrogen metabolism physiology of *Populus simonii* under low nitrogen stress[J]. Guizhou Forestry Science and Technology,2024,52(3):20-25.

[19] LI H,LI M C,LUO J,et al. N-fertilization has different effects on the growth,carbon and nitrogen physiology,and wood properties of slow- and fast-growing *Populus* species[J]. Journal of Experimental Botany,2012,63(17):6173-6185.

[20] 王勇,张曦,沈应柏,等. 不同施氮量对6个黑杨新无性系光合特性的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(3):168-173.
WANG Y,ZHANG X,SHEN Y B,et al. Effects of different nitrogen levels on the photosynthesis characteristics of six new clones of *Populus deltoids*[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentails Sinica,2010,19(3):168-173.

[21] 周志强,彭英丽,孙铭隆,等. 不同氮素水平对濒危植物黄檗幼苗光合荧光特性的影响[J]. 北京林业大学学报,2015,37(12):17-23.
ZHOU Z Q,PENG Y L,SUN M L,et al. Effects of nitrogen levels on photosynthetic and fluorescence characteristics in seedlings of endangered plant *Phellodendron amurense*[J]. Journal of Beijing Forestry University,2015,37(12)17-23.

[22] XU G H,FAN X R,MILLER A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. Annual Review Plant Biology,2012,63:153-182.

[23] 刘文平,梁烜赫,张春宵,等. 植物氮素利用途径中硝酸盐转运基因的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2022(7):238-246.
LIU W P,LIANG X H,ZHANG C X,et al. Research progress of gene encoding nitrate transports involved in nitrogen use pathway in plants[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(7):238-246.

[24] MENG S,WANG S,QUAN J E,et al. Distinct carbon and nitrogen metabolism of two contrasting poplar species in response to different N supply levels[J]. International Journal of Molecular Sciences,2018,19(8):2302.

[25] CAO X C,ZHONG C,ZHU C Q,et al. Ammonium uptake and metabolism alleviate PEG-induced water stress in rice seedlings[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2018,132:128-137.

[26] 张宇,赵宝平,柳妍娣,等. 氮肥对不同类型裸燕麦品种碳氮代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(2):40-48.
ZHANG Y,ZHANG B P,LIU Y D,et al. Effects of nitrogen fertilizer on carbon and nitrogen metabolism of different naked oat cultivars[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(2):40-48.

[27] 孙世君,付崇毅,崔世茂,等. 根区温度对黄瓜嫁接苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(8):71-80.
SUN S J,FU C Y,CUI S M,et al. Effects of root-zone temperature on carbon and nitrogen metabolism and activities of related enzymes of cucumber seedlings[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(8): 71-80.

[28] 刘鹏,武爱莲,王劲松,等. 不同基因型高粱的氮效率及对低氮胁迫的生理响应[J]. 中国农业科学,2018,51(16):3074-3083.
LIU P,WU A L,WANG J S,et al. Nitrogen use efficiency and physiological responses of different *Sorghum* genotypes influenced by nitrogen deficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(16):3074-3083.

[29] 张婷婷,孟丽丽,刘晓蕊,等. 马铃薯氮代谢对低氮胁迫的响应及转录组分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):15-26.
ZHANG T T,MENG L L,LIU X R,et al. Response of nitrogen metabolism of potato to low nitrogen stress and transcriptome analysis[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2022,50(8):15-26.

[30] 闫香如,李品,吴贤杰,等. 氮添加对杨树地上和地下生物量增加的直接和间接效应[J]. 生态学杂志,2025,44(1):56-64..
YAN X R,LI P,WU X J,et al. Direct and indirect effects of nitrogen addition on the increase of above- and below-ground biomass of poplar[J]. Chinese Journal of Ecology,2025,44(1):56-64.

[31] 刘春鹏,姚昱浓,滑磊,等. 3个杨树品种移栽后生长特性比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(2):38-44.
LIU C P,YAO Y N,HUA L,et al. Growth characteristics comparison of three poplar varieties after transplant[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2021,49(2):38-44.

(责任编辑:李小平)

中国知网 https://www.cnki.net