

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.003

论文标题： 不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗生长和生理特性的影响

作　　者： 朱 怡，林楚虹，杨 璐，等

收稿日期： 2025-10-02

引文格式： 朱怡,林楚虹,杨璐,等.不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗生长和生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):19-35.

Zhu Y, Lin C H, Yang L, et al. Effects of different nitrogen application rates on growth and physiological characteristics of transplanted seedlings of *Phoebe neurantha* ‘Fengweinan’[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):19-35.

相关论文推荐

Recommended articles

10种楠属植物叶形态特征及其分类学意义

Leaf morphological characteristics and taxonomic significance of ten species of *Phoebe*

复合肥和生物菌肥配施对闽楠苗生长及非结构性碳水化合物的影响

Effects of combined application of compound fertilizer and biofertilizer on the growth of *Phoebe bournei* seedlings and non-structural carbohydrates

水分胁迫对闽楠幼苗生理及光合特性的影响

Effects of water stress on the physiological and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

施氮对闽楠挥发性次生代谢物组分和含量的影响

Effects of nitrogen application on components and contents of volatile secondary metabolites in *Phoebe bournei*

3种育苗因素对闽楠容器苗生长和根系发育的影响

Effects of three factors on seedling growth and root development of *Phoebe bournei* container

指数施磷模式对闽楠幼苗生长及光合生理特性的影响

Effects of exponential phosphorus application on the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.003
http: //qks.csuft.edu.cn

不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗生长和生理特性的影响

朱　怡，林楚虹，杨　璐，陈小虎，费永俊，胡　蝶

（长江大学 a. 园艺园林学院；b. 楠木国家林业和草原局重点实验室；c. 楠木种质资源评价及创新中心；d. 香辛园艺植物种质创新与利用湖北省重点实验室，湖北 荆州 434025）

摘　要：【目的】探讨不同施氮量对‘凤尾楠’*Phoebe neurantha* cv.‘Fengweinan’移栽苗生长的影响，为‘凤尾楠’移栽苗外源氮的高效利用提供理论依据。【方法】采用盆栽试验，比较 1 年生裸根移栽苗（L）和带土移栽苗（T）在 5 个施氮梯度（CK，0 mg/ 株；ZN1，100 mg/ 株；ZN2，200 mg/ 株；ZN3，300 mg/ 株；ZN4，400 mg/ 株）下的表现，以确定‘凤尾楠’移栽苗的最佳施氮量。【结果】裸根移栽苗在 ZN2 处理下总根长达到峰值（较 CK 提升了 81%），而带土移栽苗在 ZN3 处理下多项生长指标最优，其株高、地径、总根长和叶长分别较 CK 提高了 29%、56%、102% 和 103%。2 种移栽苗的光合色素含量均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，裸根移栽苗在 ZN2 处理下的光合色素含量最高，幼苗的基本光合参数达到最大，其净光合速率和蒸腾速率较 CK 显著提升了 170% 和 166%；带土移栽苗在 ZN3 处理下的光合色素含量最高，但光合速率和蒸腾速率峰值出现在 ZN4 处理。适量施氮能提升可溶性糖、可溶性淀粉及有机氮化物含量，增强氮代谢酶活性。过量施氮（ZN4 处理）导致根系可溶性蛋白含量较裸根移栽苗 ZN3 处理增加了 36%，但可溶性糖含量、可溶性淀粉含量及氮代谢酶活性下降，其中带土移栽苗在 ZN4 处理下根系可溶性淀粉含量、地下部分全氮含量及叶片硝酸还原酶活性较带土移栽苗在 ZN3 处理下降低了 28%、7% 和 10%。【结论】适量施氮可增强光合作用和氮代谢，促进移栽苗的生长，裸根移栽苗和带土移栽苗的最佳施氮量分别为 200、300 mg/ 株。

关键词：施氮量；‘凤尾楠’移栽苗；生长发育；生理特性

中图分类号：S723.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0019-17

Effects of different nitrogen application rates on growth and physiological characteristics of transplanted seedlings of *Phoebe neurantha* ‘Fengweinan’

Zhu Yi, Lin Chuhong, Yang Lu, Chen Xiaohu, Fei Yongjun, Hu Die

(a. College of Horticulture and Landscape Architecture; b. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on *Phoebe* Nees; c. Center for Nanmu Germplasm Resource Evaluation and Innovation; d. Hubei Provincial Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Aromatic Horticultural Plants, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China)

Abstract:【Objective】To explore the effects of different nitrogen application rates on the growth of transplanted seedlings of *Phoebe neurantha* (Hemsl.) Gamble cv. ‘Fengweinan’ Y.J.Fei, and to provide a theoretical basis for the efficient utilization of exogenous nitrogen in transplanted seedlings of this cultivar.【Method】A pot experiment was conducted to compare the performance of one-year-old bare-root transplanted seedlings (L) and soil-root-ball transplanted seedlings (T) under five nitrogen application gradients: 0 (CK), 100 (ZN1), 200 (ZN2), 300 (ZN3), and 400 mg/plant (ZN4). The aim was to determine the optimal nitrogen application rate for transplanted ‘Fengweinan’ seedlings.【Result】For bare-root transplanted seedlings (L), the total root length reaches its peak at ZN2, which is 81% higher than that of the control (CK). For soil-root-ball transplanted seedlings (T), multiple growth indicators are optimal at ZN3: plant height, ground diameter, total root length, and leaf length are significantly increased by 29%, 56%, 102%, and 103% compared with CK, respectively. The photosynthetic pigment content of both types of transplanted seedlings first increases and then decreases with the increase of nitrogen application rate. For bare-root transplanted seedlings, the photosynthetic pigment content is the highest at ZN2, and

收稿日期（Received）：2025-10-02　　**修订日期**（Revised）：2025-11-14

基金项目：中央财政林业科技推广示范资金项目（鄂〔2025〕TG 30）；湖北省教育厅科技攻关项目（Q20191309）。

第一作者：朱怡（yizhu0106@163.com），硕士研究生。**通信作者：**胡蝶（hudie.16@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。

引文格式：朱怡 , 林楚虹 , 杨璐 , 等 . 不同施氮量对 ‘ 凤尾楠 ’ 移栽苗生长和生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9): 19-35.

Zhu Y, Lin C H, Yang L, et al. Effects of different nitrogen application rates on growth and physiological characteristics of transplanted seedlings of *Phoebe neurantha* ‘Fengweinan’[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):19-35.

the basic photosynthetic parameters of the seedlings reach their maximum values, with net photosynthetic rate and transpiration rate significantly increased by 170% and 166% compared with CK, respectively. For soil-root-ball transplanted seedlings, the photosynthetic pigment content is the highest at ZN3, but the peaks of photosynthetic rate and transpiration rate appear at ZN4. Appropriate nitrogen application can increase the contents of soluble sugar, soluble starch, and organic nitrogen compounds, and enhance the activities of nitrogen metabolism enzymes. Excessive nitrogen application (under ZN4 treatment) leads to a 36% increase in root soluble protein content compared with ZN3, but decreases in soluble sugar, soluble starch contents, and nitrogen metabolism enzyme activities. Specifically, the soluble starch content in roots, total nitrogen in underground parts, and leaf nitrate reductase activity in the ZN4 treatment group are 28%, 7%, and 10% lower than those in the ZN3 treatment group, respectively.【Conclusion】Moderate nitrogen application promotes seedling growth by enhancing photosynthetic performance and carbon-nitrogen metabolism. The optimal nitrogen application rates for bare-root seedlings and soil-balled scedings are 200 mg per plant and 300 mg per plant, respectively.

Keywords: nitrogen application rate; ‘Fengweinan’ transplanted seedlings; growth and development; physiological characteristics

楠木是我国特有的珍稀物种，在用材和观赏方面价值显著，其种质资源保护及高效培育技术研究备受关注。‘凤尾楠’*Phoebe neurantha* cv. ‘Fengweinan’ 是长江大学园林植物资源利用与种质创新中心从野生白楠 *Phoebe neurantha* 实生苗中人工选育出的首个国审楠木新品种 [1-2]，因其叶形独特，观赏价值较高，在园林绿化中应用前景广阔。但该品种与其他楠属植物类似，存在苗期生长缓慢、对环境敏感等特性，制约了其规模化育苗 [3-5]。研究表明，2 年生闽楠 *Phoebe bournei*、浙江楠 *Phoebe chekiangensis*、桢楠 *Phoebe zhennan* 和紫楠 *Phoebe sheareri* 幼苗均呈现“慢—快—慢”的苗期生长规律，符合苗木的“S”形生长曲线 [6]。这与林昌礼等 [7] 对闽楠家系苗期生长节律的研究结果一致。因此，深入研究‘凤尾楠’苗期的营养需求特性，对制定科学育苗方案具有重要意义。

植物生长发育中需要多种营养元素 [8]，其中氮、磷、钾是需求量最大且生理功能关键的三大营养元素 [9]。氮素作为不可或缺的生命元素，是蛋白质、核酸、叶绿素、维生素及多种酶类的重要组成部分，直接参与细胞分裂、伸长及能量代谢等过程 [10]。氮供应水平直接影响植物的生长状态、光合能力及抗逆性能。植株氮素匮乏时常表现为生长迟缓、株型矮小、叶片均匀黄化等症状 [11]，长期缺氮还会降低植株抗逆能力，增大遭受病虫害侵染的风险 [12-13]。因此，在植物关键生育期增施氮肥是农林业生产中常规技术措施 [14-15]。研究表明，合理施氮能促进植株生长 [16]，加速有机质分解，改善土壤养分状况并优化微生物群落结构 [17]，从而提升土壤肥力，改善土壤理化性质 [18]。但氮肥施用量需严格控制，过量易导致土壤酸化、板结，降低肥料利用率，并可能通过淋溶或径流等途径进入水体，引起富营养化等环境问题 [19]。由于自然土壤中的氮素含量有限，往往难以持续满足植物旺盛生长的养分需求，故通过人工科学补充外源氮素，对提高苗木质量、维持土壤健康及实现苗木可持续培育具有重要意义。

我国楠木种质资源丰富，其繁育与改良研究呈现多元化发展趋势。在选育良种的同时还需加强遗传改良相关研究 [20]。为实现苗木精细化培育，需建立符合生长节律的栽培技术体系。目前，关于氮添加对楠属幼苗生长与生理特性影响的研究已有报道，但针对‘凤尾楠’的需肥特性尚缺乏系统研究。基于此，以‘凤尾楠’移栽苗为研究对象，设置不同氮处理，系统测定幼苗形态与生理指标，旨在阐明外源氮与幼苗生长的关系，以期为该品种科学施肥与壮苗培育提供理论依据，促进楠木资源的高效培育与利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以含氮量为 35% 的硝酸铵（NH_4NO_3）作为氮源。供试苗木为种植于长江大学农业科技产业园楠木种质资源基地（112°05′28.99″E，30°37′23.14″N）生长一致且健康的 1 年生‘凤尾楠’幼苗（株高 6.5 cm，地径 1.11 mm）。采用裸根移栽法和带土移栽法（土球直径 5 cm 左右）对‘凤尾楠’进行移栽，用田园土（深度 5 ～ 8 cm，pH 值 7.91，全氮含量 0.331 g/kg，全磷含量 1.927 g/kg）补充基质至花盆上口径 2 cm 处，控制适宜温度与土壤含水量，移栽后置于 60% 遮阳网下缓苗 3 个月，随后进行施氮处理。试验期间所有盆随机摆放，每周调整位置以避免位置效应并实施常规养护管理。

1.2 试验设计

本试验采用双因素设计：因素一为移栽方式，包括裸根（L）和带土（T）移栽；因素二为施氮量，设 1 个对照组（CK，浇施等量清水）和 4 个施

氮处理（ZN1，100 mg/ 株；ZN2，200 mg/ 株；ZN3，300 mg/ 株；ZN4，400 mg/ 株）。共设 10 个处理组。每个处理 10 株幼苗，重复 3 次，共计 300 株。于末次施氮后第 30 天开始进行指标测定。

施氮处理前测定初始植株氮含量：裸根移栽苗为 0.134 mg/ 株，带土移栽苗为 0.215 mg/ 株。施氮时将肥料溶解于 20 mL 纯水中，使用注射器缓慢注入盆中，每 10 d 施 1 次，共施 10 次。花盆底部设置托盘以减少养分流失。用 Timmer[21] 经典公式计算每次的指数施氮量，具体施氮方案如表 1 所示。

$$N = N_S(e^{rT} - 1)；\quad (1)$$

$$N_t = N_S(e^{rT} - 1) - \sum_{t=1}^{t-1} N_{t-1}。\quad (2)$$

式中：N 为全部施用的氮素总量；N_S 为试验前‘凤尾楠’幼苗植株初始含氮量；t 为当前指数施肥次数；T 为总施肥次数；r 为氮素添加速率；N_t 为速率 r 下第 t 次的氮素施用量；N_{t-1} 为第（t−1）次的总施氮量。

表 1　‘凤尾楠’幼苗的施氮方案

Table 1　Nitrogen application scheme of ‘Fengweinan’ seedlings under different nitrogen application rates

移栽方式 Transplantation	处理 Treatment	施氮量 Nitrogen application rate /(mg·株 $^{-1}$·次 $^{-1}$)										总施氮量 Total rate /(mg·株 $^{-1}$)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
裸根 Bare-root	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ZN1	0.18	0.34	0.62	1.15	2.13	3.94	7.28	13.46	24.89	46.01	100
	ZN2	0.21	0.42	0.83	1.64	3.25	6.44	12.75	25.26	50.05	99.15	200
	ZN3	0.23	0.47	0.97	2.01	4.14	5.50	17.62	36.35	74.98	157.73	300
	ZN4	0.24	0.51	1.09	2.31	4.91	10.42	22.11	46.97	99.72	211.72	400
带土 Balled	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ZN1	0.13	0.24	0.47	0.91	1.77	3.44	6.66	12.90	25.02	48.46	100
	ZN2	0.14	0.31	0.62	2.72	1.26	5.58	11.58	24.06	49.96	103.77	200
	ZN3	0.16	0.34	0.73	1.58	3.41	7.37	15.95	48.07	61.03	161.36	300
	ZN4	0.16	0.37	0.81	3.72	2.13	8.98	19.98	44.48	99.00	220.37	400

1.3　试验方法

1.3.1　植株生长指标的测定

随机选取 9 盆‘凤尾楠’幼苗，用卷尺测量株高（盆土接合处至茎顶端最高点），用游标卡尺测定地径及新梢长度。取自上而下第 3 片功能叶，洗净擦干后，通过 EPSON scan v3.771 扫描仪获取叶片长、宽、周长及面积等形态指标。挖取完整植株根系，冲洗后擦干并做好标记，用万分之一天平分别称取地上、地下部分鲜质量；随后扫描根系，利用 WinRHIZO Pro 2007a 软件分析总根长、表面积、平均直径及根系体积等形态指标。将植株地上、地下部分于 105 ℃条件下杀青 30 min，随后 65 ℃烘干至恒质量，称干质量；粉碎并过 0.05 mm 孔径筛后保存备用。

1.3.2　植株生理指标的测定

试验前随机采集‘凤尾楠’幼苗成熟叶片，混匀后密封保存，用于各指标测定。各指标均进行 3 次及以上独立重复测定。

光合色素含量（叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素）参照杨腾 [22] 的方法进行测定。选择晴朗天气上午使用 Li-6400 便携式光合仪（美国 Li-Cor）测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率；采用蒽酮比色法 [23] 测定可溶性糖及可溶性淀粉含量；采用考马斯亮蓝法 [23] 测定可溶性蛋白含量；采用茚三酮显色法 [24] 测定脯氨酸含量；采用茚三酮比色法 [25] 测定游离氨基酸含量；采用硫酸 - 过氧化氢消煮法 [26] 测定全氮含量；采用水杨酸法 [24] 测定硝态氮含量；采用靛酚蓝比色法 [24] 测定铵态氮含量。采用离体法 [24] 测定硝酸还原酶活性；采用分光光度法 [24,27] 测定谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性。

1.4　数据处理

使用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理和统计分析，采用 Duncan’s 进行差异显著性检验（$P < 0.05$）；使用 Origin 2022 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗植株生长的影响

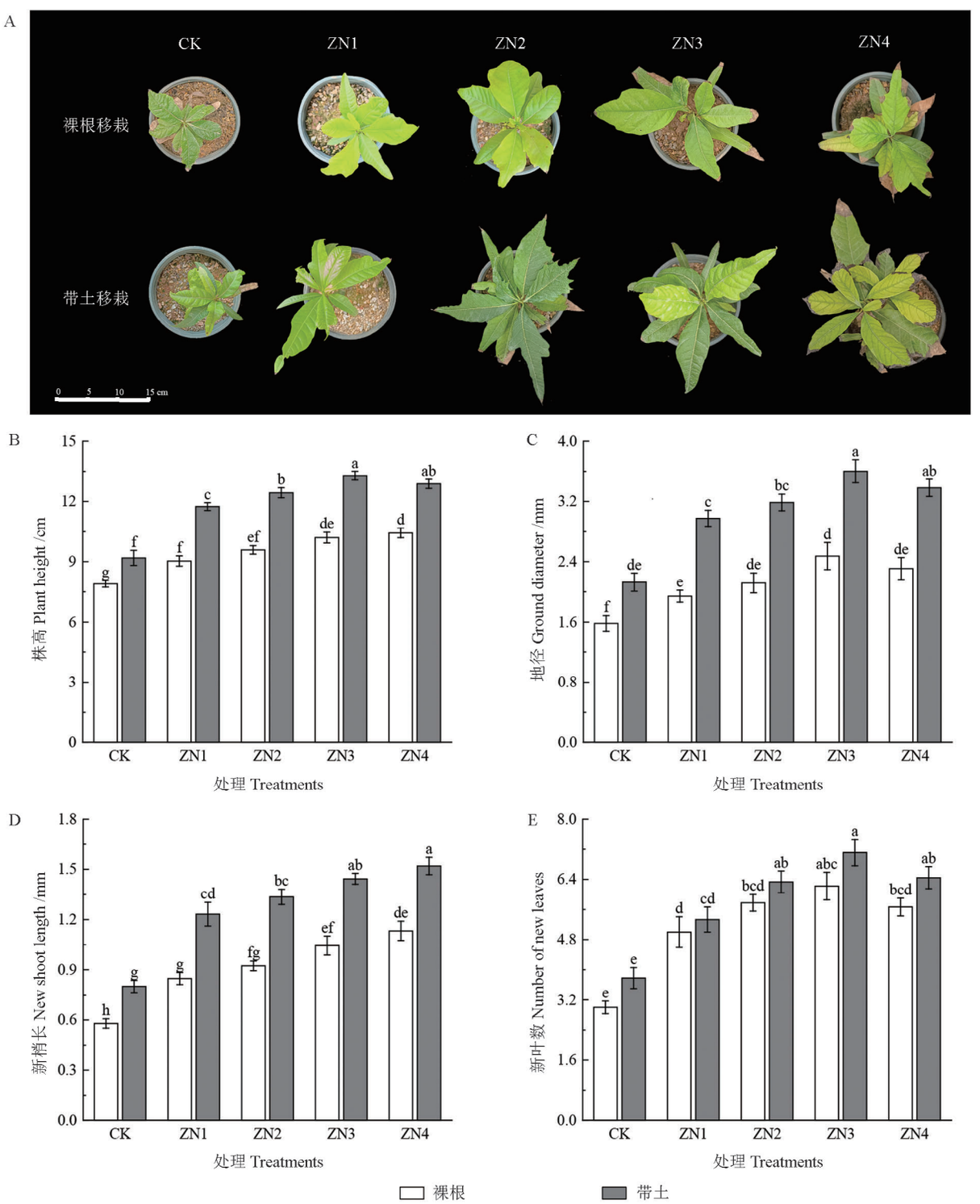
2.1.1　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗表型特征的影响

不同施氮处理下‘凤尾楠’移栽苗的表型差

异如图 1A 所示。带土移栽苗在同等处理下生长状态均优于裸根移栽苗。随着施氮量的增加，植株生长更为健壮：在 ZN1 和 ZN2 处理下新生叶片呈黄绿色；在 ZN3 和 ZN4 处理下叶片转为深绿色，但在 ZN4 高氮处理下出现叶尖焦枯现象，整体长势不如 ZN3 处理。

从生长指标测定结果（图 1B　E）来看，带土移栽苗的株高、地径、新梢长度和新叶数较裸根移栽苗显著提高了 16%、34%、39% 和 30%（$P < 0.05$）。同等施氮条件下，带土移栽苗各指标始终显著高于裸根移栽苗。

相同移栽方式下，适量施氮可促进幼苗地上部分生长。裸根移栽条件下，株高、新梢长随施氮量的增加呈递增趋势，均以 ZN4 处理达到最大



不同小写字母代表不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different lowercase letters indicate significant among treatments at $P < 0.05$. The same below.

图 1　不同施氮量下‘凤尾楠’幼苗的植株表型

Fig. 1　Plant phenotypes of ‘Fengweinan’ seedlings under different nitrogen application rates

值，但差异不显著；地径、新叶数则呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理下达到最佳，较 ZN1 处理提升了 28%、24%。带土移栽条件下，新梢长随施氮量的增加呈递增趋势，ZN4 处理达到最大值；株高、地径、新叶数则呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理下达到最佳生长状态。

2.1.2　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗根系指标的影响

不同施氮处理下‘凤尾楠’移栽苗根系特征如图 2A 所示。对照组（CK）根系细软，须根及新生白根均较少。施氮处理后根系发育显著改善，其中 ZN4 处理下根系生长状况最佳。

‘凤尾楠’移栽苗根系指标测定结果如图 2 所示。由图 2 可知，带土移栽苗根系指标虽高于裸根移栽苗，但差异不显著。同等施氮条件下，带土移栽苗各指标普遍优于裸根移栽苗，其中带土移栽苗的总根长在 ZN3 处理下达到最佳，较裸根移栽苗处理显著提高了 33%（$P < 0.05$）；带土

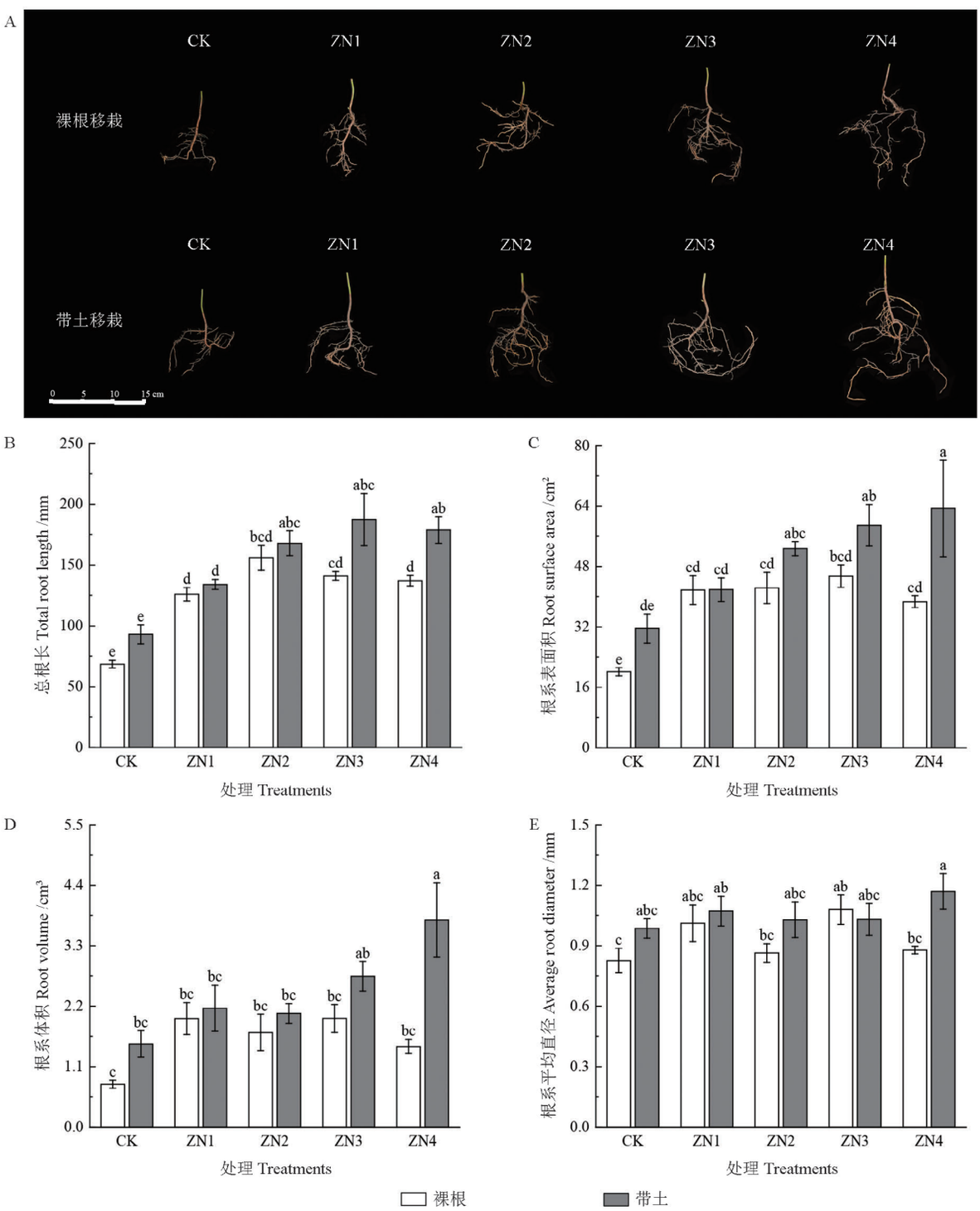


图 2　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗的根系特征

Fig. 2　Root characteristics of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

移栽苗的根系表面积、根体积和平均直径以 ZN4 处理最佳，较裸根移栽苗分别提高了 64%、157% 和 33%。

同等移栽方式下，施加适量外源氮有效促进了‘凤尾楠’移栽苗根系的生长发育。裸根移栽条件下，总根长、根系表面积随施氮量的增加呈先升后降的趋势，分别在 ZN2 和 ZN3 处理下达到最大值。带土移栽条件下，总根长随施氮量的增加呈先升后降的趋势，ZN3 处理达到最大值，较 CK 显著提高了 102%；根系表面积则呈递增趋势，且 ZN4 处理的根系表面积、根系体积和平均直径均达最高值。

2.1.3　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗叶片指标的影响

不同处理下‘凤尾楠’移栽苗叶片形态指标的测定结果如图 3 所示。由图 3 可知，带土移栽苗 CK 处理的叶长、叶面积较裸根移栽苗显著提升了 40% 和 95%（$P < 0.05$）。带土移栽苗在 ZN1 处理下的叶长、叶宽和叶面积较裸根移栽苗分别显著提高 17%、46% 和 72%。

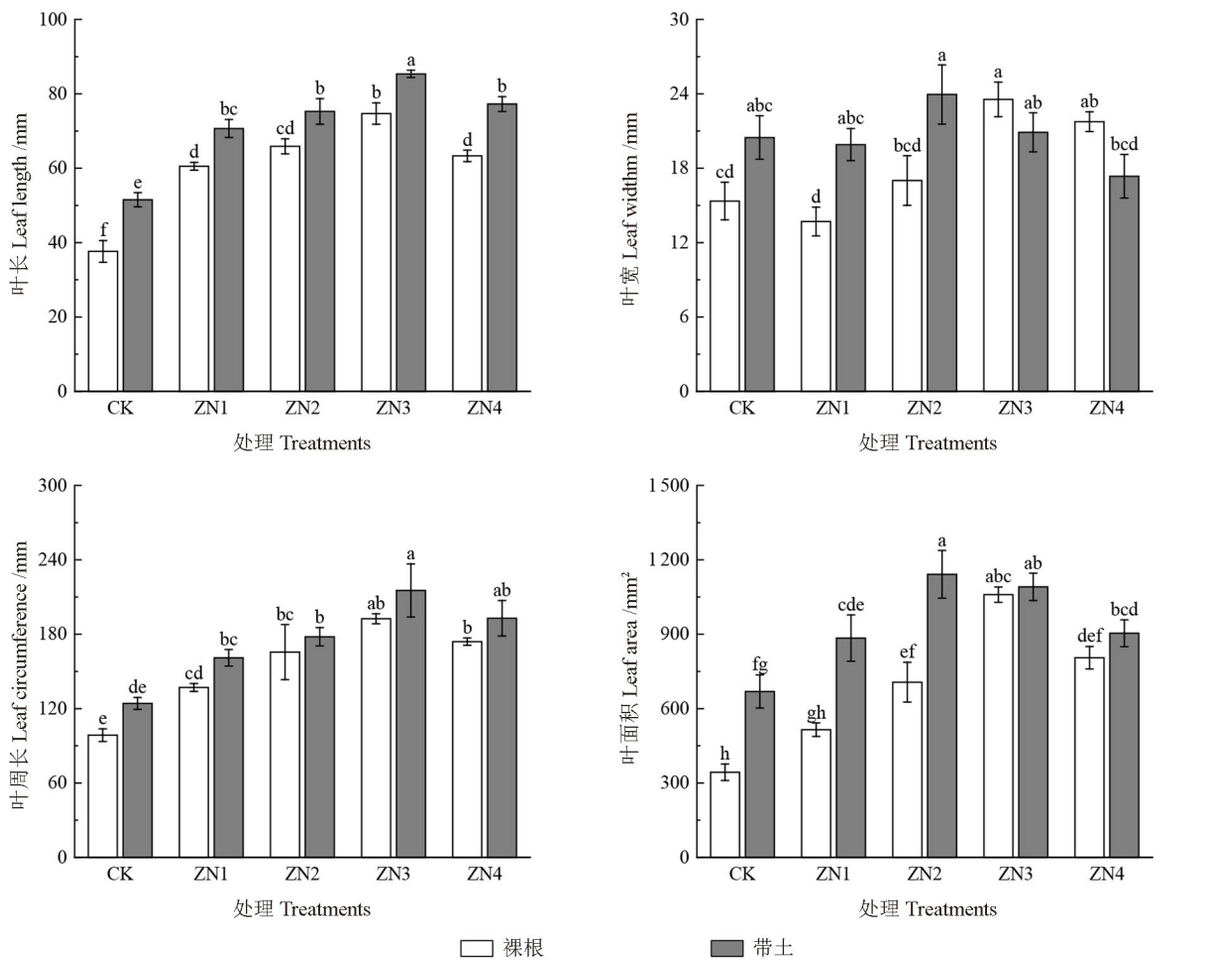


图 3　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗的叶片指标

Fig. 3　Leaves indexes of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

同等移栽方式下，外源氮肥对‘凤尾楠’移栽苗叶片生长具有显著促进作用。裸根移栽条件下，叶长、叶周长、叶面积均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，ZN3 处理的叶长、叶宽和叶面积均达最大值，较 ZN2 处理显著提高了 13%、38% 和 50%。带土移栽条件下，叶长、叶周长、叶面积均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，叶长、叶周长在 ZN3 处理下达到最大值，叶面积在 ZN2 处理下达最大值。

2.1.4　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗生物量的影响

不同处理下‘凤尾楠’移栽苗各部分生物量的测定结果如图 4 所示。带土移栽苗（CK）各部分生物量及叶片干鲜质量均高于裸根移栽苗，其中地上部分干质量较裸根移栽苗显著高了 77%（$P < 0.05$）。

外源施氮显著促进了 2 类移栽苗各部位生物量积累，且相同处理下带土移栽苗的生物量始终高于裸根移栽苗。带土移栽苗在 ZN4 处理下的地上部

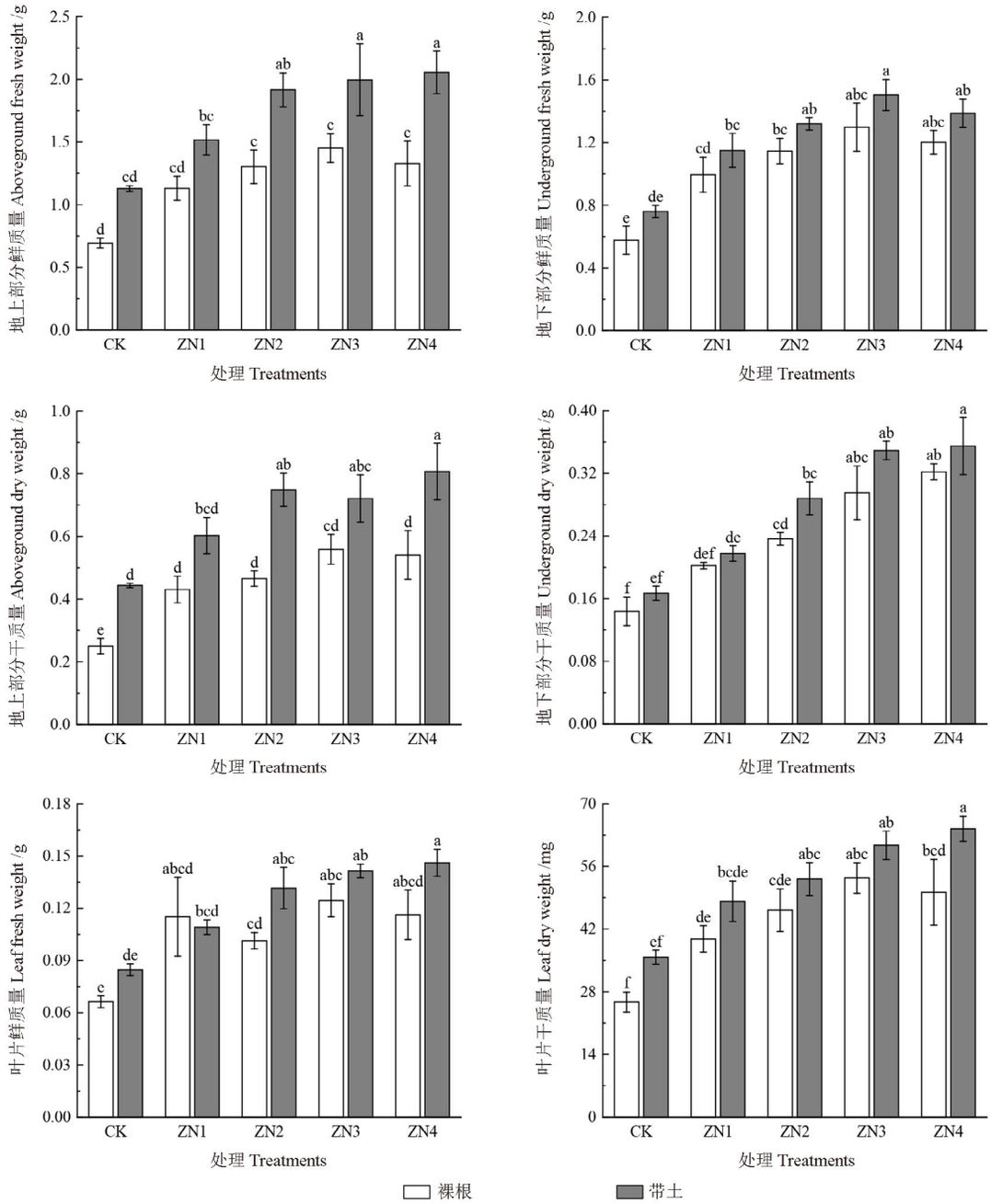


图 4　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗的生物量

Fig. 4　Biomass of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

分鲜质量、干质量和叶片鲜质量较裸根移栽苗显著提高了 55%、49% 和 26%。

同等移栽方式下，施加外源氮肥显著促进了‘凤尾楠’移栽苗各部位生物量的积累。裸根移栽条件下，地上部分鲜质量、地下部分鲜质量、地上部分干质量、叶片干质量均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，均在 ZN3 处理达最大值，地上部分鲜质量、地上部分干质量及叶片干质量较 CK 显著提高了 109%、124% 和 106%，地下部分鲜质量较 ZN1 处理显著提高了 31%；地下部分干质量则呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值，且 ZN4 处理地上部分及叶片生物量较 ZN3 处理略有下降，但差异不显著。带土移栽条件下，地上部分鲜质量、地下部分干质量、叶片鲜质量和干质量均呈持续递增趋势，且地下部分干质量和叶片干质量较 CK 显著提高了 113% 和 75%；地下部分鲜质量呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理达最大值，较 ZN1 处理显著提高了 31%。

2.2　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗光合能力的影响

2.2.1　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗光合色素的影响

对不同处理下幼苗的光合色素含量进行测定，

结果如图 5 所示。带土移栽苗（CK 处理）的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素较裸根移栽苗显著提高了 31%、29% 和 32%（$P < 0.05$）。同等施氮量下，ZN1 处理中，带土移栽苗的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量较裸根移栽苗显著提高了 15%、14%、15% 和 16%；ZN3 处理中，带土移栽苗的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量较裸根移栽苗显著提高了 34%、40% 和 46%。

同等移栽方式下，外源氮肥对‘凤尾楠’移栽苗的光合色素含量有显著影响，2 种移栽苗的光合色素变化趋势存在差异。裸根移栽条件下，叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，且均在 ZN2 处理下达到峰值，较 ZN1 处理显著提高了 26%、34%、30% 和 15%；ZN3 处理各光合色素含量开始下降，与 ZN4 处理无显著差异。带土移栽条件下，叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，且均在 ZN3 处理下达到峰值，较 ZN2 处理显著提高了 18%、19%、19% 和 18%。ZN4 处理各光合色素含量显著下降，较 ZN3 处理降低了 11%、14%、13% 和 11%。

2.2.2　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗基本光合参数的影响

对不同处理下‘凤尾楠’移栽苗的基本光合参数进行测定，结果如图 6 所示。对照处理下，带土移栽苗的光合作用强于裸根移栽苗。其中，带土移栽苗的蒸腾速率较裸根移栽苗显著提高了 34%（$P < 0.05$）。同等施氮量下，2 种移栽苗的基本光合参数存在一定的差异。ZN4 处理中，带土移栽苗的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度较裸根移栽苗显著提高了 169%、78% 和 42%。

同等移栽方式下，不同施氮量均显著促进了‘凤尾楠’移栽苗的光合作用，但 2 种移栽苗的光合参数对施氮量的响应趋势存在差异。裸根移栽处理下，净光合速率、气孔导度随施氮量增加呈先升后降的趋势，净光合速率在 ZN2 处理下达到峰值，较 ZN1 处理显著提高了 39%，气孔导度在 ZN3 处理下达最大值；ZN1 处理的蒸腾速率较 CK 显著提高了 131%，胞间 CO_2 浓度较 CK 显著降低了 16%。带土移栽处理下，净光合速率、蒸腾速率随施氮量的增加呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值，较 ZN2 处理显著提高了

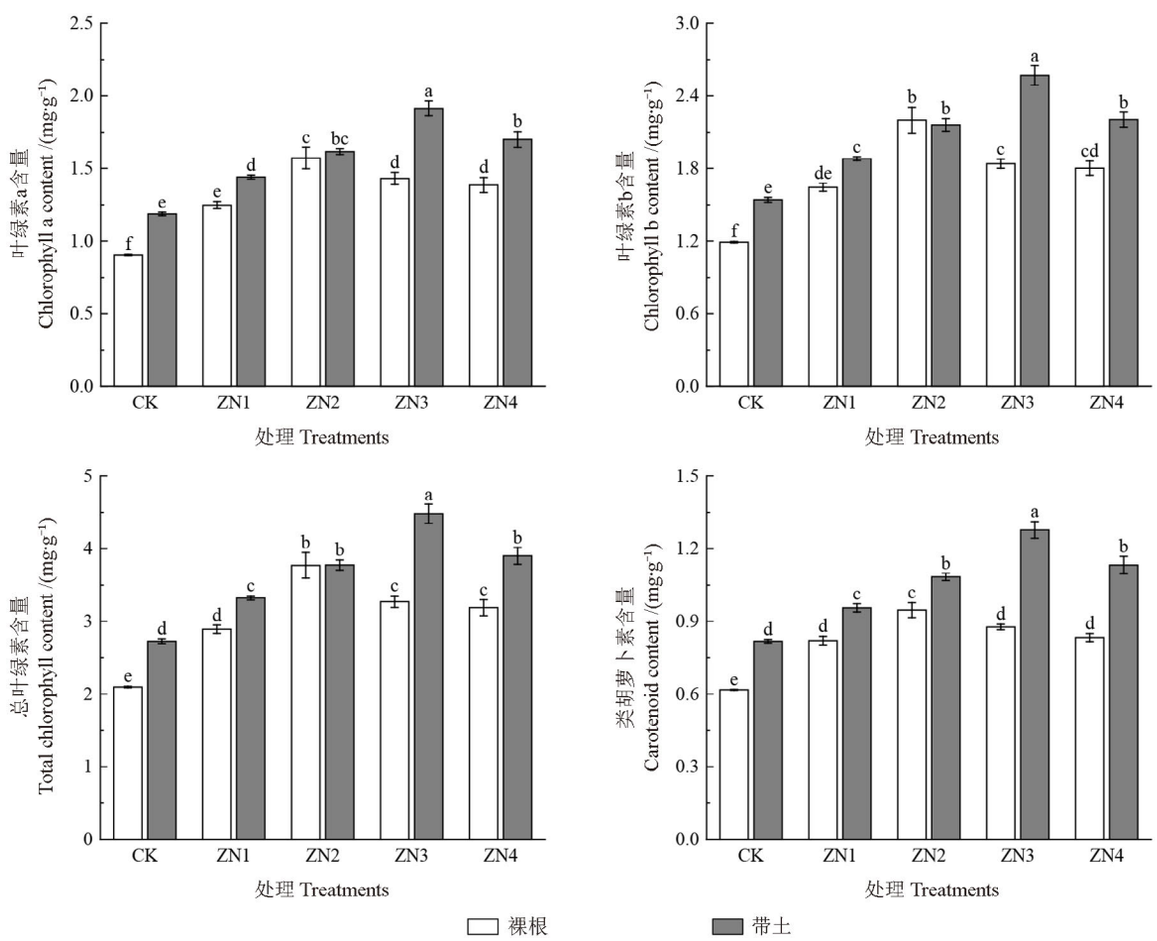


图 5　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗的光合色素含量

Fig. 5　Photosynthetic pigment concentrations of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

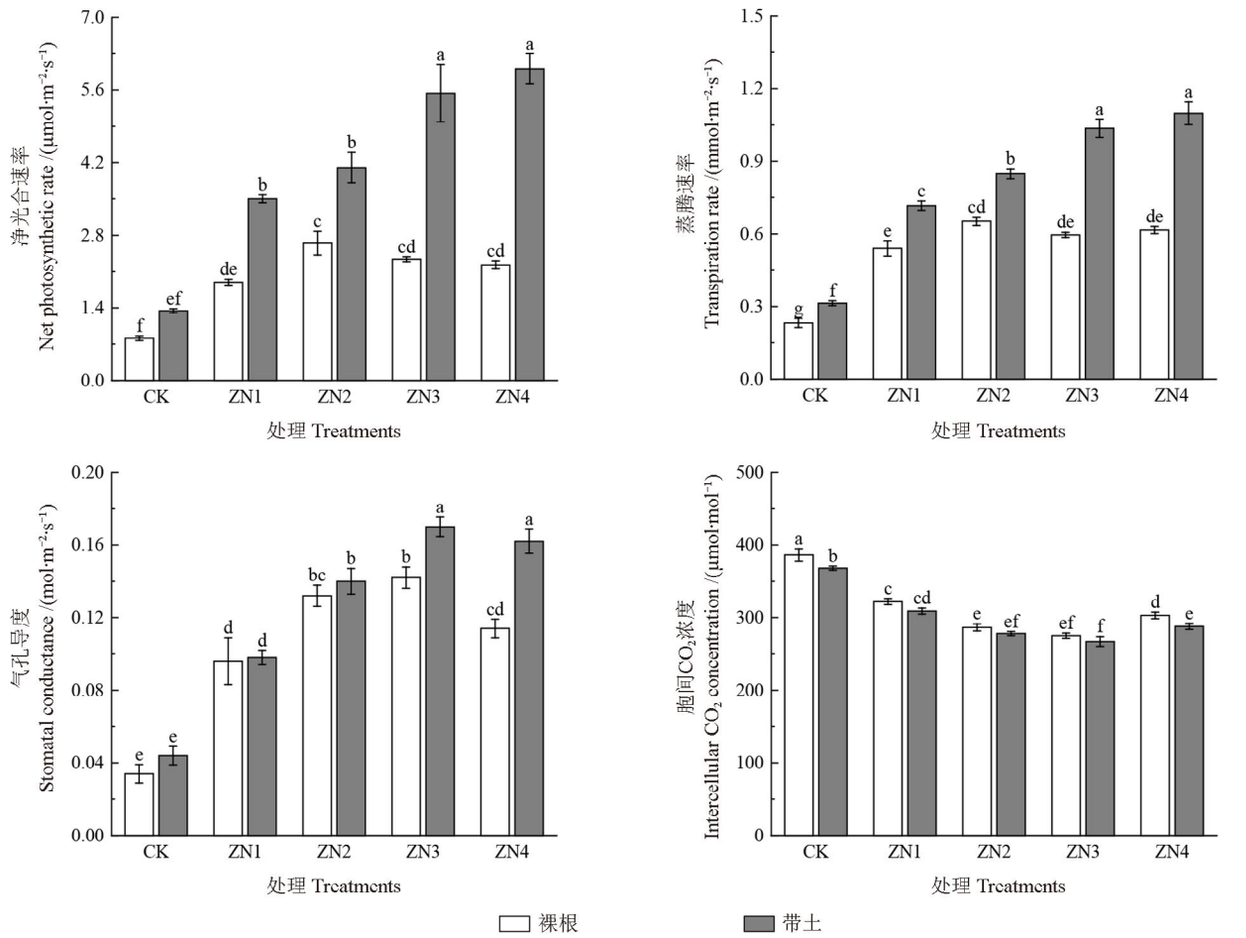


图 6　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗的基本光合参数

Fig. 6　Gas exchange indexes of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

46%、29%；气孔导度随施氮量的增加呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理下达到峰值，较 ZN2 处理显著提高了 21%；ZN1 处理的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度较 CK 处理分别显著提高了 160%、131% 和 123%，胞间 CO_2 浓度显著降低了 16%。

2.3　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗非结构性碳水化合物含量的影响

对不同处理下的‘凤尾楠’幼苗叶片和根系中可溶性糖和可溶性淀粉含量进行测定，结果如图 7 所示。在叶片中，对照处理下，带土移栽苗两者含量均高于裸根移栽苗，其中，可溶性淀粉含量较裸根移栽苗显著提高了 17%（$P < 0.05$）。同等施氮量条件下，ZN2 处理中，带土移栽苗可溶性糖含量较裸根移栽苗显著降低了 13%，可溶性淀粉含量较裸根移栽苗显著提高了 12%；ZN3 处理中，带土移栽苗可溶性糖含量较裸根移栽苗显著提高了 44%。裸根移栽处理下，可溶性淀粉含量随施氮量的增加呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值。带土移栽处理下，可溶性糖含量呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理下达到最大值，较 ZN2 处理显著提高了 27%；可溶性淀粉含量呈现递增趋势，ZN4 处理达到最大值。

在根系中，对照处理下，2 种移栽苗可溶性糖含量差异不显著，但带土移栽苗可溶性淀粉含量较裸根移栽苗显著提高了 32%（$P < 0.05$）。同等施氮量条件下，ZN4 处理可溶性糖和可溶性淀粉含量差异最显著，带土移栽苗较裸根移栽苗分别提高了 129% 和 75%。裸根移栽处理下，可溶性淀粉含量随施氮量的增加呈先升后降的趋势，在 ZN2 处理下达到最大值，较 ZN1 处理显著提高了 16%；ZN3 处理的可溶性糖含量达到最大值，较 ZN2 处理提高了 19%。带土移栽处理下，可溶性糖含量随施氮量的增加呈现持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值，较 ZN3 处理显著提高了 15%；可溶性淀粉含量呈先升后降趋势，在 ZN3 处理下达到最大值，较 ZN2 处理显著提高了 18%。

2.4　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗有机氮化物含量的影响

对不同处理下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系

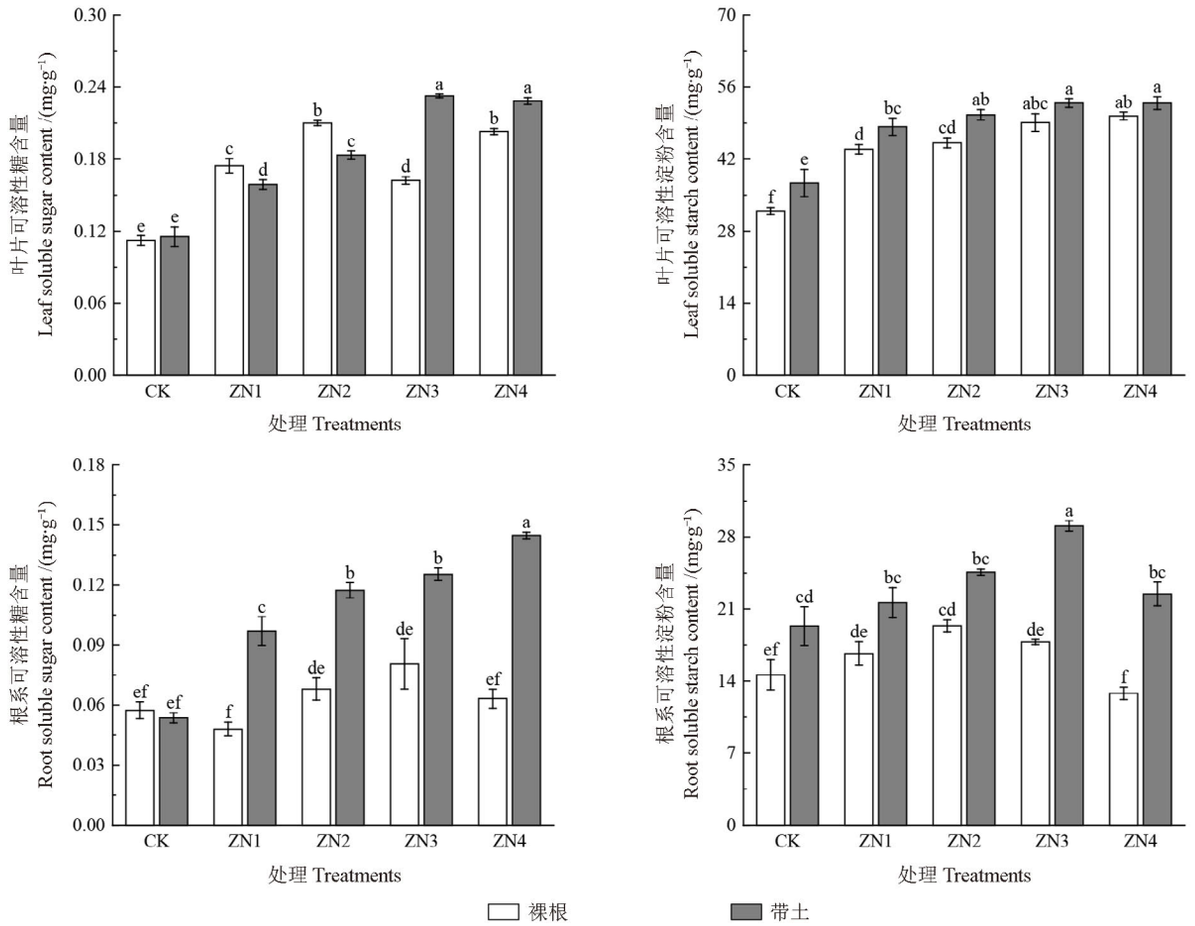


图 7 不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系中的非结构性碳水化合物含量

Fig. 7 The content of non-structural carbohydrates in leaves and roots of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

中的可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸含量进行测定，结果如图 8 所示。

在叶片中，对照处理下，带土移栽苗的叶片可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸含量均高于裸根移栽苗，其中可溶性蛋白和脯氨酸显著提高了 36% 和 85%（$P < 0.05$）。不同施氮处理下，2 种移栽苗有机氮化物含量存在显著差异。在 ZN3 处理下，带土移栽苗可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸含量较裸根移栽苗显著提高了 50%、75% 和 47%。裸根移栽处理下，有机氮含量持续递增至 ZN2 后有所波动。其中，ZN2 处理的可溶性蛋白和脯氨酸含量较 ZN1 处理显著提高了 13% 和 63%；ZN3 处理的脯氨酸和氨基酸含量较 ZN2 处理显著下降了 23% 和 18%；有机氮含量在 ZN4 处理均有所回升，较 ZN3 处理分别显著提高了 25%、36% 和 19%。带土移栽处理下，可溶性蛋白含量随着施氮量的增加呈持续递增趋势，ZN4 处理达到最大值；脯氨酸含量呈先升后降趋势，ZN3 处理达到最大值，脯氨酸含量较 ZN2 处理显著提高了 21%；ZN4 处理的可溶性蛋白和氨基酸含量略有上升，但脯氨酸较 ZN3 处理显著下降了 25%。

在根系中，对照处理下，带土移栽苗的可溶性蛋白和脯氨酸含量均显著高于裸根移栽苗，分别提高了 47% 和 35%（$P < 0.05$）。同等施氮量条件下，ZN1 处理的带土移栽苗可溶性蛋白含量较裸根移栽苗显著提高了 43%；ZN3 处理的带土移栽苗可溶性蛋白和脯氨酸含量较裸根移栽苗显著提高了 21% 和 17%。裸根移栽处理下，ZN1 处理的可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸含量较 CK 分别显著提高了 12%、38% 和 28%；ZN2 处理较 ZN1 处理进一步显著提高了 21%、16% 和 19%；ZN3 处理的脯氨酸含量较 ZN2 处理显著提高了 10%；ZN4 处理的可溶性蛋白含量较 ZN3 处理显著提高了 16%。带土移栽处理下，ZN1 处理的氨基酸含量较 CK 显著提高了 26%；ZN2 处理的可溶性蛋白和氨基酸含量较 ZN1 处理显著提高了 11% 和 22%，ZN3 处理的脯氨酸含量较 ZN1 显著提高了 39%；ZN4 处理的脯氨酸含量较 ZN3 处理显著下降了 24%，可溶性蛋白含量也呈下降趋势。

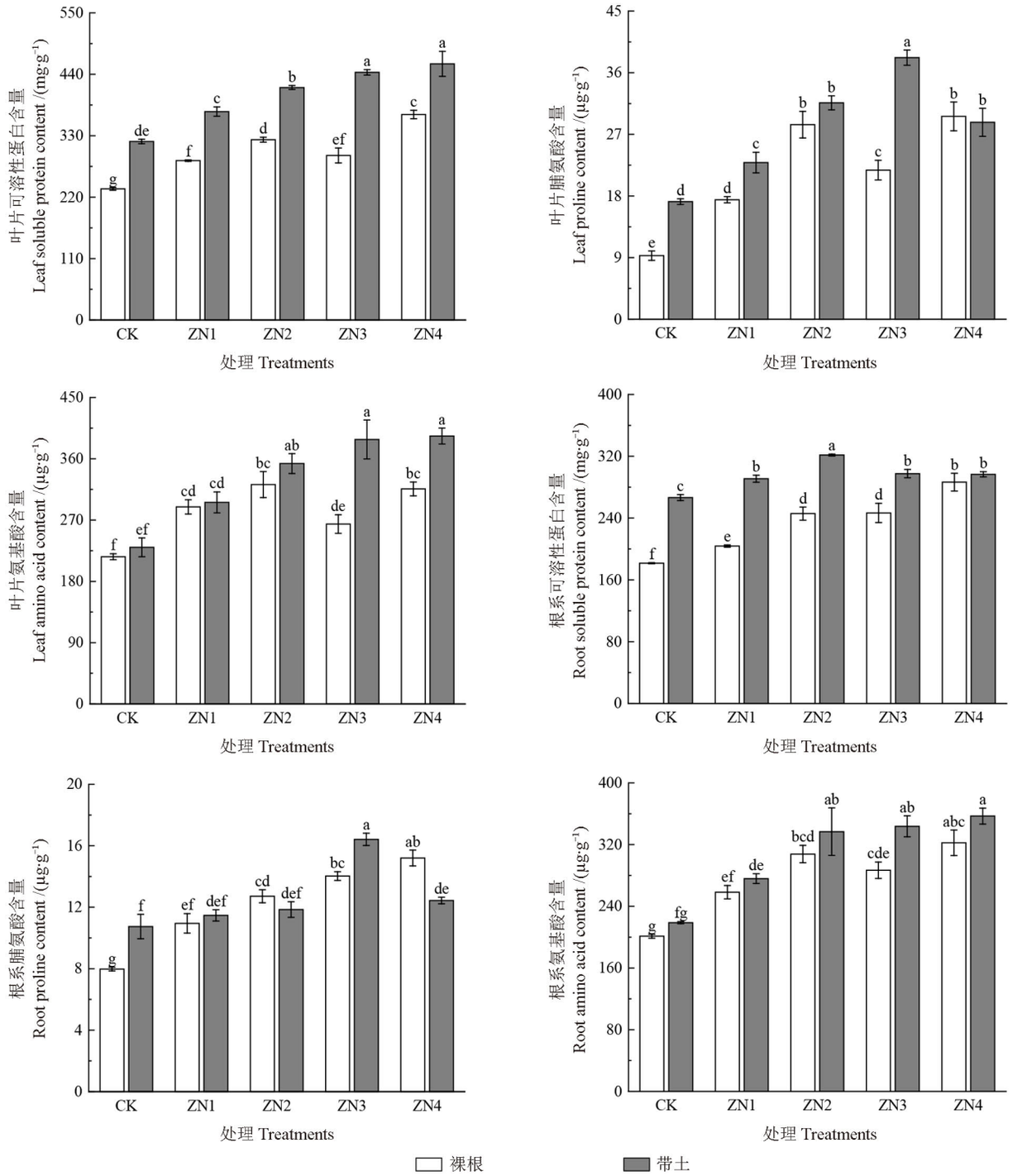


图 8　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系中的有机氮化物含量

Fig. 8　Organic nitrite content in leaves and roots transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

2.5　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗无机氮化物含量的影响

对不同处理下 2 种移栽苗叶片和根系硝态氮、铵态氮及地上部分全氮含量进行测定，结果如图 9 所示。

在叶片中，对照处理下，带土移栽苗的硝态氮和地上部分全氮含量较裸根移栽苗显著提高了 35% 和 18%（$P < 0.05$）。同等施氮处理下，2 种移栽苗地上部分无机氮化物含量存在显著差异，其中，ZN4 处理的带土移栽苗铵态氮、硝态氮和地上部分全氮含量较裸根移栽苗显著提高了 81%、19% 和 12%。裸根移栽处理下，铵态氮、硝态氮含量随施氮量增加呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值，ZN4 处理的硝态氮含量较 ZN3 处理显著提高了 11%，ZN1 处理的铵态氮含量较 CK 显著提高了 160%，ZN3 处理的硝态氮含量较 ZN2 处理显著提高了 61%；地上部分全氮含量则呈先升后降趋势，在 ZN2 处理下达到最大

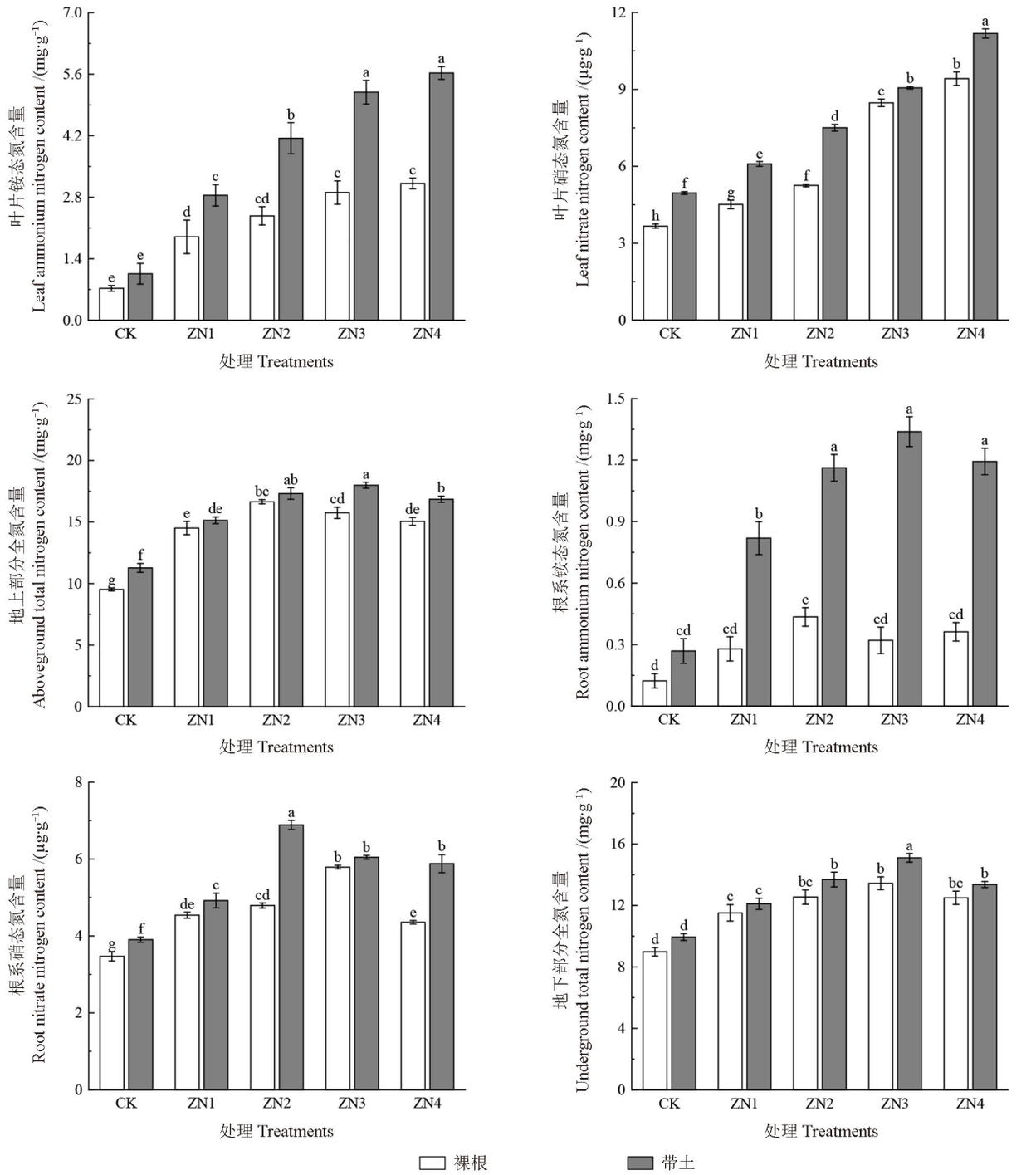


图 9 不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系中的无机氮化物含量

Fig. 9 Inorganic nitrite content in leaves and roots of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

值，较 CK 提高了 75%。带土移栽处理下，铵态氮、硝态氮含量同样呈上升趋势，ZN4 处理达到最大值，ZN4 处理的硝态氮含量较 ZN3 处理显著提高了 23%，ZN1 处理的铵态氮含量较 CK 显著提高了 169%；地上部分全氮含量则呈先升后降的趋势，ZN3 处理达到最大值，与 ZN2、ZN4 处理差异不显著，ZN1 处理较 CK 显著提高了 34%。

在根系中，对照处理下，带土移栽苗的无机氮化物含量均高于裸根移栽苗，其中，带土移栽苗的硝态氮含量较裸根移栽苗显著提高了 13%（$P < 0.05$）。同等施氮量条件下，ZN2 处理的带土移栽苗硝态氮含量较裸根移栽苗显著提高了 167%；ZN3 处理的带土移栽苗铵态氮和地下部分全氮含量较裸根移栽苗显著提高了 317% 和 12%。裸根移栽处理下，硝态氮和全氮含量随施氮量的增加呈先升后降的趋势，均在 ZN3 处理达到最大值，ZN3 处理的硝态氮含量较 ZN2 处理显著提高了 21%；ZN1 处理的硝态氮和全氮含量较 CK 处理显著提高了 31% 和 28%；铵态氮含量在 ZN2 处理下达到最大值，ZN3 处理较 ZN2 处理降低了

26%。带土移栽处理下，所有指标均呈先升后降的趋势。铵态氮和全氮含量在 ZN3 处理下达到最大值，其中 ZN3 处理的全氮含量较 ZN2 处理显著提高了 10%；硝态氮在 ZN2 处理下达到最大值，较 ZN1 处理显著提高了 40%；在 ZN1 处理下的铵态氮含量较 CK 显著提高了 205%，差异最显著。

2.6　不同施氮量对‘凤尾楠’移栽苗氮代谢相关酶活性的影响

对不同处理下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性进行测定，结果如图 10 所示。

在叶片中，对照处理下，带土移栽苗的硝酸还原酶活性较裸根移栽苗显著提高了 63%（$P < 0.05$）。同等施氮量条件下，带土移栽苗的 3 种氮代谢相关酶活性均高于裸根移栽苗，其中，ZN3 处理的带土移栽苗硝酸还原酶和谷氨酸合成酶活性较裸根移栽苗显著提高了 106% 和 14%。裸根移栽处理下，硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性随施氮量增加呈先升后降的趋势，硝酸还原酶活性

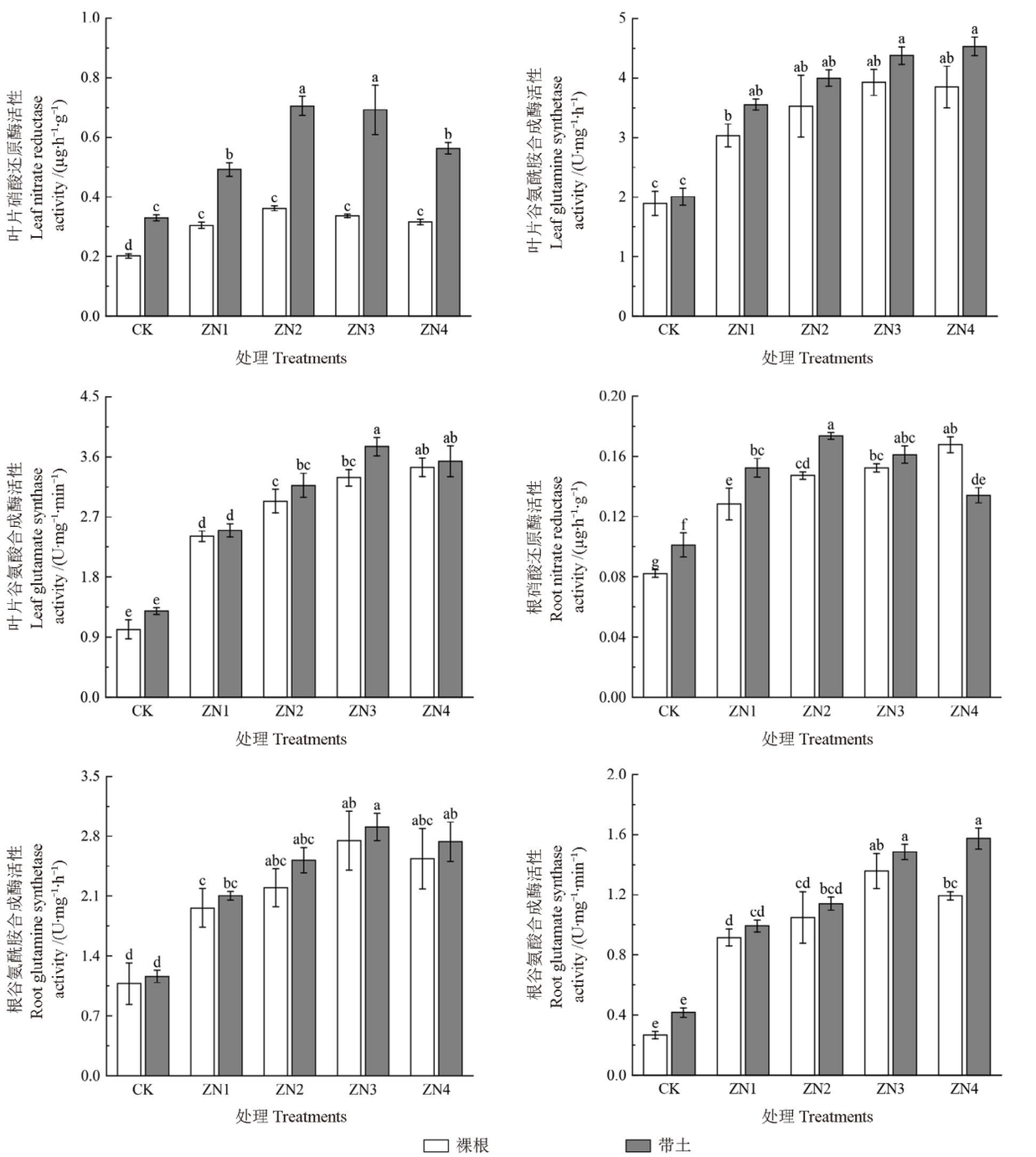


图 10　不同施氮量下‘凤尾楠’移栽苗叶片和根系中氮代谢相关酶活性

Fig. 10　Enzyme activities related to nitrogen metabolism in leaves and roots of transplanted ‘Fengweinan’ under different nitrogen application rates

在 ZN2 处理下达到最大值，谷氨酰胺合成酶活性在 ZN3 处理下达到最大值，但差异不显著；ZN1 处理的硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性较 CK 均显著提高了 50%、60% 和 139%。谷氨酸合成酶活性则呈持续递增趋势，ZN2 处理的酶活性较 ZN1 处理显著提高了 22%。带土移栽处理下，硝酸还原酶、谷氨酸合成酶活性呈先升后降的趋势，分别在 ZN2、ZN3 处理下达到最大值，ZN2 处理的硝酸还原酶活性较 ZN1 处理显著提高了 43%，ZN3 处理的谷氨酸合成酶活性较 ZN2 处理显著提高了 18%；谷氨酰胺合成酶活性则呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到最大值，但差异不显著，ZN1 处理下的活性较 CK 显著提高了 78%。

在根系中，对照处理下，带土移栽苗的氮代谢相关酶活性均高于裸根移栽苗，其中硝酸还原酶活性显著高了 22%（$P < 0.05$）。同等施氮处理下，ZN2 处理的带土移栽苗硝酸还原酶活性较裸根移栽苗显著高了 18%；ZN4 处理的带土移栽苗硝酸还原酶活性较裸根移栽苗显著低了 20%，谷氨酸合成酶活性较裸根移栽苗显著高了 32%。裸根移栽处理下，谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性均随施氮量增加呈先升后降的趋势，均在 ZN3 处理下达到最大值，其中谷氨酸合成酶活性较 ZN2 处理显著提高了 29%。硝酸还原酶活性呈持续递增趋势，在 ZN4 处理下达到峰值，较 ZN3 处理显著提高了 10%。带土移栽处理下，硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性呈先升后降的趋势，分别在 ZN2、ZN3 处理下达到最大值，其中 ZN2 处理的硝酸还原酶活性较 ZN1 处理显著提高了 15%。谷氨酸合成酶活性呈持续递增趋势，ZN4 处理达到最大值。在 ZN1 处理下硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性较 CK 显著提高了 51%、83% 和 142%。

3 讨 论

3.1 施氮量与‘凤尾楠’移栽苗生长发育的关系

基于植物养分需求精准调控投入量、减少无效损耗，对提升养分利用效率、实现资源节约与环境友好意义重大。研究发现，适量施肥可满足作物生长发育需求，但过量施肥会抑制植物生长 [28]，导致土壤退化、水体富营养化等问题。王晓等 [29] 研究表明，闽楠幼苗生长指标随施氮量的增加呈先升后降的变化趋势，氮素过量会导致植株生长受抑。2 种移栽苗多项生长指标对氮素的响应呈先升后降的变化趋势，其中带土移栽苗在施氮量为 300 ～ 400 mg/ 株时生长最佳，裸根移栽苗在施氮量为 200 ～ 300 mg/ 株时最佳，与贺维等 [28] 和柳结苗等 [30] 的研究结果一致。本研究还发现，带土移栽苗在较高氮水平下仍保持较好生长，可能与根系恢复快、氮素转运能力强有关，对前人研究形成了有效补充。应根据不同移栽方式制定差异化施氮策略，注重氮素与氮代谢的协同调控，避免过量施氮导致代谢失衡。后续可结合土壤本底氮含量与苗木生育阶段建立动态施氮模型，为精细化育苗与氮肥管理提供理论依据。

3.2 施氮量与‘凤尾楠’移栽苗生理特性的关系

氮素是光合色素的关键组成元素，对维持植物正常光合作用至关重要。缺氮或过量施氮均会影响光合色素含量，进而改变气体交换参数与光合能力 [31]。叶片叶绿素含量常作为光合强度的指标，在各类植物研究中被广泛讨论。赵建涛等 [32] 研究发现，在同一茬次下，苜蓿 *Medicago sativa* 叶片光合色素含量随施氮量的增加呈先上升后下降的变化趋势，适量氮促进气孔发育，过量则抑制气孔形成与开度，导致净光合速率下降。2 种移栽苗的光合色素变化符合上述规律，但响应程度存在差异：相同施氮量下，带土移栽苗的光合色素含量高于裸根移栽苗；带土移栽苗在 ZN3 处理下含量最高，裸根移栽苗则在 ZN2 处理下达到峰值。光合参数响应也不同，裸根移栽苗的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均随施氮量的增加呈先升后降的趋势，胞间 CO_2 浓度先降后升；带土移栽苗的净光合速率与蒸腾速率持续上升，胞间 CO_2 变化趋势与裸根苗一致。结果表明，适当施氮能够提高幼苗光合能力，过量则会抑制，且裸根移栽苗对外源氮的变化更敏感，与 Zhang 等 [33] 的研究结果一致。

非结构性碳水化合物主要包括可溶性糖和淀粉，其含量变化反映植物碳同化与消耗的平衡，二者可在一定条件下相互转化，体现植物应对环境变化所采取的生长与防御策略 [34]。向芬等 [35] 研究发现，茶树 *Camellia sinensis* cv. *baihaozao* 叶片中可溶性总糖含量随施氮量增加而上升，可溶性淀粉含量则因品种而异。另有研究发现，乌桕 *Triadica sebifera* 容器苗根、茎、叶的非结构性碳水化合物含量随施氮量的增加呈先升后降的趋势，高氮下可溶性糖含量最高 [36]。本研究结果与前人相似，施加外源氮后，裸根移栽苗叶片与根系可溶性糖含量呈先升后降再升的变化趋势，峰值分别出现在 200、300 mg/ 株；带土移栽苗叶片非结

构性碳水化合物含量持续上升，但根系可溶性淀粉含量呈先升后降的趋势，在 ZN3 处理下达最大值，表明同等施氮量下，其光合固碳能力更强，且高氮水平有利于可溶性淀粉水解转化为可溶性糖。今后可通过调控施氮优化可溶性糖与淀粉的积累与转化，以平衡苗木生长与抗逆能力，为壮苗培育提供理论依据。

可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸是重要的有机含氮化合物，且可溶性蛋白和脯氨酸还参与植物细胞的渗透调节 [37]。已有研究表明，适量施氮能促进植物体内这些含氮化合物的合成和积累；当氮过量时，可溶性蛋白和脯氨酸能够反过来参与植物渗透调节平衡，缓解因养分过剩造成的胁迫 [37]。如薄壳山核桃 *Carya illinoinensis* 在适量施氮时可溶性蛋白积累最显著，植株的抗逆性也随之增强 [38]。本研究也表明，施加氮后，裸根移栽苗叶片可溶性蛋白、脯氨酸和氨基酸含量均呈先升后降再升的变化趋势；根系中有机氮持续积累，但不同施氮量对根系氨基酸含量影响不显著。带土移栽苗叶片可溶性蛋白与氨基酸含量呈线性增长，叶片脯氨酸和根系可溶性蛋白含量则呈先上升后下降的趋势，根系氨基酸含量较对照处理显著提高，但各施氮量之间差异不显著。结果表明，‘凤尾楠’氮耐受性更强，高氮下渗透调节更稳定。

施氮能够刺激土壤中氮素向植物器官转移，提高苗木各组织器官的养分积累，促进苗木生长发育，提高苗木质量 [35]。已有研究表明，氮素供应水平对植物养分平衡具有重要调控作用。紫楠在不同施氮处理研究中发现，根、茎和叶中氮积累量均显著高于对照处理，且随施氮量增加而上升；施肥还提高了叶片氮积累比例，促进生物量向叶分配，有利于提升幼苗的光合能力 [30]。此外，乌桕在特定施氮范围内，各器官氮浓度持续上升，过量施肥则产生毒害 [36]。本试验结果与前人一致，施氮量相同时带土移栽苗各器官养分含量均高于裸根移栽苗。叶片铵态氮和硝态氮含量持续上升，全氮含量在施氮量为 200、300 mg/ 株时达峰值后下降；根系无机氮含量随施氮量增加则呈先升后降趋势，带土移栽苗在 300 mg/ 株时最高，裸根苗在 200 mg/ 株时最高，表明带土移栽苗具有更高的养分吸收与分配效率。

植物硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶等是氮素同化过程的关键酶，其活性直接影响氮代谢效率，并与植株生长发育及苗木质量密切相关。已有研究发现，在适量的供氮范围内提高施氮量，可上调各生育期菊苣 *Cichorium endivia* 氮代谢相关酶活性，促进氮素积累 [39]。研究还发现，枸杞 *Lycium barbarum* 叶片中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性随施氮量增加呈先升后降的趋势，在中等施氮水平时达到峰值 [40]。本研究中，2 种移栽苗叶片和根系硝酸还原酶活性随施氮量增加呈先升后降的趋势，均在 200 mg/ 株时最高；谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性则与施氮量呈正相关，但在中、高浓度施氮量下，酶活性差异不显著，这与 Effah 等 [31] 的研究结论一致。

4　结　论

施氮量显著影响‘凤尾楠’2 种移栽苗的生长和生理特性。随着施氮量的增加，其株高、地径、生物量及叶绿素含量、净光合速率均呈先升后降的趋势，裸根移栽苗在 200 mg/ 株时各项指标达峰值，带土移栽苗则在 300 mg/ 株时表现最佳，表明适量施氮可促进移栽苗的生长，过量则抑制。中低氮处理提高了根系和叶片中可溶性糖、淀粉及有机氮化物含量，并增强了氮代谢酶活性；过量施氮则引发胁迫响应，根系优先积累可溶性蛋白和脯氨酸，同时可溶性糖、可溶性淀粉含量及氮代谢酶活性显著下降。本研究为楠属幼苗氮肥管理提供了依据，适量氮肥添加对楠木生长具有促进作用。

参考文献：

[1] 孙兵 , 肖波 , 于鹏宇 , 等 . 湖北楠木属一新变种 : 裂叶白楠 [J]. 西北植物学报 ,2018,38(8):1567-1570.
Sun B, Xiao B, Yu P Y, et al. A new variety of *Phoebe* Nees from Hubei, China: *Phoebe neurantha* (Hemsl.) Gamble var. *lobophylla* Y.J.Fei[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018,38(8):1567-1570.

[2] 贺心茹 , 费永俊 , 孙兵 , 等 . 楠木新品种 ‘ 凤尾楠 ’[J]. 园艺学报 ,2023,50(增刊 1):191-192.
He X R, Fei Y J, Sun B, et al. A new *Phoebe neurantha* cultivar ‘Fengweinan’[J]. Acta Horticulturae Sinica,2023,50(S1):191-192.

[3] 冯桂乾 . 桢楠优良乡土树种繁育及栽培技术 [J]. 种子科技 , 2021,39(7):102-103.
Feng G Q. Breeding and cultivation techniques of excellent native tree species of *Phoebe zhennan*[J]. Seed Science & Technology, 2021,39(7):102-103.

[4] 潘小莉 . 楠木繁育与种植技术要点 [J]. 南方农业 ,2018,12(17): 3-4.
Pan X L. Nanmu breeding and planting techniques[J]. South China Agriculture,2018,12(17):3-4.

[5] 张丽君 , 胡炜 , 莫木信 , 等 . 闽楠苗木繁育及造林技术 [J].

中南林业调查规划 ,2016,35(2):41-44.
Zhang L J, Hu W, Mo M X, et al. Study on seedling breeding and afforestation technology of *Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang[J]. Central South Forest Inventory and Planning,2016,35(2):41-44.

[6] 周新华 , 胡霑 , 李军绍 , 等 .4 个楠属树种苗期生长节律 [J]. 林业科技通讯 ,2022(11):26-30.
Zhou X H, Hu Z, Li J S, et al. Growth rhythm of 4 *Phoebe* specices seedling[J]. Forest Science and Technology,2022(11): 26-30.

[7] 林昌礼 , 程亚平 , 葛永金 , 等 .41 个闽楠家系苗期生长节律及早期选择 [J]. 林业科技通讯 ,2020(8):52-55.
Lin C L, Cheng Y P, Ge Y J, et al. Growth rhythm and early selection of 41 *Phoebe* families at seedling stage[J]. Forest Science and Technology,2020(8):52-55.

[8] 万盼 , 刘芸 , 黄小辉 , 等 . 施有机肥对油桐幼苗生长及其土壤养分含量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2016,36(3): 28-32.
Wan P, Liu Y, Huang X H, et al. Effects of organic manure on growth and soil nutrients in tung oil tree seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2016,36(3): 28-32.

[9] Grunert O, Hernandez-Sanabria E, Buysens S, et al. In-depth observation on the microbial and fungal community structure of four contrasting tomato cultivation systems in soil based and soilless culture systems[J]. Frontiers in Plant Science, 2020,11:520834.

[10] Guo J J, Yang H R, Yuan Y, et al. Blending of slow-release N fertilizer and urea improve rainfed maize yield and nitrogen use efficiency while reducing apparent N losses[J]. Agronomy, 2025,15:11.

[11] Furtado Da Silva N, Cabral Da Silva E, Muraoka T, et al. Nitrogen utilization from ammonium nitrate and urea fertilizer by irrigated sugarcane in Brazilian cerrado oxisol[J]. Agriculture,2020,10(8):323.

[12] Sun Y Y, Tong C, He S, et al. Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies based on temporal dynamics of leaf morphology and color[J]. Sustainability, 2018,10:762.

[13] 寸竹 , 张金燕 , 陈军文 . 氮添加对二年生三七生长、光合特性及皂苷含量的影响 [J]. 生态学杂志 ,2020,39(4):1101-1111.
Cun Z, Zhang J Y, Chen J W. Effects of nitrogen addition on growth, photosynthetic characteristics and saponin content in two-year-old *Panax notoginseng*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(4):1101-1111.

[14] 李冬雪 , 李昕悦 , 郭婷 , 等 . 三七不同器官稳定同位素变化规律 [J]. 江苏农业科学 ,2021,49(15):128-132.
Li D X, Li X Y, Guo T, et al. Study on variation of stable isotope in different organs of *Panax notoginseng*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2021,49(15):128-132.

[15] Sun M X, Li J, Zhang L L, et al. Application of controlled-release urea increases maize N uptake, environmental benefits and economic returns via optimizing temporal and spatial distributions of soil mineral N[J]. Pedosphere,2024,34(1):222-235.

[16] 王湘莹 , 黄兰清 , 王晓明 , 等 . 不同施肥配比对紫薇叶片内源激素含量的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(4):61-67.
Wang X Y, Huang L Q, Wang X M, et al. The effect of formula fertilization on the endogenous hormone content of leaves of *Lagerstroemia indica*[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024,51(4):61-67.

[17] 黎宏轩 , 张秀丽 , 严君 , 等 . 桑 / 豆间作和施氮量对土壤胞外酶活性及微生物养分限制的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(6):31-42.
Li H X, Zhang X L, Yan J, et al. Effects of mulberry-soybean intercropping and nitrogen application rates on soil extracellular enzyme activities and microbial nutrient limitations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(6):31-42.

[18] 李明 , 张俊华 , 黄菊莹 . 氮肥对盐渍化枸杞园土壤微生物群落和氨氧化微生物丰度的影响 [J]. 土壤通报 ,2017,48(4): 908-916.
Li M, Zhang J H, Huang J Y. Microbial community of ammonia-oxidizing bacteria and archaea affected by inorganic nitrogen fertilizer application in saline soil of *Lycium barbarum* L. orchard[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(4):908-916.

[19] 安晓康 , 盛海彦 , 王生 , 等 . 外源氮对湟水流域春小麦氮素吸收利用和土壤无机氮的影响 [J]. 西北农业学报 ,2025,34(2): 191-199.
An X K, Sheng H Y, Wang S, et al. Effect of exogenous nitrogen on nitrogen uptake and utilization and soil inorganic nitrogen by spring wheat in Huangshui basin[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2025,34(2):191-199.

[20] 张钦皓 .13 个楠木家系在林芝引种苗期适应性评价与优良种质筛选 [D]. 林芝 : 西藏农牧大学 ,2025:10-21.
Zhang Q H. Adaptability evaluation and superior germplasm selection of Nanmu family seedlings in Nyingchi region, Xizang[D]. Nyingchi: Xizang Agricultural and Animal Husbandry University,2025:10-21.

[21] Timmer V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests,1997,13:275-295.

[22] 杨腾 . 施氮对文冠果幼苗生长特性影响研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2014:2-18.
Yang T. Effect of nitrogen supply on the growth characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014:2-18.

[23] 赵世杰 , 苍晶 . 植物生理学实验指导 [M]. 北京 : 中国农业出版社 ,2016:25-80.
Zhao S J, Cang J. Experimental guide of plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press,2016:25-80.

[24] 汤绍虎 , 罗充 . 植物生理学实验教程 [M]. 重庆 : 西南师范大学出版社 ,2012:35-45.
Tang S H, Luo C. Experimental course of plant physiology[M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press,2012:35-45.

[25] 彭真汾 , 王威 , 谢倩 , 等 . 橄榄果实游离氨基酸测定方法的优化 [J]. 食品工业科技 ,2017,38(22):263-267.
Peng Z F, Wang W, Xie Q, et al. Optimization of testing method for free amino acid of Chinese olive[J]. Science and Technology of Food Industry,2017,38(22):263-267.

[26] Stafilov T, Špirić Z, Glad M, et al. Study of nitrogen pollution in the Republic of North Macedonia by moss biomonitoring and Kjeldahl method[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A,2020,55(6):759-764.

[27] 杨进文 . 不同小麦品种氮素积累转运特性及相关性状的 QTL 分析 [D]. 晋中 : 山西农业大学 ,2017:8-20.
Yang J W. The characteristics of nitrogen accumulation and transportation and the QTL analysis in wheat[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University,2017:8-20.

[28] 贺维 , 张炜 , 胡庭兴 , 等 . 施肥对 1 年生楠楠幼苗生长及主要土壤肥力指标的影响 [J]. 应用与环境生物学报 ,2015,21(1):129-138.
He W, Zhang W, Hu T X, et al. Effects of fertilization on growth of 1-year-old *Phoebe zhennan* S. Lee and soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2015,21(1):129-138.

[29] 王晓 , 王樱琳 , 韦小丽 , 等 . 不同指数施氮量对闽楠幼苗生长生理及养分积累的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2020,37(3):514-521.
Wang X, Wang Y L, Wei X L, et al. Growth, physiology and nutrient accumulation of *Phoebe bournei* seedlings under different amount of exponential nitrogen fertilization[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2020,37(3):514-521.

[30] 柳结苗 , 朱小楼 , 蔡广越 , 等 . 氮素指数施肥对池杉幼苗生长及养分积累的影响 [J]. 东北林业大学学报 ,2018,46(10):1-4.
Liu J M, Zhu X L, Cai G Y, et al. Effects of N exponential fertilization on growth and nutrient accumulation of *Taxodium ascendens* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018,46(10):1-4.

[31] Effah Z, Li L L, Xie J H, et al. Regulation of nitrogen metabolism, photosynthetic activity, and yield attributes of spring wheat by nitrogen fertilizer in the semi-arid Loess Plateau region[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2023,42:1120-1133.

[32] 赵建涛 , 杨开鑫 , 马春晖 , 等 . 苜蓿叶片光合生理参数及抗氧化能力对施氮的响应 [J]. 中国草地学报 ,2023,45(2):46-55.
Zhao J T, Yang K X, Ma C H, et al. Photosynthetic physiological parameters and antioxidant capacity of alfalfa leaves in response to nitrogen application[J]. Chinese Journal of Grassland,2023, 45(2):46-55.

[33] Zhang J S, Tong T Y, Potcho P M, et al. Nitrogen effects on yield, quality and physiological characteristics of giant rice[J]. Agronomy,2020,10:1816.

[34] 王睿照 , 毛沂新 , 云丽丽 , 等 . 氮添加对蒙古栎叶片碳氮磷化学计量与非结构性碳水化合物的影响 [J]. 生态学杂志 , 2022,41(7):1369-1377.
Wang R Z, Mao Y X, Yun L L, et al. Effects of nitrogen addition on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and nonstructural carbohydrates in Mongolian oak (*Quercus mongolica*)[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(7): 1369-1377.

[35] 向芬 , 李维 , 刘红艳 , 等 . 氮素水平对茶树叶片氮代谢关键酶活性及非结构性碳水化合物的影响 [J]. 生态学报 ,2019, 39(24):9052-9057.
Xiang F, Li W, Liu H Y, et al. Effects of nitrogen levels on key enzyme activities and non-structural carbohydrates in nitrogen metabolism in tea leaves[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(24): 9052-9057.

[36] 张广涛 , 包厚天 , 黄卫和 , 等 . 不同施氮处理对乌桕容器苗养分状况的影响 [J]. 西北林学院学报 ,2023,38(1):80-87.
Zhang G T, Bao H T, Huang W H, et al. Effects of different nitrogen application treatments on nutrient status of *Sapium sebiferum* container seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2023,38(1):80-87.

[37] 黎旺姐 , 李勇 , 张刚 , 等 . 不同施氮水平对烟草叶片游离氨基酸含量及脯氨酸和苯丙氨酸代谢的影响 [J]. 基因组学与应用生物学 ,2017,36(4):1634-1640.
Li W J, Li Y, Zhang G, et al. Effects of different nitrogen fertilization levels on contents of free amino acids as well as proline and phenylalanine metabolism in tobacco leaves[J]. Genomics and Applied Biology,2017,36(4):1634-1640.

[38] 周樊 , 陈文静 , 曹凡 , 等 . 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(9): 96-103.
Zhou F, Chen W J, Cao F, et al. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of pecan seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(9):96-103.

[39] Ma Y D, Chai Y Q, Guan S H, et al. Effects of different levels of nitrogen supply on key enzyme activities of nitrogen metabolism and growth stimulation of endive (*Cichorium endivia* L.)[J]. Sustainability,2022,14:15159.

[40] 梁晓婕 , 安巍 , 李越鲲 , 等 . 枸杞根系发育及地上生长对不同施氮量的响应 [J]. 西北农业学报 ,2023,32(1):72-83.
Liang X J, An W, Li Y K, et al. Response of *Lycium barbarum* root development and above-ground growth to different nitrogen application rates[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023,32(1):72-83.

[本文编校：谢荣秀]