

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7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.009

论文标题： 10个薄壳山核桃品种幼苗对干旱—复水的生理响应

作　　者： 叶甜甜，左继林，冯资娟，等

收稿日期： 2025-07-01

引文格式： 叶甜甜,左继林,冯资娟,等.10个薄壳山核桃品种幼苗对干旱—复水的生理响应[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):90-101.

Ye T T, Zuo J L, Feng Z J, et al. Photosynthetic and physiological responses of seedlings from 10 *Carya illinoinensis* cultivars to drought□rewatering[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):90-101.

相关论文推荐

Recommended articles

干旱-复水处理对3个油茶良种的生长与光合生理特性的影响

Effects of drought and rehydration treatment on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of three *Camellia oleifera* cultivars

棕榈幼苗光合和叶绿素荧光对干旱胁迫及复水的响应

Effects of drought and rewatering on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Trachycarpus fortunei* seedlings

干旱复水对5种马尾松菌根化苗木生理特性的影响

Effects of drought and rewatering on physiological properties of five species of *Pinus massoniana* seedlings

干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响

Effects of drought and rewatering on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Paulownia catalpifolia* seedlings

基于干旱胁迫指数对不同核桃品种的生理抗旱性综合评价

Comprehensive evaluation of the physiological drought resistance of different walnut varieties based on the drought stress index

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.009 http: //qks.csuft.edu.cn

10 个薄壳山核桃品种幼苗对干旱—复水的生理响应

叶甜甜，左继林，冯资娟，邱柏豪，黄建建

（江西省林业科学院 油茶资源培育与利用江西省重点实验室，江西 南昌 330032）

摘　要：【目的】探究薄壳山核桃 *Carya illinoinensis* 在干旱胁迫和复水处理下生长、光合作用及其他生理指标的变化规律，为薄壳山核桃抗旱机制研究及抗旱品种选育提供参考。【方法】以南方省份 10 个薄壳山核桃品种的 2 年生嫁接苗为试验材料，所用砧木均为‘绍兴’实生苗，采用盆栽控水的方式进行干旱胁迫和复水处理，于干旱第 0 天（D0）、干旱第 5 天（D5）、干旱第 10 天（D10）和复水第 10 天（R10）时调查各品种的生长情况，并测定叶片光合参数、叶片解剖结构及相关生理指标，运用主成分分析法和隶属函数分析法综合评价 10 个薄壳山核桃品种的抗旱性。【结果】1）干旱胁迫下不同薄壳山核桃品种均表现出叶片卷曲、枝干下垂等萎蔫现象，叶片厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度均不同程度下降。其中，‘TJS’的降幅最大，其叶片厚度、下表皮厚度、海绵组织和栅栏组织厚度较 D0 时分别显著下降了 27.42%、29.96%、32.67%、40.19%；‘C28’的降幅最小，其叶片厚度、下表皮厚度、海绵组织和栅栏组织厚度较 D0 时降幅 4.73% ～ 13.22%。2）与 D0 相比，D10 时‘KD’的 P_n、T_r 最大 [分别为 4.53 μmol/(m^2·s)、1.2 mmol/(m^2·s)] 且降幅最小（分别下降 68.01%、83.72%），‘MD’的 G_s 降幅最小（75.86%）；‘WQT’的 P_n、G_s、T_r 较小且降幅最大，降幅分别达 91.30%、94.44%、95.35%。3）不同薄壳山核桃品种的根系活力呈现先升高后降低的趋势。D10 时，各品种的根系活力虽有所降低，但除‘XN’和‘FKT’外，其余品种仍显著高于 D0 时的水平；其中，‘NKL’根系活力较 D0 升高了 1 倍，差异最大。叶片相对电导率（REC）随时间逐渐增加，仅 D10 时的 REC 与 D0 差异达到显著性水平。4）R10 时，10 种薄壳山核桃幼苗的叶片解剖结构、光合特性基本恢复到正常水平，而根系活力维持在较高水平，但薄壳山核桃各品种各项指标的恢复程度存在差异。5）各品种综合评价得分由大到小依次为‘KD’‘C28’‘NKL’‘MD’‘XN’‘FKT’‘WQT’‘TJS’‘BN’‘GX 5’。【结论】长时间干旱对各薄壳山核桃品种均会造成不同程度的损伤，及时复水能够缓解薄壳山核桃旱害情况，并且能使根系活力出现超补偿效应。因此，当夏秋季干旱时间长达 10 d 以上时应及时浇灌植株。对于季节性干旱的南方省份，宜考虑‘KD’‘C28’和‘NKL’等抗旱性较强的品种。

关键词：薄壳山核桃；干旱胁迫；复水处理；光合作用；生理响应

中图分类号：S718.4；S664.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0090-12

Photosynthetic and physiological responses of seedlings from 10 *Carya illinoinensis* cultivars to drought-rewatering

Ye Tiantian, Zuo Jilin, Feng Zijuan, Qiu Baihao, Huang Jianjian

(Key Laboratory of Cultivation and Utilization of Oil Tea Resources in Jiangxi Province, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】To explore the changes of growth, photosynthesis, and other physiological indices of *Carya illinoinensis* under drought stress and rewatering, and to provide a reference for the study of drought resistance mechanisms and breeding of drought-tolerant cultivars in *C. illinoinensis.*【Method】Two-year-old grafted seedlings of 10 *C. illinoinensis* cultivars from southern provinces were used as test materials, with rootstocks being ‘Shaoxing’ seedlings. Drought stress and rewatering treatments were conducted through

收稿日期（Received）：2025-07-01　　**修订日期**（Revised）：2025-09-02

基金项目：江西省重点研发计划项目（20223BBF61014）；江西省林业科技创新专项（〔2022〕39 号）。

第一作者：叶甜甜（1874753200@qq.com），研究实习员，硕士。　**通信作者：**黄建建（10068831@qq.com），副研究员，硕士。

引文格式：叶甜甜 , 左继林 , 冯资娟 , 等 .10 个薄壳山核桃品种幼苗对干旱—复水的生理响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):90-101.

Ye T T, Zuo J L, Feng Z J, et al. Photosynthetic and physiological responses of seedlings from 10 *Carya illinoinensis* cultivars to drought-rewatering[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):90-101.

* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。

Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

potted water control. Growth status of each cultivar was investigated on day 0 (D0), day 5 (D5), day 10 (D10) of drought stress, and day 10 after rewatering (R10). Leaf photosynthetic parameters, leaf anatomical structures, and related physiological indicators were measured. Principal component analysis and membership function analysis were used to comprehensively evaluate the drought resistance of the 10 cultivars.【Result】1) Under drought stress, all cultivars showed wilting symptoms such as leaf curling and branch drooping. Leaf thickness (LT), lower epidermal thickness (LET), palisade tissue (PT), and spongy tissue thickness (ST) decreased to varying degrees. Among them, 'TJS' showed the largest decline, with LT, LET, PT, and ST significantly decreasing by 27.42%, 29.96%, 32.67%, and 40.19%, respectively, compared with D0. 'C28' had the smallest decline, with decreases ranging from 4.73% to 13.22% for the four indicators compared with D0; 2). Compared with D0, 'KD' exhibited the highest net photosynthetic rate (Pn) and transpiration rate (Tr) at D10 [4.53 μmol/(m²·s) and 1.2 mmol/(m²·s), respectively], with the smallest decreases (68.01% and 83.72%, respectively). 'MD' showed the smallest decrease in stomatal conductance (G_s) (75.86%) 'WQT' exhibited relatively low P_n, G_s, and T_r values with the largest decreases, reaching 91.30%, 94.44%, and 95.35%, respectively; 3) Root activity of different pecan varieties initially increased and then decreased. At D10, although root activity decreased for all varieties, it remained significantly higher than that at D0 for all except 'XN' and 'FKT'. Among these, 'NKL' exhibited the greatest difference, with root activity increasing by 1-fold compared with D0. Leaf relative electrical conductivity (REC) gradually increased over time, with significant differences between D10 and D0; 4) At R10 , the leaf anatomical structures and photosynthetic characteristics of the 10 seedlings basically recovered to normal levels, while root activity remained at a high level. However, the recovery degrees of various indices also differed among cultivars; 5) The comprehensive evaluation scores of the cultivars were ranked as: 'KD', 'C28', 'NKL', 'MD', 'XN', 'FKT', 'WQT', 'TJS', 'BN', and 'GX 5'.【Conclusion】Timely rewatering can alleviate the drought damage of *C. illinoinensis* and make the root vitality overcompensate. Therefore, when the drought time in summer and autumn is longer than 10 days, the plants should be watered in time; In addition, when planting *C. illinoinensis* in southern provinces with seasonal drought, it is advisable to consider drought-resistant varieties such as 'KD', 'C28' and 'NKL'.

Keywords: *Carya illinoinensis*; drought stress; rewatering treatment; photosynthesis; physiological response

薄壳山核桃 *Carya illinoinensis* 又名美国山核桃，原产于美国和墨西哥北部，其种仁含有 51% 以上的油脂，且不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上 [1-2]；同时，其树形高大，树干通直，木材坚固强韧 [3]，兼具果用、油用和材用价值。薄壳山核桃作为经济、社会和生态效益于一体的树种，已在我国浙江、江苏、云南、江西等 20 多个南方省份引种栽培 [4]。截至 2023 年底，全国薄壳山核桃种植面积近 1.0×10^5 hm^2，年产量超 5 000 t[5]。然而，随着全球气候变暖趋势加剧，特别是我国南方地区夏秋干旱频率高、强度大，且栽培区普遍缺乏灌溉设施，导致幼苗期植株易枯萎甚至死亡，盛果期植株果实难以充分灌浆，出现果实品质降低甚至大量减产的现象，不利于薄壳山核桃产业的健康发展 [6-7]。因此，开展薄壳山核桃的抗旱研究对干旱环境下的薄壳山核桃优良品种（系）后续的引种栽培及产业发展有着重要意义。

干旱是影响植物正常生长最重要的非生物胁迫因子之一 [8]。已有研究表明，自然干旱状态下，薄壳山核桃品种叶片光合系统和细胞膜均出现受损现象，导致生长变缓 [9]；为适应干旱环境，薄壳山核桃组织会对其组织结构和生理代谢物质进行调整 [10]。例如，干旱环境下叶片气孔通常小而密，导管密度与导管壁厚度增大，从而降低导水损失率 [10]；同时，抗氧化酶（超氧化物歧化酶、过氧化氢酶）活性、抗氧化物质（抗坏血酸、谷胱甘肽）含量、渗透调节物质（可溶性蛋白、蔗糖）含量及激素含量升高，可清除活性氧自由基并提高细胞保水能力，进而增强植株对干旱胁迫的抗性，但长期干旱会导致薄壳山核桃无法及时清除自由基，生理代谢显著受损 [11-12]。此外，植物的抗旱不仅体现在干旱过程中的自我调节方面，还表现在干旱后复水时的恢复能力 [13]。杨标等 [14] 研究表明，复水可以不同程度地恢复薄壳山核桃苗木生长及光合能力，甚至出现超补偿效应，但品种间恢复程度存在明显差异。

综上所述，目前关于薄壳山核桃抗旱方面的研究主要集中在叶片形态结构和光合生理对干旱胁迫的响应，较少关注薄壳山核桃旱后复水恢复机制的研究。本研究以 10 个薄壳山核桃品种为试验材料，测定并分析干旱—复水处理下薄壳山核桃根系活力、叶片结构、光合特性、生理特性的变化规律，并综合评价各品种的耐旱性，以筛选抗旱性较强的薄壳山核桃品种，为季节性干旱区推广种植提供良种选择参考。

1　材料和方法

1.1　材　料

试验材料为南方薄壳山核桃主栽的 10 个品种的 2 年生嫁接苗，均以'绍兴'实生苗作砧木。试验材料分别取自江西宜春和江苏句容（表 1）。宜春地处赣西北，属亚热带湿润气候，年均气温 17.2 ℃，年均降水量 1 680 mm；句容位于苏西南，属北亚热带季风气候，年均气温 15.3 ℃，年均降水量 1 050 mm。

表 1 供试品种
Table 1 Tested varieties

编码 Code	品种名称 Variety name	采集地 Collection site	编码 Code	品种名称 Variety name	采集地 Collection site
‘BN’	‘波尼’		‘MD’	‘蔓丹’	
‘XN’	‘肖尼’		‘NKL’	‘尼克罗’	
‘GX 5’	‘赣选 5 号’	江西宜春	‘FKT’	‘辐克特’	江苏句容
‘TJS’	‘特贾斯’		‘KD’	‘卡多’	
‘WQT’	‘威其塔’		‘C28’	‘亚林 28 号’	

1.2 试验设计

2024 年 3 月底，在苗木萌动前，从各品种中分别选取 45 株长势基本一致的幼苗，并将幼苗单株移栽于相同规格的硬质塑料盆中（高 35 cm，上口径 34 cm，下口径 28 cm），盆底放托盘。盆栽基质采用园土、蛭石、珍珠岩按体积比 4∶2∶1 混合配制。所有幼苗放置在江西省林业科学院温室大棚（28°44′24″N，115°49′12″E），棚内平均温度为（29±4）℃，相对湿度为（60±20）%。

2024 年 7 月 1 日，待嫁接苗抽梢萌发枝条后，将各品种幼苗分为对照组（15 株）和干旱组（45 株）。对照组（D0）于每天 18:00 充分浇水至底部有水排出，此时土壤含水量维持在 20% ～ 25%；干旱组初始土壤含水量调节至 20% ～ 25%，之后不再浇水，干旱胁迫 10 d 后恢复正常浇水（土壤含水量保持 20% ～ 25%）。试验期间监测土壤含水量，于 D0（2024 年 7 月 1 日）、D5（2024 年 7 月 5 日）、D10（2024 年 7 月 10 日）和 R10（2024 年 7 月 20 日）的上午 9:00—11:00 进行取样与指标测定，其中干旱组 D5 时土壤含水量为 10% ～ 15%，D10 时为 8% ～ 10%。

1.3 测定项目与方法

选取植株中上部复叶的第 3 ～ 5 片健康成熟叶片用于指标测定，设置 3 次重复。其中，根系采集时，将植株从盆中小心取出，轻轻去除表层附着土壤，剪取直径约 1 ～ 2 mm 的须根，用去离子水反复冲洗干净，用吸水纸吸干表面水分后测定相关指标。

植物形态测定：观察并记录各品种植株的形态变化，包括叶片卷曲程度、叶片颜色变化和叶片下垂萎蔫情况。

叶片解剖结构测定：选取树体中部阳面复叶的第 2 片小叶，并于主脉的第 3 ～ 5 侧脉处，取距主脉左右两侧各 1 cm 长的组织块，随即放置 FAA 固定液（70% 乙醇、冰乙酸、甲醛体积比为 90∶5∶5）中固定。随后，采用石蜡切片法，依次经番红 - 固绿双重染色、Leica RM2015 旋转切片机切片（厚度 8 ～ 10 μm）、中性树胶封片。最后，采用 Olympus BX41 显微镜观察，DP71 照相并分析。用目镜测微尺（精度 0.1 mm）对叶片厚度（Leaf thickness，LT）、上表皮厚度（Upper epidermis thickness，UET）、下表皮厚度（Lower epidermis thickness，LET）、栅栏组织厚度（Palisade tissue thickness，PT）、海绵组织厚度（Sponge tissue thickness，ST）、角质层厚度（Leaf cuticle thickness，LCT）进行显微测量，并计算细胞结构紧密度（Cell tightness ratio，CTR）和细胞结构疏松度（Spongy ratio，SR），共 8 项指标每项指标测量 30 个数据。

生理指标测定：采用 TTC 试验测定根系活力（Root activity，RA）；通过电导率仪测定离体叶片相对电导率（Relative electrical conductivity of detached leaves，REC）[15]。

叶片光合参数测定：采用 LI-6800 便携式光合测量系统（美国 LI-COR 公司）测定叶片的光合参数；参数包括净光合速率（P_n），气孔导度（G_s），蒸腾速率（T_r）和胞间 CO_2 浓度（C_i）[16]。

1.4 数据处理

本研究采用 SPSS 22.0 及 Origin 2023 软件分析数据和绘图，使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），采用主成分分析法和隶属函数法对参试薄壳山核桃各品种的抗旱性进行综合评价 [17]。

2 结果与分析

2.1 内外部形态结构的变化

由表 2 可知，干旱胁迫后，10 个薄壳山核桃品种的苗木均出现不同程度的叶片黄化、脱落及枝梢萎蔫等旱害症状；复水后，各品种生长状况均有一定程度恢复，表现为叶片复绿、新叶萌发、枝干挺立等现象，但不同品种在干旱—复水过程中的外部形态响应存在差异。在 D10 时，‘KD’‘C28’‘MD’中部分苗木（不足 20%）出现叶片下垂、黄化现象，

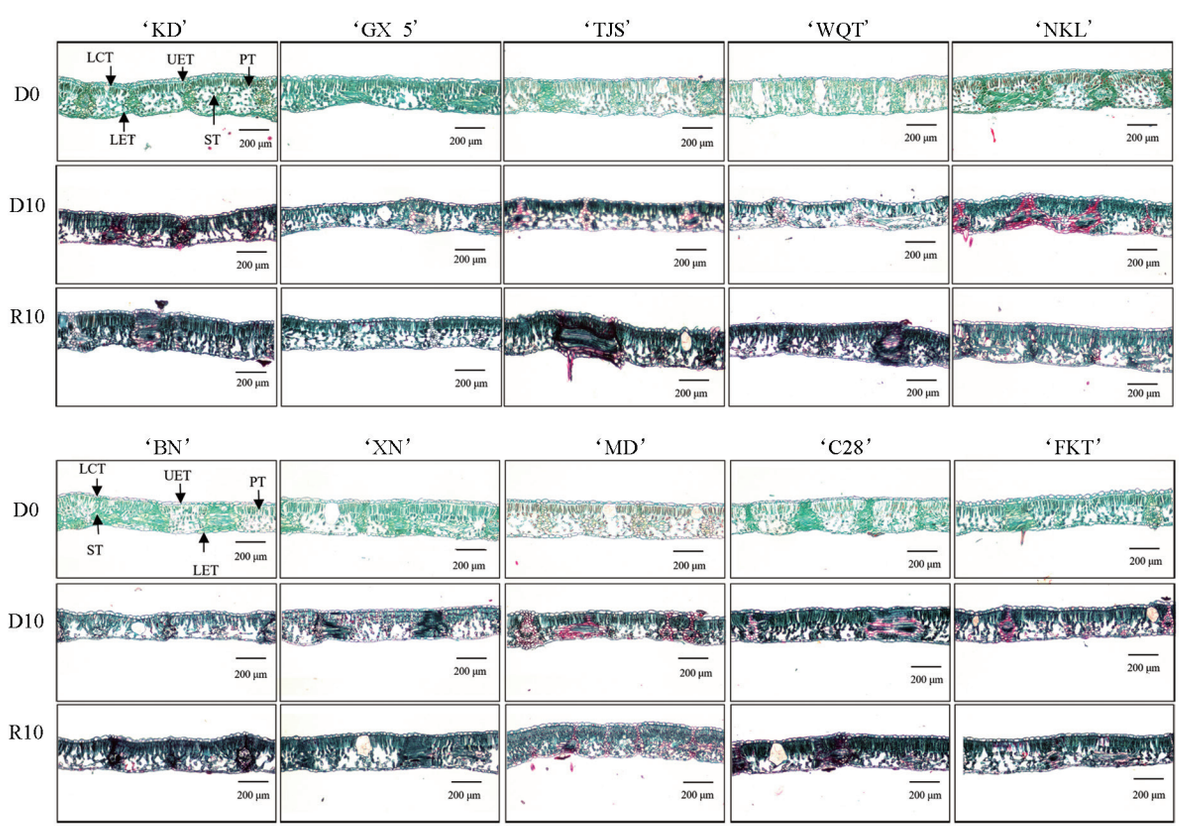
‘NKL’‘TJS’‘FKT’‘BN’中 33.3% 苗木叶片黄化且伴随着部分叶片脱落，‘XN’‘WQT’‘GX 5’中 66.7% 苗木叶片枯萎脱落；在 R10 时，大部分‘XN’‘WQT’‘TJS’‘BN’‘GX 5’植株虽能重新萌发新叶，但少部分植株死亡，其余品种植株均恢复到旱前生长状态。因此，从叶片颜色、生长状态等情况来看，‘BN’‘XN’‘WQT’‘GX 5’对干旱胁迫更为敏感。

表 2　不同取样阶段供试品种生长状态

Table 2　Growth status of tested varieties at different sampling stages

取样时段 Sampling period	品种 Variety	生长状态 Growth state	取样时段 Sampling period	品种 Variety	生长状态 Growth state
D10	‘KD’	15.5% 植株（7 株）的少量叶片黄化、萎蔫	R10	‘KD’	植株均基本恢复到 D0 状态
	‘GX 5’	66.7% 植株（30 株）的大量叶片黄化、萎蔫		‘GX 5’	6 株死亡，其余植株基本恢复到 D0 状态
	‘TJS’	33.3% 植株（15 株）的部分叶片黄化、萎蔫		‘TJS’	2 株死亡，其余植株基本恢复到 D0 状态
	‘WQT’	66.7% 植株（30 株）的大量叶片黄化、萎蔫		‘WQT’	4 株死亡，其余植株基本恢复到 D0 状态
	‘NKL’	33.3% 植株（15 株）的部分叶片黄化、萎蔫		‘NKL’	植株均基本恢复到 D0 状态
	‘BN’	33.3% 植株（15 株）的大量叶片黄化		‘BN’	2 株死亡，其余植株基本恢复到 D0 状态
	‘XN’	66.7% 植株（30 株）的大量叶片黄化、萎蔫		‘XN’	5 株死亡，其余植株基本恢复到 D0 状态
	‘MD’	17.7% 植株（8 株）的少量叶片黄化、萎蔫		‘MD’	植株均基本恢复到 D0 状态
	‘C28’	17.7% 植株（8 株）的部分叶片黄化、萎蔫		‘C28’	植株均基本恢复到 D0 状态
	‘FKT’	33.3% 植株（15 株）的部分叶片黄化、萎蔫		‘FKT’	植株均基本恢复到 D0 状态

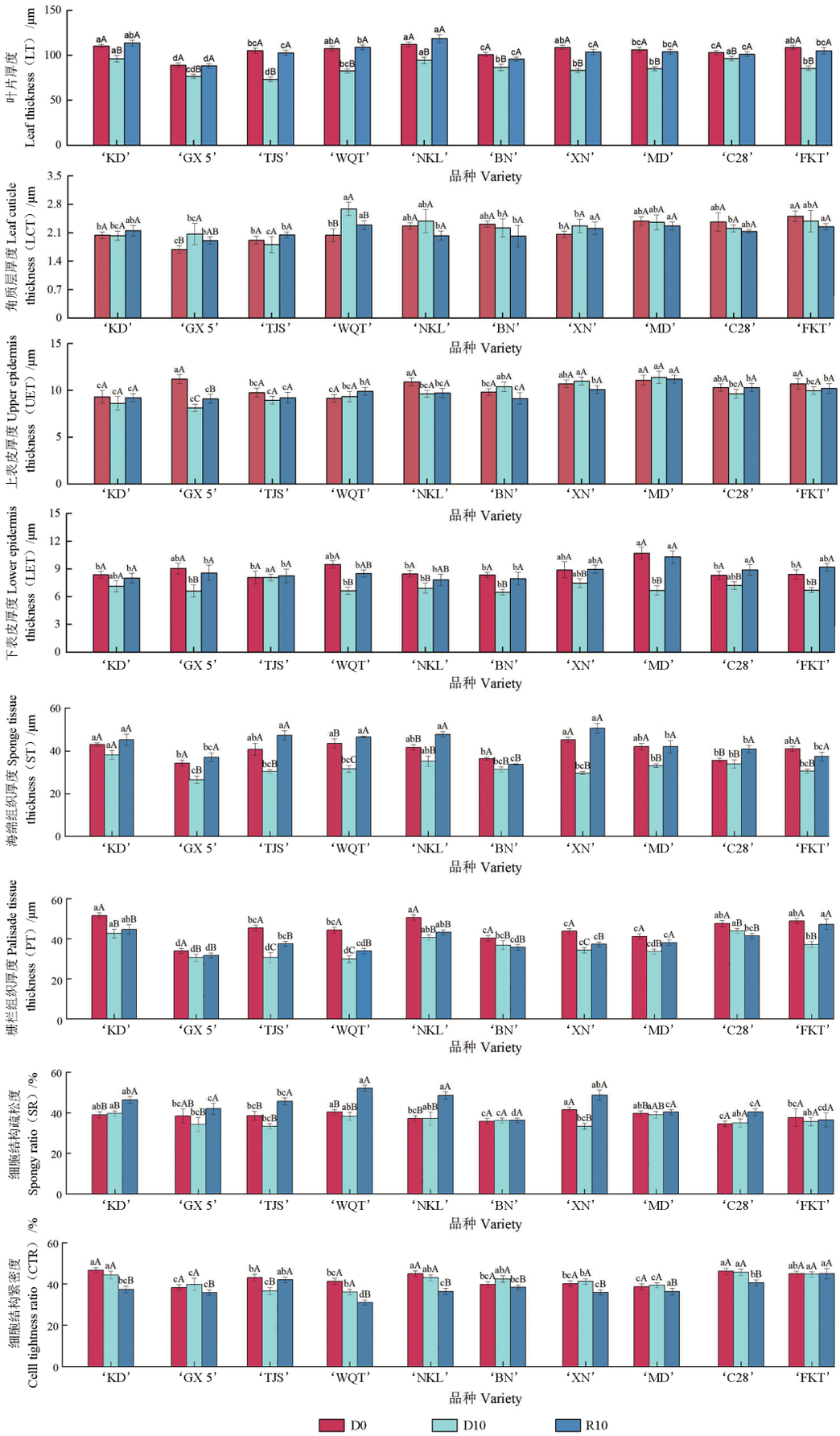
进一步分析不同时段下薄壳山核桃叶片解剖结构和各项指标（图 1、2），发现相较 D0 时段，D10 时各品种的 LT 和 PT 均显著降低，降幅分别为 6.33% ～ 27.42% 和 7.73% ～ 32.67%。此外，除‘KD’和‘TJS’外，其余品种在 D10 时的 LET 较 D0 显著下降 13.22% ～ 29.96%；除‘KD’‘NKL’和‘C28’外，其余品种在 D10 时的 ST 较 D0 显著下降 4.78% ～ 40.19%。LT、



LCT. 角质层厚度；UET. 上表皮厚度；LET. 下表皮厚度；PT. 栅栏组织厚度；ST. 海绵组织厚度（×200）。
LCT. Cuticle thickness; UET. Upper epidermis thickness; LET. Lower epidermis thickness; PT. Palisade tissue thickness; ST. Sponge tissue thickness (×200).

图 1　叶片解剖结构

Fig. 1　Anatomical structure



不同大写字母表示相同品种在不同取样阶段差异显著（$P < 0.05$）；不同小写字母表示同一取样阶段不同品种差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different capital letters indicate significant differences between the same varieties under the different sampling periods ($P < 0.05$); different lower case letters indicate significant differences between different varieties at the same sampling period ($P < 0.05$). The same below.

图 2 叶肉结构参数

Fig. 2 Mesophyll structure parameters

PT 和 ST 降幅均较小的品种为‘C28’，降幅较大的有‘TJS’和‘WQT’。但‘TJS’的 LET 降幅较小，‘MD’的 LET 降幅最大，说明‘TJS’和‘WQT’相较于‘C28’，对干旱胁迫反应更敏感，抗旱能力较弱。在 D0 和 D10 时段，大多数品种的 UET 和 LCT 无明显变化，仅‘GX 5’的 UET 明显下降，‘GX 5’和‘WQT’的 LCT 显著上升；除‘TJS’的 CTR 和‘XN’的 SR 显著下降外，其余品种的 CTR 和 SR 均无明显变化。

R10 时段，除 PT、SR 和 CTR 外，各品种其余指标基本恢复到 D0 水平。‘GX 5’‘BN’‘MD’‘C28’‘FKT’的 SR 恢复到 D0 水平，其余品种的 SR 均显著高于 D0 水平；PT 恢复到一定程度，但仍显著低于 D0；‘TJS’和‘FKT’的 CTR 无明显变化，其余品种 CTR 均显著低于各自 D0 水平。

在 3 种时段下，LT、PT 和 ST 中，‘KD’较高，‘GX 5’较低；LCT 中，‘FKT’较高，‘TJS’较低；UET 和 LET 中，‘MD’较高，‘KD’和‘TJS’较低；SR 中，‘KD’和‘WQT’较高，‘BN’‘FKT’和‘C28’较低；CTR 中，‘MD’较高，‘GX 5’较低。

2.2　对薄壳山核桃光合特性的影响

由图 3 可以看出，随着干旱天数的延长，各品种叶片的 P_n、G_s、T_r 整体呈逐渐降低的变化趋势，而 C_i 在各品种的变化趋势不同。‘GX 5’‘TJS’‘XN’和‘FKT’的 C_i 变化趋势是先下降后上升，其余品种的 C_i 呈持续下降趋势。D5 时，各指标较 D0 的降幅如下：‘GX 5’的 P_n、G_s、T_r 和 C_i 降幅最大，分别为 78.01%、92.85%、82.83% 和 34.12%；‘XN’的 P_n、G_s 的降幅最小，分别为 34.05%、45.01%；‘WQT’的 T_r 和 C_i 降幅最小，分别为 42.73%、5.56%。D10 时，各指标较 D0 的降幅如下：‘WQT’的 P_n、G_s、T_r 和 C_i 降幅最大，

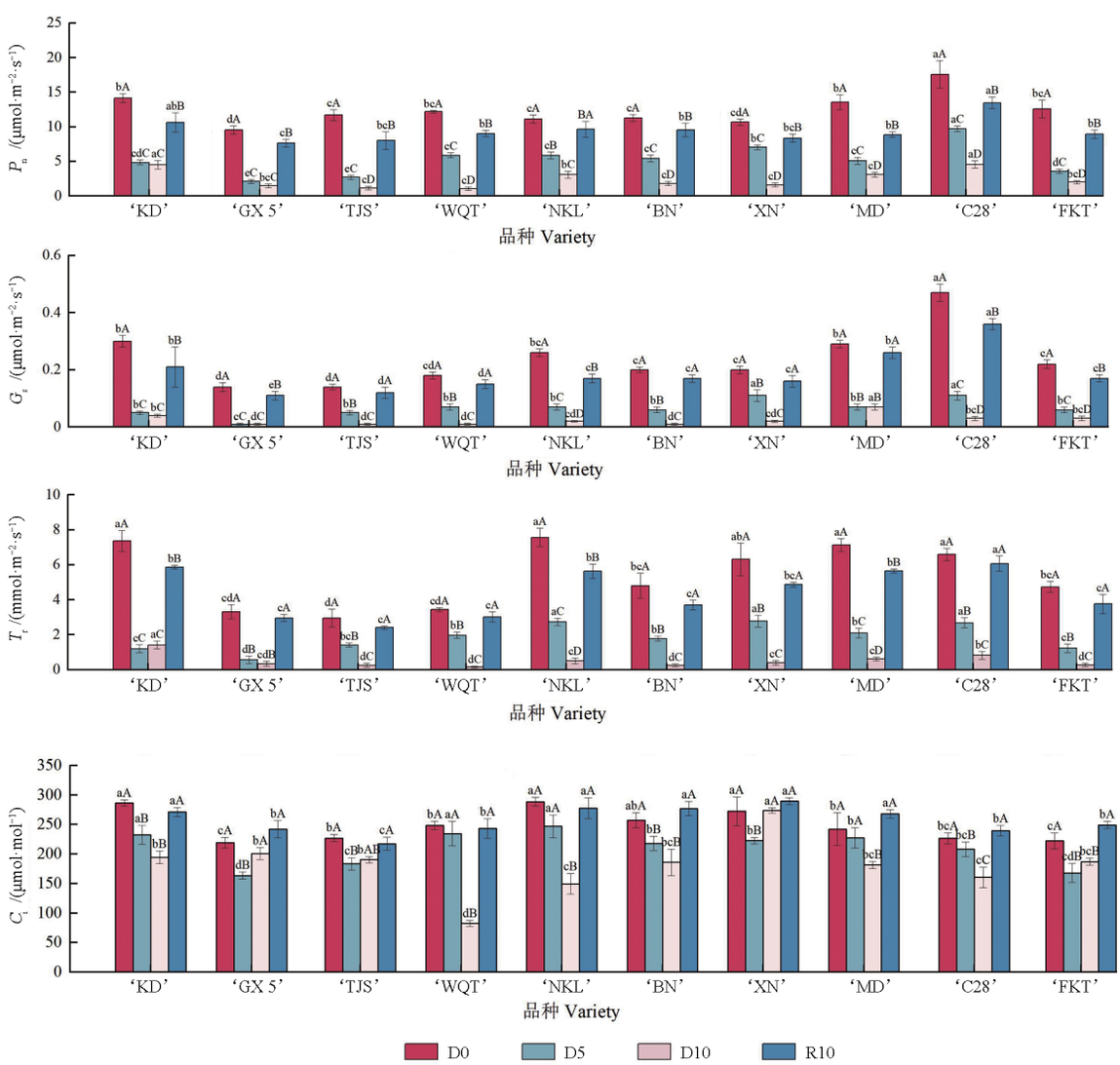


图 3　对薄壳山核桃叶片光合参数的影响

Fig. 3　Effect on photosynthetic parameters of *C. illinoinensis*

分别为 91.30%、94.44%、95.35%、66.63%；‘KD’的 P_n 和 T_r 降幅最小，分别为 68.01%、83.72%；‘MD’的 G_s 降幅最小，仅 75.86%；‘XN’的 C_i 降幅最小，仅 30.00%。

复水后（R10），P_n、G_s、T_r、C_i 均迅速增加，但仅‘NKL’的 P_n 恢复到 D0 水平，其余品种的 P_n 仍显著低于各自 D0 水平；多数品种的 G_s、T_r 和 C_i 能恢复到 D0 水平，但‘KD’‘GX 5’‘NKL’和‘MD’的 G_s 及‘KD’‘NKL’和‘MD’的 T_r 仍显著低于各自 D0 水平。

在不同干旱阶段，P_n、G_s、T_r 均以‘C28’和‘KD’较高，‘GX 5’‘WQT’和‘TJS’较低；C_i 以‘XN’和‘KD’较高，‘GX 5’‘C28’和‘FKT’较低。

2.3 对薄壳山核桃生理生化指标的影响

2.3.1 对根系活力的影响

随着干旱持续，各品种的根系活力均呈先上升后下降的趋势，复水后有所回升（图 4）。D5 和 R10 时各薄壳山核桃品种根系活力有所提高，与 D0 相比增幅分别为 19.94% ～ 264.80%、9.89% ～ 286.30%；D10 时‘KD’‘TJS’‘NKL’和‘C28’的根系活力与 D0 相比显著增加，增幅为 39.11% ～ 50.11%，其余品种的根系活力与 D0 相比无明显变化。在试验的各阶段，‘NKL’的根系活力均较高且变化幅度最大，‘C28’的根系活力均较低且变化幅度最小。

同一采集时段内，不同品种间根系活力存在差异。D0 时，‘XN’的根系活力 [0.067 mg/(g·h)] 显著高于其余品种；D5 时，‘KD’的根系活力 [0.101 mg/(g·h)] 显著高于其余品种；D10 时，‘KD’和‘TJS’的根系活力较高，分别为 0.077 mg/(g·h) 和 0.073 mg/(g·h)，显著高于其余品种；R10 时，‘KD’‘TJS’和‘NKL’的根系活力均显著高于其余品种。相比其他品种，‘GX 5’和‘C28’在不同采集时段下的根系活力均较低。

2.3.2 对叶片相对电导率的影响

随着干旱时间的延长，各品种叶片相对电导率总体呈现上升的趋势，复水后迅速降低（图 5）。从 D0 到 D5 时，各品种的叶片相对电导率无明显变化，说明干旱初期叶片细胞膜受损较轻微。从 D0 到 D10 时，除‘TJS’‘WQT’和‘NKL’

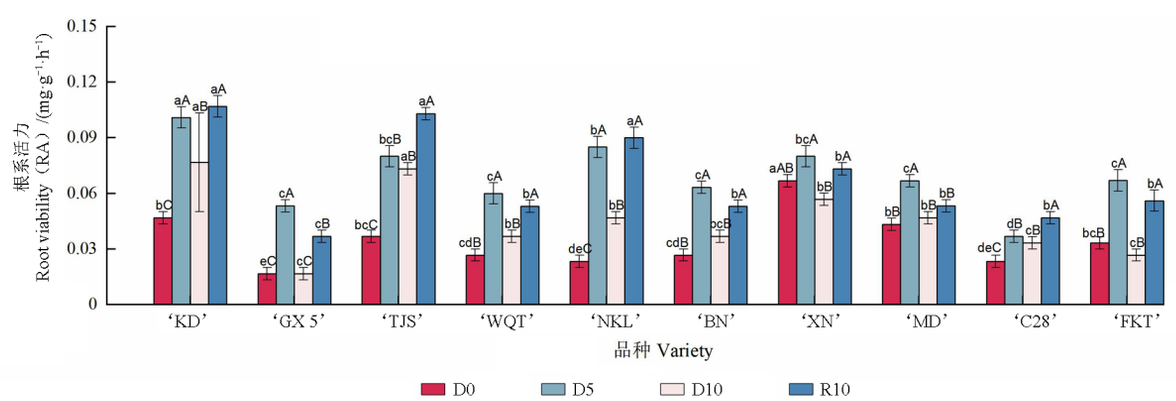


图 4 对薄壳山核桃幼苗根系活力的影响

Fig. 4 Effect on relative conductivity of root activity of *C. illinoinensis*

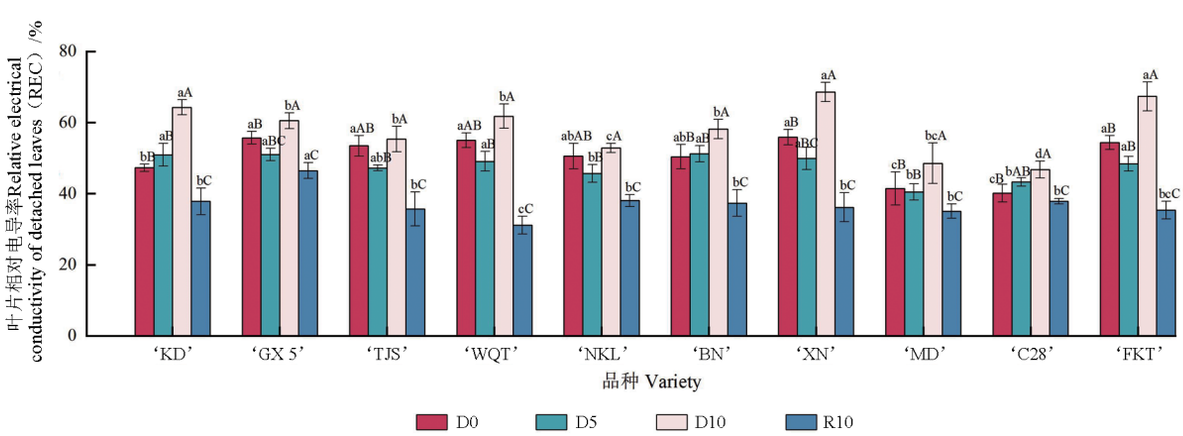


图 5 对薄壳山核桃幼苗叶片相对电导率的影响

Fig. 5 Effect on relative conductivity of leaves of *C. illinoinensis*

无明显变化外，其余品种的叶片相对电导率较D0均显著提高（增幅8.67%～35.91%），表明较长时间干旱会使细胞膜受到损伤。相比D0，R10时各品种叶片相对电导率显著降低，降幅为5.33%～43.43%。在干旱胁迫到复水过程中，叶片相对电导率变化最大的是‘XN’，最小的是‘C28’，说明‘XN’叶片对干旱胁迫更敏感。

2.4　相关性及主成分分析

由表3可知，薄壳山核桃叶片光合生理、解剖结构与根系活力存在相关性。其中，叶片厚度（LT）与下表皮厚度（LET）、栅栏组织厚度（PT）、海绵组织厚度（ST）、细胞结构疏松度（SR）呈极显著正相关，P_n与G_s、T_r、C_i呈极显著正相关。LT、LET、ST与P_n、G_s、T_r和C_i呈极显著正相关，与叶片相对电导率（REC）呈不同程度负相关。P_n、G_s、T_r和C_i与REC呈不同程度负相关。叶片解剖结构中只有ST和SR与根系活力（RA）显著正相关，而光合特性各指标与RT无显著相关性。

主成分分析结果显示（表4），前4个主成分贡献率分别为37.331%、22.030%、14.115%、10.035%，累计贡献率达到83.511%，可以较好反映薄壳山核桃叶片光合生理、叶片解剖性状及根系活力等主要信息。其中，叶片下表皮厚度、P_n、G_S和T_r在PC1的载荷较大；根系活力、海绵组织厚度和细胞结构疏松度在PC2的载荷较大；栅栏组织厚度和细胞结构紧密度在PC3的载荷较大；角质层厚度在PC4的载荷较大。

综合评价表明（表5），不同薄壳山核桃品种抗旱性从弱到强依次为‘GX 5’‘BN’‘TJS’‘WQT’‘FKT’‘XN’‘MD’‘NKL’‘C28’‘KD’。

3　讨　论

3.1　干旱胁迫及复水处理对薄壳山核桃生长及叶片结构的影响

本研究结果表明，随着干旱胁迫时间延长，10个薄壳山核桃品种幼苗的生长表型性状呈现不同程度的旱害症状。轻度受害品种如‘KD’‘C28’‘MD’，不足20.0%的植株出现部分叶片黄化、枝条轻微下垂；重度受害品种如‘XN’‘WQT’‘BN’‘GX 5’，66.7%的苗木叶片几乎全部枯萎脱落，甚至整株枯死。该结果与前人研究基本一致，前人亦发现干旱环境下植物可通过叶片萎蔫、脱落等方式减少水分消耗[18]。干旱胁迫下，各品种薄壳山核桃的叶片厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度均显著降低。其原因可能是干旱胁迫干扰了植株水分代谢过程，导致叶片细胞含水量下降，促使叶片内部解剖结构向适应干旱环境的方向发生适应性改变。这一变化趋势与重度干旱下紫花苜蓿 *Medicago sativa* L. 和海南凤仙花 *Impatiens hainanensis* Y. L. Chen 的叶片解剖结构响应规律一致[19-20]；而多数植物在干旱环境中通常表现为叶片厚度、上下表皮厚度及栅栏组织厚度增加[21-22]，表明植物对干旱胁迫的响应存在物种、品种及干旱程度差异，进而形成不同的叶片结构调控策略。薄壳山核桃在干旱胁迫下更倾向于通过降低栅栏

表3　14个叶片指标相关性分析†

Table 3　Correlation analysis of 14 leaf indexes

指标 Indicator	LT	LCT	UET	LET	PT	ST	CTR	SR	P_n	G_s	T_r	C_i	REC
LCT	0.036												
UET	0.187	0.301											
LET	0.533**	−0.157	0.431*										
PT	0.78**	0.061	0.132	0.295									
ST	0.871**	−0.088	0.103	0.575**	−0.499**								
CTR	0.088	0.124	0.038	−0.215	0.620**	−0.192							
SR	0.567**	−0.095	−0.047	0.290	0.031	0.82**	−0.568**						
P_n	0.786**	−0.092	0.222	0.682**	0.735**	0.634**	0.156	0.263					
G_s	0.657**	0.053	0.322	0.664**	0.668**	0.527**	0.142	0.174	0.931**				
T_r	0.806**	−0.036	0.308	0.704**	0.700**	0.682**	0.046	0.326	0.896**	0.907**			
C_i	0.580**	−0.342	0.066	0.548**	0.377	0.575**	−0.156	0.376	0.516**	0.455	0.628**		
REC	−0.589**	0.037	−0.082	−0.546**	−0.232	−0.633**	0.311	−0.586**	−0.543**	−0.567**	−0.554**	−0.483	
RA	0.311	−0.192	−0.206	0.054	−0.006	0.510**	−0.287	0.576**	−0.046	−0.056	0.091	0.341	−0.389

†　**. $P < 0.01$; *. $P < 0.05$.

表 4 主成分分析
Table 4 Principal component analysis

评价指标 Evaluation index	主成分荷载 Principal component loading			
	PC1	PC2	PC3	PC4
叶片厚度 Leaf thickness	0.668	0.569	0.396	0.086
角质层厚度 Leaf cuticle thickness	−0.118	0.010	0.141	0.914
上表皮厚度 Upper epidermis thickness	0.492	−0.243	−0.214	0.572
下表皮厚度 Lower epidermis thickness	0.875	0.087	−0.253	−0.035
栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	0.550	0.123	0.803	0.035
海绵组织厚度 Sponge tissue thickness	0.563	0.763	0.111	−0.001
细胞结构紧密度 Cell tightness ratio	−0.017	−0.391	0.853	0.053
细胞结构疏松度 Spongy ratio	0.214	0.881	−0.246	0.012
P_n	0.889	0.135	0.317	−0.038
G_s	0.889	0.062	0.252	0.101
T_r	0.897	0.226	0.233	0.012
C_i	0.617	0.345	−0.003	−0.416
叶片相对电导率 Relative electrical conductivity of detached leaves	−0.562	−0.564	0.151	−0.021
根系活力 Root activity	−0.102	0.811	−0.039	−0.211
特征值 Eigenvalue	5.226	3.084	1.976	1.405
贡献率 Contribution rate /%	37.331	22.030	14.115	10.035
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	37.331	59.361	73.476	83.511

表 5 各品种的综合指标值及抗旱性排序
Table 5 Comprehensive index value and ranking of drought tolerance of each variety

品种 Variety	主成分得分 Principal component score				总得分 Total score	排序 Ranking
	PC1	PC2	PC3	PC4		
‘KD’	1.47	0.49	0.32	0.02	2.30	1
‘GX 5’	0.72	0.10	0.11	0.02	0.95	10
‘TJS’	0.95	0.33	0.18	0.01	1.47	8
‘WQT’	1.02	0.35	0.15	0.08	1.60	7
‘NKL’	1.42	0.41	0.28	0.07	2.18	3
‘BN’	0.98	0.18	0.20	0.05	1.41	9
‘XN’	1.29	0.38	0.19	0.06	1.92	5
‘MD’	1.56	0.34	0.17	0.10	2.17	4
‘C28’	1.53	0.25	0.32	0.09	2.19	2
‘FKT’	1.10	0.16	0.29	0.10	1.65	6

组织与海绵组织厚度、减小细胞结构紧密度，以此减轻高温、强光辐射及水分亏缺造成的伤害，属于典型的防守型抗旱策略。

复水对干旱后植物的生长会产生一定的补偿效果，同时也可评价植物的抗旱能力 [23]。本研究中，复水后，大多数品种的植株表型性状及叶片组织结构（叶片厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度）整体恢复到对照的正常水平；但‘XN’‘WQT’和‘GX 5’出现部分植株枯死，说明‘XN’‘WQT’和‘GX 5’抗旱能力相对较弱，持续干旱 10 d 超出了这些品种的承受范围。在此胁迫下，其叶片几乎黄化或脱落，导致非结构性碳水化合物无法得到补充和转运利用，进而产生碳饥饿，且栓塞无法被修复以抵抗干旱胁迫，最终植株死亡，难以通过复水恢复 [24]；此外，持续干旱也可能导致抗旱能力弱的品种发生细胞程序性死亡，使其无法进行正常生理代谢活动，最终导致植株死亡 [23]。

本研究中，不同品种薄壳山核桃的叶片疏松度与紧密度变化趋势同样存在差异。其中，‘KD’‘TJS’‘WQT’‘NKL’及‘XN’等品种的叶片疏松度与紧密度均呈不同程度下降；其余品种叶片疏松度无显著变化，仅叶片紧密度有所降低。鹊肾 *Streblus asper* 在相关研究中也呈现类似规律 [24]。由此间接表明，薄壳山核桃叶片海绵组织相较于栅栏组织，在水分胁迫后可能具备更快或更早的吸水恢复能力。

3.2 干旱胁迫及复水处理对薄壳山核桃光合特性的影响

光合作用是植物生长过程中最基本的过程，也是对外界环境变化最为敏感的过程 [18]。随着干旱程度加重，若 P_n 和 G_s 下降的同时伴随着 C_i 下降，则 P_n 的下降为典型的气孔因素限制；若 P_n 和 G_s 下降而 C_i 上升或不变，则 P_n 的下降为典型的非气孔因素限制 [16-17]。本研究显示，随着干旱时间的延长，‘GX 5’‘XN’‘TJS’和‘FKT’的 G_s 显著下降，而 C_i 呈先降后升的趋势，与苹

果 *Malus pumila* Mill.[25] 随干旱胁迫的变化相同；‘KD’‘C28’‘BN’‘MD’‘NKL’和‘WQT’的 G_s 和 C_i 始终均呈下降趋势，与干旱胁迫前期苹果光合特性指标变化趋势一致 [25]。据此推测，‘KD’‘MD’等品种抗旱性较强，D10 时期干旱胁迫对其叶片光合器官功能无明显损伤，P_n 下降主要受气孔因素限制；‘WQT’等品种抗旱性较弱，D10 时干旱胁迫会明显损伤这些品种叶片光合器官，P_n 下降则由气孔因素限制转变为非气孔因素限制 [14]。复水后，不同品种 G_s、T_r、C_i 基本恢复到对照水平，但 P_n 仍普遍低于对照水平，与青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca* 干旱胁迫后复水光合特性指标的变化结果 [13] 类似，这说明复水能够缓解 D10 时期的薄壳山核桃叶片损伤，但不能完全恢复叶片光合效能。

3.3　干旱胁迫及复水处理对薄壳山核桃生理特性的影响

根系作为植物重要的营养器官，负责将水分和营养物质源源不断地输送至整个植株，维持植株正常生长发育，同时也是评价植物抗旱性的重要内容 [26]。前人研究发现，轻度干旱胁迫可显著提高 2 月龄伊犁绢蒿 *Seriphidium transiliense* 的根系活力 [27]，而干旱胁迫严重时则会降低根系活力。本研究结果与此相似：D5 可显著提高薄壳山核桃各品种的根系活力，而 D10 使大多数品种根系活力回落至各自 D0 水平，但仍显著提高了‘KD’‘TJS’和‘NKL’的根系活力。这一结果与马铃薯 *Solanum tuberosum* L. 在重度干旱胁迫下根系活力显著升高 [28] 的结果类似。这表明，短暂干旱胁迫可促进薄壳山核桃根系活力提升，而长期干旱胁迫则会抑制根系活力。其原因可能是：短暂干旱胁迫可刺激薄壳山核桃根系 ABA 等抗逆激素大量合成，增强细胞水分亏缺信号传导与抗旱基因表达，促使更多同化物向根系运输，进而提高根系活力以适应干旱环境；而长期干旱会导致根系生长停滞、衰老甚至死亡 [29]。‘KD’‘TJS’和‘NKL’根系活力在干旱胁迫下的增幅显著大于其他品种，表现出较强的抗旱性，说明接穗可对砧木的根系活力产生显著影响，进而影响各品种的抗逆性，这与前人关于葡萄 *Vitis vinifera* 的研究结果一致 [30]。R10 时期，各品种根系活力均显著高于正常供水处理，表现出超补偿效应。推测其原因：一是复水可提高根系水分吸收效率，缓解干旱造成的细胞失水伤害，迅速弥补干旱导致的损伤与生长滞后 [31]；二是复水诱导根系活力显著提升也可能是一种生存策略，以避免根系再次遭受脱水伤害 [32]。

叶片相对电导率能够反映逆境对植物细胞膜的损伤程度，是判断植物抗旱能力的重要指标之一 [18]。与 D0 相比，D5 时段对薄壳山核桃叶片相对电导率无明显影响，而 D10 时段则会导致薄壳山核桃叶片相对电导率明显增加，与关于广西火桐 *Firmiana kwangsiensis* 幼苗的研究结果 [33] 类似。由此表明，长时间干旱会严重损伤薄壳山核桃叶片，引起细胞膜的孔隙增大，离子外泄；而各薄壳山核桃品种的细胞膜受损程度不同，可能与其抗旱性差异有关。复水后，薄壳山核桃叶片相对电导率均显著低于 D0 水平，与关于蓝靛果 *Lonicera caerulea* L. 的相关研究结果 [34] 类似，说明 D10 时段对薄壳山核桃叶片细胞膜损伤是可逆的，甚至可以补偿短期干旱对叶片细胞膜的损伤。

4　结　论

在长时间干旱胁迫下，供试的 10 个薄壳山核桃品种在叶片黄化、萎蔫程度上存在差异，其中‘KD’‘C28’品种受害较轻，叶片黄化率不足 20.0%。叶片解剖结构方面，‘WQT’和‘TJS’的叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度降幅最大，而‘C28’降幅最小。光合参数方面，P_n、G_s、T_r 均显著下降，‘WQT’降幅最大（大于 90%），‘KD’降幅最小（小于 84%）。干旱胁迫对根系活力影响较小，仅‘GX 5’和‘C28’在各时段下均较低。复水后（R10），植株外部形态部分恢复，‘XN’‘WQT’等虽萌发新叶，但少部分植株死亡；栅栏组织厚度、细胞结构疏松度、细胞结构紧密度等未完全恢复至对照水平；‘NKL’的 P_n 和其余品种的 G_s、T_r、C_i 均基本恢复（除‘GX 5’和‘WQT’的 G_s、T_r、C_i 外）；‘KD’‘NKL’‘TJS’根系活力显著高于其他品种，表现出明显的超补偿效应。综上，若夏秋季干旱时间过长，应及时浇灌。在水源较缺乏的栽植区，建议优先选择‘KD’‘C28’等抗旱能力较强的品种，谨慎选用‘GX 5’‘XN’和‘WQT’等抗旱能力较弱的品种。

参考文献：

[1]　周文君 , 李俊 , 刘祥 , 等 . 湖南省 30 个薄壳山核桃新品种经济性状比较分析 [J]. 江西农业大学学报 ,2021,43(4):807-816.
Zhou W J, Li J, Liu X, et al. A comparative analysis of the economic characters of 30 pecan varieties in Hunan Province[J].

Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2021,43(4):807-816.

[2] 王艺颖 , 周文君 , 卢琨 , 等 . 湖南省 4 个薄壳山核桃品种果实形态和品质变化规律 [J]. 经济林研究 ,2022,40(4):52-60.
Wang Y Y, Zhou W J, Lu K, et al. Fruit morphology and quality variation patterns of four *Carya illinoinensis* varieties in Hunan Province[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(4):52-60.

[3] 彭方仁 , 李永荣 , 郝明灼 , 等 . 我国薄壳山核桃生产现状与产业化发展策略 [J]. 林业科技开发 ,2012,26(4):1-4.
Peng F R, Li Y R, Hao M Z, et al. Production status and industrialization development strategy of *Carya illinoinensis* in China[J]. China Forestry Science and Technology,2012,26(4):1-4.

[4] 李永荣 , 吴文龙 , 刘永芝 . 薄壳山核桃种质资源的开发利用 [J]. 安徽农业科学 ,2009,37(27):13306-13308,13316.
Li Y R, Wu W L, Liu Y Z. Development and utilization of pecan germplasm resources[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009,37(27):13306-13308,13316.

[5] 梁志 , 杨旭涛 , 周溪 , 等 . 桃蛀螟在安徽省薄壳山核桃产区的发生规律及防控技术 [J]. 植物保护学报 ,2024,51(4):979-980.
Liang Z, Yang X T, Zhou X, et al. Occurrence patterns of yellow peach moth *Conogethes punctiferalis* on pecan and chemical control techniques in Anhui Province[J]. Journal of Plant Protection,2024,51(4):979-980.

[6] De Marco R, Goldschmidt R J Z, Herter F G, et al. The irrigation effect on nuts' growth and yield of *Carya illinoinensis*[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências,2021,93(1):e20181351.

[7] 张瑞 , 李永荣 , 彭方仁 . 薄壳山核桃品种 ' 马汉 ' 的栽培适应性及其评价 [J]. 经济林研究 ,2013,31(2):176-180.
Zhang R, Li Y R, Peng F R. Cultivation adaptability and evaluation of Mahan in *Carya illinoinensis*[J]. Non-wood Forest Research,2013,31(2):176-180.

[8] Abdelgawad H, Farfan-Vignolo E R, De Vos D, et al. Elevated CO_2 mitigates drought and temperature-induced oxidative stress differently in grasses and legumes[J]. Plant Science,2015,231:1-10.

[9] 苗婷婷 , 吴中能 , 刘俊龙 , 等 . 不同薄壳山核桃品种 (系) 对自然干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价 [J]. 安徽林业科技 ,2025,51(1):14-22,34.
Miao T T, Wu Z N, Liu J L, et al. Physiological response and drought resistance evaluation of different *Carya illinoinensis* cultivars (lines) to natural drought stress[J]. Anhui Forestry Science and Technology,2025,51(1):14-22,34.

[10] 王兆成 , 王磊 , 周梦钰 , 等 .3 个薄壳山核桃品种叶片结构特征和枝条导水功能比较 [J]. 植物资源与环境学报 ,2021,30(3):38-45.
Wang Z C, Wang L, Zhou M Y, et al. Comparison on leaf structure characteristics and branch hydraulic function of three *Carya illinoinensis* cultivars[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2021,30(3):38-45.

[11] 李剑威 , 晏舒蕾 , 黄元城 , 等 . 薄壳山核桃幼苗对干旱胁迫的生理生化响应 [J]. 核农学报 ,2020,34(10):2326-2334.
Li J W, Yan S L, Huang Y C, et al. Physiological and biochemical responses of pecan seedlings to drought stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2020,34(10):2326-2334.

[12] 廖健明 , 黄晓露 , 梁钟芳 , 等 . 干旱胁迫下薄壳山核桃实生苗内源激素的变化规律 [J]. 广西林业科学 ,2020,49(4):511-517.
Liao J M, Huang X L, Liang Z F, et al. Content changes of endogenous hormones under drought stress of *Carya illinoinensis* seedlings[J]. Guangxi Forestry Science,2020,49(4):511-517.

[13] 邓平 , 吴敏 , 林丁 , 等 . 干旱 - 复水对桂西北喀斯特地区青冈栎幼苗叶片光合能力、叶绿素荧光和显微结构的影响 [J]. 西北植物学报 ,2024,44(1):63-76.
Deng P, Wu M, Lin D, et al. Effects of drought-rehydration on photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and microstructure of *Cyclobalanopsis glauca* seedling leaves in karst area of northwest Guangxi[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(1):63-76.

[14] 杨标 , 刘壮壮 , 彭方仁 , 等 . 干旱胁迫和复水下不同薄壳山核桃品种的生长和光合特性 [J]. 浙江农林大学学报 ,2017,34(6):991-998.
Yang B, Liu Z Z, Peng F R, et al. Growth and photosynthetic characteristics for pecan cultivars during drought stress and recovery[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2017,34(6):991-998.

[15] 王学奎 . 植物生理生化实验原理和技术 [M].2 版 . 北京 : 高等教育出版社 ,2006:165-205.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2006:165-205.

[16] 王志超 , 何之龙 , 陈永忠 , 等 . 油茶 ' 湘林 210' 抗干旱特性研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(1):37-48.
Wang Z C, He Z L, Chen Y Z, et al. Study on drought resistance characteristics of 'Xianglin 210' *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):37-48.

[17] 田晓明 , 向光锋 , 牟村 , 等 . 四种红豆属植物耐旱性综合评价 [J]. 浙江农业学报 ,2024,36(2):308-324.
Tian X M, Xiang G F, Mou C, et al. Drought tolerance evaluation of four species of *Ormosia*[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2024,36(2):308-324.

[18] Liu D, Guo H L, Yan L P, et al. Physiological, photosynthetic and stomatal ultrastructural responses of *Quercus acutissima*

seedlings to drought stress and rewatering[J]. Forests,2024,15:71.

[19] 姚泽 , 于思敏 , 王祺 , 等 . 紫花苜蓿叶片水分生理及其解剖结构的水分胁迫响应 [J]. 草地学报 ,2025,33(3):823-830.
Yao Z, Yu S M, Wang Q, et al. Water physiology and anatomical structure of *Medicago sativa* leaves in response to water stress[J]. Acta Agrestia Sinica,2025,33(3):823-830.

[20] 石俣 , 王云锦 , 李和芹 , 等 . 海南凤仙花叶片光合特性及解剖结构对干旱胁迫的响应 [J]. 亚热带植物科学 ,2025,54(4):387-397.
Shi Y, Wang Y J, Li H Q, et al. Response of photosynthetic characteristics and leaf anatomy to drought stress of *Impatiens hainanensis*[J]. Subtropical Plant Science,2025,54(4):387-397.

[21] 张敏娟 , 李昭良 , 焦锋 , 等 .8 个桑品种的植株茎叶解剖结构及与耐旱性的关联分析 [J]. 蚕业科学 ,2018,44(4):516-522.
Zhang M J, Li Z L, Jiao F, et al. Anatomical structures of stem and leaf from eight mulberry varieties and their correlationship with drought tolerance[J]. Acta Sericologica Sinica,2018,44(4):516-522.

[22] 高佩 , 何旦 , 马玉花 . 干旱胁迫对中国沙棘叶片解剖结构的影响 [J]. 高原科学研究 ,2025,9(1):23-29,42.
Gao P, He D, Ma Y H. Effects of drought stress on leaf anatomical structure of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* Rousi[J]. Plateau Science Research,2025,9(1):23-29,42.

[23] Li Z D, Yu X X, Jia G D. The anatomical structure of woody plants in arid habitats is closely related to nonstructural carbohydrates storage[J]. Forest Ecosystems,2022,9:100073.

[24] 赵明苑 , 冯顺 , 王春梅 , 等 . 不同叶龄鹊肾树叶解剖结构及其抗旱性分析 [J]. 广东农业科学 ,2016,43(8):63-68.
Zhao M Y, Feng S, Wang C M, et al. Anatomy of different ages of *Streblus asper* leaves and their drought resistance[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2016,43(8):63-68.

[25] 王朱莉 , 金喜丽阁 , 李文胜 , 等 . 干旱胁迫对 4 个苹果砧木幼苗光合特性的影响 [J]. 经济林研究 ,2025,43(1):203-211.
Wang Z L, Jin X L G, Li W S, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of seedling of four apple rootstocks[J]. Non-wood Forest Research,2025,43(1):203-211.

[26] Jiang L B, Liu H Y, Peng Z Y, et al. Root system plays an important role in responses of plant to drought in the steppe of China[J]. Land Degradation & Development,2021,32(13):3498-3506.

[27] 张永强 , 韩喆 , 于爱萍 , 等 .PEG 模拟干旱胁迫对不同苗龄伊犁绢蒿幼苗根系生理的影响 [J]. 草业科学 ,2025,42(1):129-139.
Zhang Y Q, Han Z, Yu A P, et al. Effects of PEG simulated drought stress on root physiology of *Seriphidium transiliense* seedlings at different ages[J]. Pratacultural Science,2025,42(1):129-139.

[28] 李佳欣 , 张天赐 , 任晓月 , 等 . 不同生育期马铃薯根系构型及生理指标对干旱胁迫的响应 [J]. 西北植物学报 ,2024,44(12):1848-1855.
Li J X, Zhang T C, Ren X Y, et al. Responses of potato root architecture and physiological indexes to drought stress at different growth stages[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(12):1848-1855.

[29] 李天翔 , 肖亚琴 , 曹基武 , 等 . 干旱对不同种源花榈木幼苗生长及生理生化的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(12):86-96.
Li T X, Xiao Y Q, Cao J W, et al. Effects of drought on growth and physiological and biochemical characteristics of seedlings of *Ormosia henryi* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(12):86-96.

[30] 周伟权 , 侯毅兴 , 刘春燕 , 等 . 不同葡萄砧穗组合嫁接对根系生长特性及解剖结构的影响 [J]. 新疆农业科学 ,2023,60(5):1170-1180.
Zhou W Q, Hou Y X, Liu C Y, et al. Effects of hard branch grafting on root growth characteristics and anatomical structure of different grape rootstock and scion combinations[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2023,60(5):1170-1180.

[31] Wang N, Gao J, Zhang S Q. Overcompensation or limitation to photosynthesis and root hydraulic conductance altered by rehydration in seedlings of sorghum and maize[J]. The Crop Journal,2017,5(4):337-344.

[32] Santana-Vieira D D S, Freschi L, Da Hora Almeida L A, et al. Survival strategies of citrus rootstocks subjected to drought[J]. Scientific Reports,2016,6:38775.

[33] 陆奇丰 , 骆文华 . 极小种群广西火桐幼苗对干旱复水的生理响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2024,44(4):8-16.
Lu Q F, Luo W H. Physiological response of the plant with extremely small population *Firmiana kwangsiensis* to drought stress and rehydration[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2024,44(4):8-16.

[34] 王亚茹 . 干旱胁迫及复水对蓝靛果生长发育和果实品质的影响 [D]. 哈尔滨 : 东北农业大学 ,2023:8-9.
Wang Y R. Effects of drought stress and rehydration on the growth and fruit quality of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2023:8-9.

[本文编校：张雨朦]