

基于功能性状评价 7 种核桃砧木 幼苗水分利用效率

刘丙花¹,张纪霞²,唐贵敏³,赵登超¹,梁 静¹

(1.山东省林业科学研究院,山东 济南 250014; 2.山东省蒙阴县自然资源和规划局,山东 临沂 276200; 3.山东英才学院,山东 济南 251400)

摘 要:为筛选高效用水核桃砧木,测定了干旱条件下 7 种核桃砧木幼苗的长期水分利用效率 (WUE_L) 及其水分利用相关功能性状,分析 WUE_L 与各功能性状的相关性,采用隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法对 7 种核桃砧木幼苗的水分利用效率进行综合评价。结果表明:7 种核桃砧木幼苗的 WUE_L 存在显著的种间差异 ($P<0.001$),其中鸡爪绵和香玲较高,分别为 $66.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $60.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,核桃楸和麻核桃居中,分别为 $52.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $47.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,黑核桃、铁核桃和枫杨较低,分别为 41.88 、 $37.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $32.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 WUE_L 与比叶面积 (SLA) 呈显著负相关性,与其他 13 个功能性状呈显著或极显著正相关性。隶属函数分析发现 7 种核桃砧木幼苗的隶属函数值分别为麻核桃 0.479,铁核桃 0.217,黑核桃 0.170,核桃楸 0.502,枫杨 0.167,鸡爪绵 0.991,香玲 0.700,由此判断 7 种核桃砧木的水分利用效率为:鸡爪绵>香玲>核桃楸>麻核桃>铁核桃>黑核桃>枫杨。主成分分析提取了株高、叶绿素含量和 SLA 作为水分利用效率的核心评价指标;7 种核桃砧木的综合评价指数分别为麻核桃-0.175、铁核桃-3.197、黑核桃-3.158,核桃楸 1.041、枫杨-3.801、鸡爪绵 5.875、香玲 3.414,由此判断 7 种核桃砧木水分利用效率由高到低依次为鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、黑核桃、铁核桃和枫杨。聚类分析将 7 种核桃砧木聚为 3 组:第 1 组为鸡爪绵和香玲,干旱条件下生长表现较好, WUE_L 较大;第 2 组是核桃楸和麻核桃,干旱条件下生长表现中等, WUE_L 居中;第 3 组是黑核桃、铁核桃和枫杨,干旱条件下生长表现较差, WUE_L 较低。3 种方法评价结果基本一致,且与各砧木幼苗的生长和形态表现一致;鸡爪绵和香玲实生幼苗 WUE_L 较高,生长表现好,适合在干旱、半干旱核桃适生区广泛种植。

关键词:核桃砧木;水分利用效率;比叶面积;干旱;相关功能性状

中图分类号:S664.1 **文献标志码:**A

Evaluation of water use efficiency of seven walnut rootstock seedlings based on functional traits

LIU Binghua¹, ZHANG Jixia², TANG Guimin³, ZHAO Dengchao¹, LIANG Jing¹

(1. Shandong Academy of Forestry, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Natural Resources and Planning Bureau of Mengyin County, Shandong Province, Linyi, Shandong 276200, China;

3. Shandong Yingcai University, Jinan, Shandong 251400, China)

Abstract: In order to select walnut rootstock with high water use efficiency (WUE), the long-term WUE (WUE_L) and the fourteen water use functional traits of 7 types of walnut rootstock under drought condition were measured. Correlation relationship between WUE_L and the functional traits were analyzed. Comprehensive evaluation of the WUE of the 7 types of walnut rootstock were carried out using subordinate function coefficient analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. The results showed that there were significant interspecific differences in WUE_L among 7 types of walnut rootstock seedlings ($P<0.001$). Jizhuamian and Xiangling showed higher WUE_L which was $66.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $60.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Manchurian walnut and Ma walnut had the medium WUE_L which was $52.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $47.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Black walnut, Iron walnut, and Chinese wingnut had lower WUE_L which was 41.88 , $37.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $32.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. WUE_L was negatively correlated with specific leaf area (SLA), and positively correlated with other 13 functional traits. The results from subordinate function coefficient analysis showed that subordinate function values of Ma walnut, Iron walnut, Black

walnut, Manchurian walnut, Chinese wingnut, Jizhuamian, and Xiangling were 0.479,0.217,0.170,0.502,0.167, 0.991, and 0.700, respectively, suggesting that *WUE* of the analyzed walnut rootstocks from highest to lowest were Jizhuamian, Xiangling, Manchurian walnut, Ma walnut, Iron walnut, Black walnut, and Chinese wingnut. Three functional traits of plant height, leaf chlorophyll content, and *SLA* were selected as core evaluation indicators of *WUE* based on the PCA results. Synthetic analysis indexes of Ma walnut, Iron walnut, Black walnut, Manchurian walnut, Chinese wingnut, Jizhuamian, and Xiangling were -0.175, -3.197, -3.158, 1.041, -3.801, 5.875, and 3.414, respectively, suggesting that the *WUE* of the analyzed walnut rootstocks from PCA were in descending order as Jizhuamian, Xiangling, Manchurian walnut, Ma walnut, Black walnut, Iron walnut, and Chinese wingnut. Cluster analysis divided the studied species into three groups. The first group including Jizhuamian and Xiangling had the higher *WUE_L* and the better growth performance under drought condition. The second group included Manchurian walnut, Ma walnut which were characterized by the moderate *WUE_L* and growth performance under drought condition. The third group consisting of Black walnut, Iron walnut, and Chinese wingnut had the lowest *WUE_L* and the worst growth performance under drought condition. The *WUE* evaluation results from the three evaluation methods for the 7 kinds of walnut rootstock seedlings were the same and consistent with the growth and morphological performance of each rootstock seedlings at the end of the drought treatment. The results from this study provide an important reference for selecting walnut rootstock with high *WUE*.

Keywords: walnut rootstock; water use efficiency; specific leaf area; drought; water use functional traits

随着全球气候变化的加剧及人口增长与工农业生产规模的迅速扩大,日益严重的淡水资源短缺已经成为世界许多地区农林产业发展的主要限制因子之一。发展节水农业是实现有限水资源高效利用的必由之路,在节水抗旱工程技术成本较高的情况下,发展生物节水技术,提高植物水分利用效率(*WUE*),是实现节水农业和农业可持续发展的重要战略措施^[1-3]。*WUE* 是指植物消耗单位水分所生产干物质的量,反映了植物-土壤-大气之间的碳水循环关系,是评价植物对生境适应程度的重要特征参数之一,已成为揭示陆地植被生态系统对全球变化响应和适应对策的重要手段^[4-5]。植物不同种质资源间形态结构和 CO₂同化方式等的不同引起水分吸收利用和产量形成的差异,最终导致不同种质资源间 *WUE* 的差异^[6-8]。选择高 *WUE* 的优良作物品种是实现干旱条件下作物丰产稳产和提高农田 *WUE* 的根本途径^[1,9]。

核桃(*Juglans regia* L.)是世界四大坚果之一,广泛种植于我国西北、西南及华北各省、自治区,在调整农村产业结构、增加农民收入和保障生态安全等方面发挥着重要作用^[10]。目前,我国核桃多种植在土壤相对贫瘠的丘陵山地,水资源匮乏直接影响核桃建园成活率、树体生长发育及坚果产量和品质的形成,严重制约了我国核桃产业的高水平发展。筛选高效用水优良核桃砧木,把优良的核桃品种嫁接在水分高效利用的砧木上,提高核桃树体 *WUE*,是实现干旱、半干旱核桃栽培区有限水资源的高效

利用,提升我国核桃产业化发展水平的重要途径之一。本研究以我国常用的 7 种核桃砧木实生幼苗为试验材料,在温室条件下开展盆栽控水试验,通过测定干旱条件下不同核桃砧木实生幼苗的长期水分利用效率(*WUE_L*)和水分利用相关功能性状,分析 *WUE_L*与各水分利用功能性状间的相关性,并分别采用模糊数学隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法对 7 种核桃砧木实生幼苗的水分利用特性进行综合评价,以期核桃砧木高效用水种质资源的选育提供科学理论依据和现实材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018—2019 年在山东省济南市山东省林业科学研究院实验室及苗木生产繁育基地进行(36°40'N,117°00'E)。选择大小均匀且无虫害的 7 种核桃砧木种子(砧木特性及来源见表 1)分别置于 50 L 水桶中,注入清水(水面高于种子)浸种 7~10 d,每天换水 1 次。在晴天将种子取出平摊于室外水泥地面暴晒使其开裂,将裂口的种子与河沙按体积比 1:5 混匀,置于温室,每天喷水保持湿度 65%~75%,进行催芽。待种子长出白色嫩根,将其播种于轻基质无纺布容器内,置于温室进行常规水肥管理。待幼苗长至 3~4 片功能叶片时,选取长势均匀一致的幼苗移栽至塑料盆(底径、口径、高分别为 23、38、40 cm;盆土为园区表土、沙和草炭按体积比 5:1:1 混匀,pH = 7.16)中,置于温室进行常规水肥管理。

表 1 7 种核桃砧木种质资源特性及来源

Table 1 Origins and principal characteristic description for the seven walnut rootstock species used in the study	
砧木名称 Rootstock	主要特性及来源 Principal characteristics and origins
麻核桃 Ma walnut	中国本土核桃种质资源,属于胡桃科胡桃属,主要分布在中国北方的河北、北京、天津的部分山区。 It is a Chinese native walnut germplasm resource and belongs to <i>Juglandaceae</i> family and <i>Juglans</i> L.genus. It is narrowly distributed in Northern China in the hilly, mid-elevation area between Hebei Province, Beijing, and Tianjin.
铁核桃 Iron walnut	中国本土核桃种质资源,属于核桃科核桃属,主要分布在中国的云南省、西藏东南部和四川南部等海拔较高地区。极端最低气温-2℃,在北方地区不能越冬。 It is a Chinese native walnut germplasm resource and belongs to <i>Juglandaceae</i> family and <i>Juglans</i> L.genus. It distributes mainly in Yunnan Province, southeastern Tibet and southern Sichuan and other higher elevations in China. It could not over-winter safely in the northern China.
黑核桃 Black walnut	起源于美国,广泛分布在美国的东部和加拿大南部。广泛被用作核桃砧木,以促进核桃树体生长,提高生产力、干旱和土传病害的抗性。 It originated in the United States, widely distributed in the eastern United States and southern Canada. It was widely used as rootstock to promote walnut growth, productivity, and resistance to drought and soil-borne diseases.
核桃楸 Manchurian walnut	中国本土核桃种质资源,属于胡桃科胡桃属,主要分布在中国的北方和东北地区。喜光、耐寒,能耐-40℃严寒。根系发达,生长旺盛,常用于砧木以增强核桃树体的耐寒性,促进生长。 It is a Chinese native walnut germplasm resource and belongs to <i>Juglandaceae</i> family and <i>Juglans</i> L.genus. It is one of the rare tree species in Northern China and Northeast China, and is often been used as vigorous rootstock to enhance drought and cold tolerance (-40℃), and to improve plant growth.
枫杨 Chinese wingnut	中国本土种质资源,属于胡桃科枫杨属枫杨,产于中国长江流域和淮河流域。喜光,耐湿性强,在中国常作为核桃砧木用于增强对疫霉病和涝害的抗性。 It is a Chinese native walnut germplasm resource and belongs to <i>Juglandaceae</i> family and <i>Pterocarya</i> genus. It is often been used as walnut rootstock to enhance resistant to <i>phytophthora</i> and waterlogging injury.
鸡爪绵 Jizhuamian	中国本土特有野生核桃种质资源,属于胡桃科核桃属普通核桃,原产泰山山脉,集中分布在鲁中山区的济南、泰安一带。适应性强,抗病、抗寒、抗旱能力强,它最适合中国山东省济南市南山区的土壤和气候,常被当地农民用作砧木。 It belongs to <i>Juglandaceae</i> family and <i>Juglans</i> L.genus. It is a unique wild walnut group resource in China, with strong adaptability and high resistance to disease, cold and drought. It best adapted to soil and climate of south mountain region in Jinan City, Shandong Province, China, and often been used as rootstock by local farmers.
香玲 Xiangling	中国优良核桃品种,是山东果树研究所于 20 世纪 80 年代选育的早熟核桃品种,亲本为上宋 5 号 × 阿克苏 9 号。目前已在中国北方和西北地区广泛种植,常被用作本砧进行嫁接繁殖。 An early-bearing walnut variety bred by Shandong Institute of Pomology in 1980s and its parents were Shangsong No.5 × Aksu No.9. It was now widely planted in Northern China and Northwest China. It always been used as self-rooted rootstock in China.

1.2 试验设计

移栽缓苗 2 周后,每种核桃砧木选取长势均匀一致的 30 盆植株用于试验。其中,对照组 15 盆植株进行正常供水,保持盆中土壤相对含水量为饱和含水量的 65%~75%;处理组 15 盆植株进行干旱胁迫,保持盆中土壤含水量为饱和含水量的 45%~55%。试验处理 5 月 20 日开始,7 月 21 日结束,期间每天 18:00 采用土壤温湿度检测仪(ZTS-II,浙江托普仪器有限公司)测定土壤含水量,进行浇水并记录浇水量。为减少表层土的水分蒸发,每盆表面覆盖 2~3 cm 细沙,采用称重法测定不同处理的土壤表面蒸发失水量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标 试验结束时,对不同处理的核桃砧木幼苗进行生长指标测定。株高(PH)用米尺(1 mm)从土壤表面至主干顶芽测定,地径(BD)和叶片厚度(LT)用电子游标卡尺(0.001 mm)分别在主干的土壤表面接触处和主脉两侧避开大侧脉测定。将不同处理的不同核桃砧木幼苗分别拔出、洗净,

分为叶片、枝干和根系 3 部分,记录一级侧根数(NRL),用电子天平(0.01 g)分别称量地上部鲜重和根系鲜重,计算根冠比(RSR=根系鲜重/地上部鲜重);用叶面积扫描仪(YMJ-CH,浙江托普仪器有限公司)累计测定总叶面积(TLA),用直尺(1 mm)测量主根长度(ARL)。之后烘干至恒重,用电子天平(0.01 g)称量各部分干重,以各部分总干重(TDB)表示生物量。

比叶面积(SLA)=总叶面积(cm²)/叶片总干重(g)

1.3.2 叶片叶绿素含量(C_{chl})、相对含水量(RWC)和保水力(WHC) 试验结束时,在晴天18:00—19:00 对不同处理的砧木苗从顶端数第 3~4 个成熟叶片进行取样,置于冰盒,带回实验室。叶绿素含量采用 95% 乙醇浸提比色法测定^[11],RWC 和 WHC 采用称重法测定^[10]。

1.3.3 长期水分利用效率(WUE_L) WUE_L为试验期间植株生物产量与其蒸腾水分总量之比,在试验开始和结束时,分别选择不同处理的植株 3 棵,拔出、洗净,烘干至恒重,用电子天平(0.01 g)称量干

物质量。试验周期内的总浇水量减去土壤表面蒸发失水总量即为蒸腾水分总量。

$$WUE_L = (W_F - W_I) / W_W$$

式中, W_I 和 W_F 分别为处理开始和结束时植株的干物质重(g); W_W 为植株的蒸腾失水总量(kg)。

1.3.4 叶片净光合速率(P_n)和光系统Ⅱ的最大光化学效率(F_v/F_m) 处理结束时,在晴天9:00—11:00 采用 Li-6400 XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)进行叶片光合参数测定,得到 P_n ;采用 FMS-2 型脉冲调制式荧光仪(英国 Hansatech 公司)测定叶绿素荧光参数得到初始荧光参数(F_o)与暗适应(20 min)后的最大荧光参数(F_m)。 $F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m$ 。

1.4 数据分析

不同处理的每个砧木至少重复测定 6 株,取平均值。采用 Microsoft Office Excel 2010 和 IBM.SPSS Statistics 20.0 进行数据处理和统计分析,采用 Sigma Plot 10.0 软件进行作图。采用 Duncan 法进行样本之间的多重比较($P = 0.05$);采用 One-way ANOVA 分析核桃砧木对功能指标的影响;采用 Pearson 相关系数进行相关性分析;基于 14 个水分利用相关功能性状,分别采用模糊数学隶属函数法、主成分分析法和系统聚类分析法对 7 种核桃砧木幼苗的 WUE 进行综合评价。

2 结果与分析

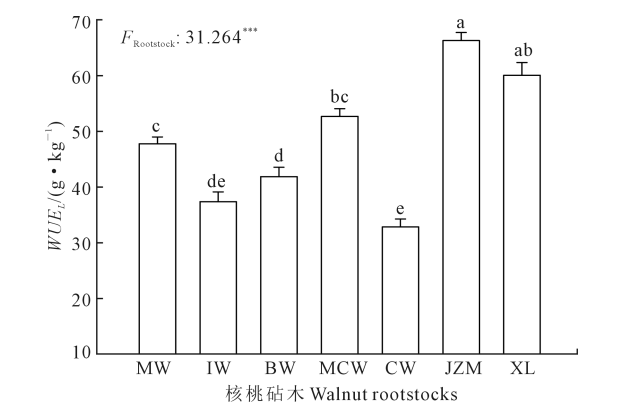
2.1 干旱条件下不同核桃砧木幼苗的长期水分利用效率(WUE_L)

由图 1 可看出,在干旱条件下,7 种核桃砧木幼苗的 WUE_L 存在显著差异($P < 0.001$)。 WUE_L 由高到低的顺序依次为鸡爪绵(66.26 g · kg⁻¹)、香玲(60.05 g · kg⁻¹)、核桃楸(52.67 g · kg⁻¹)、麻核桃(47.78 g · kg⁻¹)、黑核桃(41.88 g · kg⁻¹)、铁核桃(37.38 g · kg⁻¹)和枫杨(32.85 g · kg⁻¹)。

2.2 干旱条件下核桃砧木幼苗水分利用相关功能性状及其与 WUE_L 的相关性

在干旱条件下,7 种核桃砧木的 14 个水分利用相关功能性状的平均值、标准方差、变异系数和方差分析如表 2 所示。单因素方差分析结果表明,砧木类型对核桃砧木幼苗的 14 个高效用水性能指标均存在显著影响($P < 0.01$)。干旱条件下,7 种核桃砧木 14 个功能性状指标均存在不同程度差异,除 F_v/F_m (变异系数为 8.397%)外,其他 13 个功能性状的变异系数均 > 10.00%。其中 PH 、 BD 、 TDB 、 RSR 、 ARL 、 NLR 、 TLA 、 SLA 和 C_{chl} 的变异系数 > 20.00%,存在

较大的种间差异。Pearson 相关性分析表明 WUE_L 与 PH 、 BD 、 TDB 、 RSR 、 ARL 、 NLR 、 TLA 、 LT 、 RWC 、 WHC 、



注:MW—麻核桃,IW—铁核桃,BW—黑核桃,MCW—核桃楸,CW—枫杨,JZM—鸡爪绵,XL—香玲; $F_{Rootstock}$:砧木种类对 WUE_L 的影响;不同小写字母表示不同核桃砧木幼苗同一指标间在 0.05 水平上的差异显著;***:在 0.001 水平上影响显著。下同。

Note:MW— Ma walnut, IW— Iron walnut, BW— Black walnut, MCW— Manchurian walnut, CW— Chinese wingnut, JZM— Jizhuamian, XL— Xiangling; $F_{Rootstock}$: effect of rootstock species on WUE_L ; Lowercases letters show statistically significant differences at 0.05 level among different walnut rootstocks for each parameter; ***: significant effect at 0.001 level.The same below.

图 1 干旱条件下 7 种核桃砧木实生幼苗的长期水分利用效率 (WUE_L)

Fig.1 WUE_L of the seven walnut rootstock seedlings under drought condition

表 2 干旱条件下 7 种核桃砧木幼苗水分利用相关功能性状的平均值、标准方差、变异系数和方差分析

Table 2 Mean, standard deviation, coefficient of variation and one-way ANOVA for the water-use related functional traits of the seven walnut rootstock species under drought condition

指标 Parameter	平均值 Mean	标准方差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	$F_{砧木}$ $F_{Rootstock}$
PH/cm	52.356	12.430	23.741	20.507***
BD/mm	9.510	1.992	20.947	18.124***
TDB/g	48.894	11.318	23.148	20.150***
RSR	1.201	0.431	35.909	18.272***
ARL/cm	21.204	7.755	36.571	13.920**
NLR	26.326	9.244	35.113	12.148**
TLA/dm^2	13.057	4.227	32.372	16.735**
LT/mm	0.257	0.040	15.516	52.374***
$SLA/(cm^2 \cdot g^{-1})$	101.153	21.179	20.938	16.183**
$RWC/\%$	66.090	6.768	10.240	13.196**
$WHC/\%$	265.566	38.152	14.366	15.472**
$C_{chl}/(mg \cdot g^{-1})$	2.109	0.540	25.618	16.280***
$P_n/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	13.231	2.025	15.303	24.356***
F_v/F_m	0.721	0.061	8.397	13.226**

注:***和**为在 0.01 和 0.001 水平上影响显著。
Note: ** and ***: significant effectsat 0.01 and 0.001 level, respectively.

C_{chl} 、 P_n 和 F_v/F_m 均呈正相关性,与 SLA 呈负相关性(表 3)。

2.3 7 种核桃砧木幼苗水分利用效率的综合评价

2.3.1 模糊数学隶属函数评价法 植物 WUE 是一个复合性状,单一指标不能说明水分利用能力的高低。本研究基于干旱条件下 14 个水分利用相关功

能性状的变化及其与 WUE_L 的相关性分析(表 3),采用模糊数学隶属函数法对 7 个核桃砧木水分利用性能进行综合评价,结果见表 4。根据各指标隶属函数平均值的大小对不同核桃砧木的水分利用能力进行排序,由高到低的顺序为:鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、铁核桃、黑核桃和枫杨。

表 3 干旱条件下 7 种核桃砧木实生幼苗的 WUE_L 与其水分利用相关功能性状的相关性
Table 3 Pearson correlation coefficients between WUE_L and water-use related functional traits of the seven walnut rootstock seedlings

指标 Parameter	PH	BD	TDB	RSR	ARL	NLR	TLA	LT	SLA	RWC	WHC	C_{chl}	P_n	F_v/F_m
WUE_L	0.744***	0.663**	0.545*	0.762***	0.544*	0.474*	0.360	0.680**	-0.595*	0.444	0.600**	0.779***	0.556*	0.566*

注:*,**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关。下同。
Note: *, ** and *** indicate significant correlation at 0.05, 0.01 and 0.001 level, respectively. The same below.

表 4 干旱条件下不同核桃砧木幼苗各测定指标的隶属函数值
Table 4 Subordinate function values of the seven walnut rootstock seedlings under drought condition

砧木 Rootstock	PH	BD	TDB	SRS	ARL	NLR	TLA	LT	SLA	LAR	RWC	WHC	C_{chl}	P_n	F_v/F_m	平均值 Mean
麻核桃 Ma walnut	0.449	0.386	0.447	0.165	0.208	0.000	0.660	0.462	0.843	0.661	0.62	0.57	0.465	0.754	0.500	0.479
铁核桃 Iron walnut	0.409	0.411	0.135	0.135	0.000	0.145	0.165	0.000-0.107	0.440	0.295	0.493	0.358	0.381	0.000		0.217
黑核桃 Black walnut	0.508	0.000	0.270	0.000	0.091	0.352	0.000	0.154	0.539	0.369	0.000	0.000	0.000	0.267	0.000	0.170
核桃楸 Manchurian walnut	0.558	0.550	0.593	0.436	0.821	0.819	0.2100	0.385	0.000	0.000	0.126	0.586	0.673	0.777	1.000	0.502
枫杨 Chinese wingnut	0.000	0.310	0.000	0.241-0.016	0.073	0.029	0.385	0.421	0.316	0.276	0.258	0.069	0.000	0.143		0.167
鸡爪绵 Jizhuamian	1.000	0.860	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991
香玲 Xiangling	0.671	1.000	0.814	0.662	0.546	0.307	0.697	0.692	0.89	0.711	0.752	0.229	0.774	0.83	0.929	0.700

2.3.2 主成分分析评价法 将反映核桃砧木水分利用能力的 14 个功能性状转化为 14 个主成分,进行主成分分析,结果如表 5 所示,主成分分析提取了特征值大于 1 的 3 个主成分,累计方差贡献率为 77.487%。主成分因子负荷大于 0.600 的视为显著。主成分 1(PC_1)主要包括 PH 、 TDB 、 RSR 、 ARL 、 NLR 和 TLA ,是反映水分高效利用的植株生长、生物量积累与分配及根系形态指标,方差贡献率为 53.133%;主成分 2(PC_2)主要包括 C_{chl} 、 P_n 和 F_v/F_m ,是反映水分高效利用的叶片光合生理指标,方差贡献率为 15.227%;主成分 3(PC_3)主要包括 LT 、 SLA 、 RWC 和 WHC ,是反映水分高效利用的叶片形态与水分生理指标,方差贡献率为 9.127%。综合考虑各指标的测定难度、变异系数(表 2)及其相关性(表 6),最终选择 PH 、 C_{chl} 和 SLA 作为评价不同核桃砧木幼苗 WUE 的核心指标。

表 5 3 个主成分的特征值、方差贡献率、
累计方差贡献率和原始变量间的相关性
Table 5 Eigenvalues, proportion of total variability, as well as correlations between the original variables and the first 3 principal components

变量 Variable	PC_1	PC_2	PC_3
PH	0.849	0.286	0.105
BD	0.461	0.239	0.066
TDB	0.835	0.038	0.184
RSR	0.699	0.184	0.491
ARL	0.848	0.281	0.102
NLR	0.810	0.328	0.132
TLA	0.780	0.074	0.126
LT	0.521	0.414	0.704
SLA	-0.056	-0.348	-0.680
RWC	0.565	0.428	0.669
WHC	0.404	-0.224	0.828
C_{chl}	0.309	0.923	0.096
P_n	0.344	0.730	0.135
F_v/F_m	0.247	0.788	-0.018
特征值 Eigenvalues	8.409	2.589	1.552
方差贡献率 Variance contribution rate/%	53.133	15.227	9.127
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	53.133	68.360	77.487

表 6 干旱条件下 7 种核桃砧木实生幼苗各测定变量间的相关性

	<i>PH</i>	<i>BD</i>	<i>TDB</i>	<i>SRS</i>	<i>ARL</i>	<i>NLR</i>	<i>TLA</i>	<i>LT</i>	<i>SLA</i>	<i>RWC</i>	<i>WHC</i>	<i>C_{chl}</i>	<i>P_n</i>
<i>BD</i>	0.395												
<i>TDB</i>	0.718 **	0.533 *											
<i>SRS</i>	0.408	0.643 **	0.481										
<i>ARL</i>	0.619 *	0.659 **	0.710 **	0.684 **									
<i>NLR</i>	0.706 **	0.394	0.651 **	0.540 *	0.713 **								
<i>TLA</i>	0.553 *	0.593 *	0.683 **	0.480	0.684 **	0.572 *							
<i>LT</i>	0.448	0.467	0.632 **	0.386	0.588 *	0.545 *	0.599 *						
<i>SLA</i>	-0.285	-0.379	-0.496	-0.508 *	-0.462	-0.328	-0.608 **	-0.694 **					
<i>RWC</i>	0.279	0.429	0.461	0.554 *	0.442	0.284	0.497	0.500 *	-0.572 *				
<i>WHC</i>	0.366	0.431	0.306	0.399	0.528 *	0.416	0.402	0.322	-0.236	0.43			
<i>C_{chl}</i>	0.653 **	0.719 **	0.749 **	0.604 **	0.873 ***	0.641 *	0.793 **	0.664 **	-0.520 *	0.439	0.461		
<i>P_n</i>	0.604 **	0.523 *	0.598 *	0.445	0.605 **	0.5678	0.581 *	0.619 **	-0.318	0.306	0.411	0.697 **	
<i>F_v/F_m</i>	0.332	0.602 **	0.476	0.494	0.590 *	0.471	0.441	0.539 *	-0.247	0.306	0.408	0.646 **	0.436

将高效水分利用主要性能指标原始数据标准化后,计算 3 个主成分的得分,以所选主成分对应的特征值占 3 个特征值总和的比例为权重,计算出不同核桃砧木的综合评价得分值(*Y*),各得分值与相应特征值的方差贡献百分率的乘积累加得出不同核桃砧木的综合评价指数(*S*),以此来评价不同核桃砧木的水分利用情况(表 7)。由表 7 可知,7 种核桃砧木幼苗水分高效利用综合排名由高到低依次为鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、黑核桃、铁核桃和枫杨。

2.3.3 聚类分析法 基于干旱条件下 14 个水分利用相关功能性状,采用 IBM. SPSS Statistics 20.0 Pearson 相关性方法对 7 种核桃砧木进行聚类分析,得到聚类树状图(图 2),以此综合评价 7 种核桃砧木的水分高效利用能力。由图 2 可见,当距离为 10 时,将 7 种核桃砧木聚为 3 组,第 1 组为鸡爪绵和香玲,干旱条件下具有较好的生长表现,*WUE_L*较大;第 2 组是核桃楸和麻核桃,干旱条件下生长表现中等,*WUE_L*居中;第 3 组是铁核桃、黑核桃和枫杨,干旱条件下生长表现最差,*WUE_L*较低。

3 讨 论

植物 *WUE* 是一个由多基因控制的可遗传的复合性状,反映植物在不同生境下的水分有效利用能力,是衡量植物生长和生境(尤其是水分亏缺)适应能力的重要指标;不同物种间及同一物种的不同品种间具有遗传特征决定的 *WUE* 差异,且对外界环境变化的响应敏感度存在差异^[6-8]。本研究采用直接测定法对于干旱条件下 7 种核桃砧木幼苗的 *WUE_L*进行了测定,结果表明:干旱条件下 7 种核桃砧木实生幼苗的 *WUE_L*存在显著的种间差异($P<0.001$),*WUE_L*由高到

表 7 干旱条件下 7 种核桃砧木实生幼苗的主成分值与综合评价指数值

Table 7 Values of principal components and synthetic analysis indexes of the seven rootstock seedlings under drought condition

砧木 Rootstock	<i>Y</i>			<i>S</i>
	<i>Y₁</i>	<i>Y₂</i>	<i>Y₃</i>	
麻核桃 Ma walnut	-0.462	0.125	0.838	-0.175
铁核桃 Iron walnut	-5.022	-4.037	-2.462	-3.197
黑核桃 Black walnut	-4.624	-5.903	-2.510	-3.158
核桃楸 Manchurian walnut	1.806	1.240	-0.395	1.041
枫杨 Chinese wingnut	-6.237	-3.646	-2.382	-3.801
鸡爪绵 Jizhuamian	9.172	8.044	4.141	5.875
香玲 Xiangling	5.366	4.178	2.771	3.414

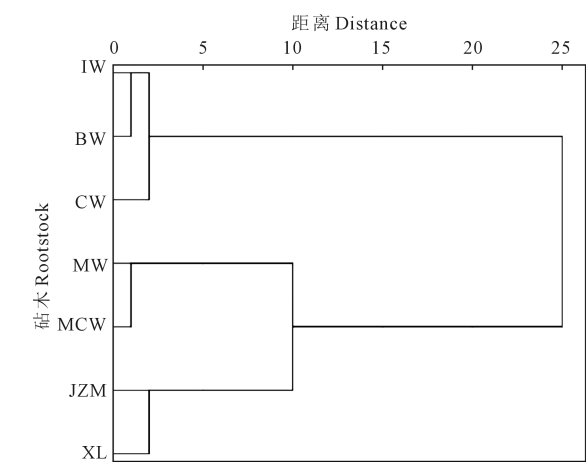


图 2 基于干旱条件下 7 个核桃砧木实生幼苗水分高效利用反映指标的聚类分析

Fig.2 Cluster analysis for the seven walnut rootstock species based on the high water use efficiency characteristics under drought condition

低的顺序依次为鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、黑核桃、铁核桃和枫杨。*WUE* 是评价植物不同种质间抗旱性差异的重要指标,高 *WUE* 是植物具有较强抗

旱能力的重要原理^[1],鸡爪绵和香玲的 WUE_L 较高,表明两者具有较强的抗旱性,与前期研究结果一致^[12-13]。

WUE_L 比叶片水平的瞬时水分利用效率 (WUE_I) 更能准确地反映较长时间内的植物 WUE ,但用水量和生物产量的测定工作细致而繁琐,成本高且误差大;稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}C$) 克服了 WUE_I 和 WUE_L 的缺点,测定方法快速、准确度高,是目前国际公认的评价植物 WUE 较为准确可靠的参数,但是 $\delta^{13}C$ 的测定需要稳定同位素质谱仪,价格昂贵,测定费用较高^[14]。近年来,越来越多的学者致力于研究作物生物学性状、农艺性状、产量性状等与水分利用相关的植物功能性状,了解这些性状与 WUE 的关系,以确定某一个或某几个简单易测的功能性状作为高效用水核心评价指标来评价作物 WUE ^[8,15-17]。植物功能性状是植物与外界环境长期相互作用下形成的形态结构和生理生态等特征,是植物对生长环境响应和适应的表征,具有较强的可塑性,且简单易测,常用于反映植物生长和环境适应性^[18-20]。资源竞争(如水分亏缺)是影响植物功能性状的重要因子,通过逆境条件下植物功能性状的改变可以揭示植物对逆境的适应机理,评估不同植物的逆境适应能力^[21-23]。 PH 和 TDB 是反映植物生长状况的主要功能性状。合理分配生物量是逆境条件下植物获取资源、赢得竞争和成功繁殖的重要策略, RSR 能反映植物对资源获取的竞争能力^[22-23]。干旱条件下,植物通过调节 RSR 以响应资源竞争,保证有限水资源的最大化吸收,促进植株生长和生产,实现有限水资源的高效利用。叶片是植物进行光合作用和蒸腾作用的主要器官,是连接植物与外界环境的重要桥梁,对外界环境变化十分敏感。与碳水通量相关的叶片功能性状主要包括 TLA 、 LT 、 SLA 、叶解剖结构、叶气孔密度、叶氮/磷含量、叶片光合色素含量、 RWC 、叶片光合和荧光参数等;水分亏缺条件下,植物会通过改变这些叶片功能性状来平衡碳的吸收和水分的损失,优化水分利用策略,提高 WUE ^[18,20,24]。根是植物获取地下资源(土壤水分及溶解其中的无机盐)的主要植物器官,并具有支撑、繁殖、贮存和合成有机物质的作用。与碳水通量相关的根功能性状主要包括根长、根粗度、比根长、根解剖结构、根分级特征、根碳氮磷含量、菌根真菌特征等;干旱条件下,植物通过改变这些根功能性状来增加土壤的碳输入和固定,提高根系对土壤水分的有效吸收,以提高植物对土壤有限水资源的利用效率^[18,20,23,25]。植物水分利用相关功能性

状均能不同程度地反映植物对有限水资源的获取能力和对干旱生境的适应能力,其中叶片功能性状具有测量简单、可操作性强、能较好反映植物的生理功能以及环境适应能力。本研究测定了干旱条件下7种核桃砧木实生幼苗的14个水分利用相关功能性状指标,分析了它们与 WUE_L 相关性。结果表明, WUE_L 与 PH 、 BD 、 TDB 、 RSR 、 ARL 、 NLR 、 LT 、 WHC 、 C_{chl} 、 P_n 和 F_v/F_m 均呈显著或极显著正相关性,与 SLA 呈显著负相关性。干旱条件下14个功能指标均存在不同程度的种间差异,其中 PH 、 BD 、 TDB 、 RSR 、 ARL 、 NLR 、 TLA 、 SLA 和 C_{chl} 变异系数 > 20.00%,存在较大的种间差异,表明这些功能性状的可塑性强,能较好地反映不同核桃砧木幼苗对有限水资源的获取和利用能力,反映不同核桃砧木幼苗对干旱的适应策略^[20,23,26],研究结果与其他物种的研究一致^[27-29]。

基于多指标的模糊数学隶属函数评价法、主成分分析法和系统聚类分析法消除了种间或品种(系)间的固有差异,可较准确反映不同植物种间及种内不同品种(系)的差异,评价结果客观可靠,目前已成为作物种质资源及其抗逆性综合评价的主要方法^[10,12,30]。本研究基于干旱条件下14个水分利用相关功能性状的综合分析,分别采用模糊数学隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法对7种核桃砧木幼苗的高效用水性能进行了综合评价,消除了不同砧木品种间的固有差异,可真实反映不同砧木的 WUE ,使评价结果更加准确、可靠。根据各功能性状隶属函数平均值的大小对不同核桃砧木的水分利用能力进行排序, WUE 由高到低的顺序为:鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、铁核桃、黑核桃和枫杨。主成分分析法从14个水分利用相关功能性状中提取了3个主成分,反映所有高效用水功能性状指标的77.487%信息,综合考虑3个主成分的主要特征指标的测定难易程度、变异系数及其相关性,最终选择 PH 、 C_{chl} 和 SLA 作为评价不同核桃砧木幼苗 WUE 的核心指标。将高效用水主要性能指标原始数据标准化后,计算3个主成分的得分,以所选主成分对应的特征值占3个特征值总和的比例为权重,计算出不同核桃砧木的综合评价得分值,各得分值与相应特征值的方差贡献百分率的乘积累加得出不同核桃砧木的综合评价指数,以此来评价不同核桃砧木幼苗的 WUE 。依据综合评价指数明确了7种核桃砧木幼苗 WUE 由高到低依次为鸡爪绵、香玲、核桃楸、麻核桃、黑核桃、铁核桃和枫杨。在模糊数学隶属函数评价法和主成分分析评价法的

基础上,根据核桃砧木的主要高效用水性能指标,对 7 种核桃砧木进行系统聚类分析,将其聚为 3 组。第 1 组为鸡爪绵和香玲,干旱条件下具有较好的生长表现, WUE_L 较大;第 2 组是核桃楸和麻核桃,干旱条件下生长表现中等, WUE_L 居中;第 3 组是黑核桃、铁核桃和枫杨,干旱条件下生长表现最差, WUE_L 较低。3 种评价方法对 7 种核桃砧木幼苗 WUE 的评价结果基本一致,且评价结果与干旱结束时各砧木幼苗的生长状况和形态表现基本一致,说明这 3 种评价方法均可较准确地反映不同核桃砧木实生幼苗的水分利用特性,可为核桃高效用水砧木筛选提供参考。

4 结 论

干旱条件下,鸡爪绵和香玲核桃实生幼苗具有较好的生长表现, WUE_L 较大,且种子易获得,适合在干旱、半干旱核桃种植区广泛应用;铁核桃、黑核桃和枫杨实生幼苗生长表现差, WUE_L 较低,且种子不易获得,不适宜在干旱、半干旱核桃栽培区应用。本研究基于多个水分利用相关功能性状的模糊数学隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法均能准确反映核桃砧木实生幼苗的 WUE ; PH ; C_{chl} 和 SLA 简单易测,可作为筛选核桃砧木实生幼苗的水分高效利用有效的形态和生理指标。研究结果可为核桃砧木高效用水综合评价提供了较为准确的评价方法,为植物水分高效利用育种提供简单有效的功能性状标记,也为进一步研究植物水分高效利用基因的 QTL 定位和克隆提供依据。

参 考 文 献:

[1] LEAKEY A D B, FERGUSON J N, PIGNON C P, et al. Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C_3 and C_4 crops[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, 70: 781-808.

[2] HATFIELD J L, DOLD C. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 103.

[3] RUGGIERO A, PUNZO P, LANDI S, et al. Improving plant water use efficiency through molecular genetics [J]. *Horticulturae*, 2017, 3 (2): 31.

[4] 史晓亮,吴梦月,张娜.中国典型陆地生态系统水分利用效率及其对气候的响应[J].*农业工程学报*,2020,36(9):152-159.

SHI X L, WU M Y, ZHANG N. Characteristics of water use efficiency of typical terrestrial ecosystems in China and its response to climate factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 152-159.

[5] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].*生态学报*,2018,38(23):8296-8305.

DU X Z, ZHAO X, WANG H Y, et al. Responses of terrestrial ecosys-

tem water use efficiency to climate change: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8296-8305.

[6] 唐晓培,杨丽,冯冬雪,等.非充分灌溉下 8 个小麦品种旗叶光合与产量及水分利用效率的关系[J].*干旱地区农业研究*,2020,38(4): 245-252,265.

TANG X P, YANG L, FENG D X, et al. Relationship between flag leaves photosynthesis and yield, water use efficiency of eight wheat varieties under deficit irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 245-252, 265.

[7] 种培芳,单立山,苏世平,等.干旱胁迫对甘肃地区 5 种经济林木水分利用效率的影响[J].*干旱地区农业研究*,2018,36(2):137-143.

CHONG P F, SHAN L S, SU S P, et al. Effects of drought stress on water use efficiency of five economic forest species in Gansu Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 137-143.

[8] ARAB M M, MARRANO A, ABDOLLAHI-ARPANAHI R, et al. Combining phenotype, genotype, and environment to uncover genetic components underlying water use efficiency in Persian walnut [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(3): 1107-1127.

[9] 刘丙花,赵登超,贾明,等.植物水分利用效率提高途径研究综述[J].*世界林业研究*,2017,30(3):24-29.

LIU B H, ZHAO D C, JIA M, et al. Research on approaches to improve plant water use efficiency[J]. *World Forestry Research*, 2017, 30(3): 24-29.

[10] LIU B H, ZHAO D C, ZHANG P Y, et al. Seedling evaluation of six walnut rootstock species originated in China based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109212.

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

LI H S.Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M].Beijing:Higher Education Press,2000.

[12] 刘丙花,赵登超,梁静,等.4 个品种核桃砧木幼苗干旱生理响应及抗旱性评价[J].*经济林研究*,2020,38(1):11-19.

LIU B H, ZHAO D C, LIANG J, et al. Physiological responses to drought stress and resistances evaluation of four cultivars of walnut rootstock seedlings[J].*Nonwood Forest Research*, 2020, 38(1): 11-19.

[13] LIU B H, LIANG J, TANG G M, et al.Drought stress affects on growth, water use efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Juglans* rootstocks[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 250: 230-235.

[14] 姜寒冰,张玉翠,任晓东,等.作物水分利用效率研究方法 & 尺度传递研究进展[J].*中国生态农业学报*,2019,27(1):50-59.

JIANG H B, ZHANG Y C, REN X D, et al. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 50-59.

[15] 张海娜,苏培玺,李善家,等.荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用[J].*生态学报*,2013,33(16):4909-4918.

ZHANG H N, SU P X, LI S J, et al. Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region [J].*Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4909-4918.

[16] 王海波.干旱条件下苹果水分利用效率相关性状的 QTL 定位和候选基因的筛选与鉴定[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

WANG H B. Mapping QTLs for traits related to water use efficiency inapple under drought stress and identification of candidate genes [D]. Yangling:Northwest A & F University, 2018.

- [17] BOUVET J M, MAKOUANZI EKOMONO C G, BRENDÉL O, et al. Selecting for water use efficiency, wood chemical traits and biomass with genomic selection in a eucalyptus breeding program[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 465: 118092.
- [18] 段玲玲,王兵,牛香.植物功能性状与碳水通量的关系研究进展[J].*温带林业研究*,2019,2(3):1-6,17.
DUAN L L, WANG B, NIU X. Research advances in relationship between plant functional traits and carbon flux and water flux[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2019, 2(3): 1-6, 17.
- [19] 何念鹏,刘聪聪,张佳慧,等.植物性状研究的机遇与挑战:从器官到群落[J].*生态学报*,2018,38(19):6787-6796.
HE N P, LIU C C, ZHANG J H, et al. Perspectives and challenges in plant traits:from organs to communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6787-6796.
- [20] KUNSTLER G, FALSTER D, COOMES D A, et al. Plant functional traits have globally consistent effects on competition[J]. *Nature*, 2016, 529(7585): 204-207.
- [21] ROSAS T, MENCUCCINI M, BARBA J, et al. Adjustments and coordination of hydraulic, leaf and stem traits along a water availability gradient[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(2): 632-646.
- [22] DÍAZ S, KATTGE J, CORNELISSEN J H C, et al. The global spectrum of plant form and function[J]. *Nature*, 2016, 529(7585): 167-171.
- [23] 翟偲涵,王平,盛连喜.竞争条件下植物功能性状的表型可塑性研究进展[J].*北华大学学报(自然科学版)*,2017,18(4):538-546.
ZHAI C H, WANG P, SHENG L X. Phenotypic plasticity of plant functional traits in competition environments[J]. *Journal of Beihua University(Natural Science)*, 2017, 18(4): 538-546.
- [24] 孙梅,田昆,张贇,等.植物叶片功能性状及其环境适应研究[J].*植物科学学报*,2017,35(6):940-949.
SUN M, TIAN K, ZHANG Y, et al. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation[J].*Plant Science Journal*, 2017, 35(6): 940-949.
- [25] ROUMET C, BIROUSTE M, PICON-COCHARD C, et al. Root structure-function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy[J]. *New Phytologist*, 2016, 210(3): 815-826.
- [26] ANDEREGG L D L, BERNER L T, BADGLEY G, et al. Within-species patterns challenge our understanding of the leaf economics spectrum[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(5): 734-744.
- [27] 冯家宝,范顺祥,侯煜飞,等.河北省森林草原区草本植物叶功能性状种间和种内变异[J].*东北林业大学学报*,2021,49(1):23-28.
FENG J B, FAN S X, HOU Y F, et al. Interspecific and intraspecific variation of leaf function traits of herbaceous plants in a forest-steppe-zone, Hebei Province, China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(1): 23-28.
- [28] 张晶,左小安,吕朋,等.科尔沁沙地典型草地植物功能性状及其相互关系[J].*干旱区研究*,2018,35(1):137-143.
ZHANG J, ZUO X A, LV P, et al. Functional traits and interrelations of dominant plant species on typical grassland in the Horqin sandy land, China[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 137-143.
- [29] 唐青青,黄永涛,丁易,等.亚热带常绿阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异[J].*生物多样性*,2016,24(3):262-270.
TANG Q Q, HUANG Y T, DING Y, et al. Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests[J].*Biodiversity Science*, 2016, 24(3): 262-270.
- [30] 袁闯,许兴,毛桂莲,等.甜高粱成熟期抗旱性指标筛选与评价方法[J].*干旱地区农业研究*,2020,38(1):280-289.
YUAN C, XU X, MAO G L, et al. Screening and evaluation methods of drought resistance index of sweet sorghum at maturity[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 280-289.

(上接第 174 页)

- [24] 严威凯,盛庆来,胡跃高,等.GGE 叠图法—分析品种×环境互作模式的理想方法[J].*作物学报*,2001,27(1):21-28.
YAN W K, SHENG Q L, HU Y G, et al. GGE biplot-an ideal tool for studying genotype by environment interaction of regional yield trial data[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(1): 21-28.
- [25] 兰巨生,胡福顺,张景瑞.作物抗旱指数的概念和统计方法[J].*华北农学报*,1990,(2):20-25.
LAN J S, HU F S, ZHANG J R. The concept and statistical method of drought resistance index in crops[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1990,(2): 20.
- [26] 李盛有,孙旭刚,王昌陵,等.基于嫁接技术评价不同耐旱型大豆根系对叶片光合参数的影响[J].*大豆科学*,2020,39(5):751-757.
LI S Y, SUN X G, WANG C L, et al. Effects of different drought tolerant soybean roots on photosynthesis of leaves based on grafting technology[J]. *Soybean Science*, 2020, 39(5): 751-757.
- [27] 孙世贤,戴俊英,顾慰连.氮、磷、钾肥对玉米倒伏及其产量的影响[J].*中国农业科学*,1989,(3):28-33, 96-97.
SUN S X, DAI J Y, GU W L. Effect of nitrogen, phosphate and potash fertilizers on lodging and yield in maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989,(3): 28-33, 96-97.
- [28] 杜彩艳,段宗颜,张乃明,等.云南主栽玉米品种抗旱性鉴定与评价[J].*干旱地区农业研究*,2015,33(4):181-189.
DU C Y, DUAN Z Y, ZHANG N M, et al. Identification and evaluation of drought resistance in different maize varieties widely grown in Yunnan[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 181-189.
- [29] 刘玉涛.玉米抗(耐)旱指标鉴定方法与展望[J].*农业科技通讯*, 2013,(10):160-163.
LIU Y T. Identification method and prospect of corn resistance(resistant)drought index[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2013,(10): 160-163.
- [30] 王喜慧.吉林省玉米骨干自交系抗旱指标筛选及其抗旱性综合评价[D].长春:吉林农业大学,2016.
WANG X H. Screening of drought resistance indexes and comprehensive evaluation on drought resistance of elite maize inbred lines in Jilin Province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.
- [31] 徐蕊.玉米抗旱性评价指标体系及遗传研究[D].泰安:山东农业大学,2008.
XU R. Study on drought resistance evaluation system and genetic analysis maize[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.