生态学杂志
Chinese Journal of Ecology
ISSN 1000-4890,CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目：　冀北地区 6 种灌木对干旱胁迫的光合及生理响应
作者：　张恒硕，查同刚，李肖，彭栋，冀晓东，张志强，张海江，薛治国
DOI：　10.13292/j.1000-4890.202102.015
收稿日期：　2020-06-18
网络首发日期：　2020-12-14
引用格式：　张恒硕，查同刚，李肖，彭栋，冀晓东，张志强，张海江，薛治国．冀北地区 6 种灌木对干旱胁迫的光合及生理响应．生态学杂志.
https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202102.015

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2020-12-14 09:21:07
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20201211.1354.015.html

DOI: 10.13292/j.1000-4890.202102.015

冀北地区 6 种灌木对干旱胁迫的光合及生理响应

张恒硕[1] 查同刚[1*] 李 肖[1] 彭 栋[1] 冀晓东[1] 张志强[1]
张海江[2] 薛治国[2]
（[1]北京林业大学水土保持学院，北京 100083；[2]张家口市崇礼区林业和草原局，河北张家口 076350）

摘 要 探讨冀北地区各灌木种对干旱胁迫的生理生态适应性及抗旱能力，为冀北地区选种育种以及加快植被恢复建设提供理论支持。以 4 种乡土灌木金露梅（*Potentilla fruticosa*）、黑沙蒿（*Artemisia ordosica*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）和 2 种引种灌木沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、荆条（*Vitex negundo* var. *heterophyll*）为研究对象，设置 4 个水分水平（T1、T2、T3 和 T4 分别为田间持水量的 85%±5%、70%±5%、50%±5%和 35%±5%），做室内盆栽干旱胁迫实验，观测其生物量、株高变化率、根冠比、叶绿素相对含量（SPAD 值）、叶片水势、净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）与水分利用效率（WUE）等指标。结果表明：（1）受干旱胁迫影响，金露梅和黑沙蒿的根冠比显著增加（$P<0.05$），生物量以及株高变化率损失较小；而虎榛子和荆条的生物量和株高变化率受水分限制显著减小（$P<0.05$）。（2）6 种灌木在干旱条件下，叶绿素相对含量、叶水势及光合作用均有不同程度的降低，而 WUE 随土壤水分的降低变化趋势相异，胡枝子在 T3 下 WUE 显著降低（$P<0.05$），沙棘在 T3 下 WUE 显著升高（$P<0.05$），金露梅在 T4 下 WUE 显著升高（$P<0.05$）。（3）灌木的生长、形态、生理生态及光合指标与各主成分之间载荷的绝对值均大于 0.7，且各灌木种的主成分抗旱综合得分顺序为：金露梅>黑沙蒿>胡枝子>沙棘>虎榛子>荆条，且除了金露梅以外，其他灌木 T4 水平因子得分均为负值，表现出极强的抗旱性。因此，在冀北干旱地区，应以乡土灌木种金露梅和黑沙蒿为主进行种植，而在水分条件较好的地区则可选择乡土灌木种胡枝子和引入种灌木沙棘作为植被群落恢复物种。

关键词 生长形态；光合；干旱胁迫；叶绿素；叶水势

The photosynthetic and physiological responses of six shrub species to drought dress in Northern Hebei Province

ZHANG Heng-shuo[1], ZHA Tong-gang[1*], LI Xiao[1], PENG Dong[1], JI Xiao-dong[1], ZHANG Zhi-qiang[1], ZHANG Hai-jiang[2], XUE Zhi-guo[2] ([1]*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;* [2]*Forestry and Grassland Bureau, Chongli District, Zhangjiakou 076350, Hebei, China*).

Abstract: In order to provide theoretical support for shrub species selection, breeding and vegetation restoration in northern Hebei Province, the physiological and ecological adaptability and drought resistance of shrub species to drought stress were assessed. Four local shrubs (*Potentilla fruticosa*, *Artemisia ordosica*, *Ostryopsis davidiana*, *Lespedeza bicolor*) and two introduced shrubs (*Hippophae rhamnoides*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*) were selected as the

国家水体污染控制与治理科技重大专项（2017ZX07101002-02）资助。
收稿日期：2020-06-18 接受日期：2020-11-04
*通讯作者 E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

research objects. Four water levels were set up for indoor pot experiment of drought stress, and the biomass, plant height change rate, root-shoot ratio, relative chlorophyll content (SPAD value), leaf water potential, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) were analyzed. The results showed that: (1) Under the influence of drought stress, the root shoot ratio of *P. fruticosa* and *A. ordosica* increased significantly (P<0.05), and the loss of biomass and plant height change rate was small, however, the change rate of biomass and plant height of *Ostryopsis davidiana* and *Vitex negundo* var. *heterophylla* was significantly reduced by water restriction (P<0.05). (2) Under the condition of drought, the relative content of chlorophyll, leaf water potential and Photosynthesis of 6 shrubs decreased in different degrees, however, WUE varied with the decrease of water. WUE of *Lespedeza bicolor* decreased significantly under T3 water treatment (P<0.05), *Hippophae rhamnoides* increased significantly under T3 water treatment (P<0.05), and *Potentilla fruticosa* increased significantly under T4 water treatment (P<0.05). (3) The absolute value of the load between the growth, morphology, physiological ecology and photosynthetic indices of shrubs and the main components was greater than 0.7, and the comprehensive score order of the main components of each shrub species was: *Potentilla fruticosa* > *Artemisia ordosica* > *Lespedeza bicolor* > *Hippophae rhamnoides* > *Ostryopsis davidiana* > *Vitex negundo* var. *heterophylla*, except *Potentilla fruticosa*, the scores of T4 level factors of other shrubs were all negative, showing strong drought resistance. Therefore, in the arid area of northern Hebei Province, the local shrub species of *Potentilla fruticosa* and *Artemisia ordosica* should be planted, while in the area with better water condition, the local shrub species of *Lespedeza bicolor* and the introduced shrub species of *Hippophae rhamnoides* can be selected as the vegetation community restoration species.

Key words: growth form; photosynthesis; drought stress; chlorophyll; leaf water potential.

近年来，随着人工林的普及与发展，乔木人工林在干旱少雨、土壤条件贫瘠且立地质量增长潜力有限的北方土石山区的生态功能局限性初见端倪（孙长忠等，2000；国家林业局森林资源管理司，2010）。而随着我国天保工程的实施，生态建设的需要，灌木林的地位和作用日显重要（陈伏生等，2012），且在全球气候变暖的情况下，导致部分地区严重干旱等极端气候事件发生的频率急剧增加（Stocker *et al*.,2013；Vicente-Serrano *et al*., 2014），越来越多的人认识到灌木林在解决干旱与半干旱地区区域水资源短缺与植被生态服务功能缺失等方面发挥的重要作用（瞿王龙等，2015）。灌木树种以抗旱性强以及良好的水源涵养功能，成为我国广大干旱半干旱地区林木植被建设的先锋树种（尹伟伦等，2006）。因此，在当前生态建设的要求下，筛选出适应当地气候条件、满足区域生态服务要求的灌木种成为改善自然生态环境以及维护生态功能稳定性最迫切的需求。

水分条件是影响干旱与半干旱地区灌木生长最重要的环境胁迫因子之一，干旱对植物的伤害是多方面的，不同植物对干旱胁迫产生的抗性机制也有所差别（吴晓凤等，2018），且严重的干旱胁迫会对植物造成不可逆转的伤害，直至死亡（刘祖祺等，1994）。河北省地处于半干旱半湿润的蒙古高原与华北平原过渡地带，该区域大部分地区降水量偏少且时空分布极不均匀，存在着山地生态破坏、水源涵养功能差、地表水资源功能性短缺等问题，严重影响了该区域的生态系统平衡。因此，为了破解该区域水资源短缺与生态环境破坏的困局，建立完善的植被抗旱体系显得尤为重要。之前关于对冀北地区人工林乔木的抗旱性能已有大量研究（宣立辉等，2018；公博等，2019），而关于造林条件较为困难地区的灌木与半灌木的抗旱性能研究较少，且在物种选取和测量指标的选取上有很大的局限性，单一指标无法全面准确地反映植物的实际抗旱能力。近年来，多元统计分析技术已被广泛用于多指标的综合评价，其主成分分析方法，可在不损失或少损失原有信息的前提下，将众多的指标转换成新的、

数量较少且彼此独立的因子，结合隶属函数法，这一评价体系更为科学，评价结果与实际表现也更为吻合，因此更容易获得品种抗旱性的客观综合评价（Chen *et al*.,2012）。

本研究选取河北省北部地区广泛分布的 4 种乡土灌木种（金露梅、黑沙蒿、虎榛子、胡枝子），与该地区大量引入的 2 种灌木（沙棘、荆条）作为抗旱性对比研究试种，以叶绿素、叶水势和光合指标（包括净光合速率 P_n、气孔导度 G_s、蒸腾速率 T_r、水分利用效率 WUE 与水分利用效率 WUE）为抗旱性评价指标，利用多元统计分析技术，综合评价 6 种灌木的抗旱性能，旨在探讨 6 种灌木在干旱胁迫下的响应机制，筛选灌木耐旱性评价指标，以期对冀北地区选种育种、水土保持林建设以及植被恢复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验于 2018 年 7—9 月在北京林业大学鹫峰实验基地温室大棚内进行。鹫峰实验基地地处 39°54N，116°28E，位于北京西北郊太行山北部，燕山东端，年平均气温 12.2 ℃，植物生长期为 220 d，无霜期 180 d，晚霜在 4 月上旬，早霜在 9 月上旬。试验材料为河北省北部地区典型的 6 种灌木树种，实验种子均为河北省张家口市崇礼区林业和草原局提供，包括 4 种乡土灌木种：金露梅（*Potentilla fruticosa*）、黑沙蒿（*Artemisia ordosica*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）和胡枝子（*Lespedeza bicolor*）和 2 种引入灌木种：沙棘（*Hippophae rhamnoides*）和荆条（*Vitex negundo* var. *heterophylla*）。首先对各灌木种进行种子催芽处理，待种子发芽 7 d 后，移入盆栽，在水分与养分充足的环境下培育 14 d 进行缓苗，最大程度缓解根部移栽受损程度（王跃勇等，2015），然后分别在各灌木树种间筛选生长状况良好、植株高度和冠幅相近的灌木幼苗作为盆栽试验苗。

用河北省张家口市崇礼区原有的栗钙土作为供试盆栽土壤，每盆的土壤重量相同均为 2 kg，且每盆种植 1 株，缓苗处理 14 d 后测量所有实验幼苗植株高度，再进行不同水分的干旱胁迫实验，根据土壤含水量从高到低，分别设置 T1、T2、T3、T4 四个水分水平：正常供水（T1）为田间持水量的（85±5）%；轻度干旱胁迫（T2）为田间持水量的（70±5）%；中度干旱胁迫（T3）为田间持水量的（50±5）%；重度干旱胁迫（T4）为田间持水量的（35±5）%(王智威等，2013)。其中，田间持水量采用威尔科克斯法（江培福等，2006）测得为 28.27%。每种灌木的每种处理都设置 10 个重复，每天通过称重法补充水分，干旱胁迫处理 14 d 后测定各灌木的生理指标。干旱胁迫实验结束后再测量所有实验植株高度、苗鲜重和根鲜重，最终用烘干法测得所有植株的总生物量。

1.2 测定目的与方法

1.2.1 形态指标和生物量的测定　干旱胁迫处理的第 1 天和干旱胁迫实验结束后的第 1 天分别测定各灌木的株高，二者差值与干旱胁迫处理第 1 天的株高的比值即为株高变化率。干旱胁迫实验结束后采用收获法将灌木整株挖出并分别测每株灌木的根鲜重和地上部分（茎+叶）鲜重，计算根冠比，根/冠=根生物量(鲜质量)/(茎+叶片)生物量(鲜质量)（张治安等，2004），并用地上和地下部分于 105 ℃杀青 15 min 后, 80 ℃烘干至恒重,得到各实验灌木植株的总生物量。

1.2.2 叶绿素相对含量的测定　使用日本 KONICA MINOLTA 公司生产的 SPAD-502plus 叶绿素仪测定各灌木叶片的 SPAD（叶绿素相对含量）值。14 d 缓苗期后，在控制水分梯度下再处理 14 d，每种灌木选取长势基本一致的 5 个植株，在每天 08:00—09:00 各灌木植株中分别选取自上而下第 5~7 片成熟叶片，连续测 3 d。

1.2.3 植物叶片水势的测定　使用美国 WESCOR 公司生产的 Psypro 露点水势仪测定各灌木种的叶片水势，每种灌木选取长势基本一致的 5 个植株，分别选取自上而下第 5~7 片成熟叶片进行测定，取其平均值，并与叶绿素相对含量的测定时间保持同步，连续测 3 d。

1.2.4 植物光合指标的测定　使用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合仪，在 8 月

上、中、下旬各选一天晴朗的天气测定植物叶片的光合指标，每种灌木选取长势基本一致的 5 个植株，每株植株选取自上而下第 5~7 片成熟叶片进行测定，控制人工光源的光照强度为 1200 μmol·m^{-2} s^{-1}，CO_2 浓度为（390±10）μmol·mol^{-1}，活体测量各灌木种叶片的净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r），并计算水分利用效率（$WUE=P_n/T_r$）。

1.3 数据处理

利用 SPSS 20.0 与 Origin 9.0 分析数据和绘图。采用双因素方差分析法分析不同灌木种的不同干旱胁迫程度下，各灌木种生理指标之间的差异；用相关性分析法讨论各灌木种生理指标之间的相关性；用主成分分析法对参试灌木种的抗旱性进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同干旱胁迫程度下 6 种灌木的生长及形态参数

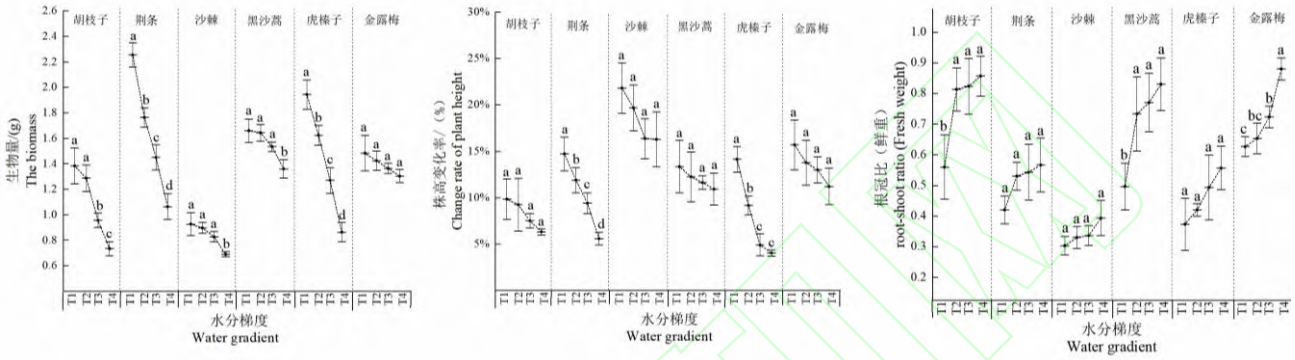

图 1 干旱胁迫下 6 种灌木的生物量、株高变化率和根冠比

Fig.1 Biomass, plant height change rate and root shoot ratio of six shrubs under the drought stress

如图 1 所示，在干旱胁迫条件下，荆条与虎榛子的生物量变化趋势最为明显，单株灌木总生物量均随着干旱胁迫的加剧而显著下降（$P<0.05$）；胡枝子土壤水分含量从 T2 下降到 T3 时生物量开始显著降低（$P<0.05$）；沙棘和黑沙蒿的生物量在 T4 下出现显著降低（$P<0.05$）；而金露梅的生物量未随土壤干旱胁迫的加强显示出显著降低趋势。

不同干旱胁迫程度下沙棘的平均株高变化率最大，且不同灌木种的株高变化率随干旱胁迫程度的增加而降低，而与生物量变化趋势相似，荆条和虎榛子随干旱胁迫变化最为显著（$P<0.05$），其他 4 种灌木的株高变化均不显著。金露梅的根冠比随土壤含水量的下降而显著增高（$P<0.05$），而胡枝子和黑沙蒿仅在 T1 到 T2 变化期间根冠比有显著增高（$P<0.05$），而其他 3 种灌木的根冠比增加幅度未通过显著性检验。

2.2 干旱胁迫对 6 种灌木叶片的叶绿素相对含量及叶片水势影响

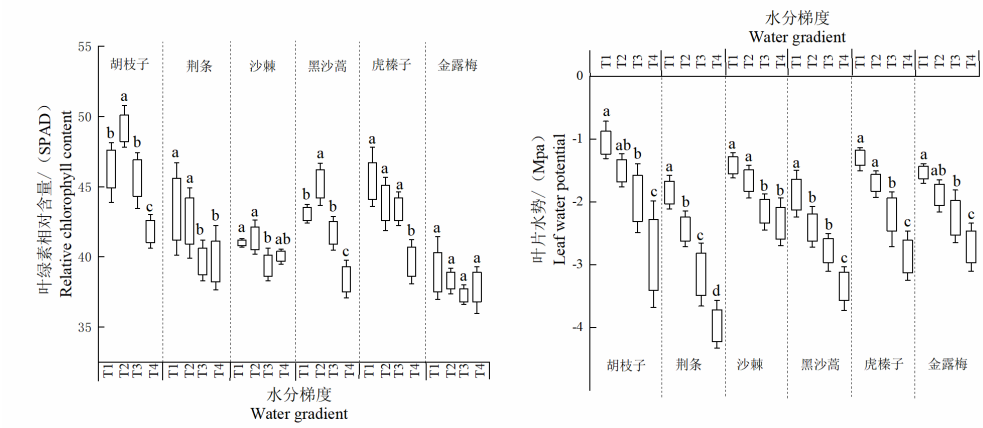

图 2　干旱胁迫下 6 种灌木叶片的叶绿素相对含量及叶水势

Fig.2　Relative chlorophyll content and leaf water potential of six shrubs under drought stress

如图 2 所示，胡枝子各干旱胁迫程度下的叶绿素相对含量均明显高于其他灌木种，且金露梅各水分处理下的叶绿素相对含量均小于各灌木不同水分下叶绿素含量的平均水平（41.83）；胡枝子与黑沙蒿不同干旱胁迫程度下的叶绿素相对含量的差异比其他灌木种更显著，且胡枝子与黑沙蒿的 T2 组叶绿素相对含量均高于对照组（T1），其中胡枝子 T2 下叶绿素相对含量的最小值比 T1 下最大值高 1.26%，黑沙蒿 T2 下叶绿素相对含量的最小值比 T1 下最大值高 1.61%；虎榛子 T1、T2 与 T3 组叶绿素相对含量差异不显著，且金露梅不同干旱胁迫程度下叶绿素相对含量也无显著差异，两者叶绿素相对含量变化幅度均不超过 10%。

6 种灌木的叶水势均随干旱胁迫程度的增加而降低，且胡枝子的叶片水势随干旱胁迫的增加变化幅度最大，平均为 3 倍，降幅最小的是沙棘与金露梅，平均为 1.02 与 1.08 倍。沙棘、虎榛子、金露梅在 T1 与 T2 干旱胁迫下差异均不显著，黑沙蒿、金露梅在 T2 与 T3 干旱胁迫下差异均不显著，且 6 种灌木在 T4 下的叶片水势均与在其他水分下的叶片水势呈现出显著差异性（$P<0.05$）。

2.3　干旱胁迫对 6 种灌木光合指标的影响

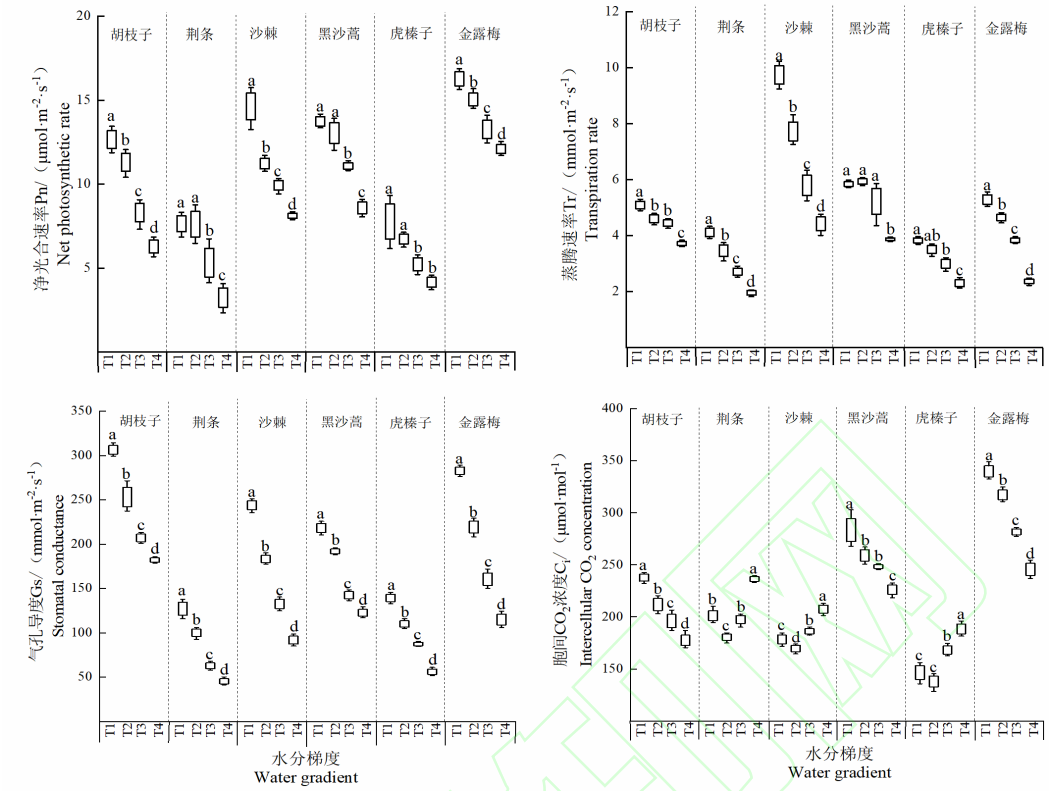

图 3　不同干旱胁迫程度下 6 种灌木的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率

Fig.3　Net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency of six Shrubs under different drought stress

如图 3 所示，6 种灌木的 P_n 随干旱胁迫的增加而降低，在不同干旱胁迫程度处理下，荆条与虎榛子的 P_n 显著低于其他灌木（P<0.05），金露梅 P_n 显著高于其他灌木（P<0.05），且在 T4 处理下荆条的 P_n 与 T1 处理差异最大，为 T1 处理的 31.90%，而在 T4 处理下金露梅的 P_n 与 T1 处理的差异最小，为 T1 处理的 70.82%。沙棘 T1 与 T2 的 P_n 差异最为显著（P<0.05），在 T2 处理下 P_n 比 T1 减少了 29.3%。

随着干旱胁迫的增加，所有灌木树种 G_s 均呈下降趋势，6 种灌木从 T1 到 T4 处理的不同干旱胁迫程度下有显著性差异（P<0.05），且不同灌木树种间的 G_s 也均有显著性差异（P<0.05）。在同一干旱胁迫程度下，胡枝子 G_s 显著高于其他灌木种（P<0.05），其次是金露梅>沙棘>黑沙蒿>虎榛子>荆条。

绝大多数灌木种 T_r 随干旱胁迫程度的增加而降低，尤其是沙棘，降低幅度最大，平均每个干旱胁迫程度下降 32.22%，且在 T4 下 T_r 仅为 T1 下的 35.08%。变化幅度最小的为黑沙蒿，在 T1、T2 和 T3 下黑沙蒿的 T_r 差异不显著（P>0.05），在 T4 下，黑沙蒿 T_r 有显著降低趋势。其他灌木种除了胡枝子（T2 与 T3）处理下、虎榛子（T1 与 T2、T2 与 T3）处理下 T_r 差异不显著之外，同一种灌木不同干旱胁迫程度下的 T_r 均有显著性差异（P<0.05）。不同灌木种间，荆条与虎榛子 T_r 无显著性差异，且平均值显著低于其他灌木种（P<0.05）。

从图 3 可看出，4 种干旱胁迫程度下金露梅的水分利用效率均高于其他 5 种灌木，且在 T4 下，金露梅的水分利用效率急剧增高（相较于 T3 水平下平均上升了 1.70 μmol·mmol^{-1}）；沙棘的水分利用效率从 T2 向 T3 变化期间增高趋势显著（P<0.05）；胡枝子的水分利用效率在 T2 向 T3 的转变过程中有显著降低趋势（P<0.05），而沙棘则相反；荆条、黑沙蒿与

虎榛子的水分利用效率未随土壤干旱胁迫的加剧而出现显著性改变。

2.4 干旱胁迫对 6 种灌木影响的差异分析

表 1 灌木种、干旱胁迫作用对植物生理影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA on the effect of shrub species and drought stress on plant physiology

测定指标 Measurement index	灌木种 Shrub species	干旱胁迫 Drought stress	灌木种×干旱胁迫 Shrub species×Drought stress
生物量 Biomass	<0.001	<0.001	<0.001
株高变化率 Change rate of plant height	<0.001	<0.001	0.061
根冠比（鲜重） Root-shoot ratio（Fresh weight）	<0.001	<0.001	0.058
叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content	<0.001	<0.001	<0.001
植物叶片水势 Plant leaf water potential	<0.001	<0.001	0.065
净光合速率 P_n Net photosynthetic rate	<0.001	<0.001	<0.001
气孔导度 G_s Stomatal conductance	<0.001	<0.001	<0.001
蒸腾速率 Tr Transpiration rate	<0.001	<0.001	<0.001
水分利用效率 WUE Water use efficiency	<0.001	0.0012	<0.001

注：表中数字为多因素方差分析各因素的 *P* 值，*P*<0.05 表明该因素对该指标产生显著影响，*P*<0.01 表明该处理因素对指标产生极显著影响。

Note: The numbers in the table are *P* value of each factor of multi factor analysis of variance, *P*<0.05 shows that this factor has significant impact on the index, *P*<0.01 shows that the treatment factor has extremely significant impact on the index.

双因素方差分析结果显示，灌木种和干旱胁迫程度均对生物量、株高变化率、根冠比（鲜重）、叶绿素相对含量(SPAD)、植物叶片水势、P_n、G_s、T_r 和 WUE 产生极显著影响（*P*<0.001）；而灌木种×干旱胁迫的交互作用仅对生物量、叶绿素相对含量(SPAD)、P_n，G_s，T_r 以及 WUE 存在极显著影响（*P*<0.001）。

2.5 干旱胁迫下 6 种灌木各生理指标的相关性分析

表 2 各指标的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of physiological indicators

测定指标 Measurement index	生物量 Biomass	株高变化率 Change rate of plant height	根冠比（鲜重） Root-shoot ratio（Fresh weight）	叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content	植物叶片水势 Plant leaf water potential	净光合速率 P_n Net photosynthetic rate	气孔导度 G_s Stomatal conductance	蒸腾速率 T_r Transpiration rate	水分利用效率 WUE Water use efficiency
生物量 Biomass	1								
株高变化率 Change rate of plant height	0.059	1							

根冠比（鲜重）Root-shoot ratio（Fresh weight）	-0.026	-0.462**	1						
叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content	0.281*	-0.150	-0.035	1					
植物叶片水势 Plant leaf water potential	0.210	0.442**	-0.334**	0.470**	1				
净光合速率 P_n Net photosynthetic rate	0.125	0.597**	0.111	-0.073	0.523**	1			
气孔导度 G_s Stomatal conductance	0.033	0.349**	0.143	0.343**	0.688**	0.787**	1		
蒸腾速率 Tr Transpiration rate	-0.109	0.705**	-0.310**	0.129	0.509**	0.650**	0.621**	1	
水分利用效率 WUE Water use efficiency	0.206	0.022	0.480**	-0.323**	0.008	0.498**	0.168	-0.252*	1

*P<0.05; **P<0.01.

进一步对 6 种灌木的 6 个生理指标进行相关性分析（表 2），各指标之间呈现出不同的相关性，其中 G_s 与 P_n 呈现出最强的正相关性（r=0.787，P<0.01），其次为株高变化率与 T_r（r=0.705，P<0.01）。而根冠比（鲜重）与株高变化率的负相关性最强（r=-0.462，P<0.01）。另外，对株高变化率影响最大的是蒸腾速率 T_r 和净光合速率 P_n，均达到极显著（r>0.5, P<0.01），而 WUE 与根冠比（鲜重）、P_n 均呈极显著正相关（P<0.01），与 T_r 呈显著负相关（r=-0.252，P<0.05）。综上所述，不同干旱胁迫程度下，6 种灌木的生长、形态参数、光合以及叶片水势等生理生化特征的变化过程是复杂的，各指标之间相互关联或制约，采用多指标的分析方法，更能反映出不同灌木种的抗旱能力。

2.6 6 种灌木抗旱性综合评价

表 3 干旱胁迫对 6 个灌木树种生长、形态、光合和生理指标影响的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of the effects of drought stress on physiological indexes of six shrub species

测定指标 Measurement index	主成分 Component			
	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4
生物量 Biomass	0.141	0.140	0.526	0.758
株高变化率 Change rate of plant height	0.742	-0.146	-0.471	0.294
根冠比（鲜重）Root-shoot ratio（Fresh weight）	-0.257	0.771	0.245	-0.399

叶绿素相对含量 Relative chlorophyll content	0.253	-0.326	0.846	-0.167
叶水势 Plant leaf water potential	0.810	-0.144	0.330	0.067
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.841	0.485	-0.154	-0.001
气孔导度 Stomatal conductance	0.835	0.253	0.234	-0.340
蒸腾速率 Transpiration rate	0.840	-0.243	-0.245	-0.209
水分利用效率 Water use efficiency	0.078	0.903	-0.058	0.260
贡献率(%) Contribution rate	38.59	21.51	16.94	11.99
累积贡献率(%) Cumulative contribution rate	38.59	60.10	77.04	89.03

主成分分析结果如表 3 所示，主成分 1、2、3 和 4 解释的方差分别占总方差的 38.59%、21.52%、16.94%和 11.99%，其累积贡献率为 89.03%，因此其可解释原始 9 个变量的 89.03%。第 1 主成分与光合指标（包括 P_n、G_s 和 T_r）有强烈的正相关性，其次是叶水势和株高变化率；第 2 主成分与 WUE 和根冠比有极强的正相关性，与叶绿素相对含量有较强的负相关关系；第 3 主成分与叶绿素相对含量有极强的正相关关系，与株高变化率有较强的负相关关系；第 4 主成分与生物量有极强的正相关关系。

表 4　6 种灌木抗旱性综合评价

Table 4　Comprehensive evaluation of drought resistance of 6 shrub species

灌木种 Shrub species		处理 Drought treatment				综合得分 Overall score	抗旱次序 Drought resistance rank
		T1	T2	T3	T4		
胡枝子	*L. bicolor*	0.7482	0.5845	-0.0833	-0.6071	0.6422	3
荆条	*V. negundo*	0.3438	-0.0163	-0.5927	-1.1521	-1.4174	6
沙棘	*H. rhamnoides*	0.2314	-0.1010	-0.4194	-0.6187	-0.9078	4
黑沙蒿	*A. ordosica*	0.5676	0.4400	0.0667	-0.3432	0.7312	2
虎榛子	*O. davidiana*	0.3817	-0.0543	-0.5019	-0.9898	-1.1643	5
金露梅	*P. fruticosa*	0.8303	0.5690	0.3204	0.3962	2.1161	1

根据各灌木种的各项生理指标与主成分的特征向量的乘积累加，并用贡献率与累加之和相乘进行加权，最终将同一种灌木的各个生理指标加权值求和，计算出各灌木种在不同干旱胁迫程度下的综合得分，得分越高的灌木，抗旱性越强。最终结果如表 4 所示，除金露梅之外，其他 5 种灌木在 T4 下得分均为负值，在 T3 下只有黑沙蒿与金露梅得分为正值，且 T3 得分分别为 0.0667 和 0.3204。而荆条、沙棘和虎榛子除了在 T1 下得分为正之外，在其他 3 个干旱胁迫程度下得分均为负值，抗旱性较差；金露梅抗旱性最强，其综合抗旱得分为 2.1161，远高于位于第 2、3 名的黑沙蒿（0.7312）和胡枝子（0.6422）的综合抗旱得分。

3　讨　论

3.1　6 种灌木在干旱胁迫下的生长及形态变化

植物的发育和结构影响着生物量（任磊等，2015），并通过地上-地下分配关系反映了植物的生长策略（Bazzaz *et al*., 1997；Shipley *et al*., 2002），而植物根系又可根据土壤水分状况做出适应性反应，当水分成为限制植物生长的条件时，根系会产生形态、生理等方面的变化来维持其功能行为（Pierret *et al*., 2007）。对河北北部地区 6 种广泛分布的灌木研究发现，金露梅对干旱条件的反应最为强烈和敏感，一方面是根冠比的增大，这是由于干旱条件下灌木冠部生长受到抑制，而根系生物量增加的缘故（Benjamin *et al*., 2006）；另一方面，株高和生物量在干旱胁迫条件下未受到显著影响，虽然土壤水分降低，但茎、干、叶的生长速率未出现显著下降，不仅是由于其本身耗水量低，更是其根系功能随环境的改变与增强，这一点从金露梅的 WUE 在 T4 下急剧上升就可看出；而荆条和虎榛子受干旱胁迫影响最大，根部受水分影响生长受到严重抑制，因而也抑制了荆条和虎榛子的茎干伸长生长，在茎干高度和生物量均显著降低的情况下，根部未做出及时调整，根冠比未发生显著变化。

3.2 6 种灌木对干旱胁迫的光合及生理生化响应

叶绿素是植物器官基本组成物质,在植物光合作用中承担至关重要的角色，更是植物光合作用能力、营养状况和生长态势的重要指示因子（岳学军等，2015）。随着干旱胁迫的增加，胡枝子与黑沙蒿叶绿素相对含量呈现出先升高后降低的趋势，且在 T2 下达到峰值，我们可知这两种灌木在轻度干旱胁迫条件下叶绿素相对含量要高于灌水充足条件或重度干旱胁迫条件下，这与大部分研究表明的叶绿素含量随干旱胁迫而降低的结果并不完全一致（Flexas *et al*., 1999；郭相平等，2003），这可能是由于在一定范围内，干旱胁迫使胡枝子与黑沙蒿的叶片含水量下降，抑制了叶片的伸展，使叶片增厚，同时也说明这两种灌木在轻度干旱胁迫下叶绿素未被破坏或者破坏极少（蔡丽平等，2011），而后随着干旱胁迫增加，叶绿素相对含量大幅度降低，这是在中度与重度干旱胁迫下植物叶绿体膜遭到破坏所导致（Anjum *et al*., 2011）。6 种灌木中，金露梅的叶绿素相对含量在不同的干旱胁迫下变化幅度最小，T1 至 T4 叶绿素相对含量无显著差异，其次是沙棘，只有 T3 下叶绿素相对含量显著低于其他 3 个水分处理，因此干旱胁迫对金露梅与沙棘的叶绿素相对含量较于其他灌木影响不显著，这与李吉跃（1991）的研究结果相似。

从各灌木种间的叶片水势变化趋势可以看出，6 种灌木的叶片水势均随着干旱胁迫的加剧而有不同程度的降低，这与罗青红等（2017）的研究结果相同，叶片水势与其渗透调节能力密切相关。而在不同干旱胁迫程度下，沙棘随干旱胁迫的加剧叶片水势降低幅度最小，其中 T1 与 T2 差异不显著，T3 与 T4 差异不显著，这是沙棘适应干旱环境的重要调节机制，通过降低气孔导度而减缓植物体内的水分散失所导致（郭冰寒等，2018）。

水分利用效率（WUE）能反映植物耗水与其生产力之间的关系（韩阳瑞等，2021），在水分亏缺时，抗旱植被能以高效的水分利用方式来抵御干旱胁迫（闫海龙等，2010），且蒸腾失水与光合碳同化对水分亏缺敏感性的差异直接导致轻度干旱胁迫下植物水分利用效率的提高, 这构成节水生物学的生理基础（Verslues *et al*., 2006）。对以上 6 种灌木的研究发现，随着干旱程度的增加，各灌木叶片的 P_n、G_s 和 T_r 均有不同程度的下降趋势，这表明光合均受到不同程度、不同渠道的抑制，因此部分植被通过“节流”或“开源”的策略来适应干旱逆境（李文娆，2010），金露梅通过这种方式，使生物量随干旱胁迫的加重优先向根系分配，提升根冠比，并显著降低 T_r，大大提升了自身水分利用效率，完成了“节流”与“开源”的双重策略，最终实现对干旱环境的适应，沙棘也是同理，而胡枝子、荆条和虎榛子在超出可调节范围的严重干旱胁迫下，打破了水分收支平衡，因此生物量大幅度减小。

3.3 6 种灌木对干旱胁迫的适应性评价

植物种抗旱性评价是由多种不同的指标来表示和评判，每一种生理指标都在不同程度上显示了其抗旱性信息，且不同指标对植物抗旱性影响也不尽相同，因此为了避免单一性状指标产生的局限性、片面性和不稳定性（Mao *et al*., 2004；莫言玲等，2016），本研究用主成

分分析法来评价物种抗旱性，结果更为真实客观（蔡建国等，2018；崔静宇等，2019）。本研究结果显示，株高变化率、叶水势和光合指标（P_n、G_s 和 T_r）均与第一主成分呈极强的正相关性，表明其可作为 6 种灌木种的抗旱性指标，且其他指标与各主成分之间的载荷的绝对值均大于 0.7，也可较好地反映 6 种灌木的抗旱能力。

最终的因子得分结果显示，6 种灌木中，金露梅的抗旱性最强，邱权等（2014）的研究结果表明，金露梅属于节水型灌木种，因为其较低的叶片蒸腾速率，有助于降低植物耗水（郭卫华等，2007），也与其对于干旱逆境长期适应过程中产生的叶片旱生结构有关（朱栗琼等，2012），且金露梅在不同干旱胁迫程度下的 P_n 均高于其他 5 种供试灌木种，已有大量研究表明净光合速率与植物的耐旱性密切相关（任磊等，2015；喻方圆等，2003；李红杰等，2019）。黑沙蒿抗旱性次之，黑沙蒿的 P_n 与 T_r 在不同干旱胁迫程度下差异性最小，降低幅度也最小，且已有大量研究表明，蒿类植物是我国干旱沙区优良的固沙植物，且有较宽的生态幅，有较强的抗旱性（龚吉蕊等，2002；何炎红等，2014；岳鹏鹏等，2017）。虎榛子 P_n 与 T_r 显著低于其他物种，叶绿素相对含量、G_s 随干旱胁迫的增加大幅度降低。薛智德等（2004）研究表明，虎榛子叶片侧维管束细胞密度与主脉厚度有较低的值，因此在水、养分输送功能和保水、贮水作用方面表现较差，表现出较差的抗旱能力。

4 结 论

本文采用主成分分析的方法，选择植物生长的形态、光合以及生理生态等几个与抗旱性密切相关的指标，较好地反映了 6 种灌木的抗旱能力。结果显示，金露梅在不同干旱胁迫程度下以其较强的根系“开源”能力提升 WUE，表现出最强的抗旱性。黑沙蒿和胡枝子在轻度干旱胁迫下根系保持“开源”能力，并保持相对稳定的 P_n 与 T_r，保证了在一定干旱胁迫程度范围内生理活动的正常进行，抗旱性较强。沙棘的生长及形态指标在整个干旱胁迫期间对水分变化不敏感，生理活动一直维持在较低且平稳的状态，抗旱性次之。虎榛子和荆条由于其特殊的叶片生理结构，受干旱胁迫影响，叶绿素等各种调节物质更容易遭受破坏，植物的生理活动受到抑制，抗旱性最差。因此，在冀北地区的乡土灌木种除了虎榛子抗旱性表现较差以外，应以金露梅、黑沙蒿这 2 种耐旱性较强的灌木作为主要的植被恢复物种，而胡枝子作为次要植被恢复物种；引入灌木种荆条抗旱表现最差，而沙棘表现出不错的抗旱性能，其综合抗旱性能位于中间位置，优于乡土灌木种虎榛子，因此也可作为该地区植被群落构建的一个重要植物种。

参考文献

蔡建国，章　毅，孙欧文，等．2018．绣球抗旱性综合评价及指标体系构建．应用生态学报，**29**(10): 3175-3182. [Cai JG, Zhang Y, Sun OW, *et al*. 2018. Comprehensive evaluation and construction of drought resistance index system in *Hydrangea macrophylla*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(10): 3175-3182.]

蔡丽平，吴鹏飞，侯晓龙，等．2011．干旱胁迫对水土保持先锋植物类芦光合特性的影响．水土保持学报，**25**(6): 237-241+259. [Cai LP, Wu PF, Hou XL, *et al*. 2011. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of pioneer plant neyraudia reynaudiana on soil and water conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **25**(6): 237-241+259.]

陈伏生，张园敏，胡小飞，等．2012．丘陵陡坡荒山灌木草丛及其造林地生态系统碳库的分配格局．水土保持学报，**26**(1): 151-155. [Chen FS, Zhang YM, Hu XF, *et al*. 2012. The pattern of ecosystem carbon stock in steep slope wild shrubs and neighboring forest plantations in hilly red soil area. *Journal of Soil and Water Conservation*, **26**(1): 151-155.]

崔静宇，关小康，杨明达，等．2019．基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定．玉米科学，**27**(5): 62-72. [Cui JY, Guan XK, Yang MD, *et al*. 2019. Integrative evaluation of maize drought tolerance in germination period by PCA method. *Journal of Maize Sciences*, **27**(5): 62-72.]

公　博，师　忱，何会宾，等．2019．冀北山区6种人工林的林地水源涵养能力．干旱区资源与环境，**33**(3): 165-170. [Gong B, Shi C, He HB, *et al*. 2019. The water conservation capacity of 6 kinds of planted forests in northern mountain area of Hebei Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **33**(3): 165-170.]

龚吉蕊，张立新，赵爱芬，等．2002．油蒿(*Artemisia ordosica*)抗旱生理生化特性研究初报．中国沙漠，**22**(4): 80-85. [Gong JR, Zhang LX, Zhao AF, *et al*. 2002. Elementary studies on physiological and bio-chemical anti-drought features of *Artemisia ordosica*. *Journal of Desert Research*, **22**(4): 80-85.]

郭冰寒，王若水，肖辉杰．2018．沙棘苗期叶水势与气孔导度对水分胁迫的响应．核农学报，**32**(3): 609-616.

[Guo BH, Wang RS, Xiao HJ. 2018. Response of leaf water potential and stomatal conductance of sea-buckthorn to water stress during seedling stage. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, **32**(3): 609-616.]

郭卫华，李　波，张新时，等．2007. 水分胁迫对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)蒸腾作用影响的比较. 生态学报, **27**(10): 4132-4140. [Guo WH, Li B, Zhang XS, *et al.* 2007. The impact of water stress on transpiration indices in *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia*. *Acta Ecologica Sinica*, **27**(10): 4132-4140.]

郭相平，张烈君，王 琴，等. 2006. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响. 干旱地区农业研究, **24**(2): 125-129. [Guo XP, Zhang LJ, Wang Q, *et al.* 2006. Effects of water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in jointing-booting stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, **24**(2): 125-129.]

国家林业局森林资源管理司．2010. 中国森林资源第七次清查结果及其分析. 林业经济，**2**(2): 66-72. [Department of Forest Resources Management, SFA. 2010. China's forest resources status and dynamic change-based on analysis of the seventh national forest resource inventory results. *Forestry Economics*, **2**(2): 66-72.]

韩阳瑞，单　炜，许大为，等. 2021. 沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应. 西南林业大学学报(自然科学版), **41**(2): 1-8. [Han YR, Dan W, Xu DW, *et al*. 2021. Response of photosynthetic characteristics and water use efficiency to drought stress of *Caragana korshinskii* in desert. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, **41**(2): 1-8.]

何炎红，田有亮，李　建，等. 2014. 沙冬青等3种沙生植物气体交换特征. 干旱区资源与环境，**28**(7): 144-149. [He YH, Tian YL, Li J, *et al*. 2014. The characteristics of gas exchange of 3 psammophytes. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **28**(7): 144-149.]

江培福，雷廷武，刘晓辉，等. 2006. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究. 农业工程学报, **22**(7): 1-5. [Jiang PF, Lei TW, Liu XH, *et al*. 2006. Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **22**(7): 1-5.]

李红杰. 2019. PEG模拟干旱胁迫下冬瓜的生理指标变化及耐旱性. 分子植物育种, **17**(20): 6792-6799. [Li HJ. Physiological index variation and drought resistance of winter gourd under polyethylene dlycol simulation drought stress. *Molecular Plant Breeding*, **17**(20): 6792-6799.]

李吉跃. 1991. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究(Ⅴ)——耐旱生产力. 北京林业大学学报，**13**(S3): 251-265. [Li JY. 1991. Study on drought tolerance of main afforestation species in Taihang Mountain Area (V)—drought tolerance productivity. *Journal of Beijing Forestry University*, **13**(S3): 251-265.]

李文娆，张岁岐，丁圣彦，等. 2010. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. 生态学报, **30**(19): 5140-5150. [Li WR, Zhang SQ, Ding SY, *et al.* 2010. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, **30**(19): 5140-5150.]

刘祖祺，张石城. 1994. 植物抗性生理学. 北京: 中国农业出版社. [Liu ZQ, Zhang SC. 1994. Physiology of plant resistance. Beijing: China Agricultural Press.]

罗青红，宁虎森，何　苗，等. 2017. 5种沙地灌木对干旱胁迫的生理生态响应. 林业科学, **53**(11): 29-42. [Luo QH, Ning HS, He M, *et al*. 2017. Ecophysiological responses of five sandy shrubs to drought stress. *Scientia Silvae Sinicae*, **53**(11): 29-42.]

莫言玲，郑俊骞，杨瑞平，等. 2016. 不同西瓜基因型对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价. 应用生态学报, **27**(6): 1942-1952. [Mo YL, Zheng JY, Yang RP, *et al.* 2016. Physiological responses and tolerance to drought stress of different watermelon genotypes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **27**(6): 1942-1952.]

邱　权，潘　昕，李吉跃，等. 2014. 青藏高原20种灌木幼苗生物量分配、水分利用效率及叶片δ^{13}C比较. 西北林学院学报, **29**(4): 8-14+20. [Qiu Q, Pan X, Li JY, *et al*. 2014. Comparison on biomass allocation and leaf water use efficiency and δ^{13}C of 20 shrub seedlings in Tibetan Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, **29**(4): 8-14+20.]

瞿王龙，杨小鹏，张存涛，等. 2015. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. 草业学报, **24**(4): 201-207. [Qu WL, Yang XP, Zhang CT, *et al.* 2015. Shrub mediated "fertile island" effects in arid and semi arid grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, **24**(4): 201-207.]

任　磊，赵夏陆，许　靖，等. 2015. 4种茶菊对干旱胁迫的形态和生理响应. 生态学报, **35**(15): 5131-5139. [Ren L, Zhao XL, Xu J, *et al*. 2015. Varied morphological and physiological responses to drought stress among four tea *Chrysanthemum* cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, **35**(15): 5131-5139.]

孙长忠，沈国舫. 2000. 我国主要树种人工林生产力现状及潜力的调查研究. Ⅰ. 杉木、马尾松人工林生产力研究. 林业科学研究, **13**(6): 613-621. [Sun CZ, Shen GF. 2000. Study on the present condition and the potentialities of the productivity of main tree species forest plantation of China. I. Study on the forest plantation productivities of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*. *Forest Research*, **13**(6): 613-621.]

王跃勇，于海业. 2015. 穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析. 农业工程学报, **31**(14): 65-71. [Wang YY, Yu HY. 2015. Experiment and analysis on the factors affecting the matrix integrity rate of seedlings collected by the seedling manipulator. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **31**(14): 65-71.]

王智威，牟思维，闫丽丽，等. 2013. 水分胁迫对春播玉米苗期生长及其生理生化特性的影响. 西北植物学报, **33**(2): 343-351. [Wang ZW, Mou SW, Yan LL, *et al.* 2013. Effects of physiological and biochemical

characteristics and growth under water stress in seedling of spring maize. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, **33**(2): 343-351.]
吴晓凤，倪　沛，杨　涛，等. 2018. 10种菊科植物的抗旱性与抗盐性评价. 生态学杂志，**37**(7): 1959-1968. [Wu XF, Ni P, Yang T, *et al.* 2018. Evaluation of drought and salt resistance of 10 species from asteraceae. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(7): 1959-1968.]
宣立辉，康　凡，谷建才，等. 2018. 冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应. 水土保持研究，**25**(4): 86-91. [Xuan LH, Kang F, Gu JC, *et al*. 2018. Hydrological effects of litter and soil layers in typical stands of north Hebei. *Research of Soil and Water Conservation*, **25**(4): 86-91.]
薛智德，韩蕊莲，侯庆春，等. 2004. 延安地区5种灌木叶旱性结构的解剖研究. 西北植物学报，**24**(7): 1200-1206. [Xue ZD, Han RL, Hou QC, *et al*. 2004. Anatomical study of xeromorphism of leaves in cutting for five brushes in Yan'an region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, **24**(7): 1200-1206.]
闫海龙，张希明，许　浩，等. 2010. 塔里木沙漠公路防护林3种植物光合特性对干旱胁迫的响应. 生态学报，**30**(10): 2519-2528. [Yan HL, Zhang XM, Xu H, *et al*. 2010. Photosynthetic characteristics responses of three plants to drought stress in Tarim Desert Highway shelterbelt. *Acta Ecologica Sinica*, **30**(10): 2519-2528.]
尹伟伦，翟明普. 2006. 建立灌木能源林概念并构筑林业可再生能源新产业链. 生物质化学工程，**40**(S1): 91-95. [Yin WL, Zhai MP. 2006. Developing shrub energy forest to form new industrial chain of forest renewalbe energy. *Biomass Chemical Engineering*, **40**(S1): 91-95.]
喻方圆，徐锡增. 2003. 植物逆境生理研究进展. 世界林业研究，**16**(5): 6-11. [Yu FY, Xu XZ. 2003. A review on plant stress physiology. *World Forestry Research*, **16**(5): 6-11.]
岳鹏鹏，周静静，王　华. 2017. 毛乌素沙地东缘黑沙蒿群落种间联结性分析. 生态科学，**36**(6): 147-152. [Yue PP, Zhou J, Wang H. 2017. Interspecific association analysis of *Artemisia ordosica* community in eastern edge of Mu Us sandy land. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(6): 147-152.]
岳学军，全东平，洪添胜，等. 2015. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型. 农业工程学报，**31**(1): 294-302. [Yue XJ, Quan DP, Hong TS, *et al*. 2015. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll content for citrus leaves. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **31**(1): 294-302.]
张治安，张美善，蔚荣海. 2004. 植物生理学实验指导. 北京：中国农业科学技术出版社. [Zhang ZA, Zhang MS, Wei RH. 2004. Experimental guidance of plant physiology. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press.]
朱栗琼，招礼军. 2012. 擎天树茎叶解剖结构及其环境适应性. 中国农学通报，**28**(1): 98-102. [Zhu LQ, Zhao LJ. 2012. Anatomical structure of stem and leaf of parashorea chinensis and its environmental adaptability. *China Agronomy Bulletin*, **28**(1): 98-102.]
Anjum SA, Xie XY, Wang LC, *et al*. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, **6**: 2026-2032.
Bazzaz FA, Grace J. 1997. Plant Resource Allocation. New York, USA: Academic Press.
Benjamin JG, Nielsen DC. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chick. *Field Crops Research*, **97**: 248-253.
Chen XJ, Min DH, Yasir TA, *et al*. 2012. Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD). *Field Crops Research*, **137**:195-201.
Flexas J, Escalona JM, Medrano H. 1999. Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines. *Plant, Cell & Environment*, **22**: 39-48.
Mao Z, Jiang H, Wang Y, *et al*. 2004. Water balance of birch and larch leaves and their resistance to short and progressives soil drought. *Russian Journal of Plant Physiology*, **51**: 697-701.
Pierret A, Doussan C, Capowiez Y, *et al*. 2007. Root functional architecture: A framework for modeling the interplay between roots and soil. *Vadose Zone Journal*, **6**: 269-281.
Shipley B, Meziane D. 2002. The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation. *Functional Ecology*, **16**: 326-331.
Stocker TF, Qin D, Plattner GK, *et al*. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 3-29.
Verslues PE, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, *et al*. 2006. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, **45:** 523-539.
Vicente-Serrano SM, Camarero JJ, Azorin-Molina C. 2014. Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, **23**: 1019-1030.
作者简介　张恒硕，男，1994年生，博士研究生，主要研究方向为土壤退化与生态修复。
E-mail: zhs418473740@bjfu.edu.cn
责任编辑　张　敏