

狼牙刺与柠条生理生态及土壤水分效应的比较研究

卜崇峰^{1,2} 刘国彬³ 陈玉福¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室

2 中国科学院研究生院 3 中国科学院水利部水土保持研究所)

摘要:该文选择陕北黄土高原耐旱、适应性强的人工乡土树种柠条为对照,对狼牙刺的生理生态特征以及其对深层土壤水分的影响作了系统地研究,同时探讨其抗旱性. 得出以下主要结论:①狼牙刺的净光合速率年均值与柠条相当($5.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),蒸腾速率($2.28 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)年均值比柠条($3.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)低 30%,其光合生产能力受土壤水分多少的影响显著. ②狼牙刺比柠条对干旱环境具有更强的适应能力,是一种值得推广的造林树种. 表现在 3 个方面:狼牙刺枝水势的日变化幅度(2.19 MPa)明显高于柠条(1.7 MPa),并且在 1 年中,其枝水势总小于柠条枝水势;狼牙刺的月平均水分利用效率(0.0023 g/g)比柠条(0.0017 g/g)高出 26.1%,而且在蒸散耗水量相当的情况下,其叶量和生物产量也远高于柠条;狼牙刺比柠条具有更强的利用深层土壤水分的能力,但在两个生长季中 10 m 土层剖面土壤水分未发生明显变化,表明其生长与当地降水处于动态平衡状态.

关键词: 狼牙刺, 柠条, 生理生态, 土壤水分

中图分类号: S793.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1522(2005)02-0028-06

BU Chong-feng^{1,2}; LIU Guo-bin³; CHEN Yu-fu¹. Comparative study on eco-physiological characteristics and their effects on soil water between *Sophara viciifolia* and *Caragana korshinskii*. *Journal of Beijing Forestry University* (2005)27(2)28-33[Ch, 16 ref.]

¹ Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, P. R. China;

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, 100039, P. R. China;

³ Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, 712100, P. R. China.

Systematic study on eco-physiological characteristics of *Sophara viciifolia* (growth, photosynthesis and transpiration and water potential) and their effects on soil water was carried out for the first time, taking *Caragana korshinskii* — one of the local shrub with a good drought tolerance and adaptability distributed widely in the Loess Plateau — as a control. The main results are as follows: 1) the average of net photosynthetic rate of *S. viciifolia* during June to September is equal to that of *C. korshinskii* ($5.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), its transpiration rate ($2.28 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) is 30% lower than that of *C. korshinskii*, its photosynthetic production has a close relationship to the amount of soil water; 2) *S. viciifolia* has a better drought adaptability than the *C. korshinskii* and it is one of promising forestation trees for the following three reasons: the water potential in branches of *S. viciifolia* (2.19 MPa) is higher than that of *C. korshinskii* (1.7 MPa), and its water potential in branches is always lower than that of *C. korshinskii* in the whole year; the monthly average water use efficiency (WUE) of *S. viciifolia* (0.0023 g/g) is 26.1% higher than that of *C. korshinskii* (0.0017 g/g), and, its leaves and biomass above ground are higher than those of *C. korshinskii* at the same level of evapotranspiration. *S. viciifolia* has a strong ability of using the deep soil water, however, the soil

收稿日期: 2004-03-71 收稿

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: “十五”国家科技攻关课题(2001BA 508B17)、中国科学院知识创新项目(KZCX1-06)、“973”国家重点基础研究发展规划项目(G2000018606)。

第一作者: 卜崇峰, 博士生. 主要研究方向: 水土资源保护及其可持续利用. 电话: 010-64889814 Email: buchongfeng@163.com 地址: 100101 北京市朝阳区大屯路甲 11 号中国科学院地理科学与资源研究所.

water in the 10 m deep soil profile does not change obviously during the two growing seasons, which shows its growth balance with local rainfall.

Key words *Sophara viciifolia*, *Caragana korshinskii*, eco-physiological, soil water

经过几十年的研究探索,对黄土高原的生态环境建设,水土保持学界已达成3点共识:①黄土高原水土流失治理、生态环境建设的核心是林草植被的恢复重建;②现阶段植被建设应以自然修复为主,辅以人工造林;③人工植被建造过程中,必须按照植被分布的地带性和非地带性规律,科学合理地选择、配置树种^[1-15]. 已有研究表明,在黄土区一些次生林地,由于林草植被的过度耗水,使林地深层土壤水分处于极度亏缺状态(可达到或接近调萎湿度),并且长期处于这种低水平^[16,17]. 这种土壤干化现象是我国北方少雨地区人工植被土壤退化的主要形式,可以导致植物生长的衰退甚至大面积干枯死亡^[18]. 深入了解天然植被的生物生态学特性及其地带性和非地带性规律、研究林草植被对深层土壤水分的影响及其反馈效应,不仅有助于人们认识天然植被本身,对人工造林树种的选择、人工植被建设的有效进行也具有重要实践意义. 本文以在该区分布广泛且被公认的抗旱灌木树种人工柠条(*Caragana korshinskii*)为对照,对天然乡土灌木种狼牙刺(*Sophara viciifolia*)的生长生理特征以及狼牙刺天然灌木林和人工柠条林对深层土壤水分的影响及二者的差异做系统的研究,同时探讨狼牙刺的抗旱性,旨在为人工造林服务.

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,是延河支流杏子河下游的一级支沟. 该区属暖温带半干旱气候,年平均降水量 510 mm,年水面蒸发力 1 486.7 mm,干燥指数 $K=1.48$,无霜期 160 d 左右,降雨年内分布不均,7—9 月降雨量占全年降雨量的 61.1%. 土壤类型以黄绵土为主,伴有红胶土、二色土、五花土等. 土壤调萎湿度约 4.5%,田间最大持水量 18.4%,表层土壤平均容重 1.30. 属森林草原区,流域内灌木植被类型分为 5 个群丛组,其中狼牙刺群丛组主要分布于流域内阳坡、半阳坡,以天然林为主.

1.2 测定内容与方法

于 2002 年春季在流域内选择立地条件相似的狼牙刺、柠条和撂荒地典型样地各 1 块,样地情况见表 1,测定内容与方法如下.

表 1 样地情况描述

TABLE 1 Sample plot description

样地名称	林龄	土壤质地 土层厚度/m	坡度/(°)	坡向/(°)	坡位	盖度/%
狼牙刺	14	黄绵土>10	18	南偏东 18	梁坡中部	85
柠条	15	黄绵土>4	20	南偏西 15	沟坡下部	82

1.2.1 生长因子

①叶量测定:在每个样地中选取(7 月份)5 株有代表性的狼牙刺和柠条,每株分上中下 3 个层次. 每层选取样枝 3 个,剪下样枝称重得 a 值,立即去掉叶后将枝条称重得 b 值,每枝鲜叶重即为 $c=a-b$ 值;然后求得 5 株样木的 15 个样枝鲜叶量均重,乘以样地实际调查得到的该层总枝数即为该层叶量;同样方法求得另外两层的叶量,各层累加便得样地内狼牙刺的总叶量. ②地上部分生物量:9 月底,选取样方内的标准枝,全部带回室内 80℃ 下连续烘干 48 h,称重求得地上生物量.

1.2.2 光合与蒸腾

6—10 月每月下旬晴天,用 CI-301PS 光合作用测定系统,测定狼牙刺和柠条的净光合速率 P ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率 E ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)的日进程(8:00—18:00). 鉴于叶片发育状况和所处位置对光合作用影响较大^[7],因此选取灌丛中上部向阳健康叶片定株定位测定,每 2 h 取样 1 次,每次 3 个样本,每个样本 2 次重复.

1.2.3 枝水势

用压力室水势仪^[8],于 5—9 月每月下旬的 6:00 和 12:00,取 2~3 年生发育良好的灌木小枝,测定其黎明前枝水势 PWPB (Predawn Water Potential in Branch)和正午枝水势 MWPB (Mid-day Water Potential in Branch),每次 3 个重复. 其中 7 月份从 6:00—18:00,每隔两小时 1 次,测定枝水势日变化.

1.2.4 土壤水分

取土烘干法. 5—9 月每月下旬,每块样地 2 个重复. 2 m 以内每 10 cm 取样,2 m 以下每 20 cm 取样.

2 结果分析

2.1 树种光合、蒸腾特性

2.1.1 光合、蒸腾的日变化

光合作用与植物内部生理特征和外部环境条件有着极其复杂的关系,因此在实际测量中光合速率变率较大,应该从多次随机实验中总结一种普遍规律或趋势才有意义^[9-12]. 狼牙刺和柠条的日变化曲

线(图 1、2)表明:二者的净光合速率日变化均以单峰型为主,偶尔呈双峰型或近双峰型(7 月份). 净光合速率极大值最多出现在 10:00(12 次),没有表现出明显的午休现象. 蒸腾速率日变化与环境因子的日变化密切相关. 蒸腾速率日变化总的趋势是:清晨蒸腾作用很弱,之后随着光照的增强,一方面气温不断升高,大气湿度下降,另一方面植物的生理活动加强,从而使蒸腾速率不断提高;下午影响蒸腾的外部环境因子和植物生理内部变化则向相反方向变化,而使蒸腾作用又不断减弱^[13]. 在 6—9 月的生长季里,狼牙刺和柠条的蒸腾速率日变化(图 3、4)基本是以单峰型曲线为主. 蒸腾速率峰值 1 次出现在 10:00,而 3 次出现在 12:00 前后;柠条的蒸腾速率 1 次在 10:00,1 次在 12:00,2 次在 14:00. 以上分析表明:10:00—14:00 时段是狼牙刺和柠条的高速光合、蒸腾期;光合速率极大值多出现在 10:00,蒸腾速率极大值多出现在 12:00,光照强度和大气温度是影响光合、蒸腾的主要外部环境因子.

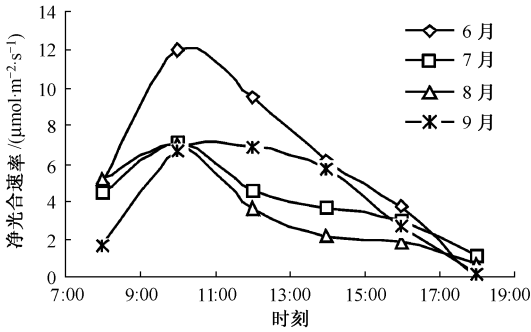


图 1 狼牙刺净光合速率日变化
FIGURE 1 Diurnal changes of net photosynthetic rate of *S. vicifolia*

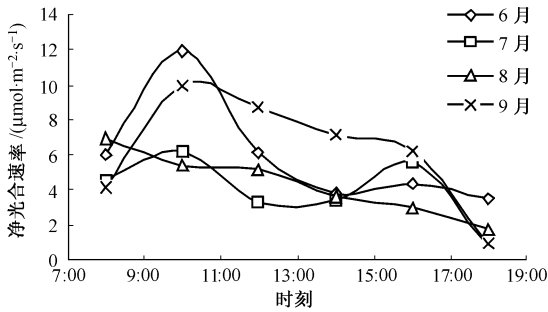


图 2 柠条净光合速率日变化
FIGURE 2 Diurnal changes of net photosynthetic rate of *C. korshinskii*

2.1.2 光合、蒸腾月动态

从图 5 可以看出,净光合速率月变化表现为:6 月灌木净光合速率值较大,进入 7、8 月呈下降趋势,到 9 月底又开始上升,出现了另一次高值. 狼牙

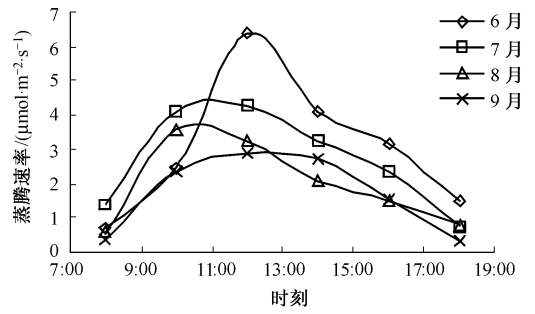


图 3 狼牙刺蒸腾速率日变化
FIGURE 3 Diurnal changes of transpiration rate of *S. vicifolia*

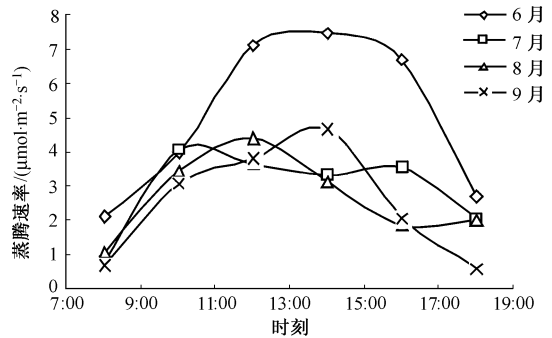


图 4 柠条蒸腾速率日变化
FIGURE 4 Diurnal changes of transpiration rate of *C. korshinskii*

刺净光合速率平均值与柠条接近 ($5.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),反映出人工柠条较天然灌木狼牙刺在单叶光合生产能力方面不具有优势. 蒸腾速率月变化趋势图(图 6)表明:从 6 月底至 9 月底,狼牙刺与柠条的蒸腾速率呈逐月下降趋势. 二者蒸腾速率月均值的种间差异比较明显,而且狼牙刺的蒸腾作用月均值 ($2.28 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 比柠条 ($3.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 低 30%.

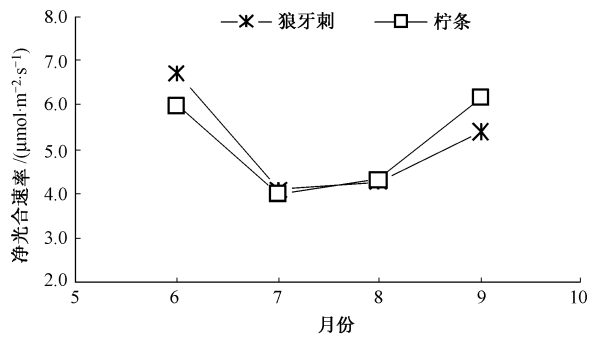


图 5 净光合速率月变化
FIGURE 5 Seasonal changes of net photosynthetic rate of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

研究表明^[12,14],当土壤干旱时光合速率与大气湿度呈线性正相关,与林地土壤水分有显著的相关关

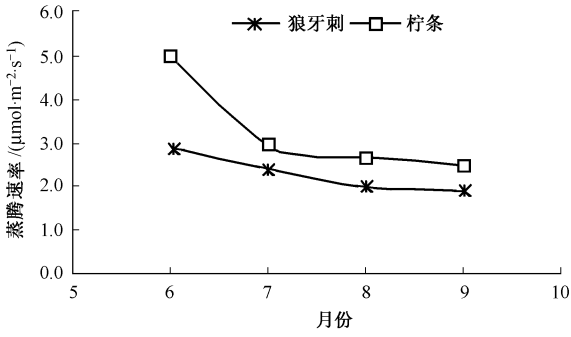


图6 蒸腾速率月变化

FIGURE 6 Seasonal changes of transpiration rate of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

刺的生物学特性优于柠条,并且可能对当地的干旱环境有着更强的适应能力,从而在水分消耗相当的情况下表现出更高的生物产量.

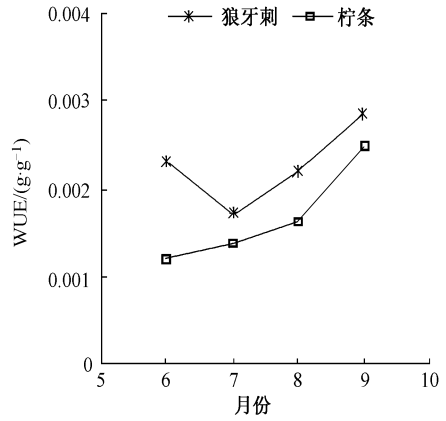


图7 水分利用效率月动态

FIGURE 7 Seasonal changes of WUE of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

系,土壤干旱是制约草原植物光合生产的主要自然生态因子.说明土壤供水能力影响植物的生理活动,而这种影响能够通过光合速率的变化,间接地反映出来.本研究表明,狼牙刺的净光合速率与土壤含水量之间极显著相关,相关系数达到 0.966 ($r_{0.01} = 0.959$).蒸腾速率 $E(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 与月平均土壤含水量(表2)的相关分析表明,蒸腾速率与土壤含水量正相关,相关系数为 0.742 ($r_{0.05} = 0.878$),但未达到显著水平.这说明蒸腾作用的季节变化与土壤水分有正相关关系,但其自身生理活动和生长节律及气候因子对蒸腾作用有很大的影响,从而蒸腾作用与土壤水分单因子没有表现出显著的相关性.

表2 狼牙刺的净光合速率、蒸腾速率、土壤水分的测定值

TABLE 2 The values of net photosynthetic rate, transpiration rate and soil water of *S. vicifolia*

	月份			
	6	7	8	9
净光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	6.75	4.08	4.26	5.4
蒸腾速率/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	2.9	2.4	1.95	1.88
3 m 土层平均含水量/%	7.76	5.93	5.48	6.53
蒸散耗水/mm(狼牙刺/柠条)	190.9/	268.3/	69.1/	30.4/
	172.9	267.0	70.7	23.6

表3 树种的生长因子

TABLE 3 The growth factors of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

样地	平均分	叶量/ 枝数	地上部生物 量/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	生物量密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	种群密度/ $(\text{株} \cdot \text{hm}^{-2})$
柠条	18	992.38	20.0	12.7	10 625
狼牙刺	5.67	720.00	27.3	18.6	10 000

2.2 枝水势对照研究

2.2.1 枝水势日变化

从狼牙刺和柠条的水势变化日进程(图8)可以看出,两个灌木种的水势日进程曲线均为单峰型.早晨 6:00 枝水势是白天中的最高值,两树种均为一 0.83 MPa.随着光照强度、气温的增加,8:00 以后枝水势急剧下降,12:00 左右达一天中的最低点(-3.02 MPa),4:00 以后开始逐渐恢复上升.原因是:从早晨开始,随着光照强度的增加、气温的升高,狼牙刺的生理活动如蒸腾作用、光合能力逐渐加强.在土壤水分并不充足的情况下,一方面生理耗水的增加造成植物体含水量下降;另一方面植株的生理需水量却在上升,从而导致水分紧张度(PMS)的下

2.1.3 水分利用效率分析

植物的水分利用效率(water use efficiency)反映植物由于蒸腾消耗的单位水量所能产生的光合产量(g/g),在植物适宜性评价中被广泛应用^[15].图7反映出,6-9月份狼牙刺各个月份的水分利用效率高 于柠条,多月平均水分利用效率分别为 0.002 3 和 0.001 7(g/g),比柠条高 26.1%,但是狼牙刺和柠条的总蒸散耗水量相当(590.9/574.4 mm).表3显示了狼牙刺与柠条的生长特征.可以看出:狼牙刺与柠条的种群密度接近,但其叶量较小、茎叶比较高,地上部生物量为 27.3 t/hm²,柠条地上部生物量为 20.0 t/hm²,前者比后者高 26.7%,生物量密度(18.6 t/hm²)比人工柠条(12.7 t/hm²)高 31.7%.说明狼牙

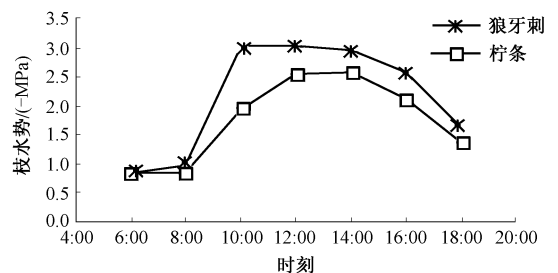


图8 枝水势日变化

FIGURE 8 Diurnal changes of water potential in branches of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

降. 下午随着气温下降、光照减弱, 植物生理活性跟着下降, 从而水分供需矛盾弱化, 水势开始不断回升, 至翌日早晨完成一个变化周期.

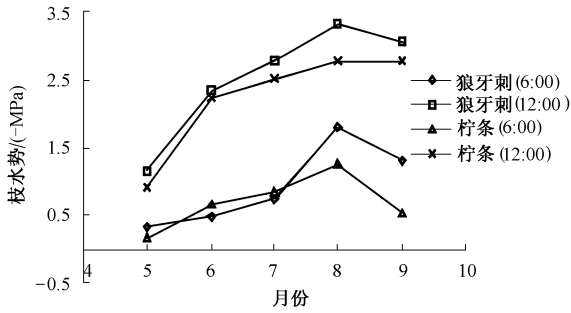


图 9 枝水势月动态

FIGURE 9 Seasonal changes of water potential in branches of *S. vicifolia* and *C. korshinskii*

可以看到: 在一天当中狼牙刺的枝水势总低于柠条, 表明其具有更强的吸收土壤水分的能力. 用黎明前枝水势 PWPB (6:00) 和正午枝水势 MWPB (12:00) 差值的绝对值作为植物水势的变化幅度, 幅度的大小可以反映植物对干旱环境的适应策略. 差值越大表明其越耐旱, 值小则表明植物对干旱相对不敏感^[16,17]. 这里, 狼牙刺水势的变化幅度为 2.19 MPa, 柠条的水势变化幅度为 1.7 MPa. 以上两点表明: 狼牙刺比柠条对干旱环境具有更强的适应能力.

2.2.2 枝水势月变化

尽管植物水势与外界环境条件和植物内部生理之间有着非常复杂的关系, 但在 1 年里, 狼牙刺和柠条的枝水势仍然表现出较好的规律性(图 9). 不论是 PWPB, 还是 MWPB, 植物生长从初期(5 月)到盛期(8 月), 枝水势有着不断下降的趋势. 原因是: 早春 4、5 月份, 植物处于生长初期, 生长需水少且水分散失也较少, 同时土壤水分含量较高, 植物体含水量也较高, 所以植物体内水分紧张度低、枝水势值较高; 进入 6、7 月份, 一方面植物生长逐渐旺盛, 叶面积不断增加, 生理需水量、蒸散耗水量均大幅增加, 另一方面土壤水分严重亏缺, 导致枝水势不断降低; 9 月底, 光照强度、日均温下降, 植物生长进入衰退期, 加之此时土壤水分较高, 因而枝水势升高. 此外, 可能受外界环境的影响(如清晨的雾气、或露水), PWPB 的种间差异相对不明显. 但是从 5—9 月份, 狼牙刺的 MWPB 总是略低于柠条, MWPB 年均差为 0.37 MPa, 这又一次说明了狼牙刺比柠条具有更强的抗旱性.

2.3 狼牙刺灌木林的土壤水分效应

从图 10、表 4 可以看到(2001 年数据引自本课题组前期的测定结果): 10 m 土层剖面上, 撂荒地土壤水分含量均衡, 大小在 9% 左右, 不存在土壤干

层. 柠条地土壤水分含量较荒地低, 但 5 m 以下平均含水量在 7% 以上, 干燥化程度较轻, 8 m 以下土壤含水量随深度大幅增加, 与撂荒地含水量接近, 表明柠条的耗水深度在 0~8 m 间. 狼牙刺地 5 m 以上为土壤水分活跃层, 生长所消耗的水分可以通过降水得到补充. 5 m 以下土壤含水量逐渐降低, 形成干层, 并且随深度的增加干燥程度有加剧的趋势. 经过两个生长季节, 狼牙刺地 10 m 土层内土壤含水量并未发生明显变化(2 m 以上土壤水分的变化是由于水分测定时间分别在生长初期和末期导致), 土壤干层没有进一步发展. 但干层深度(>10 m)超过柠条地.

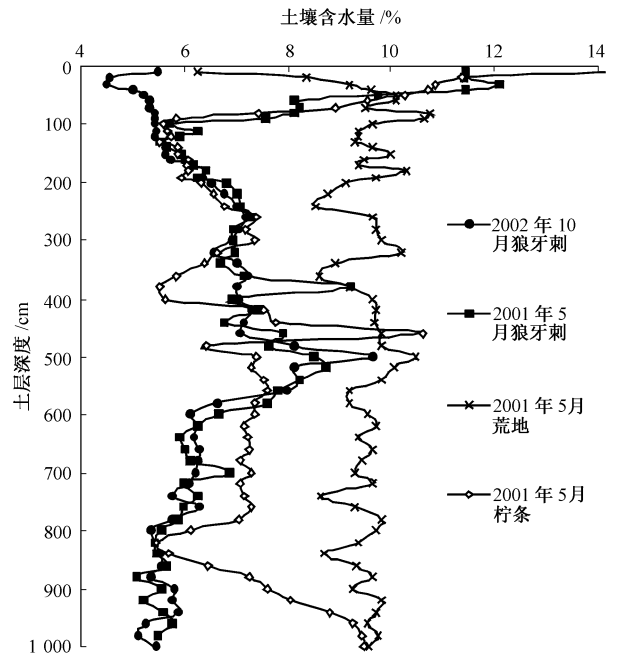


图 10 10 m 土层剖面土壤水分动态

FIGURE 10 The variations of soil water in 10 m profile

表 4 狼牙刺地每 2 m 平均土壤水分含量 %
TABLE 4 The average soil water content in every 2 m interval profile in *S. vicifolia* plot

	土层深度/m				
	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
2001 年 5 月	7.74	7.22	7.73	6.08	5.47
2002 年 10 月	5.52	6.98	7.64	6.04	5.50

上述土壤水分状况的分析表明: 天然灌木狼牙刺比柠条具有更强的吸收土壤水分的能力, 表现在多年用水深度上. 同时, 狼牙刺的生长与当地降水处于一种平衡状态, 并按其固有的自然规律演替和发展, 所以土壤水分也处于一种相对稳定的状态. 然而目前关于土壤干层对植物生长的长期影响还不清楚, 因此, 在人工植被建设中, 干层的存在应该引

起足够的重视,必须研究、考虑深层土壤缺水对植被长期发展的潜在影响.

3 结 论

1) 狼牙刺的净光合速率年均值与柠条相当($5.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 蒸腾速率($2.28 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 年均值比柠条($3.26 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 低 30%, 其光合生产能力受土壤水分多少的显著影响.

2) 与柠条相比, 狼牙刺对干旱环境具有更强的适应能力. 表现在 3 个方面: 狼牙刺枝水势的日变化幅度明显(2.19MPa) 高于柠条(1.7MPa), 在 1 年中, 其枝水势总小于柠条枝水势; 狼牙刺的月平均水分利用效率(0.0023g/g) 比柠条(0.0017g/g) 高出 26.1%, 而且在蒸散耗水量相当的情况下, 其叶量和生物产量也远高于柠条; 狼牙刺比柠条具有更强的利用深层土壤水分的能力, 但在两个生长季中 10 m 土层剖面土壤水分未发生明显变化, 表明其生长与当地降水处于动态平衡状态.

狼牙刺具有较强的利用深层土壤水分能力、很好的抗旱能力和较高的光合生物产量, 是一种在黄土区值得推广的造林树种.

参 考 文 献

[1] 陈云明, 梁一民, 陈积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 339-345.
CHEN Y M, LIANG Y M, CHENG J M. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 339-345.

[2] 张信宝, 齐永青. 非干旱造林困难地区植被恢复的科学检讨及建议[J]. 中国水土保持, 2004(10): 5-7.
ZHANG X B, QI Y Q. Review and suggestion for vegetation reconstruction in the non-arid region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(10): 5-7.

[3] 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2): 53-56.
HOU Q CH, HAN R L. Problems on vegetation construction in Loess Plateau region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(2): 53-56.

[4] 张兴昌, 卢宗凡. 坡地土壤水分动态及耗水规律研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 46-56.
ZHANG X C, LU Z F. Study on soil moisture dynamic and water consuming law in slopeland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 46-56.

[5] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
WANG G L, LIU G B, XU M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. *Bullet of Soil and Water Conservation*, 2001, 22(1): 1-5.

[6] 魏天兴, 朱金兆. 黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 45-51.
WEI T X, ZHU J Z. Feature of water supply and consumption and productivity of stand in Loess region [J]. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1999, 5(4): 45-51.

[7] 侯凤莲, 纪兆兴, 丁梦娟. 五种阔叶树光合特性研究[J]. 吉林林学院学报, 1995, 11(2): 100-104.
HOU F L, JI Z X, DING M J. Study on the photosynthetic characteristics of five species of broad-leaved trees [J]. *Journal of Jilin Forestry College*, 1995, 11(2): 100-104.

[8] 李德全, 邹琦, 陈炳嵩. 测定植物组织水势的压力室法[J]. 山东农业科学, 1990(3): 46-48.
LI D Q, ZOU Q, CHEN B S. Mensurating the water potential by chamber [J]. *Agriculture Science in Shandong*, 1990(3): 46-48.

[9] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
PAN R Z. *Plant physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

[10] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 等. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401-410.
WANG M B, LI H J, CHAI B F, et al. A comparison of transpiration photosynthesis and transpiration efficiency in four tree species in the Loess region [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5): 401-410.

[11] 杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 草原植物光合生理生态研究[J]. 中国草地, 1999(3): 20-27.
DU Z C, YANG Z G, CUI X Y. Study on photosynthetic physiological ecology of plants in the typical steppe zone [J]. *Grassland of China*, 1999(3): 20-27.

[12] 高清竹, 杨吉力, 乌力吉, 等. 库布齐沙地油蒿光合作用特性与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 1999(3): 276-279.
GAO Q Z, YANG J L, WU L J, et al. Relationship of photosynthetic characteristics of *Artemisia ordosica* and environmental factors in Hobq sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 1999(3): 276-279.

[13] 刘应迪, 李菁, 陈军, 等. 两种五倍子蚜虫冬寄主藓类植物的光合特性及其与光照、温度和植物体水分含量变化的关系[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 687-692.
LIU Y D, LI J, CHEN J, et al. Net photosynthetic rate of two species of wintering host mosses for gallaphids and its response to light, temperature and water content [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 687-692.

[14] 杜占池, 杨宗贵. 不同土壤型羊草光合和蒸腾作用特性的比较研究[J]. 植物学报, 1995, 37(1): 66-73.
DU Z C, YANG Z G. Comparative study on the characteristics of photosynthesis and transpiration in an *eurolpidium Chinese* of different soil types [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 37(1): 66-73.

[15] 山仑. 植物水分利用效率与半干旱地区农业节水[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(1): 61-66.
SHAN L. Water use efficiency of plant and agriculture water saving in the semi-arid region [J]. *Plant Physiology Communications*, 1994, 30(1): 61-66.

[16] 柴宝峰, 李鑫. 海红和刺槐水分参数的研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1997, 20(1): 91-95.
CHAI B F, LI C. A study on main water parameters of *Malus micromalus* and *Robinia pseudoacacia* [J]. *Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.)*, 1997, 20(1): 91-95.

[17] 李洪建, 王孟本. 黄土区四个树种植物水势的研究. 木本植物研究, 2001, 21(1): 100-105.
LI H J, WANG M B. A study on water potential characteristics in four tree species in Loess region [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2001, 21(1): 223-227.