

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH₄吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 祎,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O₃及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响
..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果
..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性	何苑曦,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律	申家朋,张文辉 (2746)

景观、区域和全球生态

南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)

资源与产业生态

基于 GIS 的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)

学术信息与动态

全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 nd Open Science Meeting) 会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
-----------------------------------------------------------------------	----------------

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201212041746

张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 周泽福. 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级. 生态学报, 2014, 34(10): 2519-2528.

Zhang S Y, Xiang J B, Zhang G C, Zhou Z F. Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic productivity classification. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2519-2528.

黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应 及其生产力分级

张淑勇¹, 夏江宝², 张光灿^{1,*}, 周泽福³

(1. 山东农业大学林学院、山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 泰安 271018;

2. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州学院, 滨州 256603;

3. 中国林业科学研究院林业研究所、国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 在半干旱黄土丘陵区, 以 3 年生天然次生灌木黄刺玫为材料, 研究了叶片光合生理参数对土壤水分 (*RWC*) 的响应特征及光合生产力分级。结果表明: 当 *RWC* 在 33.8%—81.3% 时, 叶片净光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 的变化曲线为明显的双峰曲线; 上午阶段 (11:00 时之前) P_n 的下降主要是气孔限制引起的, 下午以非气孔限制为主; 随着 *RWC* 的增加, P_n 、 T_r 第 1 峰值出现的时间延后; 在此水分范围内, P_n 日均值一直维持在较高水平, P_n 最高值 (8.5 ± 1.8) $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 *RWC* 为 71.7% 时。水分利用效率 (*WUE*) 对 *RWC* 的响应有所差异, 当 *RWC* 大于 47.1% 时, *WUE* 呈不明显的双峰曲线, 第 1 峰值出现在 13:00 时, 并且前后时段 *WUE* 变化不大。 *RWC* 为 47.1% 时, *WUE* 维持在最高水平, 日均值为 (2.72 ± 0.59) $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。根据 P_n 、 T_r 、*WUE* 和 *RWC* 的定量分析, 以及从黄土丘陵区生态、经济效益同时考虑, 适合黄刺玫生长的 *RWC* 在 33.8%—71.7% 之间。以光合生理参数为指标对黄刺玫土壤水分有效性及生产力进行分级与评价, 确定 *RWC* > 90.4% 或 *RWC* < 33.8% 时为“中产中效水”; *RWC* 在 71.7%—81.3% 和 47.1%—71.7% 时分别为“高产中效水”和“高产高效水”, 其中 *RWC* 在 57.4% 左右时为“最优产效水”; *RWC* 在 18.8%—26.5% 时为“低产低效水”。

关键词: 阈值效应; 土壤水分; 生产力分级; 黄刺玫

Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic productivity classification

ZHANG Shuyong¹, XIAN Jiangbao², ZHANG Guangcan^{1,*}, ZHOU Zefu³

1 College of Forestry, Shandong Agricultural University, Shandong Province Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taian 271018, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

3 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: The loess plateau region is an extremely adverse eco-environment in China, and drought and water shortage are the most critical ecological factors restricting the development of local economy, vegetation restoration and the production of agriculture and forestry. With increasing water-resource crises and drying hazards, some tree species during the process of farmland to forest project grew slowly and even to dead on the parts of loess plateau; thus, the selection of tree species is critical for vegetation restoration, and the development of soil and water conservation plantation composed of shrubs, grasses

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201104068); 国家自然科学基金 (31100196, 31100468); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (BS2013NY010)。

收稿日期: 2012-12-04; 网络出版日期: 2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhgc@sdau.edu.cn

and arbors is significant for accelerating afforestation and soil and water conservation. However, complications such as single tree species and unreasonable tree species selection and arrangement in some areas have hindered the farmland to forest conversion and artificial vegetation construction in the loess plateau region. These complications reflect the fact that little is known about the local shrub species, and there is a lack of researches concerning the relationship between plants and water.

In this study, Li-Cor6400 portable photosynthesis system was used to investigate the threshold effect of net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE), stomata conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomata limitation (L_s) in leaves of three-year-old naturally regenerated *Rosa xanthina* L. shrubs in the loess hilly region, to soil water content obtained through artificial water supply and natural consumption, and its photosynthetic productivity was classified.

The results showed that the diurnal changes of P_n and T_r showed an evident double-peaked curve when the relative water content (RWC) was in the range of 33.8%—81.3%; the reduction of P_n was mainly caused by stomatal limitation in the morning (before 11:00) and non-stomatal limitation in the afternoon (after 13:00). The time when the first peak value of P_n and T_r appeared was delayed with increasing RWCs. The daily average P_n maintained high levels in the range of about 33.8%—81.3%, and the maximum daily average P_n (8.5 ± 1.8) $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ was observed at an RWC of 71.7%. Significant differences in the response of WUE to RWC were observed, and when the RWC was greater than 47.1%, the diurnal changes of WUE showed an inconspicuous single-peaked curve at 13:00 in the afternoon, with a minor variation scope before and after 13:00. When the RWC was 47.1%, the WUE was highest with a daily average rate of (2.72 ± 0.59) $\mu mol \cdot mol^{-1}$. According to the quantitative relations between the P_n , T_r , WUE and RWC, and ecological and economic benefits, the suitable RWC for *R. xanthina* L. growth ranges from 33.8% to 71.7%. Based on photosynthetic and physiological parameters, the soil water availability and productivity of *R. xanthina* L. was classified and evaluated. More than 90.4% or less than 33.8% of RWC exhibited medium yield and efficiency; and an RWC ranging from 71.7% to 81.3% and 47.1% to 71.7% was classified as high yield and medium efficiency and high yield and high efficiency, respectively. The optimum high productivity and efficiency was observed at an RWC of approximately 57.4%. An RWC of 18.8% to 26.5% was classified as low yield and low efficiency.

Key Words: threshold effect; soil water content; productivity classified; *Rosa xanthina* L.

在黄土高原地区,干旱缺水是制约当地经济发展的突出生态特征,也是制约植被恢复和农林业生产的重要因素。随着干旱胁迫的不断加剧,如何充分提高植物对有限水资源的有效利用率,是节水农林业研究的核心目标^[1-3]。黄土高原地区是我国生态问题最为严重的地区之一,由于人类活动的干扰和自然条件制约,部分地区出现退耕还林树种生产力低下、生长缓慢甚至死亡的现象,因此树种的选择在植被恢复过程中起到至关重要的作用,选择以灌木为主,营造灌、草、乔相结合的水土保持林,对加快植被恢复速度,保持水土具有重要的现实意义^[2,4-5]。但从黄土高原地区人工植被建设与退耕还林的现状看,很多地区存在树种单一、树种选择与立地配置不合理的问题。主要原因之一是人们对当地一些可以开发利用的优良树种资源认识不够,缺乏相关植物

种类的水分关系研究^[1-2,5-6]。通过对植物光合、蒸腾等生理参数与水分关系的响应过程进行分析,确定其生态适应性和水分生理特征,可为植被建设中科学合理植物种类选择和进行立地配置提供生理生态学基础。

黄刺玫(*Rosa xanthina* L.)系蔷薇科蔷薇属有刺落叶灌木,是我国北方山地广泛分布的次生植被的主要植物之一,根系发达,萌生能力强,有较强的生态适应性和抗逆性,可保持水土、防风固沙,有良好的生态学效益^[7-8]。因此,黄刺玫在黄土高原退耕还林与植被恢复中具有较大的开发潜力。但目前有关黄刺玫的研究,多集中于其生态学特性、群落演替及花、果的作用等方面^[9-10]。关于节水及其生理生态基础的研究在农林业上已取得较多研究成果^[11-13],涉及不同水分胁迫下植物解剖结构、作物产量及水

分亏缺对植物光合、蒸腾作用及水分利用效率的影响及其机理方面^[14-16]。已有的研究大多都局限于少数几个水分亏缺程度(如轻度胁迫、中度胁迫和重度胁迫)下的实验结果。而涉及本树种与土壤水分关系,尤其是在不同的水分梯度下的研究尚未见报道。因此,本文在半干旱黄土丘陵区,通过测定3年生黄刺玫光合生理参数与土壤水分的定量关系,分析探索黄刺玫光合作用、蒸腾作用和水分利用效率等生理参数对土壤水分的响应规律;尝试提出和建立基于光合生理参数的土壤水分有效性及生产力分级,为黄刺玫在半干旱黄土丘陵区植被恢复中的开发与推广利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省中阳县的车鸣峪林场,属黄河流域典型的黄土丘陵沟壑区,东经 111°04'—111°21'、北纬 37°03'—37°20'。该区属暖温带半干旱区,具明显的大陆性季风气候,气候干燥。多年平均降水量为 500—550 mm,降雨集中在 7—9 月份(占全年降水量的 70% 以上),年平均蒸发量为 1019.7 mm,平均气温 6℃ 左右,极端最高气温 35.6℃ (1994 年 6 月 16 日),极端最低气温 -24.3℃ (1980 年 1 月 30 日),无霜期 125—150 d,≥10℃ 年积温为 2500—3000℃。土壤以褐土居多,其次是棕壤,发育差,水土流失严重。属于森林草原灌丛植被区,现有树种少,林地大部分是疏林地,林分稳定性差。

2 材料与方法

2.1 实验材料及水分处理

实验材料为 3 年生的黄刺玫苗木,起苗前对圃地苗木进行了调查、逐一标记,起苗后精心挑选,基本确保了苗高、地径与长势的一致性。苗圃地平均苗高(98.6±4.3) cm,平均地径(1.83±0.31) cm,苗木定植前,冲洗根系后用吸水纸吸去苗木表面水分,迅速用电子天平称量苗木鲜重,以计算每株苗木干重。栽培基质为黄绵土,实验期间栽培基质保持自然肥力,不施肥。实验于 2010 年 3 月下旬进行布设,栽培容器高 110 cm、口径 55 cm,下部有排水通气孔。

用环刀法测得盆栽实验土壤的田间持水量为(27.2±1.3)%,土壤容重为(1.26±0.13) g/cm³。采用田间环境条件下(盆长期埋于土壤中,使盆内土壤

与田间土壤同温)人为给水和自然耗水相结合的方法,获取盆栽土壤不同的水分梯度。在每一植株附近(离植株约 0.2 m 处)各埋设一根长度为 1 m 的土壤中子水分仪测定铝管。选取生长健壮的盆栽苗 3—5 株(3—5 盆),实验观测 2 d 前(2010 年 7 月 20 日)浇水,使土壤水分饱和,利用 LNW-50A 型土壤中子水分仪和铝盒烘干称重法相结合监测土壤水分的变化,2 d 后获得初期水分梯度,质量含水量(SWC)为 24.6%,相对含水量(RWC)为 90.4%,进行第 1 次光合与蒸腾生理参数的测定。以后通过自然耗水,每隔 1—2 d 获取一个水分梯度。在 SWC 为 22.1%、19.5%、15.6%、12.8%、9.2%、7.2%、5.1% (RWC 为 81.3%、71.7%、57.4%、47.1%、33.8%、26.5%、18.8%) 时分别进行光合生理参数的测定,8 月 15 日结束。

2.2 实验方法

实验选择在气候稳定,极少降雨的 7 月份进行测定,于 2010 年 7 月 22 日晴朗天气下进行,从每株实验树的林冠中部,选 10 片生长健壮的向阳成熟叶片,应用 Li-6400 便携式光合仪对实验树种的光合生理指标以及相应的生态环境要素进行测定,使用开放式气路,空气流速为 0.2 dm³/min,每个点稳定 10 min 后读数,每个叶片重复 3—4 次,取平均值。光合生理参数测定时间为 7:00—17:00,每 2 h 测定 1 次。仪器自动记录净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、胞间 CO₂ 浓度(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)等生理参数以及大气温度(T_c , °C)、田间 CO₂ 浓度(C_a , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、相对湿度(RH, %)、光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)等环境因子。叶片水分利用效率(water use efficiency, WUE, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)和气孔限制值(L_s)分别用公式计算^[17],即: $WUE = P_n / T_r$ 和 $L_s = 1 - C_i / C_a$ 。

土壤含水量(SWC)测定用铝盒烘干称重法和 LNW-50A 型土壤中子水分仪,与光合作用观测同日进行,观测深度为 1.0 m(每 20 cm 为 1 层,取平均值)。文中的 SWC 为质量含水量(%),相对含水量(RWC, %)为 SWC 与田间持水量(FC)的比值。

2.3 数据处理

将不同土壤水分梯度处理、不同观测时间测定的土壤含水量(RWC)和叶片气体交换参数的数据集中处理,数据的统计计算和回归分析应用 SPSS

(Statistical Program for Social Science) 软件, 获得叶片气体交换参数 (P_n 、 T_r 、 WUE 、 G_s 、 C_i 、 L_s) 对土壤水分 (RWC) 的阈值响应。

3 结果与分析

3.1 光合速率和蒸腾速率对土壤水分的阈值响应

黄刺玫光合速率 (P_n) 的变化与土壤水分 RWC 密切相关, 并具有明确的阈值响应规律 (图 1)。当 RWC 在 33.8%—81.3% 时, 黄刺玫 P_n 的变化呈双峰曲线, 均出现光合“午休”现象, 上下午各出现 1 个峰值。随着 RWC 的增加, 第 1 峰值出现的时间延后至 11:00, P_n 的下降幅度也逐渐减小, 如: RWC 为 33.8% 时, P_n 下降幅度为 49.4%; RWC 为 81.3% 时, P_n 下降幅度为 8.2%。当 RWC 高于 81.3% 后, 随着 RWC 增

加 (至 90.4% 时), P_n 呈单峰曲线, 峰值出现在 13:00, 但全天中各时段 P_n 值反而下降 (图 1), 表明较高的土壤水分可以减缓植物的光合午休, 但不利于光合作用的提高。当 RWC 低于 26.5% 后, 随着 RWC 降低 (至 18.8% 时), 全天中各时段的 P_n 值一直处于较低的水平, 表明 RWC 低于 26.5% 会对植物光合作用产生严重的不良影响。 P_n 的日均值对 RWC 也有明显的阈值响应, 在 RWC 为 71.7% 时, P_n 日均值最大为 $(8.5 \pm 1.8) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 RWC 为 57.4% 时的 P_n 日均值 $((8.3 \pm 1.7) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 没有显著差异 (表 1)。随着 RWC 的升高或降低, P_n 日均值均明显下降, 在 RWC 为 33.8%—81.3% 时, P_n 日均值均维持较高水平。

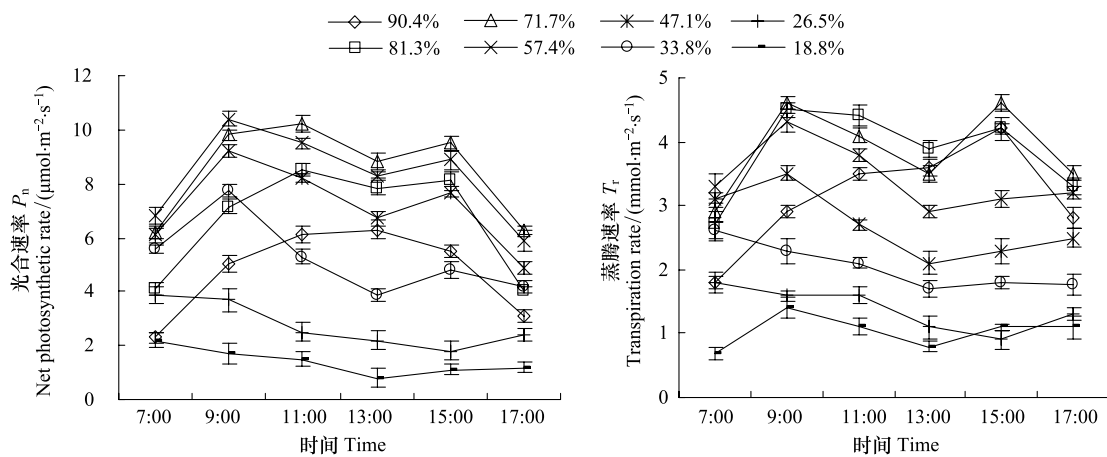


图 1 黄刺玫叶片光合速率和蒸腾速率对土壤水分的阈值响应

Fig. 1 Threshold effect of soil moisture on net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) in leaves of *R. xanthina* L.

综合以上分析, 如果提高黄刺玫的光合生产力, 需给予一定的土壤水分条件, 维持黄刺玫具有较高 P_n 的 RWC 在 33.8%—81.3% 之间, 高于或低于此水分范围, P_n 将明显下降, 其中最适宜的 RWC 为 71.7%。

蒸腾速率 (T_r) 对 RWC 的响应规律与 P_n 基本相似 (图 1), 在 33.8% < RWC < 81.3%, 黄刺玫 T_r 的变化呈双峰曲线, 第 1 峰值出现的时间, 随着 RWC 的增加逐渐延后, 如: RWC 为 33.8% 时, T_r 峰值出现在 7:00; RWC 为 81.3% 时, 峰值出现在 11:00。当 RWC 高于 81.3% 后, 随着 RWC 增加 (至 90.4% 时), T_r 呈现单峰曲线, 峰值出现在 15:00, 并且全天 T_r 值较低 (图 1), 表明土壤水分充足时, 水分可有效降低叶片

的温度, 从而造成叶片内外的压差减小, 反而使 T_r 降低, 此时叶片水分散失还存在较大潜力。当 RWC 低于 26.5% (降至 18.8%) 时, 全天中各时段的 T_r 值均较低, T_r 日均值为 $(1.0 \pm 0.3) \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1), 表明水分胁迫已经严重影响了黄刺玫正常的蒸腾功能。 T_r 日均值最大为 $(3.9 \pm 0.7) \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在 RWC 为 71.7%, 与 RWC 为 81.3% 时的 T_r 日均值 $((3.8 \pm 0.7) \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 没有显著差异 (表 1)。随着水分的增加或减少, T_r 下降。分析表明, 水分条件适宜时, 黄刺玫在高光、高温条件下可通过大量蒸腾失水来降低植物体内的温度, 为其正常生理活动创造条件。

表 1 不同土壤水分条件下黄刺玫叶片光合生理参数日均值(平均值+标准误差)

Table 1 Daily average value of photosynthetic and physiological parameters in leaves of *R. xanthina* L. under different soil moisture conditions (mean±SE)

RWC/%	P_n	T_r	WUE	G_s
90.4	4.7±1.6D	3.1±0.8B	1.50±0.30E	132±32C
81.3	6.6±2.0AB	3.8±0.7A	1.71±0.28D	186±52B
71.7	8.5±1.8A	3.9±0.7A	2.10±0.35C	245±58A
57.4	8.3±1.7A	3.4±0.5B	2.49±0.38AB	248±54A
47.1	7.1±1.5B	2.7±0.5AB	2.72±0.59A	190±56B
33.8	5.2±1.4C	2.0±0.4C	2.56±0.43B	154±50AB
26.5	2.8±0.9E	1.4±0.3D	1.98±0.26C	76±18D
18.8	1.5±0.5F	1.0±0.3E	1.47±0.83E	33±15E

同一行不同大写字母表示在 0.05 水平上差异显著,表格中数据为平均值±标准差;RWC:土壤相对含水量,soil relative water content; P_n :净光合速率,net photosynthetic rate; T_r :蒸腾速率,transpiration rate;WUE:水分利用效率,water use efficiency; G_s :气孔导度,stomata conductance

3.2 水分利用效率的阈值响应

不同土壤水分下 WUE 的变化规律具有明显的差异(图 2)。首先表现在变化曲线类型上,在 RWC 大于 47.1%时,WUE 的变化规律为不明显的单峰曲线;在 RWC 为 26.5%—33.8%时为双峰曲线。其次为 WUE 峰值出现的时间上,在 RWC 为 47.1%—81.3%时,WUE 峰值出现在 13:00,且前后 WUE 变化幅度较小;在 RWC 为 90.4%时,WUE 峰值出现在 9:00,此时 WUE 峰值较小为 1.8 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$;在 RWC 为 26.5%—33.8%时,WUE 峰值分别出现在 9:00 或 15:00。当 RWC 降至 18.8%左右时,黄刺玫 WUE 的变化进程呈现一降不起型的日变化规律,即 7:00 左右为全天中的最高值,之后 WUE 维持在较低水平。

WUE 的日均值对 RWC 的响应表现为:在 RWC 为 47.1%左右时,全天的 WUE 维持在较高水平,日均值为(2.72±0.59) $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ (表 1),其次是 RWC 为 33.8%左右时,WUE 也具有较高水平,日均值为(2.56±0.43) $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ (表 1)。但当 RWC 超过 71.7%以后,WUE 反而下降,如 RWC 为 81.3%时,WUE 日均值为(1.71±0.28) $\mu\text{mol}/\text{mmol}$;RWC 为 90.4%时,WUE 日均值为(1.50±0.30) $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ (表 1),表明过高的土壤水分不利于水分的有效利用。当 RWC 降至 18.8%左右时,上午时段虽然具有较高的 WUE,但下午时段的 WUE 明显下降。依据上述结果认为,维持黄刺玫较高 WUE 的适宜土壤水分

范围在 RWC 为 26.5%—71.7%之间。

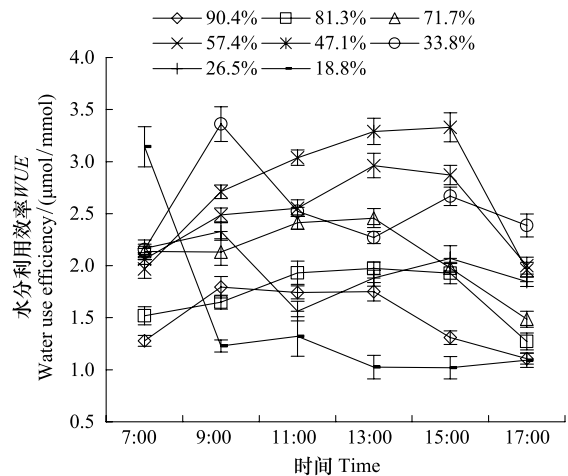


图 2 不同水分条件下黄刺玫叶片水分利用效率的日变化
Fig.2 Daily change of water use efficiency (WUE) in leaves of *R. xanthina* L. under different soil water content

综上所述,维持黄刺玫同时具有较高 P_n 和 WUE 的 RWC 在 33.8%—71.7%之间,在此土壤水分范围内,黄刺玫的 T_r 没有受到明显的抑制。

3.3 气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值的阈值效应

叶片气孔导度(G_s)对 RWC 具有明显的阈值效应,在 RWC 为 33.8%—81.3%之间, G_s 的变化类型为双峰曲线,第 1 峰值出现在 9:00 或 11:00,随着 RWC 的增加, G_s 峰值出现的时间延后,第 2 峰值均出现在 15:00。在较高水分条件下(RWC 为 90.4%), G_s 变化类型为单峰曲线,峰值出现在 13:00。在 RWC 为 18.8%—26.5%之间, G_s 在早上 7:00 左右为全天中的最高值,之后 G_s 维持在较低水平。气孔限制值(L_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)对 RWC 具有不同的变化规律(图 3)。分析得出:不同 RWC 下,上午时段(7:00—11:00)和下午时段(13:00—17:00)限制光合作用的生理机制不同。在 RWC 为 81.3%—90.4%之间, P_n 下降,伴随着 G_s 和 C_i 明显下降, L_s 明显升高(图 3),根据气孔限制理论^[17],限制黄刺玫 P_n 下降原因主要以气孔限制为主;在 RWC 为 26.5%—71.7%之间,随着时间的推移,上午时段不同 RWC 下的 G_s 和 C_i 明显下降, L_s 明显升高(图 3);但下午时段又呈现 G_s 和 L_s 下降, C_i 明显升高(图 3)。表明限制黄刺玫 P_n 的原因,在上午时段(11:00 以前)以气孔限制为主(由于气孔因素造成的 CO_2 供应不足);而下午时段(13:00 以后)转变为非气孔限制为主

(环境因子的胁迫已导致叶肉细胞光合机构的光合能力下降)。

当 RWC 小于 26.5% (降至 18.8%) 时,从 7:00 开始 C_i 明显上升,而 L_s 明显下降(图 3),即黄刺玫全天的 P_n 一直处于非气孔限制状态。表明严重的水分胁迫,已导致黄刺玫的光合结构发生破坏,叶肉细胞光合能力下降,光合生产力受到严重影响。

3.4 土壤水分生产力分级及评价

依据 P_n 、 T_r 和 WUE 3 个光合生理指标,对八个土

壤水分点进行聚类分析,当聚类数为 3 时,结果见表 2。依据类平均值大小,可划分 A 类 RWC 为低 P_n 、低 T_r 、中等 WUE 型;B 类 RWC 为中等 P_n 、中等 T_r 、中等 WUE 型;C 类 RWC 为高 P_n 、高 T_r 、高 WUE 型。方差分析表明,这 3 个水分段的划分,对 P_n 、 T_r 及 WUE 有较大的影响,差异性显著 ($P < 0.05$),说明土壤水分对黄刺玫幼苗的光合生理特性影响较大。

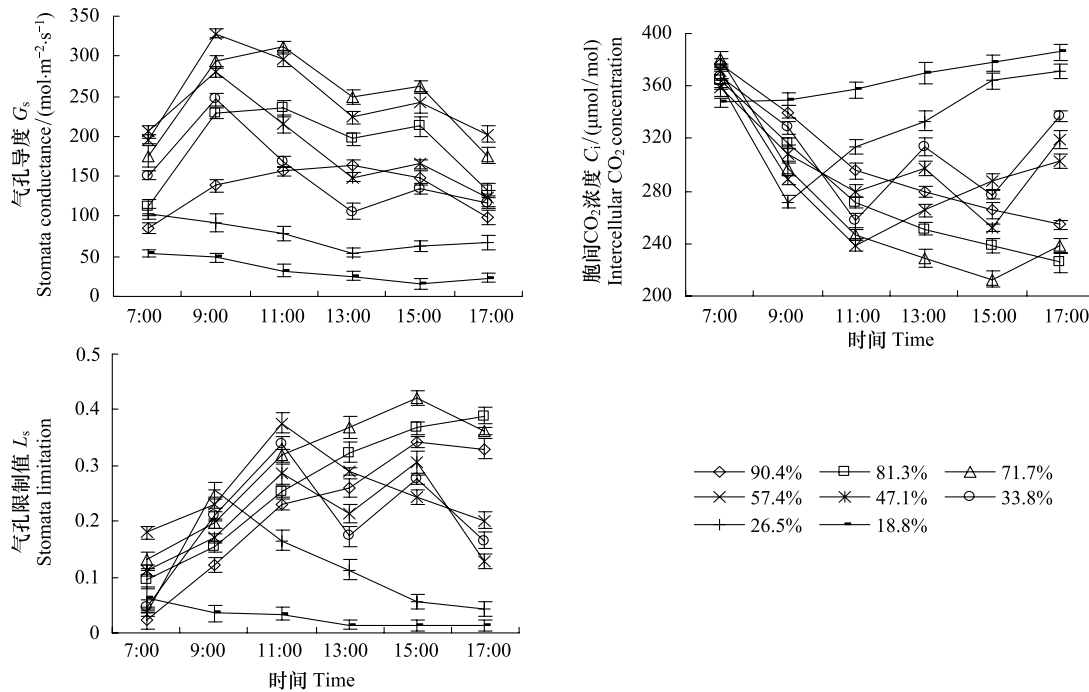


图 3 黄刺玫叶片气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值对土壤水分的阈值响应

Fig.3 Threshold effect of soil moisture on stomata conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomata limitation (L_s) in leaves of *R. xanthina* L.

表 2 土壤水分聚类分析及生产力分级

Table 2 Cluster analysis of soil water content and grading of soil moisture productivity

聚类数 Cluster	RWC /%	水分生产力分级 Grading of RWC productivity	土壤水分范围 The RWC range/%	光合参数 Photosynthetic parameters (mean±SE)		
				P_n /($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	T_r /($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	WUE /($\mu mol / mmol$)
A	90.4, 33.8	中产中效水	>90.4 or < 33.8	4.99±0.37b	2.59±0.77b	2.02±0.73b
B	81.3, 47.1,	高产中效水, 高产高效水	71.7—81.3, 47.1—57.4	7.63±0.90a	3.46±0.54a	2.24±0.24a
	57.4, 71.7					
C	26.5, 18.8	低产低效水	18.8—26.5	2.12±0.90c	1.18±0.28c	1.80±0.26c

同一行不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

依据植物水分生理学基础和对土壤水分点的聚类分析,结合植物光合生理过程对土壤水分的响应规律(图 1,图 2),明确各土壤水分临界值的生理意义,建立黄刺玫土壤水分有效性分级与评价标准。

用“产(P_n)”和“效(WUE)”的概念代替了以往研究中“效(根系吸水难易)”的概念,赋予“产”和“效”更加明确的生理意义^[18]。例如“高产”和“高效”指的是 P_n 和 WUE 高,“中产”和“中效”指中等以上(或较

高)的 P_n 及 WUE , 而“无产”和“无效”意味着 P_n 及 WUE 为零(或负值)。黄刺玫土壤水分生产力分级及有效性分析如表 2: 在 $RWC > 90.4\%$ 或 $RWC < 33.8\%$ 的范围内, 黄刺玫 P_n 较高, 类均值比其最高 P_n ($10.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 下降 52%, 能获得中等光合生产力水平, 而 WUE 类均值比其最高 WUE ($3.4 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) 下降了 41%, 并随 RWC 的增加或降低均出现减小的趋势(图 2), 故将其都称之为“中产中效水”。当 RWC 在 18.8%—26.5% 范围内, P_n 和 WUE 都很低, P_n 类均值比其最高水平 ($10.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 下降了 80%, WUE 类均值比其最高水平 ($3.4 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) 下降了 50%, 并随 RWC 的降低均急剧减小(图 2), 故将其都称之为“低产低效水”, 同时可推测, 随着土壤水分的持续减少, 造成 P_n 和 WUE 向小于零的趋势发展, 不能形成生产力, 土壤水分不能被有效利用, 易形成“无产无效水”。即该范围内有向“低产低效水”过渡趋势, 极限区域为“无产无效水”。

当 RWC 在 47.1%—81.3% 范围内, P_n 较高, 达到其最高水平的 73% 以上, 能获得中度以上的光合生产力水平, 故称其为高产水, 但 RWC 在 71.7%—81.3% 范围内, WUE 达到中等生产效率, 能达到最高 WUE 的 56% 以上, 故称其为“高产中效水”, RWC 在 47.1%—71.7% 范围内, WUE 能达到最高 WUE 的 76% 以上, 故称其为“高产高效水”。从表 1 可知, 该范围内当 RWC 超过 81.3% 左右时, 其 WUE 下降较快, 有“中效水”向“低效水”转化的趋势, 其中 RWC 在 57.4% 左右时, P_n 与 WUE 均能达到最高水平, 能使黄刺玫获得最高产效的生产力水平, 称其为“最优产效水”。

4 讨论与结论

植物叶片光合作用日变化是植物物质积累与生理代谢的基本过程, 也是分析环境因素影响植物生长和代谢的重要手段^[19-20]。有研究表明, 植物光合“午休”现象主要是由环境因子和生理因子导致的^[21-22]。van Wijk 等人^[23] 提出, 引起植物叶片 P_n 午间降低的植物内在因素不外乎气孔的部分关闭(气孔限制)和叶肉细胞自身活性下降(非气孔限制)两类。在较高水分条件下(RWC 为 90.4%), 黄刺玫的变化类型为单峰曲线, 在中午前后达到最大值, 这可能是因为较高的土壤水分条件降低了叶片的温度,

增加了气孔的开张程度^[24-25]。随着时间的推移, RH 有所升高, 光强和气温均降低, 不能使 P_n 上升。在 RWC 为 33.8%—81.3% 之间, 黄刺玫 P_n 的双峰型变化可能是因为随着 PAR 的增强, 叶温逐渐升高, RH 逐渐降低, 气孔首先受到影响并开始关闭, 气孔的关闭必然使进入叶片的 CO_2 也随之减少, P_n 也因而降低。由于气孔的关闭是一个迅速而灵活的可逆过程, 在午间高光辐射、高温、低湿的情况下, 叶片气孔关闭以降低蒸腾, 保持体内水分, 这是对干旱环境的一种适应^[26]。并且随着水分胁迫的加剧, 第 1 峰值出现时间延后, 这与 Gomes-Laranjo 等人^[27] 的研究一致。下午光强开始减弱, 叶温、 RH 有所回升, 气孔又重新开张, 导致 P_n 再次上升。黄刺玫叶片在中午前后(11:00—13:00) C_i 降低, L_s 反而下降(图 3), 表明 P_n 降低并非由于光照强烈出现对叶片光合作用的光抑制和光呼吸增强(非气孔限制)造成的, 而是因为 CO_2 不足(气孔限制)引起的。当 RWC 小于 30.5% 时, 黄刺玫处于严重水分胁迫下, 植物本身为了防止蒸腾对水分的散失, 增加气孔阻力, 因而 P_n 一直处于较低水平, 同时黄刺玫全天的光合作用一直处于非气孔限制状态。

蒸腾作用午间降低是中生和旱生植物通过关闭气孔来适应午间高温或防止叶片过度蒸腾失水的一种生态适应对策^[28-30]。本研究表明, 在轻度或中度水分胁迫下, 黄刺玫叶片 T_l 在中午出现下降趋势, 说明黄刺玫能够适当调整 T_l 以达到降低叶温, 而又不影响光合作用形成严重影响, 表现出对干旱地区特殊生境的较强适应能力。在较高水分条件下, 黄刺玫 T_l 在 15:00 左右达到最大值, 并且中午前后 T_l 值较高, 这可能是由于中午 PAR 增大, 叶温逐渐升高, G_s 开张程度增加导致的。在重度干旱胁迫下(RWC 小于 33.8%), 叶片气孔均出现过早关闭的现象, 说明随着水分胁迫程度的增强, 蒸腾失水导致叶片水分亏相应地引起叶片水势下降, 从而引起 G_s 下降, 最终避免了因过多蒸腾失水而造成叶肉组织受到伤害。从蒸腾特征上分析, 黄刺玫比较适应黄土高原干旱缺水的生态环境。大量野外调查发现, 黄刺玫多分布于阳坡或半阳坡等土壤水分较少的开阔地上。在山地阴坡分布较少, 其原因可能与阴坡的光照强度较弱有关。

叶片 WUE 是 P_n 与 T_l 的比值, 它表征植物对自身

蒸腾耗水的利用能力。 WUE 的变化是植物抗旱策略的重要组成部分,当苗木遭受水分胁迫时, WUE 必定会发生相应的变化,以保持苗木生长与水分消耗的平衡。许多学者^[31-33] 对不同植物的研究表明,适度水分胁迫能使植物 WUE 显著提高,本研究结果也支持这一观点,即适度的水分胁迫能够提高黄刺玫叶片的 WUE 。随着水分胁迫程度的增加,黄刺玫叶片的 WUE 呈增加趋势,这是植物对水分环境变化相适应的一种表现。严重水分胁迫 ($RWC < 26.5\%$) 限制了植物的蒸腾耗水,但 P_n 较低, WUE 能达到较高水平,严重水分亏缺严重损伤 CO_2 的同化机能,使光合机构受到破坏;当 RWC 在 $33.8\%—75.4\%$ 时,黄刺玫具有较大的 P_n 和 WUE ,且 T_r 较低,是低蒸腾、高产出的最佳水分范围;当 $RWC > 71.7\%$ 时, P_n 、 WUE 较高,但 T_r 较大,虽然林木的各种生理活动都处于非常活动的状态,但在水资源缺乏的地区,蒸腾作用的旺盛就意味着水分的大量消耗和浪费,从水分利用效益的角度考虑,水分利用的价值比例将不断降低,这在生产经营中是不可取的。干旱区植物能否适应当地的干旱环境条件,最主要的应看它们能否很好地协调碳同化和水分消耗之间的关系,也就是说 WUE 是其生存的关键指标^[34-35]。Robredo 等人^[36] 认为,植物对环境的适应使得 WUE 达到最高,即气孔导度对植物获取 CO_2 和水分散失的调节中符合最优控制的原则, WUE 在不同程度水分胁迫下的变化说明黄刺玫比较适应该地区干旱的生态环境。

综合上述结果,黄刺玫对干旱环境适应性较强,当 RWC 大于 71.7% 时,随 RWC 的增加, P_n 增加的幅度小于 T_r (图 1), WUE 急剧下降(图 2)。因此,黄刺玫适宜的 RWC 的上限大约在 71.7% 左右。当 RWC 为 33.8% 时,黄刺玫的 P_n 较低,植株生长较慢,但 T_r 也较低, WUE 较高,因此从防止水土流失、维护生态效益的角度来说还是可取的。所以,可认为 33.8% 左右的 RWC 是维持黄刺玫生长的土壤水分下限(或称之为所允许土壤水分最大亏缺程度)。当 RWC 小于 33.8% 时,严重的水分胁迫和高光强容易导致植株的 P_n 和 WUE 明显下降,严重影响黄刺玫的正常生长。因此,在半干旱黄土丘陵区,从生态效益和经济效益同时考虑,适合黄刺玫生长的土壤水分范围在 $33.8\%—71.7\%$ 之间。

在半干旱黄土丘陵区,干旱缺水、高温和强光是

经常出现的环境胁迫因子。在植物生长季节,白天大部分时间的 PAR 大都在 $1000—1700 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,甚至更高^[11,20];而土壤水分(尤其干旱阳坡的土壤水分),除了雨季较高之外,其他生长季节大都低于 15% ,甚至在 10% 以下^[11,20]。因此,黄刺玫的生长往往受到较严重的强光胁迫和水分胁迫,而且水资源缺乏的客观现实,又很难靠人工浇水来缓解土壤水分胁迫状况。据此,黄刺玫作为黄土丘陵区植被恢复中具有较大开发利用前途的优良灌木树种,在立地配置上应选择土壤水分条件较好和光照强度较低的阴坡或半阴坡进行栽培;在林分结构配置上,应与其它树种(尤其是乔木树种)进行合理搭配,并尽量减少水分胁迫和强光胁迫造成的不良影响,提高生产力。但黄刺玫抗旱性较强,为防止水土流失,改善地区生态环境,在阳坡也可以栽植。

References:

- [1] Lian G, Guo X D, Fu B J, Hu C X. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 647-654.
- [2] Wang L, Wei S P, Wu F Q. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau; a case study of Yangou catchment. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1543-1553.
- [3] Duan W X, Yu Z W, Zhang Y L, Wang D. Effects of supplemental irrigation on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in different spike-type wheat cultivars based on testing soil moisture. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(12): 1424-1432.
- [4] Jia Y, Li F M, Zhang Z H, Wang X L, Guo R Y, Siddique K H M. Productivity and water use of alfalfa and subsequent crops in the semiarid Loess Plateau with different stand ages of alfalfa and crop sequences. *Field Crops Research*, 2009, 114(1): 58-65.
- [5] Jiao J Y, Zhang Z G, Jia Y F, Wang N, Bai W J. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of North Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 28(7): 2981-2997.
- [6] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [7] Kunitake H, Imamizo H, Mii M. Somatic embryogenesis and plant regeneration from immature seed-derived calli of rugosa rose (*Rosa rugosa* Thunb.). *Plant Science*, 1993, 90(2): 187-194.
- [8] Rout G R, Samantaray S, Mottley J, Das P. Biotechnology of the rose: a review of recent progress. *Scientia Horticulturae*, 1999, 81

- (3): 201-228.
- [9] Zhang J T. Succession analysis of plant communities in abandoned croplands in the eastern Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(2): 458-474.
- [10] Jiao J Y, Han L Y, Jia Y F, Wang N, Lei D, Li L Y. Can seed removal through soil erosion explain the scarcity of vegetation in the Chinese Loess Plateau? *Geomorphology*, 2011, 132(1/2): 35-40.
- [11] Xie T L, Shen Y Y, Shao X Q, Gao C Y. Differences in photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency between four legume species on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1678-1685.
- [12] Silva E N, Ribeiro R V, Ferreira-Silva S L, Viégas R A, Silveira J A G. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1130-1137.
- [13] Lu P, Chacko E K, Bithell S L, Schaper H, Wiebel J, Cole S, Müller W J. Photosynthesis and stomatal conductance of five mango cultivars in the seasonally wet-dry tropics of northern Australia. *Scientia Horticulturae*, 2012, 138: 108-119.
- [14] Zheng S H, Yan C R. The ecophysiological and morphological characteristics of maize in seedling stage under water stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 1138-1143.
- [15] Zhang S, Chen L H, Duan B L, Korpelainen H, Li C Y. Populus cathayana males exhibit more efficient protective mechanisms than females under drought stress. *Forest Ecology and Management*, 2012, 275: 68-78.
- [16] Chun J A, Wang Q G, Timlin D, Fleisher D, Reddy V R. Effect of elevated carbon dioxide and water stress on gas exchange and water use efficiency in corn. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(3): 378-384.
- [17] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [18] Zhang G C, Liu X, He K N. Grading of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* woodland soil's water availability and productivity in semi-arid region of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 858-862.
- [19] Granett A L, Taylor O C. Diurnal and seasonal changes in sensitivity of plants to short exposures of hydrogen chloride gas. *Agriculture and Environment*, 1981, 6(1): 33-42.
- [20] Robinson J C, Bower J P. Transpiration from banana leaves in the subtropics in response to diurnal and seasonal factors and high evaporative demand. *Scientia Horticulturae*, 1988, 37(1/2): 129-143.
- [21] Huck M G, Ishihara K, Peterson C M, Ushijima T. Soybean adaptation to water stress at selected stages of growth. *Plant Physiology*, 1983, 73(2): 422-427.
- [22] Quick W P, Chaves M M, Wendler R, David M, Rodrigues M L, Passaharinho J A, Pereira J S, Adcock M D, Leegood R C, Stitt M. The effect of water stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(1): 25-35.
- [23] van Wijk K J, Schnettger B, Graf M, Krause G H. Photoinhibition and recovery in relation to heterogeneity of Photosystem II. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1993, 1142(1/2): 59-68.
- [24] Santesteban L G, Miranda C, Royo J B. Effect of water deficit and rewatering on leaf gas exchange and transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 2009, 121(4): 434-439.
- [25] Wu Y Z, Huang M B, Warrington D N. Growth and transpiration of maize and winter wheat in response to water deficits in pots and plots. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(1): 65-71.
- [26] Pascual I, Azcona I, Morales F, Aguirreolea J, Sánchez-Díaz M. Photosynthetic response of pepper plants to wilt induced by *Verticillium dahliae* and soil water deficit. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(9): 701-708.
- [27] Gomes-Laranjo J, Coutinho J P, Galhano V, Cordeiro V. Responses of five almond cultivars to irrigation; Photosynthesis and leaf water potential. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(3): 261-265.
- [28] Montero J I, Antón A, Muñoz P, Lorenzo P. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 323-332.
- [29] Sánchez-Blanco M J, Ferrández T, Navarro A, Bañón S, Alarcón J J. Effects of irrigation and air humidity preconditioning on water relations, growth and survival of *Rosmarinus officinalis* plants during and after transplanting. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(10): 1133-1142.
- [30] Bacelar E A, Santos D L, Moutinho-Pereira J M, Lopes J I, Gonçalves B C, Ferreira T C, Correia C M. Physiological behaviour, oxidative damage and antioxidative protection of olive trees grown under different irrigation regimes. *Plant and Soil*, 2007, 292(1/2): 1-12.
- [31] Pou A, Flexas J, del Mar Alsina M, Bota J, Carambula C, De Herralde F, Galmés J, Lovisolo C, Jiménez M, Ribas-Carbó M, Rusjan D, Secchi F, Tomàs M, Zsófi Z, Medrano H. Adjustments of water use efficiency by stomatal regulation during drought and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. berlandieri* × *V. rupestris*). *Physiologia Plantarum*, 2008, 134(2): 313-323.
- [32] Guerfel M, Baccouri O, Boujnah D, Chaïbi W, Zarrouk M. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian

- olive (Olea europaea L.)* cultivars. *Scientia Horticulturae*, 2009, 119(3): 257-263.
- [33] Karam F, Saliba R, Skaf S, Breidy J, Rouphael Y, Balendonck J. Yield and water use of eggplants (*Solanum melongena* L.) under full and deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1307-1316.
- [34] Ali M H, Hoque M R, Hassan A A, Khair A. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(3): 151-161.
- [35] Martín-Vertedor A I, Rodríguez J M P, Losada H P, Castiel E F. Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*Olea europaea* L., cv. Morisca) I. Growth and water relations. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 941-949.
- [36] Robredo A, Pérez-López U, de la Maza H S, González-Moro B, Lacuesta M, Mena-Petite A, Muñoz-Rueda A. Elevated CO₂ alleviates the impact of drought on barley improving water status by lowering stomatal conductance and delaying its effects on photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(3): 252-263.
- 参考文献:**
- [1] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征. *生态学报*, 2006, 26(3): 647-654.
- [2] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应——以燕沟流域为例. *生态学报*, 2009, 29(3): 1543-1553.
- [3] 段文学, 于振文, 张永丽, 王东. 测墒补灌对不同穗型小麦品种耗水特性和干物质积累与分配的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1424-1432.
- [5] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 王宁, 白文娟. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类. *生态学报*, 2009, 28(7): 2981-2997.
- [11] 谢田玲, 沈禹颖, 邵新庆, 高崇岳. 黄土高原4种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率. *生态学报*, 2004, 24(8): 1678-1685.
- [14] 郑盛华, 严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响. *生态学报*, 2006, 26(4): 1138-1143.
- [18] 张光灿, 刘霞, 贺康宁. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 858-862.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenetic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xiping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元