

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

中国生态学会
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33卷第19期

2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述 马凤娇, 刘金铜, A. Egrinya Eneji (5963)
- 非人灵长类性打搅行为研究进展 杨 斌, 王程亮, 纪维红, 等 (5973)
- 密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响 韩群花, 郭 聪, 张美文 (5981)
- 食物链长度远因与近因研究进展综述 王玉玉, 徐 军, 雷光春 (5990)
- AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制 罗巧玉, 王晓娟, 李媛媛, 等 (5997)
- 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展 薛建福, 赵 鑫, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, 等 (6006)
- 圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征 张明春, 黄 炎, 李德生, 等 (6014)
- 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配 赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 等 (6021)
- 风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响 杨志宏, 吴庆明, 董海燕, 等 (6028)
- 白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征 李艳红, 关进科, 黎大勇, 等 (6035)
- 生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响 罗媛媛, 刘金亮, 黄杰灵, 等 (6041)
- 基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究 吴文珊, 陈友铃, 孙伶俐, 等 (6049)
- 高榕榕果内 *Eupristina* 属两种榕小蜂的遗传进化关系 陈友铃, 孙伶俐, 武蕾蕾, 等 (6058)
- 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征 王树凤, 施翔, 孙海菁, 等 (6065)
- 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响 杨延杰, 王晓伟, 赵 康, 等 (6074)
- 极端干旱区多枝怪柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应 马晓东, 王明慧, 李卫红, 等 (6081)
- 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 等 (6088)
- 陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响 谭雪红, 郭小平, 赵廷宁 (6097)
- 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态 叶功富, 张尚炬, 张立华, 等 (6107)
- 珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较 裴男才, 陈步峰, 邹志谨, 等 (6114)
- AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响 宋成军, 曲来叶, 马克明, 等 (6121)
- 盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性 周家超, 付婷婷, 赵维维, 等 (6129)
- CO₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响 师志冰, 周 勇, 李 夏, 等 (6135)
- 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响 孟 焕, 王雪宏, 佟守正, 等 (6142)
- 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征 张 雯, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (6147)
- 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等 (6154)
- 濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例 邱广龙, 范航清, 李宗善, 等 (6163)
- 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响 尹瑞平, 吴永胜, 张 欣, 等 (6173)
- 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局 韩 路, 席琳乔, 王家强, 等 (6181)
- 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响 宗 宁, 石培礼, 蒋 婧, 等 (6191)
- 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系 杨 帆, 王志春, 王云贺, 等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华, 李 炯, 旷远文, 等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华, 赵 静, 王 凯, 等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙, 单秀娟, 周志鹏, 等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜, 张雪萍, 张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃, 陈晓倩, 吴文珊, 等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚, 任大川, 夏 涛, 等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良, 崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬, 信忠保, 覃云斌, 等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅, 王仲良, 王 堃, 等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银, 刘 洋, 熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟, 布仁仓, 刘宏娟, 等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏, 吕一河, 孙飞翔, 等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生, 喻 华, 冯文强, 等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 马军杰, 张 禹, 等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰, 陈 敏, 杨伟锋, 等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华, 王晓丽, 王 媛, 等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹, 吕瑜良, 徐 丽, 等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔, 狄晓艳, 王孟本, 等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯, 周宝同, 汪亚峰, 等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清, 李笑诺, 杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华, 叶士琳, 程 煜, 等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧, 岳文泽, 张云堂, 等 (6418)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区, 它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物, 它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖, 并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是, 生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明, 凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一, 在水分极度匮乏的荒漠生态系统, 它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

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/stxb201305161088

王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 刘京涛, 赵艳云, 孙景宽. 贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征. 生态学报, 2013, 33(19): 6088-6096.

Wang R R, Xia J B, Yang J H, Liu J T, Zhao Y Y, Sun J K. Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6088-6096.

贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征

王荣荣^{1,2}, 夏江宝^{2,*}, 杨吉华¹, 刘京涛², 赵艳云², 孙景宽²

(1. 山东农业大学林学院, 泰安 271018; 2. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603)

摘要:以黄河三角洲贝壳堤岛优势灌木酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)为试验材料,模拟贝壳砂生境系列水分条件,测定分析酸枣叶片在系列水分梯度下的光合参数光响应及叶绿素荧光参数,阐明酸枣主要光合生理参数的水分响应特征。结果表明:(1)酸枣叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)随土壤水分的增多先增大后减小, T_r 对土壤相对含水量(W_r)的敏感程度大于 P_n ,因而 WUE 维持在较高水平。(2)酸枣叶片 P_n 下降的原因在 $W_r > 25\%$ 时以气孔限制为主; $W_r < 25\%$ 时以非气孔限制为主,光合机构受到不易逆转的破坏。(3)酸枣叶片最大净光合速率、暗呼吸速率、表观量子效率(AQY)和光饱和点随土壤水分的增多先增大后减小,光补偿点、光抑制项(β)和光饱和项则先减小后增大。(4)在 W_r 为80%时,酸枣叶片PS II反应中心的光化学转化效率最高。当 $W_r < 30\%$ 时, AQY 和潜在光化学效率迅速减小, β 迅速增大,酸枣光抑制明显。当 $W_r < 25\%$ 时,非光化学淬灭系数迅速减小,初始荧光迅速增大,酸枣PS II受到不可逆的破坏。(5) W_r 在11%—25%内为低产低效水, W_r 在25%—58%内为中产中效水, W_r 在58%—80%内为高产高效水, W_r 在80%—95%内为中产低效水。贝壳砂生境酸枣叶片的光合作用对水分逆境具有较强的生理适应性和可塑性,在 W_r 为58%—80%内,酸枣光合生理活性较高,利于酸枣苗木生长。

关键词:贝壳堤岛;气体交换参数;叶绿素荧光参数;光合生产力;水分利用效率;阈值效应

Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells

WANG Rongrong^{1,2}, XIA Jiangbao^{2,*}, YANG Jihua¹, LIU Jingtiao², ZHAO Yanyun², SUN Jingkuan²

1 College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

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

Abstract: Three-year-old seedlings of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*, a dominant shrub in shell ridge island of China's Yellow River Delta, were used as experimental materials. A series of soil water content in sand formed from seashells were simulated by artificial feeding firstly and then plant transpiring. Light responses of photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Z. jujuba* var. *spinosa* under series water content were measured with CIRAS-2 portable photosynthesis system and FMS-2 portable fluorescence system, respectively. The threshold effects of the main photosynthetic and physiological parameters in leaves of *Z. jujuba* var. *spinosa* to soil water and their response relationships were elucidated, and the soil water availability on *Z. jujuba* var. *spinosa* leaves' photosynthesis was studied. The results showed that: (1) The net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) in leaves of *Z. jujuba* var. *spinosa* first increased and then decreased with the soil water increasing, while T_r was more sensitive to soil water variation than P_n , thus causing WUE at a higher level. (2) The main reason of P_n declining changed from stomatal limitation to non-stomatal limitation in leaves of *Z. jujuba* var. *spinosa* when soil relative water content (W_r) reduced to 25%, P_n was dominated by stomatal limitation when $W_r > 25\%$, and non-stomatal limitation when $W_r < 25\%$, meanwhile

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31100468, 41201023);山东省高校科技发展计划资助项目(J13LC03, J13LE57)

收稿日期:2013-05-16; 修订日期:2013-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiajb@163.com

photosynthetic apparatus was damaged irreversibly. (3) The maximum net photosynthetic rate, dark respiration rate, apparent quantum yield (AQY) and light saturation point in leaves of *Z. jujuba* var. *spinosa* first increased and then decreased, while light compensation point, photo-inhibition term (β) and photo-saturation term first decreased and then increased with the soil water increasing. The P_n light response parameters above all reached the optimum levels when W_r varied from 58% to 76%, meanwhile the photosynthetic activity was higher. (4) The potential photochemical efficiency (F_v/F_m) and actual photochemical efficiency of *Z. jujuba* var. *spinosa* first increased and then decreased with the soil water increasing, the photochemical transformation efficiency of PS II reaction center reached maximum when W_r was 80%. Non-photochemical quenching coefficient (NPQ) increased gradually with the aggravation of drought or waterlogging stress when W_r varied from 80% to 30% or from 80% to 95%, *Z. jujuba* var. *spinosa* PS II had strong ability of heat dissipation and could prevent photosynthetic apparatus from damage by dissipating excessive light energy. AQY and F_v/F_m decreased rapidly and β increased rapidly when $W_r < 30\%$, photo-inhibition occurred in *Z. jujuba* var. *spinosa* leaves significantly. NPQ decreased rapidly and initial fluorescence increased rapidly when $W_r < 25\%$, *Z. jujuba* var. *spinosa* PS II was damaged irreversibly. (5) 11%—25% of W_r was low productivity and low WUE for *Z. jujuba* var. *spinosa*, 25%—58% was middle productivity and middle WUE , 58%—80% was high productivity and high WUE , 80%—95% was middle productivity and low WUE . In summary, the photosynthesis of *Z. jujuba* var. *spinosa* had great physiological adaptability and plasticity to soil water stress in sand formed from seashells. The photosynthetic and physiological activity of *Z. jujuba* var. *spinosa* maintained at a relatively high level when W_r was between 58% and 80%, meanwhile *Z. jujuba* var. *spinosa* seedling could grow well, and the soil water maximum deficit level allowed in sand habitat for *Z. jujuba* var. *spinosa* occurred when W_r was 25%.

Key Words: shell ridge island; gas exchange parameter; chlorophyll fluorescence parameter; photosynthetic productivity; water use efficiency; threshold effect

光合作用是植物最重要的生理过程,光合效率水平是植物生产力和作物产量高低的决定性因素^[1]。土壤水分是影响植物光合生理过程的重要生态因子,对植物的光合作用、水分代谢及物质转运等生理活动产生重要作用^[2]。近年来,随着淡水资源的紧缺和干旱胁迫的加剧,干旱缺水成为制约植被恢复与农林业发展的关键生态因子^[3],如何在保证植物维持较高或者中等生产力水平的前提下,提高植物对土壤水分的利用效率成为农林业建设亟需解决的核心问题^[4]。目前对植物抗旱光合生理特性的研究主要集中在植物叶片气体交换参数和叶绿素荧光参数等主要光合生理参数对土壤水分变化的响应规律和作用机理方面^[5-6],大多局限于4—8个水分梯度下的试验结果^[7-8],缺乏土壤水分连续变化中的观测研究,从而导致植物光合生理活动对不同水分条件的响应机制及两者的定量关系等问题还不十分清楚。

贝壳堤由生活在潮间带的贝类死亡之后的壳体及其碎屑,通过波浪搬运在高潮线附近堆积而成,是淤泥质或粉砂质海岸所特有的滩脊类型,生态系统较为独特。黄河三角洲贝壳堤岛滩脊地带海拔相对较高,地下水位较低,贝壳砂土壤孔隙度大、粗砂粒含量最高,涵蓄降水能力差,加之该区域蒸降比较大,季节性缺水严重,从而导致该立地条件下植被生长受到干旱缺水的严重限制,植被类型以旱生的灌木和草本植物为主,生态系统脆弱。酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)是贝壳堤岛滩脊地带的建群种,具有较强的防风固沙和保持水土的功能,是黄河三角洲贝壳堤岛植被恢复与生态重建的优选树种。以往对酸枣的研究主要集中在药用和经济价值^[9]、培植技术^[10]以及干旱或复水条件下酸枣幼苗生长、生理和生化特性^[11-12]等方面,而贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数与土壤水分的定量关系及响应过程尚不明确,以至于现有的树木抗旱生理研究在应用于贝壳堤岛的适地适树及物种配置中受到较大限制。鉴于此,本研究通过模拟贝壳砂生境系列水分条件,测定分析酸枣叶片主要光合参数的光响应及叶绿素荧光参数,探讨酸枣叶片光合特性对土壤水分的响应规律,阐明贝壳砂生境酸枣生长适宜的水分条件,以期为黄河三角洲贝壳堤岛酸枣的立地选择及水分栽植管理提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在山东省黄河三角洲生态环境重点实验室的智能科研温室内进行,温室内的光强约为外界自然光强的85%,温度为18—30℃,CO₂浓度为345—365 μmol/mol,空气相对湿度为41%—65%。盆栽试验土壤于2011年10月取自黄河三角洲贝壳堤岛滩脊地带酸枣群落的贝壳砂,过筛去除直径大于2 mm的砂粒,土壤田间持水量为24%,土壤容重为1.3 g/cm³。以贝壳堤建群种3年生酸枣苗木为试验材料,植株平均地径为0.8 cm,平均树高为0.7 m。于2012年3月15日采用自制塑料箱体(长

80 cm×宽 40 cm×高 80 cm)进行苗木栽植,以避免栽植容器影响酸枣根系生长,共栽植 9 盆,每盆 1 株,置温室中正常培植管理。试验植株正常生长 121 d 后,选取生长健壮、长势基本一致的 5 株苗木作为观测样株,于 2012 年 7 月 14 日起进行酸枣叶片光合参数的光响应过程及叶绿素荧光参数的测定。

1.2 系列水分梯度的设计

采用人工给水和自然耗水相结合的方法获取系列土壤水分梯度。2012 年 7 月 12 日和 13 日,对 5 盆观测样株的土壤充分供水使之饱和,7 月 14 日开始停止供水,土壤水分通过植株蒸腾耗水逐渐减少,同时将土壤表面覆塑料薄膜以防止土壤水分蒸发,减缓土壤水分下降速度,于每个晴朗天气(每隔 1—2d)采用烘干法测定 5 盆土壤的重量含水量,每盆 3 个重复,8 月 11 日测定结束。根据重量含水量和田间持水量的比值计算土壤相对含水量(W_r),求取 W_r 平均值,获得 W_r 由 95% 降至 11% 的 18 个水分梯度。

1.3 测定内容与方法

在测定每个土壤水分梯度的当天 9:00—11:30,从每个观测样株中选取中上部健康、成熟叶 3 片,利用 CIRAS-2 型便携式光合仪(PP Systems, USA)对酸枣叶片光合参数的光响应过程进行测定。利用人工光源将光合有效辐射(PAR , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)控制在由 $1600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $20\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 13 个梯度内,每个光强控制 120 s,3 次重复读数。通过测定和计算,得到酸枣叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、水分利用效率($WUE = P_n/T_r$, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)^[13]、气孔导度(G_s , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)和气孔限制值($L_s = 1 - C_i/C_a$, 其中 C_a 为大气 CO_2 浓度)^[14]等主要光合参数的光响应过程。

利用 FMS-2 型便携脉冲调制式荧光仪(Hansatech, UK)对酸枣叶片的叶绿素荧光参数进行测定,与光合参数光响应测定同步进行。每株选取中上部健康、成熟叶 3 片,叶片暗适应 1 h 后测定初始荧光(F_o)和黑暗中最大荧光(F_m),待叶片在自然光下活化 1 h 后,与太阳光保持垂直,测定稳态荧光(F_s)和光下最大荧光(F_m')。通过计算,得到酸枣叶片的潜在光化学效率($F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$)、实际光化学效率($\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$)和非光化学淬灭系数($NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$)等主要荧光参数^[15]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0,根据直角双曲线修正模型^[16-17]对酸枣叶片的 P_n 光响应过程进行非线性回归分析,得到 P_n 拟合值以及最大净光合速率($P_{\max}$, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、暗呼吸速率(R_d , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、表观量子效率(AQY)、光补偿点(LCP , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、光饱和点(LSP , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、光抑制项(β)和光饱和项(γ)等光响应特征参数。采用 Origin 7.5 对不同水分条件下酸枣叶片光合参数的光响应过程进行三维绘图,对酸枣 P_n 光响应特征参数和叶绿素荧光参数与土壤水分的定量关系进行多项式回归分析并对拟合函数进行积分求解。采用 SPSS 18.0 对土壤水分点进行系统聚类分析,对不同处理间数据的差异显著性进行单因素方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 酸枣叶片光合参数与土壤水分的关系

2.1.1 不同水分条件下酸枣叶片气体交换参数的光响应

直角双曲线修正模型对不同水分条件下酸枣叶片的 P_n 光响应过程拟合效果较好,决定系数(R^2)位于 0.993—0.999 之间,故采用 P_n 拟合值代替 P_n 实测值对 P_n 光响应过程进行研究。研究发现, $PAR \leq 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,酸枣叶片光合作用主要受低光强抑制,受土壤水分的影响不明显,强光下酸枣叶片的气体交换参数对土壤水分的响应呈现一定的规律性(图 1)。酸枣叶片 P_n 、 T_r 和 WUE 均随 PAR 的增大先迅速上升后缓慢上升,随 W_r 的增大先增大后减小,均在 $W_r = 73\%$ 时达到最大值,可见水分过高或过低均会抑制酸枣的光合作用、蒸腾作用及水分利用效率。酸枣 WUE 对土壤水分的变化幅度小于 P_n 和 T_r ,最大 WUE 在 W_r 为 32%—56% 和 65%—79% 之间差异均不显著($P > 0.05$),始终保持较高水平,说明酸枣 T_r 对土壤水分的敏感程度大于 P_n ,水分逆境中,酸枣能够通过敏感的气孔开闭机制协调碳同化与水分消耗之间的关系,调节 WUE 。

弱光($PAR \leq 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、干旱(W_r 为 11%—55%)及渍水(W_r 为 85%—95%)等条件对酸枣叶片 G_s 均具有一定的抑制作用,适宜的光照和水分条件有利于 G_s 的增大, G_s 在 $W_r = 74\%$, $PAR = 1600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最大值。酸枣叶片 C_i 随 PAR 的增大而减小,随 W_r 的增大呈“减小—增大—平稳—减小”的趋势,酸枣叶片 L_s 对光强和土壤水分的响应规律与 C_i 基本相反。根据气孔限制理论^[18],当 W_r 为 55%—80% 时,酸枣 P_n 和 G_s 较高, C_i 和 L_s 较稳定,表明酸枣光合作用的限制因素较少,土壤水分条件较适宜;当 W_r 为 25%—55% 或 80%—95% 时, P_n 、 G_s 和 C_i 减小, L_s 增大,表明酸枣光合作用在轻度干旱或渍水胁迫时主要受气孔限制;当 W_r 为 11%—25% 时, P_n 、 G_s 和 L_s 减小, C_i 增大,表明酸枣光合作用在严重干旱胁迫时主要受非气孔限制。

2.1.2 酸枣叶片 P_n 光响应特征参数与土壤水分的关系

酸枣叶片 P_n 光响应特征参数与土壤水分定量关系的拟合中,通过对比发现四次方程的拟合效果较好, R^2 位于 0.945—0.989 之间。随土壤含水量的逐步增多,酸枣的 $P_{\max}$ 、 R_d 、 AQY 和 LSP 呈先增大后减小的趋势, LCP 、 β 和 γ 呈先减小后增大的趋势,不同参数对土壤水分的响应阈值存在一定差异(图 2)。根据拟合函数求解极值,可知酸枣 $P_{\max}$ 在 $W_r = 73\%$ 时达到最大值

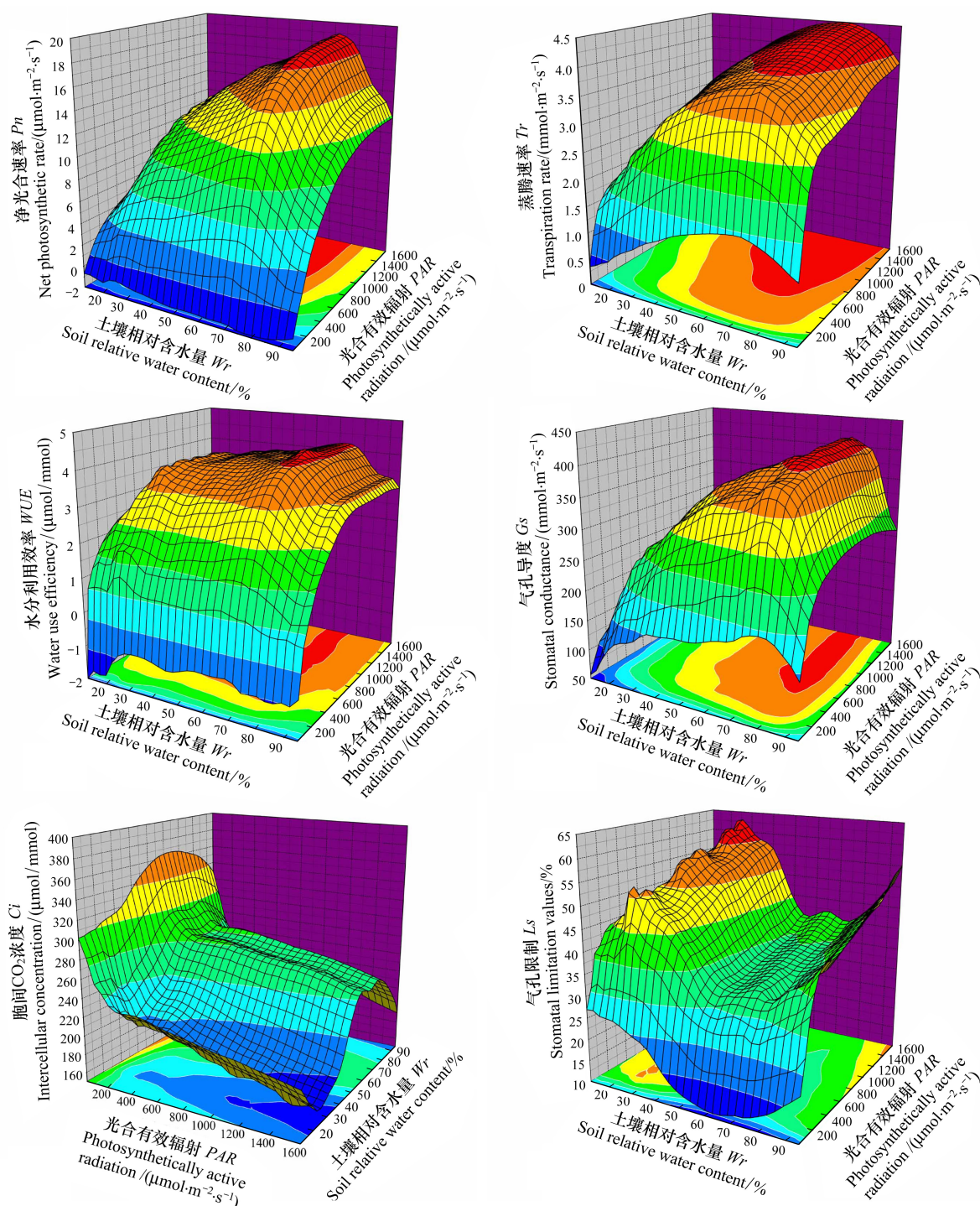


图1 不同水分条件下酸枣叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔限制值(L_s)的光响应过程

Fig. 1 Light response processes of net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal limitation values (L_s) of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* under different water content

$18.2 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。根据拟合函数的积分结果求得试验土壤水分范围(W_r 为11%—95%)内 P_{max} 的平均值为 $14.6 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 对应的 W_r 为39%和88%,可知 P_{max} 在 W_r 为39%—88%内维持较高水平,超出此水分范围后, P_{max} 随干旱或渍水胁迫的加剧迅速减小,酸枣光合潜力减弱。酸枣 R_d 、 AQY 和 LSP 分别在 W_r 为67%、72%和73%时达到最大值 $3.1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 、0.056和 $1704 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,三参数均随干旱($W_r < 40\%$)或渍水($W_r > 90\%$)胁迫的加剧而减小,表明酸枣的呼吸代谢活性以及对光能的利用

能力均受到水分胁迫的限制。酸枣 LCP β 和 γ 分别在 W_r 为 58%、76% 和 72% 时降至最小值 $36 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 0.56×10^{-4} 和 1.08×10^{-3} , 当 $W_r<30\%$ 时, 随土壤含水量的减少, LCP 较缓慢地上升, β 和 γ 大幅度地上升, 表明随着干旱胁迫的加剧, 酸枣对弱光的适应性减弱, 同时在高光强下极易达到光饱和并出现光抑制^[19]。酸枣光响应特征参数均在 W_r 为 58%—76% 内达到最适程度, 表明适宜水分条件有利于增强酸枣叶片的光合活性。

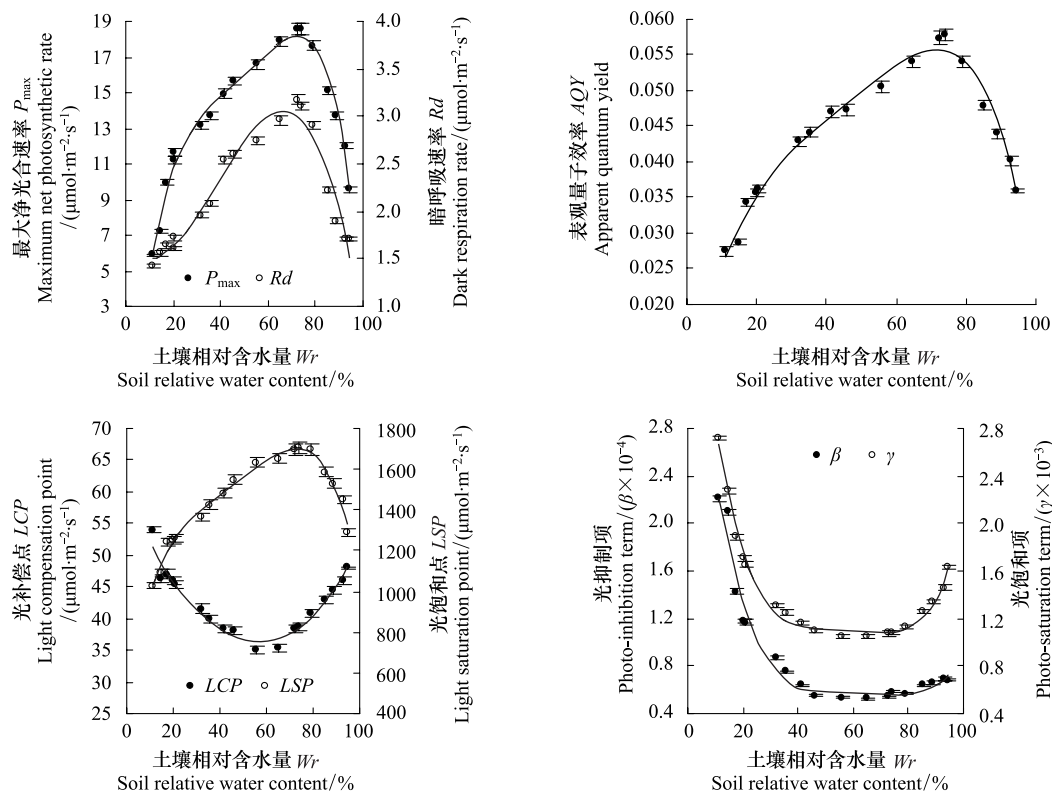


图2 不同水分条件下酸枣叶片 P_n 光响应特征参数的实测点与拟合曲线 (平均值 $\pm$ 标准误)

Fig.2 Measured points and fitting curves of net photosynthetic rate-light response parameters of *Ziziphus jujuba* var. *spinosus* under different water conditions (mean $\pm$ SE)

2.2 酸枣叶片叶绿素荧光参数与土壤水分的关系

对酸枣叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 F_o 和 NPQ 与土壤水分定量关系的拟合同样采用四次方程, R^2 位于 0.689—0.952 之间 (图 3)。酸枣 $\Phi PS II$ 的变化幅度大于 F_v/F_m , 数值小于 F_v/F_m , 两指标均在 W_r 为 80% 时达到最大值, 此时酸枣 PS II 光化学效率最高。 F_v/F_m 在 W_r 为 32%—95% 内保持较高水平, 差异不显著 ($P>0.05$), $\Phi PS II$ 在 W_r 为 30%—80% 或 80%—95% 内随干旱或渍水胁迫的加剧小幅度减小, 表明 $\Phi PS II$ 的降低并非由 PS II 受损引起, 而是酸枣光合作用减弱后对 PS II 反馈抑制的结果。 F_v/F_m 和 $\Phi PS II$ 均在 $W_r<30\%$ 时随干旱胁迫的加剧迅速减小, 表明酸枣 PS II 受到一定程度的损伤, 光化学效率降低。 F_o 表征 PS II 反应中心完全开放时的荧光强度, PS II 反应中心受到不易逆转的破坏会引起 F_o 的增加^[20]。酸枣 F_o 在 $W_r<25\%$ 时随干旱胁迫的加剧迅速增大, 表明酸枣 PS II 在严重干旱胁迫时受到不易逆转的破坏。 NPQ 表征 PS II 天线色素吸收的光能以热的形式耗散掉的部分, 热耗散是植物在光合作用达到光饱和、光合机构无法吸收过多光能情况下的一种保护机制^[21]。酸枣 NPQ 在 W_r 为 30%—80% 或 80%—95% 的范围内随干旱或渍水胁迫的加剧而增大, 表明酸枣能够通过热耗散消耗过剩光能实现自身光保护。 NPQ 在 $W_r<25\%$ 时随干旱胁迫的加剧而减小, 表明酸枣热耗散能力减弱, PS II 受到不可逆的破坏。

2.3 酸枣叶片土壤水分生产力分级

分别根据酸枣在饱和和光强下的 P_n 和 WUE 对所测土壤水分点进行聚类分析, 设定聚类数为 3, 依据类平均值将酸枣的 P_n 和 WUE 划分为高、中和低 3 个等级, 将 P_n 和 WUE 赋予“产”和“效”的光合生产力意义^[22], 结合酸枣主要光合生理参数对土壤水分的阈值效应, 建立酸枣土壤水分生产力分级体系。依据酸枣 P_n 对土壤水分点聚类, 分为 11%—21%, 32%—56% 和 85%—95%, 以及 65%—79% 3 类, 相应为低产、中产和高产, 差异显著 ($P<0.05$), 其中, 低产和中产的 P_n 聚类均值分别为高产的 0.45 倍和 0.77 倍。依据酸枣 WUE 对土壤水分点聚类, 分为 11%—21% 和 85%—95%, 32%—56%, 以及 65%—79% 3 类, 相应为低效、中效和高效, 差异显著 ($P<0.05$), 其中, 低效和中效的 WUE 聚类均值分别为高效的 0.75 倍和 0.92 倍。酸枣叶片主要光合参数和叶绿素荧光参数均在 W_r 为 58%—80% 的范围内达到最适程度, 因此, 将 W_r 为 58% 作为划分中 (高) 产水、中 (高) 效水的临

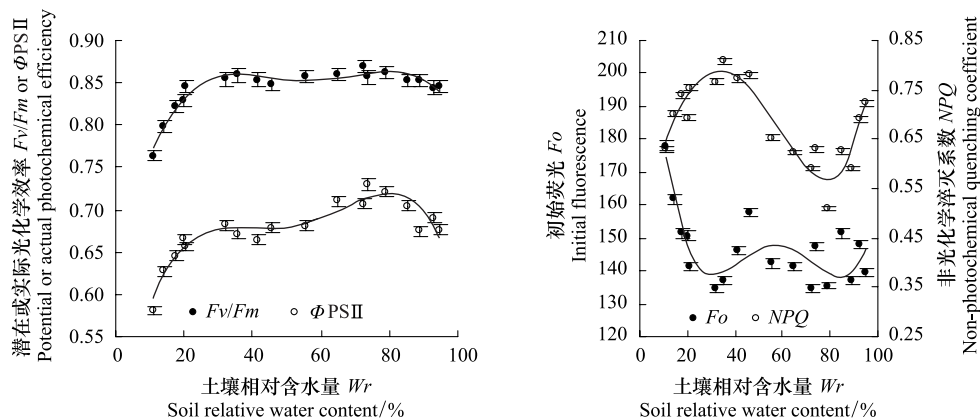


图3 不同水分条件下酸枣叶片主要叶绿素荧光参数的实测点与拟合曲线(平均值±标准误)

Fig.3 Measured points and fitting curves of main chlorophyll fluorescence parameters of *Ziziphus jujuba* var. *spinosus* under different water conditions (mean ± SE)

界点,将 W_r 为 80% 作为划分高(中)产水、高(低)效水的临界点。酸枣 P_n 下降原因由气孔限制转变为非气孔限制为主的土壤水分点出现在 W_r 为 25% 时,因此,将 W_r 为 25% 作为划分低(中)产水、低(中)效水的临界点。综合上述聚类水分点及光合生理参数土壤水分关键临界点,采用数学交集求解原理,确定出贝壳砂生境酸枣土壤水分生产力级别: W_r 在 11%—25% 内为低产低效水, W_r 在 25%—58% 内为中产中效水, W_r 在 58%—80% 内为高产高效水, W_r 在 80%—95% 内为中产低效水(表 1)。

表 1 酸枣土壤水分生产力分级标准

Table 1 Grading criterion of soil moisture productivity for *Ziziphus jujuba* var. *spinosus*. Different lowercase letters indicate significant difference among different clusters of the same parameter at 0.05 level

土壤相对含水量 W_r Soil relative water content / %	聚类均值±标准误 cluster mean±SE		土壤水分生产力级别 Grading of soil water productivity	土壤水分预测阈值 W_r predicative threshold / %
	净光合速率 P_n Net photosynthetic rate / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水分利用效率 WUE Water use efficiency / ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)		
11, 15, 17, 20, 21	8.32±0.866 c	3.08±0.134 c	低产低效水	11—25
32, 36, 42, 46, 56	14.22±0.536 b	3.80±0.030 b	中产中效水	25—58
65, 73, 74, 79	18.40±0.268 a	4.13±0.048 a	高产高效水	58—80
85, 89, 93, 95	14.22±0.536 b	3.08±0.134 c	中产低效水	80—95

同一参数不同类群之间的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 酸枣叶片的光合作用效率

光合作用气孔限制转折点的判定对于确定酸枣光合生理需水的下限具有重要意义。气孔限制理论^[18]认为,限制植物光合作用的因素分为气孔因素和非气孔因素,前者指叶片气孔的关闭程度及由此引起的气体交换难易程度,对光合作用的影响是可逆的;后者指光合机构的受损程度及由此引起的光合活性下降,对光合作用的影响是不可逆的。植物通过气孔限制降低光合作用,是其耐旱策略之一,而非气孔限制决定了光合作用的实际状态和潜力^[23]。本研究发现,酸枣在轻度干旱或渍水胁迫时,光合作用主要受气孔限制,在严重干旱胁迫时,光合作用主要受非气孔限制,其转折点出现在 W_r 为 25% 时,金矮生苹果 (*Malus pumila* cv. Goldspur)^[3] 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)^[24] 的转折点分别出现在 W_r 为 48% 和 39% 时,可见不同树种发生气孔限制转折的水分条件不尽相同,但酸枣的转折点出现在严重干旱胁迫时,表明其光合机构对于干旱胁迫的适应能力较强,光合潜力较大。

$P_{\max}$ 是衡量植物叶片光合作用潜力的重要指标,在最适环境中,表示叶片的最大光合能力^[25],酸枣 $P_{\max}$ 的最大值为 18.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,大于山杏和沙棘的最大值 (13.3—15.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[8, 24],表明酸枣的光合潜力较高。植物的呼吸作用是植物生长所必需的生理代谢活动^[26],酸枣 R_d 的最大值为 2.36 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,大于山杏^[8]、杠柳 (*Periploca sepium*)^[17] 和辽东槲木 (*Aralia elata*)^[27] 的最大值 (0.86—2.08 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),表明酸枣呼吸代谢活性高于一般灌木。 AQY 反映植物光合作用对光能的利用效率,酸枣 AQY 在 W_r 为 72% 时达到最大值 (0.056),高于一般植物 AQY 范围 (0.03—0.05) 的上限^[28],在干旱或渍水胁迫时降低,表明酸枣光合作用的光能利用效率较高,但对土壤水分响应敏感。在 W_r 为 58%—73% 内,酸枣 LCP 降至最小值, LSP

达到最大值,利用弱光和强光的能力均较高,超出此水分范围后,随干旱或渍水胁迫的加剧, LCP 增大, LSP 减小,酸枣光照生态幅变窄。酸枣 AQY 、 LCP 和 LSP 对土壤水分的阈值效应表明酸枣在水分逆境中对光照的变化较敏感,具有通过降低光能利用率适应水分逆境的生理策略。

植物叶绿素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散 3 种途径,它们之间存在着此消彼长的关系^[15],叶绿素荧光分析可以间接反映植物 PS II 反应中心对光能的吸收、传递和转化的情况,同时叶绿素荧光技术因具有快速、灵敏、无损伤的特征而逐渐受到重视^[29]。研究表明,非环境胁迫条件下 F_v/F_m 比较恒定,一般位于 0.80—0.85 之间^[1],酸枣 F_v/F_m 在 W_r 为 80% 时达到最大值 0.866,高于一般植物;酸枣 $\Phi PS II$ 在 W_r 为 80% 时达到最大值 0.718,大于沙棘的最大值 (0.640)^[24],以及大叶型丹参 (*Salvia miltiorrhiza* cv. *Sativa*) 和小叶型丹参 (*Salvia miltiorrhiza* cv. *Silcestris*) 的最大值 (0.450—0.490)^[30],表明酸枣 PS II 对光能的吸收、传递和转化效率较高。当 $W_r < 30\%$ 时,酸枣 F_v/F_m 和 AQY 作为表征光抑制的重要指标^[31],均随干旱胁迫的加剧迅速减小,同时光抑制项 β 迅速增大,表明酸枣出现明显光抑制。当 $W_r < 25\%$ 时,随干旱胁迫的加剧,酸枣 F_o 增大, NPQ 减小,表明酸枣 PS II 受到不可逆的破坏,与酸枣光合作用发生非气孔限制的水分阈值一致。

3.2 酸枣叶片光合作用的水分有效性

植物土壤水分生产力分级建立在植物水分生理学基础上,赋予 P_n 和 WUE “产”和“效”的光合生产力意义,是植物光合生理水分有效性研究的重要手段。目前,不同植物在土壤水分生产力分级方法上存在一定差异。张光灿等^[22]和陈建等^[27]通过非线性回归分析、积分求解等方法确定植物主要光合参数 (P_n 、 WUE 、 T_r 和 L_s 等) 与土壤水分的定量关系及各参数的土壤水分关键临界点 (极值、平均值、补偿点和转折点等),根据各临界点将土壤水分划分为不同的生产力级别。夏江宝等^[8]和张淑勇等^[32]依据植物主要光合参数 (P_n 、 WUE 和 T_r 等) 对系列土壤水分点进行聚类分析,结合主要参数对土壤水分的阈值效应,建立植物土壤水分生产力分级标准。本文依据酸枣叶片 P_n 和 WUE 分别对土壤水分点进行聚类分析,比依据植物主要光合参数共同对土壤水分点聚类的结果更加详细,并在重点分析 P_n 和 WUE 的同时兼顾酸枣叶片光合参数和叶绿素荧光参数的水分响应性,采用数学交集求解的方法确定酸枣土壤水分生产力级别,但各种分级方法适用于何种试验结果有待深入研究。

根据酸枣土壤水分生产力分级标准,当 W_r 为 11%—25% 时为低产低效水,酸枣光合生产力和水分利用效率均处于较低水平,同时光合作用受到非气孔限制,以 PS II 反应中心为主的光合机构受到不可逆的破坏,严重影响酸枣苗木正常生长。当 W_r 为 25%—58% 时为中产中效水, W_r 为 80%—95% 时为中产低效水,在这两个水分范围内酸枣光合生产力因受到气孔因素的可逆胁迫而处于中等水平,水分利用效率随干旱或渍水胁迫的加剧存在不同程度地减弱。当 W_r 为 58%—80% 时为高产高效水,酸枣主要光合生理参数均达到最适水平,光合生产力和水分利用效率处于较高水平,此范围是贝壳砂生境酸枣生长较为适宜的土壤水分条件。在干旱缺水地区,为有效提高水分利用效率,往往选择高产高效水或中产高效水作为植被生长较为适宜的土壤水分条件,而非高产中效水,如将 W_r 为 48%—64% 和 41%—52% 分别作为刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 和侧柏 (*Platycladus orientalis*) 适宜的土壤水分条件^[22]。维持其他植物适宜生长的 W_r 为:金矮生苹果,60%—71%^[3];山杏,47%—75%^[8];辽东槲木,44%—85%^[27];小叶扶芳藤 (*Euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb.), 44%—72%^[32]。其中,乔木刺槐和侧柏以及果树金矮生苹果的水分生态幅较窄,刺槐和侧柏适宜于较干旱的生境,金矮生苹果适宜于水分较充足的生境;灌木酸枣、山杏和辽东槲木以及藤本小叶扶芳藤的水分生态幅较宽,对不同水分生境具有较好的适应性。可见,植物适宜生长的土壤水分范围因植物种类和生境条件的不同而有较大差异。

综上所述,贝壳砂生境中酸枣不仅具有较高的光合能力,而且对水分逆境具有较强的生理适应性和可塑性。水分适宜 (W_r 为 58%—80%) 时,酸枣光合生理活性较高,利于酸枣苗木较好地生长;在轻度干旱 (W_r 为 25%—58%) 及渍水 (W_r 为 80%—95%) 胁迫时,酸枣光合作用主要受气孔限制,光合生理活性减弱;在严重干旱胁迫 (W_r 为 11%—25%) 时主要受非气孔限制,光合机构受到不易逆转的破坏,严重影响酸枣苗木的正常生长。

References:

- [1] Xu D Q. Photosynthetic Efficiency. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002: 32-33, 39-52.
- [2] Sofo A, Dichio B, Montanaro G, Xiloyannis C. Photosynthetic performance and light response of two olive cultivars under different water and light regimes. *Photosynthetica*, 2009, 47(4): 602-608.
- [3] Zhang S Y, Zhang G C, Gu S Y, Xia J B, Zhao J K. Critical responses of photosynthetic efficiency of goldspur apple tree to soil water variation in semiarid loess hilly area. *Photosynthetica*, 2010, 48(4): 589-595.
- [4] Du Y D, Song L L, Liu Z X. An overview on theoretic research of high efficient water use in agriculture. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 808-812.
- [5] Wang Y, Chen J W, Di X Y. Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [6] Wang Z X, Chen L, Ai J, Qin H Y, Liu Y X, Xu P L, Jiao Z Q, Zhao Y, Zhang Q T. Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in Amur Grape (*Vitis amurensis* Rupr.). *Photosynthetica*, 2012, 50(2): 189-196.

- [7] Gao L, Yang J, Liu R X. Effects of soil moisture levels on photosynthesis, transpiration, and moisture use efficiency of female and male plants of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6025-6034.
- [8] Xia J B, Zhang G C, Sun J K, Liu X. Threshold effects of photosynthetic and physiological parameters in *Prunus sibirica* to soil moisture and light intensity. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(3): 322-329.
- [9] Li H J, Li P, Yu G D. Advance of research and prospect of development of *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H F Chow. *Chinese Wild Plant Resources*, 1999, 18(3): 15-19.
- [10] Cui X D. Research on the fine individual selection and fast propagation technology of wild jujube resources. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(8): 4464-4466.
- [11] He S X, Liang Z S, Yu L Z, Zhou Z Y. Growth and physiological characteristics of wild sour jujube seedlings from two provenances under soil water stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7): 1387-1393.
- [12] Zhou Z Y, Liang Z S, Li S, Lai W F. Effect of water stress and re-watering on relative water content, protective enzyme and photosynthetic characteristics of wild jujube. *Chinese Journal Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 93-97.
- [13] Prior S A, Runion G B, Rogers H H, Arriaga F J. Elevated atmospheric carbon dioxide effects on soybean and sorghum gas exchange in conventional and no-tillage systems. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(2): 596-608.
- [14] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis // Govindjee, ed. *Photosynthesis, Volume II*. New York: Academic Press, 1982: 263-342.
- [15] Roháček K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning and mutual relationships. *Photosynthetica*, 2002, 40(1): 13-29.
- [16] Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 2007, 45(4): 637-640.
- [17] Wang R R, Xia J B, Yang J H, Zhao Y Y, Liu J T, Sun J K. Comparison of light response models of photosynthesis in leaves of *Periploca sepium* under drought stress in sand habitat formed from seashells. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(2): 111-121.
- [18] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [19] Ye Z P, Kang H J. Study on biological significance of coefficients in modified model of photosynthesis-irradiance. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2012, 33(2): 51-57.
- [20] Krause G H. Photoinhibition of photosynthesis: an evaluation of damaging and protective mechanisms. *Physiologia Plantarum*, 1988, 74(3): 566-574.
- [21] Gilmore A M, Yamamoto H Y. Zeaxanthin formation and energy-dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts under artificially mediated linear and cyclic electron transport. *Plant Physiology*, 1991, 96(2): 635-643.
- [22] Zhang G C, Xia J B, Shao H B, Zhang S Y. Grading woodland soil water productivity and soil bioavailability in the semi-arid Loess Plateau of China. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40(2): 148-153.
- [23] Li Q, Wang M, Wang W W, Zhang R C, Yue M. Response of photosynthetic characteristics of *Psathyrostachys huashanica* Keng to drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4278-4284.
- [24] Pei B, Zhang G C, Zhang S Y, Wu Q, Xu Z Q, Xu P. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [25] Tartachnyk I I, Blanke M M. Effect of delayed fruit harvest on photosynthesis, transpiration and nutrient remobilization of apple leaves. *New Phytologist*, 2004, 164(3): 441-450.
- [26] Tjoelker M G, Oleksyn J, Lee T D, Reich P B. Direct inhibition of leaf dark respiration by elevated CO₂ is minor in 12 grassland species. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 419-424.
- [27] Chen J, Zhang G C, Zhang S Y, Wang M J. Response processes of *Aralia elata* photosynthesis and transpiration to light and soil moisture. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1185-1190.
- [28] Li H S. *Modern Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [29] Zhang R H, Zheng Y J, Ma G S, Zhang X H, Lu H D, Shi J T, Xue J Q. Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [30] Luo M H, Hu J Y, Wu Q G, Yang J T, Su Z X. Effects of drought stress on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Salvia miltiorrhiza*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 619-623.
- [31] Demmig-Adams B, Adams W W III. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992, 43(1): 599-626.
- [32] Zhang S Y, Zhou Z F, Xia J B, Zhang G C. The responses of *Euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(12): 2514-2521.

参考文献:

- [1] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 32-33, 39-52.

- [4] 杜尧东, 宋丽莉, 留作新. 农业高效用水理论研究综述. 应用生态学报, 2003, 14(5): 808-812.
- [5] 王琰, 陈建文, 狄晓燕. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [7] 高丽, 杨劼, 刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6025-6034.
- [8] 夏江宝, 张光灿, 孙景宽, 刘霞. 山杏叶片光合生理参数对土壤水分和光照强度的阈值效应. 植物生态学报, 2011, 35(3): 322-329.
- [9] 李会军, 李萍, 余国奠. 酸枣的研究进展及开发前景. 中国野生植物资源, 1999, 18(3): 15-19.
- [10] 崔向东. 野生酸枣资源选优与快速繁殖技术研究. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4464-4466.
- [11] 贺少轩, 梁宗锁, 蔚丽珍, 周白云. 土壤干旱对2个种源野生酸枣幼苗生长和生理特性的影响. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1387-1393.
- [12] 周白云, 梁宗锁, 李硕, 来威锋. 干旱-复水对酸枣相对含水量、保护酶及光合特征的影响. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 93-97.
- [17] 王荣荣, 夏江宝, 杨吉华, 赵艳云, 刘京涛, 孙景宽. 贝壳砂生境干旱胁迫下杠柳叶片光合光响应模型比较. 植物生态学报, 2013, 37(2): 111-121.
- [19] 叶子飘, 康华靖. 植物光响应修正模型中系数的生物学意义研究. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 33(2): 51-57.
- [23] 李倩, 王明, 王雯雯, 张瑞昌, 岳明. 华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应. 生态学报, 2012, 32(13): 4278-4284.
- [24] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 吴琴, 徐志强, 徐萍. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [27] 陈建, 张光灿, 张淑勇, 王梦军. 辽东楸木光合和蒸腾作用对光照和土壤水分的响应过程. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1185-1190.
- [28] 李合生. 现代植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [29] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [30] 罗明华, 胡进耀, 吴庆贵, 杨敬天, 苏智先. 干旱胁迫对丹参叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响. 应用生态学报, 2010, 21(3): 619-623.
- [32] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 张光灿. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2514-2521.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.19 Oct., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

A review of ecosystem services and research perspectives	MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
Sexual interference in non-human primates	YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review	HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
Proximate and ultimate determinants of food chain length	WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi	LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen	XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve	ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> under cadmium stress	WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings	YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
The morphological and physiological responses of <i>Tamarix ramosissima</i> seedling to different irrigation methods in the extremely arid area	MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> seedling leaves to soil water in sand habitat formed from seashells	WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants	TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of <i>Casuarina equisetifolia</i> plantations at different ages	YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta	PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of <i>Bauhinia faberi</i> seedlings	SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate nitrogen and salinity	ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO ₂	SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation	LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass <i>Halophila beccarii</i> in Pearl Bay, Guangxi	QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China	YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
Life history characteristics and spatial distribution of <i>Populus pruinosa</i> population at the upper reaches of Tarim River	HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau	ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《生态学报》2013 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,300 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 陈利顶

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 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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