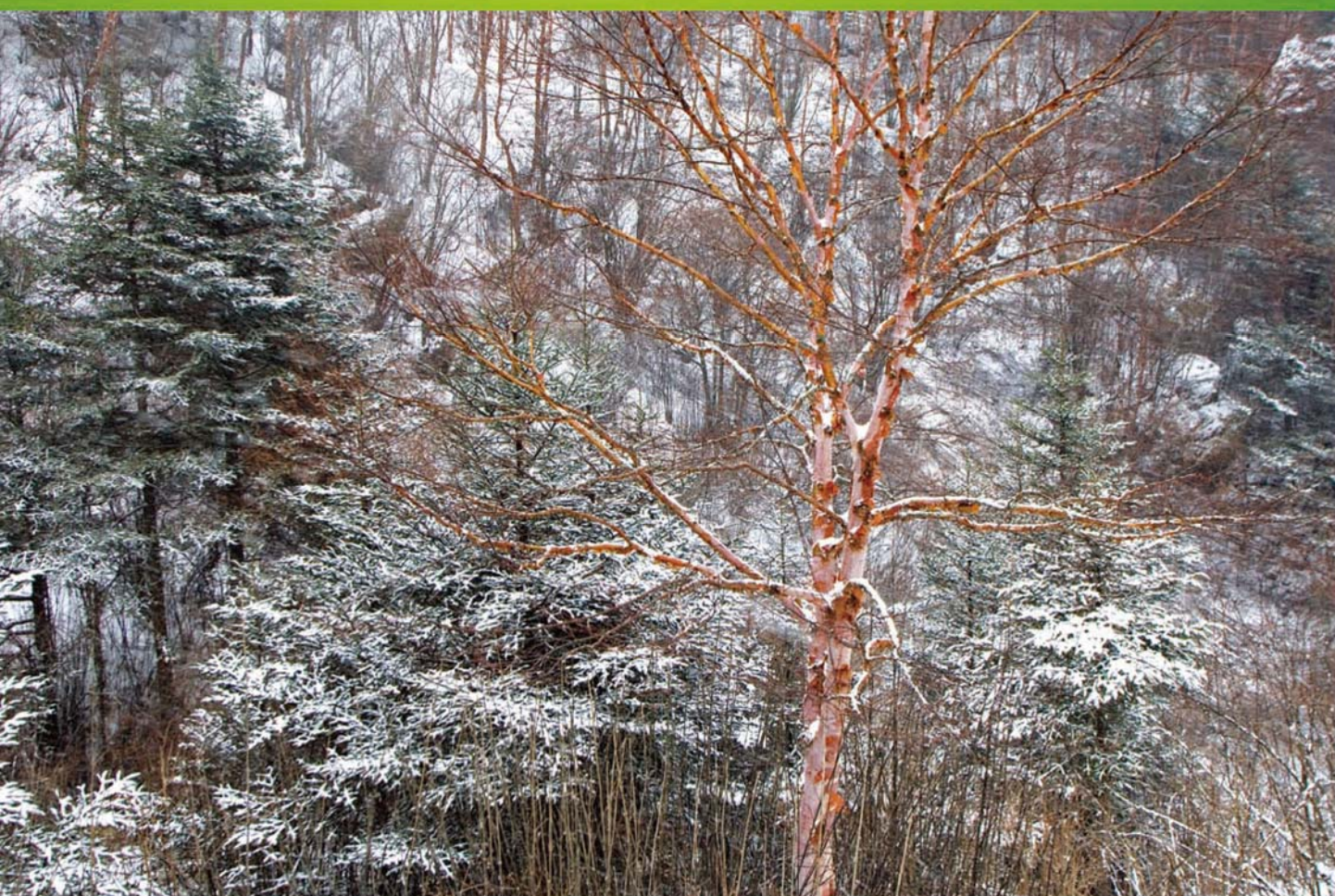


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

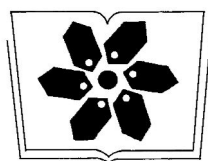
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **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 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

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/stxb201305060935

张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 王冰, 赵洪峰, 刘京涛. 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应. 生态学报, 2014, 34(8): 1937-1945.

Zhang S Y, Xia J B, Zhang G C, Wang B, Zhao H F, Liu J T. Photosynthetic responses to changes in CO_2 concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge islands in the Yellow River Delta, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1937-1945.

黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用 对 CO_2 浓度及土壤水分的响应

张淑勇^{1,2}, 夏江宝¹, 张光灿^{2,*}, 王冰², 赵洪峰³, 刘京涛¹

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

2. 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; 3. 山东省邹平水务局, 邹平 256200)

摘要:为阐明黄河三角洲贝壳砂生境叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度的响应规律, 明确其光合生产力与土壤水分的定量关系, 以 2 年生叶底珠 (*Securinega suffruticosa*) 苗木为材料, 采用早棚人工控水试验, 利用光合测定系统测定分析了不同水分条件下叶底珠叶片光合作用的 CO_2 响应特征。结果表明, 叶底珠叶片净光合速率 (P_n) 和光合作用特征参数对土壤水分 (SRWC) 变化具有阈值效应。维持叶底珠叶片较高光合生产力的 SRWC 为 50.3%—83.2%, CO_2 浓度为 700—1100 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 其中最适宜的 SRWC 为 70.5%, 最大值出现在 CO_2 浓度为 900 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 而正常 CO_2 浓度和倍增 CO_2 浓度下维持叶底珠叶片较高光合生产力水平的 SRWC 范围分别为 45.5%—90.0% 和 47.0%—92.6%。叶底珠叶片表观最大净光合速率 ($P_{\text{max},e}$) 和羧化效率 (CE) 随着 SRWC 的增加而呈抛物线变化。 CO_2 补偿点 (Γ) 呈现与 $P_{\text{max},e}$ 和 CE 相反的变化规律, 在 SRWC 为 70.5% 时, Γ 达到最低值 (51.3 $\mu\text{mol}/\text{mol}$)。光呼吸速率 (R_p) 在 SRWC 为 50.3% 时达到最小值 (2.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 随着 SRWC 的增加, R_p 增加缓慢。说明黄河三角洲贝壳砂生境条件下, 叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度和土壤水分具有宽泛的适应范围, 对贝壳砂生境经常出现的干湿交替逆境表现出一定适应能力, 在黄河三角洲贝壳堤岛可引种栽培。

关键词: 光合作用; CO_2 浓度; 土壤水分; 叶底珠

Photosynthetic responses to changes in CO_2 concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge islands in the Yellow River Delta, China

ZHANG Shuyong^{1,2}, XIA Jiangbao¹, ZHANG Guangcan^{2,*}, WANG Bing², ZHAO Hongfeng³, LIU Jingtao¹

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

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

3 Zouping Water Conservancy Department, Zouping 256200, China

Abstract: Atmospheric CO_2 concentrations, soil moisture, and photosynthetically active radiation are the major factors limiting plant growth and photosynthetic productivity in large areas of the world. These factors affect agricultural and forest production and the distribution and composition of vegetation. Human activities have resulted in increased CO_2 concentrations in the atmosphere, leading to changes in temperature, water cycling, and radiation. CO_2 is required for photosynthesis, and the ongoing increases in atmospheric CO_2 concentrations could eventually lead to higher temperatures and greater evaporative demands. Hence, droughts will be more frequent, intense, and erratic, and may affect regions that

基金项目: 国家自然科学基金 (31100468); 山东省高校科研发展计划项目 (J13LC03); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (BS2013NY010); 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目 (2012KFJJ04)

收稿日期: 2013-05-06; 修订日期: 2013-11-05

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

are not currently affected by drought. The effect of changes in CO_2 concentrations and soil water content on plants is an important theme in studies on global change. To date, few studies have assessed the effects of continuous increases in CO_2 concentration and soil moisture on photosynthesis. *Securinega suffruticosa* is one of the dominant drought-tolerant species growing on the shell islands in the Yellow River Delta region. To investigate the carbon and water cycles of the ecological system in this region, it is important to investigate the photosynthetic responses of *S. suffruticosa* to changes in CO_2 concentrations and soil moisture conditions. This has important practical significance both in terms of food safety and for constructing, improving, and managing a functional ecological environment as the global climate changes.

The study materials were 2-year-old plants of *S. suffruticosa*, originally from the shell islands in the Yellow River Delta. These plants were obtained from a nursery. The plants were subjected to seven different levels of water supply using an artificial water control system in a covered shed, and to a series of CO_2 concentrations controlled using a LI-COR 6400 portable photosynthesis system. The objective of this study was to investigate photosynthetic responses to CO_2 concentrations and determine whether photosynthetic productivity was quantitatively related to soil moisture content. The photosynthetic rate (P_n) and characteristic parameters of photosynthesis showed threshold-value responses to variations in soil relative water content ($SRWC$). *S. suffruticosa* plants were able to maintain higher photosynthetic productivity in the range of 50.3% to 83.2% $SRWC$; in this range, the range of suitable CO_2 concentrations was 700 to 1100 $\mu\text{mol/mol}$, and P_n increased with increasing CO_2 concentrations. The most suitable $SRWC$ was 70.5%, and P_n peaked at the CO_2 concentration of 900 $\mu\text{mol/mol}$. The characteristic parameters of photosynthesis showed different responses to changes in $SRWC$. Under normal and double CO_2 concentrations, the ranges of $SRWC$ in which *S. suffruticosa* maintained higher photosynthetic productivity were 45.5%—90.0% and 47.0%—92.6%, respectively, indicating that *S. suffruticosa* was highly adaptable to changes in soil moisture content. The apparent maximum photosynthesis rate ($P_{\text{max},c}$) and carboxylation efficiency (CE) increased with increasing $SRWC$, peaking at 70.5% $SRWC$ and then decreasing slowly at higher $SRWC$. The CO_2 compensation point showed the opposite trend to that of $P_{\text{max},c}$ and CE , and reached a minimum value (approx. 51.3 $\mu\text{mol/mol}$) at 70.5% $SRWC$. The photorespiration rate increased slowly with increasing $SRWC$ and peaked at approximately 2.6175 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at 50.3% $SRWC$.

We concluded that photosynthesis in leaves of *S. suffruticosa* is widely adaptable to changes in CO_2 concentrations and soil moisture, and that this species has the typical physiological characteristics of a water-tolerant and drought-tolerant plant. Thus, *S. suffruticosa* has the potential for cultivation on the shell ridge islands of the Yellow River Delta, China.

Key Words: Photosynthesis; CO_2 concentration; soil moisture; *Securinega suffruticosa*

植物光合生理活动受多种因素的影响,其中土壤水分、 CO_2 浓度和光合有效辐射是植物生理活动的物质和能量基础,也是影响植物生长、发育、繁殖和分布的重要生态环境因子,因此研究植物光合作用对 CO_2 浓度和土壤水分的响应特征是研究生态系统碳循环和水循环的基础^[1]。特别是目前大气 CO_2 浓度逐年升高,导致全球雨热分布的时空格局也发生巨大变化,引起不同地区水资源改变,由此将导致地球上大多数干旱地区更加干旱^[2-3],植物光合作用对 CO_2 浓度和土壤水分的响应特征研究对全球变化条件下食物安全保障、生态环境建设与改善都具有重要现实意义。

贝壳堤是淤泥质或粉质海岸所特有的一种滩脊类型,近年来受自然因素和人类活动的过度干扰,贝壳堤岛脆弱生态系统受到严重破坏,虽然植被恢复措施较为明显,但仍存在树种单一、成活率低和生长缓慢等问题,原因之一是对优良乡土树种认识不足,特别是在黄河三角洲贝壳堤岛滩脊地带淡水资源缺乏的条件下,亟需开展植物光合生理特性与土壤水分作用关系的研究。研究植物如何适应土壤干旱、光因子胁迫及大气 CO_2 浓度升高是揭示其对生存环境生态适应性机制的有效途径。研究表明, CO_2 浓度升高提高了植物的光合作用,增大了气孔阻力,减少蒸腾作用,并可明显提高水分利用效率^[4-6]。Vurro

等^[7]的研究表明,较高浓度的 CO₂ 对 O₃ 造成的伤害有改善作用,也有研究表明大气中 CO₂ 倍增对植物盐害具有缓解效应^[8],因此,CO₂ 浓度升高有可能增强植物的抗逆性。鉴于黄河三角洲贝壳堤岛滩脊地带植物生长的限制因子主要是水分,因此研究植物对 CO₂ 浓度及土壤水分的响应和适应机制十分必要。

国内外学者就光合作用对 CO₂ 浓度变化的响应特征进行了大量研究^[6-10]。但大多数研究多为在简单的 CO₂ 倍增或自然光照条件下,或仅考虑少数几个水分胁迫和 CO₂ 浓度升高的作用,缺乏在系列土壤水分梯度和 CO₂ 浓度连续变化条件下,植物光合生理生态特性对土壤水分和 CO₂ 浓度响应规律的研究。因此,本文选用黄河三角洲优良的天然次生灌木叶底珠 (*Securinega suffruticosa*) 作为研究对象,监测其光合特性对土壤水分和 CO₂ 浓度的响应特征,研究其光合作用参数与土壤水分的定量关系,探讨贝壳砂干湿交替生境条件下叶底珠光合的适应特点,为恢复和营造该区的自然植被、保护和改善生态环境、促进水资源的可持续利用提供参考数据。

1 试验地概况

研究区位于山东滨州市无棣县中东部滨海低地的汪子岛 (N38°02′51″—38°21′06″, E117°46′58″—118°05′43″),属滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区。该保护区属于暖温带东亚季风大陆性半湿润气候区,平均降水量为 550 mm,主要集中在 6—9 月份,占全年降水量的 71% 以上;平均蒸发量为 2430.6 mm,蒸降比为 4.4。平均气温为 12.36 °C,极端最低气温为 -25.3 °C,极端最高气温为 37.5 °C;多年平均日照 2849 h/a,平均无霜期 205 d。贝壳堤岛地势平坦,海拔一般在 5 m 以下,潜水水位浅,矿化度高。贝壳砂平均厚度达 1.0—2.5 m,局部达 3—4 m,土壤类别主要是贝壳砂土类和滨海盐土类,向海侧和向陆侧以滨海盐渍土为主,成土母质由风积物和钙质贝壳土壤化组成。植被类型以草本、灌木为主,受自然因素和平岛挖砂等人类活动的影响,现有树种较少。

2 材料与方法

2.1 试验材料与水分控制

试验材料为 2 年生叶底珠苗木,平均苗高 (75.8

±3.1) cm,平均地径 (1.15±0.27) cm,苗木定植前,冲洗根系后用吸水纸吸去其表面水分,迅速用电子天平称量鲜重,以计算每株苗木干重。栽培基质为贝壳砂,试验期间栽培基质保持自然肥力,不施肥。试验于 2012 年 3 月下旬进行布设,每一处理 (水平) 重复 6 次,共 42 盆,栽培容器高 70 cm、口径 45 cm,下部有排水通气孔。

苗木成活后,充分浇水待重力水渗出后测定其含水量,在第 1、3、5、8、11、15、20 天后采用烘干法分别测其土壤含水量 (*MWC*; %),土壤相对含水量 (*SRWC*; %) 分别为 (94.4±0.2) %、(83.2±0.3) %、(70.5±0.4) %、(62.7±0.3) %、(50.3±0.3) %、(37.9±0.2) % 和 (23.6±0.4) %。通过自然蒸发和补充灌水使土壤水分含量维持基本不变,不同水分条件处理 3 个月,7 月 5 日开始对苗木叶片光合生理参数进行测定。各处理生长阶段土壤相对含水量基本不变,为避免因幼树生长对土壤含水量控制水平的影响,每 7 d 采用标准株法对备用幼树地上部分生物量增量 (鲜重) 进行调查,以便调整水分控制标准 (栽培桶总重量),土壤相对含水量采用称重法控制 (*ES50K-15* 型电子天平,感量 0.5 g),每 2 d 称量 1 次,以便及时调整每日补充灌水量,为保持各处理土壤水分相对稳定,除每天补充灌 waters 外,土壤表面用小砂石覆盖。

用环刀法测得盆栽试验土壤的田间持水量 (*FC*) 为 (26.1±1.3) %,土壤密度为 (1.23±0.11) g/cm³。其中, $SRWC = MWC / FC$ 。

2.2 观测指标及方法

从叶底珠苗木中部选 10 片生长健壮的成熟叶片,并做好标记,在不同时间观测时皆用同一叶片。用 LI-6400 便携式光合测定仪 (美国 Licor 公司生产) 对不同供水条件下苗木的气体交换参数以及相应的生态环境要素进行测定。为了尽量减少外界光照波动所造成的影响,选择完全晴朗天气 (2012 年 7 月 15 日—20 日) 的 8:30—11:00 时进行测定,每张叶片重复 3—5 次,取平均值。在苗木气体交换参数的测定过程中,田间气温为 (32.4±2.7) °C,叶室温度为 (30.0±0.4) °C,叶室相对湿度为 (36.3±2.7) %,光合测定仪的流速设定为 200 μmol/s,光子通量密度为 1200 μmol·m⁻²·s⁻¹,参比室 CO₂ 浓度设为 1400、1200、1000、800、600、400、250、200、150、100、50 和 20

$\mu\text{mol}/\text{mol}$ 等 12 个水平。在每个 CO_2 浓度下,时间控制在 5—6 min,数据稳定后记录。仪器自动记录净光合速率($P_n, \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度($G_s, \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度($C_i, \mu\text{mol}/\text{mol}$)等生理参数以及大气温度($T_c, ^\circ\text{C}$)、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。

2.3 数据计算与处理

应用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和回归分析。采用 Michaelis-Menten 方程^[11] 拟合 P_n 的 CO_2 响应曲线,计算其表观最大净光合速率,方程为:

$$P_n = \frac{\eta C P_{\max, c}}{\eta C + P_{\max, c}} - R_d$$

式中, $P_{\max, c}$ 是在一定光强下 CO_2 浓度达到饱和时的表观最大净光合速率, C 是 CO_2 浓度, η 是表观羧化效率。

根据 Farquhar 等^[12], 在 P_n-C_i 响应曲线的较低 CO_2 浓度下 ($C_i < 200 \mu\text{mol}/\text{mol}$), P_n 主要受 Rubisco 活性和数量的限制,净光合速率 P_n 为:

$$P_n = CE \times C_i - R_p$$

式中, CE 为羧化效率, R_p 为光下呼吸速率。由于光下暗呼吸很小,可以近似将光下叶片向无 CO_2 的空气中释放 CO_2 的速率看作光呼吸速率^[13-14]。

3 结果与分析

在不同土壤水分条件下, P_n 对低 CO_2 浓度 ($C_i < 200 \mu\text{mol}/\text{mol}$) 的响应规律基本相似(图 1), 即 P_n 随着 CO_2 浓度的增加呈正比迅速上升, 受土壤水分的影响较小, 表明此时 CO_2 浓度可能是光合作用的主要限制因子。随着 CO_2 浓度的增加, 不同土壤水分条件下 P_n 对 CO_2 浓度的响应表现出不同的变化规律。首先, 在 $SRWC > 70.5\%$ 时, P_n 随着 CO_2 浓度的增加而上升, 当 CO_2 浓度达到 $1000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 左右时, P_n 出现饱和现象, 然后略为下降, P_n 没有显著差异 ($P > 0.05$), 维持在较高水平。其次, 在 $23.6\% < SRWC \leq 70.5\%$ 的水分范围内, P_n 随着 CO_2 浓度的增加而上升, 当 CO_2 浓度达到饱和后, P_n 出现迅速下降的趋势, 这可能是由于叶片来不及吸收和利用较高浓度的 CO_2 , 同时 CO_2 同化过程的一系列酶促反应速率跟不上而成为了 P_n 的限制步骤^[15]; 在此水分范围内, P_n 下降的幅度各处理有所差异, 随着 $SRWC$ 的增加, 下降的幅度逐渐减小, 如 $SRWC$ 分别为 50.3% 和

70.5% 时, P_n 下降的幅度分别为 26.9% 和 1.5% 。在 $SRWC < 37.9\%$ (达到 23.6%) 时, 随着 CO_2 浓度的增加 P_n 一直维持在较低的水平, 说明在 CO_2 充足的条件下, 土壤水分是 P_n 主要限制因素。 P_n 对 $SRWC$ 的响应表现为, 在 $SRWC < 70.5\%$ 时, P_n 随着 $SRWC$ 的增大而上升; 此后随着 $SRWC$ 的增大, P_n 反而下降, 因此 $SRWC$ 为 70.5% 可作为 P_n 变化的转折点。

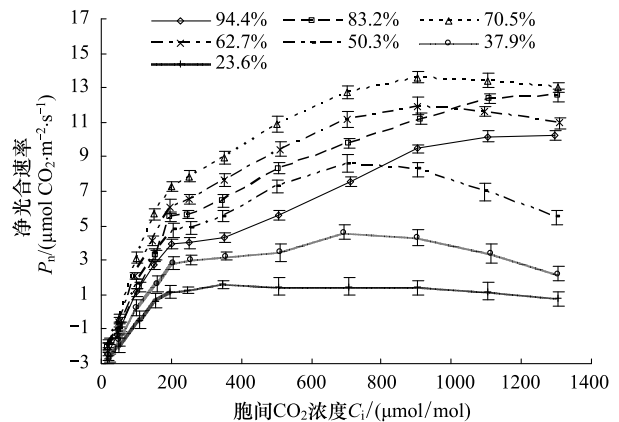


图 1 不同土壤水分条件下净光合速率对细胞间隙 CO_2 浓度的响应

Fig. 1 Responses of net photosynthetic rate (P_n) to intercellular CO_2 concentration under different soil moisture condition. Points are the mean of replicate P_n responses for each C_i . Vertical bars indicate ± 1 SE of the mean

以上分析表明, 在不同 CO_2 浓度条件下, 如果要提高叶底珠的光合生产力, 必须有适宜的土壤水分条件进行耦合, 维持较高光合生产力的土壤水分条件 $SRWC$ 为 50.3% — 83.2% , 此水分范围内适宜的 CO_2 浓度为 700 — $1100 \mu\text{mol}/\text{mol}$, 其中 P_n 最大值出现在 $SRWC$ 为 70.5% 左右, 对应 CO_2 浓度为 $900 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 左右。在土壤水分条件稍充足或者轻度水分胁迫时, 可获得中等的光合生产力, 但当 $SRWC < 37.9\%$ 时, P_n 明显降低, 叶底珠的正常生长受到明显抑制。

3.2 净光合速率的土壤水分阈值

为揭示叶底珠苗木 P_n 发生显著变化的土壤水分临界点, 取正常 CO_2 浓度 ($350 \mu\text{mol}/\text{mol}$) 和倍增 CO_2 浓度 ($700 \mu\text{mol}/\text{mol}$) 时对应的 P_n 值进行分析, 其 P_n 对 $SRWC$ 的响应结果符合二次方程(图 2)。由此方程可确定出正常 CO_2 浓度和倍增 CO_2 浓度条件下, 叶底珠最大 P_n 分别为 $7.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $11.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 维持 P_n 最高水平的土壤含水量分别在 $SRWC$ 为

67.8%和69.8%; CO₂浓度为350 μmol/mol, P_n 为零时对应的两个土壤含水量值分别为21.2%和114.3%, CO₂浓度为700 μmol/mol, P_n 为零时对应的两个土壤含水量值分别为22.5%和117.2%。SRWC为114.3%和117.2%超过100%,所以无实际的生物学意义,需删除,因此,SRWC低于21.2%和22.5%时,叶底珠叶片均不能进行光合作用。根据拟合方程的积分式:

$$\overline{P_{N,350}} = \frac{1}{94.4 - 23.6}$$

$$\int_{23.6}^{94.4} \left(-\frac{0.0035}{3}x^3 + \frac{0.4744}{2}x^2 - 8.4896x \right) dx,$$

$$\overline{P_{N,700}} = \frac{1}{94.4 - 23.6}$$

$$\int_{23.6}^{94.4} \left(-\frac{0.005}{3}x^3 + \frac{0.6981}{2}x^2 - 13.161x \right) dx$$

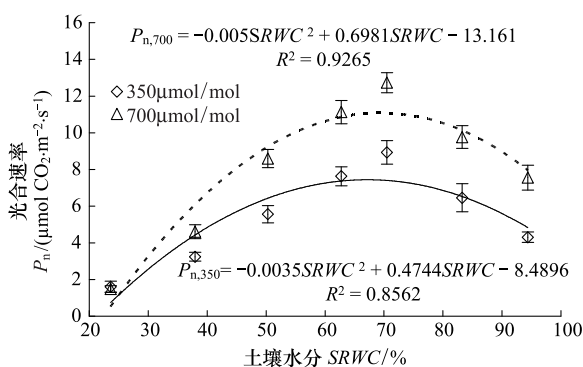


图2 正常 CO₂ 浓度 (350 μmol/mol) 和倍增 CO₂ (700 μmol/mol) 浓度下净光合速率 (P_n) 的土壤水分 (RWC) 阈值

Fig.2 The threshold value of net photosynthetic rate (P_n) in response to relative soil water content (RWC) under the normal CO₂ concentration (350 μmol/mol) and twice the normal CO₂ concentration (700 μmol/mol)

求出试验土壤含水量范围内 (SRWC 为 23.6%—94.4%), CO₂ 浓度为 350 μmol/mol 和 700 μmol/mol 时 P_n 的平均值分别为 5.9 μmol · m⁻² · s⁻¹ 和 8.6 μmol · m⁻² · s⁻¹, 其对应的 SRWC 分别为 45.5% 和 90.0%; 47.0% 和 92.6%, 因此, 正常 CO₂ 浓度下维持叶底珠较高光合生产力水平的 SRWC 范围在 45.5%—90.0%, 其中最适宜的 SRWC 为 67.8%。随着 CO₂ 浓度的增加, P_n 平均值明显提高, 增加的幅度在 51% 左右, 但土壤水分范围及最适宜的土壤水分增加不明显, 仅增加了 2%。说明在适宜的土壤水分条件下, CO₂ 浓度是光合作用的主要限制因素。

3.3 光合特征参数对土壤水分的响应

叶底珠苗木光合-CO₂ 响应特征参数对 SRWC 响应规律有所差异 (图 3), 表观最大净光合速率 ($P_{max,c}$) 和羧化效率 (CE) 具有较为相似的变化规律, 均呈抛物线趋势, 即随着 SRWC 的增加, $P_{max,c}$ 和 CE 呈直线增加的趋势, 如 SRWC 由 50.3% 到 70.5% 时, $P_{max,c}$ 和 CE 分别增加了 49.8% 和 37.1%; 当 SRWC 增加到一定临界值 (约 71%) 时, 两者均达到最大值, 分别为 20.6 μmol · m⁻² · s⁻¹ 和 0.053 μmol · m⁻² · s⁻¹ (表 1); 随着 SRWC 的持续增加, $P_{max,c}$ 和 CE 反而呈现迅速下降的趋势, 表明 SRWC 过高或过低均会导致叶底珠最大光合能力和对 CO₂ 的同化能力降低。

CO₂ 补偿点 (Γ) 对 SRWC 的响应过程 (图 3) 与 $P_{max,c}$ 和 CE 呈现相反的规律, 呈反抛物线变化。在 SRWC 为 70.5% 左右时, Γ 达到最低值 (51.3 μmol/mol) (表 1)。在 SRWC 为 50.3%—83.2% 时, Γ 差异不显著 ($P > 0.05$)。随着 SRWC 的增加或减少, Γ 均明显增大, 在 SRWC 为 23.6% 时, Γ 达到最大值 (134.9 μmol/mol) (表 1)。

光呼吸速率 (R_p) 对 SRWC 的变化具有阈值响应 (图 3)。在 SRWC 为 50.3%, R_p 达到最小值 (2.6175 μmol · m⁻² · s⁻¹) (表 1), 随着 SRWC 的增加, R_p 缓慢增加, 如 SRWC 为 62.7% 时, R_p 增加了 6% 左右; 但随着 SRWC 的下降, R_p 增加明显, 如 SRWC 为 37.9% 时, R_p 增加了 21.2%。表明适度的水分胁迫迫使其呼吸消耗减小, 有利于光合产物的积累。

4 讨论与结论

植物的生理过程对大气 CO₂ 浓度变化非常敏感, 尤其是光合作用、蒸腾速率和羧化效率, 会在很短的时间内做出响应^[16-17]。研究表明, 短期 CO₂ 浓度升高在一定程度上能够促进植物的光合作用、增加气孔阻力、减少水分蒸腾^[4-7], 本研究也证明了这一点。随着 CO₂ 浓度的增加, 叶底珠苗木的 P_n 逐渐增加, CO₂ 浓度增加对 P_n 的正效应会减缓干旱对光合作用的不利影响, 以增强植物对于干旱胁迫的抵御能力。随着土壤水分含量的降低, P_n 的 CO₂ 饱和点缓慢下降到直线下降。较低水分条件下 P_n 增加幅度较小, 因此在 CO₂ 浓度增加的情况下, 应该增加水分灌溉, 以充分利用 CO₂ 浓度升高对 P_n 的正效应。上述分析表明, 在水分充足或较低水分条件下, 大气

表 1 不同供水条件下净光合速率对 CO₂ 浓度响应的特征参数

Table 1 Parameters of photosynthetic rate in response to CO ₂ concentration under different water supply						
SRWC /%	拟合方程 Simulated equations	$P_{\max,c}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	CE /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R_p /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Γ /($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	R^2
94.4	$P_n = 0.0367\times C_i - 3.0311$	16.8c	0.0367c	3.0311b	82.6c	0.9847
83.2	$P_n = 0.0420\times C_i - 2.9318$	19.3b	0.0420b	2.9318b	69.8d	0.9990
70.5	$P_n = 0.0525\times C_i - 2.6953$	20.6a	0.0525a	2.6953d	51.3e	0.9854
62.7	$P_n = 0.0457\times C_i - 2.8161$	18.3b	0.0457b	2.8161c	61.6d	0.9960
50.3	$P_n = 0.0383\times C_i - 2.6175$	13.8d	0.0383c	2.6175d	68.3d	0.9904
37.9	$P_n = 0.0311\times C_i - 3.1730$	10.2e	0.0311d	3.1730a	102.0b	0.9924
23.6	$P_n = 0.0223\times C_i - 3.0074$	7.6f	0.0223e	3.0074b	134.9a	0.9733

不同小写字母表示同一列数据在 0.05 水平上存在显著性差异; SRWC: 土壤相对含水量 Relative water content; $P_{\max,c}$: 最大净光合速率 Apparent maximum photosynthesis rates; CE : 羧化效率 Carboxylation efficiency; R_p : 光呼吸速率 Photorespiration rate; Γ : CO₂ 补偿点 CO₂ compensation points

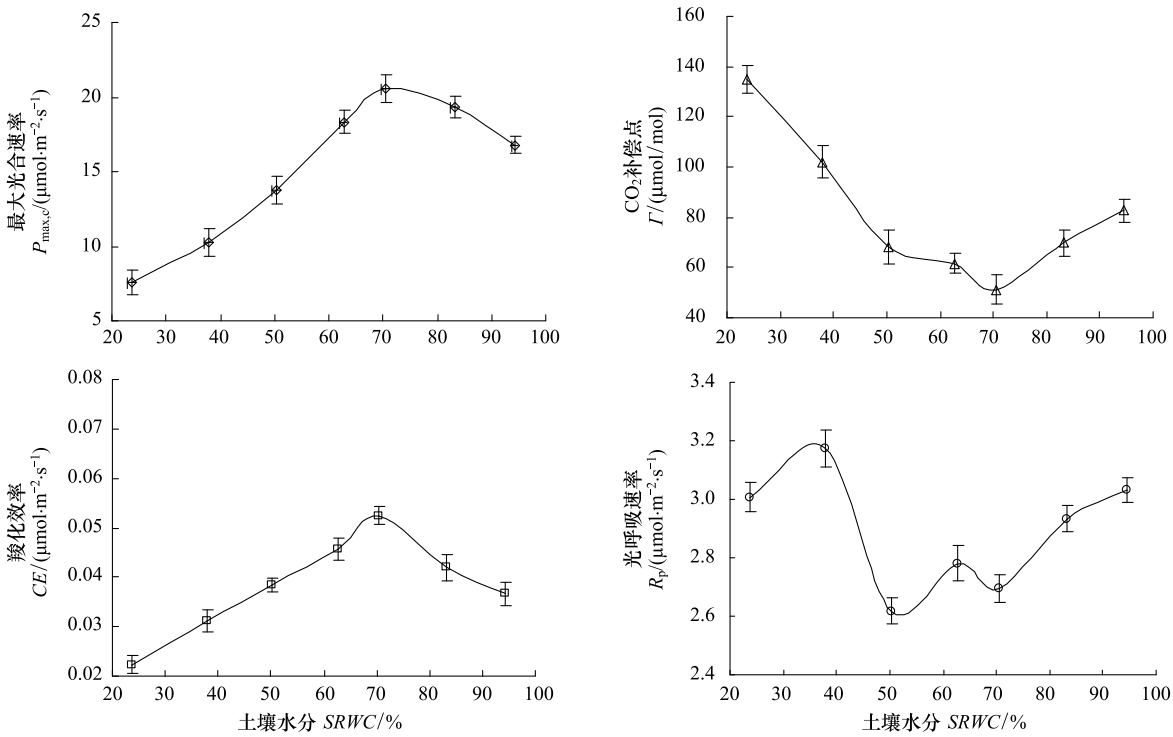


图 3 表观最大净光合速率($P_{\max,c}$)、羧化效率(CE)、CO₂ 补偿点(Γ)及光呼吸速率(R_p)对土壤水分的响应

Fig.3 The responses of apparent maximum net photosynthesis rate ($P_{\max,c}$), Carboxylation velocity (V_c), CO₂ compensation point (Γ), and photorespiration rate (R_p) to soil relative water content (SRWC)

CO₂浓度升高都能明显提高植物的 P_n 。大量研究表明,植物对土壤水分亏缺有一定的适应性和抵抗性,植物比较活跃的各种生理活动是在适度的水分亏缺范围之内^[15],这一范围因植物种类及其生理过程不同而异。本研究表明,在不同的 CO₂ 浓度范围内,维持叶底珠苗木 P_n 较高的 SRWC 在 50.3%—83.2%,其中最适宜光合作用的 SRWC 为 70.5%(图 1)。这一范围既保证了叶底珠苗木维持较高的光合作用水平

和正常的生长发育,又防止了蒸腾作用引起的大量耗水,从而达到水分的高效利用。
CO₂浓度饱和时的最大净光合速率在一定程度上反映了净光合速率对短期 CO₂ 浓度达到饱和时的潜在光合能力。本研究表明,叶底珠苗木在不同水分条件下的 $P_{\max,c}$ 具有明显的阈值响应,在 SRWC 为 70%左右时达到最大值,水分增加或减少都会显著降低 $P_{\max,c}$ 。这可能是由于适宜的土壤水分含量有

利于碳同化速率的增加,即增加了 CO₂对 Rubisco 酶结合位点的竞争从而提高 *CE*,以及通过抑制光呼吸提高净光合速率^[17]。植物的光合能力是用来表征不同植物或者作物品种的重要生理指标,在最佳或者最适的环境条件下,叶片的最大净光合速率可反映叶片的最大光合能力^[18-19]。不同植物的最大光合能力有所差异,杨梅 (*Myrica rubra*)^[20]、芦苇 (*Phragmites australis*)^[21]和胡杨 (*Populus euphratica*)^[22]的最大光合能力分别为 41.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、51.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、26.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本研究得出,叶底珠苗木的最大光合能力为 20.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,明显低于以上几种植物的光合能力,可见不同植物对高浓度 CO₂ 响应所表现出的光合特性差异较大^[23-24]。不同植物光合能力随着 CO₂浓度的增加而增加,但不同的植物增加程度不同,尤其是不同光合途径的植物差异很明显。大多数有关 C₄植物的研究表明,大气 CO₂浓度升高对 C₄植物的光合作用及生长没有很大促进^[23-26]。对 CAM(景天酸代谢)植物的研究相对较少,其结果也不尽一致^[26-28]。Cure^[23]和 Kimball^[26]等人综合了大量的实验结果计算出 CO₂浓度倍增后,C₄植物净光合速率只增加了 4%,而 C₃植物的净光合速率则可提高 66%。通过本研究结果来看,叶底珠苗木在 CO₂倍增条件下,除重度水分胁迫下,最大净光合速率增幅均超过 40%,在 *SRWC* 为 96.2%时,增幅为 75%,与 Cure^[23]、Kimball^[26]等人的研究结果基本一致。

CE 反映了植物在给定条件下对 CO₂的同化能力。本研究结果表明,叶底珠苗木 *CE* 对 *SRWC* 具有一定的阈值响应,在 *SRWC* 为 62.7%—70.5%时达到较高值(平均为 0.049 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),超过此范围,*CE* 均会下降,且 *CE* 在高水分条件下下降的幅度明显小于在低水分条件,表明低水分条件降低了苗木对 CO₂同化能力。CO₂补偿点(Γ)是了解和衡量光合作用和呼吸作用两者关系的一个重要生理指标,在不同时期和不同环境条件下 C₃植物对 CO₂响应有明显的变化^[29]。在一定的温度范围内, Γ 随温度升高而升高,随着 CO₂浓度的降低而下降^[29-30]。本研究结果表明,叶底珠苗木在 *SRWC* 为 50.3%—83.2%时, Γ 相差不大,变动幅度在 51.3—69.8 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间,随着土壤水分含量的降低, Γ 明显增加,在严重水分胁迫下达到 134.9 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。可见叶底珠苗木在不

同水分条件下对 CO₂浓度表现出一定的弹性适应。不同植物对 CO₂的同化能力以及 Γ 有所差异,这可能与植物本身的特性有关,也可能与植物所处的环境条件有关。光呼吸曾被认为是光能的消耗,不利于干物质积累^[31-32]。而随着研究的深入,逐渐认识到光呼吸对保证植物进行正常的光合作用是十分重要的^[33]。但对于光呼吸的光保护作用一直存在争议^[34-37]。本研究结果表明,在 *SRWC* 为 50.3%—70.5%时, R_p 维持在较低值,以提高植物的生物产量,有利于干物质的积累。随着土壤水分含量的降低, R_p 急剧增加,以保证在过剩光能下光合机构的正常运行,这与 Kozaki^[34]及 Wingler 等^[35]人的研究结果一致,光呼吸很可能是一种耗散过剩光能以保护光合机构免受强光破坏的途径。

References:

- [1] Mateos-Naranjo E, Redondo-Gómez S, Andrades-Moreno L, Davy A J. Growth and photosynthetic responses of the cordgrass *Spartina maritima* to CO₂ enrichment and salinity. *Chemosphere*, 2010, 81 (6): 725-731.
- [2] Lenihan J M, Bachelet D, Neilson R P, Drapek R. Simulated response of conterminous United States ecosystems to climate change at different levels of fire suppression, CO₂ emission rate, and growth response to CO₂. *Global and Planetary Change*, 2008, 64(1/2): 16-25.
- [3] Xiao G J, Zhang Q, Wang J. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [4] Allen L H Jr, Kakani V G, Vu J C V, Boote K J. Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(16): 1909-1918.
- [5] Zhang Y B, Duan B L, Qiao Y Z, Wang K Y, Korpelainen H, Li C Y. Leaf photosynthesis of *Betula albosinensis* seedlings as affected by elevated CO₂ and planting density. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1937-1944.
- [6] Sinha P G, Saradhi P P, Uprety D C, Bhatnagar A K. Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthesis and flowering in three wheat species belonging to different ploidy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 432-436.
- [7] Vurro E, Bruni R, Bianchi A, di Toppi L. Elevated atmospheric CO₂ decreases oxidative stress and increases essential oil yield in leaves of *Thymus vulgaris* grown in a mini-FACE system. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(1): 99-106.
- [8] Elizabeth A A, Alistair R. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO₂: Mechanisms and

- environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, 2007, 30(3): 258-270.
- [9] Zhang X C, Yu X F, Ma Y F, Zhangguan Z P. The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO₂ concentration. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1046-1057.
- [10] Zhou X R, Wang J H, Zhang H, Wang J C, Zhang Y B. Effects of elevated CO₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of *Fargesia rufa* Yi. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7644-7653.
- [11] Thomley J H M. Mathematical models in plant physiology: a qualitative approach to problems. London; New York: Academic Press, 1976
- [12] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [13] Cai S Q, Xu D Q. Relationship between CO₂ compensation point and photorespiration in soybean leaves. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2000, 26(6): 545-550.
- [14] Dong Z X, Han Q F, Jia Z K, Ren G X. Photosynthesis rate in response to light intensity and CO₂ concentration in different alfalfa varieties. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2272-2278.
- [15] Xu D Q. The Efficiency of Photosynthesis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.
- [16] Walker B, Steffen W. An overview of the implications of global change for natural and managed terrestrial ecosystem. *Conservation Ecology*, 1997, 1(2): 2-20.
- [17] Drake B G, González-Meler M A, Long S P. More efficient plants, a consequence of rising atmospheric CO₂. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1997, 48(1): 609-639.
- [18] Larcher H, Stuart Chapin F, Pons T L. Physiological Plant Ecology. Springer-Verlag New York Inc.; 2nd ed. 2008.
- [19] 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.
- [20] Zhang X H, Liu N, Guo J M. Comparative study of photosynthetic responses to short-term elevated CO₂ in two *Myrica* species. *Guizhou Science*, 2006, 24(2): 71-74.
- [21] Liang X, Zhang L Q, Zhao G Q. A comparison of photosynthetic characteristics between *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* under different CO₂ concentrations. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 842-848.
- [22] Zhou H H, Chen Y N, Li W H, Chen Y P. Photosynthesis of *Populus Euphratica olive* and its response to CO₂ concentration and high temperature in arid environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2797-2810.
- [23] Cure J D, Acock B. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/3): 127-145.
- [24] Rowland-Bamford A J, Backer J T, Allen L H, Bowes G. Acclimation of rice to changing atmospheric carbon dioxide concentration. *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14(6): 577-583.
- [25] Tang J J, Xu L M, Chen X, Hu S J. Interaction between C₄ barnyard grass and C₃ upland rice under elevated CO₂: Impact of mycorrhizae. *Acta Oecologica*, 2009, 35(2): 227-235.
- [26] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 2002, 77: 293-368.
- [27] Weiss I, Mizrahi Y, Raveh E. Effect of elevated CO₂ on vegetative and reproductive growth characteristics of the CAM plants *Hylocereus undatus* and *Selenicereus megalanthus*. *Scientia Horticulturae*, 2010, 123(4): 531-536.
- [28] Jiang Y P, Cheng F, Zhou Y H, Xia X J, Shi K, Yu J Q. Interactive effects of CO₂ enrichment and brassinosteroid on CO₂ assimilation and photosynthetic electron transport in *Cucumis sativus*. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75: 98-106.
- [29] Jensen A M, Löf M, Gardiner E S. Effects of above-and below-ground competition from shrubs on photosynthesis, transpiration and growth in *Quercus robur* L. seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(3): 367-375.
- [30] Pfan H, Vodnik D, Wittmann C, Aschan G, Batic F, Turk B, Macek I. Photosynthetic performance (CO₂-compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(1): 41-48.
- [31] Peterhansel C, Offermann S. Re-engineering of carbon fixation in plants-challenges for plant biotechnology to improve yields in a high-CO₂ world. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(2): 204-208.
- [32] Zouzoulas D, Koutroubas S D, Vassiliou G, Vardavakis E. Effects of ozone fumigation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology, anatomy, physiology, yield and qualitative characteristics of fibers. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 293-303.
- [33] Farazdaghi H. The single-process biochemical reaction of Rubisco: A unified theory and model with the effects of irradiance, CO₂ and rate-limiting step on the kinetics of C₃ and C₄ photosynthesis from gas exchange. *Biosystems*, 2011, 103(2): 265-284.
- [34] Kozaki A, Takeka G. Photorespiration protects C₃ plants from photooxidation. *Nature*, 1999, 384(6609): 557-560.
- [35] Wingler A, Quick W P, Bungard R A, Bailey K J, Lea P J, Leegood R C. The role of photorespiration during drought stress: an analysis utilizing barley mutants with reduced activities of photorespiratory enzymes. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22

(4): 361-373.

- [36] Haupt-Herring S, Fock H P. Exchange of oxygen and its role in energy dissipation during drought stress in tomato plants. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110(4): 489-495.

- [37] Noguès S, Alogre L. An increase in water deficit has no impact on the photosynthetic capacity of field-grown Mediterranean plants. *Functional Plant Biology*, 2002, 29(5): 621-630.

参考文献:

- [3] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [9] 张绪成, 于显枫, 马一凡, 上官周平. 高大气 CO₂浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应. *生态学报*, 2011, 31(4): 1046-1057.
- [10] 周先容, 汪建华, 张红, 王进闯, 张远彬. CO₂浓度升高和模

拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响. *生态学报*, 2012, 32(24): 7644-7653.

- [13] 蔡时青, 许大全. 大豆叶片 CO₂补偿点和光呼吸的关系. *植物生理学报*, 2000, 26(6): 545-550.

- [14] 董志新, 韩清芳, 贾志宽, 任广鑫. 不同苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种光合速率对光和 CO₂浓度的响应特征. *生态学报*, 2007, 27(6): 2272-2278.

- [15] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.

- [20] 张喜焕, 刘宁, 郭建民. 杨梅属两种植物光合特性对 CO₂浓度升高响应的比较研究. *贵州科学*, 2006, 24(2): 71-74.

- [21] 梁霞, 张利权, 赵广琦. 芦苇与外来植物互花米草在不同 CO₂浓度下的光合特性比较. *生态学报*, 2006, 26(3): 842-848.

- [22] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 干旱区胡杨光合作用对高温和 CO₂浓度的响应. *生态学报*, 2009, 29(6): 2797-2810.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《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 杨永兴

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 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 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

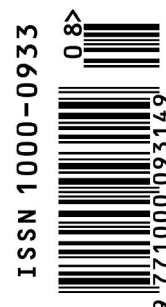
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元