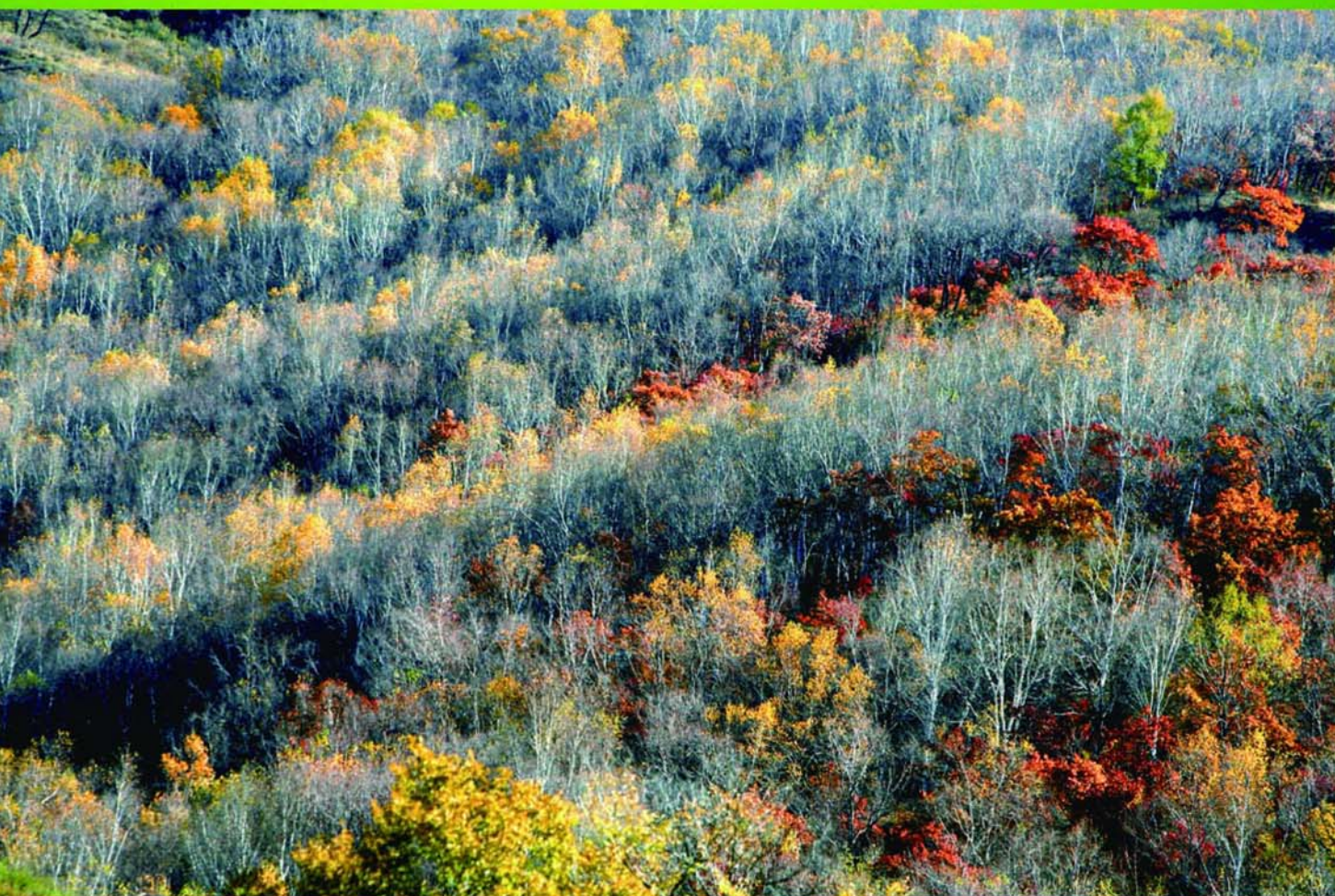


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

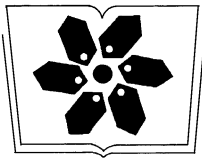
## Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 **2011**

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 31 卷 第 16 期

2011 年 8 月 (半月刊)

## 目次

|                                                                                    |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较·····                                                     | 汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489) |
| 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟·····                                                        | 郎莹,张光灿,张征坤,等 (4499)  |
| 不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响·····                                              | 秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509) |
| 镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响·····                                                      | 吴坤,吴中红,邵付菊,等 (4517)  |
| 条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较·····                                                           | 蒋和平,郑青松,朱明,等 (4525)  |
| 盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响·····                                                        | 庞秋颖,陈思学,于涛,等 (4534)  |
| 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响·····                                                     | 高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542) |
| 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析·····                                                      | 杜军,杨培岭,李云开,等 (4549)  |
| 苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长·····                                                          | 徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560) |
| 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价·····                                               | 田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)   |
| 镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响·····                                                    | 张征田,庞振凌,夏敏,等 (4579)  |
| 印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构·····                                                      | 周亚东,王春生,王小谷,等 (4586) |
| 长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例·····                                                    | 张斌,袁晓,裴恩乐,等 (4599)   |
| 应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况·····                                               | 毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609) |
| 基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析·····                                                   | 朱国平,吴强,冯春雷,等 (4620)  |
| 水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价·····                                               | 莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628) |
| 旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡·····                                                             | 王小彬,王燕,代快,等 (4638)   |
| 宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量·····                                                            | 王永生,杨世琦 (4653)       |
| 太湖沉积物有机碳与氮的来源·····                                                                 | 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661) |
| 日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响·····                                                          | 马晶,孙建,张涛,等 (4671)    |
| 灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较·····                                                            | 吕进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)  |
| 圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化·····                                                           | 兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689) |
| 塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征·····                                                             | 韩路,王海珍,陈加利,等 (4699)  |
| 珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略·····                                                      | 乔琦,秦新生,邢福武,等 (4709)  |
| 垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响·····                                                   | 多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)   |
| CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系·····                                                | 邵璞,曾晓东 (4725)        |
| 基于生态效率的辽宁省循环经济分析·····                                                              | 韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)   |
| <b>专论与综述</b>                                                                       |                      |
| 土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法·····                                                           | 曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)   |
| 生态社区评价指标体系研究进展·····                                                                | 周传斌,戴欣,王如松,等 (4749)  |
| <b>问题讨论</b>                                                                        |                      |
| 不同胁迫条件下化感与非化感水稻 PAL 多基因家族的差异表达·····                                                | 方长甸,王清水,余彦,等 (4760)  |
| <b>研究简报</b>                                                                        |                      |
| 钦州湾大型底栖动物生态学研究·····                                                                | 王迪,陈丕茂,马媛 (4768)     |
| 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征·····                                                         | 董凯凯,王惠,杨丽原,等 (4778)  |
| 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析·····                                                   | 刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783) |
| 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究·····                                                           | 隋旭红,张建军,文万荣 (4791)   |
| 小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N <sub>2</sub> O 排放及影响因子·····                                        | 石兰英,牟长城,田新民,等 (4799) |
| 期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-08 |                      |



封面图说:在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com



郎莹, 张光灿, 张征坤, 刘顺生, 刘德虎, 胡小兰. 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟. 生态学报, 2011, 31(16): 4499-4508.

Lang Y, Zhang G C, Zhang Z K, Liu S S, Liu D H, Hu X L. Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4499-4508.

# 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟

郎 莹, 张光灿\*, 张征坤, 刘顺生, 刘德虎, 胡小兰

(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, 国家林业局泰山森林生态站, 山东泰安 271018)

**摘要:** 利用 CIRAS-2 型便携式光合作用测定系统, 在黄土高原丘陵沟壑区, 测定了山杏 (*Prunus sibirica* L.) 在 8 个土壤水分梯度下光合作用的光响应过程, 并采用直角双曲线模型、非直角双曲线模型和直角双曲线修正模型对其进行拟合分析。结果表明: 土壤相对含水量 ( $RSWC$ ) 在 56.3%—80.9% 范围内, 山杏在强光下能维持较高的光合作用水平, 受到的光抑制不明显。在此土壤水分范围内, 3 个模型均能较好地拟合光合作用的光响应过程及其表观量子效率 ( $\Phi$ )、光补偿点 ( $LCP$ ) 和暗呼吸速率 ( $R_d$ ), 对  $\Phi$ 、 $LCP$  和  $R_d$  的拟合精度以非直角双曲线模型 > 直角双曲线修正模型 > 直角双曲线模型。但超出此范围 (即  $RSWC < 56.3\%$  或  $RSWC > 80.9\%$ ) 时, 山杏的光合作用在强光下会发生明显的光抑制, 表现为光合速率随光强增加而明显降低, 量子效率和光饱和点明显减小, 此时只有直角双曲线修正模型能较好地拟合山杏光响应过程及其特征参数。结论: 山杏光合作用正常的土壤水分范围在  $RSWC$  为 56.3%—80.9% 之间; 直角双曲线修正模型能较好地拟合各种土壤水分下山杏的光响应过程及其特征参数; 直角和非直角双曲线模型适用于正常水分下山杏光响应过程及其特征参数的模拟, 但不能用于拟合胁迫水分 (或光抑制) 下的光响应过程。

**关键词:** 植物光合生理; 山杏; 土壤水分; 光响应模型; 光合作用模拟

## Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions

LANG Ying, ZHANG Guangcan\*, ZHANG Zhengkun, LIU Shunsheng, LIU Dehu, HU Xiaolan

Forestry College of Shandong Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taishan Forest Ecosystem of State Forestry Administration, Taian 271018, China

**Abstract:** Water deficit is one of the major limiting factors in vegetation recovery and reconstruction in loess hilly gully region. *Prunus sibirica* L. is one of the common trees grown in this region. However, studies on characteristics of photosynthesis in leaves of *Prunus sibirica* L. under water stress are limited. The objective of this study is to explore the effect of different soil water content on photosynthesis in leaves of *Prunus sibirica* L. to characterize the relationship between photosynthesis of *Prunus sibirica* L. and soil water content and to explore the applicability of different photosynthetic models in simulating light response of photosynthesis in *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions, which will help us to further understand the photo-physiological characteristics of *Prunus sibirica* L. under water stress. The results will also help guiding cultivation of *Prunus sibirica* L. in the loess hilly gully region. By using CIRAS-2 portable photosynthesis system, the light responses of photosynthesis in leaves of two-year-old *Prunus sibirica* L. were studied under 8 different soil water conditions. And the light response curves of photosynthesis were fitted and analyzed by rectangular hyperbola model, non-rectangular hyperbola model and a modified model based on rectangular hyperbola model. Higher photosynthesis and less obvious photo-inhibition were observed in leaves of *Prunus sibirica* L. grown in the region where the relative soil water

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30872003); 国家“十一五”科技支撑专题项目 (2006BAD03A1205, 2006BAD26B06)

**收稿日期:** 2010-09-10; **修订日期:** 2010-12-06

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

contents ( $RSWC$ ) were from 56.3% to 80.9%. The light response of photosynthesis, the apparent quantum yield ( $\Phi$ ), the light compensation point ( $LCP$ ) and the dark respiration rate ( $R_d$ ) were well fitted by the three models. Among the three models, the non-rectangular hyperbola model fitted the data best; the rectangular hyperbola model fitted the data worst. When the  $RSWC$  exceeded the optimal range ( $56.3\% > RSWC > 80.9\%$ ), obvious photo-inhibition and significant decrease in photosynthesis were observed in leaves of *Prunus sibirica* L. under strong light, light saturation point and quantum yield of photosynthesis also decreased significantly. Under this circumstance, only the modified rectangular hyperbola model could well fit light response of photosynthesis and the main parameters. The optimal range of  $RSWC$  for normal photosynthesis in leaves of *Prunus sibirica* L was from 56.3% to 80.9%. The modified rectangular hyperbola model could well fit light response curves of photosynthesis and the main parameters under all the different soil water conditions. The rectangular hyperbola model and non-rectangular hyperbola model could only be used to fit light response curves of photosynthesis and the main parameters under the optimal soil water conditions.

**Key Words:** *Prunus sibirica* L.; soil water content; light response model; photosynthesis simulation

光合作用光响应曲线的测定及其模拟是植物光合生理生态学研究的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>,可以由此获得光合作用的最大光合速率、表观量子效率、光饱和点、光补偿点和暗呼吸速率等生理参数,有助于判定植物光合机构运转状况、光合作用能力和光合作用效率及其受环境变化的影响程度<sup>[3-5]</sup>。水分是影响植物生长的主要环境因子之一,而水分胁迫(尤其是干旱胁迫)是经常发生和制约植物生长发育的重要逆境问题<sup>[6]</sup>。因此,研究不同土壤水分条件下植物光合作用的光响应过程,对了解不同植物的光合作用特性及其与土壤水分的定量关系,指导植物生产过程中的良种选育和合理栽培具有重要作用。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外学者建立了许多关于植物光合作用的光响应模型<sup>[7-9]</sup>,其中以直角双曲线模型和非直角双曲线模型应用最为广泛<sup>[10-13]</sup>。然而有研究表明<sup>[5,14-17]</sup>,这两种模型在实际应用过程中,拟合的饱和光强远低于实际测量值,而最大光合速率远大于实际测量值,并且无法处理光抑制条件下的光响应数据。近年来,有研究者在直角双曲线光响应模型的基础上,提出了一种光合作用光响应新模型<sup>[1,5,18-19]</sup>——直角双曲线修正模型,发现此模型可以克服直角双曲线和非直角双曲线模型的缺陷<sup>[5]</sup>,能够比较准确地拟合植物光合光响应过程及其特征参数,拟合结果与实测数据的符合程度较高<sup>[4]</sup>。然而,迄今为止光合作用光响应新模型的应用,主要集中在农作物和草本植物<sup>[1,4-5,20-21]</sup>及其在温度胁迫或  $CO_2$  胁迫下光合作用光响应的模拟方面,但应用于木本植物(如树木)及其在水分胁迫下光响应过程的拟合是否具有同样的优势,因缺乏相应的研究还没有明确答案。

山杏(*Prunus sibirica* L.)是黄土丘陵沟壑区常见的适生树种之一,具有较强的固沙作用和抗旱能力,在目前的退耕还林等植被建设工程中应用较多。但目前对山杏的研究,尽管在生物学特性、开发利用价值和栽培技术等方面有些报道<sup>[22-25]</sup>,但对山杏光合作用等生理学过程及其在水分胁迫下如何变化的研究甚少,因而在山杏光合作用与土壤水分、光照强度等生态因子的定量关系方面还不是十分清楚。本文以两年生山杏的盆栽苗木为材料,测定其在不同土壤水分下光合作用的光响应过程,并采用直角双曲线模型、非直角双曲线模型和直角双曲线修正模型对其进行拟合分析。研究目的:1)明确山杏光合作用的光响应过程及其与土壤水分的定量关系;2)探索不同光响应模型在土壤水分胁迫下拟合山杏光响应过程的适用性。为深入了解山杏的光合生理生态特征、指导山杏在黄土丘陵区合理栽培提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于山西省吕梁山西麓的方山县峪口镇土桥沟流域(北纬  $37^{\circ}36'58''$ ,东经  $110^{\circ}02'55''$ ),属黄河中游黄土丘陵沟壑区。属暖温带大陆性季风气候,冬春寒冷干燥,秋季凉爽少雨,夏季降雨集中。干燥度 1.3,年无霜期 140 d,日照总时数 2496 h。全年平均风速 2—4 m/s,以东北风为主。多年平均气温  $7.3^{\circ}C$ ,极端最

高温 35.6℃ (1980-05-29), 极端最低温 -25.3℃ (1980-01-30); 多年平均  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温 2819.7℃, 多年平均  $\geq 15^\circ\text{C}$  的活动积温 2223.5℃。多年平均降水量 416 mm, 且年内分配非常不均, 6—9 月份降水占全年的 70% 以上。蒸发皿测得多年平均水面蒸发量达 1857.7 mm, 陆面蒸发量达 652.9 mm, 最大蒸发出现在 4—6 月, 明显大于同期降水, 年平均大气相对湿度为 50%, 表现出典型的北方严重春旱的特征。流域内最高海拔 1446 m, 试验区平均海拔 1200 m 左右。地表大部分为新生代第四纪马兰黄土所覆盖, 厚度 20—100 m。土壤为中壤质黄绵土, 由黄土母质直接发育形成, 层次过渡不明显, 质地均匀。试验区平均土壤容重 120 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量 21.0% 左右, 土壤 pH 值 8.0—8.4。试验区属森林草原灌丛植被区, 植被主要是乔木、灌木、木质藤本、半灌木、多年生及 1、2 年生草本等。乔木树种主要有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、白榆 (*Ulmus pumila*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*); 灌木主要有黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、大果榆 (*Ulmus macrocarpa*); 草本植物以菊科和禾本科为主, 菊科蒿属居多。

## 1.2 试验材料与水分控制

选用生长健壮、无病虫害、生长势基本一致的 2 年生山杏苗木为供试材料。2009 年 3 月进行苗木盆栽培育 (共栽植 6 盆, 每盆 1 株), 至 6 月份进行土壤水分处理和光合作用观测。用环刀法测得盆栽土壤容重在 1.20 g/cm<sup>3</sup> 左右、田间持水量为 23.1%。

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) 人为控制水分的方法获取盆栽的土壤水分梯度。即选取生长健壮的盆栽苗 3 株 (3 盆), 试验观测 2 d 前浇水, 使土壤水分饱和, 采用烘干法测定土壤重量含水量 (SSWC, %), 根据 SSWC 与田间持水量 (FC, %) 的比值求得土壤相对含水量 (RSWC, %)。2 d 后获得初期土壤水分含量, SSWC 为 21.9% (RSWC 为 94.9%), 进行第 1 次光合光响应过程测定。以后通过自然耗水, 每隔 2 d 获取一个土壤水分含量, 共获取 8 个水分含量系列。SSWC 分别为 21.9%, 18.7%, 15.8%, 13.0%, 10.3%, 8.4%, 6.5% 和 5.8%, RSWC 分别为 94.9%, 80.9%, 68.2%, 56.3%, 44.7%, 36.4%, 28.3% 和 25.1%。试验期间为防止降雨对土壤水分连续消耗的干扰, 采用搭建简易遮雨棚的方法, 防止雨水进入土壤水分控制区。

## 1.3 光合作用光响应过程测定

在每一试验植株中部选 3 片生长健壮的成熟叶片, 应用英国 PPS 公司生产的 CIRAS-2 型光合作用系统, 测定不同土壤水分下光合作用的光响应过程。每个水分处理水平下测定一天, 时间在 8:30—11:00 之间, 在每一植株上测定标记过的同一叶片, 每个叶片重复 3 次记录, 取平均值进行分析。测定时使用大气 CO<sub>2</sub> 浓度 ((360±6.0) μmol/mol), 大气温度 24—26℃, 相对湿度 (60±4.0)%。利用 LED 光源控制光合有效辐射强度 (PAR, μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 在 1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、250、150、100、50、20、0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。每个光照强度下控制测定时间为 120 s。仪器自动记录净光合速率 ( $P_n$ , μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 等光合生理参数。

绘制不同土壤水分下山杏光合速率的光响应 (PAR- $P_n$ ) 曲线 (图 1), 根据实测数据点的走势估计光饱和点 ( $LSP$ , μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)、最大光合速率 ( $P_{max}$ , μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)<sup>[26-27]</sup>、光补偿点 ( $P_n$  为 0 时的 PAR;  $LCP$ , μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 和暗呼吸速率 ( $PAR$  为 0 时的  $P_n$ ;  $R_d$ , μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), 作为光响应特征参数的实测值。同时采用传统的弱光下 ( $PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $PAR$  与  $P_n$  的线性回归法求得表观量子效率 ( $\Phi$ , mol/mol)<sup>[27-28]</sup>, 作为“实测值”与其他模型拟合值进行比较分析。

## 1.4 光合速率光响应过程模拟

利用 SPSS16.0、Excel 对光合速率光响应曲线和参数分别进行直角双曲线模型、非直角双曲线模型和直角双曲线修正模型的非线性拟合。

### 1.4.1 直角双曲线模型

直角双曲线的模型表达式为<sup>[21, 29-31]</sup>:

$$P_n(I) = \frac{\alpha I P_{nmax}}{\alpha I + P_{nmax}} - R_d \quad (1)$$

式中,  $P_n(I)$  为净光合速率;  $\alpha$  为初始量子效率;  $P_{nmax}$  为光饱和时最大光合速率;  $R_d$  为暗呼吸速率;  $I$  为光合有效辐射强度, 本文中用  $PAR$  表示。

植物在光补偿点处的量子效率 ( $\Phi_c$ )、内禀量子效率 ( $\Phi_0$ ) 和光合作用光响应曲线上  $I=0$  与  $I=I_c$  两点连线斜率的绝对值 ( $\Phi_{c0}$ ) 的数学表达式为:

$$\varphi_c = P'_n(I = I_c) = \frac{\alpha P_{nmax}^2}{(\alpha I_c + P_{nmax})^2} \quad (2)$$

$$\varphi_0 = P'_n(I = 0) = \alpha \quad (3)$$

$$\varphi_{c0} = \left| \frac{R_d}{I_c} \right| \quad (4)$$

式中,  $I_c$  为光补偿点, 本文中用  $LCP$  表示。

若模型拟合较好可采用下面公式来计算光补偿点:

$$I_c = \frac{R_d \cdot P_{nmax}}{\alpha(P_{nmax} - R_d)} \quad (5)$$

直线  $y=P_{nmax}$  与弱光下的线性方程相交, 交点所对应  $X$  轴的数值即光饱和点  $LSP^{[4, 31]}$ 。

#### 1.4.2 非直角双曲线模型

非直角双曲线模型因具有参数丰富、模拟效果好等特点而被广泛应用<sup>[30-34]</sup>。其模型表达式为<sup>[21, 35-37]</sup>:

$$P_n(I) = \frac{\alpha I + P_{nmax} - \sqrt{(\alpha I + P_{nmax})^2 - 4I\alpha k P_{nmax}}}{2k} - R_d \quad (6)$$

式中,  $k$  为非直角双曲线的曲角, 其他参数的意义同前。

$\Phi_c$ ,  $\Phi_0$  与  $\Phi_{c0}$  的数学表达式分别为:

$$\varphi_c = P'_n(I = I_c) = \frac{\alpha}{2k} \left[ 1 - \frac{(\alpha I_c + P_{nmax}) - 2k P_{nmax}}{\sqrt{(\alpha I_c + P_{nmax})^2 - 4k \alpha I_c P_{nmax}}} \right] \quad (7)$$

$$\varphi_0 = P'_n(I = 0) = \alpha \quad (8)$$

$$\varphi_{c0} = \left| \frac{R_d}{I_c} \right| \quad (9)$$

若模型拟合较好可采用下面公式来计算光补偿点:

$$I_c = \frac{R_d P_{nmax} - k R_d^2}{\alpha(P_{nmax} - R_d)} \quad (10)$$

直线  $y=P_{nmax}$  与弱光下的线性方程相交, 交点所对应  $X$  轴的数值即光饱和点  $LSP^{[4, 36]}$ 。

#### 1.4.3 直角双曲线修正模型

直角双曲线修正模型的表达式为<sup>[1, 5, 18-21, 38]</sup>:

$$P_n(I) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \quad (11)$$

$$LSP = \frac{\sqrt{(\beta + \gamma)/\beta} - 1}{\gamma} \quad (12)$$

$$P_{nmax} = \alpha \left( \frac{\sqrt{\beta + \gamma} - \sqrt{\beta}}{\gamma} \right)^2 - R_d \quad (13)$$

式中,  $\beta$  为修正系数,  $\gamma$  为初始量子效率与植物最大光合速率之比, 即  $r = \alpha/P_{nmax}$ , 其他参数的意义同前。

$\Phi_c$ ,  $\Phi_0$  与  $\Phi_{c0}$  的数学表达式分别为:

$$\varphi_c = P'_n(I = I_c) = \alpha \frac{1 + (\gamma - \beta) I_c - \beta \gamma I_c^2}{(1 + \gamma I_c)^2} \quad (14)$$



$$\varphi_0 = P_n'(I=0) = \alpha \quad (15)$$

$$\varphi_{c0} = \left| \frac{R_d}{I_c} \right| \quad (16)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 山杏光合速率光响应过程

由图 1 可以看出,在各个土壤水分条件下,随着光合有效辐射强度( $PAR$ )的增大,山杏的光合速率( $P_n$ )先迅速增大( $PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )后缓慢增大至光饱和点( $LSP$ ),对应出现最大光合速率( $P_{n\max}$ ),此后的光响应过程因土壤水分含量不同具有较大差别。土壤相对含水量( $RSWC$ )在 56.3%—80.9% 范围内,达到  $LSP$  后, $P_n$ 随着  $PAR$  增大的变化很小,如同一土壤水分下光饱和点的  $P_n$ ( $P_{n\max}$ )与  $PAR$  为  $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时的  $P_n$  方差分析没有显著差异( $P > 0.05$ ),即没有发生明显的光抑制。但超出此土壤水分范围时,达到  $LSP$  后,随着  $PAR$  的继续增大  $P_n$  显著减小,同一土壤水分下的  $P_{n\max}$  与  $PAR$  为  $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时的  $P_n$  显著差异( $P < 0.05$ ),即光抑制现象明显。说明水分过多或过少均会加剧强光下山杏光合作用的光抑制现象。

同时可以看出(图 1),山杏光合速率对土壤水分具有明显的阈值响应特点。即随着  $RSWC$  的减小, $P_n$  先增大后减小,在  $RSWC$  为 68.2% 的  $P_n$  水平最高,土壤水分变高或变低都会导致  $P_n$  降低。但在  $RSWC$  为 56.3%—80.9% 时,山杏的光合作用不会发生明显的光抑制,而且  $LSP$  和  $P_{n\max}$  均相对较高(表 1),可以认为是山杏光合作用比较适宜的土壤水分范围。

### 2.2 山杏光合作用光响应的模拟

利用直角双曲线模型、非直角双曲线模型和直角双曲线修正模型对山杏光合作用光响应过程及其特征参数的拟合结果见图 2、表 1。土壤相对含水量( $RSWC$ )在 56.3%—80.9% 范围内,3 个模型都能较好地拟合山杏的光合速率光响应过程(图 1),各个模型的决定系数( $R^2$ )都在 0.9 以上(表 1),其中以直角双曲线修正模型的拟合效果最好( $R^2$  达到 0.99 以上)。同时,3 个模型均能较好地拟合山杏光合作用的  $\Phi$ 、 $LCP$  和  $R_d$ (表 1),模拟值与实测值之间没有显著差异( $P > 0.05$ ),综合比较 3 个模型对  $\Phi$ 、 $LCP$  和  $R_d$  的拟合精度(与实测值的接近程度),以非直角双曲线模型>直角双曲线修正模型>直角双曲线模型。但直角与非直角双曲线模型对  $P_{n\max}$  的拟合值大于实测值,两者差异显著( $P < 0.05$ );而对  $LSP$  的拟合值则远远小于实测值(表 1)。

当  $RSWC$  超出 56.3%—80.9% 范围时,山杏的光合作用在强光下会发生明显的光抑制现象(图 2,表 1),表现为光合作用的  $\Phi$  值和  $LSP$  明显降低, $P_n$  随  $PAR$  增加而明显下降。此时,只有直角双曲线修正模型能较好地拟合光合作用的光响应过程( $R^2 > 0.98$ ,图 2,表 1)及其特征参数(表 1),而直角和非直角双曲线模型拟合山杏光响应过程会产生较大偏差(图 2),所拟合的光响应特征参数极显著偏离实测值( $P < 0.01$ ),因而难以应用(表 1)。

## 3 讨论

光合作用的表观量子效率( $\Phi$ )是反映植物对光能的利用效率的重要指标,对其传统的和常用的确定方法,是利用直线方程拟合弱光强下( $PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的光响应数据得到的直线斜率表示<sup>[28]</sup>。基于该方法的研究报道十分丰富,较多研究表明,在适宜生长条件下测定的一般植物的表观量子效率在 0.03—0.05 之间<sup>[39]</sup>。例如,怪柳和酸枣的  $\Phi$  为 0.0374 和 0.0361 左右<sup>[27]</sup>,弄口早椒和正椒 13 号的  $\Phi$  为 0.036 和 0.038

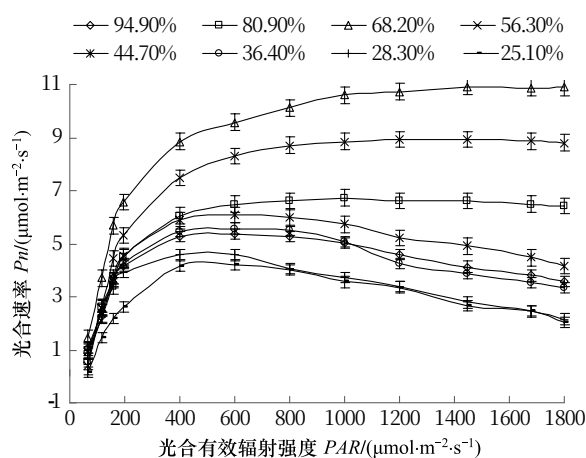


图 1 不同土壤水分下山杏光合速率光响应曲线

Fig. 1 Photosynthetic rate-light response curves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions

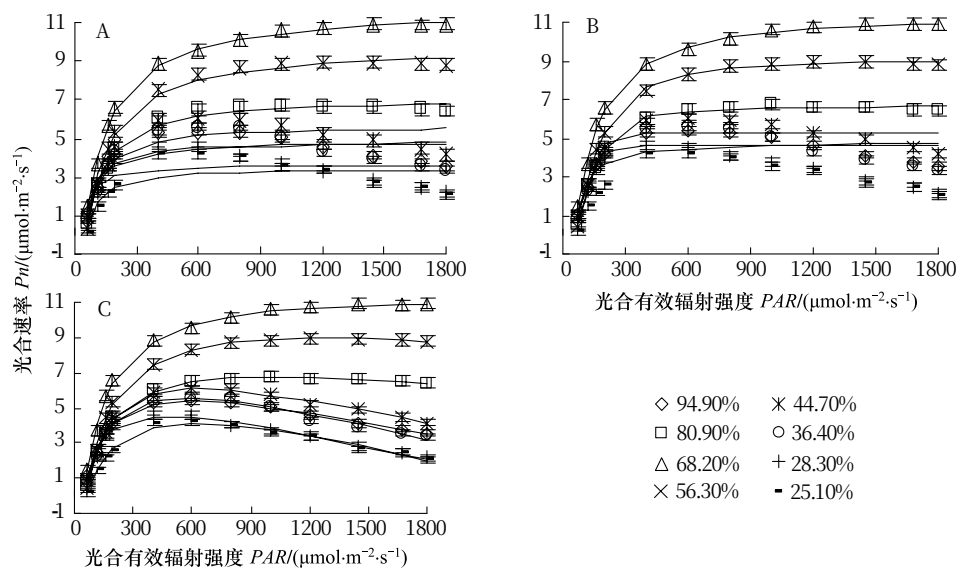


图2 不同光响应模型对山杏光合速率光响应曲线的模拟

Fig. 2 Simulation of photosynthetic rate-light response curves of *Prunus sibirica* L. by 3 models under different soil water conditions

A: 直角双曲线模型; B: 非直角双曲线模型; C: 直角双曲线修正模型

左右<sup>[40]</sup>, 美国凌霄的  $\Phi$  在 0.033—0.049 之间<sup>[41]</sup>, 五叶爬山虎的  $\Phi$  在 0.030—0.035 之间<sup>[42]</sup>。但还有一些植物在适宜生长条件下的表观量子效率低于 0.03, 例如, 花生的  $\Phi$  为 0.0269 左右<sup>[43]</sup>, 辽东槲木的  $\Phi$  低于 0.029<sup>[26]</sup>, 紫藤的  $\Phi$  低于 0.022<sup>[44]</sup>。土壤水分是影响表观量子效率的重要因子<sup>[26,28]</sup>, 但在不同植物上, 量子效率与土壤水分的定量关系还不十分清楚。本研究发现, 不同土壤水分下山杏的  $\Phi$  在 0.0207—0.0403 之间,  $RWC$  为 68.2% 的  $\Phi$  值最大 (为 0.0403), 而在  $RWC$  为 44.7%—68.2% 范围内的  $\Phi$  值相对较高 (均在 0.03 以上, 表 1)。表明山杏光合作用的光能利用效率处于一般植物的水平, 并在土壤水分过高和过低时都会下降。

近年来有研究报道, 利用传统的线性拟合方法确定量子效率时, 会由于有效辐射强度 ( $PAR$ ) 的具体取值范围或统计的数据点数量不同而出现差异。例如<sup>[4]</sup>, 当  $PAR$  取值在 200、160、120  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以下时, 冬小麦的光合作用的表观量子效率分别为 0.049、0.052、0.055  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本研究表明, 山杏的光量子效率也会随着  $PAR$  取值上限值的减小而增加 (表 1), 例如在  $RSWC$  为 68.2% 时, 上述 3 个  $PAR$  取值上限值拟合的  $\Phi$  值为 0.0403、0.0455、0.0461  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。说明线性拟合方法确定的表观量子效率具有一定的人为性而有所差别, 这与植物光合作用的光响应曲线即使在弱光下也并非严格意义 (而只是近似认为) 的线性关系有关<sup>[28]</sup>。

传统的直角双曲线和非直角双曲线模型尽管在理论上可以拟合光响应曲线上低光强下任意点的表观量子效率 (该点切线的斜率), 如光补偿点 ( $LCP$ ) 处的量子效率 ( $\Phi_c$ )、内禀量子效率 ( $\Phi_0$ ) 和  $PAR=0$  与  $LCP$  两点连线斜率的绝对值 ( $\Phi_{00}$ ), 其生理学意义明确而且具有唯一值 (表 1); 但由于模型本身是一条没有极点的渐近线这一特点, 导致其适用性和模拟精度受到很大限制<sup>[4-5,21]</sup>。在本研究中难以模拟山杏光合作用在光抑制 (水分胁迫) 下的光响应过程及其特征参数, 即使在非光抑制下对  $P_{\text{max}}$  和  $LSP$  的拟合效果也较差 (图 2、表 1)。而直角双曲线修正模型在一定程度上克服了两个传统模型的这些缺陷, 可以比较准确地处理光抑制条件下植物光合作用的光响应数据<sup>[5,14-17]</sup>, 本研究将其应用于不同土壤水分下山杏光响应过程及其特征参数的模拟处理也得到了较好效果 (图 2、表 1)。但发现在  $RSWC$  为 56.3%—80.9% 范围内, 修正模型对山杏  $LCP$  和  $R_d$  的拟合精度低于非直角双曲线模型, 与对冬小麦、水稻、丹参等研究<sup>[4-5,21,38]</sup> 得出的以直角双曲线修正模型最优的结果有所不同, 其原因是否与植物种类 (如乔木与草本植物) 的不同有关, 还需要进一步的探索。



表 1 山杏光合作用光响应参数实测值与模型拟合值

Table 1 The measured data of photosynthesis-light response parameters of *Prunus sibirica* L. and the results fitted by 3 models

| 光响应模型<br>Light response<br>model               | 光响应参数<br>Light response<br>parameter | 土壤相对含水量 $RSWC/\%$ |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                |                                      | 94.9              | 80.9   | 68.2   | 56.3   | 44.7   | 36.4   | 28.3   | 25.1   |
| 实测值<br>Measured data                           | $\Phi_{PAR \leq 200}$                | 0.0243            | 0.0292 | 0.0403 | 0.0347 | 0.0316 | 0.0265 | 0.0238 | 0.0207 |
|                                                | $\Phi_{PAR \leq 160}$                | 0.0286            | 0.0309 | 0.0455 | 0.0376 | 0.0358 | 0.0284 | 0.0286 | 0.0217 |
|                                                | $\Phi_{PAR \leq 120}$                | 0.029             | 0.0411 | 0.0461 | 0.0379 | 0.0439 | 0.0291 | 0.0292 | 0.026  |
|                                                | $LSP$                                | 600               | 1000   | 1500   | 1200   | 600    | 550    | 500    | 450    |
|                                                | $P_{nmax}$                           | 5.36              | 6.73   | 10.9   | 8.93   | 6.08   | 5.58   | 4.6    | 4.2    |
|                                                | $LCP$                                | 15.68             | 48.20  | 43.20  | 45.50  | 45.02  | 30.65  | 19.94  | 23.19  |
|                                                | $R_d$                                | 0.38              | 1.73   | 3.10   | 1.30   | 1.42   | 0.81   | 0.47   | 0.48   |
| 直角双曲线模型<br>Rectangular hyperbola<br>model      | $\Phi_0$                             | —                 | 0.0757 | 0.089  | 0.0802 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $\Phi_c$                             | —                 | 0.0697 | 0.0821 | 0.0755 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $\Phi_{c0}$                          | —                 | 0.0757 | 0.089  | 0.0802 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $LSP$                                | —                 | 48.24  | 101.01 | 96.81  | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $P_{nmax}$                           | —                 | 12.9   | 25.6   | 15.6   | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $LCP$                                | —                 | 56.24  | 51.47  | 54.49  | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $R_d$                                | —                 | 9.90   | 9.20   | 7.60   | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $R^2$                                | 0.693             | 0.983  | 0.997  | 0.990  | 0.798  | 0.604  | 0.302  | 0.603  |
| 非直角双曲线模型<br>Non-rectangular<br>hyperbola model | $\Phi_0$                             | —                 | 0.0757 | 0.089  | 0.0802 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $\Phi_c$                             | —                 | 0.0697 | 0.0821 | 0.0755 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $\Phi_{c0}$                          | —                 | 0.0757 | 0.089  | 0.0802 | —      | —      | —      | —      |
|                                                | $LSP$                                | 215               | 268    | 192    | 276    | 250    | 234    | —      | —      |
|                                                | $P_{nmax}$                           | 5.33              | 12.90  | 16.40  | 12.90  | 7.03   | 5.45   | —      | —      |
|                                                | $LCP$                                | 27.27             | 50.10  | 44.52  | 47.20  | 62.91  | 37.24  | —      | —      |
|                                                | $R_d$                                | 0.68              | 1.73   | 3.95   | 2.17   | 1.73   | 0.87   | —      | —      |
|                                                | $R^2$                                | 0.794             | 0.995  | 0.998  | 0.997  | 0.869  | 0.723  | —      | —      |
| 修正模型<br>Modified model                         | $\Phi_0$                             | 0.0512            | 0.0538 | 0.0785 | 0.0609 | 0.059  | 0.0463 | 0.0423 | 0.0457 |
|                                                | $\Phi_c$                             | 0.0481            | 0.0509 | 0.0757 | 0.0581 | 0.0562 | 0.0431 | 0.0395 | 0.043  |
|                                                | $\Phi_{c0}$                          | 0.05              | 0.0529 | 0.0777 | 0.0598 | 0.057  | 0.045  | 0.0414 | 0.0445 |
|                                                | $LSP$                                | 582               | 1006   | 1590   | 1239   | 610    | 573    | 458    | 602    |
|                                                | $P_{nmax}$                           | 5.38              | 6.73   | 10.97  | 8.96   | 6.07   | 5.55   | 4.54   | 4.13   |
|                                                | $LCP$                                | 46.14             | 56.24  | 48.69  | 51.97  | 59.80  | 50.86  | 50.41  | 51.00  |
|                                                | $R_d$                                | 4.60              | 2.20   | 5.50   | 3.00   | 6.00   | 4.62   | 3.38   | 3.19   |
|                                                | $R^2$                                | 0.997             | 0.999  | 0.999  | 0.998  | 0.999  | 0.991  | 0.986  | 0.995  |

$\Phi_{PAR \leq 200}$ 、 $\Phi_{PAR \leq 160}$  和  $\Phi_{PAR \leq 120}$  分别为  $PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $PAR \leq 160 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $PAR \leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时的量子效率

当植物吸收的光能超过其所需时,过剩的激发能会产生光抑制而降低光合作用效率<sup>[45]</sup>。强光与水分胁迫共存时会打破叶绿体内光合作用固定  $\text{CO}_2$  和吸收光能的平衡<sup>[46]</sup>,导致过剩光能的积累而加剧光抑制,严重时会导致光系统的破坏<sup>[47-48]</sup>。本研究表明,山杏光合作用发生光抑制的程度与土壤水明显相关(图 1),当  $RSWC$  为 56.3%—80.9% 时,在强光下不会发生明显的光抑制, $P_n$  和  $LSP$  水平相对较高; $RSWC$  为 44.7%—68.2% 时,在弱光下的表观量子效率较高(表 1),即光能利用效率较高。由此认为,山杏光合作用的适宜土壤水分范围在  $RSWC$  为 44.7%—80.9% 之间,其中最适宜的  $RSWC$  为 68.2% 左右。比较其他乔木植物研究结果,核桃光合作用适宜的  $RSWC$  范围在 41%—60%<sup>[49]</sup>、刺槐在 48%—64%、侧柏在 41%—52%<sup>[50-51]</sup>、丁香在 59%—76%<sup>[52]</sup>,表明山杏是抗旱能力较强和光合作用对土壤水分适应范围较广的树种。

## References:

[1] Ye Z P. Application of light-response model in estimating the photosynthesis of super-hybrid rice combination-II Youming 86. Chinese Journal of

- Ecology, 2007, 26(8): 1323-1326.
- [ 2 ] Jiang G M, He W M. A quick new method for determining light response curves of photosynthesis under field light conditions. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(6): 712-718.
- [ 3 ] Zeng X M, Yuan L, Shen Y G. Response of photosynthesis to light intensity in intact and detached leaves of *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiology Communications, 2002, 38(1): 25-26.
- [ 4 ] Ye Z P, Yu Q. Comparison of new and several classical models of photosynthesis in response to irradiance. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [ 5 ] Ye Z P, Yu Q. Comparison of a new model of light response of photosynthesis with traditional models. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(6): 771-775.
- [ 6 ] Hu J C, Cao W X, Zhang J B, Jiang D, Feng J. Quantifying responses of winter wheat physiological processes to soil water stress for use in growth simulation modeling. Pedosphere, 2004, 14(4): 509-518.
- [ 7 ] Miko U F K, Graham D F. Investigation of the CO<sub>2</sub> dependence of quantum yield and respiration in *eucalyptus pauciflora*. Plant Physiology, 1987, 83(4): 1032-1036.
- [ 8 ] Baly E C C. The kinetics of photosynthesis. Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1935, 117(804): 218-239.
- [ 9 ] Thornley J H M. Dynamic model of leaf photosynthesis with acclimation to light and nitrogen. Annals of Botany, 1998, 81(3): 431-430.
- [ 10 ] Farquhar G D, Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [ 11 ] Prioul J L, Chartier P. Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation: a critical analysis of the methods used. Annals of Botany, 1977, 41(4): 789-800.
- [ 12 ] Leverenz J W, Jarvis P G. Photosynthesis in Sitka spruce VIII. The effects of light flux density and direction on the rate of net photosynthesis and the stomata conductance of needles. Journal of Applied Ecology, 1979, 16: 919-932.
- [ 13 ] Marshall B, Biscoe P V. A model for C<sub>3</sub> leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance. Journal of Experimental Botany, 1980, 31(1): 29-39.
- [ 14 ] Chen G Y, Yu G L, Chen Y, Xu D Q. Exploring the observation methods of photosynthetic responses to light and carbon dioxide. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(6): 691-696.
- [ 15 ] Fu W G, Li P P, Bian X M, Wu Y Y, Cao Q Y. Diurnal photosynthetic changes of phragmites communis in the Wetland Lying in Beigushan Mountain of Zhengjiang prefecture. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(3): 496-501.
- [ 16 ] Liu Y F, Xiao L T, Tong J H, Li X B. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8): 76-79.
- [ 17 ] Gao J, Meng p, Wu B, Zhang J S, Chu J M. Photosynthesis and transpiration of *Salvia miltiorrhiza* in tree-herb system of *Prunus dulcis* and *Salvia miltiorrhiza*. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 64-67.
- [ 18 ] Ye Z P, Gao J. Change of carboxylation efficiency of *Salvia miltiorrhiza* in the vicinity of CO<sub>2</sub> compensation point. Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition, 2008, 36(5): 160-164.
- [ 19 ] Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637-640.
- [ 20 ] Ye Z P, Gao J. Application of a new model of light-response and CO<sub>2</sub> response of photosynthesis in *Salvia miltiorrhiza*. Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition, 2009, 37(1): 129-134.
- [ 21 ] Ye Z P, Wang J L. Comparison and analysis of light-response models of plant photosynthesis. Journal of Jinggangshan University, 2009, 30(4): 9-13.
- [ 22 ] Zhang Y Y, Qu L Y, Chen L D, Wei W. Soil microbial properties under different vegetation types in Loess hilly region. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 165-173.
- [ 23 ] Zhang S Y, Zhou Z F, Zhang G C, Xia J B. Changes of gas exchange parameters in leaves of natural secondary shrubs *Prunus davidiana* and *Prunus sibirica* L. in semi-arid Loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 499-507.
- [ 24 ] Wang H, Wang B T, Wang T, Zhang D D, Fu R J. Effects of different water moisture on photosynthesis and transpiration of potted *Prunus sibirica* seedlings. Northern Horticulture, 2010, (2): 1-5.
- [ 25 ] Cui X D, Yang C D, He J Q, Fu D X, Huang R D, Huang R D. Analysis of soil amino acid's composition and content in *Armeniaca sibirica*'s seedling place. Forest Research, 2009, 22(4): 512-520.
- [ 26 ] 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.

- [27] Xia J B, Tian J Y, Zhang G C, Li T. Photosynthetic and physiological characteristics of three shrubs species in Shell islands of Yellow River Delta. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7): 1452-1459.
- [28] Xu D Q. Photosynthetic Efficiency. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 2002: 33-33.
- [29] Lewis J D, Olszyk D, Tingey D T. Seasonal patterns of photosynthetic light response in Douglas-fir seedlings subjected to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature. *Tree Physiology*, 1999, 19(4/5): 243-252.
- [30] Zhang M, Wu J B, Guan D X, Shi T T, Chen P S, Ji R P. Light response curve of dominant tree species photosynthesis in broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [31] Lu P L, Luo Y, Liu J D, Yu Q. Characteristic parameters of light response curves of photosynthesis of winter wheat in north China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(2): 236-241.
- [32] Lu P L, Yu Q, Luo Y, Liu J D. Fitting light response curves of photosynthesis of winter wheat. *Agricultural Meteorology*, 2001, 22(2): 12-14.
- [33] Huang Y Q, Wang X Y, Lu S H, Wang Q, Zhao P. Studies of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of some dominant species in rocky desert area, Guangxi, China. *Guihaia*, 2006, 26(2): 171-177.
- [34] Wu W M, Dong H L, Wei C Z, Chen K W, Yang R B, Zhi J H. Analysis of light flux/effect curves and chlorophyll fluorescence characteristics of cotton (*Gossypium. ba rba dense* L. and *Gossypium. hirsutum* L. ) in south Xinjiang. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2006, 15(4): 141-146.
- [35] Takahiro ENDO, Toshinori OKUDO, Masasyuki TAMURA, Yoshifumi YASUOKA. Estimation of net photosynthetic rate based on in-situ hyperspectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 41: 564-570.
- [36] Richardson A, Berlyn G P. Changes in foliar spectral reflectance and chlorophyll fluorescence of four temperate species following branch cutting. *Tree Physiology*, 2002, 22(7): 499-506.
- [37] Bu L D, Zhang R H, Chang Y, Xue J Q, Han M M. Response of photosynthetic characteristics to water stress of maize leaf in seeding. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [38] Ye Z P, Gao J. Relationship photosynthetic rate of *Salvia miltiorrhiza* with irradiance at low photon flux densities. *Journal of Jinggangshan University*, 2007, 28(8): 47-50.
- [39] Li H S. Modern Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [40] Hu W H, Hu X H, Zeng J J, Duan Z H, Ye Z P. Effects of drought on photosynthetic characteristics in two pepper cultivars. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(6): 776-781.
- [41] Xia J B, Zhang G C, Liu J T, Liu Q, Chen J. Responses of photosynthetic and physiological parameters in *Campsis radicans* to soil moisture and light intensities. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(5): 13-18.
- [42] Zhang S Y, Zhang G C, Chen J, Liu G, Li X L, Liu X. Effect of soil moisture on photosynthesis and transpiration of *Parthenocissus quinquefolia* planch. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 62-66.
- [43] Zhang K, Wan Y S, Liu F Z, Zhang E Q, Wang S. Response of photosynthetic characteristics of peanut seedlings leaves to low light. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2989-2995.
- [44] Xia J B, Zhang G C, Liu G, Han W, Chen J, Liu X. Light response of *Wisteria sinensis* leaves physiological parameters under different soil moisture conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 30-34.
- [45] Li D Q, Gao H Y, Meng Q W. Plant Physiology. Beijing: Chinese Agricultural Scientific and Technological Press, 2004: 96-96.
- [46] Sun Y, Xu W J, Fan A L. Effects of salicylic acid on chlorophyll fluorescence and xanthophylls cycle in cucumber leaves under high temperature and strong light. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 399-402.
- [47] Yang G D, Zhu Z J, Ji Y M. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 115-118.
- [48] Dambrosio N, Arena C, Santo A V D. Temperature response of photosynthesis, excitation energy dissipation and alternative electron sinks to carbon assimilation in *Beta vulgaris* L. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 55: 248-257.
- [49] Li X L, Zhang G C, Zhou Z F, Liu X, Chen X J, Zhang S Y. Response to light of water utilization efficiency of walnut leaf in different soil moisture in loess hilly region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(1): 43-47.
- [50] 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(6): 858-862.
- [51] Zhang G C, He K N, Liu X. Fitting soil moisture environment of trees growth on *Loess Plateau* in semi-arid region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 1-5.
- [52] Chen X J, Zhang G C, Zhou Z F, Ma S S, Li X L, Zhang S H Y. Diurnal variations and response to light of gas exchange parameters of clove (*Syringa oblata* Lindl.) leaf in loess hilly region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(4): 102-107.



## 参考文献:

- [1] 叶子飘. 光响应模型在超级杂交稻组合-II 优明 86 中的应用. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1323-1326.
- [3] 曾小美, 袁琳, 沈允钢. 拟南芥连体和离体叶片光合作用的光响应. 植物生理学通讯, 2002, 38(1): 25-26.
- [4] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [5] 叶子飘, 于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型的比较. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 771-775.
- [14] 陈根云, 俞冠路, 陈悦, 许大全. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(6): 691-696.
- [15] 付为国, 李萍萍, 卞新民, 吴沿友, 曹秋玉. 镇江北固山湿地芦苇光合日变化的研究. 西北植物学报, 2006, 26(3): 496-501.
- [16] 刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. 中国农学通报, 2005, 21(8): 76-79.
- [17] 高峻, 孟平, 吴斌, 张劲松, 褚建民. 杏-丹参林药复合系统中丹参光合和蒸腾特性的研究. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 64-67.
- [18] 叶子飘, 高峻. 丹参羧化效率在其  $\text{CO}_2$  补偿点附近的变化. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 160-164.
- [20] 叶子飘, 高峻. 光响应和  $\text{CO}_2$  响应新模型在丹参中的应用. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 129-134.
- [21] 叶子飘, 王健林. 植物光合-光响应模型的比较分析. 井冈山学院学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 9-13.
- [22] 刘硕, 贺康宁. 不同土壤水分条件下山杏的蒸腾特性与影响因子. 中国水土保持科学, 2006, 4(6): 66-70.
- [22] 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶, 卫伟. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤微生物特性. 应用生态学报, 2010, 21(1): 165-173.
- [23] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 夏江宝. 半干旱黄土丘陵区天然次生灌木山桃 (*Prunus davidiana*) 与山杏 (*Prunus sibirica* L.) 叶片气体交换参数日动态差异. 生态学报, 2009, 29(1): 499-507.
- [24] 王红, 王百田, 王婷, 张东东, 付汝军. 不同土壤含水量对山杏盆栽幼苗蒸腾速率和光合速率的影响. 北方园艺, 2010, (2): 1-5.
- [25] 崔旭东, 杨承栋, 何家庆, 傅得贤, 黄汝多, 黄训端. 重茬对山杏苗圃地土壤氨基酸组分及含量的影响. 林业科学研究, 2009, 22(4): 512-520.
- [26] 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.
- [27] 夏江宝, 田家怡, 张光灿, 李田. 黄河三角洲贝壳堤岛 3 种灌木光合生理特征研究. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1452-1459.
- [28] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 33-33.
- [30] 张弥, 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 陈鹏师, 纪瑞鹏. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [31] 陆佩玲, 罗毅, 刘建栋, 于强. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数. 应用气象学报, 2000, 11(2): 236-241.
- [32] 陆佩玲, 于强, 罗毅, 刘建栋. 冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合. 中国农业气象, 2001, 22(2): 12-14.
- [33] 黄玉清, 王晓英, 陆树华, 汪青, 赵平. 岩溶石漠化治理优良先锋植物种类光合、蒸腾及水分利用效率的初步研究. 广西植物, 2006, 26(2): 171-177.
- [34] 伍维模, 董合林, 危常洲, 陈康谓, 杨仁碧, 支金虎. 南疆陆地棉与海岛棉光合-光响应及叶绿素荧光特性分析. 西北农业学报, 2006, 15(4): 141-146.
- [37] 卜令铎, 张仁和, 常宇, 薛吉全, 韩苗苗. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应. 生态学报, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [38] 叶子飘, 高峻. 低光强时丹参叶片的光合速率与光强的关系. 井冈山学院学报, 2007, 28(8): 47-50.
- [39] 李合生. 现代植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [40] 胡文海, 胡雪华, 曾建军, 段智辉, 叶子飘. 干旱胁迫对 2 个辣椒品种光合特性的影响. 华中农业大学学报, 2008, 27(6): 776-781.
- [41] 夏江宝, 张光灿, 刘京涛, 刘庆, 陈建. 美国凌霄光合生理参数对水分与光照的响应. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 13-18.
- [42] 张淑勇, 张光灿, 陈建, 刘刚, 李小磊, 刘霞. 土壤水分对五叶爬山虎光合与蒸腾作用的影响. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 62-66.
- [43] 张昆, 万勇善, 刘凤珍, 张尔群, 王溯. 花生幼苗光合特性对弱光的响应. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2989-2995.
- [44] 夏江宝, 张光灿, 刘刚, 韩炜, 陈建, 刘霞. 不同土壤水分条件下紫藤叶片生理参数的光响应. 应用生态学报, 2007, 18(1): 30-34.
- [45] 李德全, 高辉远, 孟庆伟. 植物生理学. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 96-96.
- [46] 孙艳, 徐伟君, 范爱丽. 高温强光下水杨酸对黄瓜叶片叶绿素荧光和叶黄素循环的影响. 应用生态学报, 2006, 17(3): 399-402.
- [47] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 115-118.
- [49] 李小磊, 张光灿, 周泽福, 刘霞, 陈新军, 张淑勇. 黄土丘陵区不同土壤水分下核桃叶片水分利用效率的光响应. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 43-47.
- [50] 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.
- [51] 张光灿, 贺康宁, 刘霞. 黄土高原半干旱区林木生长适宜土壤水分环境的研究. 水土保持学报, 2001, 15(4): 1-5.
- [52] 陈新军, 张光灿, 周泽福, 马树生, 李小磊, 张淑勇. 黄土丘陵区紫丁香叶片气体交换参数的日变化及光响应. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 102-107.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31 ,No. 16 August ,2011 ( Semimonthly )

## CONTENTS

|                                                                                                                                                             |                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination .....     | WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489) |
| Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of <i>Prunus sibirica</i> L. under different soil water conditions .....                      | LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)  |
| Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field .....                       | QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)       |
| Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves .....                     | WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujun, et al (4517)            |
| Comparative physiological responses of cadmium stress on <i>Enteromorpha clathrata</i> and <i>Enteromorpha linza</i> .....                                  | JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)     |
| Effects of salt stress on glucosinolate contents in <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Thellungiella halophila</i> rosette leaves .....                     | PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)           |
| Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field .....                                       | GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)       |
| Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia .....                                           | DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)            |
| Seed characteristics and seedling growth of <i>Spartina alterniflora</i> on coastal wetland of North Jiangsu .....                                          | XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)        |
| Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model .....                         | TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)              |
| Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in <i>Pirata subpiraticus</i> (Araneae: Lycosidae) in different habitats ..... | ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)    |
| The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current .....                                                      | ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)   |
| Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area .....      | ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)             |
| Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary .....                     | MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)   |
| Population age structure of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey .....                     | ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)        |
| Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province .....                                  | MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)       |
| Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems .....                                                                              | WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)           |
| The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period .....                                                                             | WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)                        |
| The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake .....                                                                                  | NI Zhaoxui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)       |
| Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi .....                                                                  | MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)               |
| Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in <i>Laodelphax striatellus</i> (Fallen) and <i>Nilaparvata lugens</i> (Stål) ..... | LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)          |
| Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear ( <i>Helarctos malayanus</i> ) in captivity .....                                         | LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)      |
| Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River .....                                       | HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)           |
| Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, <i>Bretschneidera sinensis</i> .....                            | QIAO Qi, QIN Xinsong, XING Fuwu, et al (4709)            |
| Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress .....           | DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)              |
| Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors .....                                                          | SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)                            |
| Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency .....                                                                             | HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)             |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                 |                                                          |
| The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement .....                                                                                  | CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)                |
| Indicators for evaluating sustainable communities: a review .....                                                                                           | ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)        |
| <b>Discussion</b>                                                                                                                                           |                                                          |
| Differential expression of <i>PAL</i> multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions .....                       | FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)       |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                      |                                                          |
| Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay .....                                                                                                   | WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)                      |
| Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration .....                               | DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)         |
| Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics .....                                            | LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)       |
| Study on sap flow in forest of <i>Quercus liaotungensis</i> and <i>Populus davidiana</i> by using the TDP method .....                                      | SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)            |
| N <sub>2</sub> O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China .....                        | SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)    |

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

| 排序<br>Order | 期刊<br>Journal                           | 总被引频次<br>Total citation | 排序<br>Order | 期刊<br>Journal | 影响因子<br>Impact factor |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-----------------------|
| 1           | 生态学报                                    | 11764                   | 1           | 生态学报          | 1.812                 |
| 2           | 应用生态学报                                  | 9430                    | 2           | 植物生态学报        | 1.771                 |
| 3           | 植物生态学报                                  | 4384                    | 3           | 应用生态学报        | 1.733                 |
| 4           | 西北植物学报                                  | 4177                    | 4           | 生物多样性         | 1.553                 |
| 5           | 生态学杂志                                   | 4048                    | 5           | 生态学杂志         | 1.396                 |
| 6           | 植物生理学通讯                                 | 3362                    | 6           | 西北植物学报        | 0.986                 |
| 7           | JOURNAL OF INTEGRATIVE<br>PLANT BIOLOGY | 3327                    | 7           | 兽类学报          | 0.894                 |
| 8           | MOLECULAR PLANT                         | 1788                    | 8           | CELL RESEARCH | 0.873                 |
| 9           | 水生生物学报                                  | 1773                    | 9           | 植物学报          | 0.841                 |
| 10          | 遗传学报                                    | 1667                    | 10          | 植物研究          | 0.809                 |

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 16 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 16 2011

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                   |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                         | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>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 70.00 元