

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **2013**

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 33 卷 第 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

### 个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N<sub>2</sub>O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

### 种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段  
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

### 景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

### 资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 ..... 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 ..... 张 锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 ..... 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

### 城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例..... 敖长林,陈瑾婷,焦 扬,等 (5109)

### 研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜 春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆 璞,张 伟,华 彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 306 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-08



**封面图说:** 高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4200m,是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地,也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来,国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示,近年来,三江源湖泊湿地面积逐步扩大,植被覆盖度得到提高,三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

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/stxb201205170736

陈凯利, 李建明, 贺会强, 胡晓辉, 姚勇哲, 孙三杰. 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响. 生态学报, 2013, 33(16): 4919-4929.

Chen K L, Li J M, He H Q, Hu X H, Yao Y Z, Sun S J. Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4919-4929.

## 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响

陈凯利, 李建明\*, 贺会强, 胡晓辉, 姚勇哲, 孙三杰

(西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100)

**摘要:**以番茄品种“金棚 1 号”为材料, 采用盆栽方式, 按照蒸腾蒸发量(ET)的 50%、75%、100% 和 125% 作为补充灌溉量研究了不同水分下番茄结果期叶片气体交换特性和光响应特征参数随叶龄的变化。结果表明: 番茄叶片随着叶龄的增加, 净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )逐渐降低, 水分利用效率(WUE)呈先上升后下降趋势; 叶龄为 18 d 和 29 d 的叶片最大净光合速率( $P_{max}$ )随灌溉量的增加均先增加后降低, 分别在 75% ET 和 100% ET 处理达到最大值。叶龄为 38 d 和 47 d 的叶片  $P_{max}$  均以 125% ET 处理最大。表观量子效率( $\alpha$ )随叶龄的增大也先升高后下降, 在叶龄为 38 d 时最大; 番茄叶片的光饱和点(LSP)随叶龄的加大而减小。不同水分处理下不同叶龄叶片的光响应特征参数为: 叶片在叶龄为 18 d 时,  $P_{max}$  为 20.64—26.73  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  为 0.0518—0.0556; 叶龄为 29 d 时,  $P_{max}$  为 11.00—24.24  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  为 0.0522—0.0594; 叶龄为 38 d 时,  $P_{max}$  为 11.77—18.18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  为 0.0619—0.0693; 叶龄为 47 d 时,  $P_{max}$  为 9.09—18.17  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  为 0.0538—0.0606。随叶龄加大, 增加补充灌溉量有利于延缓叶片光合能力的降低。气孔限制是水分影响番茄叶片光合作用的主要因素, 气孔限制与非气孔限制因素是番茄叶片  $P_n$  随叶龄变化的原因。

**关键词:** 番茄; 叶龄; 水分; 光响应特性; 气体交换参数

## Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves

CHEN Kaili, LI Jianming\*, HE Huiqiang, HU Xiaohui, YAO Yongzhe, SUN Sanjie

College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100, China

**Abstract:** Water deficit is one of the major rate-limiting factors for plants growing in arid and semiarid region and directly reduce the plant's photosynthetic rate. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) is one of the most valuable commercial vegetables all over the world and widely cultivated in China whether in open field or in greenhouse. Light-responsive photosynthetic model provides the reference to evaluate and simulate the plant photosynthesis production and the production capacity of the ecological system. The maximum net photosynthetic rate ( $P_{max}$ ) and apparent quantum yield ( $\alpha$ ) derived from light response curve are the vital parameters of light-responsive photosynthetic model, which are the critical physiology-ecology parameters of plant photosynthesis characteristics and vary with the plants species, varieties, growth condition and their metabolic status etc.. The leaf age directly affects the efficiency of plants photosynthesis and the values of light-responsive photosynthetic parameters. Water deficit could accelerate leaf senescence and shorten the leaf lifespan. Even the photosynthetic performance of leaves under different water conditions shows the obvious difference at the same leaf age. Up to now there are a few pieces of works reported on light-responsive photosynthetic characteristic of photosynthesis in different age of tomato leaves under multiple supplementary irrigation level. The objective of this study is to profile light-responsive photosynthetic characteristics in tomato with different leaf age of leaves under different levels of supplementary irrigation amount, which will provide the light-responsive photosynthetic parameters for photosynthetic model under different water

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD12B03-3)

收稿日期: 2012-05-17; 修订日期: 2013-04-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijianming66@163.com

condition and leaf age. In this study, tomato plants potted in greenhouse as material, the gas exchange and light-responsive photosynthetic characteristics parameters of tomato leaves with the change of leaf age under 4 levels of supplemental irrigation amount (50% ET, 75% ET, 100% ET, and 125% ET) were investigated. The results showed that net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $Tr$ ) all gradually reduced, but water use efficiency (WUE) ascended firstly and then descended with the increase of tomato leaf age; When leaf age were 18 d and 29 d, both  $P_{max}$  increased and then decreased with the increase of supplementary irrigation amount, peaking at 75% ET and 100% ET, respectively. When leaves age were 38 d and 47 d, with the rising of supplementary irrigation amount, both  $P_{max}$  ascended, peaking at 125% ET treatment. As for  $\alpha$ , it rose with leaf aging, reaching a peak at the leaf age of 38 d. And for light saturation point (LSP), it decreased with leaf aging. The light-responsive photosynthetic parameters of different leaf age of tomato leaves under different supplementary irrigation amount were as follows. When leaf age was 18 d,  $P_{max}$  was 20.64—26.73  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  was 0.0518—0.0556; when leaf age was 29 d,  $P_{max}$  was 11.00—24.24  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\alpha$  was 0.0522—0.0594; when leaf age was 38 d,  $P_{max}$  was 11.77—18.18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  was 0.0619—0.0693; when leaf age was 47 d,  $P_{max}$  was 9.09—18.17  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  was 0.0538—0.0606. In conclusion, with leaf aging, increasing supplementary irrigation amount could delay the fall of photosynthetic capacity of tomato leaves. Stomatal limiting factor was the main factor of influencing photosynthesis of tomato leaves; Stomatal limiting and non-stomatal limiting factors were the causes of photosynthetic rate varying of tomato leaves according to the leaf age.

**Key Words:** tomato; leaf age; water; light response characteristics; gas exchange parameter

在干旱和半干旱区,水分是作物光合作用的限制性因子<sup>[1]</sup>。水分胁迫后的植物光合速率下降<sup>[2-3]</sup>,水分胁迫下气孔因素和非气孔因素共同引起作物光合效率降低<sup>[4]</sup>。光响应模型是评价和模拟植物光合作用的物质生产以及生态系统生产能力的基础<sup>[5]</sup>,常见的有直角双曲线模型<sup>[6]</sup>、非直角双曲线模型<sup>[7]</sup>、指数模型<sup>[8-9]</sup>以及由这些模型发展起来的新模型<sup>[10]</sup>。由光响应曲线得到的最大光合速率( $P_{max}$ )和表观量子效率( $\alpha$ )是光合模型中两个重要的参数,是描述植物光合作用特征的重要生理生态特征参数,它因植物的种类、品种、生长条件和自身代谢状况的差异而不同<sup>[5]</sup>。

叶龄是叶片生命活动长短的标尺。因此,叶龄直接影响植物的光合作用,其大小影响叶片的光响应特征参数<sup>[11]</sup>。此外,水分不足会加速叶片的衰老,使叶片的生活期缩短。不同水分条件下相同叶龄的叶片光合性能也会呈现出差异性。因此,测定不同叶龄叶片在不同水分状况下的光响应特征参数为建立植物有关叶龄和水分的光合作用模型提供理论参数,也为植物在不同水分条件下光响应特征参数随叶龄变化的趋势提供理论依据。

目前国内番茄光合作用对水分的响应研究大多集中在气体交换参数<sup>[12-18]</sup>和其日变化方面<sup>[13-14,18]</sup>,不同叶龄叶片光合作用的光响应特性对水分的响应鲜有报道。为此,本试验以番茄“金棚1号”为材料,研究不同补充灌溉量条件下塑料大棚番茄光合作用随叶龄的变化,为水分和叶龄有关的光合模型的建立提供理论参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验于2011年3月至6月在陕西省杨凌区西北农林科技大学园艺学院塑料大棚中进行。供试材料为番茄品种“金棚1号”。试验采用盆栽方式进行,定植塑料花盆高48 cm,直径40 cm。定植基质为土壤和牛粪的混合物,定植前先将土壤和牛粪分别过筛,再按体积比1:1配比,混合均匀后装入盆中,每盆16 kg。基质饱和重量含水量为40%。于3月24日番茄幼苗5叶1心时定植,每盆定植1株,共36盆,浇饱和水缓苗后常规栽培管理,于5月8日番茄进入结果期开始水分处理。

试验设置4个灌溉量水分处理梯度,分别为补充灌溉单株日蒸腾蒸发量(ET)的50%,75%,100%,

125%,每处理重复 9 盆(盆下铺有托盘,回收渗漏水分),完全随机设计。植株日蒸腾蒸发量采用称质量法<sup>[19-20]</sup>获取。具体方法为:在处理前一天 8:00,充分灌水使土壤水分达到过饱和状态,24 h 后,称量花盆质量( $W_1$ );再经过 24 h 后再次称量花盆质量( $W_2$ ),计算质量差( $\Delta W = W_1 - W_2$ ),假设所得的差值全部通过植株前一天的蒸腾蒸发散失,求质量差的平均值( $\overline{\Delta W}$ ),即得前一天植株的蒸腾蒸发量( $ET_0$ ),也即水分处理的初始灌溉量( $ET_0$ )。得出  $ET_0$  后按照试验设计计算出各处理应补充的灌溉量,每天灌水 1 次。因天气情况和植株的生长发育,植株蒸腾蒸发量有较大变化,不同水分处理导致基质含水量不同,基质含水量不同的植株蒸腾蒸发量也不同,但均以补充灌溉量为 100%  $ET$  处理组为灌溉基准。此后每天 8:00 用电子秤(最大量程为 30 kg,精度为 0.001 kg)对补充灌溉量为 100% 蒸腾蒸发量的处理组称质量,由前一天浇水后花盆质量减去当日花盆质量,即得前一天的单株日蒸腾蒸发量,根据蒸腾量对各处理作相应灌溉量处理,精确到毫升。其他田间管理按常规栽培管理措施进行。

## 1.2 测定项目

### 1.2.1 基质重量含水量的测定

于 5 月 8 日开始每隔 4 d 在距离土壤顶端 10 cm 的土层取样,置于铝盒中,采用烘干法测定基质重量含水量,其公式为:基质重量含水量=(基质鲜质量-基质干质量)/基质干质量。

### 1.2.2 叶片光合作用光响应曲线的测定

试验分别于 5 月 12 日、5 月 23 日、6 月 1 日、6 月 10 日测定 4 月 24 日标记的初展开叶片,即于水分处理 4 d 后开始连续监测叶龄为 18、29、38、47 d 的叶片光响应曲线。使用 LI-6400XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司),采用 Li-6400-2B 光源,设定气体流速为 500  $\mu\text{mol/s}$ ,控制叶温 25  $^{\circ}\text{C}$ ,设置光合有效辐射强度(PAR,  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )梯度为 2 000,1 700,1 400,1 100,800,500,200,150,100,50,20,0  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。测定前用 1 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的 PAR 对叶片进行光诱导,使叶片活化。采用“Light-curve”程序自动测定,每个光强下稳定 120 s。仪器自动记录每个光强下净光合速率( $P_n$ ,  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率( $Tr$ ,  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、气孔导度( $G_s$ ,  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ ,  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )等光合指标。番茄叶片水分利用效率(WUE,  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )和气孔限制值( $L_s$ )分别通过公式  $WUE = P_n/Tr$  和  $L_s = 1 - C_i/C_a$ <sup>[9]</sup> 得到,其中  $C_a$  为空气  $\text{CO}_2$  浓度( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )。

## 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图。

Peat<sup>[8]</sup>认为利用指数模型描述番茄叶片光合作用对光强的响应较好,因此本试验依据 Bassman 等<sup>[9]</sup>的指数模型拟合光响应曲线方程:

$$P_n = P_{\max} \times (1 - C_0 \times e^{-\frac{\alpha \times \text{PAR}}{P_{\max}}}) \quad (1)$$

式中, $P_{\max}$  为最大光合速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $\alpha$  为表观量子效率, $C_0$  为一度量弱光下净光合速率趋近于 0 的指标。

按下式计算光补偿点(LCP):

$$\text{LCP} = P_{\max} \times \ln(C_0) / \alpha \quad (2)$$

假定  $P_n$ (净光合速率)达到  $P_{\max}$  的 99% 时,PAR 为光饱和点(LSP),则有:

$$\text{LSP} = P_{\max} \times \ln(100C_0) / \alpha \quad (3)$$

运用 DPS 分析软件(Marquardt 算法)拟合光响应曲线得到番茄叶片的  $P_{\max}$ 、 $\alpha$ 、LCP、LSP 等光响应特征参数。

## 2 结果分析

### 2.1 补充灌溉量对基质重量含水量的影响

补充灌溉量的多少直接影响基质重量含水量的高低,基质重量含水量随补充灌溉量的增加而增加(图 1)。随着水分处理时间的延长,各处理基质重量含水量都先快速下降,然后在一定的范围内波动;不同补充

灌溉量下各处理基质水分含量的差异较为明显;其中 125% ET 处理在处理后期基质重量含水量升高,并使基质水分处于过饱和状态。

### 2.2 番茄不同叶龄叶片气体交换参数对水分和光照的响应

#### 2.2.1 水分对番茄不同叶龄叶片净光合速率的影响

不同补充灌溉量条件下,番茄结果期不同叶龄叶片  $P_n$  随着 PAR 的增大的变化趋势一致,且随 PAR 的增强发生明显改变(图 2)。总体来说,不同水分处理不同叶龄叶片  $P_n$  均在 PAR 增强初始阶段( $PAR < 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $P_n$  呈线性增大;在  $PAR < 800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 时,  $P_n$  随 PAR 的升高而迅速增大;当 PAR 继续增强时,  $P_n$  增大速度减缓或下降。在叶龄为 18 d 时,在不同 PAR 条件下,  $P_n$  总是 75% ET > 100% ET > 125% ET > 50% ET, 100% ET 和 125% ET 处理  $P_n$  一直较为接近,而当  $PAR > 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 50% ET 处理与其他处理差异比较明显。与叶龄为 18 d 的叶片  $P_n$  相比,番茄片叶龄为 29 d 时,各水分处理  $P_n$  降低。在不同 PAR 条件下,  $P_n$  总是 100% ET > 125% ET > 75% ET > 50% ET, 当  $PAR > 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,各水分处理下的  $P_n$  的差异显著, 50% ET 处理在高光强 ( $PAR > 1400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 下  $P_n$  出现下降的趋势。当叶龄增至 38 d 时,番茄叶片  $P_n$  进一步降低。当叶龄为 38 d 时,当  $PAR < 1100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $P_n$  总是 125% ET > 100% ET > 75% ET > 50% ET, 当  $PAR > 1100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 75% ET 处理出现光抑制现象,且下降速率比 50% ET 处理快。但一直以 125% ET 处理  $P_n$  最高。当叶龄增至 47 d 时,各水分处理  $P_n$  再次减小。在不同 PAR 条件下,  $P_n$  总是 125% ET > 100% ET > 75% ET > 50% ET。由此可知,随着番茄叶片叶龄的增加,  $P_n$  出现最大值的灌溉量不同。当叶龄增大时,需要较大的灌溉量来获得较高的  $P_n$ 。

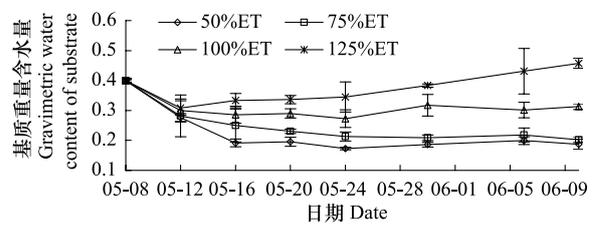


图 1 不同补充灌溉量对基质重量含水量的影响

Fig. 1 Effects of different supplementary irrigation amount on gravimetric water content of substrate

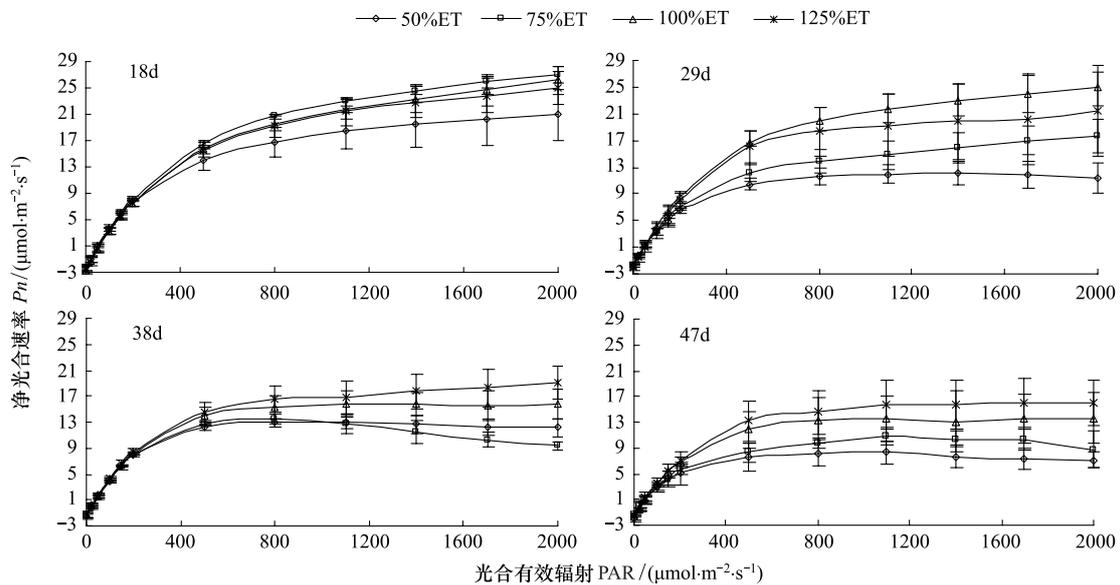


图 2 水分对番茄不同叶龄叶片净光合速率光响应过程的影响

Fig. 2 Effect of water on light response of net photosynthetic rate for different leaf age tomato leaves

#### 2.2.2 水分对番茄不同叶龄叶片气孔导度的影响

不同水分条件下不同叶龄番茄叶片的  $G_s$  均在  $PAR < 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时呈直线上升,随后缓慢升高(图 3)。不同叶龄叶片在 4 个水分处理下  $G_s$  随 PAR 变化的趋势与  $P_n$  相似,这是因为气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,  $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$  都是通过气孔扩散,其闭合程度直接影响  $P_n$  和  $Tr$ ,间接影响 WUE。

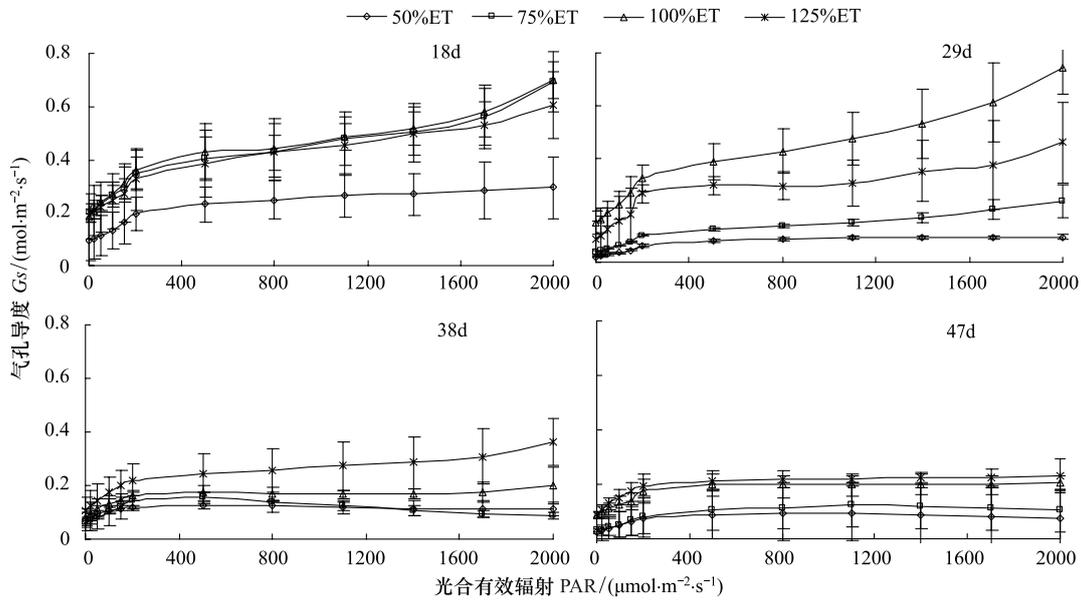


图 3 水分对番茄不同叶龄叶片气孔导度光响应过程的影响

Fig. 3 Effect of water on light response of stomatal conductance for different leaf age tomato leaves

2.2.3 水分对番茄不同叶龄叶片蒸腾速率的影响

图 4 表明不同叶龄番茄叶片的 4 个水分处理的  $T_r$  随 PAR 的升高变化的趋势与  $P_n$  和  $G_s$  随 PAR 的变化极为相似。番茄叶片叶龄为 18 d 时,50% ET 处理叶片的  $T_r$  明显低于其他 3 个处理;当叶片叶龄为 29 d 时,各水分处理下  $T_r$  降低。不同 PAR 下,不同水分处理的  $T_r$  差异明显,总是 100% ET>125% ET>75% ET>50% ET。当叶片叶龄增至 38 d 时, $T_r$  再次降低。番茄叶片叶龄达到 47 d 时, $T_r$  降至最低。

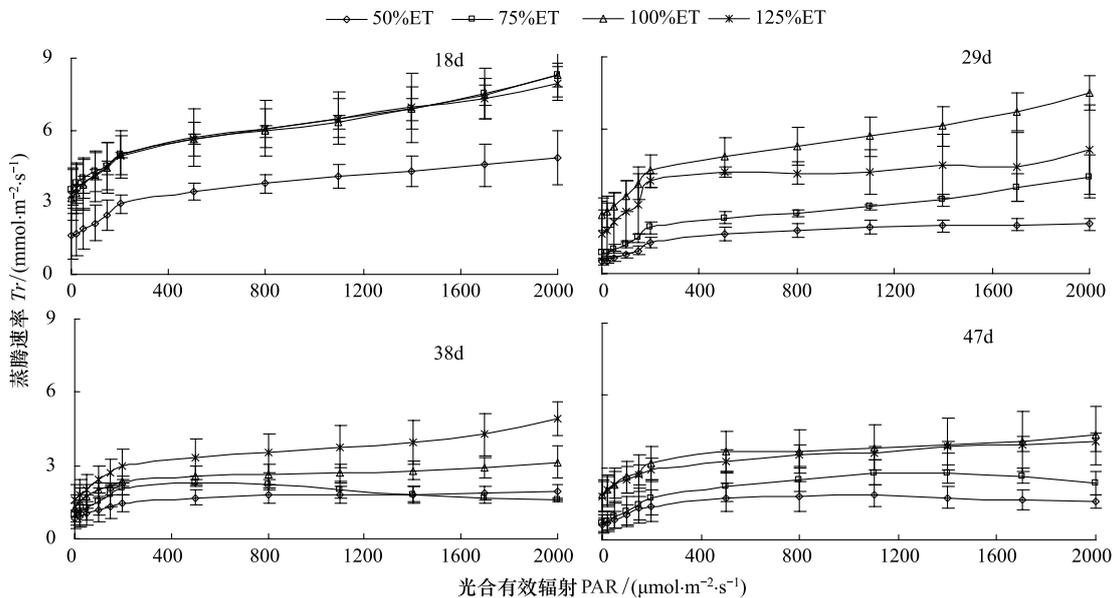


图 4 水分对番茄不同叶龄叶片蒸腾速率光响应过程的影响

Fig. 4 Effect of water on light response of transpiration rate for different leaf age tomato leaves

2.2.4 水分对番茄不同叶龄叶片水分利用效率的影响

由图 5 可知,不同叶龄番茄叶片的 WUE 在  $PAR < 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,4 个水分处理下 WUE 均随 PAR 的增强而急剧上升;当  $PAR > 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,WUE 随 PAR 的增强逐渐减小。50% ET 处理 WUE 较其他 3 个

处理高,且其他3个水分处理间的WUE相近;当番茄叶片叶龄增加到29 d时,各水分处理WUE均提高;当叶龄达到38 d时,除125% ET处理WUE不再增加,其他3个处理WUE均继续增加。最后当叶龄为47 d时,各水分处理WUE下降,且相差不大。总之,除125% ET处理WUE随叶龄的变化不大,其他3个处理WUE均随叶龄的增大而呈先增加后降低的趋势。

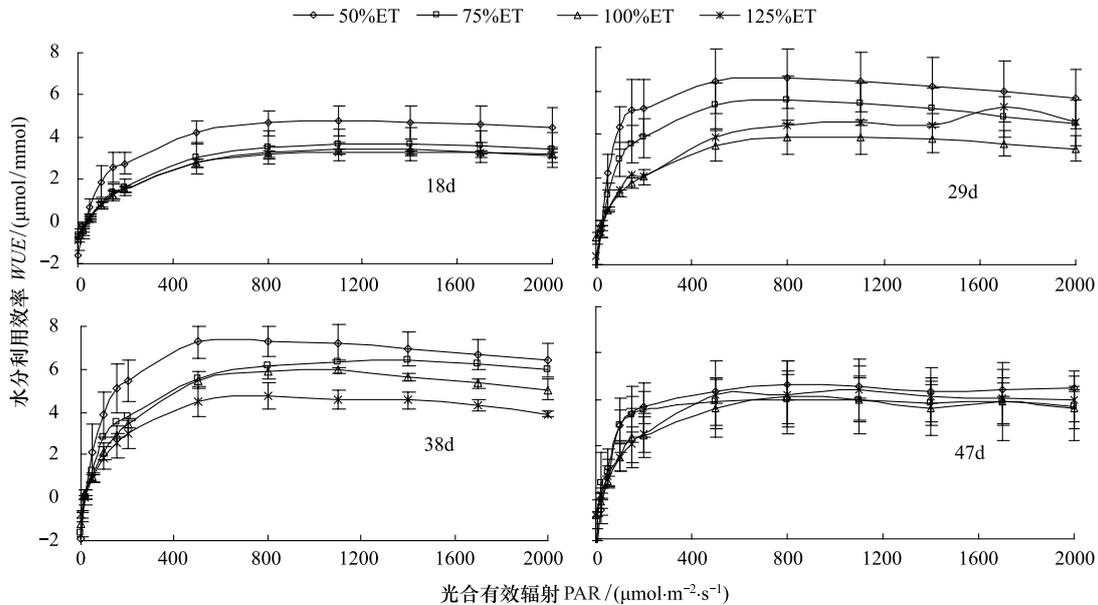


图5 水分对番茄不同叶龄叶片水分利用效率光响应过程的影响

Fig. 5 Effect of water on light response of water use efficiency for different leaf age tomato leaves

### 2.2.5 水分对番茄不同叶龄叶片胞间 $\text{CO}_2$ 浓度的影响

由图6可以看出,不同叶龄叶片在50% ET处理下  $C_i$  总小于其他处理。番茄叶片叶龄为18 d时,50% ET处理  $C_i$  较其他3个处理低,且其他3个水分处理间的  $C_i$  相近;当番茄叶片叶龄增加到29 d时,100% ET和125% ET处理  $C_i$  变化不大,50% ET和75% ET处理  $C_i$  均减小,且各水分处理间差异明显;当叶龄达到38 d时,50% ET、75% ET和125% ET处理  $C_i$  又轻微上升。当叶龄从38 d增加到47 d时,各水分处理  $C_i$  变化不大。总体来说,番茄叶片  $C_i$  在叶龄从18 d到47 d的过程中,50% E和75% ET处理  $C_i$  先降低后升高,其他2个处理变化不明显。

### 2.2.6 水分对番茄不同叶龄叶片气孔限制值的影响

各水分处理  $L_s$  随 PAR 的变化趋势与 WUE 随 PAR 的变化趋势相似(图7)。在  $\text{PAR} < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理  $L_s$  呈直线上升,其中50% ET处理,  $L_s$  增幅最大;PAR在200—500  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各水分处理  $L_s$  缓慢增大;当  $\text{PAR} > 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各水分处理  $L_s$  趋于平缓,不再增大。不同叶龄叶片的  $L_s$  均以50% ET处理的最高。总之,50% ET和75% ET处理  $L_s$  随叶龄增大先升高后降低,在叶龄为29 d时均最大;100% ET和125% ET处理  $L_s$  随叶龄增大,  $L_s$  略有升高。在叶龄为47 d时,各水分处理  $L_s$  相差不大。

### 2.3 水分对番茄不同叶龄叶片光响应特征参数的影响

最大光合速率( $P_{\max}$ )、表观量子效率( $\alpha$ )、暗呼吸速率( $R_d$ )、光补偿点(LCP)以及光饱和点(LSP)是由光响应曲线所适合的光合模型计算得到。水分和叶龄对结果期番茄叶片的光响应特征参数有明显影响(表1)。 $P_{\max}$  是度量叶片光合能力的指标。本研究中,  $P_{\max}$  随叶龄的增大而降低。当叶片叶龄为18 d时,  $P_{\max}$  随灌溉量的增加先升高而降低,以75% ET处理最高(26.73  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),50% ET处理最低(20.64  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),与75% ET处理差异显著;随着叶龄增加,番茄叶片在叶龄为29 d时随灌溉量的增加先增大而减小,  $P_{\max}$  最高值(24.24  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在100% ET处理,与75% ET(16.31  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和50% ET(11.00  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )达

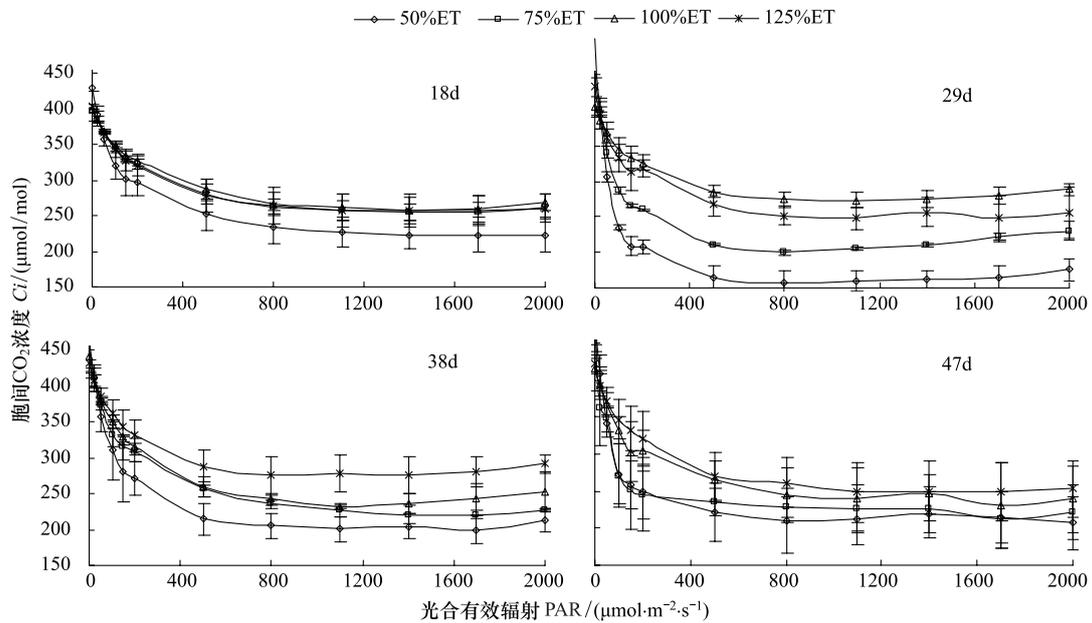


图 6 水分对番茄不同叶龄叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度光响应过程的影响

Fig. 6 Effect of water on light response of intercellular  $\text{CO}_2$  concentration for different leaf age tomato leaves

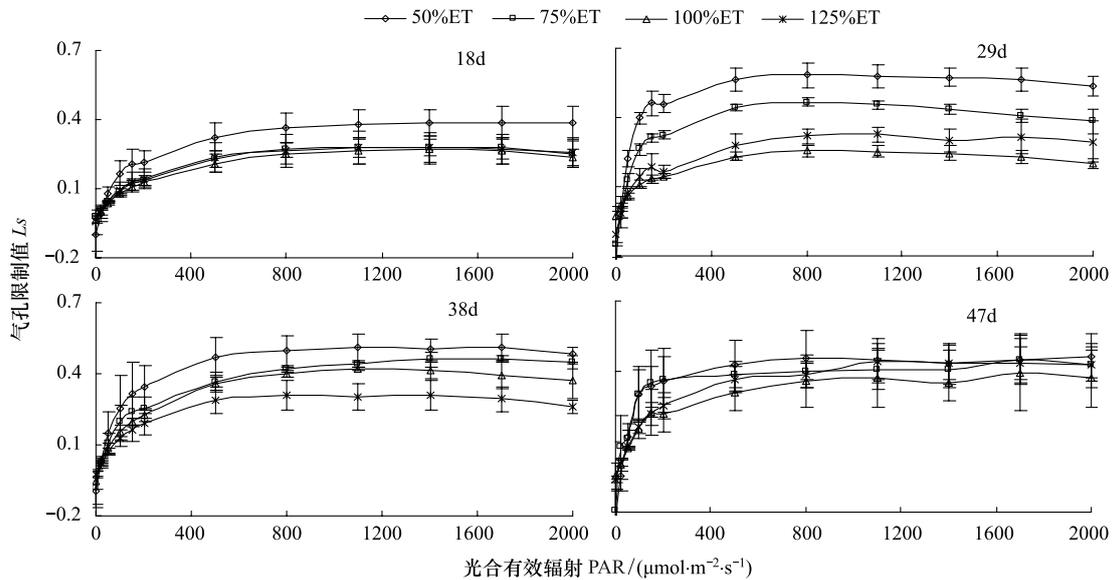


图 7 水分对番茄不同叶龄叶片气孔限制值光响应过程的影响

Fig. 7 Effect of water on light response of stomatal limitation value for different leaf age tomato leaves

到显著性差异。当番茄叶片叶龄进一步增加到 38 d, 除 50% ET 处理  $P_{\max}$  出现轻微的增加外, 其他处理的均进一步减小。此时, 番茄叶片的  $P_{\max}$  以 125% ET 处理达到最大值 ( $18.18 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。当番茄叶片叶龄为 47 d 时, 各水分处理  $P_{\max}$  继续减小, 但随灌溉量增加而增加, 以 125% ET 处理为最大值 ( $18.17 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。随着叶龄的增加, 50% ET 和 75% ET 处理的  $P_{\max}$  在叶龄增大初期 (18—29 d) 过程中下降较快, 各处理在后期 (38—47 d) 下降均比较缓慢。

$\alpha$  是反映了作物在弱光下对光照的利用效率。从表 1 可以看出, 水分对不同叶龄番茄叶片的  $\alpha$  影响不明显。50% ET 和 75% ET 处理  $\alpha$  在叶龄从 18 d 到 29 d 的过程中呈现出降低的趋势, 在以后叶龄增加的过程中  $\alpha$  先在叶片叶龄为 38 d 时达到最大值, 然后降低。100% ET 和 125% ET 处理随叶龄的增加总体表现为先增

加后降低的趋势,并且也在叶片叶龄为 38 d 时达到最大值。水分和叶龄对  $R_d$  和 LCP 影响无规律。LSP 随水分和叶龄的变化与  $P_{max}$  随之的变化极为相似,这可能是 LSP 与  $P_{max}$  有密切关系。番茄叶片的 LSP 随叶龄的增大而降低。当叶片叶龄为 18 d 和 29 d 时,LSP 随灌溉量的增加先升高后降低,均在 100% ET 时最大(分别为  $2317.12 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $1957.53 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),当叶龄为 38 d 和 47 d 时,LSP 随灌溉量的增加而增加,并都在 125% ET 处理达到最高值(分别为  $1375.39 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $1333.56 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。随着叶龄的增加,各水分处理的 LSP 在叶龄为 18—38 d 期间下降较快,在 38—47 d 期间变化较小。

表 1 水分对番茄不同叶龄叶片光响应特征参数的影响

Table 1 Effect of water on light responsive photosynthetic parameters in different age of tomato leaves

叶龄/d Leaf age	处理 Treatment	最大净光合速率 $P_{max}$ /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	表观量子效率 $\alpha$ /( $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	暗呼吸速率 $R_d$ /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	光补偿点 LCP /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	光饱和点 LSP /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
18	50% ET	20.64±2.86 b	0.0556±0.0043 a	-2.08±0.47 a	30.41±9.35 a	1744.84±263.79 b
	75% ET	26.73±1.26 a	0.0544±0.0020 a	-2.39±0.28 a	34.68±4.74 a	2295.51±169.78 a
	100% ET	25.59±2.66 a	0.0518±0.0010 a	-2.64±0.64 a	39.66±11.40 a	2317.12±271.59 a
	125% ET	24.50±2.80 ab	0.0526±0.0025 a	-2.52±0.47 a	38.39±9.98 a	2182.57±207.12 a
29	50% ET	11.00±1.18 c	0.0535±0.0016 b	-1.63±0.22 a	29.95±0.44 a	975.36±74.27 b
	75% ET	16.31±3.15 bc	0.0522±0.0002 b	-1.82±0.24 a	29.54±8.84 a	1469.52±263.60 ab
	100% ET	24.24±2.87 a	0.0579±0.0052 ab	-1.80±0.27 a	25.52±3.00 a	1957.53±218.23 a
	125% ET	20.91±6.27 ab	0.0594±0.0018 a	-1.92±0.66 a	30.75±14.40 a	1646.19±454.92 a
38	50% ET	12.64±0.77 bc	0.0654±0.0051 a	-1.35±0.25 a	21.29±1.99 a	915.28±96.63 b
	75% ET	11.77±1.29 c	0.0693±0.0004 a	-1.41±0.45 a	23.17±3.03 a	957.46±90.89 b
	100% ET	15.89±1.97 ab	0.0644±0.0049 a	-1.34±0.28 a	20.75±3.60 a	1162.84±173.85 ab
	125% ET	18.18±2.86 a	0.0619±0.0023 a	-1.23±0.44 a	19.44±3.66 a	1375.39±245.51 a
47 d	50% ET	9.09±1.80 c	0.0606±0.0117 a	-1.91±0.55 a	28.02±2.52 a	718.71±5.80 c
	75% ET	9.97±1.72 bc	0.0538±0.0005 b	-1.43±0.34 a	26.82±4.66 a	881.33±101.58 bc
	100% ET	13.65±4.12 b	0.0583±0.0046 ab	-1.31±0.22 a	28.03±3.04 a	1114.96±151.14 ab
	125% ET	18.17±0.59 a	0.0597±0.0016 a	-1.66±0.40 a	21.71±0.13 b	1333.56±157.24 a

同一叶龄同列数据后标不同小写字母者表示差异显著( $P<0.05$ )

### 3 结论与讨论

水是植物进行光合作用所必不可少的,除了水是进行光合作用的原料外,水分在维持叶片水势、调节气孔等方面起着更重要的作用。许多关于番茄的研究<sup>[12-18]</sup>表明,水分直接影响番茄在光合作用过程中的气体交换参数。土壤水分降低使番茄的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 、 $C_i$  降低,WUE 增加。本研究中,番茄叶片  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 、 $C_i$  随灌溉量的降低而降低,WUE 却提高,与前人研究一致<sup>[12-18]</sup>。根据 Farqhar 和 Sharkey<sup>[21]</sup>的理论,只有当  $C_i$  降低和  $L_s$  增大时, $P_n$  的降低主要是由气孔导度的降低引起,限制因素为气孔因素。反之,如果  $P_n$  的下降伴随着  $C_i$  的提高,光合作用的主要限制因素则是非气孔因素<sup>[1]</sup>。本研究中,随着灌溉量的减少,番茄叶片的  $C_i$  均降低,并伴随着  $L_s$  的升高,这表明番茄叶片在低灌溉量下  $P_n$  降低主要是由气孔限制因素引起的。水分胁迫使叶片气孔关闭, $G_s$  降低导致进入叶片内的  $\text{CO}_2$  浓度减少,光合作用的供应功能降低( $C_i$  减少),光合作用的底物变少使植株净光合速率降低<sup>[22]</sup>。

有研究表明  $G_s$  是引起  $P_n$  随叶龄变化的一个因子, $P_n$  和  $G_s$  随叶龄增大同步下降<sup>[23-24]</sup>。Kitajima 等<sup>[25]</sup>认为  $P_n$  与叶龄呈负相关关系。Field 和 Mooney<sup>[26]</sup>以及霍宏和王传宽<sup>[27]</sup>认为光合能力和  $G_s$  随着叶龄的增加而下降,WUE 不受叶龄变化的影响。本研究中,番茄叶片  $P_n$  和  $G_s$  随着叶龄的增大而同步减小,与前人研究一致。除 125% ET 处理 WUE 随叶龄的变化不大,其他 3 个处理 WUE 均随叶龄的增大而呈现增加后降低的趋势。

Peri 等<sup>[28]</sup>认为  $P_n$  和  $G_s$  先迅速升高并在叶片完全展开后达到最大值,然后随着叶片的衰老而逐渐降低。

艾希珍等<sup>[29]</sup>和王玲平等<sup>[30]</sup>也认为叶片叶龄较小时,气孔与非气孔因素同时影响叶片的  $P_n$ ;而叶片衰老时,叶肉因素即非气孔限制因素影响更多。本研究中,50% ET 和 75% ET 处理下,叶片在叶龄从 18 d 到 29 d 的过程中, $C_i$  降低, $L_s$  升高;说明此阶段气孔限制因素引起  $P_n$  下降;当叶龄为 29—47 d, $C_i$  逐渐增大, $L_s$  降低;说明此过程中非气孔限制因素引起  $P_n$  的下降;这表明在 50% ET 和 75% ET 处理下,气孔限制与非气孔限制因素是番茄叶片  $P_n$  随叶龄变化的原因。100% ET 和 125% ET 处理  $C_i$  随叶龄变化不大, $L_s$  略有升高,引起番茄叶片  $P_n$  随叶龄变化的原因还有待进一步研究。

$P_{max}$ 、 $\alpha$ 、 $R_d$  和 LSP 及 LCP 是表征植物光合作用的重要特征参数。大量研究表明植物光响应特征参数对水分的响应有明显的阈值,过高或过低的土壤水分都会使  $P_{max}$  和  $\alpha$  及 LSP 减小<sup>[31-38]</sup>。本研究中,番茄不同叶龄叶片  $P_{max}$  最适的补充灌溉量不同,且对水分的响应有明显的阈值。叶龄为 18 d 的番茄叶片  $P_{max}$  在 75% ET 处理下最高,叶龄为 29 d 的番茄叶片  $P_{max}$  在 100% ET 处理下最高,叶龄为 38 d 和 47 d 的番茄叶片  $P_{max}$  在 125% ET 处理下最高;在叶龄为 18 d 时  $P_{max}$  为 20.64—26.73  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;叶龄为 29 d 时, $P_{max}$  为 11.00—24.24  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;叶龄为 38 d 时, $P_{max}$  为 11.77—18.18  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;叶龄为 47 d 时, $P_{max}$  为 9.09—18.17  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本研究表明,叶龄的增大会降低番茄叶片的  $P_{max}$ ,这与 Peat<sup>[8]</sup> 在番茄、霍宏和王传宽<sup>[28]</sup> 在红松、张小全和徐德应<sup>[39]</sup> 在杉木上的研究一致。另一方面,水分胁迫会加速番茄叶片  $P_{max}$  的降低。因此,随着叶片叶龄的增大,较高补充灌溉量有利于番茄叶片光合作用的进行。

Field 和 Mooney<sup>[26]</sup> 认为  $\alpha$  并不因叶龄的变大而受到影响。艾希珍等<sup>[29]</sup> 认为黄瓜叶片、王玲平等<sup>[30]</sup> 认为萝卜叶片的  $\alpha$  均随叶龄的增大先升高后降低,最大值分别出现在叶片伸出后的 20—40 d 和 25 d。本研究中, $\alpha$  随叶龄的增加先升高后降低,各水分处理下均在叶龄为 38 d 时达到最大值。不同水分处理下番茄叶片叶龄为 18 d 时  $\alpha$  为 0.0518—0.0556;叶龄为 29 d 时, $\alpha$  为 0.0522—0.0594;叶龄为 38 d 时, $\alpha$  为 0.0619—0.0693;叶龄为 47 d 时; $\alpha$  为 0.0538—0.0606。

植物 LSP 较高表明对强光的利用率也较高。本研究中不同叶龄番茄叶片在 125% ET 处理下 LSP 较高,而在较低的灌溉量(50% ET)条件下,LSP 总是表现为最低。不同水分处理下番茄叶片的 LSP 随叶龄的加大而减小。

总之,不同叶龄叶片进行光合作用时所需的适宜的基质含水量不同。叶龄较小, $P_n$  在基质含水量较低时,就可达到极大值;当叶龄逐渐增大,要获得较大的  $P_n$  就必须提高基质含水量。本研究中,进一步提高补充灌溉量是否可以提高番茄植株的光合能力还有待进一步研究。

## References:

- [ 1 ] Xu D Q. Photosynthesis Efficiency. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.
- [ 2 ] Wei A L, Wang Z M, Zhai Z M, Gong Y S. Effect of soil drought on C4 photosynthesis enzyme activities of flag leaf and ear in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 508-512.
- [ 3 ] Jeyaramraja P R, Meenakshi S N, Joshi S D. Water deficit induced oxidative damage in tea (*Camellia sinensis*) plants. *Plant Physiol*, 2005, 162: 413-419.
- [ 4 ] Winter K, Schramm M J. Analysis of stomatal and non-stomatal components in the environmental control of CO<sub>2</sub> exchanges in leaves of *Welwitschia mirabilis*. *Plant Physiol*, 1986, 82(1): 173-178.
- [ 5 ] Yu G R, Wang Q F. Eco-physiology of plant photosynthesis, transpiration, and water use. Beijing: Science and Technology Press, 2010: 190, 191.
- [ 6 ] Johnson and Thornley. I R Johnson, J H M Thornley. Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. *Plant, Cell and Environment*, 1983, 6: 721-729.
- [ 7 ] Herrick J D, Thomas R B. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the photosynthetic light response of sun and shade leaves of canopy sweetgum trees (*Liquidambar styraciflua*) in a forest ecosystem. *Tree physiology*, 1999, 19: 779-786.
- [ 8 ] Peat W E. Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato. *Annals of Botany*, 1970, 34: 319-328.
- [ 9 ] Bassman J B, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa*×*Populus deltoides* clone.

- Tree Physiology, 1991, 8: 145-149.
- [10] Ye Z P. A new model of light-response of photosynthesis and its application. Journal of Biomathematics, 2008, 23(4): 710-716.
- [11] Shi W M, Chen Q Y, Qiao X J. Preliminary study on the model for the photosynthesis rate of cucumber leaves at different ages and determination of parameters in sunlight greenhouse. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 113-118.
- [12] Guo Y B, Feng H, Wu P T. Effects of water stress on physiological characteristic and water production efficiency of tomato. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 52-55.
- [13] Zou T S. The study of photosynthetic and transpiration daily variation of tomato leaf under different soil moisture condition. China Vegetable, 1989, 1(6): 8-9, 15.
- [14] Chen J P, Liu Z G, Duan A W, Meng Z J, Zhang J Y. Effects of soil moisture on physiological characteristics and the dynamic state of factors causing photosynthesis decline in potted tomato leaves in greenhouse, Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(9): 1589-1593.
- [15] Wang L, Ren S M, Bi Y G, Liu H L, Wu W Y. Effects of soil water and organic manure to the photosynthesis and chlorophyll of tomato in the greenhouse. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 66-68, 80.
- [16] Wang X W, Fu Q S, Wang Y J, Zhang J H, Lu H, Guo Y D. Effects of water stress on growth and photosynthetic system characters of *Lycopersicon esculentum* L. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(1): 7-13.
- [17] Jiang F C, Shi L, Li Y X, Liu M Y. Effects of water and Zinc on leaf potential, photosynthetic characteristics and transpiration efficiency of tomato. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 125-127.
- [18] Gao F S, Xu K, Wang L, Su H, Xu Y G. Effects of soil water content on H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> exchange in tomato leaves in different seasons. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 371-375.
- [19] Li J M, Wang P, Li J. Effect of irrigation amount on physiology, biochemistry and fruit quality of greenhouse tomato under sub-low temperatures. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 129-134.
- [20] Mills T M., Li J M, Hossein M H. Physiological response of gold kiwifruit (*Actinidia chinensis*) to reduced irrigation. Journal of America Soc Hort Sci, 2009, 134(6): 667-683.
- [21] Bassman J B, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *Populus deltoides* clone. Tree Physiology, 1991, 8: 145-149.
- [22] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-345.
- [23] Lambers H, Chapin F S, Pons T L // Plant physiological ecology. Zhang G P, Zhou W J, trans. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 29.
- [24] Lin Z F, Ehleringer J. Effects of leaf age on photosynthesis and water use efficiency of papaya. Photosynthetica, 1982, 16: 514-519.
- [25] Xie S and Luo X. Effect of leaf position and age on anatomical structure, photosynthesis, stomatal conductance and transpiration of Asian pear. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2003, 44: 297-303.
- [26] Kitajima K, Mulkey S S, Samaniego M, Wright S J. Decline of photosynthetic capacity with leaf age and position in two tropical pioneer tree species. American Journal of Botany. 2002, 89(12): 1925-1932.
- [27] Field C B, Mooney H A. Leaf age and seasonal effects on light, water and nutrient use efficiency in a California shrub, Oecologia, 1983, 56: 348-355.
- [28] Huo H, Wang C K. Effects of canopy position and leaf age on photosynthesis and transpiration of *Pinus koraiensis*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1181-1186.
- [29] Peri P L, Arena M, Pastur M G, Lencinas M V. Photosynthetic response to different light intensities, water status and leaf age of two *Berberis* species (*Berberidaceae*) of Patagonian steppe, Argentina. Journal of Arid Environments, 2011, 75: 1218-1222.
- [30] Ai X Z, Ma X Z, Yu M, Xing Y X. Changes of photosynthetic characteristics of cucumber leaves during unfolding in solar-greenhouse. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(3): 558-564.
- [31] Wang L P, Mao W H, Hu T H, Bao C L, Dai D L. The Changes of photosynthetic properties in radish leaves during leaf senescence. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(S1): 36-39.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Zhang S Y, Zhou F Z, Xia J B, Zhang G C. The responses of *euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 7(12): 2514-2521.
- [35] 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.

- [36] Zhu Y Y, He K N, Tang D F, Gong Y X. Response to light of *Ulmus pumila* in different soil moisture. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(2): 92-94.
- [37] Zhu Y B, Bo L D, Han M M,. Light response of maize leaves physiology parameters under different soil moisture conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(S1): 168-170.
- [38] Han R F, Li J M, Bai R F, Da H G. Effect of water on characteristics of light response of muskmelon leaves. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(7): 123-128.
- [39] Li Y X, Shen S H, Li L, Wang X M, Zhang F C, Han X M. Effects of soil moisture on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of winter wheat during its late growth stage. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 21(1): 76-82.
- [40] Zhang X Q, Xu D Y. Light responses of 18-year-old China fir shoots in relation to shoot ages and positions within crown. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 409-414.

#### 参考文献:

- [1] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002, 43, 84-95.
- [2] 魏爱丽, 王志敏, 翟志席, 翟志席, 龚元石. 土壤干旱对小麦旗叶和穗器官 C4 光合酶活性的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(5): 508-512.
- [5] 于贵瑞, 王秋凤等. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科技出版社, 2010: 190, 191.
- [9] 叶子飘. 光合作用对光响应新模型及其应用. *生物数学学报*, 2008, 23(4): 710-716.
- [11] 史为民, 陈青云, 乔晓军. 日光温室黄瓜叶片光合速率模型及其参数确定的初步研究. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 113-118.
- [12] 郭艳波, 冯浩, 吴普特. 水分亏缺对番茄生理特性及水分生产效率的影响. *灌溉排水学报*, 2008, 27(3): 52-55.
- [13] 邹冬生. 不同土壤水分条件下番茄叶片光合及蒸腾日变化研究. *中国蔬菜*, 1989, 1(6): 8-9, 15.
- [14] 陈金平, 刘祖贵, 段爱旺, 孟兆江, 张寄阳. 土壤水分对温室盆栽番茄叶片生理特性的影响及光合下降因子动态. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1589-1593.
- [15] 王磊, 任树梅, 毕勇刚, 刘洪禄, 吴文勇. 土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究. *灌溉排水学报*, 2004, 23(2): 66-68, 80.
- [16] 王学文, 付秋实, 王玉珏, 张京红, 路河, 郭仰东. 水分胁迫对番茄生长及光合系统结构性能的影响. *中国农业大学学报*, 2010, 15(1): 7-13.
- [17] 姜凤超, 石磊, 李玉欣, 刘孟雨. 水分和锌对番茄叶水势、光合特性及蒸腾效率的影响. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 125-127.
- [18] 高方胜, 徐坤, 王磊, 苏华, 徐立功. 土壤水分对不同季节番茄叶片水和二氧化碳交换特性的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 371-375.
- [19] 李建明, 王平, 李江. 灌溉量对亚低温下温室番茄生理生化与品质的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 129-134.
- [23] Lambers H, Chapin F S, Pons T L. 植物生理生态学//张国平, 周伟军, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 29.
- [28] 霍宏, 王传宽. 冠层部位和叶龄对红松光合蒸腾特性的影响. *应用生态学报*. 2007, 18(6): 1181-1186.
- [30] 艾希珍, 马兴庄, 于立明, 邢禹贤. 日光温室黄瓜叶片展开过程中光合特性的变化. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 558-564.
- [31] 王玲平, 毛伟海, 胡天华, 包崇来, 戴丹丽. 萝卜叶片衰老过程中光合性能变化研究. *华北农学报*, 22(增刊): 36-39.
- [32] 陈建, 张光灿, 张淑勇, 王梦军. 辽东椴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.
- [33] 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.
- [34] 张淑勇, 周泽福, 夏江宝, 张光灿. 不同土壤水分条件下小叶扶芳藤叶片光合作用对光的响应. *西北植物学报*. 2007, 7(12): 2514-2521.
- [35] 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.
- [36] 朱艳艳, 贺康宁, 唐道锋, 巩玉霞. 不同土壤水分条件下白榆的光响应研究. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 92-94.
- [37] 朱永波, 张仁和, 卜令铎, 韩苗苗, 薛吉全. 不同土壤水分条件下玉米叶片生理参数的光响应. *干旱地区农业研究(增刊)*, 2007, 25: 168-170.
- [38] 韩瑞锋, 李建明, 白润峰, 达会广, 赵艳艳. 水分对甜瓜叶片光响应特性的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(7): 123-128.
- [39] 李永秀, 申双和, 李丽, 汪秀敏, 张富存, 韩小梅. 土壤水分对冬小麦生育后期叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响. *生态学杂志*, 2012, 21(1): 76-82.
- [40] 张小全, 徐德应. 18年生杉木不同部位和叶龄针叶光响应研究. *生态学报*, 2001, 21(3): 409-414.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013( Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Advances in theoretical issues of species distribution models ..... LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguo, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem ..... JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals ..... WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

**Autecology & Fundamentals**

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China .....  
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves .....  
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China ..... DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers .....  
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F<sub>1</sub> progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and  
crossostephium ..... XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region .....  
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanjin, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves ..... CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi .....  
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N<sub>2</sub>O fluxes in Chinese chestnut stands .....  
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil .....  
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

**Population, Community and Ecosystem**

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China ..... MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal  
Landsat TM images; a case study of the Yingxiu-Wenchuan section ..... XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire  
disturbance ..... NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics .....  
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake .....  
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap .....  
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall .....  
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China .....  
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Exploring the space syntax under negative planning; a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge  
species ..... YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China .....  
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ..... ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ..... ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ..... ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ..... ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland ..... AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province ..... JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period ..... JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

# 《生态学报》2013 年征订启事

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

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

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

本期责任副主编 王克林 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

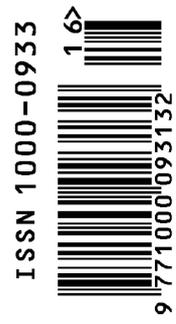
第33卷 第16期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 2013)

<b>编辑</b>	《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	<b>Edited by</b>	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
<b>主编</b>	王如松	<b>Editor-in-chief</b>	WANG Rusong
<b>主管</b>	中国科学技术协会	<b>Supervised by</b>	China Association for Science and Technology
<b>主办</b>	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085	<b>Sponsored by</b>	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
<b>出版</b>	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	<b>Published by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
<b>印刷</b>	北京北林印刷厂	<b>Printed by</b>	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
<b>发行</b>	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@espg.net	<b>Distributed by</b>	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
<b>订购</b>	全国各地邮局	<b>Domestic</b>	All Local Post Offices in China
<b>国外发行</b>	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044	<b>Foreign</b>	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
<b>广告经营</b>	京海工商广字第8013号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元