

# 干旱胁迫对竹柳光合特性的影响

宋学贵<sup>1</sup>, 王彬<sup>2</sup>, 周光良<sup>2</sup>, 胡红玲<sup>2</sup>

(1. 眉山市林业局, 四川 眉山 620010; 2. 四川农业大学林学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:**采用盆栽控水的方法,设置5个处理对竹柳幼树进行干旱胁迫实验(分别为浇水到土壤田间持水量的80%后,依次停水16 d、12 d、8 d、4 d和0 d),分析了竹柳在不同干旱胁迫处理下的光合指标,并探讨了胁迫结束后复水对竹柳光合指标的影响。结果表明:(1)随干旱胁迫强度的增大,竹柳的净光合速率( $P_n$ )显著降低( $P < 0.05$ ),气孔导度( $G_s$ )和蒸腾速率( $Tr$ )总体上呈下降趋势,胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )先降低后升高;(2)对胁迫后的竹柳恢复浇水,竹柳的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )显著增加;(3)竹柳通过叶片变黄、萎蔫卷曲、干枯脱落,顶芽萎蔫下垂的避旱策略来应对干旱胁迫。

**关键词:**竹柳;干旱胁迫;复水;光合特性

中图分类号:S792.12

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2014)05-0040-05

## Influences of Drought Stress on Photosynthetic Characteristics of Fragile Willow

SONG Xue-gui<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, ZHOU Guang-liang<sup>2</sup>, HU Hong-lin<sup>2</sup>

(1. Forest Bureau of Meishan District, Meishan 620010, China;

2. Forestry College of Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

**Abstract:** Pot experiments were conducted with 5 watering treatments (watering to 80% field capacity, then stopping watering followed by drought stress of 16 days, 12 days, 8 days, 4 days and 0 day) on fragile willow saplings. Photosynthetic indicators of fragile willow were determined and analyzed under different drought stress. And the change of photosynthetic indicators of fragile willow after re-watering were observed. The results showed as follows: 1) with the increase of drought stress, the net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of fragile willow saplings decreased significantly, stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $Tr$ ) overall decreased, and intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) decreased at first and then increased. 2) After re-watering the sapling for 72 and 120 hours, the net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and the transpiration rate ( $Tr$ ) increased significantly. 3) Fragile willow adopted such a drought avoidance strategy as turning yellow, wilting, curling and drying off of leaves and wilting and sagging of terminal buds to cope with drought stress.

**Key words:** Fragile willow (*Salix fragilis* L.), Drought stress, Re-water, Photosynthetic Characteristics

干旱是一个世界性问题。据统计,全球约有43%的耕地处于干旱、半干旱地区<sup>[1]</sup>,我国干旱及半干旱地区面积占全国总耕地面积的48%<sup>[2]</sup>。干旱是影响植物生长发育的重要逆境因子,也是决定

植物地理分布和限制作物产量的主要因素。在我国干旱和半干旱地区,缺水问题一直是影响农业生产和限制生态恢复的最主要因素之一,即使在降水较多的地区,也普遍存在季节性和非周期性干旱问

收稿日期:2014-06-06

作者简介:宋学贵(1981-),男,林业工程师,主要从事森林资源保护和管理, E-mail:86397210@qq.com。

题<sup>[2-4]</sup>。

干旱胁迫是指当植物耗水大于吸水时,植物组织内水分亏缺使得其正常生理活动受到干扰的现象<sup>[5,6]</sup>。当植物遇到干旱胁迫时,首先是活性氧清除系统受到破坏,使得植物体内活性氧大量积累,造成生物膜受害,导致细胞脱水,质膜透性加大,形成膜脂过氧化。细胞质膜受到伤害后,膜系统破坏,一切位于膜上的酶活性紊乱,各种代谢活动无序进行,进一步导致植物代谢作用的失调,影响正常的生长发育<sup>[7]</sup>。因此研究植物对不同强度干旱胁迫的反应对生态系统保育和干旱地区植被恢复具有重要的意义。

竹柳(*Salix fragilis* L.),又名爆竹柳,近年由美国引进,为杨柳科(Salicaceae)柳属(*Salix* L.)植物,落叶乔木。叶狭长,为披针形叶,小枝细长下垂,树冠较窄呈塔形,树干通直,根系发达,树皮幼时绿色,光滑。竹柳是经选优选育及驯化出的一个柳树品种,具有腋芽萌发力强,生长迅速,耐寒,耐旱,耐水湿,耐盐碱,以及材质优良,干形优美,木材用途多样等优点,是目前最适宜于盐碱地种植的丰产速生林树种之一,具有巨大的推广价值和广阔的发展前景<sup>[8,9,11-13]</sup>。

近年来,对竹柳的研究多集中在扦插栽培技术<sup>[8,9,12,13]</sup>方面,有少量关于竹柳生物学特性<sup>[8,14]</sup>和病虫害防治技术<sup>[10,17]</sup>的报道,而关于干旱胁迫对竹柳的影响的研究未见报道。本研究采用盆栽方式进行干旱胁迫实验,通过对不同水分胁迫状态下竹柳幼树光合指标和形态指标的分析,探讨竹柳对干旱胁迫的响应机制,为竹柳栽培立地条件选择和进行科学的经营管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2013年4月在四川省雅安市雨城区四川农业大学科研园区进行,地理位置102°59'55"E, 29°58'48"N,海拔600 m。年平均气温16.2℃,月平均最高温29.9℃(7月),月平均最低温3.7℃(1月),年均日照时数1 039.6 h,无霜期298 d,年平均降雨量1 774.3 mm。试验在大棚内进行,除没有降雨外,其余环境条件与自然状态基本相同。

### 1.2 实验材料

实验材料竹柳为扦插苗,栽植于内径28 cm,高

30 cm的塑料盆中,每盆1株,每盆装土16 kg。经2 a生长为幼树后,平均高170 cm,开始进行干旱胁迫实验。胁迫前采用常规管理。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 实验设计

选取15株形态生长指标一致的竹柳幼树,分5个处理,每个处理3盆。5个处理在2013年4月1日8点采用HH2土壤水分速测仪(ML2x,GBR,England)测定土壤水分含量,浇水到土壤田间持水量的80%左右后,W1停止浇水0 d,W2停止浇水4 d,W3停止浇水8 d,W4停止浇水12 d,W5停止浇水16 d。干旱胁迫实验结束后,测定各项光合指标和形态指标,之后对5个处理恢复浇水,使土壤水分含量恢复至田间持水量的80%左右,72 h和120 h后分别再次测定各项光合指标。

#### 1.3.2 测定项目及方法

##### (1) 形态指标

株高:2013年4月1日,用卷尺测定株高( $H_0$ ),2013年4月21日胁迫结束后,再次测定株高( $H_1$ ),株高生长量 $\Delta H = H_1 - H_0$ 。

地径:2013年4月1日,用游标卡尺测定地径( $C_0$ )2013年4月21日,再次测定地径( $C_1$ ),地径生长量 $\Delta C = C_1 - C_0$ 。

##### (2) 光合指标

2013年4月21日、4月24日和4月26日,选取各植株中上部成熟叶片,利用LI-6400便携式光合仪(LI-COR Inc.,USA)测定净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。

### 1.4 统计分析

运用SPSS 20.0 统计分析软件(SPSS Inc., USA)进行差异显著性检验和统计分析。

文中所述“显著”表示 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对竹柳株高和地径生长量的影响

由表1可见,随着干旱胁迫强度的增加,株高生长量呈下降趋势,各处理间差异不显著;地径生长量显著下降,W2显著低于W1,W3和W4差异不明显且显著低于W2,W4和W5差异不明显,W5显著低于W3。表明,干旱胁迫抑制了竹柳株高和地径的生长。

表 1 竹柳的株高和地径生长量

Tab. 1 Plant height growth and ground diameter growth of fragile willow

处理 Treatment	株高生长量 Increment of tree height (cm)	地径生长量 Ground diameter growth (mm)
W1	7.00 ± 5.57a	0.85 ± 0.11a
W2	2.67 ± 1.53b	0.54 ± 0.18b
W3	1.33 ± 2.52c	0.34 ± 0.02c
W4	1.00 ± 1.41c	0.21 ± 0.01cd
W5	1.00 ± 0.00c	0.07 ± 0.08d

注:表中数字为平均值 ± 标准差;表中的小写字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

Notes: the figures in the table represent the mean ± standard deviation; the lowercase letters in the table indicate significant difference at 0.05 level, the same as below.

表 2

干旱胁迫对竹柳光合指标的影响

Tab. 2 Effect of drought stress on the photosynthetic indicators of fragile willow sapling

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate Pn ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度 Stomatal conductance Gs ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	胞间二氧化碳浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration Ci ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate Tr ( $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
W1	19.39 ± 2.27a	0.22 ± 0.06a	221.67 ± 30.94c	3.36 ± 0.83a
W2	0.97 ± 0.27b	0.01 ± 0.00b	121.18 ± 85.91d	0.14 ± 0.04b
W3	0.90 ± 0.26b	0.01 ± 0.00b	136.74 ± 88.35d	0.14 ± 0.03b
W4	-1.00 ± 0.36c	0.01 ± 0.00b	580.52 ± 95.46b	0.20 ± 0.04b
W5	-1.78 ± 0.29d	0.01 ± 0.00b	783.32 ± 43.12a	0.16 ± 0.03b

### 2.2.2 干旱胁迫对竹柳叶片气孔导度和蒸腾速率的影响

气孔导度表示气孔张开的程度,对光合作用和蒸腾作用都有影响。由表 2 可以看出,随干旱胁迫强度的增大,竹柳的气孔导度(Gs)总体呈现出下降的趋势,在 W1 时最大,为  $0.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,远高于其他处理,且其余处理之间几乎没有差异。同时,随干旱胁迫强度的增大,蒸腾速率(Tr)也表现出与气孔导度相同的变化趋势,在 W1 时达到  $3.36 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,W2 与 W1 相比有显著降低,其他处理之间降幅很小,差异不显著。表明,干旱胁迫中气孔导度是影响植物蒸腾耗水的重要因素,干旱胁迫降低了气孔导度,从而降低了蒸腾速率。

### 2.2.3 干旱胁迫对竹柳叶片胞间二氧化碳浓度的影响

由表 2 可见,随着干旱胁迫强度的增加,胞间二氧化碳浓度(Ci)呈现出先减小后增大的趋势。W2 与 W3 差异不大且显著低于 W1,但之后不断增加,在 W4 及 W5 时都显著升高,且 W4 显著高于 W3, W5 显著高于 W4。原因可能是胁迫前期,气孔关闭但光合作用仍在进行,因此消耗了叶片中的 CO<sub>2</sub>,使得其值降低,但胁迫后期气孔关闭,光合作用停止,叶片中 CO<sub>2</sub> 含量又不断增加。

### 2.2.4 干旱胁迫对竹柳形态特征的影响

由表 3 可以看出,随着干旱胁迫强度的增加,竹

### 2.2 干旱胁迫对竹柳生长和光合特性的影响

由表 2 可以看出,随着干旱胁迫强度的增加,竹柳的光合作用呈下降趋势,干旱处理后期的 W4、W5 由于受到较大强度的干旱胁迫,土壤水分已经损失殆尽,光合作用几乎停止。

#### 2.2.1 干旱胁迫对竹柳叶片净光合速率的影响

其中,随着干旱胁迫强度的增加,净光合速率(Pn)呈下降的趋势,W2 和 W3 差异不明显且显著低于 W1。W4 和 W5 显著低于 W3。表明,干旱胁迫显著降低了竹柳叶片的净光合速率,从而影响竹柳的生长。

柳外形特征呈现出受害越来越严重的趋势。受到胁迫后竹柳首先表现为叶片变黄,之后出现萎蔫卷曲,再者脱落,最后从顶端开始出现枯萎现象。表明缺水时,竹柳主要通过叶片凋落,减少叶面积,来降低光合作用,减少水分消耗,从而避过干旱的危害。

表 3 干旱胁迫对竹柳形态特征的影响

Tab. 3 Effect of drought stress on the morphological characteristics of fragile willow saplings

处理 Treatment	形态特征 Morphological characteristics
W1 (停止浇水 0 d, CK)	正常
W2 (停止浇水 4 d)	部分叶片变黄
W3 (停止浇水 8 d)	叶片变黄,部分叶片萎蔫卷曲,干枯脱落
W4 (停止浇水 12 d)	叶片萎蔫卷曲,干枯脱落,顶芽正常
W5 (停止浇水 16 d)	叶片萎蔫卷曲,干枯脱落,顶芽萎蔫下垂

### 2.3 恢复浇水 72 h 和 120 h 后竹柳叶片光合指标的变化情况

在干旱胁迫结束时,因 W4、W5 处理叶片枯萎严重,已无光合作用,所以恢复浇水 72 h 和 120 h 后,只对 W1、W2 和 W3 进行了光合指标的测定。

由表 4 可以看出,恢复浇水后的 W2、W3 与干旱胁迫后的 W2、W3 相比,净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均显著增加,并且恢复浇水 120 h 后的各指标值的增幅大于恢复浇水 72 h 后的增幅。

表 4 恢复浇水后和干旱胁迫后的光合指标的比较  
Tab. 4 Comparison of the photosynthetic indicators after rewatering and drought stress

处理 Treat-ment	时间 Time	净光合速率	气孔导度	胞间二氧化碳浓度	蒸腾速率
		Net photosynthetic rate Pn ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Stomatal conductance Gs ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Inntercellular CO <sub>2</sub> concentration Ci ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	Transpiration rate Tr ( $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
W2	干旱胁迫处理后	0.97 ± 0.27c	0.01 ± 0.00c	121.18 ± 85.91b	0.14 ± 0.04c
	恢复浇水 72 h 后	13.46 ± 0.60b	0.13 ± 0.01b	195.70 ± 7.97b	4.49 ± 0.38b
	恢复浇水 120 h 后	19.46 ± 1.75a	0.23 ± 0.04a	214.60 ± 14.09a	7.30 ± 0.90a
W3	干旱胁迫处理后	0.90 ± 0.26c	0.01 ± 0.00c	136.74 ± 88.35b	0.14 ± 0.03c
	恢复浇水 72 h 后	11.61 ± 1.06b	0.14 ± 0.02b	220.24 ± 12.37b	4.44 ± 0.46b
	恢复浇水 120 h 后	16.28 ± 1.90a	0.21 ± 0.06a	227.86 ± 23.46a	7.24 ± 1.57a

同时由表 5 可以看出,恢复浇水 72h 后,W1 到 W3 处理间胞间二氧化碳浓度呈先降低后升高的趋势;净光合速率呈显著下降趋势;和 W1 相比,W2 的气孔导度和蒸腾速率显著降低,而 W2 和 W3 无显著差异,表明干旱胁迫的影响还未完全恢复。

恢复浇水 120 h 后,净光合速率大小顺序仍为

W3 < W2 < W1,但处理间的差异逐渐缩小;气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均无明显差异。表明对胁迫后的竹柳恢复浇水,W2、W3 的光合作用能够迅速恢复,且随着恢复浇水时间的延长,W2、W3 的光合特性与 W1 越来越接近。

表 5 恢复浇水后竹柳叶片光合指标的变化情况  
Tab. 5 The change of photosynthetic indicators of fragile willow after re-watering

恢复浇水后 小时数 Time after re- watering (h)	处理 Treatment	净光合速率	气孔导度	胞间二氧化碳浓度	蒸腾速率
		Net photosynthetic rate Pn ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Stomatal conductance Gs ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Inntercellular CO <sub>2</sub> concentration Ci ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	Transpiration rate Tr ( $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
72	W1	23.15 ± 1.28a	0.31 ± 0.03a	233.13 ± 13.49a	8.12 ± 0.61a
	W2	13.46 ± 0.60b	0.13 ± 0.01b	195.70 ± 7.97c	4.49 ± 0.38b
	W3	11.61 ± 1.06c	0.14 ± 0.02b	220.24 ± 12.37b	4.44 ± 0.46b
120	W1	20.56 ± 2.23a	0.26 ± 0.05a	222.28 ± 11.75a	7.62 ± 1.04a
	W2	19.46 ± 1.75b	0.23 ± 0.04b	214.60 ± 14.09b	7.30 ± 0.90a
	W3	16.28 ± 1.90c	0.21 ± 0.06b	227.86 ± 23.46a	7.24 ± 1.57a

### 3 讨论与结论

付世磊等<sup>[15]</sup>研究表明,在轻度和中度水分胁迫下,叶片光合速率的降低主要是气孔部分关闭的结果;重度胁迫在一定程度上破坏了光合器官的结构和功能,导致光合速率大幅度下降。本研究中,干旱胁迫下,W2 的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率较 W1 有显著降低,且三者的变化趋势基本一致,表明竹柳对干旱胁迫的反应为叶片的气孔导度降低,从而导致蒸腾速率和净光合速率的降低,与付世磊的研究结果一致。而除 W1 外,其他处理之间的净光合速率、气孔导度与蒸腾速率的差异并不显著,但已降到很低的水平,可能是由于植物体内活性氧自由基代谢失调,引发了生物膜结构与功能的破坏。

干旱胁迫下,引起植物叶片光合效率降低的植物自身因素主要有部分气孔的关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制两类。

前者使胞间二氧化碳浓度值降低,而后者使胞间二氧化碳浓度值增高。当这两种因素同时存在时,胞间二氧化碳浓度值变化的方向取决于占优势的那个因素<sup>[17]</sup>。本研究中,胞间二氧化碳浓度值呈现出先降低后增大的趋势,干旱初期胞间二氧化碳浓度值显著性降低,表明此时光合作用的降低可能是由于气孔的部分关闭造成;而干旱后期胞间二氧化碳浓度值显著性增大,则叶肉细胞光合活性下降应该是此时光合作用降低的主要因素。

阔叶树种主要通过关闭气孔以及叶片变色、卷曲、萎蔫、落叶等形式减少叶面积以防止水分的过度损失来抵御干旱<sup>[16]</sup>。本实验中,受到干旱胁迫时,竹柳主要通过叶片变黄,萎蔫卷曲,干枯脱落,顶芽萎蔫下垂的避旱策略来减少水分散失,以保持植株基本生理活动所需的水分供应,维持其生存,这种避旱方式也使得其在复水后能较快的恢复生长。

研究中,恢复浇水 72 h 和 120 h 后,竹柳的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均

显著增加,且 120 h 后的各指标值的增幅大于 72 h 后的增幅。表明,随着恢复浇水时间的增加,各指标均逐渐接近未胁迫处理的值,也进一步反应其复水后较强的恢复能力。

竹柳具有较强的耐旱性,但其在水分条件较好的地方生长迅速,生态经济效益更高<sup>[12]</sup>。当遭遇严重干旱胁迫时,竹柳的光合作用迅速减弱,甚至停止,其生长也几乎接近停止。因此,在水分缺乏或季节性干旱频繁的地区,不适合大面积栽植竹柳。

#### 参考文献:

- [1] 严寒,许本波,赵福永,等. 脱落酸和水杨酸对干旱胁迫下芝麻幼苗生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 163 ~ 166.
- [2] 朱新强,张新颖,师尚礼,等. 干旱胁迫下 4 个苜蓿品种根系抗旱性的比较[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(1): 103 ~ 107.
- [3] 曹昀,王国祥,张聘. 干旱对芦苇幼苗生长和叶绿素荧光的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 862 ~ 869.
- [4] Lange OL, Kappen L, Schuize ED. Water and plant life: Problem and modern approaches [M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1976.
- [5] 曹昀,王国祥. 土壤水分含量对菖蒲 (*Acorus calamus*) 萌发及幼、苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1748 ~ 1755.
- [6] 吴晓东,王国祥,李振国,等. 干旱胁迫对香蒲生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 103 ~ 107.
- [7] 李明,王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2002, 24(4): 503 ~ 507.
- [8] 徐克顺. 竹柳生物学特性及扦插育苗技术[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(20): 121 ~ 122.
- [9] 司光义,邢丽荣,汪建林,等. 竹柳覆盖地膜扦插技术[J]. 内蒙古农业科技, 2012(2): 123 ~ 124.
- [10] 侯金波. 竹柳病害预防技术[J]. 现代农业科技, 2010(1): 197.
- [11] 陈烨丽,李丽,白善军,等. 株行距对竹柳胸径影响的研究[J]. 农业科技通讯, 2011(2): 74 ~ 75.
- [12] 白善军,李玉娟,张健,等. 沿海滩涂竹柳直插造林技术[J]. 现代农业科技, 2010(13): 241.
- [13] 马金洲. 六盘山地区竹柳扦插育苗技术[J]. 现代农业科技, 2011(20): 221.
- [14] 张奇才,吴明红,应丽霞. 竹柳的特性及其对生态园林的功效[J]. 农业工程, 2011(5): 67 ~ 69.
- [15] 付士磊,周永斌,何兴元,等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2016 ~ 2019.
- [16] 李吉跃,朱妍. 干旱胁迫对北京城市绿化树种耗水特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 32 ~ 37.
- [17] 陈惠,张健,王栋. 江苏沿海地区竹柳主要虫害及防治技术[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(3): 119 ~ 121.
- [18] 影响[J]. 竹子研究汇刊, 2014, 33(1): 16 ~ 24.
- [7] 李晓齐,杨素香,周珠丽,等. 四川地震区大熊猫栖息地受损特征与灾后重建对策[J]. 四川林业科技, 2014, 35(1): 68 ~ 72.
- [8] Liu C, Wang Y, Pan K, et al. Responses of the antioxidant defense system to drought stress in the leaves of *Fargesia denudata* seedlings, the staple food of the giant panda[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2014a, 61(3): 374 ~ 383.
- [9] Liu C, Wang Y, Pan K, et al. Carbon and nitrogen metabolism in leaves and roots of dwarf bamboo (*Fargesia denudata* Yi) subjected to drought for two consecutive years during sprouting period[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014b, 33: 243 ~ 255.

#### (上接第 83 页)

- [2] 郑雯,冉江洪,李波,等. 汶川地震对四川龙溪一虹口和唐家河自然保护区大熊猫栖息地利用格局的影响[J]. 兽类学报, 2012, 32(2): 118 ~ 123.
- [3] 申国珍,谢宗强,冯朝阳,等. 汶川地震对大熊猫栖息地的影响与恢复对策[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1417 ~ 1425.
- [4] 程颂,宋洪涛. 汶川大地震对四川卧龙自然保护区大熊猫栖息地的影响[J]. 山地学报, 2008, 26, 旅游专集, 65 ~ 69.
- [5] 李怡. 汶川地震前后岷山 A 种群大熊猫栖息地状况研究[J]. 四川林业科技, 2009, 30(1): 43 ~ 47.
- [6] 周世强,黄金燕,严啸,等. 汶川地震对拐棍竹性系种群生态的