

涝渍胁迫对鸡爪槭幼苗光合生理特性的影响

吴 静¹, 王小德^{1*}, 叶建峰², 杨玲玲¹

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院,浙江 临安 311300;2. 浙江省天目山林场,浙江 临安 311311)

摘要:通过设置对照(CK)、涝害(LH)和渍害(ZH)3种水分处理,研究鸡爪槭2年生实生苗的生理生态适应机制。结果表明:与CK比对,LH和ZH组鸡爪槭幼苗除胞间CO₂浓度升高,净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)均显著降低; P_n 、 G_s 在试验初期下降稳定,随着处理时间延长至第20天下降加速;LH和ZH组光合色素含量一直处于下降,受到胁迫显著;叶绿素a与叶绿素b的含量比值介于2.65~4.42之间,叶绿素与类胡萝卜素含量比值则在4.55~5.94之间。不同水分处理均显著影响鸡爪槭幼苗叶片气体交换以及光合色素,鸡爪槭幼苗表现出不耐水淹的生理生态特性。

关键词:鸡爪槭;幼苗;涝渍胁迫;气体交换;光合色素

中图分类号:S718.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)05-0026-05

Effects of Waterlogging Stress on the Photosynthetic Physiological Characteristics of *Acer palmatum* Seedlings

WU Jing¹, WANG Xiao-de^{1*}, YE Jian-feng², YANG Ling-ling¹

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;
2. Forest Farm of Mount Tianmu, Lin'an, Zhejiang 311311, China)

Abstract:Seedlings of 2-year-old potted *Acer palmatum* seedlings were used to examine the effects of water stress on the physiological and ecological adaptation mechanisms. Three treatment were established, normal (control), water stressed (ZH, in which soil was saturated by water), severe water stress (LH, in which water level was 5cm above soil surface). Compared with the control, the seedling's net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) in treatments LH and ZH were significantly low, while the inter-cellular carbon dioxide concentrations were high. The P_n and G_s in LH and ZH declined steadily at the early stage of the treatments, and declined rapidly from the day 20. The photosynthetic pigment contents of LH and ZH had been declining throughout the test period, indicating the synthesis of the pigments was seriously stressed. The ratio of chlorophyll a to b in three treatments ranged from 2.65 to 4.42, and the ratio of chlorophylls to carotenoids ranged from 4.55 to 5.94. The fact that different water treatments could effectively influence seedlings' leaf gas exchange and contents of photosynthetic pigment indicated that the *A. palmatum* presented physiological and ecological features of non-tolerance to water stress.

Key words:*Acer palmatum*; seeding; waterlogging stress; gas exchange; photosynthetic pigment

浙江地区夏季台风多发,常常某一段持续集中降雨,极易造成局部土壤积水,对很多园林植物生长造成涝渍危害。目前,关于植物淹水方面的研究主要集中在作物^[1-2]、造林树种^[3-4]及果树^[5]方面,鸡爪槭

(*Acer palmatum*)^[6]是园林绿化中较为常见的彩叶树种,关于其耐涝渍能力方面的研究报道尚少。以2年生鸡爪槭幼苗为对象,探讨不同水分处理下光合生理生态特性的变化,揭示其对涝渍的适应性机理。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为2年生鸡爪槭实生幼苗。2013年5月初,挑选大小和长势基本一致的60株盆栽幼苗,种植于口径25 cm、高30 cm的塑料盆中,盆土按园土:基质=1:1,置于浙江农林大学园林学院教学实习基地内进行相同光照和水分管理适应,于2013年7月25日开展试验,幼苗平均株高为50 cm。

试验场地为亚热带季风气候区,全年平均降水量为1421 mm,多年平均气温为15.9°C,历年平均日照时数为1939 h,无霜期236 d。

1.2 试验设计

试验设常规对照(CK,土壤含水量为田间持水量的75%左右)、涝害处理(LH,土壤含水量处于过饱和,并且淹水超过土壤表面5 cm)和渍害处理(ZH,土壤含水量处于完全饱和状态,使整个根部淹水)3种处理,将试验用苗分为5组,随机区组设计,3盆小区,3次重复。分别在处理后的1、4、10 d和20 d测定幼苗的光合作用及光合色素等指标。

1.3 测定方法

1.3.1 光合作用的测定 选取植株顶部完好成熟叶为测定对象,先用饱和光进行30 min光诱导,然后使用Li-Cor-6400便携式光合分析系统(Li-Cor-6400,Li-Cor Inc,USA)红蓝光源叶室定期测定鸡爪槭幼苗叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、

胞间CO₂浓度(C_i)等光合参数,测定时间为每天的9:00—11:00,试验条件控制CO₂浓度380 μmol·mol⁻¹、饱和光强1000 μmol·m⁻²·s⁻¹、叶室温度37°C,计算叶片内在水分利用效率($WUEi = P_n / G_s$)^[7]。

1.3.2 光合色素含量的测定 选取用于测定光合速率的叶片,采用浸提法^[8]。

1.4 数据处理

利用Excel 2007和SPSS 19.0^[9]进行试验数据处理和分析。采用Duncan多重比较检验处理间差异显著性,用Pearson相关系数分析相关性。

2 结果与分析

2.1 涝渍对鸡爪槭幼苗叶片气体交换参数变化的影响

2.1.1 净光合速率 在整个试验期间,LH和ZH组幼苗叶片的 P_n 均显著低于CK(图1),分别降低101.60%和72.67%,试验第1天和第4天,与CK相比,LH与ZH组均下降,但ZH组第4天的 P_n 稍高于第1天,可能与试验初期短期涝渍处理使植物产生短暂适应机制有关。在试验第10天时,LH组和ZH组的 P_n 分别比CK降低79.70%和56.72%;至第20天时,与CK相比,ZH组 P_n 仍下降,但开始幅度减小,而LH组 P_n 则急剧下降且为负值。可见,涝害与渍害胁迫对鸡爪槭幼苗对 P_n 有影响。

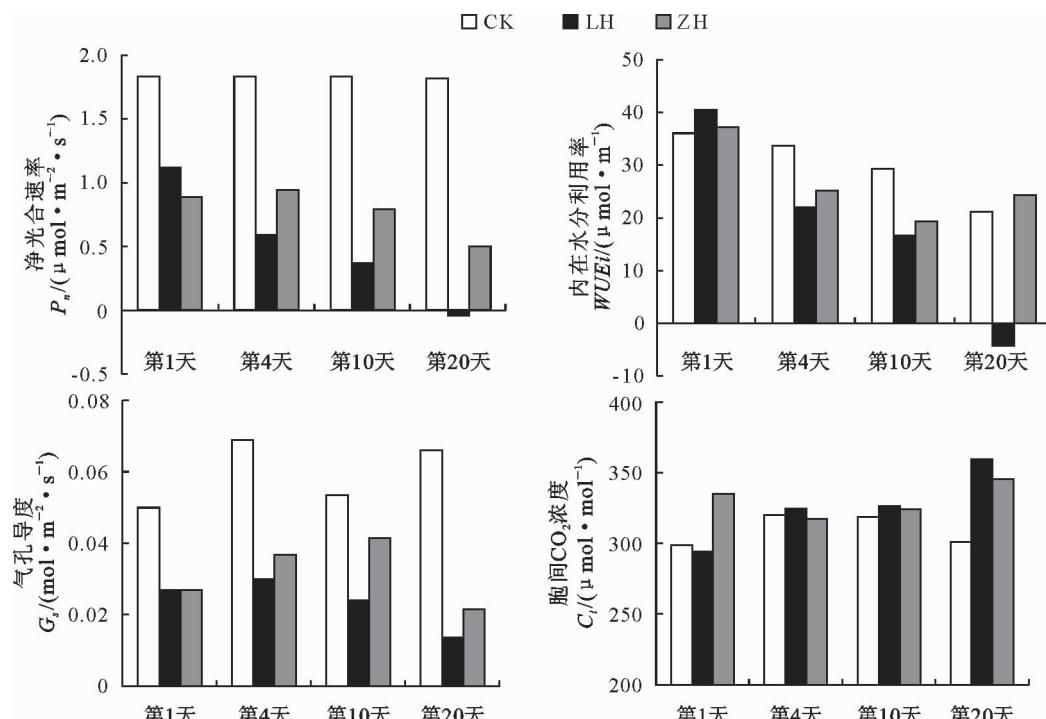


图1 不同涝渍处理下鸡爪槭幼苗叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和内在水分利用的变化

Fig. 1 Changes of different waterlogging treatments on P_n , G_s , C_i and $WUEi$ in seedling leaves of *A. palmatum*

2.1.2 气孔导度 LH 和 ZH 组的鸡爪槭幼苗 G_s 分别比 CK 下降 80.06% 和 67.98%，而且 LH 组的 G_s 比 ZH 组下降 37.74%。LH 组和 ZH 组幼苗 G_s 都是先下降后上升再下降(图 1)，与 CK 持续平稳的变化趋势有所不同。试验第 1 天，LH 组和 ZH 组 G_s 分别比 CK 下降 46.68% 和 46.40%；ZH 组之后开始回升，第 10 天比 CK 下降 22.18%；之后又开始下降。而 LH 组第 4 天有小幅上升，之后开始下降，持续至第 20 天。在短期后有小幅回升，表明鸡爪槭对水分胁迫有一定的自我调节能力。

2.1.3 胞间 CO_2 浓度 LH 组和 ZH 组变化不显著(图 1)。LH 组 C_i 在处理至第 20 天上升至最高值，较 CK 高出 19.39%；而 ZH 组在处理至第 4 天出现小幅回落，之后略有上升，到第 20 天至最高值、且高出 CK 14.81%。而 CK 在试验期间的变化幅度较小。

2.1.4 内在水分利用率 LH 和 ZH 组的 WUE_i 在第 1 天，分别比 CK 上升 12.00% 和 2.55%；之后 LH 组一直下降，至第 20 天比 CK 下降 120.74%；而 ZH 组却呈现出升降交替变化的趋势并趋于 CK

值。这与 CK 基本趋于稳定的变化趋势有所不同(图 1)。初期 2 个处理相差不大，随着处理时间的延长，第 20 天 LH 组降到负值，而 ZH 组较 CK 水平差异不显著。

2.2 潟渍对鸡爪槭幼苗叶片光合色素的影响

LH 和 HZ 组幼苗叶片的光合色素含量变化差异不显著(表 1)。胁迫过程中 Chls 含量呈逐渐下降趋势，LH 和 ZH 组先下降再小幅上升，之后急剧下降；试验第 1 天，LH 组和 ZH 组的 Chls 含量分别下降 31.54% 和 16.52%；试验第 4 天，LH 组无显著变化，而 ZH 组下降 28.59%；至 10 天，相较第 4 天，LH 组和 ZH 组分别上升 15.32% 和 10.12%；之后又出现下降，胁迫第 20 天分别比 CK 下降 75.78% 和 67.12%。Chla 与 Chlb 的含量之比在 2.65~4.42 之间波动。

LH 组和 ZH 组的 Car 含量持续下降，胁迫第 20 天分别比 CK 低 73.69% 和 62.80%。Chls 与 Car 含量之比在 4.55~5.94 范围内波动，第 20 天 LH 组和 ZH 组的 Chls 与 Car 含量比值分别为 4.63 和 4.55。

表 1 不同水分处理下鸡爪槭幼苗叶片光合色素含量与比值

Table 1 Different water treatments on photosynthetic pigment contents and ratio in seedling leaves of *A. palmatum*

处理	时间/d	叶绿素 a /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b /(mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b	叶绿素/类胡萝卜素
涝害	1	2.14±0.15b	0.63±0.10b	0.52±0.05b	3.42	5.34
	4	2.12±0.21b	0.63±0.07b	0.55±0.06b	3.36	5.00
	10	2.48±0.11bcd	0.69±0.01b	0.59±0.01b	3.57	5.37
	20	0.71±0.26a	0.27±0.11a	0.21±0.07a	2.65	4.63
渍害	1	2.68±0.24de	0.70±0.22b	0.65±0.12b	3.85	5.16
	4	2.22±0.31bc	0.67±0.12b	0.58±0.08b	3.33	5.00
	10	2.59±0.06cd	0.57±0.06b	0.53±0.04b	4.42	5.94
	20	0.99±0.37a	0.34±0.14a	0.29±0.12a	2.90	4.55
CK		3.03±0.06e	1.01±0.06c	0.80±0.03c	2.99	5.03

注：数据为平均值±标准差，同一列中含有相同字母表示差异不显著($p<0.05$)。

2.3 气体交换参数与光合色素指标变化的相关性分析

由表 2 可见， P_n 与光合色素指标呈极显著正相关($p<0.01$)，与 C_i 呈负显著相关，与 WUE_i 呈正显著相关，与 G_s 相关性不显著。表明在胁迫作用下，鸡爪槭幼苗 P_n 下降可能源于光合色素变化，而非由于叶片气孔关闭带来的直接结果。试验第 1 天处理 LH 组幼苗的 G_s 、 C_i 下降，而 ZH 组 G_s 升、 C_i 下降，表明 LH 初期幼苗的 P_n 降低是由于气孔限制所致。除此其余 C_i 都是呈上升趋势，猜测淹水导致鸡爪槭 P_n 下降主要是由于叶肉细胞光合能力下降，利用 CO_2 的能力降低，进而 C_i 升高。

3 结论与讨论

水分胁迫逆境条件光合生理生态响应能力的重要指标之一^[10]。整个试验期间 LH 和 ZH 组较 CK 的 P_n 都下降，两处理对鸡爪槭幼苗 P_n 的影响有一定相似性，但 LH 组显著低于 ZH 组，可能是由于涝害使植物根系渗透胁迫伤害更为严重，使 P_n 产生抑制作用更大^[11]。在根部水淹时间短于 50 d 的情况下，一些不耐淹植物的 P_n 就会下降到对照的 0%~25%^[12]，表明长时间涝渍环境下鸡爪槭幼苗的光合效率低下，光适应能力较差，耐水淹能力差，对渍水环境有一定适应。

水淹胁迫下树木首先适应反应是气孔关闭^[13]，进而导致其净光合速率下降^[14]。本试验气孔导度与净光合速率、蒸腾速率之间的变化呈正相关，显著性不强，但净光合速率和蒸腾速率则呈极显著正相

研究表明，植物的净光合速率可以作为检验对

关系。研究表明,下降原因是气孔限制和非气孔限制的双重结果^[15]。本试验发现,第 1 天 LH 组幼苗的气孔导度下降、胞间 CO₂ 浓度下降,而 ZH 组气孔导度上升、胞间 CO₂ 浓度下降,表明 LH 初期幼苗的净光合速率降低是由于气孔限制所致。除此其余胞间 CO₂ 浓度都是呈上升趋势,可能淹水导致

鸡爪槭光合下降主要是由于非气孔限制因素所致。ZH 组气孔导度和净光合速率在初期下降后,在短期后有小幅回升,而 LH 组则没有,说明该树种具有一定的耐受水的能力,但只能达到渍水环境,而不能承受淹水环境。

表 2 主要叶片气体交换参数与光合色素指标相关性

Table 2 Correlations between gas exchange parameters and photosynthetic pigment indicators

参数	P_n	G_s	C_i	WUE_i	Chla	Chlb	Chls	Car
P_n	1.000							
G_s	0.330	1.000						
C_i	-0.697*	-0.664*	1.000					
WUE_i	0.636*	0.520	-0.746*	1.000				
Chla	0.769**	0.136	-0.666*	0.565	1.000			
Chlb	0.890**	0.141	-0.665*	0.522	0.924**	1.000		
Chls	0.808**	0.139	-0.675*	0.563	0.996**	0.955**	1.000	
Car	0.850**	0.107	-0.654*	0.572	0.967**	0.985**	0.985**	1.000

注: * 为显著相关($p < 0.05$); ** 为极显著相关($p < 0.01$)。

内在水分利用率与净光合速率之间的变化成显著的正相关。随着净光合速率的变化,内在水分利用率 LH 组和 ZH 组在初期两个处理相差不大,但末期 LH 组随 P_n 改变降为负值,而 ZH 组较 CK 水平变化不显著。这主要是净光合速率和气孔导度下降,同时 LH 组净光合速率降幅大于 ZH 组,气孔导度变化幅度小于 ZH 组,故出现 LH 组和 ZH 组 WUE_i 低于 CK,且 LH 组低于 ZH 组的结果。反映出鸡爪槭幼苗对水分胁迫的一定敏感程度,这与周朝彬^[16]等研究结果相似。

叶片中光合色素是叶片光合作用的物质基础,Chls 含量与光合强度密切相关^[17]。Chls 之间的比值和总量在一定程度上表示了光系统对光量子的捕获和利用状况,同样反映了植物处于特定环境下所承受光胁迫的潜在能力^[18]。胁迫过程中叶绿素含量呈逐渐下降趋势,与张克清^[19]的研究一致。一般正常稳定状态下,Chl a/b 的比值约为 3:1^[20],但在逆境胁迫环境下则呈不稳定状态。Chla 很大程度上决定了光合效率能力,Chlb 在调控光合机构、维持稳定和提高适应方面起重要作用^[21]。试验过程中 2 处理 Chl a/b 的比值上升且高于 3:1,初期叶绿素的降幅 LH 组高于 ZH 组,第 10 天基本持平,第 20 天 LH 组降幅仍高于 ZH 组,Chla/b 升高意味着 Chlb 含量的相对减少,胁迫中 Chlb 的受损程度则大于 Chla,这种变化可能是植物的一种相关保护机制^[22]。第 10 天 LH 组和 ZH 组 Chl a/b 值分别为 3.57 和 4.42,比 CK 上升 19.13% 和 47.55%,反映出此时 ZH 组的光胁迫程度更为严重。至试验第 20 天 LH 组和 ZH 组分别为 2.65 和 2.90,可能与徐文铎^[23]的研究结论相类似,活性氧作用下 Chla 更易被分解。试验胁迫第 20 天,LH 组和 ZH 组分

别比 CK 下降 11.44% 和 3.20%,这可能是水分胁迫使叶绿体片层中的 Chls a/b-Pro 复合体合成受到抑制,或者与水分胁迫诱导叶绿体发生膜质过氧化而产生的破坏作用相关^[24]。Chls/Car 的比值 $> 3:1$ 有利于提高叶绿素在光合色素中相对比例进而增加光合作用的能力,同时也可确保有足够的反应中心色素^[25]。在胁迫中 Chls/Car 的比值一直 $> 3:1$,利于光合作用的进行。Car 既是光合色素,又是内源抗氧化剂,除在光合作用中具有一定的功能外,在细胞内还可吸收剩余能量,淬灭活性氧,从而防止膜脂过氧化^[26]。胁迫第 20 天 Car 快速下降,使得对活性氧的淬灭减少,导致细胞内氧自由基堆积,进而破坏叶绿体膜结构,加速叶绿素的分解^[17],使得叶片中 Chls 含量在胁迫后期快速下降,这在 LH 组尤为显著。表明淹水胁迫严重影响了植物叶片光合色素合成,涝害胁迫更为明显。

参考文献:

- [1] 钟雪花,杨万年,吕应堂. 淹水胁迫下对烟草、油菜某些生理指标的比较研究[J]. 武汉植物学研究, 2002, 20(5): 395-398.
- [2] ZHONG X H, YANG W N, LV Y T. Comparative research on some physiological characteristics of tobacco and rape under flooding stress [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2002, 20(5): 395-398. (in Chinese)
- [3] 李金才,董琦,余叔文. 不同生育期根际土壤淹水对小麦品种光合作用和用产量的影响[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 434-442.
- [4] LI J C, DONG Q, YU S W. Effect of waterlogging at different growth stages on photosynthesis and yield of different wheat cultivars [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(4): 434-442. (in Chinese)
- [5] 汤玉喜,周金星,吴敏,等. 淹水胁迫下美洲黑杨新无性系光合特征的变化[J]. 林业科技开发, 2008, 22(6): 20-24.
- [6] 范川,李贤伟,张建,等. 毛豹皮樟 4 个品种幼苗对水涝胁迫的

- 生理响应[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 10-14.
- FAN C, LI X W, ZHANG J, et al. Physiological response of flooding stress on the seedlings of four varieties of *Litsea coreana* var. *lanuginosa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(6): 10-14. (in Chinese)
- [5] 吴林, 黄玉龙, 李亚东, 等. 越桔对淹水的耐受性及形态生理反应[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(4): 64-69.
- WU L, HUANG Y L, LI Y D, et al. Advances in tolerance ability and morphological and physiological responses of blueberry to flooding [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2002, 24(4): 64-69. (in Chinese)
- [6] 方文培. 中国植物志: 第 46 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 129.
- [7] NIJS I, FERRIS R, BLUM H. Stomatal regulation in a changing climate: a field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO₂ enrichment (FACE) [J]. Plant Cell and Environment, 1997, 20(6): 1041-1050.
- [8] 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 51-54.
- [9] 夏怡凡. SPSS 统计分析精要与实例详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 50-56.
- [10] 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.
- FU S L, ZHOU Y B, HE X Y, et al. Effects of drought stress on photosynthesis physiology of *Populus pseudo-simoni* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2016-2019. (in Chinese)
- [11] 郭书奎, 赵可夫. NaCl 胁迫抑制玉米光合作用的可能机理[J]. 植物生理学报, 2001, 27(6): 461-466.
- GUO S K, ZHAO K F. The possible mechanisms of NaCl inhibit photosynthesis of maize seedlings [J]. Acta Photophysiologica Sinica, 2001, 27(6): 461-466. (in Chinese)
- [12] GRAVATT D A, KIRBY C J. Patterns of photosynthesis and starch allocation in seedlings of four bottomland hardwood tree species subjected to flooding [J]. Tree Physiology, 1998, 18: 411-417.
- [13] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [14] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 等. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 960-968.
- YI Y H, FAN D Y, XIE Z Q, et al. Effects of waterlogging on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Ouercus variabilis* and *Pterocarya stenoptera* [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 960-968. (in Chinese)
- [15] 关义新, 戴俊英, 林燕. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 293-297.
- GUAN Y X, DAI J Y, LIN Y. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress [J]. Plant Physiology Communications, 1995, 31(4): 293-297. (in Chinese)
- [16] 周朝彬, 宋余洋, 王炳举, 等. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 5-9.
- ZHOU C B, SONG Y Y, WANG B J, et al. Effects of drought stress photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 5-9. (in Chinese)
- [17] 何军, 许兴, 李树华, 等. 水分胁迫对牛心朴子叶片光合色素及叶绿素荧光的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(9): 1594-1598.
- HE J, XU X, LI S H, et al. Effects of water stress on photosynthetic pigment in leaves and chlorophyll fluorescence of *Cynanchum komarovii* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2004, 24(9): 1594-1598. (in Chinese)
- [18] 李玉灵, 朱帆, 王俊刚, 等. 水分胁迫下臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)光合特性和色素组成的季节变化[J]. 生态学报, 2009, 9(8): 4346-4352.
- LI Y L, ZHU F, WANG J G, et al. Seasonal changes of photosynthetic characteristics *Sabina vulgaris* Ant. under water stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 9(8): 4346-4352. (in Chinese)
- [19] 张克清. 淹水胁迫对 5 种豆科植物生长及生理性状的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2007: 30-31.
- [20] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 64-66.
- [21] VAVILIN D, VERMAAS W. Chlorophyll B can serve as the major pigment in functional photosystem II complexes of cyanobacteria [J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2001, 98(24): 14168-14173.
- [22] 周党卫, 朱文琰, 腾中华, 等. 不同海拔珠芽蓼抗氧化系统的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5): 522-524.
- ZHOU D W, ZHU W Y, TENG Z H, et al. Antioxidative compounds of *Polygonum viviparum* L. from different altitudes [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2003, 9(5): 522-524. (in Chinese)
- [23] 徐文铎, 郑元润, 刘广田, 等. 内蒙古沙地云杉生长与生态条件关系的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 368-373.
- XU W D, ZHENG Y R, LIU G T, et al. Relationship between ecological conditions and spruce growth on sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(4): 368-373. (in Chinese)
- [24] 许丽颖, 郝玉萍, 王刚, 等. 水分胁迫对紫叶李叶片色素含量与 PAL 活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(2): 168-172.
- XU L Y, HAO Y P, WANG G, et al. Effect of water stress on pigment content and PAL activity of purple leaf plum [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2007, 29(2): 168-172. (in Chinese)
- [25] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- LI C X, ZHONG Z C, LIU Y. Effects of soil water change on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 1953-1959. (in Chinese)
- [26] WILLEKENS H, VAN CAMP W, LNZED, et al. Ozone, sulfur dioxide, and ozone ultraviolet-B have similar effect on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana plumbaginifolia* [J]. Plant Physiol, 1994, 106: 1007-1014.