

312-317

第19卷第3期
1999年5月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 3
May, 1999水分胁迫下白杨派双交无性系
主要生理过程研究*

5792.117

杨敏生 裴保华 朱之悌

(河北农业大学林学院 保定 071000) (北京林业大学 北京 100083)

摘要 以白杨双杂交杂种新无性系为主要试验材料,在4种水分胁迫条件下对各无性系生理和生长指标进行分析,结果表明,土壤干旱胁迫对无性系净光合速率(P_n),蒸腾速率(T_r),气孔导度(G_s),叶温与气温差(L_t),细胞间 CO_2 浓度(C_i)等生理指标均产生显著影响。不同指标对水分胁迫的敏感性不同,无性系间在各项生理指标值及随水分胁迫发展而下降幅度均存在着显著差异。不同水分胁迫条件,影响 P_n 的主导因子不同,充足供水时, C_i 是限制 P_n 的主导因子,随着水分胁迫的发展,各因子对 P_n 的影响均不明显,但供水量继续下降到40%时 G_s 和 C_i 成为限制 P_n 的主导因子, T_r 和 L_t 在各水分条件下对 P_n 均无显著直接影响。

关键词 水分胁迫,毛白杨杂种无性系,生理指标,通径分析。

PHYSIOLOGICAL STUDY OF DOUBLE CROSS HYBRID
CLONES OF WHITE POPLAR UNDER WATER STRESS

YANG Min-Sheng PEI Bao-Hua

(Forestry Institute, Hebei Agriculture University, Baoding, 071000, China)

ZHU Zhi-Ti

(Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract With the one-year-old seedlings of the double cross hybrid clones of white poplar as the experimental materials, the major physiological properties of the clones were analyzed under four water stress conditions. The result shows that under the condition of soil drought stress, photosynthesis (P_n), transpiration (T_r), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), and difference of leaf temperature and air temperature (L_t) were all influenced significantly. The sensitivity of the factors to water deficit was different from each other, and significant physiological differences existed among the clones. The relation of T_r , G_s , C_i and L_t to P_n was studied by means of path analysis, multiple regression and partial correlation analysis. When the water was sufficient, the factor affecting P_n was C_i . With drought stress developing, the affecting of the four factors to P_n both not significant. When the water content dropped to 40%, the factors affecting P_n were G_s and C_i .

* 国家攻关课题“毛白杨短期工业用材新品种选育”子专题和河北省自然科学基金资助项目。

收稿日期:1996-10-30,修改稿收到日期:1997-03-07。

Key words water stress, hybrid clones of white poplar, physiological properties, path analysis.

毛白杨良种选育从“六五”开始列入国家攻关计划,选育具有抗旱速生毛白杨优良杂种无性系是扩大其分布范围,发挥其生产潜力的重要手段,研究在干旱胁迫条件下毛白杨及其杂种无性系的生理反应,对毛白杨抗旱品种选育无疑具有重要意义。本文以毛白杨双交杂种无性系为材料,在4种水分胁迫条件下研究了各无性系主要生理反应,并对各生理指标间的关系进行了探讨

1 材料和方法

选用6个白杨双杂交杂种新无性系为试验材料,杂交组合为(毛白杨×新疆杨)×(银白杨×欧洲山杨) [(*Populus tomentosa* × *P. bolleana*) × (*P. alba* × *P. tremula*)]。另有2个为毛白杨、新疆杨单交无性系(MX1和MX2)。这些无性系均经过初选,具有较明显的杂种优势,生长量较大。毛白杨和新疆杨为对照。

将无性系嫩枝扦插小苗于3月下旬栽于塑料盆中,盆高25cm,内径23cm,培养土为苗圃熟土(2份)和沙(1份)混合而成,为砂壤土,田间持水量为16%。各无性系苗木大小和质量尽可能保持一致,每盆栽2株,栽后将苗木平茬,将盆下部三分之二埋入土壤中,在充足水分条件下培养,5月下旬苗高达30cm左右时,开始控水试验。将10个无性系在4个供水处理条件下,培养30d。每个无性系每个处理重复3盆,每个供水处理按完全随机区组排列。4个水分处理为:处理Ⅰ,盆中土壤含水量为田间持水量的100%(相对含水量为100%);处理Ⅱ,土壤含水量为田间持水量的80%;处理Ⅲ,土壤含水量为田间持水量的60%;处理Ⅳ,土壤含水量为田间持水量的40%。试验开始后,每天18:00称取盆重,补充当天失去的水分,使各处理保持设定的含水量。控水30d后测定各项生理指标。

采用ADC-LAC3型便携式CO₂分析仪(英国产)测定苗木的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶温与气温差及细胞间CO₂浓度等。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对净光合速率的影响

经过30d的水分胁迫后,不同处理间苗木 P_n 表现不同,达到极显著差异(表1)。从处理Ⅰ到处理Ⅲ,即供水量为田间持水量的60%(此时各无性系叶水势在-0.4~0.8MPa之间)以上时, P_n 没有明显的变化。同时,由表1不难看出,除了亲本毛白杨和新疆杨在处理Ⅰ P_n 最高外,其余无性系 P_n 最高值并不出现在充足供水的处理Ⅰ,而是出现在处理Ⅲ,甚至处理Ⅳ,其中B430和B414的 P_n 最高值则出现在处理Ⅲ。当供水量进一步下降到田间持水量的40%时,各无性系的 P_n 则迅速下降到2.73~8.63 $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。但不同无性系 P_n 下降的速度不同,与80%供水处理相比,B433、毛白杨、B429下降幅度最大,而B431、新疆杨、B414、B432的 P_n 下降较少。各无性系 P_n 对水分胁迫的反应,与其它文献报道基本一致^[1,2]。据研究,许多树种在轻度缺水时,一般不影响光合作用,适度的干旱对光合有一定促进作用。当大部分土壤可利用水耗尽,叶水势下降到某一数值时, P_n 才迅速下降。不同树种光合作用开始下降时的叶水势阈值不同。

在各水分处理中,无性系间 P_n 存在较大差异。无论在供水良好还是受到水分胁迫时,MX1、MX2、B432、B430、新疆杨均保持相对较高的 P_n ;而B429和毛白杨在各处理中净光合速率均相对较低。根据各处理无性系 P_n 变异系数可以看出,在适度供水条件下,各无性系间 P_n 差异较小,从处理Ⅰ到处理Ⅲ变异系数分别为15.62%、10.53%、9.52%,而在干旱条件下,无性系间差异增大,变异系数达到30.98%。说明从光合作用角度看,各无性系对干旱的适应能力有较大的差异。以处理Ⅳ与处理Ⅰ的 P_n 比值作为光合抗旱系数,可反映无性系间抗旱生产力的大小。根据表1计算结果可知,B431、B414、B432、新疆杨的光合抗旱系数最大,为0.543~0.854,而B429、毛白杨和B433则较低,为0.278~0.367。

2.2 水分胁迫对蒸腾速率和气孔导度的影响

在水分胁迫下,蒸腾速率(T_r)也表现出下降的趋势。表2可见,4个水分处理间及无性系间均存在明显差异。随着水分胁迫的加剧, T_r 表现出明显下降的趋势。在供水量下降到40%时,各无性系 T_r 大幅度下降。无性系间 T_r 也存在显著差异,这一差异在无性系受到水分胁迫时表现更加明显,在处理Ⅳ时,变异系

数达到36.40%,B431、MX1、B432、B414、MX2的 T_r 平均值较高,为6.25~6.70mmol/m²·s,而B429、B433、毛白杨则较低,为5.46~5.60mmol/m²·s。

表1 水分胁迫对净光合速率的影响 ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$)

Table 1 Effect of water stress on photosynthesis of the clones

无性系 Clone	I (100%)	II (80%)	III (60%)	IV (40%)
MX1	15.13±2.03	15.80±1.61	14.47±3.05	7.57±1.17
MX2	14.57±3.18	16.57±1.69	16.40±0.36	7.07±1.91
B431	10.10±2.36	13.20±1.98	13.13±1.87	8.63±0.60
B432	14.27±3.18	14.73±1.96	13.43±1.75	8.20±1.04
B429	9.83±1.45	12.20±1.65	11.80±2.48	2.73±1.86
B430	15.13±1.91	13.27±1.53	15.33±0.15	6.10±1.53
B433	13.00±0.56	14.20±2.05	14.20±1.68	4.77±2.05
B414	11.83±2.07	12.43±1.55	13.57±2.71	7.63±1.93
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	13.10±0.89	13.01±2.02	12.67±2.80	4.13±2.03
新疆杨 <i>P. balleana</i>	15.47±2.56	12.90±2.36	13.73±2.18	8.40±2.173
平均值 Average	13.24	13.83	13.86	6.52
变异系数 (%) Coefficient of variation	15.62	10.53	9.52	30.98

表2 水分胁迫对蒸腾速率的影响 (mmol/m²·s)

Table 2 Effect of water stress on transpiration of the clones

无性系 Clone	I (100%)	II (80%)	III (60%)	IV (40%)
MX1	8.20±1.25	8.13±1.14	7.40±0.10	2.60±1.15
MX2	7.77±0.76	8.17±1.16	6.83±0.81	2.23±0.80
B431	8.83±0.60	7.23±1.32	7.03±0.99	3.70±1.14
B432	8.87±0.80	8.50±0.30	6.13±0.91	2.63±0.50
B429	7.17±1.12	7.17±0.49	6.47±0.58	1.03±0.32
B430	8.33±1.16	7.87±0.64	5.97±0.22	1.97±0.68
B433	7.21±1.05	7.73±0.91	6.63±0.83	1.55±0.51
B414	7.40±1.04	6.00±1.47	6.90±0.78	3.13±0.15
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	74.0±1.25	7.01±0.70	6.60±0.36	1.33±0.32
新疆杨 <i>P. balleana</i>	7.87±1.32	7.67±1.06	6.77±0.57	2.40±0.00
平均值 Average	7.90	7.66	6.69	2.23
变异系数 (%) Coefficient of variation	8.0	7.0	6.3	36.4

在水分胁迫条件下,导致 P_n 和 T_r 下降的主要原因是气孔关闭。气孔导度 (G_s) 是反映气孔开度的一个重要指标。由表3可以看出,在水分胁迫下,苗木气孔导度随之下降。但胁迫强度不同, G_s 下降幅度不同。供水量从100%降至60%时, G_s 下降的幅度较小,平均下降了27.88%。当供水量下降为40%时, G_s 大幅度下降,下降了88.52%。 G_s 随水分胁迫强度的变化趋势与蒸腾速率是一致的。

2.3 水分胁迫对胞间 CO_2 浓度和叶温的影响

在4个水分处理下, C_i 的变动范围为228~313mg/L,低于空气中的 CO_2 浓度(表4),水分胁迫对 C_i 有显著的影响,在供水量为100%时, C_i 的浓度最大,平均为307.9mg/L,随着水分胁迫加强, C_i 下降。供水量下降到80%、60%和40%时,各无性系 C_i 平均值分别下降了4.55%、8.77%和19.8%。 C_i 在水分处理间差异极显著,4个水分处理无性系间变异系数分别为1.92%、2.87%、3.36%和6.74%。随着胁迫的加强,无性系间 C_i 差异逐渐增大,但总的来看差异较小。

表3 水分胁迫对气孔导度的影响 (mmol/m²·s)

Table 3 Effect of water stress on stomatal conductance of the clones

无性系 Clone	I (100%)	II (80%)	III (60%)	IV (40%)
MX1	1.59±0.52	1.48±0.56	1.24±0.72	0.16±0.10
MX2	1.51±0.39	1.41±0.48	1.08±0.50	0.13±0.06
B431	1.38±0.35	1.57±0.15	1.51±0.72	0.25±0.05
B432	1.33±0.42	1.21±0.50	0.71±0.45	0.15±0.05
B429	0.73±0.18	0.67±0.15	0.68±0.42	0.06±0.05
B430	1.71±0.57	1.22±0.38	0.65±0.25	0.09±0.02
B433	0.86±0.30	0.79±0.24	0.62±0.38	0.05±0.02
B414	1.00±0.41	1.20±0.14	0.68±0.37	0.20±0.16
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	0.94±0.25	0.78±0.23	0.71±0.36	0.06±0.02
新疆杨 <i>P. bolariana</i>	1.17±0.27	1.17±0.15	0.87±0.23	0.22±0.00
平均值 Average	1.22	1.19	0.88	0.11
变异系数 (%)	27.24	32.78	34.59	52.18
Coefficient of variation				

表4 水分胁迫对胞间 CO₂浓度的影响 (mg/L)Table 4 Effect of water stress on intercellular CO₂ concentration of the clones

无性系 Clone	I (100%)	II (80%)	III (60%)	IV (40%)
MX1	307±8	299±21	274±34	242±41
MX2	305±21	296±17	280±23	240±20
B431	317±8	308±9	295±26	263±11
B432	313±29	287±16	274±43	237±13
B429	313±14	293±27	281±38	237±24
B430	305±17	304±23	296±22	224±36
B433	303±20	284±22	276±36	228±24
B414	313±19	300±24	289±28	259±4
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	304±10	291±20	267±18	214±18
新疆杨 <i>P. bolariana</i>	298±14	283±16	281±12	282±10
平均值 Average	307.9	294.4	281.4	247.0
变异系数 (%)	1.92	2.87	3.36	6.74
Coefficient of variation				

一般情况,叶温低于气温,在干旱时,气孔关闭,蒸腾速率降低,植物体内热量向外散发受阻,叶片温度随之提高。通过叶温与气温差值(Lt),反映出叶片气孔开闭和叶片与外界热量的交换,表5结果表明,水分处理间及无性系间 Lt 均存在明显差异。水分胁迫强度直接影响 Lt 值,随水分胁迫加强, Lt 提高,从处理 I 到处理 III Lt 平均值从 -2.03℃ 提高至 -1.71℃,但这3个处理仍是叶温低于气温,当供水量降到40%时,叶温进一步提高, Lt 达到0.35℃,叶温高于气温。经检验,水分处理间和无性系间 Lt 均存在极显著差异。

2.4 水分胁迫下净光合速率与其它生理指标的关系

在树木光合作用中,CO₂从空气中向叶绿体光合部位扩散受着诸因素如叶面 CO₂浓度、气孔导度、叶肉导度、气孔内 CO₂浓度及蒸腾速率等的影响。Brun 和 Cooper^[3]认为,CO₂的扩散能力严重限制了叶片的光合作用。Dornhoff 和 Shible^[4]报道气孔阻力(r_s)和叶肉阻力(r_m)与光合速率显著负相关。为了解在水分胁迫下影响 P_n 的生理因素,测定了不同土壤干旱条件下叶片 P_n 与 CO₂扩散能力有关的生理因素间的相互关系,在4个水分处理中,应用通径分析、多元回归分析及偏相关分析研究了蒸腾速率(T)、气孔导度(G_s)、细胞间 CO₂浓度(C_i)和叶温与气温之差(Lt)与净光合速率(P_n)的关系,结果见表6。

表5 水分胁迫对叶温与气温差值的影响 (°C)

Table 5 Effect of water stress on difference of leaf temperature and air temperature of the clones

无性系 Clone	I (100%)	II (80%)	III (60%)	IV (40%)
MX1	-1.5±1.0	-2.3±0.4	-1.6±0.7	0.1±0.1
MX2	-2.2±0.3	-2.3±0.6	-1.5±0.5	0.2±0.1
B431	-2.1±0.1	-2.5±0.6	-2.1±0.2	-0.2±0.1
B432	-2.3±0.3	-2.4±0.3	-1.7±0.4	0.3±0.2
B429	-1.8±0.3	-1.9±0.1	-1.5±0.3	0.9±0.4
B430	-2.1±0.2	-2.0±0.2	-2.2±0.3	0.4±0.2
B433	-2.0±0.5	-1.6±0.3	-1.6±0.0	0.8±0.3
B414	-2.1±0.5	-1.8±0.3	-1.7±0.1	0.1±0.4
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	-2.1±0.6	-1.6±0.3	-1.6±0.2	0.6±0.3
新疆杨 <i>P. bolariana</i>	-2.1±0.4	-1.7±0.6	-1.6±0.5	0.4±0.0
平均值 Average	-2.03	-2.00	-1.71	0.35
变异系数 (%) Coefficient of variation	11.15	16.99	13.65	93.70

表6 各生理指标与净光合速率的相关和通径分析

Table 6 Correlation and path analysis of Tr , G_s , C_i and L_t to P_n at four water stages

处理 Treatment	因素 Factor	$Tr \rightarrow P_n$	$G_s \rightarrow P_n$	$C_i \rightarrow P_n$	$L_t \rightarrow P_n$	简单相关 Simple correlation	偏相关 Partial correlation	多元相关 Multiple correlation
I (100%)	Tr	0.2095	0.2816	-0.2704	0.0026	0.2233	0.2445	0.9104**
	G_s	0.1546	0.3815	0.0440	0.0003	0.5805	0.4531	
	C_i	0.0731	-0.0217	-0.7749	0.0006	-0.7229*	-0.8305**	
	L_t	-0.0594	-0.0125	0.0527	-0.0090	-0.0284	-0.0201	
II (80%)	Tr	0.2729	0.0333	-0.0070	0.2449	0.5410	0.3005	0.6887
	G_s	0.0859	0.1057	-0.2190	0.3922	0.3646	0.017	
	C_i	0.0035	0.0640	-0.3489	0.2434	-0.0336	-0.0102	
	L_t	-0.1331	-0.0825	0.1691	-0.5021	-0.5486	-0.3658	
III (60%)	Tr	-0.2411	0.2552	-0.0059	0.0116	0.0198	-0.1308	0.2700
	G_s	-0.1839	0.3346	0.0040	-0.0019	0.1712	0.1781	
	C_i	0.0084	0.0776	0.1710	-0.0580	0.1987	0.1090	
	L_t	-0.0376	-0.0857	-0.1328	0.0746	-0.1814	0.0418	
IV (40%)	Tr	-1.1810	2.6626	-0.5249	-0.0553	0.9013**	-0.6057	0.9723**
	G_s	-1.0979	2.8641	-0.8231	-0.0487	0.8944**	0.8402**	
	C_i	-0.5625	2.1390	-1.1021	-0.0190	0.4555	-0.8085*	
	L_t	1.1207	-2.3948	0.3567	0.0058	-0.8590**	0.0690	

有下线的数字为通径分析中各性状对 P_n 的直接效应。* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 显著水平。The value with underline is the direct effect of every trait to P_n in path analysis. * and **, significant at the 0.05 and 0.01 level, respectively.

由表6分析结果表明,在不同水分胁迫下,影响 P_n 的主导因子不同。在充足供水条件下(供水量为 100%), Tr 、 G_s 和 L_t 与 P_n 相关均不明显,简单相关和偏相关系数均未达到显著水平。 G_s 对 P_n 的作用稍大,偏相关系数也仅为 0.4531。而 C_i 与 P_n 则存在着紧密相关关系,简单相关系数和偏相关系数分别为 -0.7229 和 -0.8305。分析其原因,不难理解,苗木在充足供水情况下,气孔开放,气孔导度很大,蒸腾旺盛,苗木体内与大气水分和热量交换速率很快,叶片光合作用也很旺盛,因此 Tr 、 G_s 和 L_t 均对 P_n 影响较小,而用于光合作用的 CO_2 浓度就成为限制光合作用的主导因子, C_i 越低,表示细胞内外 CO_2 浓度差越大,叶片固定 CO_2 的速率越快, C_i 对 P_n 的作用主要是直接作用,直接通径系数为 -0.7749,4 个因子对 P_n 的多

元决定程度为82.88%。随着供水量的降低,苗木逐渐受到水分胁迫的影响,各因素对 P_n 的作用也发生改变。在受到轻度和中度水分胁迫时(供水量为80%和60%),气孔开度逐渐受到水分亏缺的影响, G_s 有所降低, P_n 受到限制, G_s 、 Tr 和 L_t 等逐渐对 P_n 产生影响,而 C_i 的作用逐渐降低。但由计算结果可以看出,在处理Ⅱ和处理Ⅲ4个因子对 P_n 的多元决定作用较低,处理Ⅱ为47.43%,处理Ⅲ仅为7.29%。各因子与 P_n 均未达到显著相关,这一结果可能是由于苗木受到一定水分胁迫时,不同无性系对水分亏缺的敏感程度不同,一些对水分敏感的无性系,在含水量刚下降时,气孔开度即受到影响, Tr 降低, G_s 和 L_t 提高,从而 P_n 下降;而耐旱的无性系,在轻度到中度水分亏缺时,气孔受水分亏缺的影响较小, G_s 降低较慢,仍未成为光合作用的限制因子,对 P_n 的影响较小。由于存在这种关系,从而在多元分析中难以看出哪一个因素对所有无性系光合能力有一致的影响。这一点也进一步说明不同无性系的光合作用对水分胁迫的适应能力不同,其选种的潜力较大,然而,虽然各无性系光合作用对水分胁迫的适应能力有差异,但也有一定的限度。当供水量降至40%,苗木受到严重的水分胁迫时,各因子对 P_n 的影响又趋于一致。在处理Ⅳ,4个因子对 P_n 的多元决定系数达到94.53%。4个因素中, G_s 、 Tr 和 L_t 与 P_n 简单相关系数均达到极显著相关。但从偏相关分析看出, G_s 和 C_i 是影响 P_n 的主导因素, G_s 对 P_n 直接影响较大,直接通径系数为2.8641。此外, G_s 通过 C_i 和 Tr 对 P_n 产生负的影响,这可能是因为较严重的水分胁迫下,通过 Tr 引起苗木体内水分丧失,严重限制苗木的光合作用,因此, G_s 通过限制蒸腾作用,从而对 P_n 产生负的影响。 C_i 与 P_n 仍呈显著负相关关系,直接通径系数为-1.1021。 C_i 通过 G_s 对 P_n 产生较大的间接作用,间接通径系数为2.1390,即气孔导度提高,有利于 CO_2 向气孔内扩散,从而有利于光合作用。在水分胁迫下,尽管 Tr 与 P_n 的简单相关系数达到0.9013,但通过偏相关分析表明, Tr 对 P_n 的直接作用仍较低,偏相关不显著。 Tr 对 P_n 的作用主要通过 G_s 产生间接作用,间接通径系数达到2.6626。

上述分析表明,在不同水分胁迫条件下,影响 P_n 的主导因子不同。在充足供水时, C_i 是限制 P_n 的主导因子,随着水分胁迫的发展,各因子对 P_n 的影响均不明显,但水分胁迫进一步加剧,供水量降到40%时, G_s 和 C_i 成为影响 P_n 的主要限制因子。 Tr 和 L_t 在各供水条件下与 P_n 均无显著的直接影响。研究结果与一些作物上的研究结果相似,游明安等^[3]对大豆的研究表明,在适宜的水分条件下,开花前影响 P_n 的主要因子是叶肉导度和 C_i , P_n 与叶肉导度呈正相关关系,而与 C_i 呈负相关关系。到鼓粒后期, G_s 也成为重要的直接因素。 Tr 对 P_n 无直接影响,而是通过叶肉导度和气孔导度产生间接作用。Secor^[6,7]认为在无胁迫条件下,大豆叶片在衰老时期 G_s 与 P_n 无明显相关。

参 考 文 献

- 1 Dickmann D I, et al. Photosynthesis, water relations and growth of two hybrid *Populus* genotypes during a severe drought. *Can. J. For. Res.*, 1992, 22(8): 1094~1106
- 2 Rhodenbaugh E J, et al. Water stress photosynthesis and early growth patterns of cutting of three *Populus* clones. *Tree Physiol.*, 1993, 13(3): 213~226
- 3 Brun W A and Cooper R L. Effect of light intensity and carbon dioxide concentration on photosynthesis. *Crop Sci.*, 1967, 7: 451~454
- 4 Dornhoff G M and Shibles R M. Varietal differences in net photosynthesis of soybean leaves. *Crop Sci.*, 1970, 10: 42~45
- 5 游明安,等.大豆叶片光合速率与气孔导度、叶肉导度的关系.作物学报,1995,21(2):145~149
- 6 Secor J, et al. A metabolic comparison between progressive and monocarpic senescence of soybean. *Can J. Bot.*, 1984, 62: 806~811
- 7 Secor J, et al. Metabolic changes in senescing soybean leaves of similar plant ontogeny. *Crop Sci.*, 1983, 23: 106~110
- 8 郭连生,等.9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究.生态学报,1992,12(1):42~52
- 9 杨敏生,等.毛白杨不同无性系光合作用特性的比较研究.北京林业大学学报,1992,14(增3):65~71