

文章编号: 1001-1498(2008)03-0357-05

乌兰布和沙漠东北部不同起源的 5 种沙生灌木的光合及生长特性

李清河¹, 赵英铭², 刘建锋¹, 赵秀莲¹, 江泽平¹

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口 015200)

摘要:在乌兰布和沙漠地区,研究了中沙冬青、梭梭、白刺、霸王、柠条等 5 种沙生灌木的生理生长指标的差异性,结果表明:这些灌木树种的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用效率等气体交换特征和株高、地径、冠幅等生长指标在不同起源之间均具有显著差异,且人工起源植株的气体交换特征均比天然起源植株的大,而生长指标则均比天然起源植株的小;天然林和人工林中不同树种的水分利用效率的差异均不显著,但不同树种的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂浓度、蒸腾速率等气体交换特征和株高、地径、冠幅等生长指标差异却很显著。在测定光响应曲线和 CO₂响应曲线基础上求算出的最大光合速率、表观量子效率、光补偿点、光饱和点、暗呼吸速率、CO₂补偿点和羧化效率等光合响应曲线参数在不同树种以及不同起源之间的变化也很大,并据此提出不同树种的人工林栽培及天然林保护措施。

关键词: 乌兰布和沙漠; 沙生灌木; 起源; 光合特性

中图分类号: Q945.11, S793.9

文献标识码: A

The Differences of Growth and Photosynthetic Traits of Five Shrubs Species from Two Origins in the Northeastern Ulanbuh Desert

LI Qing-he¹, ZHAO Ying-ming², LIU Jian-feng¹, ZHAO Xiu-lian¹, JIANG Ze-ping¹

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Experimental Center for Desert Forestry, CAF, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: Five dominant species of natural and artificial-origins shrubs in the northeastern Ulanbuh Desert, *Ammopiptanthus mongolicus*, *Haloxylon ammodendron*, *Nitraria tangutorum*, *Zygophyllum xanthoxylum*, *Caragana korshinskii* were chosen for the research. The photosynthetic gas exchange indices, photosynthetic response curves and growth indices were measured. The differences among different species and origins were analyzed. The ANOVA results showed that between natural and artificial origins, the remarkable differences exist in the gas exchange indices, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (E), water utilization efficiency (WUE), and the growth indices, shrub height (H), shrub diameter (D), shrub canopy (C). and the gas exchange indices of artificial origins were bigger than that of natural origins, but the growth indices smaller than natural origins. Among the five species, the difference of WUE is not remarkable, but the remarkable differences exist in the gas exchange indices, P_n , G_s , C_i , E , and the growth indices, H , D , C . Some photosynthetic response curves parameters, such as maximum photosynthetic rate, apparent quantum yield, light compensation point, light

收稿日期: 2006-10-16

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划专题(2006BAD26B0801)、国家林业局 948 课题(2006-04-02)、防治治沙科技攻关课题(2005BA517A01)

作者简介: 李清河(1971—),男,内蒙古包头人,博士,副研究员,主要从事植物逆境生态、水土保持与荒漠化防治、林业生态工程研究。

saturation point, dark respiration rate, CO_2 compensation point, carboxylation efficiency, were calculated based on the measured light and CO_2 response curves for five shrubs of two origins. And the diversification of the photosynthetic response curves parameters for different species and origins exist. And some suggestions for artificial shrub cultivation and natural shrub protection measures were put forward.

Key words: Ulanbuh Desert; psammophilic shrub; origin; photosynthetic traits

在我国西部沙区,分布着许多天然沙生灌木群落,这些沙生灌木在天然状态下,大都生长良好,但是许多人工沙生灌木林长势明显比天然林差,难以形成稳定的人工林群落。植物的光合生理特性是植株生长的内在原因。在以往研究中,对沙生灌木人工林的生理生长指标研究居多^[1-4],而对天然林与人工林的对比研究还未见报道。

乌兰布和沙漠地区地处我国北部沙区中部,属于温带干旱荒漠区,行政区划上大部分位于内蒙古阿拉善盟阿左旗和巴彦淖尔市磴口县。乌兰布和沙漠地区生态系统以灌木为主,其中沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus* Maxim.) Cheng f)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron* Bge)、白刺 (*Nitraria tangutonum* Bohr)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 是该地区的主要优势树种,也是该地区生态建设选用的灌木。本文分别测定了这 5 种灌木的天然林与人工林植株的生理与生长指标,探讨树种、植物起源的差异,以期为这些沙生灌木的人工栽培、天然林保护提供参考,提高生态建设的成效。

1 材料与方法

1.1 研究地点与树种

人工林主要选择 2001 年在内蒙古磴口县中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第四分场栽植的灌木,该区属于温带荒漠大陆性气候,年平均降水量约 144.5 mm,年平均蒸发量 2380.6 mm,年平均气温 7.8。天然灌木林主要选择生长在阿拉善盟阿左旗敖伦布拉格镇的沙冬青、梭梭、白刺、霸王,该地区位于乌兰布和沙漠北部,地处河套平原和阿拉善草原两大经济板块的结合部;天然柠条林主要生长在磴口县境内狼山山前,处于狼山冲积扇的荒漠地区,主要伴生植物有蒙古扁桃 (*Prunus mongolica* Maxim.)、沙冬青、霸王等。

1.2 测定方法

采用 LI-6400 便携式光合作用测量系统在自然条件下不离体分别对天然林和人工林中的 5 种沙生

灌木进行光合生理特征测定。选择 2006 年 8 月中旬晴朗无云的天气,于上午 9:00 - 11:00 进行测定,并统一选取生长正常植株当年生中层枝条上生长良好的成熟叶片作为测定材料。每个树种选择 30 株进行重复测定。测量指标包括净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、水分利用效率 (WUE) 为 P_n/E 。测定时设置统一的光合环境指标:光合有效辐射为 $1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、大气 CO_2 浓度为 $370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、样本室大气流速为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 等;同时测量植株高度 (H)、地径 (D)、冠幅 (C) 等生长指标。另外选取部分植株测定光响应曲线与 CO_2 响应曲线,以得出最大净光合速率 ($P_{n\max}$)、表观量子效率 (AQY)、光补偿点 (LCP)、光饱和点 (LSP)、暗呼吸速率 (R_d)、 CO_2 补偿点 (CCP) 及羧化效率 (CE) 等光合响应曲线参数。植物叶面积测定应用数字图像处理技术计算得出^[5]。

1.3 数据处理

测定数据均利用 SAS 统计软件进行一维和二维方差分析,用 Duncan 法进行多重比较检验,并用字母法标记。对于光响应曲线数据,运用非直角双曲线理论模型^[6-7]利用 SAS 统计软件的回归模型进行非线性拟合,结合低光强及低 CO_2 浓度下数据的线性回归法求出各个光合响应曲线的参数值。

2 结果与分析

2.1 光合特征

由表 1 可以看出:不同树种和不同起源植株的净光合速率具有极显著差异,并且树种和起源的交互作用对净光合速率的影响也极显著。由表 2 可以看出:人工灌木林中白刺的净光合速率显著高于其它树种,其它树种间的差异不显著;而 5 种天然灌木林树种的净光合速率差异性不显著。沙冬青、梭梭、白刺、霸王的天然与人工起源之间的净光合速率差异显著,但柠条的差异性不显著,人工植株的净光合速率明显高于天然植株,这说明人工灌木林植株的同化器官工作效率明显高于天然植株。

表 1 二维方差分析中生理与生长指标的 F 值

指标	树种	起源	树种 × 起源
净光合速率	6.37***	64.85***	5.48***
气孔导度	8.49***	20.87***	10.97***
胞间 CO ₂ 浓度	27.70***	0.03 ^{ns}	38.66***
蒸腾速率	9.73***	7.31*	6.81***
水分利用效率	0.88 ^{ns}	12.89***	0.84 ^{ns}
植株高度	93.29***	37.27***	24.17***
地径	106.13***	259.24***	67.49***
冠幅	47.00***	64.92***	66.68***

注: ***: $P < 0.005$ **: $P < 0.01$ (: $P < 0.05$ ns: $P > 0.05$)

从表 1 可见: 不同树种和不同起源的植株的气孔导度具有显著性差异, 并且树种和起源的交互作用对其也具有显著影响。由表 2 可见: 在人工灌木林树种中, 沙冬青、梭梭、霸王、柠条的气孔导度的差异性不显著, 但白刺显著大于其它树种; 天然灌木林

中, 柠条的气孔导度最大, 而沙冬青、白刺、霸王的基本相同。不同树种的天然与人工林的气孔导度差异是不同的, 其中沙冬青、梭梭、霸王、柠条的差异性不显著, 但白刺则具有显著的差异性; 并且只有天然柠条的气孔导度比人工植株的大。

由表 1 和表 2 可以看出, 不同树种的胞间 CO₂ 浓度具有显著性差异, 树种和起源的交互作用对其也有显著影响。在天然起源灌木树种中, 柠条的胞间 CO₂ 浓度最大, 沙冬青、白刺和霸王间的差异性不显著; 而在人工起源灌木中, 霸王的气孔导度最大, 梭梭的最小, 沙冬青与柠条的差异性不显著。5 种沙生灌木中, 只有天然起源的霸王的气孔导度比人工起源的小, 其余 4 种灌木都为天然植株大于人工植株。

表 2 不同起源灌木林树种生理与生长指标的 Duncan 多重比较检验

指标	起源	沙冬青	梭梭	白刺	霸王	柠条
净光合速率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	天然	^b 6.26 ^a	^b 6.30 ^a	^b 6.61 ^a	^b 6.11 ^a	^a 5.74 ^a
	人工	^a 15.72 ^b	^a 18.47 ^b	^a 28.42 ^a	^a 10.20 ^b	^a 11.68 ^b
气孔导度 / ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	天然	^a 0.09 ^b	^a 0.11 ^{ab}	^b 0.09 ^b	^a 0.09 ^b	^a 0.14 ^a
	人工	^a 0.17 ^b	^a 0.14 ^b	^a 0.40 ^a	^a 0.11 ^b	^a 0.11 ^b
胞间 CO ₂ 浓度 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	天然	^a 227.22 ^b	^a 249.67 ^{ab}	^a 224.00 ^b	^b 224.61 ^b	^a 277.18 ^a
	人工	^a 192.33 ^{bc}	^b 144.03 ^c	^a 214.04 ^b	^a 471.27 ^a	^b 172.33 ^{bc}
蒸腾速率 / ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	天然	^a 3.37 ^b	^a 4.96 ^a	^b 5.24 ^a	^a 4.72 ^{ab}	^a 4.46 ^{ab}
	人工	^a 4.66 ^b	^a 6.00 ^b	^a 13.67 ^a	^a 3.07 ^b	^a 4.36 ^b
水分利用效率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	天然	^b 1.85 ^a	^a 1.26 ^a	^a 1.26 ^a	^a 1.31 ^a	^b 1.29 ^a
	人工	^a 3.44 ^a	^a 3.69 ^a	^a 2.18 ^a	^a 5.22 ^a	^a 2.72 ^a
植株高度 /cm	天然	^a 76.00 ^d	^a 423.33 ^a	^a 91.33 ^{cd}	^a 147.33 ^{bc}	^a 176.67 ^b
	人工	^a 82.33 ^c	^b 195.00 ^a	^b 39.33 ^d	^b 120.33 ^b	^a 198.33 ^a
地径 /cm	天然	^a 3.60 ^c	^a 17.83 ^b	^a 6.50 ^c	^a 4.83 ^c	^a 26.67 ^a
	人工	^b 1.69 ^d	^b 7.33 ^a	^b 3.93 ^b	^b 2.94 ^c	^b 3.99 ^b
冠幅 /cm	天然	^a 103.33 ^c	^a 436.17 ^a	^a 431.67 ^a	^a 178.83 ^b	^b 175.00 ^b
	人工	^a 82.00 ^d	^b 145.83 ^c	^b 139.17 ^c	^a 199.67 ^b	^a 323.83 ^a

注: 表中数据为平均值, 数据左上方字母为对起源的分析结果; 右上方字母为对树种的分析结果。相同字母为差异不显著, 不同为差异显著。

不同树种的蒸腾速率具有显著性差异, 树种和起源的交互作用对其也有显著影响, 而不同起源间的差异性也较显著 (表 1)。由表 2 可以看出: 不同灌木树种的天然与人工起源间的蒸腾速率差异是不同的, 其中沙冬青、梭梭、霸王、柠条的差异性不显著, 但白刺的差异性显著。在人工灌木林树种中, 白刺的蒸腾速率最大, 沙冬青、梭梭、霸王、柠条之间的差异性不显著; 在天然灌木林树种中, 沙冬青的蒸腾速率最小, 白刺与梭梭则显著高于其它树种。

由表 1 可以看出: 不同起源的植株之间水分利用效率具有显著性差异, 而不同树种及树种与起源之间交互作用的差异性不显著。梭梭、白刺、霸王

天然与人工起源的差异性不显著, 但沙冬青、柠条的差异性显著。5 种沙生灌木人工起源植株的水分利用效率明显比天然起源的高, 说明人工灌木林植株在与天然植株损耗等量水分的基础上, 碳同化量更大。不论是人工起源还是天然起源, 各树种之间水分利用效率差异性均不显著。

由表 3 可见: 不同树种之间以及不同起源之间的 2 种光合响应曲线的参数值的变化很大。只有天然柠条的最大净光合速率大于人工柠条, 其余灌木树种均呈现出人工树种大于天然树种; 人工起源的 5 种灌木植株的表观量子效率均比天然起源的大, 这说明人工树种对光的利用能力高于天然树种。在 5 种天然灌

木中,霸王的光补偿点最低,梭梭的最高,而 CO_2 补偿点恰恰相反,梭梭在较低的 CO_2 浓度时就开始进行光合作用,属于低光呼吸类型;而霸王需要较高的 CO_2 浓度才开始进行光合作用,属于高光呼吸类型,因而梭梭的生长量明显大于霸王。天然沙冬青的光饱和

点最高,达 $1\ 041.84\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,人工柠条最低,光量子通量密度仅为 $421.30\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时就达到最大净光合速率;天然柠条的暗呼吸速率最大,天然霸王的最小。在 5 种灌木中,沙冬青的羧化效率最低,白刺的较高,这说明白刺对 CO_2 的利用较充分。

表 3 不同起源灌木林各树种的光响应曲线和 CO_2 响应曲线参数值

曲线参数	天然林					人工林				
	沙冬青	梭梭	白刺	霸王	柠条	沙冬青	梭梭	白刺	霸王	柠条
最大净光合速率 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	8 991 2	8 744 5	12 214 0	7 483 7	17 222 3	14 267 5	16 302 5	16 468 3	14 607 4	14 908 9
表观量子效率 / ($\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$)	0 009 3	0 020 7	0 029 1	0 017 9	0 030 1	0 025 7	0 021 9	0 035 2	0 036 4	0 040 6
光补偿点 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	73.180 0	140.166 7	51.526 7	22.193 3	132.946 7	68.453 3	156.503 3	65.380 0	58.130 0	55.350 0
光饱和点 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 041.836 7	563.100 0	491.653 3	440.826 7	706.150 0	622.046 7	897.600 0	533.876 7	463.793 3	421.300 0
暗呼吸速率 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0 712 5	2 706 1	1 235 1	0 424 3	4 205 0	1 890 8	3 726 3	1 716 7	1 833 4	2 323 5
CO_2 补偿点 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	61.923 3	26 743 3	91.656 7	130.196 7	44.976 7	82.393 3	14.406 7	115.436 7	98.596 7	44.976 7
羧化效率 / ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0 024 2	0 086 1	0 087 4	0 033 3	0 071 6	0 008 0	0 036 7	0 105 6	0 066 6	0 071 6

注:测光响应曲线时,叶室 CO_2 浓度为 $370\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$;叶室温度为 (32 ± 2) ;气体流速为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$;测 CO_2 响应曲线时,叶室光照强度为 $1\ 800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

2.2 生长特征

由表 1 可以看出:不同树种和不同起源植株的高度差异显著,并且树种和起源的交互作用对其也有显著影响。由表 2 可以看出:天然起源的梭梭、白刺、霸王的高度显著比人工起源的大,但沙冬青、柠条的差异不显著。人工起源的梭梭株高与柠条的差异不显著,但它们与沙冬青、白刺、霸王的差异显著,且柠条和梭梭的株高最大;天然起源的梭梭株高显著大于其它树种,沙冬青的最低,仅为 76 cm。

不同树种和不同起源的植株地径具有显著性差异,并且树种和起源的交互作用对其也具有显著影响(表 1)。由表 2 可见:天然起源的 5 种沙生灌木的地径均显著比人工起源的大。人工起源的白刺与柠条的地径差异性不显著,梭梭地径最大,而沙冬青最小;天然起源的沙冬青、白刺、霸王之间的地径的差异性不显著,且显著比梭梭、柠条的地径小。

不同树种和不同起源的植株的冠幅具有显著性差异,并且树种和起源的交互作用对其也具有显著影响(表 1)。由表 2 可以看出:天然与人工起源的梭梭、白刺、柠条的冠幅具有显著的差异性,但沙冬青、霸王的差异性不显著。人工起源的梭梭与白刺的冠幅差异性不显著,但它们与其余 3 种灌木的差

异性显著,柠条的冠幅显著大于其它树种;天然起源的梭梭与白刺的冠幅、霸王与柠条的冠幅差异性均不显著,沙冬青的冠幅显著小于其它树种。

3 结论与讨论

沙冬青、梭梭、白刺、霸王、柠条在生理生长指标上存在差异主要是植物自身特性的体现^[3,8]。不同灌木种的遗传性不同,其光合、蒸腾等生理特征及生长表型都有各自的特点,因而它们之间必然存在差异。白刺的光合与蒸腾速率也表现为最大,说明白刺在测定的光合环境下,碳同化和气孔水分损耗强度最大。5 种沙生灌木的水分利用效率在树种间的差异不显著,说明这几种长期生活在荒漠条件下的旱生植物,在形态、解剖构造和生理生化上均体现了对干旱、高温和高光强一系列的适应性;同时 5 种灌木的植株高度、地径及冠幅等生长指标几乎均不一致。

对于不同起源林分的研究,有些研究指出人工林的生长加速度和数量成熟龄都要早于天然林,从而使人工林的寿命小于天然林^[9]。首先在生长指标上,大部分树种的天然起源林分的植株高度、地径及冠幅等大于人工起源;其次净光合速率、蒸腾速率、

气孔导度、水分利用效率、表观量子效率、最大光合速率等光合生理指标大部分表现为天然起源小于人工起源。这些沙生灌木的生理与生长指标在天然与人工起源之间存在差异是由多种因素影响的,可以归纳为以下综合作用:(1)两种起源地立地生态因子存在差异,土壤水分可利用性的差异等生态因子都对植物光合作用具有一定的影响^[10-11];(2)人工林的林分密度较天然林大;(3)两种起源林分植株的成熟度不同,叶子年龄等生育期不同,决定了叶片的营养物质含量不同等;(4)人工林受到更大的管理措施上的干扰,如浇水等。

据此,在乌兰布和沙漠地区 5 种沙生灌木的人工栽培过程中要注重树种的差异。梭梭的光补偿点最高,霸王最低,这样在人工林培育过程中,梭梭不耐遮阴,不适于栽植在乔木林带等附近,而霸王则耐遮阴,比较适于与梭梭等高灌木混交。同时梭梭的 CO₂ 补偿点最低,而霸王的补偿点最高,结合其胞间 CO₂ 浓度的表现也是如此,因而在人工林栽培中,进行 CO₂ 施肥处理可促进梭梭的生长^[12],但其对霸王的作用就不明显。柠条的表观量子效率和最大光合速率都较高,能够有效地利用弱光环境,且在高光强下能够充分利用光能,从光合生产的角度来说,可以进行适度密植,而沙冬青则不适于密植。在天然林培育管理过程中,由于天然沙冬青的表观量子效率小而光饱和点高,需有充足的光照且可利用高光强光能。梭梭和柠条的光补偿点较高,位于群落下方的种子天然更新幼苗会受到极大制约,因而要促进梭梭、柠条天然更新种子传播到空隙地带,保证幼苗有充足的光照;同时霸王、白刺和沙冬青的光补偿点较低,可与梭梭等高灌木混交,因而一定要加强保护

当前梭梭与霸王、白刺、沙冬青等伴生的天然林物种多样性,增强天然林分的稳定性。

参考文献:

- [1] 周海燕,张景光,龙利群,等. 脆弱生态带典型区域几种锦鸡儿属优势灌木的光合特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 227 - 231
- [2] 蒋高明,朱桂杰. 高温强光环境条件下 3 种沙地灌木的光合生理特点[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 525 - 531
- [3] 李清河,刘建锋,张景波,等. 乌兰布和沙漠东北部 8 种沙生灌木生长季末期的光合生理特性[J]. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2318 - 2323
- [4] 邓 雄,李小明,张希明,等. 4 种荒漠植物气体交换特征的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 605 - 612
- [5] 张恒敢,杨四军,顾克军,等. 应用数字图像处理测定作物叶面积的简便方法[J]. 江苏农业科学, 2002(3): 20 - 21, 25
- [6] 刘宇锋,萧浪涛,童建华,等. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J]. 中国农学通报, 2005 21(8): 76 - 79
- [7] Calne I M G R, Thomley J H M. Temperature and CO₂ responses of leaf and canopy photosynthesis: a clarification using the Non-rectangular hyperbola model of photosynthesis[J]. Annals of Botany, 1988, 82: 883 - 892
- [8] Martin C D, Peter R. Interspecific variation in respiratory and photosynthetic parameters in Antarctic bryophytes[J]. New Phytologist, 1997, 137(2): 231 - 240
- [9] 朱教君,曾德慧,康宏樟,等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京:中国林业出版社, 2005
- [10] Ehleringer J R, Cook C S. Photosynthesis in *Encelia farinosa* Gray in response to decreasing leaf water potential[J]. Plant Physiology, 1984, 75: 688 - 693
- [11] 肖文发,徐德应. 森林能量利用与产量形成的生理生态基础[M]. 北京:中国林业出版社, 1999
- [12] 李卫民,周凌云. 水肥(氮)对小麦生理生态的影响()水肥(氮)对小麦叶片细胞间隙 CO₂ 浓度和气孔导度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 271 - 274