

西双版纳区域气候变化对植物生长趋势的影响^{*}

宋富强^{1,4}, 赵俊斌^{1,2,5}, 张一平^{1,2,3**}, 许再富¹, 肖来云¹

(1 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2 中国科学院西双版纳热带植物园

热带森林生态学重点实验室; 3 西双版纳热带雨林生态系统研究站, 云南 勐腊 666303;

4 云南省环境科学研究院, 云南 昆明 650034; 5 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 目前全球变暖已经致使地球上生物群系的格局发生了显著的变化。高纬度地区的植物生长由此变得更加活跃, 而热带地区植物生长的趋势仍然是一个具有争论的问题。西双版纳热带植物园地处中国西南地区, 20 世纪 70 年代以来, 这里气候发生了显著的变化, 其气温以每 10 年 0.18℃ 的速度上升。本研究利用西双版纳热带植物园中的 48 种热带植物 (28 科) 的株高生长数据 (1974~ 2003 年) 来分析其对西双版纳区域气候变化的长期变化响应, 通过对株高与气候因子的相关分析选出对植物株高生长影响最大的气候因子。结果表明, 植物在研究期间的株高生长年间波动比较强烈, 但没有表现出明显的趋势; 植物的株高生长主要受到干热季 (3、4 月份) 的日照时数 (负) 与月均最低气温 (正) 所影响, 而干热季正是这些植物每年开始萌叶的时期; 另外, 降雨并没有对引种植物株高生长产生显著的影响; 从 2 个关键因子的长期变化趋势来看, 西双版纳气候变化将有利于保护植物的生长, 进而将有利于植物园内热带植物的保护与保存。

关键词: 气候因子; 年间变化趋势; 植物株高生长偏差; 西双版纳

中图分类号: Q 948

文献标识码: A

文章编号: 0253-2700 (2010) 06-547-07

Effects of the Regional Climate Change on the Plant Growth Trend in Xishuangbanna

SONG Fu Qiang^{1,4}, ZHAO Jun Bin^{1,2,5}, ZHANG Yi Ping^{1,2,3**},

XU Zai Fu¹, XIAO Lai Yun¹

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China;

2 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden;

3 Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences

Mengla 666303, China; 4 Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China;

5 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: So far as we know, global warming has notably changed the patterns of the biomes on earth. As the increasing activity of plant growth in high latitudes has been confirmed, the plant growth trend in tropics is still a controversial question concerned. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden is located in southwestern China, and the climate here has changed significantly during the past a few decades. As the temperature rose averagely 0.18℃ per ten years since 1970s, how would the plants here respond? Here we used the long-term height plant growth data (1974– 2003) of 48 tropical conserved species from 28 families in the botanical garden to present their inter-annual variation of growth responding to the regional climate change. Correlation analysis between the inter-annual climatic factors and the plant heights were performed to reveal the key cli-

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (30670395)、中国科学院植物园与生物分类研究项目 (KSCX2-YW-Z-004) 和云南省自然科学基金项目 (2004C0053M)

^{**} 通讯作者: Author for correspondence; E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn, Fax: 0871-5160916; Tel: 0871-5160904

收稿日期: 2010-08-09, 2010-10-26 接受发表

作者简介: 宋富强 (1978-) 男, 博士, 研究方向: 生态气候。E-mail: sfg@xtbg.ac.cn

matic factors. Result shows as followed. For the conserved species in Xishuangbanna, inter annual mean plant height varies strongly along years since 1974; however, no significant trend is shown. Height growth of the introduced species is mainly impacted by the sunshine duration (negative) and mean minimum temperature (positive) in dry hot season (March and April), which is the period when these plants begin to flush leaves. Yet, rainfall is not included in these key factors. In the perspective of the trends of the 2 key factors, growth of the plants in the botanical garden is expected to be benefited. And this will also benefit the conservation work for tropical plants in the botanical garden.

Key words: Climatic factors; Inter annual variation trend; Plant height deviation; Xishuangbanna

人类活动使得大气中二氧化碳浓度迅速上升,从而导致了全球变暖的趋势已经成为不争的事实 (Houghton 等, 2001), 气温持续的上升不可避免的改变了全球生态系统碳平衡 (Woodwell and Mackenzie, 1995)。研究表明热带地区植被的净初级生产量 (NPP) 占全球的 36%, 其碳储量占全球 59% (Dixon 等, 1994; Melillo 等, 1993), 热带地区生物群系是全球碳循环过程的关键组成成分。高纬度地区植物受全球变暖的影响后, 生长更加活跃 (Goulden 等, 1996), 然而, 热带地区植物生长的趋势依然是一个值得争论的问题。一些研究表明热带植物生长速率呈上升趋势 (Nemani 等, 2003; Phillips 等, 1998), 而另外一些研究的结果则恰恰相反 (Braswell 等, 1997; Clark 等, 2003)。除气温外, 诸如植物体内生理过程、森林管理、害虫入侵、土壤、光照、降雨等也对热带生态系统中植物生长有显著的影响 (Cao 等, 2004; Churkina and Running, 1998; Clark and Clark, 1999; Davies, 2001; Gamache and Payette, 2004; Huete 等, 2006; King 等, 2005; 李德军等, 2004; Wright and Vanschaik, 1994; Yu 等, 2005)。由于热带地区植物生长趋势及其影响因子十分复杂, 因此热带地区植物对气候变化的响应还需要更多的研究 (Clark and Clark, 1994; Clark 等, 2003)。

位于远东热带森林北缘的西双版纳热带季节雨林是地球上重要的一个碳汇, 拥有很大的碳储量 (吕晓涛等, 2006; Zheng 等, 2006)。由于地处热带北缘地区, 其气温全年均比典型的热带地区较低。西双版纳热带植物园正位于这个地区。过去几十年里, 植物园中保护植物的生长是如何受当地气候变化的影响? 其主要的气候影响因子是什么? 本文利用西双版纳热带植物园中保护植物长期株高生长数据, 对其长期变化趋势与其气

候影响因子进行分析探讨。

1 方法

1.1 样地概况

中国科学院西双版纳热带植物园地处中国西南地区的云南省南部, 属于远东热带地区北缘 (21°41'N, 101°25'E), 海拔 570 m。图 1 显示了该地区 38 年来平均的气候状况 (1974~2003 年)。根据气温与降雨的季节变化, 西双版纳一年可以分为 3 个季节: 5~10 月份为雨季; 11 月至次年 2 月为雾凉季, 降雨较少, 有大雾; 3~4 月为干热季, 气温升高, 少雨 (刘文杰和李红梅, 1997; 张克映, 1966), 通常把雾凉季与干热季统称为旱季。年平均气温为 21.8℃, 月均最高温最高出现在 6 月份 (25.7℃), 月均最低温最低出现在 1 月 (16.0℃), 全年降雨量为 1490 mm 左右, 其中雨季占 84%, 年日照时数总量为 1858.7 h。

保护植物在植物园中专门的园区定植, 由于植物长期于园区内生长, 其植被已有明显的群落结构, 冠层高达 20~30 m。

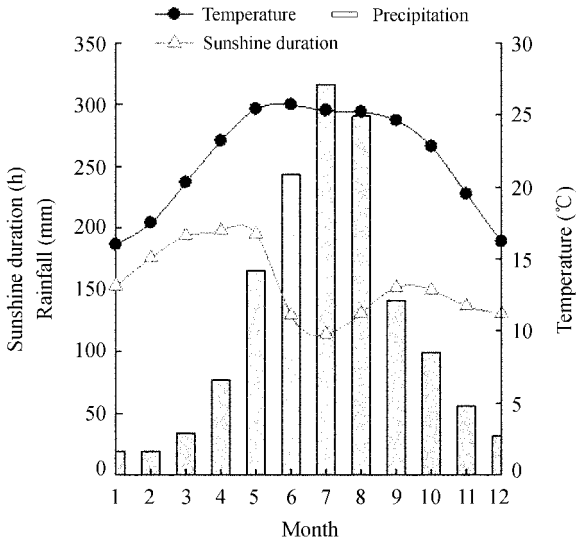


图 1 西双版纳热带植物园气候特征 (1974~2003 年)

Fig 1 Mean annual climatic status in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden (1974-2003)

1. 2 材料

植物株高为从植物基部到顶部的高度 (m)。株高数据包括了西双版纳热带植物园中定植的 48 种热带保护植物 (表 1)。植物株高在栽种以后即开始, 每 5 年进行一次观测, 本研究中所用的 48 种植物的观测区间为 1974~ 2003 年, 每次观测都选在植物生长较慢的 12 或 1 月份。每个植物种选取 10 株同时栽种的个体作为样本, 每次测定 10 株样本的株高, 并记录平均值作为该种植物在该年的株高。观测人员为植物园中园林部工作人员, 使用仪器为树高测定仪。

植物生长主要由当地的气候因子影响。本研究中所选的气候因子包括气温、降雨和日照时数。数据来源于植物园中的气象观测站。气候数据是按照中国气象局 (CMA) 观测要求进行记录。

1. 3 统计方法

植物生长与年龄之间普遍存在 Logistic 关系。本研究用 logistic 函数拟合的方法去除植物自身的生长趋势,

进而分析气候因子对植物株高的影响。计算如下:

$$H_{pr} = d + \frac{a}{1 + (\frac{x}{c})^b} \tag{1}$$

$$H_d = H_{\alpha} - H_{pr} \tag{2}$$

X 为植物年龄; a, b, c, d 为拟合参数。利用式 (1) 对每个植物种进行曲线拟合, 得到预期株高 (H_{pr}), 然后用实测株高 (H_{α}) 减去预期株高即获得株高生长偏差 (H_d , 式 2)。统计表明, 本研究中的所有植物株高生长与年龄之间呈显著 logistic 关系 ($P < 0.05$)。获得的生长偏差 (H_d) 不包含植物自身的生长趋势, 可视为主要由气候所影响。正值表示促进生长, 负值表示抑制生长。将所有种同年的 H_d 进行平均, 得到年间株高变化格局 (图 2: d)。利用 Mann Kendall 检验对气候因子以及株高年间变化格局的趋势显著性进行检验, 并计算其线性回归的斜率作为其变化的平均速率。

为了揭示影响年间株高偏差变化的主要气候因子,

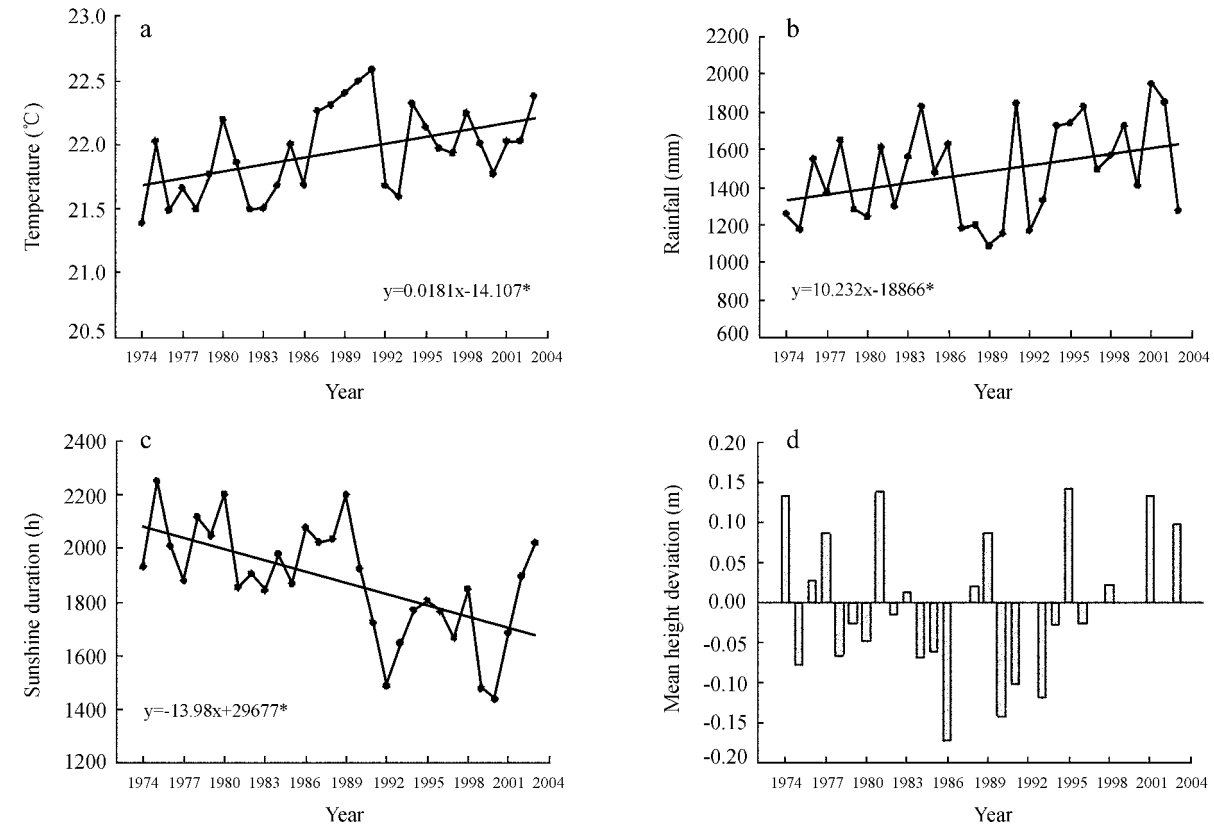


图2 气候及株高生长偏差年间变化 (1974~ 2003 年)。a: 气温; b: 降雨; c: 日照时数; d: 株高生长偏差。

a、b、c 中用一次直线回归函数拟合年间气候变化以得到长期变化趋势,
其拟合公式后 “*” 表示年间变化表现出显著的趋势 ($P < 0.05$)

Fig 2 Inter-annual variations of mean temperature (a), rainfall (b), sunshine duration (c),
and plant height deviation (d) in Xishuangbanna (1974– 2003)

Linear regression lines in (a), (b), (c) represent the long-term trends of the climatic factors and regression formulas are also given.

The significance of the long term trend is noted by “*” at the end of the formulas ($P < 0.05$)

表1 研究植物名录
Table 1 List of the studied species, family

Family	Species	PY	MT	RHD (m)	Family	Species	PY	MT	RHD (m)
Apocynaceae	<i>Cerbera manghas</i>	1981	6	-0.43~-0.45	Lecythidaceae	<i>Barringtonia macrostachya</i>	1960	10	-0.80~-0.62
Aquifoliaceae	<i>Ilex rotunda</i>	1979	6	-0.29~-0.28	Magnoliaceae	<i>Manglietia fordiana</i>	1979	6	-0.07~-0.09
Caesalpiniaceae	<i>Lycidice brevilax</i>	1979	6	-0.93~-0.64	Magnoliaceae	<i>Manglietia moto</i>	1979	6	-0.14~-0.10
Caesalpiniaceae	<i>Lycidice rhodostegia</i>	1979	6	-0.33~-0.47	Magnoliaceae	<i>Paramichelia baillonii</i>	1976	8	-0.40~-0.61
Combretaceae	<i>Terminalia bellirica</i>	1961	8	-0.23~-0.78	Meliaceae	<i>Chukrasia tabularia</i>	1961	8	-0.65~-0.79
Combretaceae	<i>Terminalia chebula</i>	1973	7	-0.84~-0.70	Moraceae	<i>Artocarpus nitidus</i>	1975	7	-0.19~-0.28
Combretaceae	<i>Terminalia hainanensis</i>	1974	8	-0.44~-0.30	Moraceae	<i>Sp.</i>	1974	7	-0.98~-0.67
Cornaceae	<i>Cornus fordii</i>	1978	7	-0.27~-0.29	Oleaceae	<i>Osmanthus matsumuranus</i>	1979	6	-0.14~-0.13
Daphniphyllaceae	<i>Daphniphyllum calycinum</i>	1978	7	-0.08~-0.05	Rhamnaceae	<i>Hovenia dulcis</i>	1978	7	-0.45~-0.42
Dilleniaceae	<i>Dillenia indica</i>	1964	6	-0.41~-0.42	Rosaceae	<i>Pyrus callergana</i>	1979	6	-0.13~-0.17
Dipterocarpaceae	<i>Dipterocarpus retusus</i>	1981	6	-0.13~-0.11	Rubiaceae	<i>Hymenodictyon excelsum</i>	1961	8	-0.37~-0.59
Dipterocarpaceae	<i>Dipterocarpus sp.</i>	1961	7	-0.68~-0.93	Rutaceae	<i>Glycosmis hainanensis</i>	1979	6	-0.07~-0.15
Dipterocarpaceae	<i>Shorea chinensis</i>	1981	10	-0.74~-0.44	Sapindaceae	<i>Arytera litoralis</i>	1973	6	-0.29~-0.37
Dipterocarpaceae	<i>Vatica mangachapoi</i>	1981	10	-0.36~-0.36	Sapindaceae	<i>Lepisanthes rubiginosa</i>	1976	8	-0.67~-0.42
Dipterocarpaceae	<i>Vatica xishuangbannaensis</i>	1981	8	-0.36~-0.43	Sapotaceae	<i>Chrysophyllum cainito</i>	1985	6	-0.14~-0.06
Elaeocarpaceae	<i>Elaeocarpus serratus</i>	1973	6	-0.08~-0.07	Sapotaceae	<i>Lucuma nervosa</i>	1981	6	-0.25~-0.26
Euphorbiaceae	<i>Cleidiocarpus cavalerii</i>	1974	8	-0.78~-0.78	Sterculiaceae	<i>Reevesia pubescens</i>	1981	6	-0.50~-0.33
Euphorbiaceae	<i>Sapium sebiferum</i>	1978	7	-0.56~-0.47	Sterculiaceae	<i>Sterculia villosa</i>	1964	7	-0.30~-0.63
Euphorbiaceae	<i>Vernicia montana</i>	1978	7	-0.18~-0.25	Theaceae	<i>Camellia sp.</i>	1974	8	-0.06~-0.07
Flacourtiaceae	<i>Hydnocarpus hainanensis</i>	1973	6	-0.09~-0.07	Theaceae	<i>Camellia vietnamensis</i>	1974	8	-0.11~-0.16
Hamamelidaceae	<i>Atingia takhtajanensis</i>	1978	6	-0.35~-0.24	Theaceae	<i>Tutcheria hohstenensis</i>	1974	8	-0.40~-0.41
Hamamelidaceae	<i>Liquidambar styraciflua</i>	1975	6	-0.15~-0.19	Theaceae	<i>Camellia gigantocarpa</i>	1974	8	-0.39~-0.19
Lauraceae	<i>Litsea glutinosa</i>	1964	9	-0.96~-0.43	Tiliaceae	<i>Burretiodendr tonkinense</i>	1978	7	-0.24~-0.31
Lauraceae	<i>Litsea garrettii</i>	1975	6	-0.80~-0.78	Ulmaceae	<i>Gironniera cuspidata</i>	1978	7	-0.47~-0.41

PY: 种植年份 planted year; MT: 观测次数 measured times; RHD: 株高生长偏差范围 range of height deviation

我们做了其年间变化格局与气温、降雨和日照时数 3 个因子的相关 (图 3: a), 其中每个因子分 4 个变量 (年平均值和 3 个季节的平均值), 通过其相关系数判断气候因子对株高的影响程度。

2 结果

2.1 地方气候的长期变化

在过去的 30 年, 西双版纳地区的气候发生了显著的变化 (图 2), 本研究所选取的 3 个与植物生长密切相关的气候因子——气温、降雨和日照时数均出现了显著的变化趋势 (通过 Mann Kendall 检验, $P < 0.05$)。年平均气温和降雨分别以 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $102.32\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率上升, 而日照时数的长期变化则呈下降趋势 ($-139.8\text{ h}/10\text{a}$)。同时, 3 个气候因子还呈现明显的年间的波动, 势必对植物生长造成影响。

2.2 植物株高偏差长期变化

本研究中保护植物均出现了不同程度的年间株高偏差波动, 波动范围在 $-0.17\sim 0.14\text{ m}$ 之间 (图 2: d), 最高年平均株高偏差出现在 1995 年 (0.14 m), 最低值出现在 1986 年 (-0.17 m)。经过 Mann Kendall 检验发现, 株高偏差年间变化总体上在过去的 30 年里并没有表现出显著的趋势, 然而从年间波动来看, 植物的生长在 1984~1994 年之间主要受到限制, 而在 1994 年后有加速的趋势。

2.3 气候影响因子

图 3: a 显示了植物株高偏差与各个气候因子的相关关系, 其中有 2 个气候因子达到显著水平 $P < 0.05$ ——干热季的日照时数 (负相关) 和平均最低气温 (正相关), 表明干热季较长的日照时数或较低的气温将限制植物的株高生长, 反之则促进株高生长。这个结果同时也说明西双版纳的干热季 (3~4 月) 是决定植物生长的一个重要时期, 其主要原因将在讨论中着重分析。另外, 相关分析没有显示降雨因子对株高生长造成显著影响。

从两个影响植物株高生长的气候因子的长期变化趋势来看 (图 3: b, c), 干热季平均最低气温的长期变化趋势为 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 并通过了 Mann Kendall 检验表现出显著的趋势, 但干热季的日照时数的长期变化趋势 ($-21.05\text{ h}/10\text{a}$) 并

没有表现出显著减少的趋势。总体上看, 2 个因子的变化趋势均将对植物生长产生促进作用。

3 讨论

植物株高是植物营养生长情况的主要体现之一。众所周知, 植物生长的年间波动受到区域气候的影响很大。由于气温的上升, 部分热带地区的研究表明 1990 年以来植物生长受到抑制 (Braswell 等, 1997; Clark 等, 2003)。本研究中所选取的 48 种热带植物在观测的 29 年中 (1974~2003 年), 其株高生长并没有表现出明显趋势 (图 2: d)。结果表明, 这些植物的株高生长主要受到西双版纳地区干热季 (3~4 月份) 的日照时数及月均最低气温 2 个气候因子共同作用, 且两个因子对植物生长的作用刚好相反 (图 3)。

干热季的日照时数对植物生长起到抑制的作用, 即该时期较长的日照时数将导致相应年份植物生长量较小。在西双版纳, 干热季 (3~4 月) 气温相对较低、降雨较少 (图 1), 而这个时期天气晴朗, 日照时数较长, 可以加大植物的蒸腾作用, 从而加重干旱程度, 抑制植物生长。本研究日照时数的作用与已有研究结果截然相反 (Fan 等, 1990; Huete 等, 2006; Nemani 等, 2003), 其原因是已有研究的理论与假设都是建立在水分充足的条件下, 可见日照时数主要还是通过水分因子来间接地对植物生长产生作用, 然而其中机理还有待进一步研究。从长期变化趋势来看 (图 3: b), 干热季日照时数以 $21.0\text{ h}/10\text{a}$ 的速率下降, 虽然该趋势变化并没有达到显著水平, 但从长远来看, 同样将有利于植物的生长。

在西双版纳, 干热季之所以是决定植物生长的关键时期, 主要是由于 4 月份刚好是西双版纳多数植物开始萌叶的时期。研究表明 (赵俊斌等, 2009), 西双版纳热带北缘的地理位置, 决定了其气温较典型热带地区低的特征, 而 4 月份气温的回升则使得多数植物开始进入生长季, 这也正是干热季平均最低温是决定植物生长的关键因子之一的原因, 且最低温越高植物生长量越大, 即干热季较低的低温会对植物生长产生限制, 从而对植物生长有较大影响。哥斯达黎加地区的研究结果表明, 月平均最低气温对植物生长起限制作用 (Clark 等, 2003), 与本研究不尽一

致。相比西双版纳地区最冷月平均最低温仅为 12 1℃，哥斯达黎加最冷月平均最低气温则在 20℃以上，这也是两地平均低温对植物生长影响不同的原因。从长期变化趋势来看（图 3: c），干热季月均最低气温表现出显著的上升趋势（0.4℃/10a），这也将有利于植物在西双版纳的生长。总体来看，气候的变化趋势将有利于西双版纳植物园内保护植物的生长，进而有利于植物园内热带植物的保护与保存。

另外，西双版纳旱季期间，降雨量很低，仅占全年降雨量的 15%（图 1），但却没有对植物生长产生显著影响，可见旱季虽然少雨，但仍然在植物承受范围之内，从而使植物生长更加受控于低温与日照时数；其次，西双版纳旱季早晨的大雾对植物所需水分的补充有一定的作用（刘文杰和李红梅，1997）。因此，旱季的干旱并没有对植物生长产生显著影响。

西双版纳特殊的地理位置与气候条件决定了其植物生长响应的特殊性，而干热季的气候条件对植物生长有较强的影响。因此，在未来的研究与森林管理方面，应加强干热季气候变化对植物影响的评估。

然而，之前的研究表明，西双版纳地区气候变化对植物生长变化的贡献有限（宋富强等，2009），即不能忽视其他非气候因素对植物生长的影响，如生物因素（如个体之间对光资源的竞争）、空气中二氧化碳等气体浓度的变化以及人为的干扰作用等，这些同样会对植物生长产生一定作用，且可能通过气候因素间接作用于植物，而这些作用的评估则需要进一步研究。

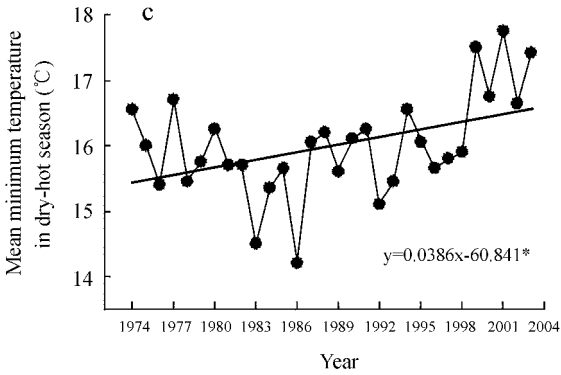
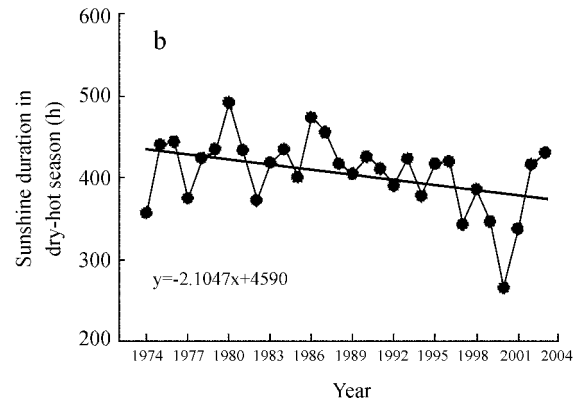
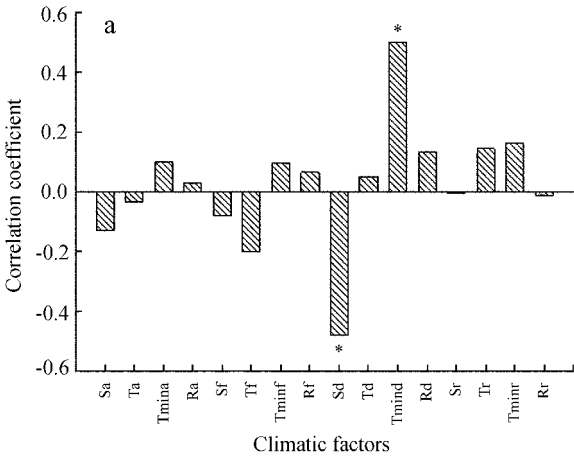


图 3 年间株高生长偏差与气候因子的相关系数 (a) 和显著相关因子的长期变化趋势 (b, c)

Sa: 年日照时间; Ta: 年均气温; Tmina: 年均最低气温; Ra: 年降雨量; Sf: 雾凉季日照时间; Tf: 雾凉季平均气温; Tminf: 雾凉季平均最低气温; Rf: 雾凉季降雨量; Sd: 干热季日照时数; Td: 干热季平均气温; Tmind: 干热季平均最低气温; Rd: 干热季降雨量; Sr: 雨季日照时间; Tr: 雨季平均气温; Tminr: 雨季平均最低气温; Rr: 雨季降雨量。其中相关系数达到显著的因子以“*”标注 ($P < 0.05$)。b、c 中用一次直线回归函数拟合显著相关因子的年间变化以得到其长期变化趋势 (1974~2003)，其拟合公式后“*”表示年间变化表现出显著的趋势 ($P < 0.05$)

Fig 3 Correlation coefficients between plant height deviation and climatic factors are shown in (a)

Sa, annual sunshine duration; Ta, annual mean temperature; Tmina, annual mean minimum temperature; Ra, annual rainfall; Sf, sunshine duration in fog cool season; Tf, mean temperature in fog cool season; Tminf, mean minimum temperature in fog cool season; Rf, rainfall in fog cool season; Sd, sunshine duration in dry hot season; Td, mean temperature in dry hot season; Tmind, mean minimum temperature in dry hot season; Rd, rainfall in dry hot season; Sr, sunshine duration in rainy season; Tr, mean temperature in rainy season; Tminr, mean minimum temperature in rainy season; Rr, rainfall in rainy season. The significant coefficients are figured out by “*” ($P < 0.05$). Inter annual variations of the significant factors are shown in (b) and (c). Linear regression lines represent their long-term trends and regression formulas are also given (1974~2003) with a “*” to denote the significance of the trends ($P < 0.05$)

致谢 本研究的株高生长数据由西双版纳热带植物园园林部和档案室提供, 气候资料由西双版纳热带植物园生态站提供。

〔参 考 文 献〕

- Braswell BH, Schimel DS, Linder E *et al.*, 1997. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. *Science*, 278: 870
- Cao M, Prince SD, Small J *et al.*, 2004. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 [J]. *Ecosystems*, 7: 233–242
- Churkina G, Running SW, 1998. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes [J]. *Ecosystems*, 1: 206–215
- Clark DA, Clark DB, 1999. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management [J]. *Ecological Applications*, 9: 981–997
- Clark DA, Clark DB, 1994. Climate-induced annual variation in canopy tree growth in a Costa Rican tropical rain forest [J]. *Journal of Ecology*, 82 (4): 865–872
- Clark DA, Piper SC, Keeling CD *et al.*, 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984–2000 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 5852–5857
- Davies SJ, 2001. Tree mortality and growth in 11 sympatric *Macaranga* species in Borneo [J]. *Ecology*, 82: 920–932
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA *et al.*, 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 263: 185–190
- Fan SM, Wofsy SC, Bakwin PS *et al.*, 1990. Atmosphere biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon forest [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 95: 16851–16864
- Gamache I, Payette S, 2004. Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest tundra of eastern Canada [J]. *Ecology*, 92: 835–845
- Goulden ML, Munger JW, Fan SM *et al.*, 1996. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability [J]. *Science*, 271: 1576
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ *et al.*, 2001. Climate Change 2001: the Scientific Basis [M]. UK: Cambridge University Press
- Huete AR, Didan K, Shimabukuro YE *et al.*, 2006. Amazon rainforests green up with sunlight in dry season [J]. *Geophysical Research Letter*, 33: L06405
- King DA, Davies SJ, Supardi MNN *et al.*, 2005. Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia [J]. *Ecology*, 19: 445–453
- Li DJ (李德军), Mo JM (莫江明), Fang YT (方运霆) *et al.*, 2004. Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24: 876–882
- Liu WJ (刘文杰), Li HM (李红梅), 1997. Tourism climatic resources in Xishuangbanna [J]. *Natural Resources* (自然资源), 2: 62–66
- Lu XT (吕晓涛), Tang JW (唐建维), Yu GR (于贵瑞) *et al.*, 2006. Carbon storage and distribution of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Yunnan [J]. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 24: 277–283
- Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW *et al.*, 1993. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 363: 234–240
- Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H *et al.*, 2003. Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 300: 1560–1563
- Phillips OL, Malhi Y, Higuchi N *et al.*, 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots [J]. *Science*, 282: 439
- Song FQ (宋富强), Zhang YP (张一平), Hu JX (胡建湘) *et al.*, 2009. The influences of shooting duration and climate factors on plant height growth [J]. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 31 (2): 178–182
- Woodwell GM, Mackenzie FT, 1995. Biotic feedbacks in the global climatic system: will the warming feed the warming? [M]. Oxford University Press, USA
- Wright SJ, Vanschaik CP, 1994. Light and the phenology of tropical trees [J]. *American Naturalist*, 143: 192–199
- Yu DP (于大炮), Wang SZ (王顺忠), Tang LN (唐立娜) *et al.*, 2005. Relationship between tree ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 16: 14–20
- Zhang KY (张克映), 1966. Climatic characteristics and its cause of formation in Southern Yunnan, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 33: 210–230
- Zhao JB (赵俊斌), Zhang YP (张一平), Song FQ (宋富强) *et al.*, A comparison of the phenological characteristics of introduced plant species in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden [J]. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学报), 44: 464–472
- Zheng Z, Feng ZL, Cao M *et al.*, 2006. Forest structure and biomass of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Biotropica*, 38: 318–327