

西双版纳热带季节雨林地温特征^{*}

高举明^{1,4} 张一平^{1**} 于贵瑞² 宋清海¹ 杨振^{1,4} 孙晓敏² 赵双菊³

(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ²中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ³云南省建筑材料科学研究设计院, 昆明 650223; ⁴中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 地温是森林气候重要的环境因素之一,与植物生长密切相关,且是影响土壤呼吸的关键因素。适宜的地温能够促进土壤微生物活动,加速凋落物分解,提高土壤肥力,对地温的深入研究有利于正确把握森林碳通量的变化规律。本文利用西双版纳热带季节雨林2003—2006年的地温数据,分析不同深度地温的日变化、季节变化及年际变化规律。结果表明:近地层地温呈现正弦变化趋势;深层地温相对稳定,随深度增加地温日变幅减小;地温峰值出现时刻随深度增加而呈现滞后现象,相位变化明显;地温季节差异明显,平均地温在雨季(5—10月)较高,雾凉季(11月—翌年2月)较低,干热季(3—4月)居中,地温垂直变化季节差异显著;地温年变化呈现单峰分布,最低值在1月,最高值出现在7月;总体来看,热带季节雨林地温变化强度为地温年较差 > 地温年间变幅 > 不同深度间地温变幅 > 地温日较差。

关键词 地温; 西双版纳; 热带季节雨林

中图分类号 S718 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2008)06-0880-08

Characteristics of soil temperature in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. GAO Ju-ming^{1,4}, ZHANG Yi-ping¹, YU Gui-ru², SONG Qing-hai¹, YANG Zhen^{1,4}, SUN Xiao-min², ZHAO Shuang-ju³ (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³Yunnan Building Materials Science Research and Design Institute, Kunming 650223, China; ⁴Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 880-887.

Abstract: Soil temperature is an important environmental factor in forest, which not only closely relates with plant growth, but also influences soil respiration. An optimal soil temperature can improve soil fertility via promoting soil microbial activity and litter decomposition. Therefore, the study on soil temperature will be helpful to understand the changes of carbon flux in forest ecosystem. Based on the data from 2003 to 2006 in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, the diurnal, seasonal, and inter-annual variations of soil temperature at different depths were analyzed, and the results indicated that the diurnal variation of soil temperature in near-surface soil layer demonstrated a sine trend, while that in deeper soil layers was relatively stable. With the increase of soil depth, the variation magnitude of soil temperature decreased, the peak of soil temperature lagged behind, and the phase change was obvious. The seasonal variation of soil temperature was obvious too, with the highest value in rainy season (May to October), lowest value in foggy-cool season (November to the next February), and intermediate value in dry-hot season (March to April). Different soil layers were different in the seasonal variation of soil temperature. The inter-annual variation of soil temperature was a single-peak curve, with the lowest temperature in January and the highest temperature in July. Generally speaking, the variation range of soil temperature was decreased in the order of yearly soil temperature > inter-annual soil

*国家自然科学基金项目(40571163)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ9X2-YW-432-1)、国家重点基础发展规划项目(2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-01A)。

**通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2007-09-04 接受日期: 2008-01-20

temperature > soil temperature among different soil layers > diurnal soil temperature

Key words: soil temperature; Xishuangbanna; tropical seasonal rain forest

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的生命支持系统,而森林作为陆地生态系统的主体,在全球碳循环中起着极其重要的作用,同时森林生态系统的生产、呼吸等生态过程都受到温度的制约(王森等,2004)。对森林温度特征的研究,是揭示森林生态系统功能和评估森林对环境综合效益的基础(杜颖等,2007;吴家兵等,2002)。在20世纪中叶,Geiger(1965)就开展了欧洲赤松林气温日变化研究,随之,后人也作了大量的相关工作,对森林温度特征认识逐步深化。

地温和土壤积温是一种重要的热量资源,它影响植物种子的萌发、生长发育、开花和结果,特别是对根系活动以及各种酶的活动影响极大(刘玉洪,1993;杜尧东等,2005)。地温还制约着土壤中多种理化和生物作用的速率,从而影响植物生长。林内地温和植物生长有直接关系,特别是对植物的蒸腾、根的呼吸、土壤微生物的活动、凋落物的分解以及土壤肥力等均有重要作用。另外,土壤温度及土壤含水量直接影响着土壤中微生物、地面凋落物及腐殖质的呼吸作用,对夜间生态系统净 CO_2 交换有着重要的作用。因此,地温是表征植物生产能力的重要参数之一,生态系统的光合、呼吸和生物量积累等碳循环过程都受温度的制约。

一般认为,在水分等不构成限制因素的条件下,温度是控制生态系统呼吸季节变化的重要环境要素(Lloyd & Taylor, 1994; Moncrieff & Fang, 1999)。全球温度升高会使分解作用受低温限制的地区(如北方森林和苔原地区)减少,扩大全球土壤呼吸的范围,加快 CO_2 从土壤中的释放。为准确估计生态系统呼吸的季节过程与年呼吸量,首先应考虑夜间生态系统呼吸与温度间的关系。虽然生态系统呼吸随温度呈指数增加的趋势得到了广泛的认同,但是对于特定类型的生态系统,以何处的温度作为环境指标,并没有明确的结论,地温(Black *et al*, 1996; Goulden *et al*, 1996; Barford *et al*, 2001)、气温(Valentini *et al*, 1996; Greco & Balldocchi, 1996)、地温和气温的加权平均(Balldocchi *et al*, 1997)、树干温度(Aubinet *et al*, 2001)等环境指标都被应用。热带雨林群落结构复杂,分层明显,各层林冠获取的光强异质性较大,这势必也会影响到林下地温的变

化;另外,在不同季节,由于部分植物落叶,以及新老叶片截获光照的能力有所差异,势必造成林下地温的季节变化。

碳循环是生物圈健康发展的重要标志(Gupta & Singh, 1981), CO_2 通量是生态系统碳循环最为重要的特征量之一,决定陆地生态系统 CO_2 通量的生理生态学过程是植物(含光合细菌)的光合作用和生物(动植物和微生物)呼吸作用。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分,而地温是影响土壤呼吸最主要因子(Moore & Knowles, 1989; Moore & Dalva, 1993; Kirschbaum, 1995),研究经证实土壤呼吸与地温呈正相关(Mathes & Schriefer, 1985; Moore & Knowles, 1989; 王森等, 2003),因此探讨森林的地温特征,对深入研究森林的土壤呼吸和植物初级生产力变化以及碳循环过程均具有重要意义。

西双版纳地处北回归线以南,终年受西南季风控制,属热带季风气候,热带季节雨林是该地区重要的森林类型之一。热带雨林是目前生态系统碳收支研究关注的重点,而土壤温度的变化在某种程度上影响着该区域的碳收支平衡,因而对地温的深入研究有利于正确回答该地区碳源汇的问题。单从纬度来说,西双版纳很难形成大片的热带雨林,但是在该地区独特的气候条件(年雾日 > 170 d, 平均风速 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、太阳高度及林窗边缘共同影响下,该地区形成了独特的热带季节雨林,并且林窗区域气温、地温差有明显的季节差异(张一平等, 2004; 窦军霞等, 2005; Dou *et al*, 2006)。5 cm地温与土壤呼吸速率最相关(Gordon *et al*, 1987; 沙丽清等, 2004),虽然目前对该地区的生物量、风、太阳辐射等有了较深入的研究,但对热带季节雨林地温的变化规律的研究尚不多见。本文通过实测资料,对西双版纳热带季节雨林不同层次地温的时空分布开展研究,探讨其热带季节雨林土壤温度的变化特征,以期为深入研究热带雨林的植物更新与生长规律以及热带森林碳循环提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

观测点位于云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内(21°57'N, 101°12'E, 海拔 756

m),距中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站约 10 km。本区位于热带的北缘,一年中有雾凉季(11月—翌年 2 月份)、干热季(3—4 月份)、湿热季或雨季(5—10 月)之分(张克映,1966),太阳辐射年总量 5000~5600 MJ·a⁻¹ 年均日照时数 1787.8 h,年均温 21.4℃,最热月均温 25.3℃,最冷月均温 15.6℃。年均降雨量为 1557 mm,但分布不均,雨季降水占全年的 83%左右。该地区独特的天气现象为雾日较多,年雾日可达(258±58)d,在雾凉季月平均雾日均超过 23 d,最多的 1 月可达 26.1 d(刘文杰,2004);一般在夜间 22:30 左右开始起雾,直到第 2 天 12:00 以后才逐渐消散;与雾凉季相比,干热季的雾生成时刻较迟,维持时间较短,一般在 23:00 之后才开始起雾,而在 10:00 左右就逐渐消散。

观测样地林分平均高度 35 m 左右,郁闭度为 90%,结构复杂,分层现象明显,乔木层冠层按高度可分为 3 层:上层高 30 m 以上,优势种主要为绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*);中层高度在 16~30 m,常见种有云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树(*Girardinia subaequalis*)等;下层高 16 m 以下,主要种包括云树(*Garcinia cowa*)、假广子(*Knema erratica*)、细罗伞(*Ardisia tenera*)等;林中藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著(Cao et al.,1996;任泳红等,1999)。

1.2 研究方法

利用 ChinaFlux 设置在西双版纳热带季节雨林

的常规气象观测系统中 2003—2006 年地温观测数据,在 5、10、15、20、40 cm 中设置温度传感器为 105 T Thermocouple Probe (CAMPBELL SCIENTIFIC, USA);在 60、80、100 cm 中设置的温度传感器为 107 L (CAMPBELL SCIENTIFIC, USA)。数据为自动记录的 30 min 数据。通过分析各层土壤温度的日变化、季节变化和年际变化以及地温垂直变化和变率分析来探讨地温的时空分布特征。

由于 2005 和 2006 年 60 cm 处土壤传感器出现异常,数据明显超出地温波动范围,依据合理剔除野点的原则,本次研究剔除了这 2 年 60 cm 处的异常数据,60 cm 处地温主要采用 2003 和 2004 年 2 年的数据。

2 结果与分析

2.1 地温时空分布特征

图 1 为不同年份热带季节雨林地温的时空变化,由图 1 可以看出,不同年间热带季节雨林地温分布趋势十分相似,在 40 cm 以上近地面层日变化较明显,其下的深层地温日变化很小,接近于恒值。因此,以下的分析中,主要使用 4 年的平均值。

图 2 为 40 cm 以上各层平均地温的日变化。可见,各层地温均呈现正弦变化,愈靠近表层这个变化趋势愈明显,地温的最低值和最高值出现时刻随深度增加呈现滞后现象(表 1),显示了不同深度地温日变化的相位存在明显差异,但是随着深度的增加,其变幅急剧减小,到 40 cm 变幅已趋于 0。

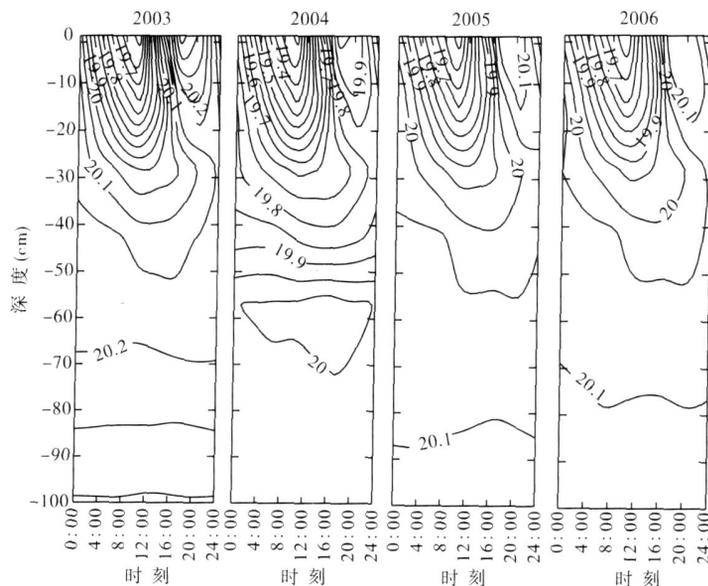


图 1 平均地温时空变化

Fig 1 Spatial and temporal variations of mean soil temperature

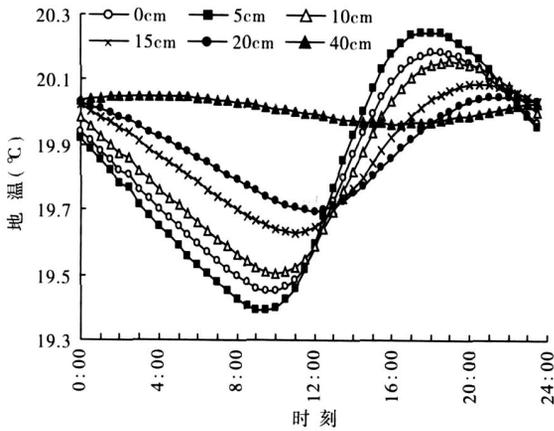


图 2 2003—2006年平均地温日变化
 Fig 2 Diurnal variations of soil temperature during 2003-2006

表 1 不同深度地温最高、最低值及出现时刻(北京时间)
 Tab 1 Maximum and minimum soil temperature and corresponding time in different depth

深度 (cm)	地温		地温	
	最低值()	时刻	最高值()	时刻
0	19.5	09:30	20.2	18:30
5	19.4	09:00	20.2	18:00
10	19.5	10:00	20.2	19:00
15	19.6	11:00	20.1	20:30
20	19.7	12:00	20.1	21:30

表 1为不同深度地温最高、最低值以及它们出现的时刻,由此可见,0 cm处地温在 9:30达到最低值(19.5),而在 18:30达到最高值(20.2);其

下地温的最低值和最高值均向后推移,20 cm处的地温的位相与 0 cm相比,已推迟了约 3 h;40 cm处地温虽然还有一定的变幅,但其地温变化已经很小,接近恒值,全天温度均在 20.0 左右。

图 3为不同月份各时平均地温的变化。由图 3可以看出,地温不同深度的日变化和年变化呈现相似的变化特征,在各深度其年变化均大于日变化。

2.2 不同季节地温变化特征

图 4显示了不同季节平均地温的垂直变化。从图 4可见,雾凉季(11月—翌年 2月)不同深度的地温均最低,并呈现随深度增加,地温升高的垂直变化特征;干热季(3—4月)各深度的平均地温值高于雾凉季,但低于雨季前期(5—7月)和后期(8—10月),其垂直变化不大,呈现随深度增加略有降低的趋势;在雨季前期,在深度 40 cm以上,其平均地温为最高,呈现随深度增加地温降低的垂直变化特征,并且其变率较明显;到了雨季后期,40 cm以下平均地温最高,垂直变化表现为 40 cm以上地温基本上不随深度变化而变化,而 40 cm以下随深度增加而减小。

进一步分析不同季节昼间和夜间平均地温的垂直变化(图 5),从图 5可见,在雾凉季,昼间和夜间地温均呈现随深度增加,地温升高的趋势。但昼夜温差差异均不大,并且仅在 20 cm以上,夜间的平均地温略高于昼间。在干热季和雨季前期,地温的垂

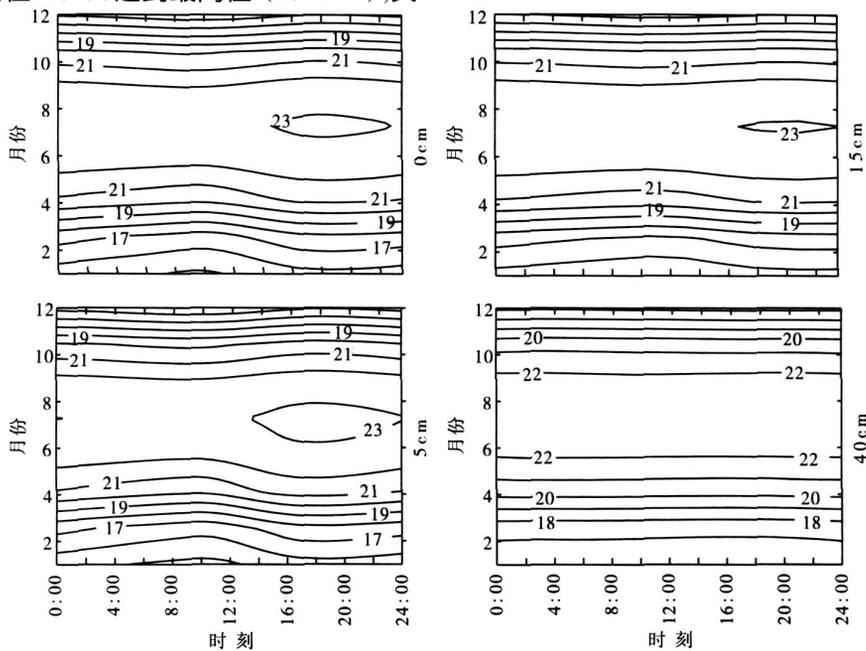


图 3 热带季节雨林地温时间变化
 Fig 3 Temporal variations of average soil temperature in a tropical seasonal rain forest

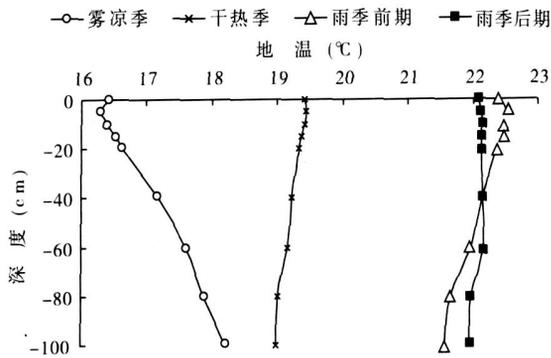


图 4 各季节平均地温垂直变化
 Fig 4 Vertical variations of average soil temperature in each season

直变化呈现表层土壤温度高,深层土壤温度低的变化趋势。但是雨季前期昼夜地温差异较小,而干热季 40 cm 以上夜间的地温大部分高于日间,特别在 10~20 cm 层,夜间地温远高于日间。在雨季后期,60 cm 以上,地温呈现随深度增加,地温升高的趋势;而其下则呈现随深度增加,地温降低的特征,并且在 10~40 cm,夜间的地温要高于日间。

综合年平均地温的垂直变化(图 6),对于年平均地温,总体上呈现随深度增加地温升高的趋势,但昼间的平均地温在 20 cm 以上,垂直变化不明显,并且低于夜间平均地温;而夜间平均地温的变化与昼

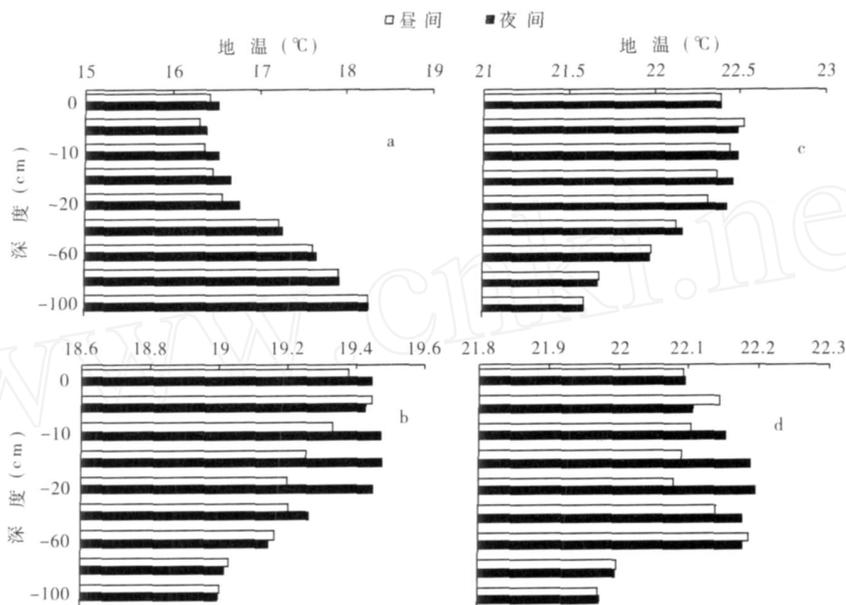


图 5 各季节平均地温垂直分布
 Fig 5 Vertical distributions of average soil temperature in each season
 a 雾凉季; b 干热季; c 雨季前期; d 雨季后期

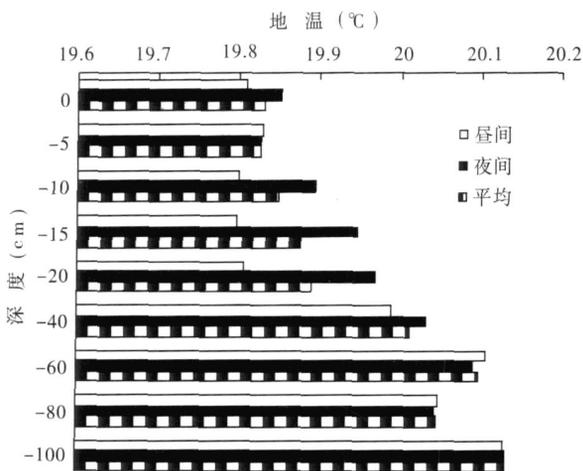


图 6 年平均地温垂直分布
 Fig 6 Vertical distribution of annual average soil temperature

间相反,呈现显著的垂直变化,导致日平均地温同样呈现了较明显的垂直变化。另外,图 6 同样显示了地温的昼夜差异,仅在 40 cm 以下差异不明显。

2.3 平均地温的年变化特征

图 7 为各观测深度的平均地温年变化。由图 7 可见,不同深度的地温日变化趋势相似,均呈现单峰分布。最低值出现在 1 月,而最高值出现在 7 月。在 3—9 月,近地层的地温较高,而在 10 月—翌年 2 月,深层地温较高。

2.4 地温的变率

为准确掌握热带季节雨林地温的变化特征,利用逐时平均地温,求算了 1 d 中不同深度地温的最高和最低值;利用逐日的平均地温值,求算了 1 年中不同深度地温的最高和最低值;并且利用 4 年逐日

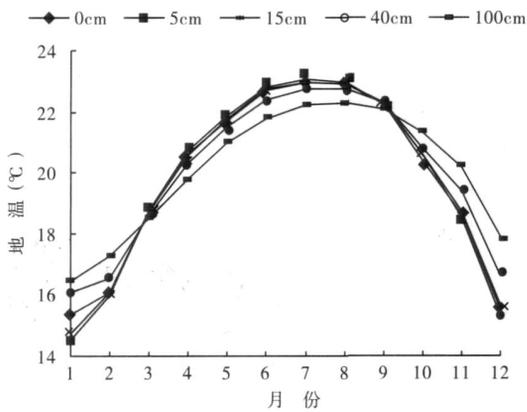


图 7 平均地温年变化
Fig 7 Monthly variation of average soil temperature

的日平均地温,求算了 4 年中的不同深度地温的最高和最低值,进而得到了地温的日较差、年较差、年间差(表 2)。

由表 2 可以看出,日较差在 0 ~ 0.8 波动,40 cm 以下日较差接近于 0,地温恒定;年较差波动范围最大(5.3 ~ 9.4);年间差介于中间,在 1.7 ~ 4.9 波动。表层日较差、年较差、年间差均大于深层土壤,随着深度的增加差值逐渐减小。

图 8 为热带季节雨林地温最大、最小值的垂直变化。由图 8 可见,在各深度地温的日变化中,日最高地温呈现随深度增加降低的趋势,但垂直变化不明显;日最低地温则呈现较显著的垂直变化,但变幅(日较差)不大(表 2),特别在 40 cm 以下,其地温日较差已趋近于 0。对于不同深度地温的年变化,同样显示了年最低地温随深度增加而增高,而最高地温基本不变的趋势。但是其地温的年较差(表 2)在各深度均有较大值,在近地层较大,深层略小。对于各年间的相同深度的最大、最小地温差,最大地温差显示出较大的值(1.7 ~ 4.9),随深度增加地温差呈现减小趋势;而最小地温差均不大,其变幅(表 2)同样显示了近地层较大,深层较小。

表 2 各层地温变幅比较 ()
Tab 2 Comparison of temperature variation amplitude of each soil layer

深度 (cm)	日较差	年较差	年间差
0	0.7	9.1	4.8
5	0.8	9.4	4.9
10	0.7	9.2	4.7
15	0.5	8.8	4.5
20	0.4	8.6	4.3
40	0.1	7.4	3.5
60	0.0	6.8	1.8
80	0.0	5.7	1.7
100	0.0	5.3	2.0

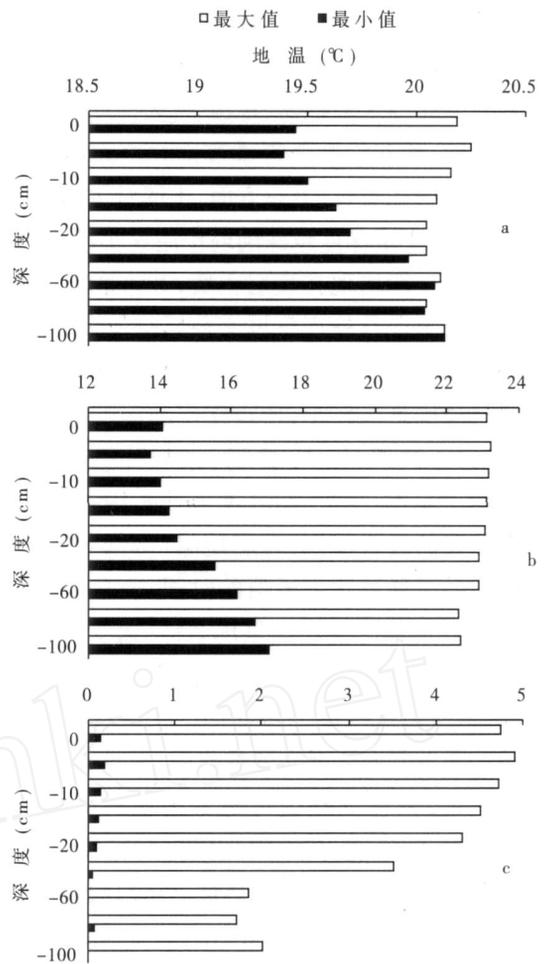


图 8 热带季节雨林最高、最低地温垂直分布
Fig 8 Vertical distributions of the maximum and minimum soil temperature in a tropical seasonal rain forest
a 日变化; b 年变化; c 不同年间温差。

通过比较各变幅的最大值,可以得到热带季节雨林地温的变化排序:地温年较差(9.4) > 地温年间变幅(4.9) > 不同深度间地温变幅(3.9) > 地温日较差(0.8)。

3 讨论

森林内的地温是森林气候重要的环境因素之一,它的变化不仅受太阳辐射的支配,而且还受林冠阻截再分配的影响。影响地温升降的因素可分为 2 类,即影响土壤表面吸热的各种因素和影响土壤热量散失的因素。前者主要是气象和地理因素,后者主要是土壤因素。地温是控制土壤呼吸作用最为重要的环境因子之一。如果没有水分和养分的限制,生态系统净初级生产力(NPP)和有机质分解均可由于温度的升高而提高。研究表明,有机质分解可能比 NPP 更易被全球变暖所促进(Kirschbaum, 1995)。

土壤是由大小不同的固相颗粒按不同比例组合而成的,土壤对水分和热量均具有吸收作用。土壤温度的日变化与太阳辐射、日照、气团活动等要素有关。一方面,西双版纳热带季节雨林内太阳辐射被各层植被反射和吸收;另一方面,土壤对太阳辐射也有削弱作用,土壤深度越深削弱作用越明显,因而土壤的最高温一般出现在表层土壤,并且表层土壤由于受太阳辐射以及昼夜气温交替影响较大,地温呈现出明显的日变化特征(图 1,图 2);而深层土壤受到外界环境的影响较小,使得深层地温的昼夜变化较小,接近于恒值(图 1,图 2),这与其他热带地区的研究结果基本一致(Lloyd & Taylor, 1994)。由于土壤对热量的吸收作用,表层地温达到极值的时间要稍稍落后于气温达到极值的时间,并且日温度最高值出现时刻随深度增加呈现后移(表 1和图 2),这与吴家兵等(2002)在长白山阔叶红松林的研究结果完全一致。

植物覆盖具有降低地温的作用,炎热的夏季,太阳直射大地,浓密的林冠可把太阳辐射的 20% ~ 25% 反射到天空,把 35% 的太阳辐射吸收,同时树木的蒸腾作用可吸收大量的热量。在西双版纳雾凉季和干热季,热带季节雨林不同深度地温均低于雨季(图 4)。其原因是由于干季的平均温度以及太阳辐射均比雨季要低(张一平等, 2005; 窦军霞等, 2006)。在该时期,热带季节雨林中的许多树种会出现集中落叶现象,使得植被覆盖度减小、叶片老化,导致森林蒸腾作用降低(Zhang, 2006)。另外,雾凉季气温为全年中最低,地温也会随之下降。在雨季,太阳辐射较强,气温较高,雨水充沛,土壤含水量较高,疏松湿润的土壤有利于吸收太阳辐射,从而地温也较高。

地温会影响植物残体的分解量、分解强度和泥炭物质聚集。地温越高,越有利于有机质的分解。Bubier等(1995)研究表明,地温与 CH_4 和 CO_2 排放呈正相关。土壤 5 cm 地温较低且含水量较高,有机物质的积累速度大于分解速度,因此会导致生态系统成为碳汇。本研究显示 5 cm 地温日变化呈现明显的正弦变化规律:在 9:00 左右达到最低值,而在 18:00 左右达到最高值(表 1),相对气温日变化来说存在明显的滞后现象,并且其日变化幅度(日较差)较小(0.8),在进行土壤呼吸计算时需要注意这一现象。

各个季节地温的垂直变化存在较大差异(图

4),雾凉季随深度增加地温升高,显示了土壤是作为热源,热量从深层传递到表层;而干热季恰恰相反,随深度增加地温呈现降低趋势,表明土壤作为热汇,热量从表层向深层传递。

Keith等(1997)在堪培拉西部 50 km 处雪松林的研究发现,10 cm 处的地温在 1 年内的绝大部分时间均低于 0 cm 处的地温,特别在夏季差异显著。本研究表明,热带季节雨林的月平均地温在浅层差异不明显(图 8),在干季 0 cm 地温还略高于 10 cm 地温;雨季则反之。本研究表明,不同深度的地温年变化趋势相似,均呈现单峰分布,最低值出现在 1 月,而最高值出现在 7 月。这与 Tang等(2005)在加利福尼亚州橡树-草热带稀树草原生态系统内的研究结果相似。

致谢 本研究得到了中国科学院西双版纳热带森林生态系统定位研究站的大力支持,刘梦楠同志参加了观测数据的记录工作,在此表示感谢。

参考文献

- 窦军霞,张一平,刘玉洪,等. 2005. 西双版纳热带次生林林窗辐射特征初步研究. 热带气象学报, 21(3): 293-300.
- 窦军霞,张一平,赵双菊,等. 2006. 西双版纳热带季节雨林辐射垂直分布特征. 北京林业大学学报, 28(2): 15-21.
- 杜尧东,刘锦奎,何健. 2005. 广州地区蔬菜田土壤温度变化特征及其预报模型研究. 生态学杂志, 24(9): 1021-1024.
- 杜颖,关德新,殷红,等. 2007. 长白山阔叶红松林的温度效应. 生态学杂志, 26(6): 787-792.
- 刘文杰,张一平,李红梅,等. 2004. 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究. 植物生态学报, 28(2): 264-270.
- 刘玉洪. 1993. 哀牢山北段山地的地温气候资源分析. 自然资源学报, 8(2): 158-165.
- 任泳红,曹敏,唐建维,等. 1999. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, 23(5): 418-425.
- 沙丽清,郑征,唐建维,等. 2004. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(增刊): 167-174.
- 王淼,韩士杰,王跃思. 2004. 影响阔叶红松林土壤 CO_2 排放的主要因素. 生态学杂志, 23(5): 24-29.
- 王淼,姬兰柱,李秋荣,等. 2003. 地温和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 14(8): 1234-1238.
- 吴家兵,关德新,代力民,等. 2002. 长白山阔叶红松林夏季温度特征研究. 生态学杂志, 21(5): 14-17.
- 张一平,窦军霞,刘玉洪,等. 2004. 热带季节雨林林窗辐射特征研究. 应用生态学报, 15(6): 929-934.

- 张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 2005. 西双版纳热带季节雨林地太阳辐射特征研究. 北京林业大学学报, **27**(5): 17-25.
- Aubinet M, Chemanne B, Vandenhaute M, *et al* 2001. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes *Agricultural and Forest Meteorology*, **108**: 293-315.
- Baldocchi DD, Vogel CA, Hall B. 1997. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest *Agricultural and Forest Meteorology*, **83**: 147-170.
- Barford CC, Wofsy SC, Goulden ML, *et al* 2001. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest *Science*, **294**: 1688-1691.
- Black TA, Hartog G, Neumann HH, *et al* 1996. Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest *Global Change Biology*, **2**: 219-229.
- Bubier JL, Moore R, Belhario L, *et al* 1995. Ecological controls on methane emissions from a northern peat land complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada *Global Biogeochemical Cycles*, **9**: 455-470.
- Cao M, Zhang JH, Feng ZL, *et al* 1996. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest, China *Tropical Ecology*, **37**: 183-192.
- Dou JX, Zhang YP, Yu GR, *et al* 2006. A preliminary study on the heat storage flux of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**(suppl 11): 163-173.
- Geiger R. 1965. *The Climate Near the Ground* Cambridge MA: Harvard University Press
- Gordon AM, Schlentner RE, van Cleve K. 1987. Seasonal patterns of soil respiration and CO₂ evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 304-310.
- Goulden ML, Munger JW, Fan SM, *et al* 1996. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability *Science*, **271**: 1576-1578.
- Greco S, Baldocchi DD. 1996. Seasonal variation of CO₂ and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest *Global Change Biology*, **2**: 183-197.
- Gupta SR, Singh JS. 1981. Soil respiration in tropical grassland *Soil Biology and Biochemistry*, **13**: 261-268.
- Keith H, Jacobsen KL, Raison RJ. 1997. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest *Plant and Soil*, **190**: 127-141.
- Kirschbaum MUE. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**: 735-760.
- Lloyd J, Taylor JA. 1994. On the temperature dependence of soil respiration *Functional Ecology*, **8**: 315-323.
- Mathes K, Schriefer T. 1985. Soil respiration during secondary succession influences of temperature and moisture *Soil Biology and Biochemistry*, **17**: 205-211.
- Moncrieff JB, Fang C. 1999. A model for soil CO₂ production and transport 2. Application to a Florida *Pinus elliotte* plantation *Agricultural and Forest Meteorology*, **95**: 237-256.
- Moore TR, Dalva M. 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peat land soils *Journal of Soil Science*, **44**: 651-664.
- Moore TR, Knowles R. 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peat land soils *Canadian Journal of Soil Science*, **69**: 33-38.
- Tang JW, Baldocchi DD. 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components *Biogeochemistry*, **73**: 183-207.
- Valentini R, de Angellis P, Matteucci G, *et al* 1996. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere *Global Change Biology*, **2**: 199-207.
- Zhang YP, Sha LQ, Yu GR, *et al* 2006. Annual variation of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**(suppl 11): 150-162.

作者简介 高举明,男,1979年生,硕士,主要从事生态气候研究。E-mail: gaojm@xtbg.ac.cn
责任编辑 王伟
