

文章编号: 1005-0930(2012)01-0036-010 中图分类号: S716.2 文献标识码: A
doi: 10.3969/j.issn.1005-0930.2012.01.005

热带季节雨林近地层 CO₂ 堆积的气象条件分析

姚玉刚^{1,2}, 张一平¹, 于贵瑞³, 宋清海^{1,2},
谭正洪^{1,2}, 周文君^{1,2}

(1. 中国科学院热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园), 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 热带雨林内 CO₂ 浓度分布随近地层 CO₂ 堆积现象的出现而发生显著变化, 对估算林内各层植被冠层 CO₂ 储存项有直接影响. 通过寻找形成近地层 CO₂ 堆积的主要气象控制因子, 有助于判别不同气象条件在近地层 CO₂ 堆积中的作用. 采用基于因子分析的主成分提取方法, 将 8 个气象因子观测资料整合为 3 个主成分, 并逐一揭示 4 个典型时期各主成分的支配因子在近地层 CO₂ 堆积形成中的作用. 结果表明: 热量条件是影响 11—12 月(雾凉季)、3—4 月(干热季)、9—10 月(雨季后期)近地层 CO₂ 堆积的主要气象条件. 水分条件是 6—7 月(雨季前期)近地层 CO₂ 堆积的主要气象条件. 动力条件对近地层 CO₂ 堆积影响较弱, 仅起到辅助作用.

关键词: 近地层; CO₂ 堆积; 气象条件; 主成分分析

CO₂ 浓度的空间分布是指示森林碳库的重要指标, CO₂ 作为光合作用的底物, 其浓度分布研究对于了解森林的气体传输过程是十分必要的^[1]. 森林 CO₂ 浓度分布在边界层尺度随大气稳定度、风向、地形、风速及辐射收支的变化而变化. 具体到局地环境中, 主要受土壤水分、气温、地温等气象因子的影响^[2]. 在特定时段, 因湍流交换强度弱, 冠层内部的 CO₂ 浓度变化无法通过湍流传输到冠层上方, 储存在冠层内部, 称为 CO₂ 储存效应^[3]. 林内 CO₂ 浓度分布随近地层 CO₂ 堆积现象的出现而发生显著变化, 对估算林内各层植被冠层 CO₂ 储存项有直接影响^[4-5]. 通过在高大森林中设置 CO₂ 浓度廓线观测可以有效地减小 CO₂ 储存项的估算误差^[6-9], 根据 CO₂ 浓度随时间的变率分别计算不同层次植被冠层大气中的 CO₂ 储存量, 经累加从而得到林内各层 CO₂ 储存项的相对真实的变化特征.

西双版纳热带季节雨林林内近地层 CO₂ 堆积现象会对估算热带季节雨林植被冠层

收稿日期: 2010-12-05; 修订日期: 2011-04-20

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-Q1-05-04); 国家自然科学基金项目(31061140359、40801035; 41071071; 41001063); 国家 973 项目(2010CB833501)

作者简介: 姚玉刚(1983—), 男, 博士研究生. E-mail: yaoyugang@xtbg.ac.cn

通信作者: 张一平(1957—), 男, 研究员. Tel: 0871-5160904; E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

CO₂ 储存项产生影响^[10]. 本研究基于 4 个典型季节的集中观测数据, 采用因子分析的主成分提取方法, 判断不同月份有利于出现近地层 CO₂ 堆积的气象因子. 本文旨在探讨不同气象条件在不同月份对近地层 CO₂ 堆积的影响规律, 为客观评价通量计算中的储存项提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

西双版纳热带雨林是世界第二大热带雨林—印度马来热带雨林区(简称远东热带雨林)的一个重要组成部分^[11], 位于该热带雨林区的北缘. 热带季节雨林是西双版纳热带雨林的主要类型和地带性植被, 主要分布在海拔 900m 以下的沟谷两侧及低丘台地^[12], 以西双版纳东南部的勐腊县最为集中. 西双版纳处于云南南部, 年平均气温为 21.5℃, 年降水量为 1558.8mm, 由于受印度季风控制, 降水分配不均, 一年中干、湿季分明, 一般 11—4 月为干季, 5—10 月为雨季. 年平均风速仅为 0.5m/s, 为著名的静风区^[13]. 土壤为砖红壤. 观测样地位于中国生态系统研究网络西双版纳热带季节雨林定位观测样地(21°56′N、101°15′E), 海拔 750m. 雨林群落高度 32—35m, 结构复杂, 分层现象明显^[14-15].

观测铁塔位于起伏山坡阶梯上的小凹地处, 四面有山丘, 铁塔底部与周围山丘顶的相对高差处于 80—270m 之间, 水平距离为 400—686m. 地形呈现东西至南北走向, 白天, 山顶受到太阳辐射增温, 山顶近地层的大气受热上升, 谷底空气沿山坡爬升, 易形成谷风. 夜间, 大气层结相对稳定^[16-17], 辐射冷却作用明显, 易形成稳定逆温层结^[18].

1.2 研究方法

1.2.1 仪器设置 在观测铁塔上设置有 8 通道 CO₂/H₂O 廓线监测系统(8 channel CO₂/H₂O profile system, LI-840, LI-COR, USA) 同步测定 8 层 CO₂ 浓度和水汽含量. 观测高度为: 0.5, 1.0, 4.0, 10.2, 16.3, 36.5, 48.8, 69.0m. 采样频率为 1Hz(每个高度观测 30 个数据, 输出最后 10 个数据), 4min 完成一次循环, 每日中午 12:00 切换 CO₂ 标准气体对红外气体分析仪进行标定. 数据输出采用 SQL 2005 处理, 输出 60min 平均 CO₂ 浓度数据.

气象观测系统包括 7 层三杯风速仪(A100R, VECTOR, UK), 观测高度分别为 4.2、16.3、26.2、36.5、42.0、48.8 和 69.8m. 8 层温湿探头(HMP45C, VAISALA, Netherlands), 观测高度分别为 0.5、4.2、16.3、26.2、36.5、42.0、48.8 和 69.8m. 气压观测设置在距地表 4.2m 高度(CS105, VAISALA, Netherlands), 顶层设置有雨量筒(52203, YOUNG, USA). 上述仪器均与 CR10X 型数据采集器(CR10X, Campbell, USA) 相连, 每 30min 输出一组平均值. 本研究中, 除降雨量(X6) 为日总量值外, 其余各气象因子均为日均值(表 1).

表 1 观测气象要素简介
Table 1 The information about relative meteorological factors

因子	单位	名称	观测高度	仪器型号/供应厂商
X1	w/m ²	总辐射 Q	距地表 41.6m	CNR-1, Kipp&Zonen, Finland
X2	℃	气温 T_a	距地表 0.5m	HMP45C, Vaisala, Netherlands
X3	℃	地温 T_s	地下 5cm	105T, Campbell Scientific, USA
X4	%	土壤含水量 SWC	地下 5cm	CS616, Campbell Scientific, USA

续表

因子	单位	名称	观测高度	仪器型号/供应厂商
X5	%	相对湿度 <i>RH</i>	距地表 0.5m	HMP45C, Vaisala, Netherlands
X6	mm	降雨量 <i>Rainfall</i>	距地表 70m	52203, RM Young, USA
X7	m/s	风速 <i>WS</i>	距地表 16.3m	A100R, Vector Instruments, UK
X8	hPa	气压 P_a	距地表 4.2m	CS105, Vaisala, Netherlands

1.2.2 数据处理 对 4 种热带森林近地层 CO_2 浓度日较差情况进行了汇总. 从文献中获取的信息看各森林站点近地层 CO_2 浓度日较差均小于 $100\mu\text{mol/mol}$ (表 2). 本研究采用近地层 0.5m 高度测定的 CO_2 浓度日较差作为判据, 将近地层 CO_2 浓度堆积指标进行定义: 以近地层 0.5m 处 CO_2 日较差 $\geq 100\mu\text{mol/mol}$ 时, 称 CO_2 堆积发生日. 反之, 近地层 0.5m 处 CO_2 日较差 $< 100\mu\text{mol/mol}$ 时, 称为无 CO_2 堆积日. 选择 2008 年 11—12 月 (雾凉季)、2009 年 3—4 月 (干热季)、6—7 月 (雨季前期) 和 9—10 月 (雨季后期) 代表典型季节. 结合 CO_2 浓度堆积指标, 将 4 次集中观测期间各天均划分 CO_2 堆积发生日和无 CO_2 堆积日, 以此为依据划分同期气象因子.

表 2 站点情况调研

Table 2 Site characteristics

站名、地区	森林	地形	日较差/ $\mu\text{mol/mol}$	观测时段	高度/m	参考文献
亚马逊 Tapajós	热带森林	平坦高地	< 60	2000. 6. 29—2004. 1. 16	0. 1	[19]
马来西亚 Sarawak	热带雨林	山顶	< 90	1998. 1. 18—1. 19	1. 0	[20]
马来西亚 PSO	热带常绿阔叶林	起伏地形	< 70	2004. 9—2005. 11	0. 2/0. 5	[21]
亚马逊 LBA Site	热带雨林	山顶	< 50	2000. 1. 1—6. 1	0. 5	[22]
亚马逊 INPA			< 70	2000. 6. 2—12. 1		

经数据处理后, 2008 年 11—12 月、2009 年 3—4 月、6—7 月和 9—10 月期间气象要素有效天数分别为 52、61、61 和 61d, 除 11—12 月有部分天数数据缺失外, 其余 3 次观测数据完整. 使用 SPSS13.0 针对同期降雨日总量和其它气象因子日均值进行基于因子分析的主成分分析. 主成分分析可以通过多个指标的线性组合把原来多个变量归纳为少数几个相互独立的综合指标, 并尽可能多地保留原来变量所反映的信息. 列入主成分分析的气象因子归为以下 4 类: 热量条件 (X1 总辐射 (Q)、X2 气温 (T_a)、X3 地温 (T_s)), 水分条件 (X4 土壤含水量 (SWC)、X5 相对湿度 (RH)、X6 降雨量 ($Rainfall$)) 和动力条件 (X7 风速 (WS)、X8 气压 (P_a)). 由于各指标的量纲存在不同, 在 SPSS 主成分分析设置中对原始数据进行标准化处理, 消除了量纲的影响. 本文使用 surfer8.0 软件绘制 CO_2 浓度的时空分布特征, 采用 SigmaPlot11 软件绘制折线图.

2 结果与分析

2.1 西双版纳 CO_2 浓度垂直分布特征

根据堆积指标, 4 次集中观测期间获得 CO_2 堆积发生日数分别为 12、30、41 和 37d, CO_2 堆积日出现频率分别为 16.3% (11—12 月)、54.5% (3—4 月)、73.2% (6—7 月) 和 62.7% (9—10 月). 西双版纳热带季节雨林两月平均 CO_2 浓度日变化特征如图 1 所示. 从

各月有 CO₂ 堆积情况来看,6—7 月傍晚时分 CO₂ 堆积浓度最为剧烈(平均为 630 μ mol/mol) ,11—12 月傍晚最低(530 μ mol/mol) . 从图 1 可知,傍晚时分林内各层 CO₂ 浓度发生了剧烈的变化,CO₂ 浓度的堆积影响高度可达距地表 20m 左右.

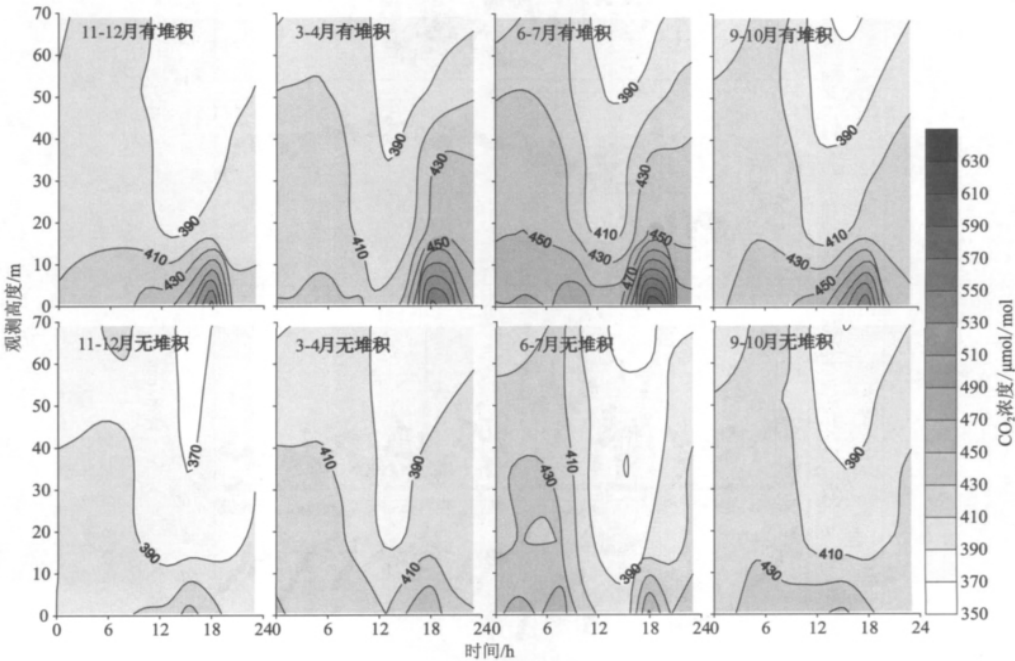


图 1 CO₂ 浓度垂直时空分布日变化
Fig. 1 Vertical spatio-temporal evolution of CO₂ concentration

无 CO₂ 堆积日林内各层 CO₂ 浓度变化很小(图 1) , 近地层 CO₂ 浓度出现微弱升高, 变化幅度缓和,处于 20—40 μ mol/mol 之间.

2.2 各次观测气象因子逐日值比较

4 次集中观测时期的降雨日总量和其它气象因子日均值逐日变化趋势如图 2 所示. 总辐射在 3—4 月整体较高,11—12 月较低,6—7 月变化剧烈,而大气压 11—12 月较高, 6—7 月最低 [图 2(a)]. 气温和地温表现出一致的变化趋势,6—7 月最高,11—12 月最低 [图 2(b)]. 风速 3—4 月较高,9—10 月最低,降雨主要集中在 6—7 月,9—10 月次之,其 余月份分布较少 [图 2(c)]. 土壤含水量 3—4 月前期最低,6—7 月和 9—10 月最高,相对 湿度除 3—4 月较低外,其余月份均在 90% 以上 [图 2(d)].

2.3 近地层 CO₂ 堆积的影响因子分析

近地层 CO₂ 堆积现象的发生是由诸多因子决定的,每个气象因子从某个方面反映出 CO₂ 堆积的影响程度是不同的. 从表 3 可以看出 4 个选取时段中前 3 个主成分的累积方 差贡献率超过了 70% ,特征值均接近或大于 1,表明这 3 个主成分基本包含了这 8 个气象 因子的所有变异信息,从而可以用 3 个彼此不相关的综合指标分别综合存在于原有的 8 个指标的各类信息中. 各综合指标代表的信息不重叠.

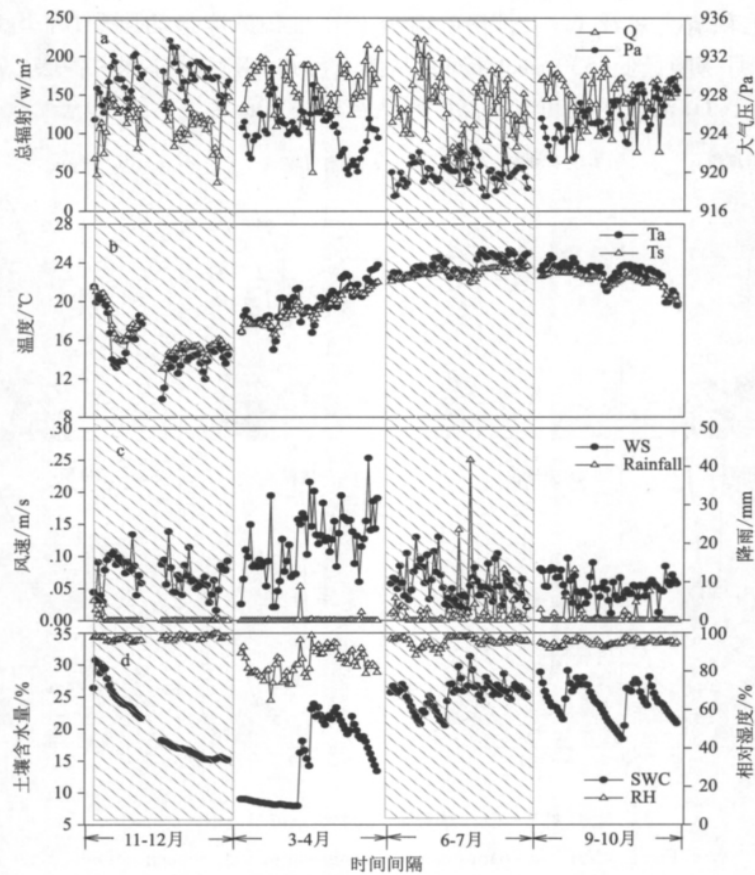


图2 4次集中观测气象要素逐日变化
Fig. 2 Day to day variation in four intensive campaigns

表3 主成分特征值及方差贡献率

Table 3 Principle components analysis result

主成分	11—12月			3—4月			6—7月			9—10月		
	特征值	贡献率 /%	累积 贡献率 /%	特征值	贡献率 /%	累积 贡献率 /%	特征值	贡献率 /%	累积 贡献率 /%	特征值	贡献率 /%	累积 贡献率 /%
1	4.1	51.1	51.1	3.3	41.0	41.0	3.1	39.0	39.0	2.9	35.7	35.7
2	2.1	26.5	77.5	2.1	26.2	67.2	2.1	26.5	65.5	2.1	26.1	61.7
3	1.2	15.2	92.8	0.9	10.8	78.0	1.0	13.1	78.5	1.3	16.5	78.2

表中粗体表示累积贡献率在第3个主成分时均超过了70%。

表4 为气象因子前3个主成分旋转后的因子载荷矩阵. 通过4次方最大旋转后,得到了8个气象因子在3个主成分上的新的因子载荷.

表 4 因子旋转载荷矩阵
Table 4 Rotated component matrix

因子	11—12 月			3—4 月			6—7 月			9—10 月		
	成分			成分			成分			成分		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
X1	0.233	0.962	-0.040	0.284	-0.264	-0.111	-0.859	0.137	0.037	0.036	0.823	-0.019
X2	0.970	-0.012	-0.160	0.923	-0.052	-0.243	-0.208	0.947	0.005	0.954	0.062	0.103
X3	0.989	-0.047	-0.104	0.923	0.091	-0.298	-0.194	0.939	-0.075	0.966	0.018	0.123
X4	0.808	0.163	-0.248	0.460	0.767	-0.106	0.898	-0.050	0.243	0.217	0.113	0.898
X5	-0.512	-0.241	0.809	-0.118	0.893	-0.096	0.946	-0.184	0.042	-0.228	-0.513	0.705
X6	0.839	-0.164	0.480	-0.054	0.750	0.177	0.442	-0.049	0.854	0.169	-0.045	0.227
X7	-0.362	0.903	-0.132	0.831	-0.055	0.342	-0.646	-0.065	0.674	0.016	0.921	-0.006
X8	-0.397	-0.241	-0.182	-0.396	0.033	0.856	-0.133	-0.392	-0.055	-0.874	0.002	0.144

表中粗体表示在不同主成分中载荷值较大的影响因子。

从表 4 可以看出,11—12 月影响 CO₂ 堆积的第一主成分的指标有 X3(*T_s*)、X2(*T_a*) , 表明热量条件影响最大,方差贡献率高达 51.1% (表 3) . 第二主成分的贡献来源有 X1 (*Q*) 和 X7(*WS*) ,体现了热量和动力条件的重要性,方差贡献率为 26.5% . 第三主成分的支配指标为 X5(*RH*) ,水分条件的方差贡献率为 15.2% . 3—4 月影响 CO₂ 堆积的第一主成分的指标与 2008 年 11—12 月基本一致,热量条件方差贡献率高达 41.0% (表 3) . 第二主成分的指标为 X5(*RH*)、X4(*SWC*) 和 X6(*Rainfall*) ,水分条件的方差贡献率为 26.2% . 第三主成分的支配指标为 X8(*P_a*) ,动力条件在一定程度上有利于 CO₂ 堆积的形成,方差贡献率为 10.8% . 6—7 月影响 CO₂ 堆积的第一主成分的指标转变为 X5(*RH*) ,水分条件的方差贡献率高达 39.0% (表 3) . 第二主成分的支配指标为 X2(*T_a*) 和 X3(*T_s*) ,热量条件的方差贡献率为 26.5% . 第三主成分的支配因子为 X6(*Rainfall*) ,水分条件的方差贡献率为 13.1% . 9—10 月影响 CO₂ 堆积的指标与 11—12 月所筛指标一致.

3 讨论

3.1 热量条件对近地层 CO₂ 堆积的影响

热量条件由总辐射(*Q*)、气温(*T_a*) 和地温(*T_s*) 构成. 总辐射(*Q*) 季节变化趋势为 3—4 月整体较高,11—12 月较低,6—7 月变化剧烈 [图 2(a)]. 气温(*T_a*) 和地温(*T_s*) 季节变化趋势为 6—7 月最高,11—12 月最低 [图 2(b)]. 热量条件是 11—12 月、3—4 月和 9—10 月第一主成分中的支配因子(方差贡献率分别为 51.1% ,41.0% 和 35.7%) , 11—12 月、6—7 月、9—10 月第二主成分的支配因子(方差贡献率分别为 26.5%、26.5% 和 26.1%) , 及 6—7 月第三主成分的支配因子(方差贡献率 13.1%) . 热量条件在 11—12 月、3—4 月和 9—10 月近地层 CO₂ 堆积过程中起主导作用,在 6—7 月起次要作用. 总辐射对近地层“逆温”的形成有重要的影响,如 Dias 发现辐射冷却效应在森林中持续约 4h,易在冠层内外形成不稳定的气温垂直廓线^[23],而西双版纳山地环境确实存在逆温现象^[18]. 在逆温条件下,由地形引发的泄流作用可能参与其中,形成了有利于近地层 CO₂ 堆积的环境条件. 从温度因子看,Hollinger 发现气温每上升 10℃,夏季晴朗夜间的老龄林排放 CO₂ 的强度可加倍^[24],说明气温能显著影响森林生态系统呼吸. 近地层的 CO₂ 主要来源于地

表土壤呼吸过程^[25],土壤呼吸是影响和控制热带季节雨林近地层 CO_2 浓度变化的主要因子^[26],能够解释 60% 的 CO_2 浓度季节变化特征^[27].

3.2 水分条件对近地层 CO_2 堆积的影响

水分条件由土壤含水量(SWC),相对湿度(RH)和降雨量(Rainfall)反映.季节变化趋势为6—7月最高[图2(c)、(d)].水分条件在6—7月是第一主成分的支配因子(方差贡献率39.0%),在3—4月是第二主成分的支配因子(方差贡献率26.2%),在11—12月和9—10月是第三主成分的支配因子(方差贡献率分别为15.2%和16.5%).水分条件在6—7月近地层 CO_2 堆积过程中起主导作用,在其余月份起次要作用.6—7月正值西双版纳雨季,降雨的频繁发生会扰动土壤孔隙中的 CO_2 ,使得 CO_2 堆积现象发生频繁(73.2%),这与李俊清的结论一致^[28].Sha指出当土壤含水量超过40%时,土壤呼吸出现明显下降.未超过40%的土壤含水量对土壤呼吸有积极的作用^[29].热带季节雨林土壤为砖红壤,质地偏砂,保水性差,土壤含水量均在30%以下,6—7月有利于土壤呼吸的增强.

3.3 动力条件对近地层 CO_2 堆积的影响

动力条件由风速(WS)和气压(P_a)反映,季节变化趋势为:风速在3—4月较高,9—10月最低[图2(c)],气压在11—12月较高,6—7月最低(图2a).动力条件在11—12月和9—10月均为第二主成分的支配因子(方差贡献率分别为26.5%和26.1%),在3—4月为第三主成分的支配因子(方差贡献率10.8%).动力条件在11—12月、3—4月和9—10月近地层 CO_2 堆积过程中起辅助作用,对6—7月影响微弱.林内风速由气压梯度差产生,其数值大小反映了林内物质交换能力的强弱,相对较高的风速和相对较大的气压差有利于林内气体的交换,可能会使冠层植物呼吸排放的 CO_2 向下转移.此外,由于郁闭度高的森林冠层的阻截作用,林内风速偏低,湍流交换作用微弱^[30],为近地层 CO_2 的堆积提供了相对稳定的环境背景.

3.4 综合影响

通过近地层 CO_2 堆积现象的最高和最低出现频率时期来分析综合的气象因子影响.近地层 CO_2 堆积现象的出现频率在6—7月最高,此时热带季节雨林处于雨热同期.总辐射受降雨影响日变化大、气温和地温较高、气压较低、土壤含水量未达饱和状态、频繁降雨会扰动土壤孔隙中的 CO_2 ,促使近地层 CO_2 浓度增加.以上因子从 CO_2 来源和有利于下泄气流形成的环境条件方面施加影响,共同导致近地层 CO_2 堆积现象的频繁发生.从近地层 CO_2 堆积现象发生频率最低的11—12月来看,此时热带季节雨林处于雾凉季,气温和地温全年最低、土壤含水量持续下降、总辐射降低、降雨扰动减少、相对湿度较高、气压较高,近地层 CO_2 浓度堆积的 CO_2 来源仅依靠由气温和地温的升高引发的土壤呼吸速率的增强.

热量条件对热带季节雨林近地层 CO_2 堆积的影响主要集中在除6—7月外的其余3个时期.水分条件对近地层 CO_2 堆积的影响集中在6—7月,存在明显的季节性变化特征,主要受西双版纳降雨的季节变化影响较大.动力条件对热带季节雨林近地层 CO_2 堆积的影响相对较弱.热量条件中辐射因子形成的逆温抑制了动力作用,而气温和地温升高,又有利于动力条件的产生.水分条件中水分因子的相变与潜热与热量条件息息相关,但降雨又独立于热量条件.由两者共同表征的地表水热通量决定着小气候环境的主要特

征^[31]. 综合来看, 热量条件与水分条件主导了西双版纳热带季节雨林近地层 CO₂ 堆积的外界气象条件, 动力条件对近地层 CO₂ 堆积影响较弱.

4 结论

西双版纳热带季节雨林近地层 CO₂ 堆积日出现频率主要发生在 6—7 月, 11—12 月最低. 热量条件是影响 11—12 月、3—4 月、9—10 月近地层 CO₂ 堆积的主要气象条件, 水分条件是 6—7 月近地层 CO₂ 堆积的主要气象条件, 动力条件影响较弱. 主要结论如下:

(1) 热量条件对热带季节雨林近地层 CO₂ 堆积的影响主要集中在 11—12 月(雾凉季)、3—4 月(干热季)、9—10 月(雨季后期), 在 6—7 月(雨季前期)起次要作用;

(2) 水分条件对近地层 CO₂ 堆积的影响主要集中在 6—7 月(雨季前期), 在其余 3 次观测期间起次要作用;

(3) 动力条件在 11—12 月(雾凉季)、3—4 月(干热季)、9—10 月(雨季后期)近地层 CO₂ 堆积过程中起辅助作用, 在 6—7 月(雨季前期)影响微弱.

综合来看, 热量条件与水分条件主导了西双版纳热带季节雨林近地层 CO₂ 堆积的外界气象条件, 动力条件影响微弱.

致谢 感谢中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站的大力协助. 感谢日本国立环境研究所梁乃申老师对本研究提出的宝贵意见和技术支持. 感谢唐勇老师在多元统计分析中给予的建议. 感谢赵俊斌、游广永、张鹏超、李麟辉等同学在试验中给予的帮助.

参考文献

- [1] 王汉杰, 王信理. 生态边界层原理与方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1999
Wang Hanjie, Wang Xinli. Ecological principles and methods of boundary layer [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999
- [2] 傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1983
Fu Baopu. Mountain climate [M]. Beijing: Science Press, 1983
- [3] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future [J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479-492
- [4] de Araújo A C, Dolman A J, Waterloo M J, et al. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 226-237
- [5] Takagi M. Atmospheric carbon dioxide concentration within a narrow valley in a forested catchment area [J]. Journal of Forest Research, 2009, 14(5): 286-295
- [6] Goulden M L, J William Munger, Fan S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy [J]. Global Change Biology, 1996, 2: 169-182
- [7] Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water [J]. Global Change Biology, 1996, 2(3): 231-240
- [8] Yang B, Hanson P J, Riggs J S, et al. Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112: 112(d20): D20123-1-D20123-5
- [9] Yang P C, Black T A, Neumann H H, et al. Spatial and temporal variability of CO₂ concentration and flux in a boreal aspen forest [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D22): 27653-27661
- [10] 姚玉刚, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带森林大气 CO₂ 储存通量两种计算方法的比较研究 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 24-30
Yao Yugang, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. Estimation of CO₂ storage flux between forest and atmosphere in a tropical

- forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1) : 24-30
- [11] Whitmore T C. Tropical rain forests of the far east-the journal of ecology [M]. Oxford: Clarendon Press, 1984
- [12] 吴征镒. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980
- Wu Zhengyi. Vegetation of China [M]. Beijing: Science Press, 1980
- [13] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 中国热带季风林区林缘水平热力特征的初步分析 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(2) : 205-209
- Zhang Yiping, Ma Youxin, Liu Yuhong, et al. Horizontal thermal characteristics at forest edge in calm tropical region of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2) : 205-209
- [14] Zhang J H, Cao M. Tropical forest vegetation of Xishuangbanna, SW China and its secondary changes, with special reference to some problems in local nature conservation [J]. Biological Conservation, 1995, 73: 229-238
- [15] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究 [J]. 植物生态学报, 1999, 23(5) : 418-425
- Ren Yonghong, Cao Min, Tang Jianwei, et al. A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(5) : 418-425
- [16] 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林大气稳定度特征 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(1) : 130-134
- Yang Zhen, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. Characteristics of atmospheric stability at the boundary of atmosphere-tropical seasonal rainforest canopy in Xishuangbanna of Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1) : 130-134
- [17] 杨振, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层大气稳定度时间变化特征初探 [J]. 热带气象学报, 2007, 23(4) : 413-416
- Yang Zhen, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. The temporal variation characteristics of atmospheric stability classification over the ecoboundary layer in tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(4) : 413-416
- [18] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳山地逆温资源评价 [J]. 国土与自然资源研究, 1997, 3: 36-39
- Liu Wenjie, Li Hongmei. Inversion resource in mountainous areas of Xishuangbanna [J]. Territory and Natural Resources Study, 1997, 3: 36-39
- [19] Goulden M L, Miller S D, da Rocha H R. Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D8) : 1-14
- [20] Kumagai T, Kuraji K, Noguchi H, et al. Vertical profiles of environmental factors within tropical rainforest, Lambir Hills National Park, Sarawak, Malaysia [J]. Journal of Forest Research, 2001, 6: 257-264
- [21] Ohkubo S, Kosugi Y, Takanashi S, et al. Vertical profiles and storage fluxes of CO₂, heat and water in a tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2008, 60(4) : 569-582
- [22] de Araújo A C, Kruijt B, Nobre A D, et al. Nocturnal accumulation of CO₂ underneath a tropical forest canopy along a topographical gradient [J]. Ecological Applications, 2008, 18(6) : 1406-1419
- [23] Dias N L. Radiative effects on temperature in the stable surface layer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 89(1) : 141-159
- [24] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, et al. Carbon-dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere [J]. Ecology, 1994, 75(1) : 134-150
- [25] 张一平, 沙丽清, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林碳通量年变化特征及影响因子初探 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(S1) : 139-152
- Zhang Yiping, Sha Liqing, Yu Guirui, et al. Annual variations of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. Sciences in China(Series D: Earth Science), 2006, 36(S1) : 139-152
- [26] 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林、橡胶林及水稻田生态系统碳储量和土壤碳排放研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008
- Sha Liqing. Carbon storage and soil CO₂ efflux of tropical seasonal rain forest, rubber tree plantation and paddy soil in Xishuangbanna, Southwest China [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008
- [27] 谭正洪, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层 CO₂ 浓度的时空动态及其成因分析 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(3) : 555-567
- Tan Zhenghong, Zhang Yiping, Yu Guirui, et al. Spatial and temporal dynamics of CO₂ concentration and its causes in Xishuangbanna tropical seasonal rain forest, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3) : 555-567

- [28] 李俊清, 牛树奎. 森林生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
Li Junqing, Niu Shukui. Forest ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [29] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, et al. Soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China [J]. Sciences in China(Series D: Earth Science), 2005, 48(SI): 189-197
- [30] 王正非, 朱廷曜, 朱劲伟, 等. 森林气象学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985
Wang Zhengfei, Zhu Tingyao, Zhu Jinwei, et al. Forest meteorology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985
- [31] 王修信, 刘馨, 陈声海, 等. 半干旱地区草地水热通量与环境要素及相关性研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 770-777
Wang Xiuxin, Liu Xin, Chen Shenghai, et al. Correlation analysis of water and heat fluxes with environmental variables over lawn in semi-arid area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(5): 770-777

An Analysis of Meteorological Conditions Causing CO₂ Pooling in the Surface Layer in a Tropical Seasonal Rain Forest, SW China

YAO Yugang^{1,2}, ZHANG Yiping¹, YU Guirui²,
SONG Qinghai^{1,2}, TAN Zhenghong^{1,2}, ZHOU Wenjun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 2. The Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geographical Science and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract

The concentration of CO₂ in tropical rain forests is significantly affected by the CO₂ pooling near ground layer. The CO₂ pooling may directly influence the estimation of carbon storage at different canopy layers, especially the inner canopy(below the 33.5m above ground layer) . To differentiate the effect of different weather conditions on CO₂ pooling near the ground layer, weather factors near the ground layer were collected and analyzed in a tropical seasonal rainforest. By using principal components extraction method, eight meteorological factors were integrated into three principal components and the contributions of each principal component to the forming of CO₂ pooling near the ground layer were analyzed in four different time scales. Results show that heat conditions play an important role in Nov-Dec(fog-cool) , Mar-Apr(dry-hot) and Sep-Oct(later rainy season) , while water condition is more important in Jun-Jul(previous rainy season) on the forming of CO₂ pooling near the ground layer. Dynamic condition shows relatively weak influence which only plays a supplementary role in different time scales.

Keywords: surface layer; CO₂ pooling; meteorological conditions; PCA analysis