

西双版纳热带季雨林土壤呼吸变化规律及其影响因素

王亚军¹, 郁珊珊²

(1. 福州大学 建筑学院, 福州 350108; 2. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要:为了探寻西双版纳热带季雨林土壤呼吸变化规律及其影响因素,分别于2014年不同季节测定了土壤呼吸强度及相关环境因子,同时取相应点表土(0—10 cm)测定土壤养分,利用指数模型和线性模型分析土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系。结果表明:热带季雨林大气温度的日变化趋势均为单峰曲线;落叶季雨林和半常绿季雨林大气湿度日变化均呈“V”字形变化趋势;0—10 cm土壤温度与大气温度变化趋势相一致,在14:00左右达到峰值;土壤湿度均呈“V”字形变化趋势,在14:00达到最低,此后有所回升,局部有所波动。在时间尺度上,2种热带季雨林土壤呼吸均表现为单峰型,且峰值出现的时间基本一致,在14:00左右达到最大,最低值出现在早上6:00,相同时间常绿季雨林土壤呼吸速率高于落叶季雨林。2种热带季雨林土壤呼吸季节性差异显著($p < 0.05$),呈先增加后降低的趋势,均表现为秋季>夏季>冬季>春季。2种热带季雨林土壤呼吸与土壤温度之间关系以指数方程拟合最好,土壤温度可以解释土壤呼吸强度的53.7%~71.0%;落叶季雨林土壤呼吸与土壤湿度之间关系以线性方程拟合最好,常绿季雨林土壤呼吸与土壤湿度之间关系以指数方程拟合最好,土壤湿度可以解释土壤呼吸强度的52.1%~62.3%。通过偏相关分析可知,西双版纳热带季雨林土壤呼吸均与有机质和土壤速效养分含量呈极显著的相关关系($p < 0.01$),与土壤全氮含量呈显著的相关关系($p < 0.05$),而与全磷含量并没有显著的相关性($p > 0.05$),其中常绿季雨林的相关系数均高于落叶季雨林。

关键词:西双版纳;热带季雨林;土壤呼吸;影响因子

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0133-06

Soil Respiration and Impact Factors of Tropical Seasonal Rainforests in Xishuangbanna, Yunnan Province

WANG Yajun¹, YU Shanshan²

(1. College of Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: In order to explore soil respiration and impact factors of tropical seasonal rainforests in Xishuangbanna, measurements of soil respiration, soil temperature and moisture content, soil nutrients (0—10 cm) during different seasons in 2014 by Li-6400, and characteristics of the daily and seasonal variations of soil respiration and their controlling factors were presented, and exponential model and linear model were used to analyze the relations between soil respiration and soil temperature and humidity. The results showed that daily air temperature of tropical seasonal rainforests showed the single peak curve, and daily atmospheric moisture had a V-shape variation trend, soil temperature in 0—10 cm depth had the same variation trend as the atmospheric temperature, which the peak occurred at 14:00, and soil moisture had the V-shape variation trend with local fluctuation. The daily soil respiration rate showed a single peak curve which the daily maximum of soil respiration rate occurred at 14:00 and the minimum occurred at 6:00, and at same time, evergreen monsoon forest soil respiration rate was higher than that in the deciduous monsoon forest. These two tropical seasonal rainforest soil respiration rates had the significant seasonal differences ($p < 0.05$), which showed the order: autumn>summer>spring>winter. We found that soil respiration was extremely significant correlated with soil temperature in 0—10 cm depth, which could be described by exponential equation

收稿日期: 2015-08-03

修回日期: 2015-09-11

第一作者: 王亚军(1977—),男,安徽阜阳人,博士,高级工程师,研究方向:风景园林规划与设计、人文景观与生态规划、风景园林工程与设计方法。E-mail: fjiangyajun@163.com

通信作者: 郁珊珊(1981—),女,福建厦门人,博士,研究方向:风景园林规划与设计、城市绿地系统规划。E-mail: yushanhan_81@163.com

($p < 0.01$), the exponential regression model could explain 53.7%~71.0% of the soil respiration, and soil respiration was extremely significant correlated with soil moisture content in 0—10 cm depth, which followed the linear equation ($p < 0.01$), the exponential regression model could explain 52.1%~52.2% of the soil respiration. Through the partial correlation analysis to exclude other environment factors, we found that soil respiration had the extremely significantly correlation with soil organic matter and soil available nutrients ($p < 0.01$), had significantly correlation with soil nitrogen content ($p < 0.05$) and no significantly correlation with soil phosphorus ($p > 0.05$), of which the correlation coefficients in the evergreen monsoon forest were higher than those in the deciduous monsoon forest.

Keywords: Xishuangbanna; tropical seasonal rainforests; soil respiration rate; impact factors

土壤作为大气 CO_2 重要的源或者汇,土壤 CO_2 细微的改变都会显著改变大气中 CO_2 的浓度和碳的累积速率^[1-2]。土壤呼吸释放的 CO_2 是全球碳循环中活跃组成部分,包括土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸的生物学过程和非生物学过程^[3],土壤呼吸每年向大气释放的碳达 80~100 Pg,是化石燃料燃烧释放 CO_2 的 10 倍之多^[4]。而在陆地生态系统中,土壤碳库是大气碳贮量的 2~3 倍,通过土壤呼吸作用向大气释放的 CO_2 约占全球 CO_2 交换量的 25%左右^[1-2]。土壤呼吸受多种因素的共同交互影响,包括土壤温度和湿度、土壤养分、地上和地下生物量的分配、净生态系统生产力(NEP)和人类干扰等,其中,土壤呼吸的主要变化由土壤温度和湿度共同解释^[5-6]。由此可知,测定陆地生态系统土壤呼吸速率特征并阐明影响土壤 CO_2 释放量的环境因子,是估计全球碳平衡预算和全球变化潜在效应最基本的数据。

当前,尽管国内外诸多学者对土壤呼吸做了大量的研究^[1-2,6-8],但由于不同植被土壤呼吸速率存在巨大的差异,使得量化土壤呼吸与温度变化间的关系尤为困难,特别是在高海拔和高纬度地区,土壤呼吸对温度升高的响应十分敏感,因此研究土壤呼吸对温度变化的响应显得更加重要^[5-6]。热带雨林作为地球上结构最复杂的森林生态系统,拥有最高的树种多样性^[9-10]。中国的热带雨林主要分布在西藏东南部、云南、广西、台湾的南部和海南岛,近年来,我国学者对于海南和云南的热带雨林群落结构组成和植物区系组成已经开展了部分研究,而对热带季雨林土壤呼吸还鲜见报道^[7-8,11]。因此,本文采用美国 Li-6400 便携式气体分析系统和 Li-6400 土壤呼吸室对热带季雨林土壤呼吸速率及影响因子进行观测,旨在探讨地土壤呼吸的季节变化规律,分析土壤温度和湿度对林地土壤呼吸的影响,建立土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系模型,以期深入了解土壤呼吸作用的变化过程及变化机理,从而为西双版纳热带季雨林生态系统碳循环提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

西双版纳热带雨林位于我国西南部(21°09'—22°33'N,99°58'—101°50'E),地处北回归线以南的热带北缘,属于横断山系的余脉,分布着较多的宽谷盆地、低山和低丘,海拔范围从最低点 491 m 至最高峰 2 429 m,总面积达 19 223 km²,以热带森林茂密称著,地形多为丘陵宽谷型小盆地、多溪流,地带性土壤为砖红壤和赤红壤。该区是热带东南亚向温带亚洲过渡的生态交错带,被认为是中国生物多样性保护的优先区域之一。由于它独特的地理位置和西南季风的强烈影响,该区呈现出明显的季节性气候,形成了干湿分明的旱季和雨季,雨季从 5 月份一直持续到 10 月份,其间降雨量占全年降雨量的 80%以上。对应于这种独特的地理位置和气候特征,在该区的山谷、低地和水分条件较好的低山环境中形成了独具特色的热带季节雨林^[7-8]。

样地选择中国科学院热带雨林生态站,位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇(21°56'N,101°16'E),海拔 720 m,面积 20 hm²(400 m×500 m),东西长 500 m,南北长 400 m,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,乔木层按高度即可分为 3 层,上层高 30 m 以上,优势种主要为千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)和绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*);中层高度为 16~30 m,常见种有大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)和云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)等;下层高 16 m 以下,主要种包括细罗伞(*Ardisia tenera*)、云树(*Garcinia cowal*)等;林中藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,反映了热带季节雨林树种组成的多样性及时空差异。据中国科学院热带生态站多年的资料显示,年均温为 21.4℃,年均降雨量为 1 557 mm,每年 5 月到 10 月为雨季,其中雨季为 1 355 mm,占全年的 87%,11 月到次年 4 月为旱季,降雨量为 202 mm,仅占年

降雨量的 13%,相对湿度 86%。在 1 hm² 的样地内,胸径>10 cm 的树种有 119 种,林龄约 200 年。由于特殊的地形地貌,气候的立体分异相当大,其东、北、西三面高,在一定程度上阻挡了西北方来的冷气流,使得最冷月平均温度并不低,弥补了积温的不足。低山沟谷及低丘上在冬季有浓雾,又弥补了降水的不足。因而在该地区的低山沟谷及低丘上,形成了热带湿润气候,具有热带雨林发育的条件,海拔 1 000 m 以下的河谷地区为砖红壤,主要的森林类型为热带季雨林、热带季雨林和热带山地常绿阔叶林等^[11]。

1.2 研究样地设置及基本特征

为长期监测我国热带森林生态系统,生态系统研究网络(CERN)于 1993 年 3 月在西双版纳勐仑镇至巴卡小寨公路的 52 km 路碑处南侧保护完好的森林中建立了一块 2 hm² (100 m×100 m)的长期生态学监测样地,样地坐落于两个小山丘之间一块呈东西走向的湿润沟谷中,谷底宽约 40 m,两侧的坡度为 15°~20°,林下土壤是由白垩系紫色砂岩发育而成的砖红壤。由于该保护区成立于 1958 年,因此自建成之后保护区内的生态景观基本没有遭受过重大的人为干扰。

为较全面地反映西双版纳热带季雨林的植物多样性特征,2014 年 3 月 14 日(春季)、6 月 14 日(夏季)、9 月 14 日(秋季)和 11 月 14 日(冬季)在样地选取森林群落发育较好、结构完整,受人为和自然因素影响较小、坡度较平缓的落叶季雨林和常绿季雨林,其中,落叶季雨林主要优势种为中层乔木大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)和云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*),半生有滇南溪桫(*Chisocheton siamensis*)、细柄罗伞(*A. tenera* Mez)和思茅崖豆(*Millettia leptobotry*),常绿季雨林以亚洲热带广布种和热带北部特有种为主,多属于番荔枝科(*Annonaceae*)、使君子科(*Combretaceae*)、梧桐科(*Sterculiaceae*)、木棉科(*Bombacaceae*)、大戟科(*Euphorbi-*

aceae)、豆科(*Leguminosae*)、无患子科(*Sapindaceae*)和山榄科(*Sapotaceae*)等。所选样地面积为 10 m×10 m=100 m²,每个样地重复 3 次,土壤深厚,达 1 m 以上,样地枯枝落叶层和腐殖质较厚,达 5~10 cm,林内湿度较大,树干上附生有较厚的苔藓层,观测记录坡向、坡度、坡位和海拔等生境因子。

1.3 土壤呼吸测定

选择保护区内落叶季雨林和常绿季雨林,每个林分布设 2 个监测点,相距 80 m,在第一次测定土壤呼吸之前,提前一天将测定基座(Soil Collar)嵌入土壤中,在每个基座内存留的地表植被自土壤表层彻底剪除,聚氯乙烯圆柱体经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了因安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率波动。采用动态密闭气室红外 CO₂ 分析仪(IRGA)法,测定仪器型号为美国 Li-6400 便携式气体分析系统和 Li-6400 土壤呼吸室,土壤呼吸日变化测定为白天每隔 2 h 测定 1 次,每个监测点 1 次测定 2 个重复,取平均值。季节变化测定为 2014 年 3 月 14 日(春季)、6 月 14 日(夏季)、9 月 14 日(秋季)和 11 月 14 日(冬季),在 8:00—10:00 点之间测量,有报道指出该时间段测定值最为接近 24 h 平均值,具有较好的代表性^[11]。在观测土壤呼吸的同时,使用手持长杆电子温度探针(SK-250 WP,Sato Keiryoki,Kanda,Japan)测定 0—10 cm 深处的土壤温度,使用时域反射仪(Model TDR 300,Spectrum,Aurora,USA)测定每个监测点附近 0—10 cm 范围内的土壤含水量,每个样地温、湿度安装数据采集器(HOBO ProRH/TEMP Data Logger),以获取距地面 50 cm 高度大气温度和相对湿度数据,用于分析土壤呼吸速率和水热因子的关系,同时取 0—10 cm 混合土样一份,带回实验室自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 0.5 mm 筛,测定土壤养分含量。

表 1 西双版纳热带季雨林样地基本特征

样地类型	海拔梯度/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	郁闭度	密度/(株·hm ⁻²)	胸径/m	树高/m	土壤类型
落叶季雨林	938	6	SW	28	0.82	726	5.03	4.98	砖红壤
常绿季雨林	1234	15	NE	32	0.93	824	5.86	5.63	砖红壤

1.4 土壤养分测定

土壤有机质含量(g/kg)测定采用重铬酸钾氧化外加热法;全氮(g/kg)用凯氏定氮法;碱解氮采用 NaOH—H₃BO₃ 法测定;全磷(g/kg)用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;有效磷(mg/kg)采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;全钾(g/kg)采用火焰分光光度法;有效钾(mg/kg)采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度计法^[12]。

1.5 数据处理

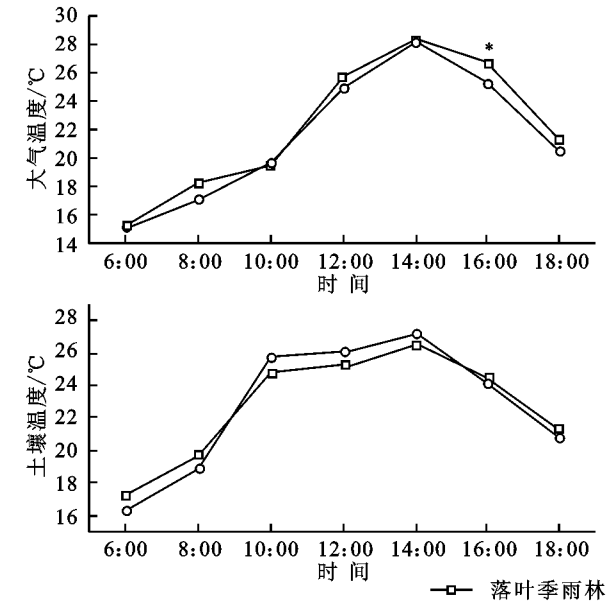
Excel 2007.0 和 SPSS 18.0 数据分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验其差异显著性,Pearson 相关性系数检验各指标的相关性。分两步对土壤呼吸与土壤温度和湿度数据进行拟合,首先,采用指数方程拟合 R_s 对 T 的响应关系。同时,采用线性、幂函数和二项式方程对 R_s 与 W_s 间进行回归分析。由原始数据拟合得到的多

元回归关系经统计学检验得到拟合度参数 R^2 , 并在 $p < 0.01$ 水平检验相关系数的显著性。

2 结果与分析

2.1 热带季雨林环境因子日动态

由图 1 可知,落叶季雨林近地面大气温度日变化范围为 15.3~28.3℃,大气湿度日变化范围为 48.3%~81.7%,土壤温度日变化范围为 17.2~26.5℃,土壤湿度日变化范围为 30.8%~41.3%;常绿季雨林近地面大气温度日变化范围为 15.2~28.1℃,大气湿度日变化范



注: * 和 ** 表示相同时间两种季雨林环境因子在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 差异显著,下同。

图 1 热带季雨林环境因子日动态

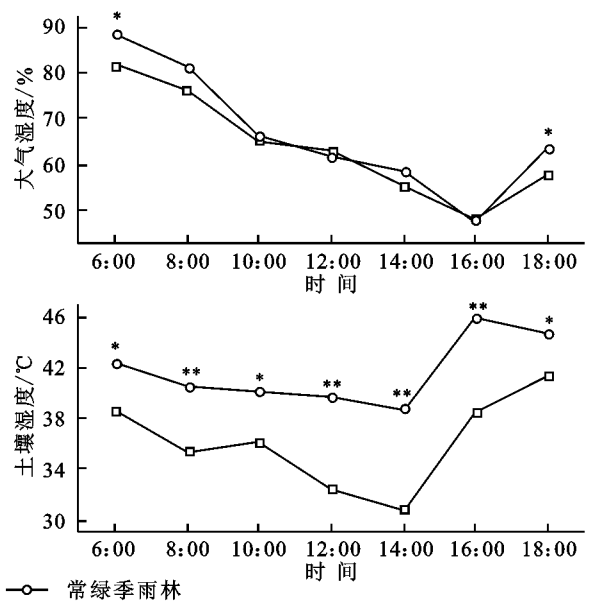
2.2 热带季雨林土壤呼吸日变化

图 2 为 2 种热带季雨林土壤呼吸日变化曲线,由图可知,2 种热带季雨林土壤呼吸存在明显的日变化规律,均表现为单峰型,且峰值出现的时间基本一致,土壤呼吸速率都在 14:00 左右达到最大,最低值出现在早上 6:00,在 6:00—10:00,2 种热带季雨林土壤呼吸升高缓慢,此后急剧上升,达到最大值以后急剧降低,在 16:00 以后,缓慢降低。落叶季雨林土壤呼吸日变化范围为 0.46~1.43 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,常绿季雨林土壤呼吸日变化范围为 0.82~1.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。相同时间常绿季雨林土壤呼吸速率高于落叶季雨林。

2.3 热带季雨林土壤呼吸季节变化规律

图 3 为 2 种热带季雨林土壤呼吸季节变化规律,由图可知,2 种热带季雨林土壤呼吸存在明显的季节变化规律,均表现为单峰型,且峰值出现的时间基本一致,土壤呼吸速率都在秋季达到最大,最低值出现在冬季,随着季节呈先增加后降低的趋势,2 种热带季雨林土壤呼吸季节差异显著 ($p < 0.05$),均表现为秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季。落叶季雨林土壤呼吸季节变化

围为 47.2%~88.3%,土壤温度日变化范围为 16.3~27.3℃,土壤湿度日变化范围为 38.7%~45.9%。2 种季雨林近地面大气温度的变化趋势及变幅较为相似,大气温度的日变化趋势均为单峰曲线,在 14:00 左右达到峰值;2 种季雨林大气湿度日变化趋势相一致,均呈“V”字形变化趋势,在 16:00 达到最低,此后有所回升;2 种季雨林土壤温度与大气温度变化趋势相一致,在 14:00 左右达到峰值局部有所波动;2 种季雨林土壤湿度日变化趋势相一致,均呈“V”字形变化趋势,在 14:00 达到最低,此后有所回升,局部有所波动。



范围为 0.61~4.79 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,常绿季雨林土壤呼吸季节变化范围为 0.93~6.97 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在夏季和秋季,常绿季雨林土壤呼吸速率极显著高于落叶季雨林 ($p < 0.01$),春季和冬季,常绿季雨林土壤呼吸速率显著高于落叶季雨林 ($p < 0.05$)。

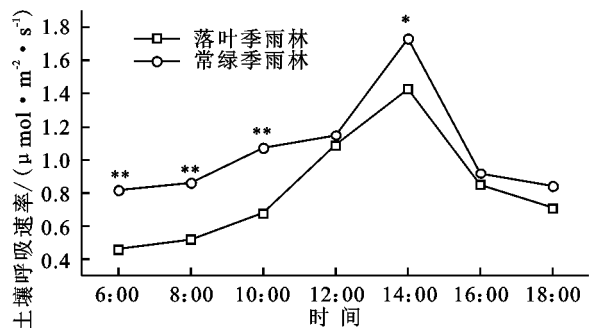


图 2 热带季雨林土壤呼吸日变化

2.4 土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响

为进一步探讨热带季雨林土壤呼吸与其显著影响因子土壤温度和湿度的关系,国内外学者一般采用线性模型、二次方程、指数模型等多种方法进行拟合,本试验结果中将土壤呼吸强度与土壤 10 cm 温度进

行曲线拟合,筛选出最佳拟合度的方程(R^2 最大, p 值最小),得出的不同拟合方程见图 1,结果土壤呼吸与土壤温度之间关系以指数方程拟合最好。由图可知,落叶季雨林和常绿季雨林土壤呼吸与土壤温度的指数关系达到了极显著水平($p<0.001$),且指数模型的决定系数最大,故指数模型的拟合效果最好,从指数模型来看,土壤温度可以解释土壤呼吸强度的 53.7%~71.0%。其中落叶季雨林土壤呼吸与土壤温度的指数关系具体表现为 $y=0.0008x^{2.2218}$ ($R^2=0.7101$, $p<0.001$),常绿季雨林土壤呼吸与土壤温度的指数关系的指数关系具体表现为 $y=0.0382x^{1.0569}$ ($R^2=0.5370$, $p<0.001$)。落叶季雨林土壤呼吸与土壤湿度之间关系以线性方程拟合最好,常绿季雨林土壤呼吸与土壤湿度之间关系以指数方程拟合最好。由图可知,落叶季雨林土壤呼吸与土壤湿度的线性关系达到了极显著水平($p<0.001$),且线性模型的决定系数最大,从线性模型来看,土壤湿度可以解释土壤呼吸强度

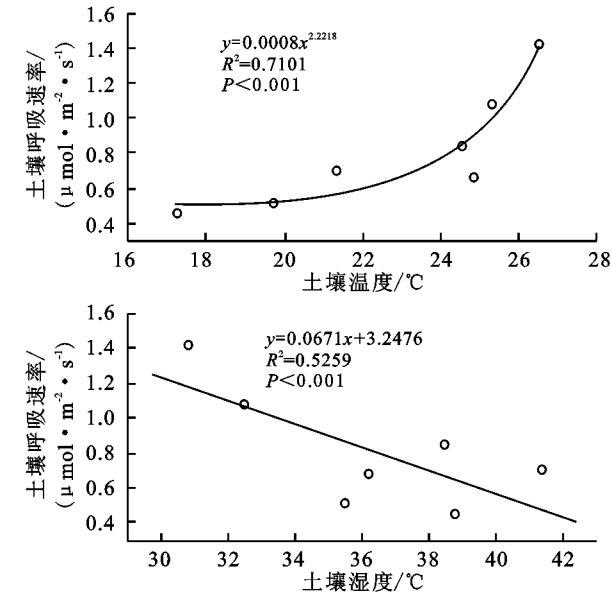
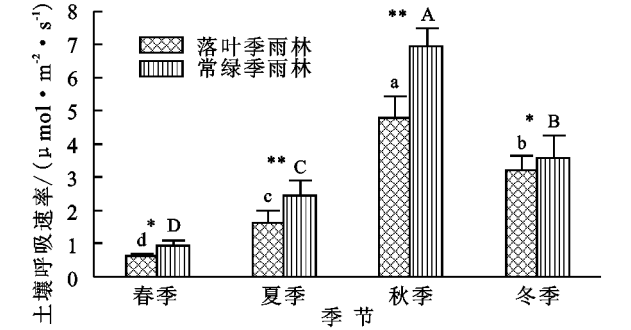


图 4 土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响

2.5 热带季雨林土壤呼吸的主要影响因素

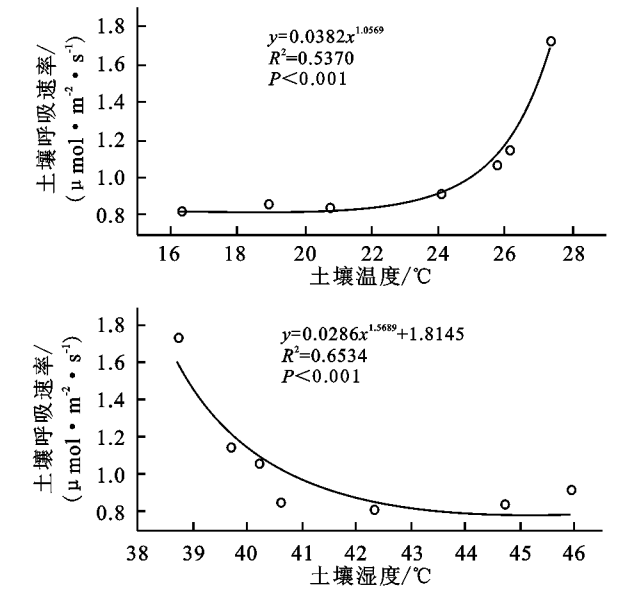
土壤呼吸主要是植物的根以及土壤微生物的呼吸,植物的生长、微生物的氧化分解等活动都要受周围环境如土壤温度、土壤水分、气温、空气湿度等的影响,因此,这些环境因子也是影响土壤呼吸强度的重要因素。由表 2 可知,2 种热带季雨林土壤呼吸强度与各环境因子的 Pearson 相关关系均显著,但有时由于某一共同变量的干扰会导致 2 个变量间的假相关,为排除其他因素的干扰,对各因子分别作偏相关分析,控制其他几个变量以分析土壤呼吸与另一个变量的净相关关系。结果表明,落叶季雨林和常绿季雨林土壤呼吸均与有机质和土壤速效养分含量呈极显著的相关关系($p<0.01$),与土壤全氮含量呈显著的相关关系($p<$

的 52.1%~65.3%。其中落叶季雨林土壤呼吸与土壤湿度的线性关系具体表现为 $y=-0.0671x+3.2476$ ($R^2=0.5259$, $p<0.001$),常绿季雨林土壤呼吸与土壤温度的指数关系具体表现为 $y=0.0286x^{-1.5689}+1.87455$ ($R^2=0.6534$, $p<0.001$)。



注:大、小写字母分别表示不同季节两种季雨林土壤呼吸差异显著 ($p<0.05$),* 和 ** 表示相同季节两种季雨林土壤呼吸在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 差异显著。

图 3 热带季雨林土壤呼吸季节变化规律



0.05),而与全磷含量并没有显著的相关性($p>0.01$),其中常绿季雨林的相关性系数均高于落叶季雨林。

表 2 热带季雨林土壤呼吸的主要影响因素

项目	落叶季雨林		常绿季雨林	
	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性
有机质	0.952	0.000**	0.963	0.000**
全氮	0.523	0.048*	0.512	0.037*
全磷	0.212	0.095	0.105	0.103
速效氮	0.727	0.005**	0.798	0.004**
有效磷	0.654	0.009**	0.755	0.003**
有效钾	0.835	0.003**	0.903	0.000**

注:* 和 ** 分别表示在 0.05、0.01 水平相关性显著和极显著(双尾检验)。

3 讨论与结论

本研究中(图 1),西双版纳热带季雨林大气温度

存在显著的日变化,气温的日较差在早、晚可达 10°C 以上,白天较高的温度有利于植物进行光合作用,下午较低的温度下植物呼吸作用减弱,有利于植物进行有机物质的积累,由于观测日期属于夏季和秋季交接的时期,因此大气温度变化幅度大,14:00 左右温度达到最高,土壤呼吸速率对地表温度响应较快,故土壤呼吸速率在此时段达到峰值。土壤呼吸速率与土壤(0—10 cm)温度的变化趋势基本吻合,但热带季雨林土壤(0—10 cm)温度的峰值出现较土壤呼吸峰值的出现均有所延迟,其原因主要是土壤(0—10 cm)温度达到高峰期需要一个热传递过程,该现象在草地和森林土壤中也有出现,但延迟时间一般在 2 h 左右^[11]。从热带季节雨林土壤呼吸的日变化分布特征可以看出,在白天,林冠的调节作用趋向于在昼间热量充足时从外界获取能量,夜间则趋向于保持环境稳定,将林内外气温保持在一个可控的范围内。大量研究结果显示,森林、草原以及湿地等的土壤呼吸速率呈现单峰型特点^[11]。本研究中热带季雨林土壤呼吸日和季节变化同样呈现明显的单峰曲线,日变化峰值出现在 14:00,最小值出现在 6:00 左右,此时段地表温度较低、湿度较大,此外,根系活动和呼吸作用较弱,因此土壤呼吸速率低^[5-6]。土壤呼吸的季节变化特征表明,从春季开始,气温逐渐上升,土壤呼吸速率也逐渐增加,夏季土壤中的微生物和根系呼吸旺盛,导致 CO_2 排放强度增大,但由于这段时间内降雨少,土壤呼吸并没有达到最高值,秋季土壤中的活体根系数量最大,根系和微生物活性最强,而且此时水热条件较好,降雨量较大,因此土壤呼吸在秋季达到最高^[11]。

土壤呼吸速率主要由温度、湿度、环境因子等共同作用所驱动,主要控制因子随生态系统类型和气候类型不同而不同^[5-6]。对于热带季雨林生态系统,水热环境因子是影响其土壤呼吸最为主要的两大因素^[7-8,11]。大量研究表明,热带季雨林土壤呼吸主要受温度和水分的影 响,具有明显的季节动态,但 Hashimoto 等在泰国季雨林的研究认为,温度并不是影响土壤呼吸的主要因子,而水分则显现出干湿季变化,因此水分才是影响土壤呼吸的主要因子,这主要是由于供试植被、土壤类型及气候环境不同所致,他们是对热带季风气候环境下的森林生态系统进行研究^[5-6]。土壤湿度在一定程度上降低土壤呼吸速率对土壤温度的响应,土壤湿度的限制作用可能是导致土壤呼吸速率的敏感性降低。因此,土壤温度、湿度和养分含量相互作用影响着热带季雨林土壤呼吸,同时,在本研究中坡度和坡向的变化也影响着热带季雨林土壤呼吸。

一般情况下,土壤水分的增加会促进土壤的呼吸作用,当土壤湿度较低时,土壤呼吸强度随土壤水分的增加而增加,而土壤水分的增加会导致土壤通透性变差^[1-2,11]; O_2 是植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,过高的土壤含水量会限制土壤中 O_2 的扩散,此时土壤处于嫌气状态,植物根系和好氧微生物的活动受到抑制,土壤有机质的分解速率降低,土壤中产生的 CO_2 减少,所以会出现当土壤含水量超过阈值以后,土壤呼吸有所下降的现象,这与前人的研究结果是相似的^[7-8,11]。本研究中热带季雨林土壤呼吸作用受土壤湿度的影响较为明显,土壤呼吸速率与土壤(0—10 cm)湿度呈负线性相关关系,且存在一定差异,其大小依次为常绿季雨林>落叶季雨林,说明常绿季雨林土壤呼吸对水分的敏感性较强,其次为落叶季雨林。与此同时,土壤温度升高,根系呼吸和土壤生物活性增强,土壤中产生的 CO_2 增多,土壤温度影响土壤中 CO_2 向大气的输送过程, CO_2 向大气的排放增强。在秋季和夏季,土壤湿度的限制作用尤为明显,水分在一定程度上增加了土壤呼吸速率对土壤温度的响应。

参考文献

- [1] Scharlemann J P W, Tanner E V J, Hiederer R, et al. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81-91.
- [2] Matías L, Castro J, Zamora R. Effect of simulated climate change on soil respiration in a Mediterranean-type ecosystem: rainfall and habitat type are more important than temperature or the soil carbon pool[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 299-310.
- [3] Karhu K, Auffret M D, Dungait J A J, et al. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response [J]. *Nature*, 2014, 513(7516): 81-84.
- [4] Gomez-Casanovas N, Matamala R, Cook D R, et al. Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2532-2545.
- [5] Tucker C L, Bell J, Pendall E, et al. Does declining carbon-use efficiency explain thermal acclimation of soil respiration with warming[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 252-263.
- [6] Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, et al. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2011, 14(5): 835-847.

用的研究方法以及得出的相关结论可以有效提高黑龙江省煤炭城市土地的高效利用,但影响煤炭城市的很多指标难以量化,例如自然灾害、煤炭政策、土地总体规划等因素,本文是在假定这些因素对土地集约利用影响一定的前提下进行研究的,为了方便进一步的深入研究,接下来应将这些因素考虑下去,并且应加大投入城市基础设施、有效保护环境治理;合理配置土地资源,正确处理影响煤炭城市土地节约利用的各因素之间的关系,加强以煤矿为主的矿区土地规划引导,科学评价矿产资源开发对土地利用效益的影响,理清矿产资源开发与保护的关系、矿产资源开发与土地利用的关系。利用先进技术促进矿产资源综合利用,加大矿区复垦、复绿力度,积极做好矿产资源枯竭地区的产业转型和矿山生态恢复。

参考文献:

- [1] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, et al. Characterising the urban environment of UK cities and towns: A template for landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87(3): 210-222.
- [2] Kottmeier C, Biegert C, Corsmeier U. Effects of urban land use on surface temperature in Berlin: Case study[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2007, 133(2): 128-137.
- [3] Mitchell D, Clarke M, Baxter J. Evaluating land administration projects in developing countries[J]. *Land Use Policy*, 2008, 25(4): 464-473.
- [4] 朱天明, 杨桂山, 万荣荣. 城市土地集约利用国内外研究进展[J]. *经济地理*, 2009, 29(6): 977-983.
- [5] 王杨, 宋戈. 黑龙江省城市土地集约利用潜力时空变异规律[J]. *经济地理*, 2007, 27(2): 313-316.
- [6] 何明花, 刘峰贵, 唐仲霞, 等. 西宁市城市土地集约利用研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 28(3): 44-49.
- [7] 杨伟, 廖和平, 谢德体, 等. 基于生态健康的重庆市南岸区城市土地集约利用综合评价[J]. *中国土地科学*, 2012, 26(4): 78-83.
- [8] 陈钰, 雷国平. 大庆市土地利用与生态环境协调度评价[J]. *水土保持研究*, 2011, 6(3): 114-120.
- [9] 刘浩, 张毅, 郑文升. 城市土地集约利用与区域城市化的时空耦合协调发展评价: 以环渤海地区城市为例[J]. *地理研究*, 2011, 30(10): 1085-1016.
- [10] 李龙. 资源型城市土地资源与矿产资源冲突问题分析[J]. *工业技术经济*, 2007, 26(5): 107-109.
- [11] 范辉, 刘卫东, 周颖. 基于结构功能关系的城市土地集约利用评价: 以武汉市中心城区为例[J]. *经济地理*, 2013, 33(10): 145-150.
- [12] 李进涛, 谭术魁, 汪文雄. 基于 DPSIR 模型的城市土地集约利用时空差异的实证研究: 以湖北省为例[J]. *中国土地科学*, 2009, 23(3): 49-54.
- [13] 宋戈, 雷国平. 资源型城市土地集约利用评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 李景刚, 张效军, 高艳梅, 等. 基于改进熵值模型的城市土地集约利用动态评价: 以广州市为例[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(4): 118-122.
- [15] 宋戈, 郑浩. 黑龙江省地级市土地集约利用评价及驱动力: 以佳木斯市为例[J]. *经济地理*, 2008, 28(2): 297-299.
- [16] 杨佳惠, 雷国平. 黑龙江省煤炭城市鸡西市的土地利用综合效益评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 176-183.
- [17] 王雨晴, 宋戈. 城市土地利用综合效益评价与案例研究[J]. *地理科学*, 2006, 26(6): 743-748.
- [18] 王成新, 张本丽, 姚世谋. 山东省城市土地集约利用评价及其时空差异研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 109-113.
- [19] 雷广海, 刘友兆, 陆效平. 江苏省 13 个城市土地利用集约度时空变异及驱动因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(1): 7-12.
- [20] 乔陆印, 周伟, 曹银贵. 山西省 11 个地级市城市土地集约利用评价研究[J]. *资源与产业*, 2011, 13(3): 77-82.

(上接第 138 页)

- [7] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2013-2017.
- [8] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(2): 167-174.
- [9] De-Nova J A, Medina R, Montero J C, et al. Insights into the historical construction of species-rich Mesoamerican seasonally dry tropical forests: the diversification of *Bursera* (Burseraceae, Sapindales)[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 276-287.
- [10] Mo X X, Zhu H, Zhang Y J, et al. Traditional forest management has limited impact on plant diversity and composition in a tropical seasonal rainforest in SW China[J]. *Biological Conservation*, 2011, 144(6): 1832-1840.
- [11] 卢华正, 沙丽清, 王君, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2315-2322.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.