

西双版纳热带季节雨林土壤呼吸季节动态及驱动因素

蔡子良¹, 邱世平^{1, 2*}

1. 国家林业和草原局西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223

摘要: 季节雨林是西双版纳热带森林生态系统中原始林, 本研究采用挖壕沟法与红外气体分析法研究了西双版纳热带季节雨林土壤呼吸, 包括根系呼吸、异养呼吸的干湿季动态变化, 旨在为准确估算中国热带碳收支提供基础数据。结果表明, (1) 西双版纳热带季节雨林所在的土壤温度和土壤湿度存在显著的季节变化规律, 均呈倒“V”型变化趋势。不同季节 0—5 cm 土壤温度和湿度均显著高于 5—10 cm; 土壤温度和湿度随着季节的变化呈先增加后降低趋势, 在夏季达到最大, 在冬季最小。(2) 西双版纳热带季节雨林土壤总呼吸 (R_s)、自养呼吸 (R_a) 及异养呼吸 (R_h) 具有明显的分层现象和季节性规律, 从分层来看, 不同季节 0—5 cm 土壤总呼吸 (R_s)、自养呼吸 (R_a) 及异养呼吸 (R_h) 均高于 5—10 cm 土层; 从季节性规律来看, 土壤总呼吸 (R_s)、自养呼吸 (R_a) 及异养呼吸 (R_h) 随着季节的变化呈先增加后降低趋势, 在夏季达到最大, 在冬季最小。(3) 西双版纳热带季节雨林土壤总呼吸与土壤温度呈显著的指数关系, 与土壤湿度呈显著的二次曲线关系, 其决定系数 R^2 分别为 0.32—0.46 和 0.29—0.40 ($P < 0.05$), 明显低于土壤呼吸速率与土壤温度关系方程的 R^2 值, 这表明土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性较弱。(4) 主成分分析表明, 第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 64.18%, 负荷值最高的几个指标分别为有机碳、全氮和转化酶, 第二主成分为全氮、全钾和转化酶, 说明土壤温度、有机碳、全氮和蔗糖酶是西双版纳热带季节雨林土壤呼吸的主要影响因子。

关键词: 西双版纳; 热带季节雨林; 土壤呼吸; 季节动态

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.02.009

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2019) 02-0283-08

引用格式: 蔡子良, 邱世平, 2019. 西双版纳热带季节雨林土壤呼吸季节动态及驱动因素[J]. 生态环境学报, 28(2): 283-290.

CAI Ziliang, QIU Shiping, 2019. Seasonal variation of soil respiration and its impact factors in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Yunnan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(2): 283-290.

土壤呼吸作为土壤碳通量和陆地生态系统碳循环的关键成分, 土壤呼吸的微小变化将对大气碳热平衡产生巨大影响 (Carey et al., 2016; Berryman et al., 2015; Liu et al., 2016)。CO₂ 浓度增加导致全球气候变暖已是不争的事实, 威胁着人类的生存和发展 (李玉宁等, 2002; 崔骁勇等, 2001)。因此, 在全球气候变化背景下, 陆地生态系统碳循环与收支研究一直是国内外学者关注的热点问题之一 (曹湛波等, 2016)。土壤呼吸是土壤与大气进行碳交换的主要过程, 是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分, 也是土壤碳库主要输出途径, 全球每年通过土壤呼吸作用释放的 C 约为 75 Pg (Kang et al., 2016; 雷蕾等, 2016)。土壤呼吸速率很小的变化, 都将使大气 CO₂ 浓度和土壤碳储量发生巨大的改变, 在全球尺度, 森林土壤呼吸释放的 CO₂ 量为 77 Pg·a⁻¹ (以 C 计, 下同), 仅次于全

球总初级生产力 (100—120 Pg·a⁻¹), 大于全球陆地生态系统的净初级生产力 (50—60 Pg·a⁻¹) (栾军伟等, 2006; 杨玉盛等, 2004)。因此, 准确评估土壤呼吸作用及其对全球变化的响应具有十分重要的意义 (杨玉盛等, 2004; Xu et al., 2015; Chen et al., 2015)。

森林生态系统既可充当碳源也可充当碳汇, 其呼吸的年际变化大于光合作用 (龚斌等, 2013)。根据微气候法估算热带地区净初级生产力约为全球陆地生态系统光合作用的 32%, 而热带森林植被和地下碳约占全球陆地碳库的 37%, 这种对净生物碳汇的估算由于受取样区域限制而不很准确 (杨玉盛等, 2004)。近年来, 亚洲热带天然林正以前所未有的速度转变为次生林或人工林, 20 世纪 80 年代土壤损失到大气中的碳平均为 0.88 Pg·a⁻¹, 90 年代为 1.09 Pg·a⁻¹, 20 世纪大约为 2 Pg·a⁻¹ (王家骏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (4015020316)

作者简介: 蔡子良 (1986 年生), 男, 工程师, 博士, 研究方向为森林资源监测。E-mail: Ziliangcai@163.com

*通信作者: 邱世平 (1973 年生), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为林业调查规划设计、森林资源监测。E-mail:

Shi_pingqiu1983@163.com

收稿日期: 2018-09-17

等, 2018)。

西双版纳热带季节雨林是分布在热带北缘水热和海拔高度极限条件下的森林类型, 具有热带森林的结构和群落特征, 热带季节雨林面积在 1976—2013 年间减少了 67% (刘博奇等, 2016; 梁国华等, 2016)。土壤呼吸对于准确估算该区碳汇/源具有重要意义。目前土壤呼吸及其影响因子的研究主要集中在典型生态系统的测定上, 如温带森林、北方针叶林和半干旱草原等 (Xu et al., 2015; 刘博奇等, 2016; 王家骏等, 2018), 而对西双版纳热带季节雨林土壤呼吸, 区分根系呼吸、异养呼吸变化规律及其影响因子的研究尚未见报道。有鉴于此, 本研究探讨西双版纳地区热带季节雨林土壤呼吸季节变化动态及其影响因子, 旨在为准确估算中国热带碳收支提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西双版纳傣族自治州属北热带季风气候, 年均降雨量 1557 mm, 全年干湿季分明, 干季 (11 月至次年 4 月, 包括雾凉季和干热季) 降雨 264 mm, 占年降雨的 17%, 雨季 (5—10 月) 降雨 1293 mm, 占年降雨的 83%, 年均相对湿度 86%, 太阳年总辐射量 4902.4 MJ·m⁻², 年日照时数 1787.8 h。年均气温 21.5 °C, 最热月 (5 月) 均温 25.3 °C, 最冷月 (1 月) 均温 15.5 °C, 土壤为砖红壤。

本研究样地位于西双版纳勐仑自然保护区内 (21°51'N、101°12'E), 海拔约 756 m, 样地坡度约 25°。样地植被结构复杂, 物种丰富, 群落高度 40 m 左右, 结构复杂, 分层现象明显, 乔木层按高度可分为 3 层: 上层高 30 m 以上, 标志种主要为千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼 (*Pometia tomentosa*); 中层高度在 16—30 m 之间, 常见种有云南玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树 (*Gironniera 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*)、蚁花 (*Mezzettiopsis creaghii*) 及毒鼠子 (*Dichapetalum gelonioides*) 等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外, 常见种有染木 (*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟 (*Morinda angustifolia*)、玉叶金花 (*Mussaenda*) 等。草本层与灌木层处于同一层次, 种类不多, 常见种有海芋 (*Alocasia macrorrhiza*)、凤尾蕨 (*Pteris*) 等。藤本及附生植物丰富, 板根及茎花现象显著, 是典型的季节雨林。

1.2 土壤呼吸测定方法

在研究区布设监测点并标记, 在第一次测定土壤呼吸之前, 提前一天将测定基座嵌入土壤中, 剪

除每个基座内存留的土壤表层以上的地表植被, 聚氯乙烯圆柱体经过 24 h 平衡后, 土壤呼吸速率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, 在 6:00—18:00 之间测量, 每个监测点 1 次测定 2 个重复取平均值。在观测土壤呼吸的同时, 使用手持长杆电子温度探针测定 0—10 cm 深处的土壤温度, 同时使用 TDR 测定每个监测点附近 0—5 cm 和 5—10 cm 范围内的土壤湿度。同时取监测西双版纳热带季节雨林 0—10 cm 混合土样两份, 带回实验室, 一份自然风干 (15—20 d) 去除碎片和部分根后过 0.5 mm 筛, 测定土壤养分含量; 另一份于 4 °C 冰箱中保存, 用于土壤酶活性测定。

在每个样方内随机安置 3 个 PVC 连接环, 用于土壤呼吸速率的定期测定。本试验使用 Li-6400 分析系统 (Li-cor Inc., Lincoln, NE, USA) 测定土壤呼吸速率, 测定时间为 8:00—18:00, 每个月测定 3 次, 同时用 Li-8100 自带的土壤温度和湿度传感器分别测定 5 cm 深度的土壤体积含水量和土壤温度。每次测量时按照不同顺序进行测量, 以避免系统误差。

土壤呼吸速率 (R_s) ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 0—5 cm 土壤温度 (t) 以及 5—10 cm 土壤含水量 (W) 的拟合关系如下 (廖畅, 2016):

$$R_s = ae^{Kt} \quad (1)$$

$$R_s = aW^2 + bW + c \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 、 K 均为拟合参数。

$$Q_{10} = e^{10K} \quad (3)$$

根据土壤呼吸速率与土壤温度的指数关系, 通过样地内放置的温度自动记录仪记录的土壤温度, 分别计算各样地年平均土壤呼吸速率和单位面积土壤 CO₂ 通量为 (廖畅, 2016):

$$R_d = \sum_1^{24} R_i \times 3600 \times 10^4 \times 12 \times 10^{-6} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$R_y = \sum_1^{24} R_d \quad (5)$$

式中, R_d 和 R_y 分别为土壤呼吸日通量 ($\text{t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 和年通量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。利用 SPSS 20.0 软件进行 One-way ANOVA 分析, 采用 LSD 多重检验法检验处理间的差异显著性。

1.3 土壤养分的测定

土壤养分的测定参照鲍士旦(2000)的《土壤农化分析》：土壤有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)采用重铬酸钾氧化外加加热法测定；全氮($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)采用凯氏定氮法测定；全磷($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定；全钾($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)采用火焰分光光度法测定(胡军国, 2016)。

土壤酶活性的测定：土壤酶活测定采用分光光度计进行比色测定，测定酶活种类为纤维素酶(1 g 土样 30 min 内分解产生 1 mg 葡萄糖所需的酶量)、转化酶(1 g 土样 24 h 内分解产生 1 mg 葡萄糖所需的酶量)、脲酶(1 g 土样 24 h 内分解产生 1 mg 氨基氮所需的酶量)(胡军国, 2016)。

1.4 数据处理

运用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 进行数据分析，采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验各组数据间的差异显著性，Pearson 相关性系数检验各指标间的相关性；采用指数方程对土壤呼吸(R_s)与土壤温度和湿度间进行回归分析；采用主成分分析提取对研究区土壤呼吸起主导作用的土壤环境因子。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 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上检验相关系数的显著性。

2 结果与分析

2.1 西双版纳热带季节雨林环境因子日动态

图 1 可知，西双版纳热带季节雨林土壤温度和土壤湿度呈一致的变化规律，均呈倒“V”型变化趋势。不同季节 0—5 cm 土壤温度均显著高于 5—10 cm；0—5 cm 土壤温度随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，其中不同季节 0—5 cm 土壤温度差异均显著($P<0.05$)；5—10 cm 土

壤温度随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小，其中春季和冬季 5—10 cm 土壤温度差异不显著($P>0.05$)，二者显著低于夏季和秋季($P<0.05$)。不同季节 0—5 cm 土壤湿度均显著高于 5—10 cm 土壤湿度；0—5 cm 土壤湿度随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小，其中春、夏和秋季 0—5 cm 土壤湿度差异均不显著($P>0.05$)；5—10 cm 土壤湿度随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小，其中春季秋季和冬季 5—10 cm 土壤湿度差异不显著($P>0.05$)，三者显著低于夏季($P<0.05$)。

2.2 西双版纳热带季节雨林土壤总呼吸(R_s)、自养呼吸(R_a)及异养呼吸(R_h)

由图 2 可知，西双版纳热带季节雨林土壤呼吸具有明显的分层现象和季节性规律，从分层现象来看，不同季节 0—5 cm 土壤总呼吸(R_s)、自养呼吸(R_a)及异养呼吸(R_h)均高于 5—10 cm 土层；从季节性规律来看，0—5 cm 土壤异养呼吸(R_h)随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小，其中夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$)，5—10 cm 土壤异养呼吸(R_h)随着季节的变化呈先增加后降低趋势，春季和冬季差异不显著($P>0.05$)，二者显著低于夏季和秋季($P<0.05$)。0—5 cm 土壤自养呼吸(R_a)随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小，其中春季和冬季差异不显著($P>0.05$)，二者显著低于夏季和秋季($P<0.05$)，5—10 cm 土壤自养呼吸(R_a)表现为：春季、秋季和冬季差异不显著($P>0.05$)，三者显著低于夏季($P<0.05$)。0—5 cm 和 5—10 cm 土壤总呼吸(R_s)随着季节的

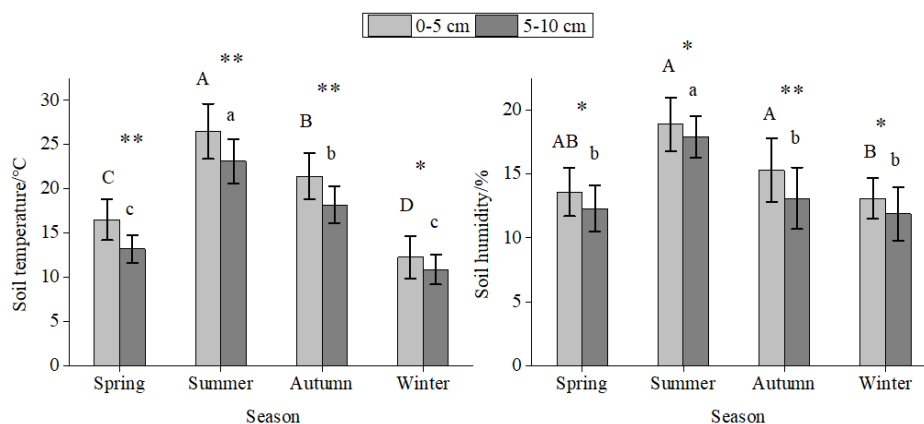


图1 西双版纳热带季节雨林环境因子日动态

Fig. 1 Daily dynamics of environmental factors in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna

$n=18$ ；不同大写字母表示 0—5 cm 差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示 5—10 cm 差异显著，下同

$n=18$ ；Different capital letters indicate significant difference in 0—5 cm soil layer ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference in 0—5 cm soil layer, the same below

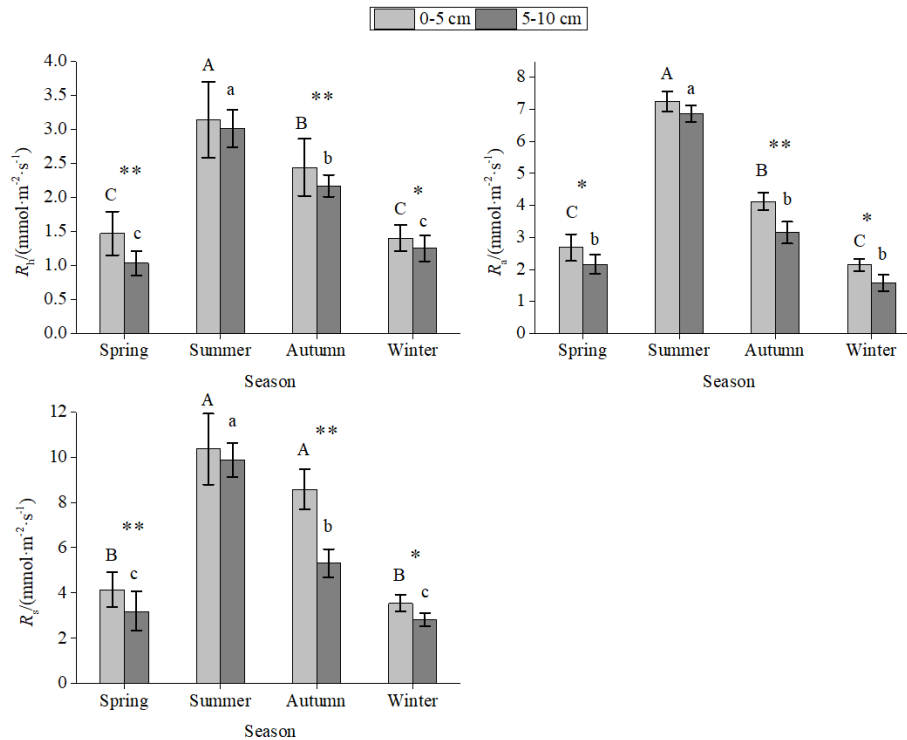


图2 西双版纳热带季节雨林土壤总呼吸 (R_s)、自养呼吸 (R_a) 及异养呼吸 (R_h)

Fig. 2 Total soil respiration (R_s), autotrophic respiration (R_a) and heterotrophic respiration (R_h) in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna

变化呈先增加后降低趋势,在夏季达到最大,在冬季最小。

2.3 西双版纳热带季节雨林土壤养分和酶活性

由表 1 可知,西双版纳热带季节雨林土壤养分和酶活性具有明显的分层现象和季节性规律,从分层现象来看,不同季节 0—5 cm 土壤养分和酶活性均高于 5—10 cm 土层;从季节性规律来看,土壤养分和酶活性随季节的变化呈先增加后降低趋势,在夏季达到最大。0—5 cm 土壤有机碳、全氮、全钾、纤维素酶、脲酶、转化酶和蔗糖酶均随着季节的变化呈先增加后降低趋势,在夏季达到最大,在冬季最小,其中夏季和秋季差异不显著 ($P>0.05$),春季和冬季差异不显著 ($P>0.05$)。5—10 cm 土壤有机碳、全氮、全钾、纤维素酶、脲酶、转化酶和

蔗糖酶均随着季节的变化呈先增加后降低趋势,在夏季达到最大,在冬季最小,其中夏季和秋季差异不显著 ($P>0.05$),春季和冬季差异不显著 ($P>0.05$)。0—5 cm 和 5—10 cm 土壤全磷随着季节呈先增加后降低趋势,其中不同季节土壤全磷差异均不显著 ($P>0.05$)。

2.4 土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响

西双版纳热带季节雨林土壤总呼吸与土壤温度呈显著的指数关系(表 2),其响应具体表现在,夏季和秋季土壤呼吸 Q_{10} 显著高于春季和秋季。春季、夏季、秋季和冬季土壤总呼吸的 Q_{10} 分别为 1.53、1.86、1.62、1.70。不同季节土壤异养呼吸与土壤温度呈显著的指数关系,其中夏季和秋季土壤异养呼吸温度敏感性较高。春季、夏季、秋季和冬

表1 西双版纳热带季节雨林土壤养分和酶活性

Table 1 Soil nutrient and enzyme activity in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna

土层深度 Soil depth	季节 Season	有机碳 Soil organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	纤维素酶 Cellulase/(mg ⁻¹ ·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	脲酶 Urease/(mg ⁻¹ ·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	转化酶 Invertase/(mg ⁻¹ ·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	蔗糖酶 Sucrase/(mg ⁻¹ ·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
0—5 cm	春季 Spring	16.52±2.15b	1.63±0.13b	0.75±0.06a	6.35±0.56b	1.68±0.35b	4.36±0.35b	3.56±0.63b	1.23±0.13b
	夏季 Summer	19.36±1.69a	1.98±0.25a	0.81±0.05a	12.15±1.42a	2.89±0.46a	6.87±0.46a	7.13±0.52a	2.69±0.26a
	秋季 Autumn	18.72±2.41a	1.82±0.16a	0.77±0.08a	11.04±2.31a	2.61±0.32a	6.53±0.26a	6.85±0.34a	2.53±0.15a
	冬季 Winter	15.04±1.87b	1.51±0.24b	0.73±0.04a	5.18±0.85b	1.53±0.42b	4.12±0.38b	3.02±0.48b	1.14±0.32b
5—10 cm	春季 Spring	13.69±2.06b	1.54±0.26b	0.71±0.06a	5.03±0.54c	1.54±0.31b	3.68±0.42b	2.89±0.25b	0.98±0.24b
	夏季 Summer	16.23±1.87a	1.83±0.32a	0.73±0.03a	10.41±1.21a	2.65±0.29a	5.87±0.36a	6.03±0.26a	2.34±0.26a
	秋季 Autumn	15.48±1.54a	1.74±0.27a	0.71±0.05a	8.06±0.98b	2.31±0.25a	5.81±0.28a	5.37±0.34a	2.17±0.34a
	冬季 Winter	12.04±2.03b	1.41±0.31b	0.68±0.04a	4.12±0.54c	1.47±0.37b	3.24±0.27b	2.17±0.31b	0.85±0.19b

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$), the same below

表2 土壤呼吸和组分与土壤温度的指数关系
Table 2 Exponential relationship between soil respiration and soil temperature

项目 Item	季节 Season	F	R ²	参数 Parameter		
				a	K	Q ₁₀
R _s	春季 Spring	236.35	0.456	1.263	0.035	1.53
	夏季 Summer	298.21	0.596	0.856	0.075	1.86
	秋季 Autumn	198.26	0.513	0.952	0.065	1.62
	冬季 Winter	203.14	0.496	1.026	0.041	1.70
R _h	春季 Spring	201.45	0.463	1.145	0.063	1.63
	夏季 Summer	286.27	0.538	0.856	0.072	1.72
	秋季 Autumn	187.56	0.423	0.257	0.034	1.58
	冬季 Winter	168.03	0.401	0.142	0.068	1.52
R _a	春季 Spring	206.58	0.432	0.398	0.029	1.62
	夏季 Summer	275.04	0.587	1.041	0.017	1.83
	秋季 Autumn	213.45	0.498	0.854	0.034	1.60
	冬季 Winter	188.03	0.414	0.927	0.053	1.57

n=90. The same below

季土壤异养呼吸 Q₁₀ 分别为 1.63、1.72、1.58、1.52，不同季节土壤自养呼吸与土壤温度呈显著的指数关系，夏季和秋季土壤自养呼吸温度敏感性较高。

整个试验期测得的不同季节土壤呼吸速率与 0—5 cm 和 5—10 cm 土层土壤含水量之间的关系用二次曲线拟合最好（表 3），其决定系数 R² 分别为 0.317—0.456 和 0.289—0.401，明显低于土壤呼吸速率与土壤温度关系方程的 R² 值，这表明土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性较弱，夏季和秋季相关性强于春季和冬季（相关系数绝对值）。

2.5 西双版纳热带季节雨林土壤呼吸的主成分分析

表 4 是主成分分析中各土壤环境因子的总方差分解表，可以看出第一、第二主成分特征值占总方差的百分比为 87.249%，即前两个主成分对 8 个指标所涵盖的大部分信息进行了概括，其中第一主成分携带的信息最多（达到 64% 以上），而主成分 3 和 4 对总方差的贡献很小（9.189% 和 3.562%），因此，选取前 2 个因子作为主成分。表 5 是土壤环境因子对应于两个主成分的荷载值，反映了主成分与变量的相关系数，荷载值大的即可认为是重要因子。第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 64.184%，荷载值最高的几个指标分别为有机碳、全氮和转化酶（分别为 0.857、0.803 和 0.812，绝对值大于 0.8 时判定为荷载值较高），第二主成分为全氮、全钾和转化酶（分别为 0.832、0.801 和 0.803），说明有机碳、全氮和蔗糖酶是西双版纳热

表4 观测指标总方差分解表

Table 4 Analysis table of total variance of observation indexes

主成分 Principal component	特征值及贡献率 Eigenvalues and contribution rates		
	特征值 Eigenvalues	贡献率 Contribution rates/%	累积贡献率 Accumulative contribution/%
1	64.184	64.184	64.184
2	23.065	87.249	87.249
3	9.189	96.438	96.438
4	3.562	100	100

表5 主成分荷载矩阵

Table 5 Principal component load matrix

项目 Item	主成分 Principal component	
	1	2
有机碳 Soil organic carbon	0.857	0.042
全氮 Total nitrogen	0.803	0.832
全磷 Total phosphorus	0.201	0.017
全钾 Total potassium	0.357	0.803
纤维素酶 Cellulase	0.204	0.614
脲酶 Urease	0.345	0.432
转化酶 Invertase	0.812	0.803
蔗糖酶 Sucrase	0.074	0.507

带季节雨林土壤呼吸的主要影响因子。

3 讨论

本研究中，西双版纳热带季节雨林土壤温度和土壤湿度存在显著的季节变化规律，均呈倒“V”型变化趋势。不同季节 0—5 cm 土壤温度和湿度均显著高于 5—10 cm；土壤温度和湿度随着季节的变化呈先增加后降低趋势，在夏季达到最大，在冬季最小。研究显示（杨帆等，2017；刘博奇等，2016），森林、草原以及湿地等的土壤呼吸速率呈现单峰型变化，本研究中西双版纳热带季节雨林土壤呼吸日变化同样呈现明显的单峰曲线，季节变化峰值出现在夏季，最小值出现在冬季，夏季地表温度较低、湿度较大，随时间的变化，气温逐渐上升，土壤呼吸速率也逐渐增加，土壤中的微生物和根系呼吸旺盛，导致 CO₂ 排放强度增大，土壤呼吸达到最高值，根系和微生物活性最强，此后，随着温度的降低，土壤呼吸则急剧降低。土壤呼吸速率主要由温度、湿度等环境因子共同作用所驱动，主要控制因子随生态系统类型和气候类型不同而不同（Carey et al., 2016）。大量研究表明，西双版纳热带季节雨林土壤呼吸主要受温度和水分的影响，具有明显的季节

表3 土壤呼吸和组分与土壤含水量的指数关系

Table 3 Exponential relationship between soil respiration and soil moisture content

季节 Season	0—5 cm 土壤含水量 Soil moisture content (W)			5—10 cm 土壤含水量 Soil moisture content (W)		
	关系方程 Equation	R ²	F	关系方程 Equation	R ²	F
春季 Spring	R _s =-0.043W ² +0.276W-1.126	0.325	231.46	R _s =-0.169W ² -0.545W+1.576	0.314	201.48
夏季 Summer	R _s =0.057W ² -0.732W+0.249	0.456	264.89	R _s =-0.324W ² +0.124W-2.024	0.401	252.34
秋季 Autumn	R _s =-0.054W ² +0.456W-0.042	0.402	198.46	R _s =0.875W ² +0.014W-0.535	0.356	175.24
冬季 Winter	R _s =0.071W ² -0.004W+0.545	0.317	176.23	R _s =-0.132W ² +0.354W-0.147	0.289	165.32

动态,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导致土壤呼吸速率的敏感性降低(王家骏,2017;刘彦春等,2016)。因此,土壤温度、湿度和养分含量相互作用影响着西双版纳热带季节雨林土壤呼吸。另外,土壤呼吸具有明显的季节特征,最大值出现在夏季,冬季最小,这与前人的研究结果一致(Bae et al., 2015; Barba et al., 2016)。研究区夏季降雨频繁,温度较高,良好的水热条件有利于植物的生长发育,植物地下部分的根系呼吸旺盛,且生长过程中产生相当量的分泌物可作为微生物代谢活动的养料(Avila et al., 2016; Fang et al., 2015; Taylor et al., 2015);另一方面在高温高湿条件下凋落物分解加快,向土壤输送的养分增多,促进了土壤微生物的呼吸;在冬季,植物还处于休眠期,而此时土壤微生物的代谢活性也较低(杨开军等,2016;葛晓改等2016;梁国华等,2016)。因此,土壤总呼吸随季节呈先增加后降低趋势。

通常情况下,土壤湿度会促进土壤呼吸,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(杨开军等,2016;陈书涛等,2017)。O₂是植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,过高的土壤湿度会限制土壤中O₂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,土壤有机碳的分解速率降低,土壤中产生的CO₂减少,所以会出现当土壤湿度超过阈值以后,土壤呼吸有所下降的现象(夏秀雪等,2017;付刚等,2017)。本研究中,西双版纳热带季节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湿度呈负线性相关关系,并没有出现影响土壤呼吸的土壤湿度的阈值。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CO₂增多,土壤温度影响土壤中CO₂向大气的输送过程,CO₂向大气的排放增强,因此土壤温度与土壤呼吸呈正相关;另一方面,土壤湿度在一定程度上增强了土壤呼吸速率对土壤温度的响应(陈晶等,2016)。通过相关性分析可知,不同的西双版纳热带季节雨林土壤呼吸均与土壤养分和土壤酶活性有一定的相关性,而主成分的结果显示西双版纳热带季节雨林土壤有机碳、全氮和蔗糖酶是土壤呼吸的主要影响因素。

本研究表明,试验期内土壤呼吸速率与0—5 cm和5—10 cm深处土壤温度之间均存在极显著指数正相关关系,表明温度是影响西双版纳热带季节雨林土壤呼吸速率的主导因子,这与国内外多数研究结果一致(王家骏等,2018;刘博奇等,2016)。

这可能是由于土壤温度的变化对植物根系活性和土壤微生物代谢活动产生了影响,从而使得土壤呼吸发生变化。在一定范围内,随着温度的升高,土壤微生物活性增强,土壤呼吸速率也会随之增大。土壤呼吸受到土壤温度、湿度等因子的综合影响,其过程十分复杂(张慧东等,2015;郑威等,2017;郭全恩等,2016)。国内外许多研究表明,森林土壤呼吸与土壤温度有良好的相关性。在热带、亚热带森林和北温带森林中均发现土壤呼吸与地表温度之间具有极显著的指数关系(郑威等,2017)。本研究利用温度单因素指数模型拟合呼吸对温度的响应函数,相关性极显著,表明随着温度的升高,土壤呼吸速率呈指数增长,与国内外许多研究结果相同(邵英男等,2017;曹裕松等,2016;王亚军等,2018)。对众多植被的研究结果表明,土壤呼吸与土壤湿度之间也存在正相关关系。本研究中,土壤呼吸与土壤温度和湿度的双因素模型较单因素模型拟合度更高,表明所研究林分土壤呼吸受二者共同影响。本研究中,不同氮浓度的土壤呼吸速率与0—5 cm和5—10 cm土层土壤含水量之间的关系用二次曲线拟合最好,其决定系数R²分别为0.32—0.46和0.29—0.40,明显低于土壤呼吸速率与土壤温度关系方程的R²值,这表明土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性较弱。其主要原因可能是该区属于亚热带季风湿润性气候特征,降水比较丰富,林地蓄水持水能力较强,从整个试验期来看,土壤含水量保持在相对较高的状态,故水分不是限制土壤呼吸的关键因子,土壤含水量对土壤呼吸的影响远小于土壤温度对土壤呼吸的影响。

4 结论

本文探讨西双版纳地区热带季节雨林土壤呼吸季节变化动态及其影响因素,其结论如下:

西双版纳热带季节雨林土壤温度和土壤湿度存在显著的季节变化规律,均呈倒“V”型变化趋势;土壤总呼吸(R_s)、自养呼吸(R_a)及异养呼吸(R_h)随着季节的变化呈先增加后降低趋势,在夏季达到最大;其中不同季节0—5 cm土壤总呼吸(R_s)、自养呼吸(R_a)及异养呼吸(R_h)均高于5—10 cm土层。土壤总呼吸与土壤温度呈显著的指数关系,与土壤湿度呈显著的二次曲线关系,其中土壤温度对西双版纳热带季节雨林土壤呼吸速率的影响高于土壤湿度。主成分分析表明:第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的64.18%,负荷值最高的几个指标分别为有机碳、全氮和转化酶,第二主成分为全氮、全钾和转化酶,说明土壤温度、有机碳、全氮和蔗糖酶是西双版纳热带季节雨林土壤呼吸的主要影响因素。

参考文献:

- AVILA J M, GALLARDO A, IBANEZ B, et al., 2016. Quercus suber dieback alters soil respiration and nutrient availability in Mediterranean forests [J]. *Journal of Ecology*, 104(5): 1441-1452.
- BAE K, FAHEY T J, YANAI R D, et al., 2015. Soil nitrogen availability affects belowground carbon allocation and soil respiration in northern hardwood forests of New Hampshire [J]. *Ecosystems*, 18(7): 1179-1191.
- BARBA J, YUSTE J C, POYATOS R, et al., 2016. Strong resilience of soil respiration components to drought-induced die-off resulting in forest secondary succession [J]. *Oecologia*, 182(1): 27-41.
- BERRYMAN E M, BARNARD H R, ADAMS H R, et al., 2015. Complex terrain alters temperature and moisture limitations of forest soil respiration across a semiarid to subalpine gradient [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(4): 707-723.
- CAREY J C, TANG J, TEMPLER P H, et al., 2016. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48): 13797-13802.
- CHEN S T, ZHANG X, LIU Y F, et al., 2015. Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 86: 148-157.
- FANG X, ZHAO L, ZHOU G Y, et al., 2015. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests [J]. *Plant and Soil*, 392(1-2): 139-153.
- LIU Y C, LIU S R, WAN S Q, et al., 2016. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 226-227: 186-198.
- KANG H Z, FAHEY T J, BAE K K, et al., 2016. Response of forest soil respiration to nutrient addition depends on site fertility [J]. *Biogeochemistry*, 127(1): 113-124.
- TAYLOR A J, LAI C T, HOPKINS F M, et al., 2015. Radiocarbon-based partitioning of soil respiration in an old-growth coniferous forest [J]. *Ecosystems*, 18(3): 459-470.
- XU Z F, TANG S S, XIONG L, et al., 2015. Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: Patterns and controls [J]. *Applied Soil Ecology*, 93: 105-110.
- 鲍士旦, 2000. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社.
- BAO S D, 2000. Analysis of agrochemical soil [M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press.
- 曹裕松, 吴风云, 肖宜安, 等, 2016. 退耕还林对土壤养分含量及其垂直分布的影响[J]. *生态环境学报*, 25(2): 196-201.
- CAO Y S, WU F Y, XIAO Y A, et al., 2016. Effect of returning farmland to forests on soil nutrients contents and its vertical distribution [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(2): 196-201.
- 曹湛波, 王磊, 李凡, 等, 2016. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 37(5): 1908-1914.
- CAO Z B, WANG L, LI F, et al., 2016. Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 37(5): 1908-1914.
- 陈晶, 康峰峰, 程小琴, 等, 2016. 太岳山华北落叶松林土壤呼吸特征对模拟氮硫沉降的短期响应[J]. *应用与环境生物学报*, 3(4): 646-653.
- CHEN J, KANG F F, CHENG X Q, et al., 2016. Short-term response of soil respiration characteristics to simulated nitrogen and sulfur deposition in larch forests of north China in taiyue mountains[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 3(4): 646-653.
- 陈书涛, 邹建文, 胡正华, 2017. 陆地生态系统土壤呼吸的观测与模拟[J]. *生态环境学报*, 26(11): 1985-1996.
- CHEN S T, ZHOU J W, HU Z H, 2017. Measurements and Modeling of Soil Respiration in Terrestrial Ecosystems [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(11): 1985-1996.
- 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清, 2001. 草地土壤呼吸研究进展[J]. *生态学报*, 21(2): 315-325.
- CUI X Y, CHEN Z Z, CHEN S Q, 2001. Progress in research on soil respiration of grasslands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(2): 315-325.
- 付刚, 钟志明, 2017. 实验增温对西藏高原玉米田土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 26(1): 49-54.
- FU G, ZHONG Z M, 2017. Effect of experimental warming on soil respiration in a maize system of Tibe [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(1): 49-54.
- 葛晓改, 周本智, 肖文发, 等, 2016. 生物质炭输入对土壤碳排放的激发效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 25(2): 339-345.
- GE X G, ZHOU B Z, XIAO W F, et al., 2016. Priming effect of biochar addition on soil carbon emission: a Review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(2): 339-345.
- 龚斌, 王凤玉, 张继平, 等, 2013. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系[J]. *生态环境学报*, 7(8): 1275-1281.
- GONG B, WANG F Y, ZHANG J P, et al., 2013. Diurnal changes of soil respiration of mid-subtropical forest and its relationship with soil temperature and humidity [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 7(8): 1275-1281.
- 郭全恩, 李保国, 南丽丽, 等, 2016. 疏勒河流域绿洲荒漠过渡带土壤呼吸特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 25(6): 934-938.
- GUOP Q E, LI B G, NAN L L, et al., 2016. Characteristics of soil respiration and its influence factors in oasis-desert transitional belt of Shule River basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(6): 934-938.
- 胡军国, 2016. 森林土壤呼吸监测与评价方法研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- HU J G, 2016. Forest soil respiration monitoring and evaluation methods [D]. Beijing: Beijing Forestry University.
- 雷蕾, 肖文发, 曾立雄, 等, 2016. 马尾松林土壤呼吸组分对不同营林措施的响应[J]. *生态学报*, 36(17): 5360-5370.
- LEI L, XIAO W F, ZENG L X, et al., 2016. Response of soil respiration components to different forest management measures in masson pine forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(17): 5360-5370.
- 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等, 2016. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应[J]. *生态学杂志*, 35(1): 125-134.
- LIANG G H, WU J P, XIONG X, et al., 2016. Response of soil respiration to simulated acid rain in three successional subtropical forests in southern China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 35(1): 125-134.
- 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等, 2016. 模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响[J]. *广西植物*, 36(2): 145-153.
- LIANG G H, WU J P, XIONG X, et al., 2016. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Nature Reserve [J]. *Guihaia*, 36(2): 145-153.
- 廖畅, 2016. 氮添加和凋落物处理对中亚热带山地森林土壤呼吸的影响[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉植物园).
- LIAO C, 2016. Effects of nitrogen addition and litter treatment on soil respiration in subtropical mountain forests [D]. Wuhan: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences.
- 李玉宁, 王关玉, 李伟, 2002. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. *地学前缘*, 9(2): 351-357.
- LI YU N, WANG G Y, LI W, 2002. Soil respiration and carbon cycle [J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 351-357.
- 刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 等, 2016. 小兴安岭典型温带森林土壤呼吸对强降雨的响应[J]. *北京林业大学学报*, 38(4): 77-85.
- LIU F Q, MOU C C, XING Y J, et al., 2016. Effect of strongrainfalls on soil respiration in a typical temperate forest in Lesser Xing' an Mountains, northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(4): 77-85.
- 刘彦春, 尚晴, 王磊, 等, 2016. 气候过渡带锐齿栎林土壤呼吸对降雨改变的响应[J]. *生态学报*, 36(24): 8054-8061.
- LIU Y C, SHANG Q, WANG L, et al., 2016. Responses of soil respiration to changing precipitation regimes in an oak forest at a climate transitional zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(24): 8054-8061.
- 刘颖, 韩士杰, 2009. 长白山四种森林土壤呼吸的影响因素[J]. *生态环境学报*, 18(3): 1061-1065.
- LIU Y, HAN S J, 2009. Factors controlling soil respiration in four types of forest of Changbai Mountains, China [J]. *Ecology and*

- Environmental Sciences, 18(3):1061-1065.
- 栾军伟, 向成华, 骆宗诗, 等, 2006. 森林土壤呼吸研究进展[J]. 应用生态学报, 17(12): 2451-2456.
- LUAN J W, XIANG C H, LUO Z S, et al., 2006. Research advances in forest soil respiration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 17(12): 2451-2456.
- 邵英男, 田松岩, 刘延坤, 等, 2017. 密度调控对长白落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. 北京林业大学学报, 39(6): 51-59.
- SHAO Y N, TIAN S Y, LIU Y K, et al., 2017. Effects of density control on soil respiration in *Larix olgensis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 39(6): 51-59.
- 王家骏, 王传宽, 韩轶, 2018. 帽儿山不同年龄森林土壤呼吸速率的影响因子[J]. 生态学报, 38(4): 57-61.
- WANG J J, WANG C K, HAN Y, 2018. Factors affecting soil respiration in stands of different ages in the Maoershan region, Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 38(4): 57-61.
- 王家骏, 2017. 帽儿山天然次生林年龄序列土壤呼吸和土壤有机碳储量差异[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- WANG J J, 2017. The difference of soil respiration and soil organic carbon storage in age sequence of maer mountain natural secondary forest [D]. Harbin: Northeast Forestry University.
- 王亚军, 郁珊珊, 2018. 城市绿地生态系统雨季土壤呼吸对降雨变化的响应[J]. 生态环境学报, 27(4): 625-633.
- WANG Y J, YU S S, 2018. Response of soil respiration of urban green-land ecosystem to precipitation events in Fuzhou city [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(4): 625-633.
- 夏秀雪, 高国强, 王东男, 等, 2017. 林下植被去除对水曲柳人工林土壤呼吸、微生物和根系动态的短期影响[J]. 生态学杂志, 36(5): 1198-1207.
- XIA X X, GAO G Q, WANG D N, et al., 2017. Short-term effect of understory removal on the dynamics of soil respiration, microbial biomass, and root growth in a *Fraxinus mandshurica* Rupr. plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 36(5): 1198-1207.
- 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等, 2004. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 24(3): 583-591.
- YANG Y S, DONG B, XIE J S, et al., 2004. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. Acta Ecologica Sinica, 24(3): 583-591.
- 杨帆, 杨万勤, 吴福忠, 等, 2017. 氮对川西亚高山森林土壤呼吸、养分和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 28(6): 1779-1785.
- YANG F, YANG W Q, WU F Z, et al., 2017. Effects of naphthalene on soil respiration, nutrients and enzyme activities in the subalpine forest of western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(6): 1779-1785.
- 杨开军, 熊莉, 杨万勤, 等, 2016. 林窗对川西亚高山云杉人工林土壤呼吸的影响[J]. 应用与环境生物学报, 22(3): 505-509.
- YANG K J, XIONG L, YANG W Q, et al., 2016. Effects of forest Windows on soil respiration in subalpine spruce plantations in western Sichuan [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 22(3): 505-509.
- 张慧东, 尤文忠, 魏文俊, 等, 2015. 暖温带-中温带过渡区4种典型森林土壤呼吸的温度敏感性[J]. 生态环境学报, 24(11): 1757-1764.
- ZHANG H D, YOU W Z, WEI W J, et al., 2015. Temperature sensitivity of soil respiration in four forest types in temperate ecotone, northeast China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 24(11): 1757-1764.
- 郑威, 何峰, 谭一波, 等, 2017. 两种石漠化区退耕林型的土壤呼吸及模型模拟[J]. 生态科学, 36(5): 138-143.
- ZHENG W, HE F, TAN Y B, et al., 2017. Soil respiration and model simulation for two plantation types belong to conversion of cropland to forest project in karst area [J]. Ecological Science, 36(5): 138-143.

Seasonal Variation of Soil Respiration and Its Impact Factors in Tropical Seasonal Rainforest in Xishuangbanna, Yunnan

CAI Ziliang¹, QIU Shiping^{1,2*}

1. Northwest Institute of Inventory, Planning and Design, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China;

2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

Abstract: This study was conducted in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Yunnan aiming at measuring soil respiration and its impact factors. The results showed that (1) Soil temperature and soil moisture had the obvious seasonal dynamics and there was a lower soil temperature and soil moisture in winter and higher in summer, and the soil temperature and soil moisture in 0–5 cm was higher than 5–10 cm. (2) Total soil respiration (R_s), soil autotrophic respiration (R_a) and soil heterotrophic respiration (R_h) had the obvious seasonal dynamics which showed increased and then decreased with seasonal variation, and R_s , R_a , R_h in 0–5 cm was higher than 5–10 cm. (3) There was a significantly exponential relationship between total soil respiration and soil temperature, and a significantly quadratic curve between total soil respiration and soil water content in 0–5 and 5–10 cm with R^2 of 0.317–0.456, 0.289–0.401, which was higher than the correlation coefficient between total soil respiration and soil temperature, indicating that the effect of soil water content on soil respiration was weak than soil temperature. And (4) principal component analysis showed that the interpretation of the first principal components of original variables accounted for 64.184% of the total variance, respectively. Soil organic carbon, total nitrogen and invertase had the highest load value, and the second principal components were soil total nitrogen, total potassium and invertase, which illustrated that soil organic carbon, total nitrogen and sucrose were the main influencing factors to soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna.

Key words: Xishuangbanna; tropical seasonal rainforest; soil respiration; seasonal variation