

滇中云南松林土壤呼吸季节动态及其影响因子研究

赵吉霞, 王邵军*, 陈奇伯, 陈敏全, 舒蛟靖, 李元玖

(西南林业大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要:采用 Li-6400-09 便携式土壤呼吸室对澄江尖山河流域云南松土壤呼吸速率进行定位测定, 并对土壤呼吸的影响因子进行分析。结果表明: 土壤呼吸具有明显的季节变化特点, 云南松次生林土壤呼吸波动范围为 $0.77 \sim 4.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 湿季土壤呼吸速率显著高于干季($p < 0.05$); 土壤呼吸速率与土壤温度和土壤水分的相关性均达到显著水平, 且与土壤水分相关性最紧密, 它能够解释云南松林土壤呼吸的 57.9%~69.4%; 双因素模型较好地拟合了土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸的交互作用, 两者共同解释了土壤呼吸速率变化的 74.5%~81.6%; 相关分析表明, 不同土壤化学指标对土壤呼吸速率的影响存在差异。土壤呼吸速率与土壤易氧化有机碳、全氮、水解氮及 pH 均呈显著的正相关关系, 且与土壤全 P 含量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), 而与土壤 C/N 则呈极显著的负相关关系。因此, 西南地区严重干旱的情况下, 土壤含水量的减少成为云南松林土壤呼吸季节变化的主控因子, 其次为土壤化学性质的影响。

关键词: 云南松林; 土壤呼吸速率; 土壤温度; 土壤含水量; 土壤化学性质

中图分类号:S714.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)03-0008-06

Soil Respiration and Its Affecting Factors of *Pinus yunnanensis* in the Middle Regions of Yunnan

ZHAO Ji-xia, WANG Shao-jun*, CHEN Qi-bo, CHEN Min-quan, SHU Jiao-jing, LI Yuan-jiu

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: With a portable soil respiration chamber (model Li-6400-09), the soil respiration (Rs) of *Pinus yunnanensis* forest in the watersheds of Jianshan River of Chengjiang was measured from April 2012 to March 2013. The results were as follows: the soil respiration presented significant seasonal variations, ranged from $0.77 \sim 4.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and the rate of Rs in dry season was significantly higher than that in wet season. Rs was found to be significant related with soil temperature and soil moisture. Rs had a strong correlation with soil moisture, which was responsible for about 57.9%~69.4% of the seasonal variation in Rs . The equation of interactions had much more predicative power than that using temperature and water as single independent variables, soil temperature and soil moisture together could explain 74.5%~81.6% Rs . The coefficients of soil properties to Rs had no unified conclusion. The significant impacts of ROC, TN, AN, TP and pH on Rs were positive, while that of C/N was negative. The results indicated that the soil water under the severe drought had become the main control factor of Rs in the study, whereas soil properties also had some significant influences on Rs .

Key words: *Pinus yunnanensis*; soil respiration; soil temperature; soil moisture; soil chemical property

收稿日期:2014-08-11 修回日期:2014-10-18

基金项目:西南林业大学科技创新基金(C1426)。

作者简介:赵吉霞,女,白族,在读硕士,研究方向:林业生态工程。E-mail:zhaojixiacc@163.com

*通信作者:王邵军,男,博士,副教授,研究方向:土壤生物与土壤生态学。E-mail:wanghn2008@aliyun.com

土壤呼吸作为全球碳循环的一个重要环节,是大气CO₂的一个重要排放源。大气CO₂浓度升高引起温室效应加速了土壤有机碳的矿化作用,其产物通过土壤呼吸作用以CO₂的形式释放反馈回大气中,进一步加剧了全球变暖^[1-2]。全球土壤呼吸释放的CO₂通量约为76.5 P g·a⁻¹,高于全球陆地净初级生产力的量达30~60 P g·a⁻¹^[3],土壤呼吸速率的微小变化,都会显著影响大气中CO₂的浓度和土壤碳的累积速率^[1]。

土壤呼吸是一个由生物和非生物控制的复杂过程,受土壤温度、土壤水分和土壤养分等非生物因素,以及植被、土壤微生物和土壤动物等生物因素的直接与间接调控^[4]。森林植被、土壤和气候的地带性变化是导致不同林分类型间土壤呼吸速率差异性的重要原因。国内有关针叶林系统土壤呼吸速率及其影响因素研究已有报道^[4-7],云南松林(*Pinus yunnanensis*)约占云南省森林面积的70%,是云贵高原地区的一个主要森林类型。目前有关云南松林地土壤呼吸研究报道较少,近年来,由于全球变暖使厄尔尼诺、南方涛动(ENSO)引起的干旱现象更加频繁^[8],干旱对陆地生态系统碳循环的影响已逐渐成为国内外普遍关注的重点^[9]。因此,精确测定干旱区土壤呼吸时空动态及其主要调控因素,已成为全球变化研究中的关键问题。

本研究采用Li-6400土壤呼吸系统,连续定位测定云南玉溪市澄江尖山河流域云南松林地土壤CO₂释放的动态特征,并分析土壤呼吸的主要影响因子,为揭示严重干旱条件下土壤CO₂释放的过程及调控机理提供基础数据,并为准确评估云南松林生态系统碳收支平衡提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于云南省玉溪市澄江县西南部,是珠江上游南北盘江石灰岩地区水土保持综合治理试点工程中的一个典型小流域(24°32'~24°37'N,102°47'~102°52'E),流域面积35.42 km²,流域内森林覆盖率达21.4%,海拔1 722.0~2 347.4 m,地面坡度为5°~35°。小流域属低纬度高原气候,多年平均降雨量1 050 mm,干湿季分明,雨季为6~10月,降水量占全年总降水量的75%。土壤为红壤。

在云南玉溪尖山河流域所辖林区,选择相同母质(玄武岩)、相同海拔(海拔高度差<50 m)、前期植被均为天然次生林的云南松林地建立20 m×30 m样地3块(样地间距相差<200 m)。优势树种为

云南松(*Pinus yunnanensis*)林,平均树龄20 a,平均树高6.5 m,平均胸径9.5 cm,郁闭度0.6;林下主要植物有紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)、光叶铁仔(*Myrsine stolonifera*)、云南兔儿风(*Ainsliaea yunnanensis*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、夏枯草(*Prunella vulgaris*)等,盖度约45%。地表松针凋落物较少,平均厚度<1 cm。

1.2 土壤呼吸的测定

从2012年4月至2013年3月,采用Li-6400-09(土壤呼吸叶室)连接到Li-6400便携式光合作用测量系统测定土壤呼吸速率。在云南松天然次生林内分别设置3个20 m×30 m固定样地,每个固定样地内随机布置3个样点。测定时,提前24 h将土壤圈嵌入土壤中,以尽量恢复因底座的嵌入对土壤的扰动。由于研究区属于中亚热带高原季风气候,气温年较差小且有明显干湿季变化,故选择2012年4月、7月、10月、12月、2013年3月每月月底选择晴朗无风的稳定天气在各测定样点进行土壤呼吸速率的测定,每个样点重复3次。同时,用Li-6400温度探头同步测定5 cm和10 cm地温。每次测定完后在每个样点挖出深度为20 cm左右的垂直剖面,分别在0~5 cm和5~10 cm 2层采集土样,将相同土层土壤组成混合土样,用四分法取约1 kg混合土样分层装袋密封,带回实验室内供土壤指标分析。

1.3 土壤养分指标测定

土壤样品及时带回实验室,剔除根系、土壤动物、石块等杂物,并尽量保持原有湿度,根据《森林土壤分析方法》^[10]用烘干法测定土壤含水率,并进行土壤的风干过筛处理,供化学性质测定。土壤有机质采用K₂Cr₂O₇外加热法测定;土壤全氮采用扩散法测定;土壤水解氮采用碱解扩散法;土壤易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化法;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定;土壤pH采用电位法测定。

1.4 数据处理

所有数据统计分析均基于SPSS11.5软件进行,用one-way ANOVA检验土壤呼吸速率季节变化的差异显著性;温度与呼吸作用的生物化学过程之间的关系通常是用指数方程或阿累尼乌斯方程来描述^[11]。因此采用指数模型R_s=ae^{βT_s}(式中:R_s为土壤呼吸速率;T_s为土壤温度;a为土壤温度0℃时的土壤呼吸速率;β为温度敏感系数)进行拟合土壤呼吸速率与土壤温度的相关关系。而Q₁₀是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的指标,指温度每升高10℃时土壤呼吸速率增加的倍数^[5]。由目前常用模

型: $Q_{10} = e^{10\beta}$ (式中, β 为土壤呼吸与温度指数模型 $R_s = ae^{\beta T}$ 中的温度反映系数) 进行计算; 目前国内外对水分条件与土壤呼吸的相互作用和相互影响关系的研究还缺乏一致性^[12]。本试验分别采用 Linear: $R_s = a + bW$ 、Quadratic: $R_s = a + bW + cW^2$ 和 Exponential: $R_s = ae^{bW}$ 回归模型分别对 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤含水量(%) 和 土壤呼吸速率(R_s) 进行回归分析; 并采用双因素模型 $R_s = ae^{\beta T} W^c$ 、 $R_s = a + bTW$ 和 $R_s = a + bT + cW$ 对土壤呼吸与温度(T) 和 土壤含水率(%) 的共同作用进行了分析; 同时采用 Bivariate Correlations 分析土壤呼吸速率与土壤理化性质的相关性。所有统计的显著性水平为 0.05, 并用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 云南松林土壤呼吸、温度和水分的季节动态

对云南松林地土壤呼吸速率连续观测表明, 整个观测期间内, 土壤呼吸速率具有明显的季节变化特征, 呈现单峰变化趋势(图 1)。观测初期, 由于气温上升, 云南松林地有着较高的土壤温度, 而过低的土壤含水量则限制了土壤呼吸作用。随后, 伴随着

土壤温度和土壤含水量的同时升高, 土壤呼吸速率逐渐增大, 7 月云南松林处于相对高温, 但土壤呼吸速率并未表现为峰值, 而后随着土壤温度不断降低, 土壤呼吸速率呈现持续增长趋势, 至 10 月达峰值, 此时土壤含水量出现最高峰值。10 月后土壤呼吸速率开始下降; 至翌年 3 月, 由于土壤温度和土壤含水量过低的限制, 土壤呼吸速率达到最低值。土壤呼吸速率变化范围在 $0.77 \sim 4.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 变异幅度达 5.48, 湿季(11 月—翌年 4 月) 土壤呼吸速率 $3.70 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 显著($p < 0.05$) 高于干季(5—10 月) $1.48 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

测定期间, 5 cm 和 10 cm 深度土壤温度差异不显著, 表现为冬春季较低、夏秋季较高的特点, 并与对应的土壤呼吸速率变化趋势基本相似; 而 0~5 cm 和 5~10 cm 层土壤水分季节变化规律的差异比较明显, 均呈现 5~10 cm 土壤含水量 $> 0 \sim 5 \text{ cm}$ 层的特点。进入雨季开始, 土壤含水量逐渐增大, 10 月达到最大值, 翌年 3 月达到最小值, 全年干湿两季明显, 这主要是由于研究区中亚热带气候特点所致, 土壤含水量与土壤呼吸的季节变化趋势略有不同, 但相关性极显著。

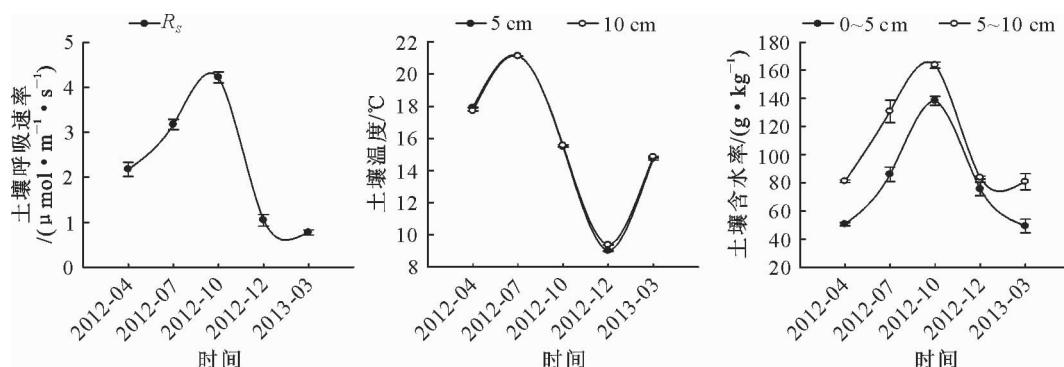


图 1 云南松林土壤呼吸速率、土壤温度和含水率的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of soil respiration rate, soil temperature and soil water content of *P. yunnanensis*

2.2 土壤呼吸与土壤环境因子的关系

2.2.1 与土壤温度的关系 通过对不同季节土壤呼吸速率与 5、10 cm 土壤温度的回归分析, 云南松林地土壤呼吸速率与其 5、10 cm 处土壤温度均呈现了显著的正相关关系($R^2 = 0.327 \sim 0.383$, $p < 0.05$), 其中与 10 cm 层土壤温度的相关性较好, 这是由于土壤呼吸主要是由根系呼吸和微生物呼吸共同决定的, 根系和土壤微生物主要分布在地下 10~30 cm 层, 造成了根系呼吸和微生物呼吸贡献在 10~30 cm 附近较大。因此, 土壤呼吸速率的变化趋势与 10 cm 土壤温度变化趋势较为接近(表 1)。

根据云南松林地土壤呼吸速率与各层土壤温度的指数回归方程(表 1), 5、10 cm 层土壤温度每升高

10°C , 云南松林地土壤呼吸速率分别提高 2.12、2.51 倍, 基于 10 cm 层土温的值 $>$ 5 cm 层, 说明土壤呼吸对 10 cm 层土温的变化较为敏感。

表 1 云南松林地土壤呼吸与土壤温度的关系

Table 1 Relationship between soil respiration rate and soil temperature of *P. yunnanensis*

土层/cm	$R_s = ae^{\beta T_s}$	R^2	P	Q_{10}
5	$R_s = 0.513e^{0.075T}$	0.327	0.026	2.12
10	$R_s = 0.490e^{0.092T}$	0.383	0.027	2.51

2.2.2 与土壤水分的关系 回归分析表明, 3 种模型都能较好地模拟土壤呼吸与土壤含水量之间的相关关系($p < 0.05$), 拟合度 R^2 在 $0.440 \sim 0.694$, 其中以 Quadratic 模型拟合的效果最好, 拟合度最

大,可以分别解释0~5 cm和5~10 cm层土壤呼吸速率变化的57.9%和69.4%(表2)。因此,与土壤温度相比,土壤含水量对土壤呼吸的贡献较大,土壤

水分是云南松林林地土壤呼吸季节动态的主要非生物调控因子。

表2 土壤呼吸(R_s)与含水量(W)关系模型参数

Table 2 Parameters of the correlation model of soil respiration with soil moisture

土层/cm	$R_s = a + bW$				$R_s = a + bW + cW^2$				$R_s = ae^{bW}$				
	a	b	R^2	p	a	b	c	R^2	p	a	b	R^2	p
0~5	0.294	0.020	0.554	0.0015	1.477	-0.010	0.002	0.579	0.0055	0.706	0.107	0.440	0.0070
5~10	0.214	-0.426	0.689	0.0001	0.901	-0.003	0.001	0.694	0.0008	0.464	0.012	0.577	0.0010

2.2.3 与土壤温度和土壤湿度的复合关系 双因素模型分析表明,各模型均能较好地拟合土壤呼吸速率与温度和含水量的复合关系,其中线性模型 $R_s = a + bT + cW$ 对两林分的拟合效果最好(表3)。与土壤温度或土壤水分与土壤呼吸的单因素关系模型

的相关程度相比,双变量模型的复相关系数均得到较大的提高,模型可以分别解释0~5 cm和5~10 cm层云南松林地土壤呼吸速率的74.5%和81.6%。因此,云南松林地土壤呼吸主要受土壤温度和含水量的协同影响。

表3 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T)和含水量(W)关系模型参数

Table 3 Parameters of the correlation model of soil respiration with soil temperature and moisture

土层 /cm	$R_s = a + bTW$				$R_s = ae^{bT}W^c$				$R_s = a + bT + cW$					
	a	b	R^2	p	a	b	c	R^2	p	a	b	c	R^2	p
0~5	0.309	0.001	0.767	0.000	0.001	0.113	1.595	0.769	0.000	-1.434	0.112	0.020	0.816	0.000
5~10	0.296	0.009	0.657	0.000	0.001	0.053	2.156	0.722	0.000	-1.708	0.058	0.019	0.745	0.000

2.2.4 与土壤化学性质的相互关系 对土壤呼吸速率与土壤理化性质进行pearson相关分析(表4、表5)表明,土壤各理化指标与土壤呼吸的相关性并不完全统一。土壤呼吸速率与土壤有机质(SOM)表现为正相相关关系,但未达显著水平,土壤易氧化

有机碳(ROC)、全氮(TN)、水解氮(AN)及pH均达显著正相关关系,且与土壤全磷(TP)含量呈极显著的正相关关系,土壤C/N则与土壤呼吸速率呈极显著的负相关关系。

表4 云南松林地土壤化学特征

Table 4 Soil chemical properties in *P. yunnanensis*

时间	SOM /(g·kg ⁻¹)	ROC /(g·kg ⁻¹)	TN /(g·kg ⁻¹)	AN /(mg·kg ⁻¹)	TP /(g·kg ⁻¹)	C/N	pH
2012-07	22.61	0.19	0.69	31.65	0.36	19.01	5.20
2012-10	26.60	0.25	1.09	47.79	0.42	14.16	5.07
2012-12	27.11	0.15	0.85	38.07	0.17	18.50	5.40
2013-03	23.68	0.20	0.59	31.79	0.16	23.28	5.16

注:SOM:土壤有机质,ROC:易氧化有机碳,TN:全氮,AN:水解氮,TP:全磷。

表5 土壤呼吸与土壤化学性质的相关性分析

Table 5 Correlation of soil respiration with soil chemical properties

指标	Rs	SOM	ROC	TN	AN	TP	C/N	pH
Rs	1							
SOM	0.104	1						
ROC	0.613*	0.083	1					
TN	0.690*	0.738**	0.413	1				
AN	0.649*	0.715**	-0.857**	0.959**	1			
TP	0.948**	-0.037	-0.750**	0.597*	0.537	1		
C/N	-0.801**	-0.540	-0.356	-0.946**	-0.857**	-0.750**	1	
pH	0.582*	0.444	-0.043	0.666*	0.527	0.534	-0.776**	1

注:Rs土壤呼吸速率。

3 结论与讨论

森林群落的水、肥、气、热等环境因子的季节周期性变化,使群落的物候相也相应地发生改变。土

壤呼吸速率随植物物候相及环境因子的改变而变化^[13]。本研究中,云南松林地土壤呼吸具有明显的季节变化呈明显的单峰型,这与冯文婷^[14]等观测的哀牢山中山湿性常绿阔叶林、尉海东^[15]等观测的中

亚热带 3 种主要人工林土壤呼吸的变化趋势一致。土壤呼吸变化趋势与土壤温度基本相似,但土壤呼吸峰值滞后于土壤温度峰值,7 月土壤温度达整个观测期峰值点,而土壤呼吸速率由于土壤水分的限制未达最大值,呈持续增长趋势,至 10 月土壤呼吸速率与土壤水分同时达到峰值,这可能是由于土壤含水量显著增大,加速土壤微生物对地面凋落物的分解,并刺激微生物生长,提高土壤微生物的活性,从而导致土壤呼吸速率达到全年的最大值。

整个观测期间,云南松林地土壤呼吸速率呈现干湿交替的变化规律,湿季大于干季。说明湿润气候条件具有刺激土壤呼吸增加的作用。土壤降水量季节分布差异是导致土壤呼吸年际变化的主要原因^[16]。长期干旱条件下,部分碳由于受到干旱的抑制而未被释放,干湿交替,土壤获得降雨,从而促进原先干旱而被限制的部分碳在微生物的刺激下又被重新释放出来。

土壤温度和湿度是影响森林土壤呼吸的主要因素,由于土壤温度和土壤湿度不同季节的配置导致了土壤呼吸的季节波动^[17]。本研究回归分析显示,土壤呼吸速率与各层土壤温度和土壤含水量的相关性都达到了显著水平,但土壤含水量对土壤呼吸的影响($R^2 = 0.579 \sim 0.694$)高于土壤温度($R^2 = 0.327 \sim 0.383$)。与以往的研究结果不同^[14],导致这种不一致结果的主要原因可能是由于近年来研究区的持续干旱,土壤温度变幅小,温度并不是影响土壤呼吸速率的主要因子,而土壤水分则呈现明显的干湿季节变化,致使土壤水分成为影响土壤呼吸速率的主要原因。

由于降雨充足,加拿大范库弗峰岛东海岸杉木林土壤呼吸与土壤水分关系不明显^[18];泰国季雨林的研究表明,由于热带常年高温且温度变化小,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^[19]。在土壤水分充足的地区,土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子;而在干旱或半干旱地区和土壤含水量过饱和的情况下,温度和水分对土壤呼吸共同起作用^[6]。通过土壤呼吸速率和土壤含水量双因素模型显示,土壤温度和含水量共同作用最高分别解释了云南松林地土壤呼吸的 74.5% (0~5 cm)、81.6% (5~10 cm),优于仅考虑土壤温度或土壤含水量的单变量模型。这与 Y. Qi^[20]等的研究结果相似,温度和湿度共同解释了针叶林土壤呼吸变化的 89%。野外条件下测定的土壤呼吸实际上是土壤温度、土壤水分以及其他生物因子对土壤呼吸综合作用的结果^[7]。无论是土壤呼吸与土壤温度

的关系模型,还是土壤呼吸与土壤水分的单因素关系模型都或多或少忽略了另外因素的作用^[21],双因素模型明显优于仅考虑土壤温度或土壤水分的单因素模型,表明澄江尖山河流域云南松林土壤呼吸速率主要受土壤温度和土壤水分的协同影响。

由土壤呼吸与土壤温度拟合所得的指数方程计算值。基于地下 5 cm 和 10 cm 层土温所得到的云南松林值分别为 2.12、2.51。可见 2 种基于 10 cm 层土温的值均 > 5 cm 层,这主要由于不同土层温度变化范围不同,浅层土壤温度变化范围较深层大。所以,以不同土层温度为依据所得的值不同,温度变化范围大值小,温度变化范围小值大。这与陈全胜^[22]等研究结果相似。

土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程,不仅受到土壤温度和土壤水分的影响,且土壤有机质、pH、氮、磷等理化指标均会对土壤呼吸速率产生影响。土壤有机质是微生物进行分解活动排放 CO₂ 的物质基础,也是陆地生态系统中最大的碳库。L. J. Sikora^[23]等研究发现,土壤有机质含量与土壤呼吸速率呈正相关关系,而本研究结果表明云南松林地土壤呼吸速率与有机质相关性不显著,而土壤易氧化有机碳作为土壤活性有机碳的组成部分,与土壤呼吸速率达显著正相关关系。不是全部有机碳都贡献给土壤呼吸,而主要是有机碳中的活性组分和中间组分,分别为土壤呼吸所贡献是 80% 和 20%^[24];活性组分中尤其是轻组有机碳,与土壤呼吸成显著正相关^[25]。

土壤全 N 与土壤呼吸速率均呈显著正相关,土壤呼吸速率与反硝化作用呈显著正相关^[26],全氮含量增加能刺激土壤 CO₂ 的释放^[27]。土壤水解氮是影响植物根系和土壤微生物代谢活动的主要成分,其与土壤呼吸速率达显著正相关关系。氮对土壤 CO₂ 的释放的影响通过刺激植物的初级生产从而为土壤呼吸提供更多的底物实现^[11]。土壤 C/N 与土壤呼吸则呈现极显著的负相关关系。C/N 高则不利于土壤微生物的分解^[28]。有机营养型微生物在有机质矿化过程中,需要利用碳源作为细胞体的构成物质,同时在营养上还需要氮的供应,以保持细胞构成中 C/N 的平衡,因此,有机质中 C 与 N 含量比例状况制约微生物生长和活动过程,影响有机质的分解速度^[29],从而对土壤呼吸产生影响。说明微生物的分解活动需要有其最佳的 C/N 值。

土壤全 P 含量与土壤呼吸之间也呈极显著的正相关($p < 0.01$)。这主要是由于 P 作为生态系统重要的组成部分,参与或控制了生物地球化学循环的很多生物学过程^[30],对植物根系的形成和微生物

的生长有很好的促进作用,进而对土壤呼吸速率产生影响。

土壤pH通过调控化学反应和微生物体内酶的多样性,对有机质的合成与分解、土壤微生物活动及根系生产发育产生影响,进而影响土壤CO₂的排放^[31]。本研究发现云南松林地土壤呼吸速率与土壤pH呈显著正相关关系。这主要是由于该研究区土壤pH变化范围为5.03~5.96,土壤pH<7时,随pH增加CO₂的产生量也增加,pH>7以后,随pH增加CO₂产生量降低^[32]。

研究得出,澄江尖山河流域云南松林地土壤呼吸速率具有明显的季节变化,变化幅度为0.77~4.22 μmol·m⁻²·s⁻¹,呈单峰曲线趋势,即旱季较低,湿季较高的特点。旱季的低土壤水分对土壤呼吸具有明显的抑制作用;云南松林地土壤呼吸速率与土壤含水量的相关性比其与温度的关系更加显著。土壤温度的季节变化仅可以解释土壤呼吸季节变化的32.7%~38.2%,而土壤水分的季节变化则可以解释云南松林地土壤呼吸速率变化的57.9%~69.4%。与单因素关系方程相比,双变量方程可以更好的解释土壤呼吸的季节变化,土壤温度和含水量的共同作用可以解释云南松林地土壤呼吸的74.5%~81.6%;由于土壤化学特征的季节变化,导致其对土壤呼吸速率的动态变化产生一定的影响。土壤呼吸速率与土壤易氧化有机碳、全氮、水解氮及pH均呈显著的正相关关系,且与土壤全P含量呈极显著的正相关关系,而与土壤C/N则呈极显著的负相关关系。

参考文献:

- [1] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [2] ZERVA A, MENCUCCHINI M. Short-term effects of clear felling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11):2025-2036.
- [3] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):23-36.
- [4] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 土壤温度和湿度对长白山松林土壤呼吸速率的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9):1581-1585.
- LIU Y, HAN S J, HU Y L, et al. Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestri formis* forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9):1581-1585. (in Chinese)
- [5] 张慧东, 尤文忠, 邢兆凯, 等. 辽东山区天然次生林和落叶松人工林的土壤呼吸[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3):198-224.
- ZHANG H D, YOU W Z, XING Z K, et al. Soil respiration of natural secondary forest and larch plantation in montane region of eastern Liaoning Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):198-224. (in Chinese)
- [6] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):564-570.
- MOU S G. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):564-570. (in Chinese)
- [7] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12):6366-6376.
- YAN J X, QIN Z D, ZHANG Y H, et al. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 29(12):6366-6376. (in Chinese)
- [8] TIMMERMANN A, OBERHUBER J, BACHER A, et al. Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming [J]. *Nature*, 1999, 398:694-697.
- [9] BORKEN W, SAVAGE K, DAVIDSON E A, et al. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12:177-193.
- [10] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社, 1999.
- [11] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [12] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413:622-625.
- [13] 马涛, 周金星. 滩地人工林杨树林土壤呼吸变化规律与环境因子的关系研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6):31-41.
- MA T, ZHOU J X. Studies on soil respiration change and its relation with environmental factors in polar plantation on beach land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(6):31-41. (in Chinese)
- [14] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1):31-39.
- FENG W T, ZOU X M, SHA L Q, et al. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of AiLao Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1):31-39. (in Chinese)
- [15] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带3种主要人工林的土壤呼吸动态[J]. *福建农林大学学报:自然科学版*, 2006, 35(3):272-277.
- WEI H D, MA X Q. Dynamics of soil respiration in three major plantations in mid-subtropical zone [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University:Natural Science Edition*, 2006, 35(3):272-277. (in Chinese)
- [16] EPRON D, NGAO J, GRANTIER A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six year study [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(6):499-505.

(下转第20页)

- nutrient and their influencing factors in Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 75-78. (in Chinese)
- [16] 李以康, 韩发, 冉飞, 等. 三江源区高寒草甸退化对土壤养分和土壤酶活性影响的研究[J]. 中国草地学报, 2008, 30(4): 51-58.
- LI Y K, HAN F, RAN F, et al. Effect of typical alpine meadow degradation on soil enzyme and soil nutrient in source Region of Three Rivers[J]. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30(4): 51-58. (in Chinese)
- [17] 干友民, 李志丹, 泽柏, 等. 川西北亚高山草地不同退化梯度草地土壤养分变化[J]. 草业学报, 2005, 14(2): 38-42.
- GAN Y M, LI Z D, ZE B, et al. The changes of grassland soil nutrition at different degradation subalpine meadow of northwest in Sichuan[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(2): 38-42. (in Chinese)
- [18] 许中旗, 闵庆文, 王英舜, 等. 人为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 38-42.
- XU Z Q, MIN Q W, WANG Y S, et al. Impact of human disturbances on soil nutrient contents of typical grasslands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 38-42. (in Chinese)
- [19] 黄金国, 魏兴琥, 李森. 粤北岩溶山区石漠化土地的植被退化及其恢复途径—以英德、阳山、乳源、连州 4 县(市)为例[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 22-26.
- HUANG J G, WEI X H, LI S. Vegetation degradation and restoration ways of rock desertification land in karst mountain area of northern Guangdong—Exampled in Yingde, Yangshan, Ruyuan and Lianzhou County(City) [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(1): 22-26. (in Chinese)

(上接第 13 页)

- [17] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 583-591.
- YANG Y S, DONG B, XIE J S, et al. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. Acta Ecological Sinica, 2004, 24(3): 583-591. (in Chinese)
- [18] HUMPHREYS E R, BLACK T A, MORGENSEN K, et al. Carbon dioxide fluxes in coastal Douglas fir stands at different stages of development after clear cut harvesting[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 14(1): 6-22.
- [19] HASHIMOTO S, TANAKA N, SUZUKI M, et al. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest. Thailand[J]. Journal of Forest Research, 2004, 9(1): 75-79.
- [20] QI Y, XU M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains[J]. Plant Soil, 2001, 237(1): 15-23.
- [21] JIA B, ZHOU G, WANG Y, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1): 60-76.
- [22] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 202-209.
- CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(2): 202-209. (in Chinese)
- [23] SIKORA L J, MCCOY L. Attempts to determine available carbon in soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 1990, 9(1): 19-24.
- SCHLESINGER W H, RAIKES J A, HARTLEY A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems [J]. Ecology, 1996, 77(2): 364-374.
- [24] SCHIMEL D S, BRASWELL B H, HOLLAND E A. Climatic, edaphic and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 279-293.
- [25] 王晶, 解宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 109-112.
- WANG J, XIE H T, ZHU P, et al. Annotation and modern analysis method for active soil organic matter(carbon) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 109-112. (in Chinese)
- [26] KESSEL C V, PENNOCK D J, FARREL R E. Seasonal variations in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale[J]. Soil Science Society Am J, 1993, 57: 988-995.
- [27] BROKEN W, MUHS A, BEESE F. Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 159: 49-58.
- [28] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 44-53.
- GENG Y B, ZHANG S, DONG Y S, et al. The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlation between their content and fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in Xilin river basin steppe [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 44-53. (in Chinese)
- [29] 北京林学院. 土壤学(上册)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [30] SHI X H, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Advance in the main factors controlling soil carbon dioxide flux [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 761-768. (in Chinese)
- [31] 时秀焕, 张晓平, 梁爱珍, 等. 土壤 CO₂ 排放主要影响因素的研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 761-768.
- SHI X H, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Advance in the main factors controlling soil carbon dioxide flux [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 761-768. (in Chinese)
- [32] KOWALENKO C G, IVARSON K C, CAMERON D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1978, 10(5): 417-423.