

文章编号: 1008-2786-(2015)6-696-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000084

## 贡嘎山生态系统土壤呼吸带谱特征

彭亮<sup>1,2</sup> 彭尽晖<sup>1</sup> 孙守琴<sup>2\*</sup> 吴艳宏<sup>2</sup> 何刚<sup>3</sup>

(1. 湖南农业大学 园艺园林学院 湖南 长沙 410128; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所  
山地表生过程与生态调控重点实验室 四川 成都 610041; 3. 四川师范大学 生命科学学院 四川 成都 610068)

**摘 要:** 对贡嘎山高山生态系统 2 013 ~ 3 650 m 海拔梯度上的土壤呼吸速率特征、时空变化规律及其与土壤温湿度、土壤有机碳、全氮等的关系进行了分析。结果表明: 随海拔的升高, 土壤呼吸速率先逐渐增加然后降低, 土壤呼吸最大值出现在海拔 2 750 m 处。土壤呼吸速率在 8 月初最高, 12 月初最低。随着季节的变化, 一天中土壤呼吸速率最高和最低值出现的时间也会发生变化。8 月土壤呼吸值日变化范围最大, 最低和最高值分别出现在 9:30 和 15:00。5—7 月以及 9—11 月土壤呼吸速率的最低值和最高值分别出现在 7:30 点和 13:30。进入秋冬季 (10—12 月) 土壤呼吸速率日变化特征减弱, 尤其是进入 12 月后无明显日变化特征。土壤温度是影响土壤呼吸时空变异的主要因子; 土壤有机碳和全氮含量也是影响土壤呼吸的因子; 土壤湿度并不是影响土壤呼吸速率的贡嘎山高山生态系统重要因素。

**关键词:** 高山生态系统; 土壤呼吸; 海拔梯度; 月变化; 日变化

**中图分类号:** S152

**文献标志码:** A

土壤呼吸是土壤碳通量和陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 其微弱变化都将引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的剧烈变化<sup>[1]</sup>, 从而对大气碳平衡产生巨大影响<sup>[2]</sup>。森林生态系统是陆地生态系统的主体, 其碳储量 (约  $1.146 \times 10^{12}$  t) 占全球陆地总碳储量的 46%。森林生态系统中<sup>[3]</sup>, 土壤及其有机层碳储量约为森林生态系统总碳储量的 45%<sup>[4]</sup>, 森林生态系统土壤呼吸因此成为全球生态系统主要排放 CO<sub>2</sub> 的途径之一<sup>[5]</sup>。

土壤呼吸具有空间异质性, 不同森林类型的土壤呼吸具有较大差异。在森林生态系统中, 随着海拔梯度的变化, 土壤温度、水分、植被类型、土壤理化性质、土壤微生物等生态因子都将会发生剧烈的变化,

从而导致不同海拔梯度上土壤呼吸具有巨大差异。根据常宗强<sup>[6]</sup>等以及施政等<sup>[7]</sup>的研究, 年均土壤呼吸速率随着海拔的升高显著降低。而刘华等<sup>[8]</sup>则发现, 土壤呼吸速率并非随海拔呈线性增加或减少的关系, 而是有规律的波动。土壤呼吸随海拔梯度变化究竟是怎样的变化规律, 不同海拔梯度上气候因子的变化如何影响土壤呼吸仍然是土壤呼吸研究的重点。

贡嘎山 (29°33′ ~ 30°50′N, 101°50′ ~ 102°15′E) 位于青藏高原东南边缘, 大雪山脉中南段, 主峰海拔 7 556 m, 是横断山系最高峰。该区地质构造异常复杂, 地貌形态千奇百怪, 岭谷高差十分悬殊。在其东坡海螺沟 28 km 的水平距离内形成约 6 400 m

收稿日期 (Received date): 2014-07-15; 修回日期 (Accepted): 2014-10-24。

基金项目 (Foundation item): 中科院知识创新工程青年人才类方向项目 (KZCX2-EW-QN310)、自然科学基金项目 (41273096) 资助。[Supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-EW-QN310), National Natural Science Funds of China (41273096).]

作者简介 (Biography): 彭亮 (1989-) 男, 硕士研究生, 湖南省人, 研究方向: 景观生态学。[Liang Peng, Master student, Male, born in Hunan Province, Specialized in ecology of climate change. ]E-mail: keith215@126.com

\* 通信作者 (Corresponding author): 孙守琴 (1980-) 女, 博士, 四川省人, 副研究员, 研究方向: 气候变化生态学、植物生理生态、元素生物地球化学循环。[Shouqin Sun, Ph.D., Female, born in Sichuan Province, Associate professor, Specialized in ecology of climate change, plant eco-physiology and biogeochemical cycle of element. ]E-mail: shouqinsun@imde.ac.cn

的高差。沿海拔的升高,具有亚热带常绿阔叶林(1 600~2 200 m)、常绿与落叶阔叶混交林(2 200~2 400 m)、针阔混交林(2 400~2 800 m)、暗针叶林(2 800~3 600 m)、高山灌丛(3 600~4 000 m)、高山草甸(4 000~4 600 m)及流石滩稀疏植被(4 600~4 900 m)等 7 个植被带,山地气候和土壤自然垂直带谱十分明显,因此是研究土壤呼吸空间变异的理想基地。

本研究对贡嘎山不同海拔梯度和植被类型土壤呼吸的时空变化特征进行了分析,目的主要是:1. 研究土壤呼吸随海拔梯度及时间的变化特征;2. 分析影响土壤呼吸时空差异的主要因素。了解高山生态系统森林碳储存及其沿海拔的分布对于阐明高山生态系统功能、揭示区域碳循环的规律、准确评估中国西南地区高山森林生态系统碳平衡及源-汇关系具有重要意义。

1 研究方法

1.1 样地设置

在贡嘎山东坡 7 个植被带中,由于亚热带常绿阔叶林海拔 1 800 m 以下区域受到人为干扰较大,因而从海拔 1 900 m 处开始研究。高山草甸(4 000~4 600 m)及流石滩稀疏植被带(4 600~4 900 m)由于难以到达而没有开展研究。因此研究范围为:亚热带常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林、高山灌丛 5 个植被带。

沿海拔梯度在上述 5 个植被带分别设置一个 20 m × 20 m 的固定样地,暗针叶林由于海拔范围比较大,增设了两个样地,共 7 个样地(表 1)。在样地内随机选择 5 个代表性的样方,每个小样方内分别安装 1 个内径为 20 cm,高为 10 cm 的 PVC 土壤环;将土壤环的一端打入土中,使 PVC 环高出土壤

表面大约 2 cm。每个 PVC 环固定后,用卷尺(mm 刻度)在四个方向测量 PVC 环上沿距离图表的高度,并取平均值作为 PVC 环的平均高度。

1.2 土壤呼吸测定

于 2012-08-12 开始,每月月初用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统进行土壤呼吸速率的原位测定。其中第一次测定时间距离 PVC 环布设时间大于 48 h。每个海拔梯度上 5 个样点的多次监测值的均值代表每个林型的平均呼吸速率,每日测定时间为 10:00~15:00。表层(< 5 cm)土壤温湿度用 Li-8100 自带的温度和湿度探针同步测定。

另外在暗针叶林海拔 2 964 m 样地中,每月选取天气晴朗的一日进行土壤呼吸日变化的 24 h 连续测量。

1.3 土壤样品分析

于 2012 年 9 月在各样地内随机选择 5 个点采集 0~5 cm 土壤样品,充分混匀后形成一个复合样本。采集的土样带回实验室风干、过 2 mm 筛后进行 pH、总有机碳、全氮等的测定。pH(水:土=2.5:1)用 pH 计(Eutech pH 6+,Eutech Instruments 公司)测定,土壤有机碳、全氮由碳氮测定仪(Vario MACRO cube,德国 Elementar 公司,精度:≤0.5% RSD)测定。

1.4 数据处理和分析

季节和森林类型对土壤呼吸的影响用单变量方差进行分析,土壤温度与土壤呼吸的相关关系用指数曲线回归,土壤含水量与土壤呼吸的相关关系用线性方程进行回归,具体计算公式如下:

土壤呼吸速率与土壤温度关系的模型:  $R = a \times e^{bT}$ , 式中:  $R$  为土壤呼吸速率,  $T$  为土壤温度,  $a$  和  $b$  为待定参数。土壤呼吸速率( $R$ )与土壤含水量( $W$ )关系的模型:  $R = b + aW$ , 式中:  $R$  为土壤呼吸速率,  $W$  为土壤湿度,  $a$  和  $b$  为待定参数。

表 1 样地特征  
Table 1 Sample characteristics

样地编号	海拔/m	植被类型	优势物种
1	2 013	常绿阔叶林	槭树 ( <i>Acer saccharum</i> )、川滇柳 ( <i>Salix rehderiana</i> )
2	2 262	常绿-落叶阔叶林	槭树 ( <i>Acer saccharum</i> )、香桦 ( <i>Betula insignis</i> )
3	2 750	针阔混交林	麦吊杉 ( <i>Picea brachytyl</i> )、桦树 ( <i>Betula platyphylla</i> )
4	2 964	暗针叶林	峨眉冷杉 ( <i>Abies fabri</i> )
5	3 063	暗针叶林	峨眉冷杉 ( <i>Abies fabri</i> )
6	3 231	暗针叶林	峨眉冷杉 ( <i>Abies fabri</i> )
7	3 650	高山灌丛	高山杜鹃 ( <i>Rhododendron lapponicum</i> )

2 结果与分析

2.1 土壤温度、含水率、理化性质海拔梯度特征

表层土壤平均温度随着海拔的升高逐渐降低。海拔 2 017 m 样地土壤温度平均值最高,为 12.73℃ 3 558 m 样地的值最低 5.68℃。海拔每增加 100 m,土壤温度下降 0.43℃ ( $R^2 = 0.9821$ )。各样点土壤含水率均较高,达到 0.40 ~ 0.56 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,但没有表现出明显的海拔变化特征(图 1)。

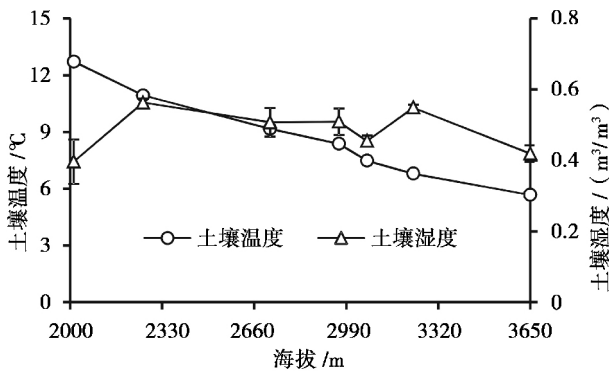


图 1 土壤温湿度随海拔的变化特征

Fig. 1 Soil temperature and humidity characteristics along with the variation of altitude

土壤有机碳含量在海拔 2 750 m 处最高,达到 197 g/kg,在海拔 3 650 m 处最低,为 25.2 g/kg,最高值是最低值的 7.8 倍(表 2)。海拔 2 750 m、3 063 m 样地土壤有机碳含量远远高于其他样地。土壤氮含量随海拔的变化趋势与土壤有机碳相似,其最大值也出现在海拔 2 750 m 处,为 9.04 g/kg,出现在海拔 3 231 m 处,为 1.65 g/kg,最高值是最低值的 5.5 倍。

2.2 土壤呼吸速率随海拔的变化

土壤呼吸速率随海拔的增加表现出先增加后降低的趋势(图 2)。土壤呼吸速率最大值出现在海拔 2 750 m 处的针阔混交林,为 0.91 ~ 3.52 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s),平均值为 2.29 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s);最低值出现在海拔 3 650 m 处的高山灌丛,为 0.0 ~ 1.18 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s),平均值为 0.44 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。土壤呼吸速率随海拔的变化趋势在 8—9 月尤其明显,随着时间进入 10 月、11 月,海拔变化趋势不显著。

2.3 土壤呼吸速率月变化

各样地土壤呼吸速率在不同月具有较大差异

(图 3)。在 8 月初最大,从 8 月到 12 月初,土壤呼吸速率逐渐下降。与 8 月相比,12 月初土壤呼吸速率降低了 74% ~ 93%。从土壤呼吸速率变化的绝对值看,海拔 2 750 m 样地的变幅最大,12 月初的土壤呼吸速率与 8 月相比下降了 4.76 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。

表 2 不同海拔梯度土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties along with the variation of altitude

海拔 /m	有机碳/(g/kg)	全氮/(g/kg)	C/N 质量比
2 013	75.9	6.12	12.4
2 262	69.4	5.12	13.4
2 750	197	9.04	21.8
2 964	52.3	3.39	15.4
3 063	181	8.75	20.8
3 231	58.2	4.42	13.1
3 650	25.2	1.65	15.3

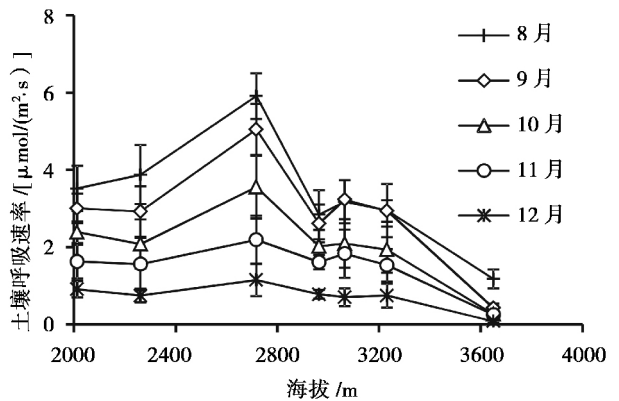


图 2 土壤呼吸速率随海拔的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of soil respiration rate with the altitude

2.4 土壤呼吸日变化

土壤呼吸速率在晚间和上午维持在较低水平,最小值出现在 6:00 ~ 10:00,最大值出现在 14:00 ~ 16:00,整个过程呈单峰曲线。土壤呼吸速率的日变化特征在夏季(6—9 月)较明显,呈单峰曲线,尤其是 8 月土壤呼吸值日变化范围最大,为 1.93 ~ 2.3 μmol CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)。秋冬季(10—12 月)土壤呼吸速率日变化特征减弱,尤其是进入 12 月后日变化特征不明显(图 4)。另外,随着季节的变化,一天中土壤呼吸速率最高和最低值出现的时间也会发生变化,其中 8 月的土壤呼吸速率最低和最高值分别出

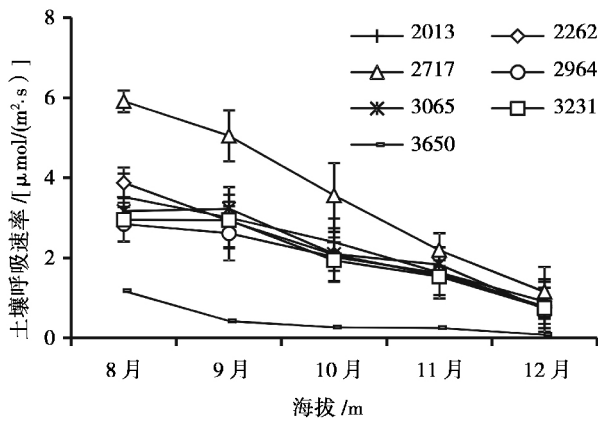


图 3 土壤呼吸速率月变化特征

Fig. 3 Monthly variation characteristics of soil respiration rate

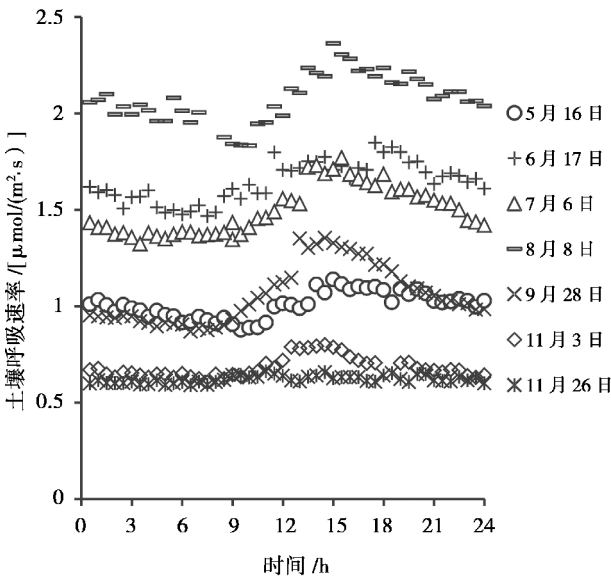


图 4 土壤呼吸日变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil respiration rate

现在 9:30 和 15:00 5—7 月以及 9—11 月的最低值和最高值分别出现在 7:30 和 13:30。

2.5 影响土壤呼吸的因素

回归分析表明,土壤呼吸速率与土壤温度呈指数关系 ( $R^2 = 0.7294 \sim 0.8727$ )。各海拔梯度上土壤呼吸的  $Q_{10}$  值在 3.61 ~ 5.98 (表 3), 最大值出现在海拔 3 650 m 处。此外,土壤呼吸速率与土壤有机碳 ( $R^2 = 0.5655, P = 0.051$ ) 和总氮 ( $R^2 = 0.6922, P = 0.020$ ) 含量具有显著的正相关关系 (图 5)。土壤湿度不是影响贡嘎山高山生态系统土壤呼吸速率的重要因素。

表 3 土壤呼吸速率( $y$ ) 与土壤温度( $x$ ) 的关系

Table 3 Soil respiration rate relationship with the soil temperature

海拔梯度 Altitudinal gradient/m	拟合方程 Fitting equation	$R^2$	$Q_{10}$
2 013	$y = 0.3953 \times e^{0.1284x}$	0.87	3.61
2 262	$y = 0.3805 \times e^{0.1456x}$	0.78	4.29
2 750	$y = 0.8328 \times e^{0.1385x}$	0.85	3.99
2 964	$y = 0.5452 \times e^{0.1406x}$	0.84	4.08
3 063	$y = 0.6567 \times e^{0.1421x}$	0.79	4.14
3 231	$y = 0.7137 \times e^{0.131x}$	0.81	3.71
3 650	$y = 0.1043 \times e^{0.1788x}$	0.73	5.98

3 讨论

海拔通常是多种环境因子的综合反映。随着海拔的变化,各种生态因子也随之发生变化<sup>[9]</sup>。本研究表明,随海拔的增加,土壤呼吸速率先逐渐增加随后逐渐下降,土壤呼吸速率最大值出现在海拔 2 750 m 处,而不是如早期研究中发现的简单递减,或者反复波动<sup>[6-8]</sup>。各研究中涉及的海拔区范围的差异、以及不同地域气候及植被类型的区别可能是导致研究结果差异的主要原因。本研究的海拔范围内,涉及从常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林到高山灌丛几种不同植被类型,土壤呼吸速率随海拔的变化实际上是它随植被类型的变化的反映。

除受环境因子影响外,土壤呼吸作用很大程度上受土壤理化性质、微生物含量、植被生物量 and 生产力等多因素影响<sup>[10-11]</sup>。例如,不同植被类型凋落物分解速率的差异<sup>[12]</sup>、不同植被类型土壤微生物量碳氮、微生物对土壤碳利用率的差异<sup>[13]</sup>以及由此导致的地下代谢的差异等,均是导致不同植被类型的土壤呼吸速率存在巨大差异的原因<sup>[14-15]</sup>。本研究中,土壤呼吸速率在海拔 2 750 m 处最大,该海拔梯度上的植被类型为针阔混交林,上层植被发育良好,地面凋落物厚度大,土壤湿润,这些环境条件可能是导致该海拔范围土壤呼吸速率较高的原因。而海拔 3 650 m 左右为高山灌丛,其优势物种主要是稀疏生长的杜鹃、高山柳以及覆盖在地表的苔藓植物,使得该区域无论是从植物凋落物对土壤有机质的归还作用,还是从植物根系的角度,均对土壤呼吸不会有太大的贡献。

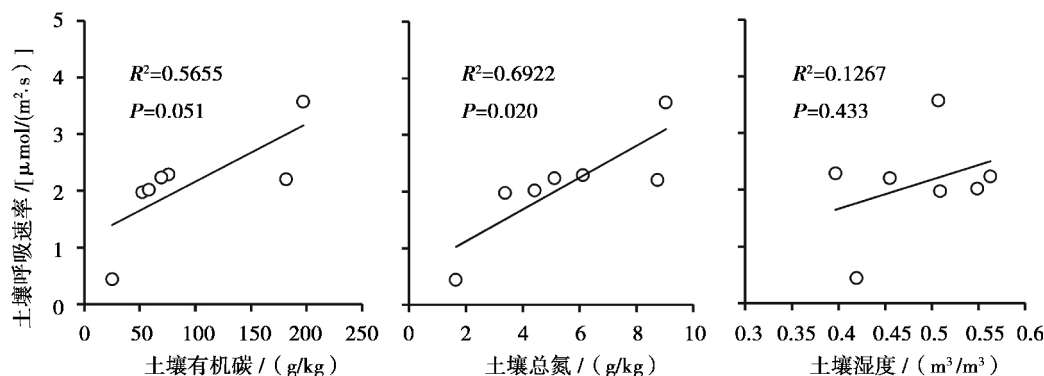


图5 土壤呼吸速率与土壤有机碳、土壤总氮和土壤湿度的关系

Fig. 5 Soil organic carbon, soil total nitrogen and soil moisture relationship with soil respiration rate

在时间上,早期研究表明,生长季的土壤呼吸速率大于非生长季<sup>[16-18]</sup>。本研究也发现,土壤呼吸速率在不同月之间具有显著的差异,具体表现为8月初最高,12月初最低,这与施政等<sup>[7]</sup>的研究结果相似。土壤呼吸速率的日变化特征在夏季(6—9月)最为明显,呈单峰曲线,进入冬季后(10—12月),土壤呼吸日变化特征减弱,尤其是进入12月后日变化特征不明显。根据周小平等<sup>[19]</sup>的研究,土壤温度是引起土壤呼吸季节变化的重要的因素。6—9月为植物生长旺盛期,植物根系和微生物活动剧烈,昼夜温差大,因此土壤呼吸能具有明显的单峰变化规律<sup>[19]</sup>;进入秋冬季后,温度逐渐较低,植物、微生物开始进入休眠状态,从而导致10—12月土壤呼吸日变化特征减弱甚至消失。土壤呼吸速率最大值出现的时间一般在下午或者傍晚,并不是一天中植物、微生物活动旺盛的中午,说明土壤呼吸值滞后于土壤温度<sup>[16]</sup>。另外,不同季节的土壤呼吸日变化,可能还受到季节性变化显著的土壤有机碳含量和植物物候期等因素的影响<sup>[20]</sup>,而造成不同季节的日变化最高和最低值出现的时间不同。例如,8月的土壤呼吸速率最低和最高值分别出现在9:30和15:00,而5—7月以及9—11月土壤呼吸速率的最低值和最高值分别出现在7:30和13:30。

土壤温度和湿度被认为是影响土壤呼吸的两个重要因子<sup>[7, 21-24]</sup>。A Moriyama等<sup>[25]</sup>在青藏高原的研究结果表明,在海拔梯度上土壤呼吸速率随着土壤温度和含水量的增加而增加。本研究中,土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数相关关系(表3)。无论在时间还是空间尺度上,土壤温度都是影响土壤呼吸变化的主要因素。但是,土壤呼吸的变化与土壤湿度间的相关性不明显,说明土壤湿度不是导

致本研究中土壤呼吸时空分布的主要因子。其原因可能是由于贡嘎山年降水量大,空气和土壤湿度高,在生长季土壤水分在空间及时间尺度上变化很小,使得土壤湿度对土壤呼吸的影响十分有限。此外,土壤呼吸速率与土壤有机碳和总氮含量呈正相关。一方面,土壤有机碳通过其自身的矿化作用排放CO<sub>2</sub>直接影响土壤呼吸速率<sup>[26]</sup>;另一方面,土壤有机碳、全氮含量的差异往往会导致植被根系活力、微生物数量和活性等发生变化<sup>[27]</sup>从而间接影响土壤呼吸<sup>[28]</sup>。

本研究的不足之处在于仅对2012年的土壤呼吸进行了测定,因此结果仅能反映目前的土壤呼吸时空变化(月变化、日变化和带谱上的变化)特征。未来的研究中需要在更长时间尺度上对土壤呼吸进行连续观测,以反映土壤呼吸的年际变化特征并预测其对未来气候变化的响应规律。

## 4 结论

本研究表明,随海拔的升高,土壤呼吸速率先增加然后逐渐降低,土壤呼吸最大值出现在海拔2750m的针阔混交林;土壤呼吸速率在8月初最高,12月初最低。土壤呼吸日变化特征在8月最明显,其最低和最高值分别出现在9:30和15:00;秋冬季(10—12月)土壤呼吸速率日变化特征减弱,尤其是进入12月后日变化特征不明显。土壤温度是影响土壤呼吸时空变异的主要因子;土壤有机碳和全氮含量也是影响土壤呼吸的因子;土壤湿度并不是影响土壤呼吸速率的贡嘎山高山生态系统重要因素。

## 参考文献(References)

- [1] Raich J W ,Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus , 1992 44: 81 - 99
- [2] Raich J W ,Potter CS ,BhagawatiD. Interannual variability in global soil respiration ,1980 - 94 [J]. Global Change Biology 2002 8: 800 - 812
- [3] IPCC( Inter Governmental Panel on Climate Change) . Land use , land-use change , and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press ,UK 2000.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest resources assessment 2010 main report[R]. Rome 2010.
- [5] Yi Zhigang ,Yi Weimin. Proceeding of studies on soil respiration of forest ecosystem[J]. Ecology and Environment 2003 ,12( 3) : 361 - 365 [易志刚 ,殷伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展 [J]. 生态环境 2003 ,12( 3) : 361 - 365]
- [6] Chang Zongqiang ,Feng Qi ,WuYuxia ,et al. Influence of environmental factors on soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in sub-alpine scrub forest of Qilian Mountains [J]. Journal of glaciology and geocryology 2005 27( 5) : 666 - 672 [常宗强 ,冯起 ,吴雨霞 ,等. 祁连山亚高山灌丛林土壤呼吸速率的时空变化及其影响分析 [J]. 冰川冻土 2005 27( 5) : 666 - 672]
- [7] Shi Zheng ,Wang Jiashe ,He Rong ,et al. Soil respiration and its regulation factor along elevation gradient in Wuyi Mountain of South China[J]. Chinese Journal of Ecology 2008 27( 4) : 563 - 568 [施政 ,汪家社 ,何容 ,等. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子 [J]. 生态学杂志 2008 27( 4) : 563 - 568]
- [8] Liu Hua ,Zang Runguo ,Jiang Xiaoheng ,et al. Spatial and temporal variation in soil respiration of *Picea schrenkiana* var *tianschanica* ( Rupr. ) Chen et Fu Natural Stand in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Natural Resources 2007 22( 4) : 568 - 578 [刘华 ,臧润国 ,江晓昉 ,等. 天山云杉天然林分土壤呼吸速率的时空变化规律分析 [J]. 自然资源学报 2007 22( 4) : 568 - 578]
- [9] Zou X M ,Ruan H M ,Fang Y ,et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates a sequential fumigation-incubation procedure [J]. Soil Biology and Biochemistry , 2005 , 37: 1923 - 1928
- [10] Kelting D L ,Burger J A ,Edwards G S. Estimating root respiration microbial respiration in the rhizosphere , and root-free soil respiration in forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry , 1998 , 30: 961 - 968
- [11] Wang Miao ,Ji Lanzhu ,Li Qiurong ,et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2003 , 14( 8) : 1234 - 1238 [王淼 ,姬兰柱 ,李秋荣 ,等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报 2003 , 14( 8) : 1234 - 1238]
- [12] Yang Gang ,He Xunyang ,Wang Kelin ,et al. Effects of vegetation types on soil micro-biomass carbon , nitrogen and soil respiration [J]. Chinese Journal of Soil Science 2008 39( 1) : 189 - 191 [杨刚 ,何寻阳 ,王克林 ,等. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响 [J]. 土壤通报 2008 39( 1) : 189 - 191]
- [13] Luo Lu , Shen Guozhen ,Xie Zongqiang ,et al. Components of soil respiration and its temperature sensitivity in four types of forests along an elevational gradient in Shennongjia , China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology , 2011 35( 7) : 722 - 730 [罗璐 ,申国珍 ,谢宗强 ,等. 神农架海拔梯度上 4 种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性 [J]. 植物生态学报 2011 35( 7) : 722 - 730]
- [14] Feng Huamin ,Wang Yujie ,Wang Yunqi ,et al. Soil respiration characteristics of three forests in Jinyun Mount of Chongqing city [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2011 31( 5) : 38 - 44 [冯华敏 ,王玉杰 ,王云琦 ,等. 重庆市缙云山 3 种森林类型的土壤呼吸特征研究 [J]. 水土保持通报 2011 31( 5) : 38 - 44]
- [15] Jia Bingtun ,Zhou Guangsheng ,Jiang Yanling ,et al. Temporal spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica 2013 33( 23) : 7516 - 7524 [贾丙瑞 ,周广胜 ,蒋延玲 ,等. 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征 [J]. 生态学报 2013 33( 23) : 7516 - 7524]
- [16] Zhang Junxing ,Su Hongxin ,Liu Haifeng ,et al. Seasonal dynamic and drive mechanism of soil respiration in three temperate forests [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University , 2011 32( 4) : 160 - 167 [张俊兴 ,苏宏新 ,刘海丰 ,等. 3 种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制 [J]. 内蒙古农业大学学报 , 2011 32( 4) : 160 - 167]
- [17] Zhu J J ,Yan Q L ,Fan A N ,et al. The role of environment root and microbial biomass characteristics in soil respiration in temperate secondary forests of Northeast China [J]. Trees 2009 23( 23) : 189 - 196
- [18] Zhou Xiaoping ,Wang Xiaoke ,Zhang Hongxing ,et al. Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau , China [J]. Acta Ecologica Sinica 2013 33( 23) : 7525 - 7536 [周小平 ,王效科 ,张红星 ,等. 黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化 [J]. 生态学报 2013 33( 23) : 7525 - 7536]
- [19] Liu Q ,Edwards N T ,Post W M ,et al. Temperature-independent diurnal variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest [J]. Global Change Biology 2006 12: 2136 - 2145
- [20] Davidson E A ,Verchot L V ,Cattaneo J H ,et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. Biogeochemistry 2000 48: 53 - 69
- [21] Chen Quansheng ,Li Linhao ,Han Xingguo ,et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica 2003 23( 5) : 972 - 978 [陈全胜 ,李凌浩 ,韩兴国 ,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理 [J]. 生态学报 2003 23( 5) : 972 - 978]
- [22] Rodeghiero M ,Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation /temperature gradient in the Italian Alps [J]. Global Change Biology 2005 11: 1024 - 1041
- [23] Wang C ,Bond - Lamberty B ,Gower S T. Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce fire chronosequence [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres ( 1984 - 2012) , 2002 , 107: WFX 5 - 1 - WFX 5 - 8

- [25] Moriyama A ,Yonemura S ,Kawashima S ,et al. Environmental indicators for estimating the potential soil respiration rate in alpine zone [J]. *Ecological Indicators* ,2013( 32) : 245 – 252
- [26] Li Mingfeng , Dong Yunshe , Di Yuanbo , et al. Analyses of the correlation between the fluxes of CO<sub>2</sub> and the distribution of C&N in grassland soils [J]. *Environmental Science* ,2004 ,25( 2) : 7 – 11 [李明峰 ,董云社 ,耿元波 ,等. 草原土壤的碳氮分布与 CO<sub>2</sub> 排放通量的相关性分析[J]. *环境科学* 2004 ,25( 2) : 7 – 11]
- [27] Tripathi S , Kumari S , Chakraborty A , et al. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils [J]. *Biology and Fertility of Soils* 2006 ,42:273 – 277
- [28] Borken W ,Xu Y J ,Davidson E A ,et al. Site and temporal variation of soil respiration in European beech ,Norway Spruce ,and Scots pine forests [J]. *Global Change Biology* 2002 ,8: 1205 – 1216

## Characteristics of Mountain Ecosystem Soil Respiration along an Elevation Gradient on Gongga Mountain

PENG Liang<sup>1,2</sup> , PENG Jinhui<sup>1</sup> , SUN Shouqin<sup>2</sup> , WU Yanhong<sup>2</sup> , HE Gang<sup>3</sup>

( 1. Agricultural University of Hunan , Horticulture and Landscape College , Changsha 410128 , China;

2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation , Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China; 3. Sichuan Normal University , College of Life Science , Chengdu 610068 , China)

**Abstract:** Temporal and spatial variation of soil respiration along an altitudinal gradient ( 2 013 ~ 3 650 m a. s. l. ) in east slope of Gongga Mountain , Sichuan province , China , and its relationships with soil temperature , soil moisture , soil organic carbon and total nitrogen content were studied in this study. Results indicated that soil respiration rate first increased and then decreased with the increase of altitude. The maximum of soil respiration was observed at sites in 2 750 m a. s. l. Temporally , the soil respiration rate was highest in August and was lowest in December , so does the daily variations of soil respiration. The minimum and maximum of daily soil respiration in August were separately observed at 9:30 and 15:00 , while that in September to November , were observed at 7:30 and 13:30 , respectively. The daily variations of soil respiration were small in winter ( October to December ) , especially those in December were negligible. Soil temperature were main factors to influencing temporal and spatial variation of soil respiration. Soil organic carbon and soil total nitrogen content were factors influencing soil respiration. Soil moisture was not influenced soil respiration rate in Gongga Mountain forest ecosystem .

**Key words:** alpine ecosystem; soil respiration; altitudinal gradient; monthly variation; daily variation