

森林生态系统土壤 CO₂ 释放随海拔梯度的变化及其影响因子

吴雅琼¹, 刘国华^{1,*}, 傅伯杰¹, 郭玉华², 胡婵娟¹

(¹. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085 ². 内蒙古巴彦淖尔市环境监测站 (环境科学研究所), 内蒙古巴彦淖尔市 015000)

摘要 联合国气候框架公约的签署提升了人们对全球变暖、碳循环的关注。土壤 CO₂ 释放作为土壤-大气 CO₂ 交换的主要途径之一, 成为了各国生态学家研究的重点内容。通过对 1800 ~ 2155m 海拔梯度上森林生态系统土壤 CO₂ 释放进行研究, 揭示了较小空间尺度上土壤 CO₂ 释放的变化规律及其控制机制。在研究区域内, 随着海拔梯度的增加, 森林土壤 CO₂ 释放由 $(1.94 \pm 0.06) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 逐渐增加至 $(1.22 \pm 0.07) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。土壤温度、土壤水分、土壤有机碳 (SOC)、全 N、全 P 与土壤 CO₂ 释放呈显著正相关 ($k = 14, P < 0.05$) ; 土壤容重与土壤 CO₂ 释放速率呈显著负相关 ($k = 14, P < 0.05$) ; 土壤 pH 对土壤 CO₂ 释放影响不显著。作为一个复杂的生态学过程, 环境因子及其交互作用对土壤 CO₂ 释放产生影响, 为了减少因子共线性影响, 逐步降低因子维数, 采用主成分分析 (PCA) 揭示了土壤温度、土壤水分、SOC、全 N、全 P、容重 6 个因子的联合作用, 其累积贡献率达到了 57% 以上。进一步运用逐步回归分析方法, 探讨了影响土壤 CO₂ 释放沿海拔梯度分布的主导因子, 结果表明土壤水分是研究区域森林生态系统土壤 CO₂ 释放沿海拔梯度变化的主导因子。

关键词 土壤 CO₂ 释放 森林生态系统 海拔梯度 土壤水分 土壤温度 土壤性质

文章编号: 1000-0933 (2007) 11-4678-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Soil CO₂ emission distribution along an elevation gradient and the controlling factors in the forest ecosystem

WU Ya-Qiong¹, LIU Guo-Hua^{1,*}, FU Bo-Jie¹, GUO Yu-Hua², HU Chan-Juan¹

¹ State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China

² Environmental Monitoring Station (Research Institute for Environmental Sciences), Bayannaoer 015000, Inner Mongolia

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (11) 4678 ~ 4685.

Abstract : The observed increase in levels of atmospheric CO₂ and the signing of the UN Framework Convention on Climate Change have increased interest in the global warming and the global carbon cycle. As one of the key components in the global carbon cycle, the response of soil carbon pool to the global warming is another studied focus issue. Changes in soil CO₂ emission along the elevation gradient could reflect the outcome of multiple interacting environmental factors on a long temporal scale and a small spatial scale, therefore, a research focused on the variation of soil CO₂ emission along 1800 — 2155m elevation gradient and the response of it to controlling factors was carried out. In the study area, soil CO₂ emission increased from $(1.94 \pm 0.06) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ to $(1.22 \pm 0.07) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ along the elevation gradient, which was due

基金项目 国家重点基础发展研究规划资助项目 (2002CB412503) 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目 (40321101)

收稿日期 2006-12-25 ; 修订日期 2007-09-17

作者简介 吴雅琼 (1979 ~), 女, 内蒙古人, 博士, 主要从事景观生态学和土壤碳释放研究. E-mail : wyq121@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : ghliu@rcees.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40321101 and 40571005), and the State Key Basic Research and Development Program Plan (No. 2002CB412503)

Received date 2006-12-25 ; **Accepted date** 2007-09-17

Biography WU Ya-Qiong, Ph. D., mainly engaged in landscape ecology and the soil CO₂ emission. E-mail : wyq121@163.com

to the responses of the controlling factors to the elevation. However, not only the effect of controlling factors can interact, overlap, or restrain each other, but also each factor can act in different ways. Soil temperature, soil moisture, SOC, total N and total P significantly correlated to soil CO₂ emission positively ($r = 14, P < 0.05$), and soil bulk density correlated to soil CO₂ emission negatively ($r = 14, P < 0.05$), whereas pH did not control soil CO₂ emission significantly in this study. Moreover, a variety of statistical approaches were used to characterize the primary controls over soil CO₂ emission among these controlling factors. Primary component analysis (PCA) explored data reduction and a stepwise regression analysis constructed a most parsimonious model of soil CO₂ emission, in which the most obvious effect of soil moisture appeared to be as a primary constraint on the distribution of soil CO₂ emission along the elevation gradient.

Key Words : soil CO₂ emission ; forest ecosystem ; elevation gradient ; soil moisture ; soil temperature ; soil substrate

联合国气候框架公约的签署提升了人们对全球变暖、碳循环变化,以及全球变化对未来环境的影响,充分说明研究温室气体释放过程的重要意义^[1]。土壤作为一个巨大的碳库,是大气 CO₂ 的重要源或汇,其轻微的变化也会导致大气中 CO₂ 浓度明显改变。因此,在研究 CO₂ 浓度增加与气候变化的过程中,加强对土壤 CO₂ 释放的研究,对于估算未来大气 CO₂ 浓度及全球变化具有举足轻重的意义^[2]。由此可见,精确的估算土壤 CO₂ 释放及研究其控制机制极其重要。然而,由于植被、气候、土壤类型及研究方法等方面的差异,目前还不能正确而充分的认识森林生态系统碳循环的过程,尤其对于山地森林土壤碳动态的研究,仍是土壤碳循环研究中需要填补的空白领域^[3,4]。

随着海拔变化,山地生态系统的气候、植被类型、土壤性质、土壤养分可利用性等要素均发生显著地变化^[5],如果仅从单独环境因子的角度对土壤 CO₂ 释放进行研究,将严重限制对土壤 CO₂ 释放及其控制机理的正确认识^[6]。在海拔梯度上研究土壤 CO₂ 释放,不仅能够在更小的空间尺度上反映不同气候状况下土壤 CO₂ 释放规律,揭示多个互相关联的环境因子对土壤 CO₂ 释放的综合影响;而且梯度研究可以为土壤 CO₂ 释放模型、土壤有机碳 (SOC) 循环模型研究提供基础数据,因为这种野外试验相对于控制试验能够反映更多因子的联合作用^[5,7]。

本文通过研究海拔梯度上森林生态系统土壤 CO₂ 释放的分布特征,在较小的空间尺度上揭示土壤 CO₂ 释放及环境因子的变化规律,阐明土壤理化性质与土壤 CO₂ 释放间的关系,为土壤有机质转化模型的研究提供良好的基础,而且,其结果对于预测全球气候变化、土壤碳库的反馈作用具有重要的意义。

1 实验材料与方法

1.1 区域概况

本实验的研究区位于四川省阿坝羌族自治州茂县凤仪镇静州村大沟流域 (31°41'32" ~ 31°42'15"N, 103°52'41" ~ 103°53'55")。据中国科学院成都生物研究所茂县生态站多年气象观测资料显示,该地区年均温 8.9℃, ≥10℃ 积温为 2690.8 度,年降雨量 900mm,年蒸发量 795.8mm,属暖温带气候。该区域土壤为淋溶褐土,土壤母质为千枚岩。在 1950 ~ 1960 年代尚存有辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 萌生林,经过近 30a 的砍伐,森林覆盖率由 60% 下降到 1985 年的 14.4%。为改善当地生态环境,近 20a 来当地政府营建了一些人工纯林和混交林,如油松 (*Pinus tabulaeformis*)、云南松 (*Pinus yunnanensis*)、华山松 (*Pinus armandi*) 等^[8]。

1.2 样地设置

在研究区域内,选择分布于 1800 ~ 2155m 海拔间人工混交松林为研究对象。该梯度范围内的森林生态系统以林龄 25a 左右的华山松 (*Pinus armandii*)、油松 (*P. tabulaeformis*) 为优势种,林木平均高度、胸径分别为 (1.3 ± 2.0) m、(2.2 ± 1.2) cm,林分平均密度为 (950 ± 90) 株 · hm²。林下植被以锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、美丽胡枝子 (*Lespedeza formosa*) 为优势种,覆盖度约为 60%。

在海拔 1800 ~ 2155m 范围内,每上升 50m 左右设置 1 个海拔梯度。为了减少样地间的空间异质性,每个

梯度上选择坡向、坡度、坡位及小地形类似的样地（坡向为西南向,坡度约为 22°）。

1.3 土壤样品采集及分析

于 2006 年 7 月,在各个样地内分别挖取土壤剖面 3 个。以环刀法取 0 ~ 15cm 土样,以测定土壤容重;同时采集土壤样品带回实验室,进行理化性质分析。具体测定方法为:土壤 pH 值-电位法;土壤有机碳测定采用重铬酸钾容量法（外加热法）;土壤全氮测定采用半微量开氏法;土壤全磷测定采用 HClO₄-H₂SO₄ 法。

1.4 土壤 CO₂ 释放测定方法

本研究采用动态箱式法测定土壤 CO₂ 释放（LI-6400 红外分析仪及 LI-6400-09 土壤气室;LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska）。于 2006 年 7 月及 8 月,对各个样地土壤 CO₂ 释放进行测定。在测定每个样地土壤 CO₂ 释放的前一天,选择较为平坦的地段,去除地表凋落物层,埋置 8 ~ 10 个土壤 PVC 垫圈。于第 2、3 日的 11:00 ~ 14:00 进行连续测量。每次记录 5 个土壤 CO₂ 释放通量瞬时值,分析时以该时段两天测量数值的平均值为依据。

测量土壤 CO₂ 释放的同时,测定 0 ~ 5cm 深度内的土壤温度（LI-6000-09TC,LI-COR Inc,Nebraska,USA, ± 1.5℃,0 ~ 5℃）,及水分含量（ML2X,England, ± 0.01%, 0 ~ 40℃; ± 0.02%, 40 ~ 70℃）。

1.5 分析方法

SPSS（Statistics Package for Social Science）统计分析软件是本研究采用的主要分析工具。运用 ANOVA 方法,分析不同海拔梯度上各个环境因子及土壤 CO₂ 释放的显著性差异;运用主成分分析（PCA）方法减少因子共线性造成的影响,筛选主要成分;运用逐步回归分析,进一步探究导致土壤 CO₂ 释放沿海拔梯度变化的主导因子。

2 研究结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 释放沿海拔梯度的变化

在研究区,随着森林生态系统沿海拔梯度 1800 ~ 2155 m 分布,土壤 CO₂ 释放逐渐增加（图 1）。其中,分布于 1800 ~ 1850 m 之间的森林生态系统土壤 CO₂ 释放较低,其均值为 $(1.94 \pm 0.06) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;1900 ~ 2000 m 范围内,土壤 CO₂ 释放均值为 $(2.05 \pm 0.08) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,而分布于 2000 m 以上的森林生态系统,其土壤 CO₂ 释放均值为 $(2.22 \pm 0.07) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,显著高于 2000m 以下森林生态系统土壤 CO₂ 释放（ $P < 0.05$ ）。

2.2 环境因子与土壤 CO₂ 释放的响应关系

大量的野外实验表明,土壤温度及水分含量,是影响土壤 CO₂ 释放季节变化重要因素。在水分含量充足、不成为限制因子的条件下,土壤温度是控制土壤 CO₂ 释放的主要因子^[6~11]。然而对于极端类型土壤,如极湿或极干燥的土壤而言,土壤水分含量和温度共同影响土壤 CO₂ 释放^[12~15]。不同的研究者、不同实验方法、不同研究地点所得到的温度与土壤 CO₂ 释放之间的具体关系可能各不相同,但在生态学上一般用指数方程对二者关系进行模拟。

本研究的野外实验是在一日中土壤温度最高的时段进行,因此不同海拔梯度上土壤温度的变化并不显著。仅海拔 1970m 和 2000m 两个样点的土壤温度略低于其它林地（ $P < 0.05$ ）,主要原因是这两个地点的林木密度（ $> 1900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^2$ ）略高于其它实验点（ $< 1800 \text{ 株} \cdot \text{hm}^2$ ）,林分郁闭度的差别影响了林下土壤温度的变化。但总体上,随着海拔增加,研究区森林土壤 CO₂ 释放与土壤温度间表现出显著的正相关关系,且可以用一指数关系描述二者间的响应关系（ $R^2 = 0.34, P < 0.05$ ）（图 2a）。

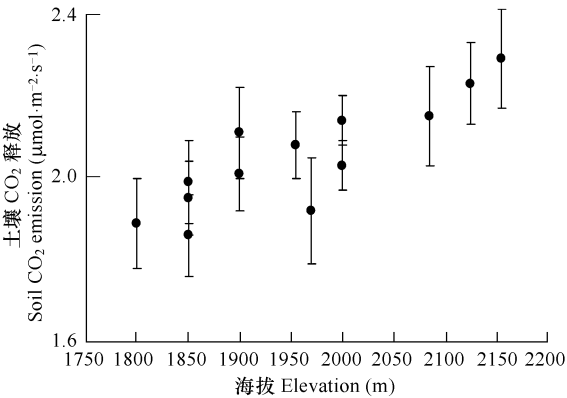


图 1 土壤 CO₂ 释放沿海拔梯度的变化

Fig. 1 Soil CO₂ emission along the elevation gradient

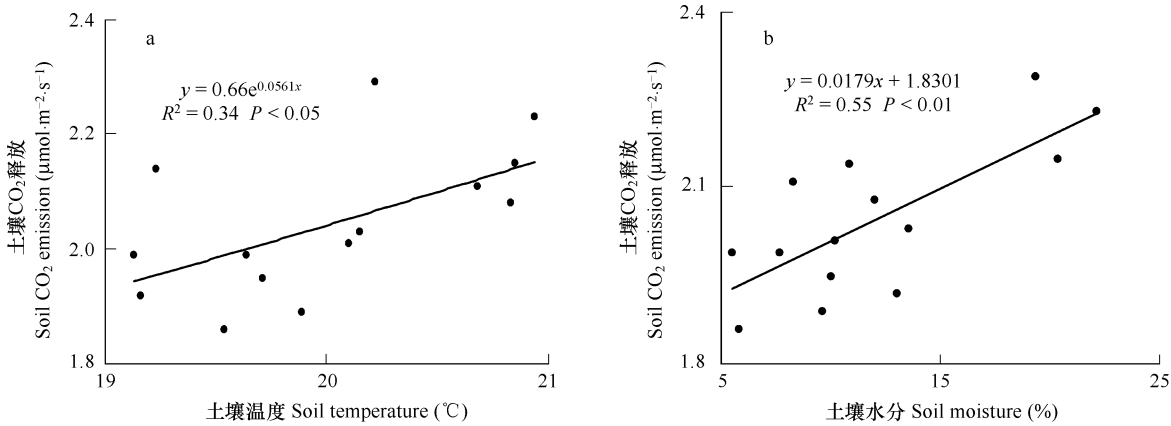


图2 土壤温度 (a),水分 (b)与土壤 CO₂释放的关系

Fig. 2 Relationships between soil temperature (a), soil moisture (b) and soil CO₂ emission

另一方面,随着海拔梯度的变化,各个林地土壤水分含量在 5.50% ~ 22.14% 之间变化;海拔为 1800 ~ 1850 m 范围内土壤水分含量为 $7.7\% \pm 2.1\%$,1900 ~ 2000 m 范围内土壤水分含量为 $11.3\% \pm 2.0\%$,而分布于 2000 m 以上的森林生态系统,其土壤水分含量为 $20.6\% \pm 1.4\%$,显著高于 2000m 以下林地土壤水分含量 ($P < 0.01$)。

在土壤 CO₂释放的研究中,并没有一个具体的关系式来描述水分与土壤 CO₂释放通量之间的关系。本研究表明,当森林土壤水分含量为 5% ~ 22% 时,土壤 CO₂释放与土壤水分含量之间表现出显著的正相关关系 ($R^2 = 0.55, P < 0.01$) (图 2b)。

土壤微生物分解土壤有机物质,以此获得生长所需能量,这一过程中产生的 CO₂即为土壤 CO₂释放,因此,土壤有机碳 (SOC)是影响土壤 CO₂释放的因子之一。图 3 (a)表明,SOC 与土壤 CO₂释放间存在显著的正相关关系 ($R^2 = 0.36, P < 0.05$)。这主要是因为随着海拔增加,温度降低,降雨量增加,从而导致分解速率变缓,因此土壤中积累了更多的 SOC [6~18],土壤释放出更多的 CO₂进入大气。

温带森林土壤 N 的有效性限制植物生长 [9],而土壤 P 是植物难以利用的元素,因此,土壤 P 含量成为植物生长、发育的重要限制因子 [10,21];土壤微生物生长所需要的 N 来源于土壤,而 P 显著影响微生物的结构、群落组成及其活性 [22]。因此,研究土壤 N、P 对土壤 CO₂释放的影响机制是很有必要的 (图 3b,3c)。本研究表明,随着土壤中 (0~15cm) N、P 含量的增加,土壤 CO₂释放显著增加。

有研究表明,土壤酸化会降低土壤微生物分解、运移土壤有机质及养分元素的能力 [23,24],而且也会改变土壤生物群落结构 [25]。在本研究中,土壤 pH 值为 4.21 ~ 5.77,与植被覆盖有关,因为根系、土壤微生物分泌有机酸及呼吸作用都会降低土壤 pH [26],但 pH 值与土壤 CO₂释放间的相关性并不显著 ($R^2 = 0.02, P > 0.05$),说明对于该研究区而言,土壤 pH 的差异并未对土壤性质、微生物活性等造成显著影响。

土壤容重可以定性衡量土壤透气性及其孔隙度。研究表明 (图 4):随着土壤容重增加,土壤 CO₂释放逐渐降低 ($R^2 = 0.25, P < 0.05$)。其原因在于土壤容重增加,破坏了土壤团聚体结构,降低了氧气由空气扩散进入土壤的速率,同时也就影响了土壤微生物对氧气的消耗,进而引起土壤缺氧,降低了土壤微生物碳、土壤呼吸及土壤酶活性 [27,28]。土壤结构通过影响土壤粘粒组分、土壤有机质的化学性质、微生物组成,进而影响土壤 CO₂释放 [29]。

3 讨论

海拔作为环境因子的综合体现,研究土壤 CO₂释放对其响应是山地生态系统碳释放焦点问题之一。虽然国内外学者对典型生态系统土壤 CO₂释放的动态及影响机制研究由来已久,但是针对山地生态系统海拔梯度上森林生态系统土壤 CO₂释放动态及其影响因子的研究却极少,而且现有一些研究结果间也存在极大的差

异。对于中国长白山地区而言,典型森林生态系统为阔叶红松林 (500 ~ 1100m)、云冷杉暗针叶林 (100 ~ 1700m)、岳桦林 (700 ~ 2000m),随着海拔增加,不同类型森林生态系统生长季土壤 CO₂释放逐渐降低,尤其以云冷杉暗针叶林土壤 CO₂释放最低^[6]。对于温带典型森林生态系统而言,随着海拔由 1050、1150、1350m 增加,森林生态系统由油松人工林、辽东栎林向白桦林过渡,其土壤 CO₂释放年通量分别为 866、1431、1132 g CO₂ m⁻² a⁻¹,表现出一定的增加趋势^[1]。对于鼎湖山典型森林生态系统而言,随着海拔上升 (0 ~ 300m),土壤 CO₂释放年通量逐渐增加 (29.5mg CO₂ m⁻² a⁻¹增加至 477.9 mg CO₂ m⁻² a⁻¹左右)^[2];而在海南岛尖峰岭地区,海拔 80 ~ 400m 热带半落叶季雨林土壤 CO₂释放年通量 (0.5 t hm⁻² a⁻¹) 显著低于 650 ~ 1200m 热带山地雨林 (9.89 t hm⁻² a⁻¹)^[3]。Garten Jr. 等对 Appalachian 山的研究指出,随着海拔的增加 (35 ~ 1670m),土壤活性有机碳周转时间与年均温显著负相关^[5];不仅如此,他们的研究还指出,高海拔样点 (670m) 生长季土壤 CO₂释放最高,其主要原因是地下根系生物量对土壤 CO₂释放的贡献超过了温度对其的影响^[6]。

本文通过对不同海拔梯度上森林生态系统土壤 CO₂释放的分布规律,及其控制机制进行研究,结果表明在研究区域内,随着海拔梯度 1800 ~ 2155m 上升,森林生态系统土壤 CO₂释放逐渐增加,这与大多数已有研究的结果类似。进一步对这种变化的控制机制进行研究,表明土壤温度、土壤水分、土壤有机碳、全 N、全 P 及容重等环境因子对土壤 CO₂释放的影响很显著。

然而,在自然条件下,各个环境因子不仅单独对土壤 CO₂释放产生影响,而且存在交互作用。如 SOC 的矿化速率受到温度的控制;温度影响着微生物的生理过程^[4~36];土壤粉粒、粘粒含量,有机质的积累会导致土壤容重的下降^[7];SOC 含量与土壤容重、pH 负相关,与土壤持水能力呈正相关^[8~40];土壤水分间接影响植物根系光合及呼吸所需养分的有效性^[1];凋落物性质影响土壤中的 C、N 含量;土壤表层有机碳含量与 N 相互关联^[3,41]等。为了降低各个因子间多重共线性的影响,减少影响因子的维数,本文采用主成分 (PCA) 分析,用更精简的模型对土壤 CO₂释放的变异进行分析,结果表明:土壤水分、SOC、全 N 含量、全 P 含量、土壤容重及土壤温度这 6 个环境因子是影响土壤 CO₂释放的主要因子,即,土壤水分、SOC、全 N、全 P、土壤温度越高,土壤容重越低,则土壤 CO₂释放越高。6 个因子的累积贡献率达到了 57% 而 pH 值对土壤 CO₂释放的影响则非常小,其贡献率仅为 18% 左右。

运用逐步回归方法,在表 1 的第 1 个组分中筛选导致土壤 CO₂释放沿海拔梯度变化最主要的环境因子。

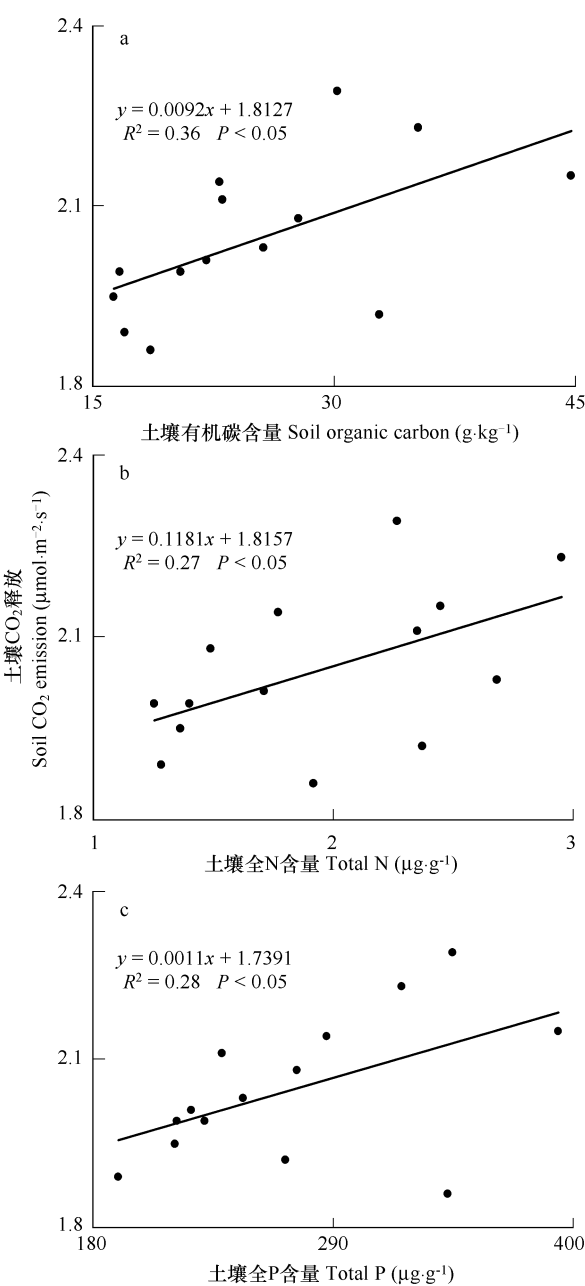


图3 土壤有机碳 (a)、全 N (b)、全 P (c) 含量与土壤 CO₂ 释放的关系
Fig. 3 Relationships between soil organic carbon (a), total N (b), total P (c) and soil CO₂ emission

运用逐步回归方法,在表 1 的第 1 个组分中筛选导致土壤 CO₂释放沿海拔梯度变化最主要的环境因子。

结果表明,土壤水分含量是土壤 CO₂释放在不同海拔梯度上产生差异的主导因子,该因子可以解释土壤 CO₂释放随海拔梯度 50% 以上的变异 ($Y = 1.830 + 0.0179 X$ 式中, Y 为土壤 CO₂释放 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$); X 为土壤水分 (%); $R^2 = 0.55$; $P < 0.01$)。

事实上,随着海拔上升,不仅温度、降雨等气象因子发生显著的变化,土壤理化性质、植被性质、土壤微生物群落等生物、非生物因子也发生一定的变化,受这些环境因子影响的土壤 CO₂释放也必然表现出一定的变化趋势。本文在 400m 的海拔梯度上揭示了土壤理化性质对人工林土壤 CO₂释放的影响机制,而且进一步阐明了土壤水分含量对土壤 CO₂释放沿海拔梯度变化的主导作用。但正如表 1 所示,土壤水分、温度、容重等 7 个

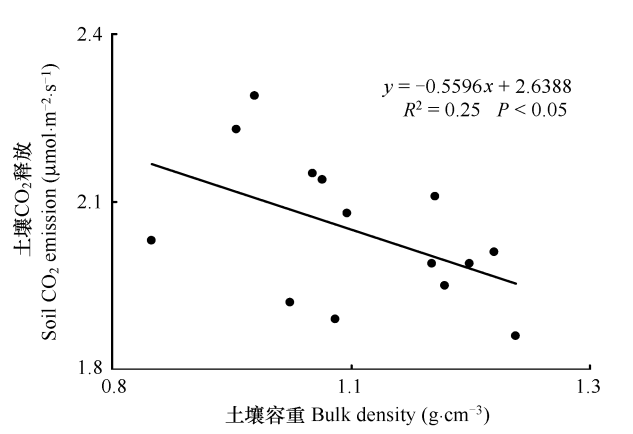


图 4 土壤容重与土壤 CO₂释放的关系

Fig. 4 Relationship between soil bulk density and soil CO₂ emission

表 1 主成分 (PCA) 分析结果

Table 1 Variance in soil CO ₂ emission along elevation gradient explained by various components of the PCA			
主成分 Component	总差异 Total variance	差异百分率 % of variance	累积贡献率 Cumulative (%)
1	4.023	57.478	57.476
2	1.320	18.856	76.331

Component 1 是土壤水分、SOC、全 N 含量、全 P 含量、土壤容重及土壤温度的联合效应; Component 2 是 pH 的影响效应

因子的累积贡献率仅为 76%,说明这 7 个因子,不足以完全揭示海拔梯度上土壤 CO₂释放的控制机理,其它因子,如群落结构、植物地上、地下生物量等有可能也是导致土壤 CO₂释放沿海拔梯度的重要因子。

References :

[1] Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123 :105 – 114.

[2] Liang N S, Nakadai T, Hirano T, *et al.* In situ comparison of four approach approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123 :97 – 117.

[3] Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 1982, 14 (4) :161 – 187.

[4] Fehse J, Hofstede R, Aguirre N, *et al.* High altitude tropical secondary forests :a competitive carbon sink ?*Forest Ecology and Management*, 2002, 163 :9 – 25.

[5] Garten Jr. C T, Post W M III, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 1999, 45 :115 – 145.

[6] Scott-Denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 :525 – 534.

[7] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, *et al.* Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 :273 – 284.

[8] Kong W J, Zheng Z. The aboveground biomass and net primary productivity of degraded and artificial communities in Maoxian, upper reach of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22 (4) :445 – 450.

[9] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (4) :972 – 978 .

[10] Cui X Y, Chen S Q, Chen Z Z. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (4) :390 – 394.

[11] Zheng D L, Chen J Q, LeMoine J M, *et al.* Influence of land-use change and edges on soil respiration in a managed forest landscape, WI, USA.

Forest Ecology and Management, 2005, 215 :169 — 182.

[2] Kichlighter D W, Melillo J M, Peterjohn W T, *et al.* Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 :1301 — 1315.

[3] Moncrieff J B, Fang C. A model for soil CO₂ production and transport 2 :Application to a florida *Pinus elliotte* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95 :237 — 256.

[4] Sjögersten S, Wookey P A. Climatic and resource quality controls on soil respiration across a forest — tundra ecotone in Swedish Lapland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 :1633 — 1646.

[5] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 :945 — 951.

[6] Garten Jr. C T, Hanson P J. Measured forest soil C stocks and estimated turnover times along an elevation gradient. *Geoderma*, 2006, 136 :342 — 352.

[7] Grieve I C, Marsden R L. Effects of forest cover and topographic factors on TOC and associated metals at various scales in western Scotland. *Science of the Total Environment*, 2001, 265 :143 — 151.

[8] Withington C L, Sanford Jr R L. Decomposition rates of buried substrates increase with altitude in the forest-alpine tundra ecotone. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 :68 — 75.

[9] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, *et al.* Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, 6 :806 — 814. .

[10] Fernandes S A P, Bernoux M, Cerri C C, *et al.* Seasonal variation of soil chemical properties and CO₂ and CH₄ fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon. *Geoderma*, 2002, 107 :227 — 241.

[11] Khan M S, Zaidi A, Wani P A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture — A review. *Agronomic Sustainable Development*, 2007, 27 :29 — 43 .

[12] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 26 :1443 — 1451.

[13] Boruvka L, Mladkova L, Drabek O. Factors controlling spatial distribution of soil acidification and Al forms in forest soils. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2005, 99 :1796 — 1806.

[14] Persson T, Lundkvist H, Wiren A, *et al.* Effects of acidifications and liming on carbon and nitrogen mineralization and soil organisms in mor humus. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 45 :77 — 96.

[15] Baath E, Berg B, Lohm U, *et al.* Effects of experimental acidification and liming on soil organisms and decomposition in a Scots pine forest. *Pedobiologia*, 1980, 20 :85 — 100.

[16] Tornquist C G, Hons F M, Feagley S E. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1999, 73 :19 — 20. .

[17] Bauer P J, Frederick J R, Novak J M, *et al.* Soil CO₂ flux from a norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, 2006, 90 :205 — 211.

[18] Tejada M, Moreno J L, Hernandez M T, *et al.* Application of two beet vinasse forms in soil restoration :Effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 119 :289 — 298.

[19] Franzluebbers A J, Haney R L, Hons F M, *et al.* Active fractions of organic matter in soils with different textures. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28 :1367 — 1372.

[20] Wang M, Ji L Z, Li Q R, *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (6) :1234 — 1238.

[21] Liu S H, Fang J Y, Kiyota M. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22 (1) :119 — 126.

[22] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (6) :1673 — 1678.

[23] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21 (6) :416 — 423.

[24] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27 :753 — 760.

[25] Townsend A R, Vitousek P M, Trumbore S E. Soil organic matter dynamics along gradients in temperature and land use on the island of Hawaii. *Ecology*, 1995, 76 :721 — 733.

[6] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272 :393 — 396.

[7] Su Y Z, Zhao H L. Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy Land, north China. *Ecological Engineering*, 2003, 20 :223 — 235 .

[8] Wofsy S C, Harriss R C. The North American Carbon Program (NACP). Report of the NACP Committee of the U. S. Washington D. C. : Interagency Carbon Cycle Science Program. U.S. Global Change Research Program, 2002.

[9] Leifeld J, Bassin S, Fuhrer J. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105 :255 — 266.

[10] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M. Water-holding capacity of ground covers and soils in alpine and sub-alpine shrubs in western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 () :2775 — 2782.

[11] Tsui C C, Chen Z S, Hsieh C F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, 2004, 123 :131 — 142.

参考文献：

[8] 孔维静, 郑征. 岷江上游茂县退化生态系统及人工恢复 植被地上生物量及净初级生产力. *山地学报*, 2004, 22 (4) :445 ~ 450.

[9] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23 (9) :972 ~ 978.

[10] 崔骁勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究. *应用生态学报*, 2000, 11 (3) :390 ~ 394.

[10] 王森, 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. *应用生态学报*, 2003, 14 (9) :1234 ~ 1238.

[11] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22 (1) :119 ~ 126.

[12] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. *生态学报*, 2003, 23 (9) :1673 ~ 1678.

[13] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. *植物生态学报*, 1997, 21 (3) :416 ~ 423.

[14] 张远东, 刘世荣, 马姜明. 川西高山和亚高山灌丛的地被物及土壤持水性能. *生态学报*, 2006, 26 (9) :2775 ~ 2782.