

气候变化对亚高山暗针叶林土壤温室气体排放的影响

鲁旭阳^{1,2}, 霍常富^{1,2}, 范继辉^{1,2}, 程根伟^{1*}

1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地环境演变与调控重点实验室, 四川 成都 610041

摘要: 利用生物地球化学模型 Forest-DNDC 模拟气候变化对贡嘎山亚高山暗针叶林土壤温室气体的释放的影响。以位于贡嘎山东坡海拔 3 000 m 的峨眉冷杉 (*Abies fabri*) 中龄林为研究对象, 以 1999—2006 年 8 年的日气候数据进行平均得到的日平均最高温度、日平均最低温度和日平均降水总量作为基线 (Base) 气候情景, 另外设置了温度+2 °C (T+)、温度-2 °C (T-)、降水量+20% (P+)、降水量-20% (P-)、温度+2 °C同时降水量+20% (T+P+)、温度-2 °C同时降水量-20% (T-P-)、温度+2 °C同时降水量-20% (T+P-)、温度-2 °C同时降水量+20% (T-P+) 8 种气候变化情景。结果显示: 贡嘎山峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放随着温度增加而增加, 土壤 N₂O 释放对降水量改变敏感, 而土壤 NO 的释放对温度和降水的改变均比较敏感, 二者表现为协同作用。温度+2 °C同时降水量+20% (T+P+) 情景下土壤 CO₂ 释放最高, 高于基线情景的 36.08%; 温度-2 °C同时降水量+20% (T-P+) 情景下土壤 CO₂ 释放最低, 低于基线情景的 36.89%。土壤 N₂O 释放随着降水量的增加而升高, 随着降水量减少而降低; 温度和降水量同时增加时土壤 NO 释放均高于单一增加温度或降水量情景, 而温度和降水量同时降低时土壤 NO 释放均低于单一降低温度或降水量情景。

关键词: 贡嘎山; 峨眉冷杉; 土壤呼吸; Forest-DNDC; 气候变化

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2194-06

由于大气中温室气体浓度的增加而引起的全球气候变暖是当今世界面临的一个重要的环境问题^[1-3]。IPCC 第四次评估报告指出, 到 21 世纪末地球表面的温度将升高 1.8~6.4 °C, 如果温室气体按照目前或者高于目前的水平持续排放下去, 将会引起地球气候系统产生更严重的后果^[4]。气候变化通过 C、N 循环过程与森林生态系统相耦合, 并对森林土壤的 C、N 动态产生显著的影响^[5-7]。大气 CO₂ 浓度、温度以及降水量的变化都将导致土壤有机质的降解, 土壤硝化作用, 土壤反硝化作用等过程的变化, 最终影响土壤温室气体的排放。近年来发展起来的生态模型是计算土壤温室气体排放的重要工具, 其中生物地球化学循环模型 Forest-DNDC 不仅能够模拟森林生态系统植被生产力和土壤 C、N 动态, 而且还能够模拟土壤温室气体的释放^[8-9]。

暗针叶林在我国横断山地区有较大面积的分布, 暗针叶林带是该地区山地植被垂直带谱中的优势带, 该植被带森林资源丰富, 是我国第二大林区——西南林区的主体组成部分^[10]。贡嘎山位于青藏高原东南缘, 这种极端环境下的植被及土壤对气候变化的响应极为敏感, 是研究生态系统对气候变化适应与响应机制的天然实验室。贡嘎山的亚高山暗针叶林主要分布在海拔 2 800~3 400

m, 原始状态保存完好, 具有典型的代表性。目前, 关于气候变化与贡嘎山亚高山暗针叶林生态系统关系的研究已取得一些成果, 但是多集中在森林生物量和生产力研究方面^[11-13], 对于土壤温室气体释放的研究还比较少^[10,14], 本研究利用 Forest-DNDC 模型模拟气候变化对贡嘎山亚高山暗针叶林土壤温室气体 CO₂、N₂O 和 NO 释放的影响, 以期为我国温室气体清单的编制和森林 C、N 平衡的计算提供基础数据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

本研究亚高山暗针叶林位于贡嘎山东坡海拔 3 000 m 左右的高度上, 原始状态保持完好。贡嘎山位于青藏高原东南缘, 大雪山脉的中南段, 其地理位置属北纬 29°20'~30°20'和东经 101°30'~102°15'之间地带, 处在中国东部季风区亚热带与青藏高原寒区温带的过渡带上, 主峰海拔 7 556 m, 是中国横断山系的最高峰, 区内发育了从亚热带到寒带的完整自然垂直带谱^[11,15-17]。本研究选择位于海拔 3 000 m 左右的峨眉冷杉 (*Abies fabri*) 演替林开展土壤温室气体释放的研究, 该区域年平均气温 4 °C, 1 月平均气温-4.5 °C, 7 月平均气温 12.7 °C, 年均降水量 1 800~2 100 mm, 降水主要集中在 6—10 月,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422005)

作者简介: 鲁旭阳 (1980 年生), 男, 博士, 研究方向为森林生态学。E-mail: xylyu@imde.ac.cn

*通讯作者, E-mail: gwcheng@imde.ac.cn

收稿日期: 2009-09-18

占全年降水的 70% 以上^[18]。演替林是原始峨眉冷杉林在泥石流爆发后的迹地上发生植被演替形成的，现在已经形成中龄林，林龄大约 80 a，总郁闭度 0.8 左右，郁闭度较高，建群种为峨眉冷杉^[10]。此外，在林内还残存少量的在演替过程中的先锋树种东瓜杨 (*Populus purdomii*)。峨眉冷杉树高 18 m 左右，胸径 20~30 cm；林下灌木和草本则稀疏分布，盖度均小于 30%。林下土壤为典型的山地暗棕壤，具有较高的砂粒含量和渗透性。

1.2 Forest-DNDC 模型描述

Forest-DNDC 是一个基于山地和湿地生态系统 C、N 生物地球化学循环的过程导向的模型，它能够预测山地和湿地森林生态系统中森林的生长和生产，土壤 C、N 动态和土壤产生的痕量气体的排放。Forest-DNDC 整合了两个广泛应用的模型：PnET-N-DNDC——山地森林生态系统的生物地球化学模型；Wetland-DNDC——水文驱动的生物地球化学模型^[19]。PnET-N-DNDC 能够模拟山地森林生态系统 C、N 动态和温室气体排放，它是在基本的生物地球化学循环基础上，通过整合生态驱动因子，环境因子和地球化学、生物化学反应而形成的动力学模型^[8-9]。Wetland-DNDC 是通过将水文学特征整合到 PnET-N-DNDC 模型而构建的模拟湿地森林生态系统 C、N 生物地球化学循环的模型，它的基本功能是模拟湿地森林的生长，土壤的生物地球化学过程和水过程^[20-22]。因此 Forest-DNDC 模型既能在山地生态系统应用，而此时它与 PnET-N-DNDC 相同，因此也能在湿地生态系统中应用。目前，Forest-DNDC 模型已在许多国家的不同森林类型进行了验证和应用^[23-26]，在先前的研究中我们在贡嘎山峨眉冷杉林区域对该模型进行了验证，结果表明 Forest-DNDC 能够模拟峨眉冷杉林土壤温室气体的排放，并且具有一定的合理性和准

确性^[27-29]。

1.3 气候数据

Forest-DNDC 模型要求输入日最高温度、日最低温度、日降水量气候数据作为输入参数产生模拟结果。本研究利用 1999—2006 年 8 年的日气候数据进行平均得到的日平均最高温度、日平均最低温度和日平均降水总量作为基线 (Base) 的气候情景 (图 1)。为了探讨气候变化对峨眉冷杉林土壤温室气体释放的影响，在基线气候数据基础上，设置温度+2 °C ($T+$)、温度-2 °C ($T-$)、降水量+20% ($P+$)、降水量-20% ($P-$)、温度+2 °C 同时降水量+20% ($T+P+$)、温度-2 °C 同时降水量-20% ($T-P-$)、温度+2 °C 同时降水量-20% ($T+P-$)、温度-2 °C 同时降水量+20% ($T-P+$) 8 种气候变化情景。将改变后的气候数据输入 Forest-DNDC 模型模拟气候变化对峨眉冷杉林土壤温室气体排放的影响，在模拟的过程中只改变气候条件，其它模型参数保持不变。

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 释放

Forest-DNDC 模型在计算土壤 CO₂ 释放时将土壤微生物呼吸和根呼吸分开进行计算，在这里土壤 CO₂ 释放是指土壤微生物呼吸和根呼吸释放 CO₂ 的总和。图 2 为不同气候情景下贡嘎山亚高山暗针叶峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放总量，在基线 (Base) 情景土壤 CO₂ 全年释放总量 (以 C 计，下同) 为 6 706.53 kg·hm⁻²·a⁻¹，平均每天释放量为 18.37 kg·hm⁻²·a⁻¹；温度+2 °C 同时降水量+20% ($T+P+$) 情景下土壤 CO₂ 释放最高，全年释放量为 9 126.22 kg·hm⁻²·a⁻¹，高于基线情景的 36.08%；温度-2 °C 同时降水量+20% ($T-P+$) 情景下土壤 CO₂ 释放最低，全年释放量为 4 232.37 kg·hm⁻²·a⁻¹，低于基线情景的 36.89%。另外，温度增加的三种情景下 ($T+$ 、 $T+P+$ 、 $T+P-$)，土壤 CO₂ 释放总量均明显高于基线情景，并且三种

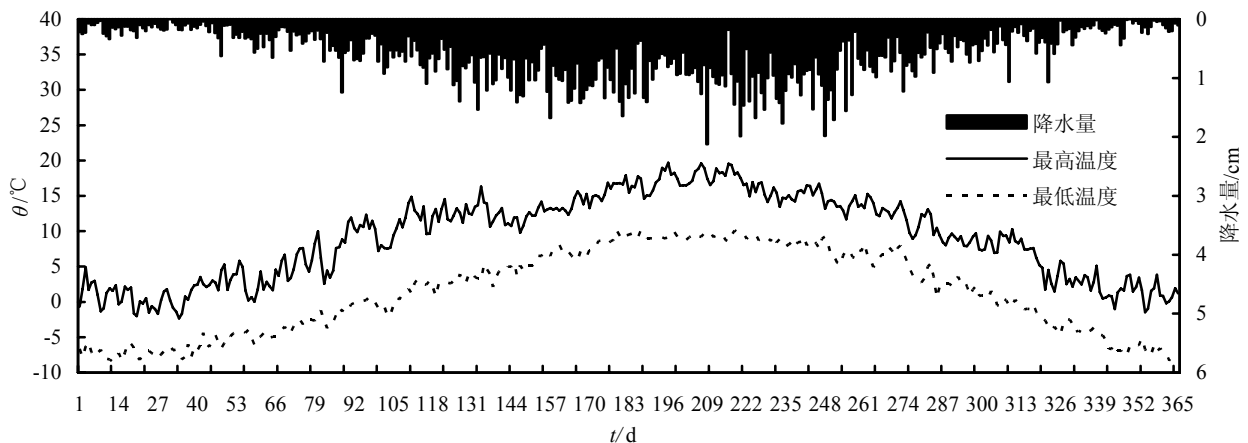


图 1 1999—2006 年峨眉冷杉林区域日平均最高温度、日平均最低温度和日平均降水量

Fig.1 Daily average maximum and minimum air temperature, daily average sum of precipitation of 1999—2006 in *Abies fabri* forest

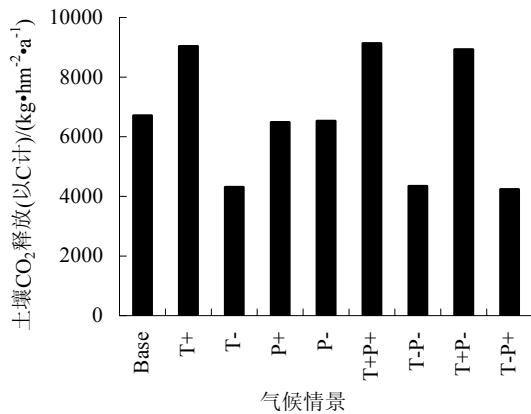


图2 不同气候情景下峨眉冷杉林土壤CO₂释放
Fig.2 The soil CO₂ emissions from the *Abies fabri* forest soil under different climate scenarios

情景的释放总量相当；而在温度降低的三种情景下 (T^- 、 $T-P^+$ 、 $T-P^-$)，土壤CO₂释放总量均明显低于基线情景，并且三种情景的释放总量也相当；而单一改变降水量的两种情景下 (P^+ 、 P^-)，土壤CO₂释放总量均与对照相差不大，由此可以看出，在贡嘎山峨眉冷杉林区域，温度是控制土壤CO₂释放的关键因子，并且随着温度的升高土壤CO₂释放总量增加，而降水量的改变对土壤CO₂释放影响不大。

2.2 土壤N₂O释放

不同气候情景下贡嘎山峨眉冷杉林土壤N₂O释放如图3所示。在基线 (Base) 情景土壤N₂O全年释放总量 (以N计，下同) 为697.71 g·hm⁻²·a⁻¹，平均每天释放量为1.91 g·hm⁻²·d⁻¹；土壤N₂O释放最高值出现在温度+2℃同时降水量+20% ($T+P^+$) 情景，全年释放总量为1004.71 g·hm⁻²·a⁻¹，和基线水平相比增加了44.01%；土壤N₂O释放最低值出现在降水量-20% (P^-) 情景，全年释放总量为435.92 g·hm⁻²·a⁻¹，和基线水平相比降低了37.52%。在降

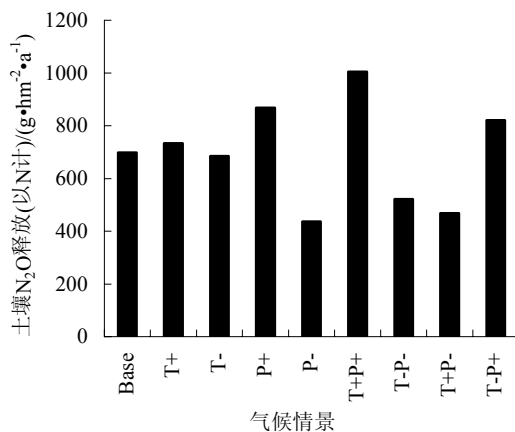


图3 不同气候情景下峨眉冷杉林土壤N₂O释放
Fig.3 The soil N₂O emissions from the *Abies fabri* forest soil under different climate scenarios

水量+20%条件下，无论温度增加、降低还是不变 (P^+ 、 $T+P^+$ 、 $T-P^+$)，土壤N₂O释放均高于基线情景；而当降水量-20%条件下 (P^- 、 $T+P^-$ 、 $T-P^-$)，土壤N₂O释放均低于基线情景；由此可见，随着降水量的增加土壤N₂O释放增加。另外，温度+2℃同时降水量+20% ($T+P^+$) 情景土壤N₂O释放分别高于单一增加温度 (T^+) 和降水量 (P^+) 情景的37.13%和15.74%；温度-2℃同时降水量-20% ($T-P^-$) 情景土壤N₂O释放低于温度-2℃ (T^-) 的23.87%，而略高于降水量-20% (P^-) 情景；温度+2℃同时降水量-20% ($T+P^-$) 和温度-2℃同时降水量+20% ($T-P^+$) 情景土壤N₂O释放也和单一改变温度和降水量 (T^+ 、 P^+ 、 T^- 、 P^-) 有较大差异，因此，温度、降水及温度和降水的联合作用均会影响峨眉冷杉林土壤N₂O释放。

2.3 土壤NO释放

和土壤N₂O释放相比，贡嘎山峨眉冷杉林土壤NO释放量较少 (图4)。基线 (Base) 气候情景下土壤NO释放总量 (以N计，下同) 为249.22 g·hm⁻²·a⁻¹，平均每天释放量仅为0.68 g·hm⁻²·d⁻¹；温度+2℃同时降水量+20% ($T+P^+$) 和温度-2℃同时降水量-20% ($T-P^-$) 情景土壤NO全年释放总量为326.08和142.53 g·hm⁻²·a⁻¹，分别为NO释放的最高值和最低值，分别高于基线情景的30.84%和低于基线情景的42.81%。温度-2℃ (T^-)、降水量-20% (P^-) 情景土壤NO释放分别低于基线水平的32.58%和27.65%，温度+2℃ (T^+) 情景土壤NO释放高于基线情景的18.05%，降水量+20% (P^+) 情景土壤NO释放与基线情景相当，由此可见，温度和降水均是控制峨眉冷杉林土壤NO释放的关键因子。另外，温度+2℃同时降水量+20% ($T+P^+$) 情景土

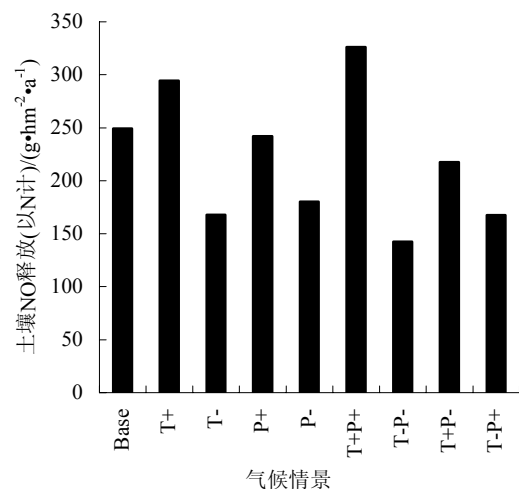


图4 不同气候情景下峨眉冷杉林土壤NO释放
Fig.4 The soil NO emissions from the *Abies fabri* forest soil under different climate scenarios

壤 NO 释放均高于单一增加温度 ($T+$) 和降水量 ($P+$) 情景, 温度-2 °C 同时降水量-20% ($T-P-$) 情景土壤 NO 释放均低于单一降低温度 ($T-$) 和降水量 ($P-$) 情景, 可见, 在影响土壤 NO 释放方面温度和降水表现为协同作用。

3 讨论和结论

大气中 CO₂、N₂O 和 NO 等温室气体浓度的增加引起的气候变化会导致地球表面温度增高和降水量、降水方式发生改变^[30]。而温度和水的可利用性是影响土壤生态过程, 包括土壤 C、N 迁移、土壤有机质的降解、硝化作用和反硝化作用等过程的重要因子, 这些过程的改变最终会影响土壤生态系统 C、N 的动态和土壤温室气体的排放。本研究利用基于过程的生物地球化学循环模型 Forest-DNDC 模拟不同气候变化情景下贡嘎山亚高山暗针叶峨眉冷杉林土壤 CO₂、N₂O 和 NO 三种温室气体释放的变化规律。

在森林生态系统中, 土壤 CO₂ 的产生、转移和释放是一个复杂的生态过程, 受到温度、水分、土壤性质、有机底物降解等因子及这些因子交互作用的影响^[31]。其中, 地球表面温度的增高会对陆地生态系统 C 库尤其是土壤 C 库产生正反馈作用, 使土壤中根的呼吸和微生物呼吸增加, 向大气中释放更多的 CO₂, 进一步加剧气候的变暖^[32]。贡嘎山峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放随着温度的升高释放量增加, 也就是说温度是控制峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放的关键因子。在许多生态系统中都有类似的规律, 例如在阿根廷农业生态系统中发现, 土壤 CO₂ 释放与温度呈现显著正相关关系, 并且温度每升高 10 °C, 土壤 CO₂ 释放增加 2.18 倍^[33]; 利用 CENTURY 模型计算挪威云杉林(*Picea abies*) 土壤微生物呼吸发现, 温度的升高使土壤有机质快速地降解, 释放大量的 CO₂^[34]。在全球的范围内, 土壤 CO₂ 释放和地球表面的温度呈正相关关系^[35]。降水的改变会影响土壤表层水分的含量和分布, 而土壤表层是土壤生物活性和 CO₂ 产生的主要区域^[36]。降水量的改变对峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放影响不大, 这可能是因为该区域海拔较高, 降水量充足, 为土壤有机质的降解和 CO₂ 的产生提供了足够的水分。

土壤 N₂O 和 NO 的释放是由土壤中 N₂O 和 NO 的产生、消耗和转移过程控制的, 在有分子氧存在的条件下, NH₄⁺ 氧化为 NO₃⁻ 的硝化过程中会产生 N₂O 和 NO, 而 NO₃⁻ 还原成 NO₂⁻, 进一步还原成 NO、N₂O 和 N₂ 的反硝化过程中也会产生 N₂O 和 NO^[37]。温度和降水是影响土壤硝化作用、反硝化作用和矿化作用等过程的主要因子, 最终会影响土壤含 N 气体的释放。当温度和降水增加时, 土壤中

土壤有机碳快速地分解, 大量的可溶性有机碳、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 产生, 这些硝化作用和反硝化作用底物浓度增加会促使土壤 N₂O 和 NO 释放增加^[9]。温度、降水及温度和降水的联合作用均会影响峨眉冷杉林土壤 N₂O 和 NO 释放, 并且随着降水量的增加土壤 N₂O 释放呈明显增加趋势, 而在影响土壤 NO 释放方面温度和降水表现为协同作用。温度的升高会促进土壤微生物的活性, 而硝化作用和反硝化作用均是微生物驱动的, 从而使硝化作用和反硝化作用加快, 土壤 N₂O 和 NO 释放增加^[38]。峨眉冷杉林土壤 N₂O 释放随着降水量的增加而增加, 是因为土壤水分含量的增加和微生物过程的变化引起的, 土壤湿度的增加促进 N₂O 的产生和释放^[39]。温度和降水对土壤 NO 释放的影响在国内外报道较少, Sullivan 等^[40]发现在美国东南部的农田土壤中, 土壤 NO 释放随着温度增加而增加。

从以上分析可见, 气候变化影响贡嘎山峨眉冷杉林土壤温室气体的排放, 不同气候情景对土壤温室气体释放的影响有大有小、有促进有抑制, 并且同一气候情景对不同温室气体释放影响也不相同。温度是控制峨眉冷杉林土壤 CO₂ 释放的关键因子, 对土壤 CO₂ 释放产生正的反馈作用, 随着温度的升高土壤 CO₂ 释放总量增加, 而降水量的改变对土壤 CO₂ 释放影响不大。温度、降水及温度和降水的联合作用均会影响峨眉冷杉林土壤 N₂O 释放, 降水的影响最为明显, 表现为土壤 N₂O 释放随着降水量的增加而增加; 而温度和降水也是影响土壤 NO 释放的关键因子, 二者表现为协同作用。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (HOUGHTON J T, DING Y, GRIGGS D J, et al.)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] GARCIA-GONZALO J, PELTOLA H, BRICEÑO-ELIZONDO E, et al. Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: A case study from a Finnish boreal forest[J]. Climatic Change, 2007, 81: 431-454.
- [3] ALIG R J, ADAMS D M, MCCARL B A. Project impacts of global climate change on the US forest and agriculture sectors and carbon budgets[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169: 3-14.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M/OL]. 2007. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- [5] KAIJALAINEN T, PUSSINEN A, LISKI J, et al. An approach towards an estimate of the impact of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget: Germany as a case study[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 162: 87-103.
- [6] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature,

- 2006, 440: 165-173.
- [7] VERBURG P S J. Soil solution and extractable soil nitrogen response to climate change in two boreal forest ecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 257-261.
- [8] LI C S, ABER J, STANGE F, et al. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. model development[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 4369-4384.
- [9] STANGE F, BUTTERBACH-BAHL K, PAPEN H, et al. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 2. sensitivity analysis and validation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 4385-4398.
- [10] DONG Y S, QI Y C, LUO J, et al. Experimental study on N₂O and CH₄ fluxes from the dark coniferous forest zone soil of the Gongga Mountain, China[J]. *Science in China: Series D*, 2003, 46(3): 285-295.
- [11] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 179-185.
CHENG Genwei, LUO Ji. The carbon accumulation and dissipation features of sub-alpine woodland in Mt. Gongga[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 58(2): 179-185.
- [12] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 191-196.
LUO Ji, YANG Zhong, YANG Qingwei. A study on the biomass and production of forest on the Gongga Mountain[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 191-196.
- [13] 罗辑, 赵义海, 李林峰. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林 C 循环的初步研究[J]. *山地学报*, 1999, 17(3): 250-254.
LUO Ji, ZHAO Yihai, LI Linfeng. A preliminary research on the carbon cycle of *Abies fabri* forests on the east slope of the Gongga Mountain[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(3): 250-254.
- [14] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 402-409.
LUO Ji, YANG Zhong, YANG Qingwei. CO₂ emissions from soils in *Abies fabri* forest region on the east slope of Gongga Mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 402-409.
- [15] CHENG G W, LUO J. Succession features and dynamic simulation of sub-alpine forest in the Gongga Mountain, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 1: 29-37.
- [16] WANG L, OUYANG H, PENG K, et al. Distribution characteristics of SOM and nitrogen on the eastern slope of Gongga Mountain[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, 14(4): 481-487.
- [17] WANG L, OUYANG H, ZHOU C P, et al. Soil organic matter dynamics along in the Gongga Mountain on a vertical vegetation gradient the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4): 411-420.
- [18] HE L, TANG Y. Soil development along primary succession sequences on moraines of Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain, Sichuan, China[J]. *Catena*, 2008, 72: 259-269.
- [19] MIEHLE P, LIVESLEY S J, LI C S, et al. Quantifying uncertainty from large-scale model predictions of forest carbon dynamics[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1421-1434.
- [20] LI C S, CUI J B, SUN G, et al. Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems[J]. *Environmental Management*, 2004, 33: 176-186.
- [21] CUI J B, LI C S, TRETTIN C. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 278-289.
- [22] CUI J B, LI C S, TRETTIN C. Modeling biogeochemistry and forest management practices for assessing GHGs mitigation strategies in forested wetlands[J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, 10: 43-53.
- [23] BUTTERBACH-BAHL K, STANGE F, PAPEN H, et al. Impact of changes in temperature and precipitation on N₂O and NO emissions from forest soils[C]// *Non-CO₂ greenhouse gases: scientific understanding, control and implementation*. Kluwer Academic Publishers, 2000: 167-171.
- [24] BUTTERBACH-BAHL K, STANGE F, PAPEN H, et al. Regional inventory of nitric oxide and nitrous oxide emissions for forest soils of southeast Germany using the biogeochemical model PnET-N-DNDC[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 34155-34166.
- [25] KESIK M, BRUGGEMANN, FORKEL R, et al. Future scenarios of N₂O and NO emissions from European forest soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: 2018-2022.
- [26] KIESE R, LI C S, DAVID W, et al. Regional application of PnET-N-DNDC for estimating the N₂O source strength of tropical rainforests in the wet tropics of Australia[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 128-144.
- [27] LU X, CHENG G, XIAO F, et al. Modeling effects of temperature and precipitation on carbon characteristics and GHGs emissions in *Abies fabric* forest of subalpine[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 339-346.
- [28] LU X, CHENG G. Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in *Abies fabri* forest of subalpine, southwest China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1015-1021.
- [29] LU X, CHENG G, XIAO F, et al. Simulating carbon sequestration and GHGs emissions in *Abies fabric* Forest on the Gongga Mountains using a biogeochemical process model Forest-DNDC[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 5: 249-256.
- [30] GORISSEN A, TIETEMA A, JOOSTEN N N, et al. Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands[J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 650-661.
- [31] UVAROV A V, TIUNOV A V, SCHEU S. Long-term effects of seasonal and diurnal temperature fluctuations on carbon dioxide efflux from a forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 3387-3397.
- [32] RUSTAD L E, HUNTINGTON T G, BOONE R D, et al. Controls on soil respiration: Implications for climate change[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1-6.
- [33] ALVAREZ R, ALVAREZ C R. Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the Humid Pampa of Argentina: estimation of carbon fluxes under climate change[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34: 282-285.
- [34] ELIASSON P E, MCMURTRIE R E, PEPPER D A, et al. The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 167-181.
- [35] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.

- [36] LI H J, YAN J X, YUE X F, et al. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2008, 148: 490-503.
- [37] KIESE R, LI C S, HILBERT D W, et al. Regional application of PnET-N-DNDC for estimating the N₂O source strength of tropical rainforests in the wet tropics of Australia[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 128-144.
- [38] ZHANG J, HAN X. N₂O emission from the semi-arid ecosystem under mineral fertilizer (urea and superphosphate) and increased precipitation in northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 291-302.
- [39] SITAULA B K, BAKKEN L R. Nitrous oxide release from spruce forest soil: Relationships with nitrification, methane uptake, temperature, moisture and fertilization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25: 1415-1421.
- [40] SULLIVAN L J, MOORE T C, ANEJA V P, et al. Environmental variables controlling nitric oxide emissions from agriculture soils in the southeast unites states[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30: 3573-3582.

Effects of climate change on soil greenhouse gas emissions in subalpine dark coniferous forest

LU Xuyang^{1,2}, HUO Changfu^{1,2}, FAN Jihui^{1,2}, CHENG Genwei^{1*}

1. Institute of Mountain Hazards & Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Key Laboratory of Mountain Environment Evolvement and Regulation, Institute of Mountain Hazards & Environment, CAS, Chengdu 610041, China

Abstract: The biogeochemical Forest-DNDC model was used to derive estimates of the effects of climate change on soil greenhouse gas emissions in the subalpine dark coniferous forest ecosystem of Gongga Mountain. The subalpine dark coniferous forest is middle age *Abies fabri* forest which is located 3 000 m altitude on the eastern slope of Gongga Mountain. Daily average maximum and minimum air temperature, daily average sum of precipitation which calculated from 8-year dataset each today's climate from 1999 to 2006 were assumed as the base scenario. The following were designed as 8 different climate change scenarios: 2 °C increase ($T+$) and decrease ($T-$) in daily air temperature; 20% increase ($P+$) and decrease ($P-$) in daily precipitation; 2 °C increase in temperature and 20% increase in precipitation ($T+P+$); 2 °C decrease in temperature and 20% decrease in precipitation ($T-P-$); 2 °C increase in temperature and 20% decrease in precipitation ($T+P-$); 2 °C decrease in temperature and 20% increase in precipitation ($T-P+$). The simulated results showed that soil CO₂ emissions were relatively sensitive to changes in temperature (T), while N₂O emissions were more sensitive to precipitation (P) changes and NO emissions were found to be sensitive to both temperature and precipitation changes within the ranges of observed climate variability. The largest positive and negative responses of soil CO₂ emissions to climate change occurred under $T+P+$ scenario (36.08% higher than that of the base scenario) and $T-P+$ scenario (36.89% lower than that of the base scenario). Soil N₂O emissions increased under elevated daily precipitation and decreased under reduced daily precipitation. Increase in both air temperature and precipitation resulted in a greater magnitude of soil NO emissions than the individual increase in either air temperature or precipitation alone. And decrease in both air temperature and precipitation resulted in a lower magnitude of soil NO emissions than the individual decrease in either air temperature or precipitation alone.

Key words: Gongga Mountain; *Abies fabri*; Soil respiration; Forest-DNDC; Climate change