

模拟蒙古栎林生态系统碳收支对非对称性升温的响应

苏宏新, 李广起

中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093
E-mail: hxsu@ibcas.ac.cn

2012-02-09 收稿, 2012-04-01 接受
国家自然科学基金(30900188)资助

摘要 夜间最低气温与白天最高气温的非对称性升高现象普遍存在于北半球. 应用 BIOME-BGC 模型模拟了北京东灵山地带性植被蒙古栎林生态系统碳收支在多种气候变化情景下的变化趋势, 通过协方差分析探讨非对称性升温对暖温带落叶阔叶林生态系统固碳的潜在效应. 结果表明, 当大气 CO₂ 浓度不变时, 对称性升温对 GPP 和 NPP 影响不大, 但促进了 Rh; 蒙古栎林生态系统为一个较强的碳源, 而非对称性升温则显著地提高了 GPP, NPP 和 Rh, 只是 Rh 的变化幅度较小, 碳源功能随着升温不对称性的不断加强而减弱. 当大气 CO₂ 浓度和气温同时升高时, 两者的正交互作用显著地提高了 GPP, NPP 和 Rh, 但 Rh 的变化幅度较小, 蒙古栎林生态系统转变为一个较强的碳汇, 且随着升温幅度及其不对称性的不断加强, 各通量变化幅度增大, 碳汇功能不断加强. 总之, 非对称性升温较对称性升温更有利于蒙古栎林生态系统的碳吸收. 鉴于此, 推测基于平均气温变化的估算都可能在一定程度上高估了暖温带落叶阔叶林生态系统对气候变暖的正反馈. 但该模型模拟的结果还没有得到相应观测和实验的证实. 强调今后只有采用协同方法, 充分考虑最低气温、最高气温和平均气温各自的生态效应及其与其他生态因子的交互作用, 才能更加真实地评价非对称性升温现实世界中森林生态系统的碳源/汇功能.

关键词

东灵山地区
暖温带落叶阔叶林
气候变化
BIOME-BGC 模型

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第一工作组第4次评估报告明确指出, 近100年(1906~2005年)全球平均气温上升了0.74℃, 气候变暖已是不争的事实^[1]. 关于升温的过程, Karl等人^[2]分析了1951~1990年全球陆地气温资料指出, 北半球大部分陆地最低气温上升的幅度是最高气温的3倍. 而Easterling等人^[3]进一步证实了气候变暖过程中存在明显的非对称性(asymmetric trends), 即最低气温升高比最高气温升高快, 冬、春季的升温速率远大于夏、秋季的升温速率. 同样地, 唐国利和丁一汇^[4]基于我国603个气象站1961~2002年气温观测资料分析表明, 年平均最高、最低气温存在明显的非对称性变化, 后者升温幅度约为前者的2倍多. 越来越多的基于长期观测^[5,6]、

控制实验^[7-9]和模型模拟^[10-12]的研究都表明, 最低气温升高和最高气温升高可能对植物、生态系统结构与功能(如生产力和碳循环等)造成不同的影响. 但绝大部分研究气候变暖对陆地生态系统影响及其反馈的工作都只笼统地考虑了平均气温的变化^[13].

北京东灵山地区位于我国暖温带的中心区域, 属于“国际地圈与生物圈计划”在北半球选点的大断面上, 并居于“中国生态系统研究网络”所选的全国东西与南北两条断面的焦点, 具有明显过渡带的特征, 是研究气候变化较理想的场所^[14]. 该地区地带性植被为暖温带落叶阔叶林, 由于长期的人为干扰, 原生林几乎丧失殆尽. 但其次生林恢复和保护良好, 植被群落结构相对复杂, 具有典型的暖温带落叶阔叶林区域北部亚带特色, 仍是我国森林研究从北到

南纬度分布带上不可缺少的典型植被类型之一^[15]。目前,对东灵山地区典型森林生态系统生产力和碳循环^[16,17]及未来气候变化对暖温带落叶阔叶林的结构和功能的潜在影响^[18-21]等方面都进行了大量的研究。但该区域是否存在非对称性升温现象?如是,在未来气候情景下这种非对称性是否影响森林生态系统碳收支平衡?这方面的研究未见报道。为此,本研究在不同未来气候情景下,应用基于过程的生态系统模型 BIOME-BGC^[22]模拟以蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)为建群种的暖温带落叶阔叶林生态系统碳收支的变化情况,探索未来气温升高及其非对称性对生态系统碳收支的潜在影响,为以后的控制实验和模拟研究奠定基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究在中国科学院北京森林生态系统定位站驻地北京东灵山地区(39°48'~40°00'N, 115°24'~115°36'E)开展。该地区气候属于暖温带半湿润季风气候,四季分明。经过比较强烈的人为干扰,现有植被以天然次生林和人工林为主。其中次生林以蒙古栎林为主,林内主要树种包括蒙古栎、五角枫(*Acer pictum* subsp. *mono* (Maxim.) Ohashi)、黑桦(*Betula dahurica* Pall.)、花曲柳(*Fraxinus chinensis* subsp. *rhynchophylla* (Hance) E. Murray)和糠椴(*Tilia*

mandshurica Rupr. et Maxim.)等。土壤在全国土壤区划中属褐色土壤带,落叶阔叶林下以山地棕壤为主^[14]。本研究以定位站的蒙古栎林永久性观测样地为模拟对象,具体情况参见之前的研究^[18]。

1.2 历史气象数据

1993~2010年气温和降水数据直接来自中国科学院北京森林生态系统定位站气象观测场(39°58'N, 115°26'E, 海拔 1150 m)。为了获得该地区长期气候变化趋势,应用 SPSS 时间序列分析方法中的互相关函数(cross-correlation function)比较分析了当地气象数据与最近的河北怀来气象站(40°24'N, 115°30'E, 海拔 536.8 m)相应时段的数据(数据来自 <http://cdc.cma.gov.cn/>),结果显示两站有极好相关性。在此,应用线性回归方程根据怀来气象数据插补延长当地 1954~1992年气温和降水资料。

东灵山地区过去 57 年的年平均气温为(4.3 ± 0.7)℃,年平均最高气温为(11.2 ± 0.7)℃,年平均最低气温为(-1.0 ± 1.0)℃,年降水量为(588.9 ± 99.9) mm。从长期变化趋势看,气温都显著升高(图 1)。其中年平均最低气温线性升温速率为 0.0508℃ a⁻¹,约为同期最高气温升温的 2.1 倍,呈现明显的非对称性。年平均气温线性升温速率为 0.0309℃ a⁻¹,明显高于全球^[1]或全国^[23]同期平均值(分别为 0.013 和 0.022℃ a⁻¹),属于气候变化的敏感区域。与此同时,东灵山地区大气降水年度间波动极大,稍有减少趋势(图 1(d))。

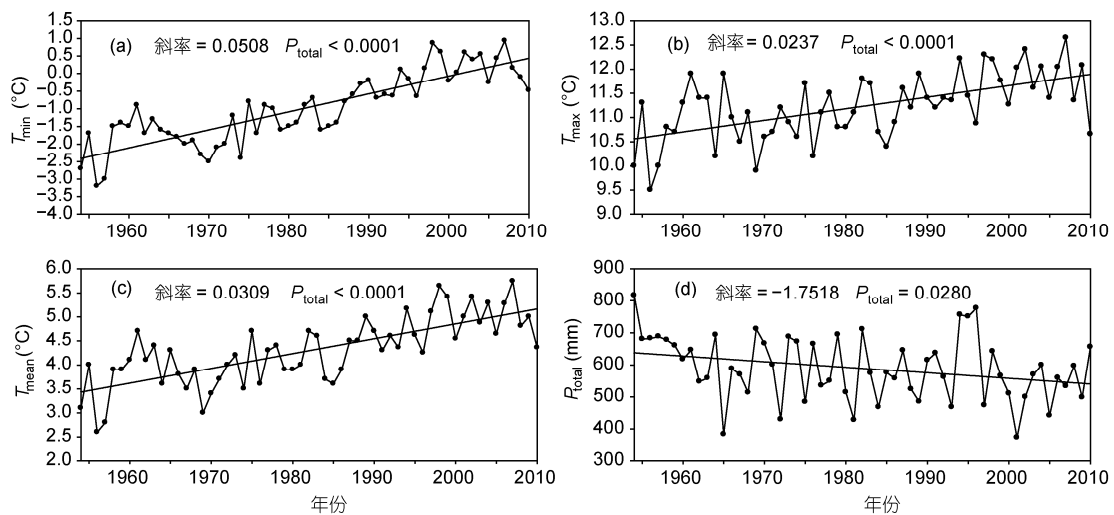


图 1 北京东灵山地区 1954~2010 年年平均最低气温(T_{\min})、年平均最高气温(T_{\max})、年平均气温(T_{mean})和年降水量(P_{total})变化

1.3 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC 是研究全球和区域气候、干扰和各类植被生物地球化学循环互作的生态系统过程模型^[22]。该模型是从森林动力学模型 Forest-BGC 发展而来的,模型的发展历程及其机理过程的详细描述可参见 Theoretical Framework of Biome-BGC (<http://www.ntsug.umt.edu/sites/ntsug.umt.edu/>)。建立 BIOME-BGC 模型的初衷是解决大尺度多种植被类型共存的区域生态学问题。但在生态系统尺度上,大量研究已经证明 BIOME-BGC 模型可以对不同区域上典型森林生态系统的生产力、碳储量和通量等进行很好的模拟,如在美国的阿拉斯加州,该模型模拟黑松林的碳通量高度相关于基于涡度相关法实测的总初级生产力(gross primary productivity, GPP)(89%)、生态系统呼吸(ecosystem respiration, RE)(89%)和净生态系统碳交换量(net ecosystem exchange, NEE)(42%)^[24];同样地,该模型可以正确模拟从欧亚大陆到东亚水热梯度条件下 6 个落叶松林生态系统 GPP, RE 和 NEE,其数值与基于 AsiaFlux 观测数据高度一致^[25];在日本中部的温带柏-松树混交林区,该模型还能很好地考虑收获和气候变化对生态系统碳收支的影响,在月尺度上模拟的碳通量结果与基于涡度相关法实测的 GPP(斜率=1.20, $R^2=0.93$)、RE(斜率=0.98, $R^2=0.95$)和 NEE(斜率=0.73, $R^2=0.39$)高度相关,在年尺度上 NEE(斜率=0.85, $R^2=0.45$)的拟合更优^[26];而在北美常绿针叶林区^[22]、欧洲中部^[27]和我国的北亚热带常绿针叶林区^[28],模型不仅能重现基于涡度相关法实测的较短时间尺度的碳通量动态特征,而且还能模拟长期的碳储量分配格局、动态以及这些过程对环境梯度变化的响应。BIOME-BGC 还成功地模拟了包括黄松^[29]和黑云杉^[30]在内不同森林生态系统长期演替序列碳收支动态特征。此外,在我国南方的红树林^[31]、天山北坡的雪岭云杉林^[32]和北京山区包括以栎类为主落叶阔叶林在内的多种典型森林^[33]中,BIOME-BGC 模拟的净初级生产力(net primary productivity, NPP)与基于经典生态调查法估算的实测值也都保持很好的一致性。这些研究充分证明了 BIOME-BGC 模型理论原理和结构框架的合理性和可靠性。也正因如此,该模型已经被广泛地应用于分析森林生态系统碳循环过程的长期历史动态变化趋势^[34],并预测不同森林生态系统对未来长期气候变

化、经营干扰的响应与适应^[35-38]。在本研究中,由于东灵山地区暖温带落叶阔叶林的小地形非常复杂,不适合应用涡度相关法进行连续通量监测,没有相关数据对模型进行校验。但 Su 和 Sang^[18]已经利用东灵山地区蒙古栎林短期的实测数据对 BIOME-BGC 模型进行了部分验证,证明该模型可以作为诊断工具来研究暖温带落叶阔叶林生态系统对气候变化的响应。

本研究使用的 BIOME-BGC 版本为 4.2 (<http://www.ntsug.umt.edu/project/biome-bgc>),许多生态系统行为/过程都是基于每日气象数据以天为时间步长进行模拟的。模型的输入参数主要有 3 种:研究地点初始条件、生理生态参数和气象因子,其中气象因子包括每日的最高温度(°C)、最低温度(°C)、日降雨量(cm)、白天平均温(°C)、水气压亏缺(vapor pressure deficit, Pa)和太阳短波辐射($W m^{-2}$)和日长(S)等 7 项。这里,前 3 个气象因子为直接观测数据,而后 4 个气象因子则采用 MT-CLIM 模型^[39]基于前面的观测数据来估算;样地初始条件和生理生态参数参见之前的研究^[18]。模型的输出参数主要有 3 种尺度:年、月和日,output map init.c 中给出了 646 个相关参数的选项,使用者可以根据实际需求选择恰当的参数。本研究中只选择了生态系统碳收支主要组成的 GPP, NPP, 异养呼吸(heterotrophic respiration, Rh)和 NEE 等。

1.4 模型模拟方案

模型的模拟第一阶段为 spin-up 模拟——重复运行东灵山地区 1954~2010 年每日气象数据,模拟从次生裸地(无植被覆盖)开始至植被、凋落物及土壤碳库达到平衡状态。第二阶段代入不同气候情景的气象数据及相应大气 CO_2 浓度模拟蒙古栎林生态系统碳收支的动态变化。

关于未来气候情景,本研究参考了区域气候模式 RegCM3 在 IPCC-SRES 报告的高排放情景 A2 下对中国区域温度和降水量变化的高分辨率综合预估结果^[40](数据来自 <http://ncc.cma.gov.cn/cn/>)。与对照期 1961~1990 年相比,A2 情景下北京东灵山地区 21 世纪后期(2071~2100 年)每月的最高气温、最低气温和平均气温都呈明显的上升趋势,升高幅度差别不大(即对称性同步升温),年均值都约为 $3.5^{\circ}C$ (图 2)。但基于多年的观测资料分析却显示东灵山地区的气候变暖存在明显的非对称性(图 1)。鉴于此,本研究

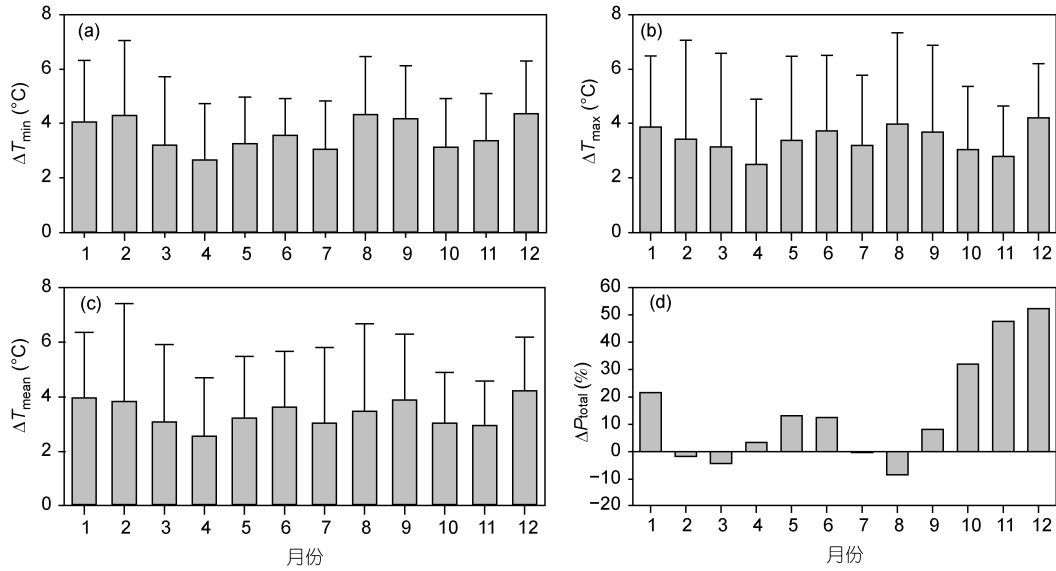


图2 SRES A2 情景下 RegCM3 模拟的北京东灵山地区气候变化
2071~2100 年与 1961~1990 年之间的平均差值 Δ , 符号同图 1

综合了历史数据分析结果和 RegCM3 在 SRES A2 情景下的模拟结果, 设置了一系列的升温情景: 平均气温升高 3.0 和 4.0℃ 2 个梯度, 最高气温和最低气温升高幅度的比例分别为 1:1, 1:2, 1:3. 同时考虑有/无大气 CO₂ 浓度的变化(表 1). 而基于 RegCM3 模拟的 SRES A2 情景下东灵山地区降水量有所变化, 夏季降水有所减少, 冬季降水相对变化量很大, 但其绝对值不大, 对年降水量的贡献有限(图 2). 因此, 在本研究中没有考虑降水量的变化. 所有气候情景都是以 1961~1990 年为参照期, 2071~2100 年每日的气

象数据则是在 1961~1990 年的基础上, 直接利用表 1 所给出的变化值校正而得到. 同时考虑了气温变化对水气压亏缺的影响, 即相应气象数据是通过 MT-CLIM 模型来组织而不是直接运用 BIOME-BGC 的初始化文件设置来完成的.

Spin-up 阶段的大气 CO₂ 浓度值采用恒定值 294.8 ppmv, 代表第二次工业革命完成时及其之前的状况. 1954~2010 年的大气 CO₂ 浓度值取自冰芯测定和大气观测数据 (<http://www.earth-policy.org/indicators/C52/>). SRES A2 情景的大气 CO₂ 浓度值采用 Bern 碳循环模型 reference 版本中相应值, 从 2071 年的 626.2 ppmv 升高到 2100 年 836.0 ppmv^[41].

整个模拟过程都不考虑大气 N 沉降速率的年际变化及森林火灾的影响.

2 结果

以对照期不同年份年降水量和平均气温、相应情景大气 CO₂ 浓度作为协变量, 采用协方差分析 (analysis of covariance) 来探索不同升温幅度及其不对称性对生态系统碳收支各组分的影响(表 2). 在不考虑大气 CO₂ 浓度升高的情景下(以 a 情景为对照), 气温对称地升高 3℃(b)对 GPP 和 NPP 都没有影响, Rh 却显著提高了 12.86%, NEE 从 6.44 gC m⁻² a⁻¹ 下降到 -65.49 gC m⁻² a⁻¹, 生态系统由微弱的碳汇变成了较强的碳源; 当最高气温:最低气温为 1:2 非对称

表 1 不同气候变化情景设置^{a)}

情景	最高气温	最低气温	平均气温	降水	大气 CO ₂ 浓度
a	不变	不变	不变	不变	正常
b	+3℃	+3℃	+3℃	不变	正常
c	+2℃	+4℃	+3℃	不变	正常
d	+1.5℃	+4.5℃	+3℃	不变	正常
e	+4℃	+4℃	+4℃	不变	正常
f	+2.7℃	+5.4℃	+4℃	不变	正常
g	+2℃	+6℃	+4℃	不变	正常
h	不变	不变	不变	不变	升高
i	+3℃	+3℃	+3℃	不变	升高
j	+2℃	+4℃	+3℃	不变	升高
k	+1.5℃	+4.5℃	+3℃	不变	升高
l	+4℃	+4℃	+4℃	不变	升高
m	+2.7℃	+5.4℃	+4℃	不变	升高
n	+2℃	+6℃	+4℃	不变	升高

a) 不变/正常: 对照期 1961~1990 年相应值; 升高: SRES A2 情景下 2071~2100 年相应值

表2 不同气候情景下蒙古栎林生态系统碳收支变化

情景	GPP (gC m ⁻² a ⁻¹)	NPP (gC m ⁻² a ⁻¹)	Rh (gC m ⁻² a ⁻¹)	NEE (gC m ⁻² a ⁻¹)	
a	980.97±47.80 ^a	607.87±30.56 ^a	601.43±34.84 ^a	6.44±47.01 ^{abcd}	
b	1034.81±47.80 ^a	613.29±30.56 ^a	678.78±34.84 ^{bce}	-65.49±47.01 ^{bcd}	
c	1130.16±47.80 ^{bc}	671.46±30.56 ^b	719.88±34.84 ^{bcddeg}	-48.42±47.01 ^{abcd}	
不增加 CO ₂ ^{a)}	d	1179.79±47.80 ^{bcd}	701.81±30.56 ^{bc}	747.79±34.84 ^{cdeg}	-45.99±47.01 ^{abcd}
e	1015.41±47.80 ^a	591.78±30.56 ^a	705.23±34.84 ^{bcdde}	-113.45±47.01 ^{bc}	
f	1148.24±47.80 ^{bc}	670.92±30.56 ^b	765.57±34.84 ^{cdfg}	-94.64±47.01 ^{bcd}	
g	1226.88±47.80 ^{cd}	718.23±30.56 ^c	809.24±34.84 ^{fg}	-91.01±47.01 ^{bcd}	
h	1008.28±36.49 ^a	623.72±25.93 ^a	590.75±34.85 ^a	32.97±38.60 ^{ab}	
i	1214.59±36.49 ^b	718.31±25.93 ^b	672.16±34.85 ^{bc}	46.15±38.60 ^{ab}	
j	1326.96±36.49 ^c	786.48±25.93 ^c	720.03±34.85 ^{cd}	66.45±38.60 ^{ab}	
增加 CO ₂ ^{b)}	k	1400.79±36.49 ^d	831.18±25.93 ^{de}	752.94±34.85 ^{cde}	78.24±38.60 ^{ab}
l	1295.02±36.49 ^c	753.31±25.93 ^{bc}	704.21±34.85 ^{bcd}	49.10±38.60 ^{ab}	
m	1467.84±36.49 ^e	855.67±25.93 ^{de}	776.06±34.85 ^{de}	79.61±38.60 ^{ab}	
n	1574.93±36.49 ^f	920.09±25.93 ^f	825.65±34.85 ^f	94.45±38.60 ^{bc}	

a) 修正平均数是按降水量 = 576.5 mm, 年平均气温 = 4.9℃, CO₂ = 333.25 ppmv 的情景下计算的, P < 0.05 时用不同字母标识. b) 修正平均数是按降水量 = 576.5 mm, 年平均气温 = 4.9℃, CO₂ = 724.93 ppmv 的情景下计算的, P < 0.05 时用不同字母标识

性升高(c)时, GPP, NPP 和 Rh 都显著升高, 分别为 15.21%, 10.46%和19.69%, 后者的变化幅度相对大一些, 因此, 生态系统呈现较强的碳源功能, NEE 为 -48.42 gC m⁻² a⁻¹; 当最高气温:最低气温为 1:3 非对称性升高(d)时, GPP, NPP 和 Rh 上升幅度更大, 分别为 20.20%, 15.45%和 24.34%, NEE 为 -45.99 gC m⁻² a⁻¹. 气温对称地升高 4℃(e)对 GPP 和 NPP 都没有影响, 却显著提高了 Rh (17.26%), 生态系统由微弱的碳汇变成了较强的碳源, NEE 为 -113.45 gC m⁻² a⁻¹; 而气温非对称性升高(f 和 g)时, GPP, NPP 和 Rh 都显著升高, 前两者的幅度更大一些, 相对于气温对称地升高 4℃(e)而言, 生态系统的碳源功能已被显著弱化.

在同时考虑大气 CO₂ 浓度升高的情景下(以表 1 的 h 情景为对照), 由于气温和大气 CO₂ 浓度升高具有正交互作用, 气温升高 3℃的 3 种情景(i, j, k)下, GPP, NPP 和 Rh 都有显著的提高, 且各处理之间差异显著, 但 NEE 却不受影响, 都表现出较强的碳汇功能; 当气温升高 4℃(l, m, n)时, GPP, NPP 和 Rh 相对于对照(h)都有显著的提高, 各处理之间差异显著, 其结果与气温升高 3℃的相应情形进行比较也有显著的提高. 与此同时, NEE 随着不对称性的不断加强而增大.

3 讨论

从植物生理学方面看, 夜间最低气温对植物的蒸腾作用、呼吸作用、干物质的积累等影响很大, 而

白天最高气温对于植物的光合作用正常机能的控制等方面非常重要. 因此, 由光合作用和呼吸作用主导的生态系统碳收支对昼夜不同升温的响应必然会存在差异^[7,8]. 在不考虑大气 CO₂ 浓度升高的情景下(以 a 情景为对照), 最低气温与最高气温都对称地升高 3℃(b)或 4℃(e), 对 GPP 的影响很小(分别为+5.49%和+3.51%), 这可能是以下几个方面原因综合造成的: (1) 夜间最低气温的升高通过调节叶片糖类和淀粉浓度含量可以显著提高植物光合作用强度^[7,42]; 同时, 气温的升高会相应延长生长季, 使得光合作用时间增长; (2) 白天最高气温的升高会抑制植物光合作用, 同时气温的升高会加强水分蒸散引起土壤水分亏缺, 通过控制叶片气孔导度也使得光合作用有所减弱^[7]; (3) 气温升高引起的土壤水分亏缺中和甚至超过了气温对土壤氮素矿化的直接促进作用, 降低了土壤中可获得性氮素, 间接限制了生产力^[43]. 这一研究结果也间接地证实了蒙古栎林生态系统的生产力主要受降水量而非气温影响^[19,20]. 当然, 气温升高也会相应提高植物个体的自养呼吸^[44], 从而抵消由于升温造成的 GPP 的增加, 使得 NPP 的变化也不大. 而气温升高还通过改变土壤温度, 促进土壤呼吸^[44], 使得生态系统碳源功能显著提高(表 2). 当最低气温与最高气温呈非对称性升高时(c, d, f, g), 最低气温的升高可以显著提高植物光合作用强度^[42]且升高幅度大于最高气温, 导致 GPP 和 NPP 显著升高(表 2).

由于光合产物的促进作用, Rh 随着最低气温升高也显著加强, 但白天最高气温升高对它的影响不大^[9]; 同时由于温度上升加剧水分蒸发所导致的土壤水分亏缺会抑制土壤的异养呼吸^[43,44], 从而抵消部分夜间升温造成的 Rh 升高幅度. 因此, 升温对生态系统碳吸收的负效应在最低气温升温幅度大于最高气温的升温幅度时得到一定程度的缓解^[42].

当单独升高大气 CO₂ 浓度(h)时, 相对于 a 情景蒙古栎林生态系统 GPP 只提高了 2.78%, NPP 提高了 2.61% (表 2), 这与之前的模拟结果基本一致^[24,45]. 本研究中大气 CO₂ 浓度升高的促进作用不太明显, 可能与当地具体环境(如年均温比较低、土层浅、比较贫瘠等)相关^[18], 同时本研究模拟的是天然成熟蒙古栎林, 而天然成熟林对大气 CO₂ 浓度升高可能表现较强的适应性, 几乎没有表现出持续的促进作用^[46]. 与此同时, 大气 CO₂ 浓度升高改变植被的叶面积指数, 加大水分蒸散从而导致土壤含水量胁迫加强, 使得 Rh 略微减弱^[24], 从而提升了整个生态系统碳汇功能(表 2). 当大气温度和 CO₂ 浓度同时改变时, 蒙古栎林生态系统都表现为一个较强的碳汇(表 2), 这主要受益于大气温度与 CO₂ 浓度同时升高所表现出很强的正交互作用^[8], 如电子传输速率随温度升高而提高耦合了光合 Rubisco 酶活性随 CO₂ 浓度升高而增加, 直接提高了 GPP 和 NPP^[47]; 两者的交互作用还通过改变植物生长(如细根和凋落物等)和土壤微生物群落结构^[48], 一方面通过增加底物和促进土壤酶活性而提高了 Rh, 另一方面则提高氮素矿化速率和资源可获得性, 间接提高了 GPP 和 NPP. 在大气 CO₂ 浓度升高的情景下, 夜间最低气温的升高对植物光合作用的促进效应不但继续存在而且还得到进一步强化, 其详细机理过程目前还不清楚^[49]. 因此, 气温和大气 CO₂ 浓度升高对生态系统碳吸收的正效应在最低气温升温幅度大于最高气温的升温幅度时得

到加强, 生态系统呈较强碳汇(表 2). 基于此, 本研究认为之前所有基于平均气温的评估研究都可能在一定程度上高估了暖温带落叶阔叶林生态系统对气候变暖的正反馈^[50]. 这就意味着今后的研究需要改变过去仅仅考虑平均气温的模式, 而要分别研究最低气温、最高气温和平均气温在不同环境条件下各自对生态系统的影响, 进而更真实地探索非对称性现实世界中各种生态系统的关键过程与主要功能的变化规律^[7,8,49].

当然, 在本研究中, BIOME-BGC 模型侧重模拟生物地球化学循环过程, 没有像动态植被模型那样考虑群落组成与结构动态^[19,20], 而现实中温带森林生产力和碳收支还会受到群落结构动态^[51]、演替阶段、林业经营措施^[52]等立地干扰因素的影响, 因此模型本身会给研究结果带来一定的不确定性. 另外, 除了气候变化外, 大气氮沉降、大气对流层臭氧浓度等不但能直接影响森林碳循环过程, 而且还与其他气候变化因子产生复杂的交互作用间接影响森林对气候变化的相应模式^[44], 这些在以后的模拟研究中也亟待加强. 与此同时, 国内外关于最低气温升高和最高气温升高对森林生态系统影响的实验研究十分少见^[7,8,49], 这些研究结果没有就最高气温还是最低气温对森林生态系统碳收支起关键作用取得一致, 还不足以对模型模拟的结果进行对比检验. 综上所述, 气温非对称性升高对森林生态系统影响及其与其他环境变化因子的交互作用的重要性还没有得到充分认识, 相关研究还非常稀少. 今后只有以协同方法(coordinated approaches)^[53], 积极地把生态学长期定位观测、多因子综合控制实验和数据-模型融合等方法有机结合起来, 才有可能在全球变化大背景下充分阐明非对称性气候变暖对具有长生命周期森林生态系统结构与固碳功能的影响机理, 为制定合理的林业气候变化适应措施和碳汇管理提供理论支撑.

致谢 中国科学院北京森林生态系统定位研究站建站以来有多位站长和观测员为气象观测做出了贡献, 在此一并致谢. 感谢国家气候中心提供的区域气候变化模拟结果.

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 2007, The Physical Science Basis: Summary for Policy Makers. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996
- 2 Karl T R, Diaz H F, Kukla G. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 74: 1007-1023
- 3 Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. Science, 1997, 277: 364-367

- 4 唐国利, 丁一汇. 由最高最低气温求算的平均气温对我国年平均气温序列影响. 应用气象学报, 2007, 18: 187–192
- 5 Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. Science, 1999, 283: 229–231
- 6 Peng S, Huang J, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101: 9971–9975
- 7 Turnbull M, Murthy R, Griffin K. The relative impacts of daytime and night-time warming on photosynthetic capacity in *Populus deltoides*. Plant Cell Environ, 2002, 25: 1729–1737
- 8 Volder A, Gifford R M, Evans J R. Effects of elevated atmospheric CO₂, cutting frequency, and differential day/night atmospheric warming on root growth and turnover of *Phalaris swards*. Glob Change Biol, 2007, 13: 1040–1052
- 9 Xia J, Han Y, Zhang Z, et al. Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe. Biogeosciences, 2009, 6: 1361–1370
- 10 Dhakhwa G B, Campbell C L. Potential effects of differential day-night warming in global climate change on crop production. Clim Change, 1998, 40: 647–667
- 11 Rosenzweig C, Tubiello F N. Effects of changes in minimum and maximum temperature on wheat yields in the central US: A simulation study. Agr Forest Meteorol, 1996, 80: 215–230
- 12 Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: A comparison of empirical and CERES model predictions in three locations. Agron J, 2007, 99: 469–477
- 13 Luo Y. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. Annu Rev Ecol Evol Syst, 2007, 38: 683–712
- 14 陈灵芝, 黄建辉. 暖温带森林生态系统结构与功能的研究. 北京: 科学出版社, 1997. 296
- 15 刘海丰, 李亮, 桑卫国. 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构. 生物多样性, 2011, 19: 232–242
- 16 桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算. 植物生态学报, 2002, 26: 543–548
- 17 方精云, 刘国华, 朱彪, 等. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 533–543
- 18 Su H X, Sang W G. Simulations and analysis of net primary productivity in *Quercus liaotungensis* forest of Donglingshan Mountain Range in response to different climate change scenarios. Acta Bot Sin, 2004, 46: 1281–1291
- 19 刘瑞刚, 李娜, 苏宏新, 等. 北京山区 3 种暖温带森林生态系统未来碳平衡的模拟与分析. 植物生态学报, 2009, 33: 516–534
- 20 李亮, 苏宏新, 桑卫国. 模拟夏季干旱对东灵山森林植被动态的影响. 植物生态学报, 2011, 35: 147–158
- 21 Yu M, Gao Q. Leaf-traits and growth allometry explain competition and differences in response to climatic change in a temperate forest landscape: A simulation study. Ann Bot, 2011, 108: 885–894
- 22 Thornton P E, Law B E, Gholz H L, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. Agr Forest Meteorol, 2002, 113: 185–222
- 23 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63: 942–956
- 24 Ueyama M, Harazono Y, Kim Y, et al. Response of the carbon cycle in sub-arctic black spruce forests to climate change: Reduction of a carbon sink related to the sensitivity of heterotrophic respiration. Agr Forest Meteorol, 2009, 149: 582–602
- 25 Ueyama M, Ichii K, Hirata R, et al. Simulating carbon and water cycles of larch forests in East Asia by the BIOME-BGC model with AsiaFlux data. Biogeosciences, 2010, 7: 959–977
- 26 Ueyama M, Kai A, Ichii K, et al. The sensitivity of carbon sequestration to harvesting and climate conditions in a temperate cypress forest: Observations and modeling. Ecol Model, 2011, 222: 3216–3225
- 27 Schmid S, Zierl B, Bugmann H. Analyzing the carbon dynamics of central European forests: Comparison of Biome-BGC simulations with measurements. Reg Envir Chang, 2006, 6: 167–180
- 28 马泽清, 刘琪璟, 王辉民, 等. 中亚热带人工湿地松林(*Pinus elliottii*)生产力观测与模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 1005–1015
- 29 Law B E, Turner D, Campbell J, et al. Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. Glob Change Biol, 2004, 10: 1429–1444
- 30 Bond-Lamberty B, Gower S T, Goulden M L, et al. Simulation of boreal black spruce chronosequences: Comparison to field measurements and model evaluation. J Geophys Res-Biogeosci, 2006, 111: G02014
- 31 Luo Z K, Sun O J, Wang E L, et al. Modeling productivity in mangrove forests as impacted by effective soil water availability and its sensitivity to climate change using Biome-BGC. Ecosystems, 2010, 13: 949–965
- 32 Su H X, Sang W G, Wang Y X, et al. Simulating *Picea schrenkiana* forest productivity under climatic changes and atmospheric CO₂ increase in Tianshan Mountains, Xinjiang Autonomous Region, China. Forest Ecol Manag, 2007, 246: 273–284
- 33 范敏锐. 北京山区森林生态系统净初级生产力对气候变化的响应. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2011. 26–46
- 34 Eastaugh C S, Pöetzelsberger E, Hasenauer H. Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC. Tree Physiol, 2011, 31: 262–274

- 35 Tatarinov F A, Cienciala E. Long-term simulation of the effect of climate changes on the growth of main Central-European forest tree species. *Ecol Model*, 2009, 220: 3081–3088
- 36 Boisvenue C, Running S W. Simulations show decreasing carbon stocks and potential for carbon emissions in Rocky Mountain forests over the next century. *Ecol Appl*, 2010, 20: 1302–1319
- 37 Hlasny T, Barcza Z, Fabrika M, et al. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Clim Res*, 2011, 47: 219–236
- 38 Peckham S D, Gower S T. Simulated long-term effects of harvest and biomass residue removal on soil carbon and nitrogen content and productivity for two Upper Great Lakes forest ecosystems. *GCB Bioenergy*, 2011, 3: 135–147
- 39 Thornton P E, Hasenauer H, White M A. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agr Forest Meteorol*, 2000, 104: 255–271
- 40 高学杰, 石英, Giorgi F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 911–922
- 41 Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US), 2000
- 42 Wan S, Xia J, Liu W, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90: 2700–2710
- 43 Beier C, Emmett B A, Penuelas J, et al. Carbon and nitrogen cycles in European ecosystems respond differently to global warming. *Sci Total Environ*, 2008, 407: 692–697
- 44 Matussek R, Wieser G, Calfapietra C, et al. Forests under climate change and air pollution: Gaps in understanding and future directions for research. *Environ Pollut*, 2012, 160: 57–65
- 45 Melillo J M, Borchers J, Chaney J, et al. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Glob Biogeochem Cycle*, 1995, 9: 407–438
- 46 Körner C, Asshoff R, Bignucolo O, et al. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, 2005, 309: 1360–1362
- 47 Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149: 79–90
- 48 Feng R F, Yang W Q, Zhang J, et al. Effects of simulated elevated concentration of atmospheric CO₂ and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27: 4019–4026
- 49 Turnbull M H, Tissue D T, Murthy R, et al. Nocturnal warming increases photosynthesis at elevated CO₂ partial pressure in *Populus deltoides*. *New Phytol*, 2004, 161: 819–826
- 50 Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
- 51 Kardol P, Todd D E, Hanson P J, et al. Long-term successional forest dynamics: Species and community responses to climatic variability. *J Veg Sci*, 2010, 21: 627–642
- 52 Luyssaert S, Inglima I, Jung M, et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Glob Change Biol*, 2007, 13: 2509–2537
- 53 Luo Y, Melillo J, Niu S, et al. Coordinated approaches to quantify long-term ecosystem dynamics in response to global change. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 843–854

Simulating the response of the *Quercus mongolica* forest ecosystem carbon budget to asymmetric warming

SU HongXin & LI GuangQi

State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

It has been found that nighttime minimum temperature has increased more rapidly than daytime maximum temperature at locations around the Northern Hemisphere in recent years. It is therefore important to understand the differential responses of terrestrial ecosystems to asymmetrical vs. symmetrical diurnal warming, and their consequent influences on ecosystem carbon cycling. We used a well-established, process-based ecosystem model (BIOME-BGC) combined with climate change scenarios, to examine effects of asymmetric temperature change on a *Quercus mongolica* forest ecosystem carbon budget in North China. Two mean temperatures increases (3°C and 4°C) are applied to baseline daily climate data (1961–1990). The effects of three different scenarios of temperature change are analyzed (minimum and maximum temperatures raised equally; minima increased two or three times as much as maxima), under both current and elevated CO₂ concentrations. Carbon sequestration was consistently negative under temperature change and current CO₂ concentration, and negative effects of temperature declined when minima were increased more than maxima. Sequestration changed to positive under temperature change and elevated CO₂ concentration, and positive effects of temperature increased when minima were increased more than maxima. Our results indicate that the potential effects of global change on *Quercus mongolica* forest ecosystem productivity (GPP and NPP) may be less severe with equal day-night warming than with asymmetric day-night warming. In this view, we suggest that estimates based only on average temperature change may to some extent overestimate the positive feedback of warm temperate deciduous broad-leaf forest ecosystems to climate warming. However, the model simulation results have not been confirmed by corresponding observation and experiment. Only by giving full consideration to minimum, maximum and average temperatures and their respective ecological effects via coordinated approaches, can we more realistically assess forest ecosystem carbon source/sink functions in the real world.

Dongling Mountain, warm temperate deciduous broad-leaved forest, climate change, BIOME-BGC model

doi: 10.1360/972012-236