

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 2013

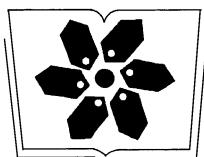
中国生态学学会

中国科学院生态环境研究中心

科学出版社

主办

出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第9期 2013年5月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)

不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响

常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝萍, 罗志军, 等 (2761)
长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 藏润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李 璞,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202130189

李亮,何晓军,胡理乐,李俊生. 1958—2008年太白山太白红杉林碳循环模拟. 生态学报, 2013, 33(9): 2845-2855.

Li L, He X J, Hu L L, Li J S. Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2845-2855.

1958—2008年太白山太白红杉林碳循环模拟

李亮¹, 何晓军², 胡理乐¹, 李俊生^{1,*}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; ; 2. 陕西太白山国家级自然保护区管理局, 眉县 722300)

摘要: 太白红杉(*Larix chinensis*)林主要分布于我国秦岭太白山的林线位置, 对气候变化的响应十分敏感。为了定量分析太白山太白红杉林在气候变化背景下的碳循环特征, 基于模型(MTCLIM)模拟的温度和降水数据, 应用植被动态过程模型(LPJ-GUESS)模拟了太白山南北坡1958—2008年太白红杉林的净初级生产力(NPP)、生物量和净生态系统碳交换量(NEE)。结果表明: 1) 太白红杉和巴山冷杉(*Abies fargesii*)的NPP和生物量在太白红杉林占有优势, 太白红杉的NPP和生物量均大于巴山冷杉。1958—2008年间太白红杉南北坡NPP的平均值为 $0.38 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 巴山冷杉为 $0.25 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 两者之和占整个太白红杉林NPP的86%; 1958—2008年间太白红杉南北坡生物量的平均值为 2.91 kgC/m^2 , 巴山冷杉为 2.02 kgC/m^2 , 两者之和占太白红杉林生物量的94%。2) 太白红杉和巴山冷杉的NPP均表现为北坡大于南坡, 且南北坡均有逐年增加的趋势, 北坡的增幅小于南坡, 所以太白山南北坡太白红杉林的NPP差异有逐年减少的趋势。3) 太白红杉生物量的年际波动较大, 南北坡呈交替上升趋势, 南坡的平均值(2.94 kgC/m^2)大于北坡(2.89 kgC/m^2)。巴山冷杉生物量的年际波动相对较小, 北坡生物量水平大于南坡。4) 1958—2008年南北坡太白红杉林平均NEE均为 $-0.023 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 表现为碳汇。南北坡碳汇水平均呈逐年增加趋势, 南坡的增加幅度($0.91 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)大于北坡($0.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。以气候和 CO_2 为驱动因子对太白山太白红杉林的长期碳循环动态做了定量分析, 从机理上揭示气候变化与生态系统碳循环的关系, 还需要做进一步的野外观测和控制实验研究。

关键词: 生物量; 气候变化; LPJ-GUESS; 净生态系统碳交换量; 净初级生产力

Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China

LI Liang¹, HE Xiaojun², HU Lile¹, LI Junsheng^{1,*}

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Administration Bureau of Shaanxi Taibai Mountain National Nature Reserve, Meixian 722300, China

Abstract: The terrestrial ecosystem carbon cycle, an important component of the global carbon cycle, has significant impacts on the composition of atmospheric greenhouse gases (GHGs) and global climate change. Quantitative analysis, which provides knowledge of the terrestrial ecosystem carbon cycle, is not only a prerequisite for accurately predicting regional and global climate; it also provides a scientific basis from which governments can develop programs in response to global change. The major goal of this study is to quantify the carbon cycle of the *Larix chinensis* forest at Taibai Mountain, Shaanxi, China, which experienced significant climate change during the time period from 1958 to 2008. Process-based models are useful tools for predicting changes to the long-term ecosystem carbon cycle that is influenced by climate change. We quantitatively investigated the carbon cycle of the modeled area by using a process-based model, LPJ-GUESS, using climatic data from the Mountain Microclimate Simulation Model (MTCLIM) and CO_2 concentration data to drive the model.

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201209031); 中国环境科学研究院改革启动经费专项项目(2011GQ-13); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2007KYYW04)

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijsh@caes.org.cn

Net primary productivity (NPP), biomass and net ecosystem carbon exchange (NEE) are the major outputs of the LPJ-GUESS model we used in this study. The NPP and biomass of *L. chinensis* and *Abies fargesii* were large in the *L. chinensis* forest, and both NPP and biomass of *L. chinensis* were larger than *A. fargesii*. The average NPP of *L. chinensis* and *A. fargesii* during 1958 and 2008 were $0.38 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.25 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The sum of the two species' NPP accounted for 86% of the biomass in *L. chinensis* forest. The average biomass of *L. chinensis* and *A. fargesii* during 1958 and 2008 were 2.91 kgC/m^2 and 2.02 kgC/m^2 , respectively. The sum of the two species' biomass was 94 percent of the NPP in *L. chinensis* forest. *A. fargesii* occupied the lower slope of the *L. chinensis* forest because of its altitudinal limitation, and the upper elevation forest was pure *L. chinensis* forest. Both *L. chinensis* and *A. fargesii* had larger NPP on the northern slope of Taibai Mountain than on the southern slope. Both slopes experienced increasing NPP of the two species over time, and the increase of the northern slope was smaller than the southern slope, so the difference of the *L. chinensis* forest's NPP between the northern and southern slope was decreasing over the 51-year study period. Biomass of *L. chinensis* experienced inter-annual fluctuations during the 1958—2008 study period and increased alternatively between the northern and southern slope. The mean biomass on the southern slope between 1958 and 2008 (2.94 kgC/m^2) was greater than the northern slope (2.89 kgC/m^2). Biomass of *A. fargesii*, which always occupied a larger part on the northern slope during the 51-year study period, had fewer inter-annual fluctuations compared with *L. chinensis*. The modeled value of NEE, whose average was $-0.023 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, showed that *L. chinensis* forest has been a carbon sink over the 51 years studied. There was no significant difference in average NEE between the northern and southern slope. Both slopes showed increasing carbon sink functioning, with an annual increase of $0.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ on the southern slope and $0.42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ on the northern slope. This long-term simulation of the *L. chinensis* forest driven by climatic data and CO_2 concentration was only a preliminary quantitative study of the carbon cycle dynamics. Additional field observations and manipulative experiments are needed to reveal the relationships between climate change and the ecosystem carbon cycle.

Key Words: biomass; climate change; LPJ-GUESS; NEE; NPP

陆地生态系统碳循环是全球碳循环系统的重要组成部分,对大气中的温室气体(CO_2 , CH_4 , NO_x)组成以及全球气候变化有着重要的影响^[1]。定量分析陆地生态系统碳循环过程是准确预测区域及全球气候的前提条件^[2],同时也为各国政府制定全球变化应对方案提供了科学依据。

过程模型是定量评估陆地生态系统碳循环长期变化的有效手段之一。鉴于过程模型在研究气候变化与生态系统动态方面的优势^[3],以及人们对自然生态系统过程及其控制机制的认识不断深入,生态系统过程模型在碳循环以及气候变化领域得到了广泛的应用^[4-7]。目前在全球应用较多的过程模型主要有(LPJ)^[8]、(HYL)^[9]、(IBIS)^[10]、(SDGVM)^[11]、(TRIFFID)^[12],虽然对某些生态系统过程的模拟采用了不同方程,但是这些模型都以气候和 CO_2 浓度为驱动因子,并且都包括了基本的植被生理过程、生物物理过程以及植被动态过程^[13]。模型比较研究表明,以上过程模型在全球尺度上的模拟结果基本一致^[13-14]。为了降低大尺度过程模型的计算量,提高模拟效率,许多过程模型的空间分辨率较低,因而限制了其在较小区域尺度的应用。Smith等^[15]将小尺度上来源于林窗模型^[16]的,反映个体资源竞争的植被动态过程整合到LPJ模型中,开发了(LPJ-GUESS)模型,使过程模型在小尺度上的应用成为可能^[17-18]。刘瑞刚等^[19]利用(LPJ-GUESS)模型成功模拟了我国北京东灵山暖温带落叶阔叶林的碳平衡。

太白红杉(*Larix chinensis*)林主要分布于我国秦岭太白山的林线位置,对气候变化的响应十分敏感^[20],研究林线生态系统的碳循环有助于人们进一步了解气候变化与生态系统功能之间的关系。已有研究表明秦岭地区近51年的气候变化明显,且南北坡气候有较大差异^[21-23]。而在这种气候变化的背景下,目前对太白红杉林的碳循环研究较少,只涉及太白红杉林及其土壤的碳储量和碳密度^[24-25],尚没有研究探讨过去近51年太白红杉林碳循环的长期动态。本研究利用LPJ-GUESS模型对太白山太白红杉林近51年的碳循环进行了

定量模拟,并进行了南北坡差异分析,为探讨研究区的气候变化与碳循环的关系以及预测未来碳循环变化提供了一定的参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

太白山($107^{\circ}41'$ — $107^{\circ}52'$ N, $33^{\circ}49'$ — $34^{\circ}08'$ E)系秦岭主峰,海拔3767 m,是我国中东部地区的最高峰。太白山上下高差达3000 m,气候和植被类型的垂直分异明显,在海拔3000—3500 m有太白红杉林分布。分布区域内的年降水量为北坡709—1542 mm,南坡795—1314 mm;年均温为北坡1.4—4.2 °C,南坡3.7—8.2 °C;土壤形成以淋溶过程为主,并且受冷湿气候影响,土壤类型主要为山地暗棕壤。研究区分布的乔木树种除太白红杉外,还有巴山冷杉(*Abies fargesii*)和少量的牛皮桦(*Betula albo-sinensis* var. *septentrionalis*),太白红杉林在其分布上限多呈纯林,分布下限与巴山冷杉混交;灌木主要为太白杜鹃(*Rhododendron purdomii*)、头花杜鹃(*R. capitatum*)和金背杜鹃(*R. clementinae*)等。

1.2 LPJ-GUESS 模型简介

LPJ-GUESS 模型属于陆地生态系统过程模型。模拟过程包括植物生理过程(光合,呼吸等),生物物理过程(能量交换)以及生物地球化学过程(H_2O , CO_2 循环)^[8, 15, 26]。LPJ-GUESS 模型通过模拟各组成物种的更新、生长和死亡过程反映植被动态,这些过程主要受模拟区域当前的环境状况、物种组成以及物种的生活史特征的影响^[7]。LPJ-GUESS 模型适合于多尺度的生态系统动态模拟,已经在全球得到广泛的应用。Smith 等^[15]和 Hickler 等^[17]分别应用 LPJ-GUESS 模型成功模拟了欧洲和美国东北的植被动态。Tagesson 等^[18]利用 LPJ-GUESS 模型结合遥感数据模拟了瑞典森林的净初级生产力(NPP)。LPJ-GUESS 也被用于模拟中国陆地生态系统及北京山区森林的碳循环^[6, 19]。

LPJ-GUESS 模型的输入数据包括月均温、月降水量、月平均辐射、 CO_2 浓度以及土壤类型代码。输出数据包括植被的 NPP、生物量、叶面积指数(LAI)、土壤碳储量、蒸散、径流以及土壤含水量等。

1.3 数据获取

1.3.1 温度和降水数据

LPJ-GUESS 模型模拟时间为1958—2008年,输入数据中的月平均温度和月降水量数据来自山地小气候模拟模型(MTCLIM)模型。MTCLIM 模型可以根据某一点(基站)观察得到的气候要素值经过海拔、坡度和方位的订正,计算出研究点的气候要素^[27]。MTCLIM 模型基于 Running 等^[28]提出的气候要素空间递推的基本思想,在应用于生态模拟时有较好的拟合效果。经过一系列的改进^[29-31],MTCLIM 模型已经在生态水文模拟、造林、林火研究以及病虫害预测等方面有了广泛的应用^[32-34]。MTCLIM 模型模拟得到的气候要素包括温度、降水和潜在蒸散发等,本研究需要从 MTCLIM 模型得到太白山南北坡太白红杉林分布上下限气温和降水的月值数据。

获取本底数据的基站属于国家气象局的气象站,其地理位置分别是北坡的武功($34^{\circ}15'$ N, $108^{\circ}13'$ E),海拔448 m,南坡的佛坪($33^{\circ}31'$ N, $107^{\circ}59'$ E),海拔827 m。研究位点主要参数值见表1,基站数据的时间范围是1958—2008年,得到太白山南北坡太白红杉林上下限温度与降水的月值数据,作为 LPJ-GUESS 模型输入数据的一部分。1958—2008年太白山太白红杉林南北坡的年均温和年降水量的动态变化见图1。

1.3.2 其他数据

CO_2 浓度年值数据来自美国地球系统研究实验室,时间段为1658—2008年;南坡太阳辐射为佛坪气象站的数据,北坡太阳辐射为武功气象站的数据,时间段为1958—2008年;土壤类型代码根据模拟点的地理坐标从模型自带的文件中提取。由于本研究以碳循环为研究内容,为了减少模型源程序的修改,提高模型运行效率,模型输出数据包括NPP,生物量,NEE 和 LAI。

1.4 参数率定

太白山南北坡太白红杉林的垂直分布范围是3000—3500 m,在这个林带分布的其他乔木树种还有巴山

冷杉(垂直分布范围 2600—3300 m)和牛皮桦(垂直分布范围 1800—3100 m)^[35],林下有灌木和草本。LPJ-GUESS 可以在物种和植物功能型(PFT)两个水平上进行模拟。因为没有物种特性参数的实测数据,在确定了研究区的物种组成后,将物种划分到不同的植物功能型^[7],以植物功能型参数代表物种参数进行模拟,物种主要参数值见表 2。

表 1 MTCLIM 模型模拟太白红杉林 4 个位点的温度与降水的参数值

Table 1 Parameter values of MTCLIM for temperature and precipitation modeling of four sites in *L. chinensis* forest

参数 Parameters	北坡上限 North_up	北坡下限 North_low	南坡上限 South_up	南坡下限 South_low
海拔 Elevation/m	3450	3100	3500	3200
坡度 Slope/(°)	30	30	20	9.2
坡向 Aspect/(°)	310	70	130	200
等雨量线 Isohyet/cm	102.7	94	103	98
最高温递减率 Maximum temperature lapse rate/(°C/km)	-4.9	-4.9	-4.1	-4.1
最低温递减率 Minimum temperature lapse rate/(°C/km)	-5.1	-5.1	-3.9	-3.9

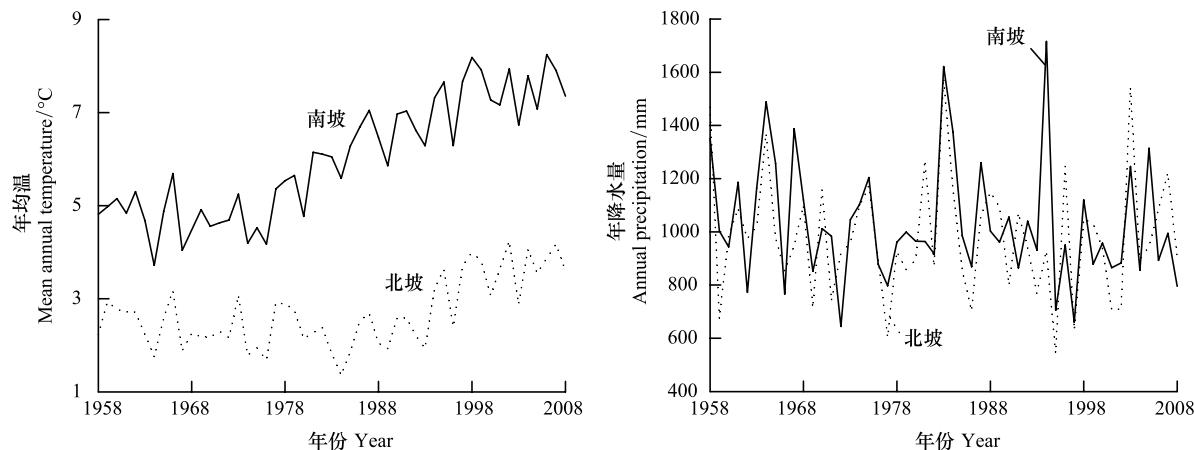


图 1 南北坡太白红杉林的年均温和年降水量

Fig.1 Mean annual temperature and annual precipitation of the *L. chinensis* forest on the southern and northern slope

表 2 LPJ-GUESS 模型中植物物种的主要参数值

Table 2 Parameter values of the major plant species in LPJ-GUESS Model

特征 Trait	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	灌木 Shrub	草本 Grass
植物功能型 Pant functional type	NS	NE	IBS	TBS	GR
植物更新最低温度 Minimum temperature for establish/°C	—	—	—	-18	—
植物更新最高温度 Maximum temperature for establish/°C	2	2	—	6	—
光合作用最低温度 Minimum temperature for photosynthesis/°C	10	10	10	15	10
光合作用最高温度 Maximum temperature for photosynthesis/°C	25	25	25	25	30
植物更新 5 度最小积温 Minimum growing degree day sum on 5 degree for establish	900	600	150	830	0
光合作用 5 度最小积温 Minimum growing degree day sum on 5 degree for photosynthesis	0	0	200	150	50
寿命 Longevity /a	900	900	300	100	—
耐荫性 Shade tolerance	不耐荫	耐荫	不耐荫	耐荫	不耐荫

NS: 落叶针叶乔木; NE: 常绿针叶乔木; IBS: 不耐荫落叶阔叶乔木; TBS: 耐荫落叶阔叶灌木; GR: 杂草或禾草

1.5 运行方案

LPJ-GUESS 模型的运行分为两个时间段,第 1 个时间段是 1658—1957 年,运行 300a,目的是使模拟地区的植被和土壤碳库分别达到稳定状态^[15]。第 2 个时间段是 1958—2008 年。由于第 1 个阶段缺少对应年份的部分输入数据,将 1958—1987 年的月平均温度、月降水量和太阳辐射数据循环使用,这样既可以使模型达到平衡,也保证了模拟过程中干扰事件的发生,这种方法也是 LPJ-GUESS 模型运行的通用方法^[15,36]。

1.6 模型验证

LPJ-GUESS 模型的适用性广,已经进行了大量结果的验证^[17-19, 37]。由于 LPJ-GUESS 模型是第 1 次在秦岭地区应用,所以用相关资料对模拟结果进行了验证。通过将 NPP 和生物量与之前研究进行比较(表 3),发现太白红杉、巴山冷杉、草本以及总体的模拟值与之前的研究结果基本一致,虽然牛皮桦的模拟结果明显小于之前的研究结果,但从野外监测经验来看,这一模拟结果还是比较可靠的。尽管太白红杉林分布海拔范围内有牛皮桦分布,但是太白山红杉林的分布下限(3000 m)已经接近牛皮桦的分布上限了(3100 m),所以即便这一区域有牛皮桦的分布,其数量也非常稀少,生长状况也很差。另一方面,之前研究的牛皮桦的净初级生产力和生物量是整个牛皮桦林的值,而模拟值相当于牛皮桦林的上限值。

另外,将 2000—2008 年 LAI 月值的模拟结果与同时期 MODIS 1 km 分辨率的 LAI 8 天合成 L4 级产品进行了比较(图 2)。从图 2 可以看出,模拟结果主要集中在 2 和 5 两个值上,连续性较差,且在 2 附近的值小于反演结果,在 5 附近的值大于反演结果。但总体来说,LAI 的模拟结果还比较合理。

从以上验证结果来看,LPJ-GUESS 模型可以较好的模拟太白山地区的植被特征,适用于太白红杉林碳循环的南北差异分析。

表 3 NPP 与生物量的模拟值与其他研究的比较

Table 3 Comparison of modeled NPP and biomass with other studies

物种 Species	净初级生产力 $NPP / (\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	生物量 $\text{Biomass} / (\text{kgC}/\text{m}^2)$	来源 Source
太白红杉 NS <i>L. chinensis</i> needle-leaved summergreen tree	0.43 ± 0.01 0.45 ± 0.10 — 0.60 ± 0.20	2.91 ± 0.15 6.88 ± 0.13 8.33 —	模拟值 [39] [40] [41]
巴山冷杉 NE <i>A. fargesii</i> needled-leaved evergreen tree	0.24 ± 0.01 0.45 ± 0.10 0.40 ± 0.15	2.02 ± 0.10 6.88 ± 0.13 —	模拟值 [39] [41]
牛皮桦 IBS <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i> shade-intolerant broad-leaved summergreen tree	0.06 ± 0.003 — — 0.60 ± 0.25	0.21 ± 0.01 4.5 1.88 —	模拟值 [39] [40] [41]
草本 GR Herb or grass	0.02 ± 0.004 —	0.04 ± 0.004 0.07	模拟值 [40]
总体 Total	0.78 ± 0.02 — — 1.25 ± 0.25 0.90 ± 0.10 0.60 ± 0.20	5.27 ± 0.20 10.25 7.65 ± 4.15 — — —	模拟值 [40] [25] [42] [43] [41]

2 结果

2.1 净初级生产力

由表 4 来看,太白红杉的 NPP 在南北坡上限有绝对的优势,但是在下限则显著低于巴山冷杉($P < 0.05$),由于太白红杉林的分布上限无巴山冷杉分布,所以南北坡上限巴山冷杉的 NPP 为 0。太白红杉和巴山冷杉构成了太白红杉林 NPP 的主要组成部分(86%),牛皮桦、灌木和草本的 NPP 所占比例较小,且随时间变化的趋势

势不明显。无论是南坡还是北坡,太白红杉的NPP都显著大于巴山冷杉($P<0.05$)。太白红杉和巴山冷杉在南坡的NPP都显著小于北坡($P<0.05$)(图3)。

1958—2008年,太白红杉南、北坡NPP分别为 $0.32 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,期间都表现出升高的趋势,其中南坡的升高幅度为 $0.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,北坡为 $0.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,但是北坡的NPP随时间波动较大,且具有一定的周期性(大约为20a)。巴山冷杉南、北坡NPP的平均值分别为 $0.23 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.26 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,同样表现出随时间升高的趋势,南北坡升高幅度与太白红杉相等,分别为 $0.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。太白红杉和巴山冷杉的NPP在南坡的升高幅度大于北坡,同时南坡的NPP小于北坡,说明近51年太白红杉林的NPP在太白山南北坡差异有逐年减少的趋势。

2.2 生物量

在生物量方面,太白红杉和巴山冷杉同样是太白红杉林的主要组成部分(94%),牛皮桦、灌木和草本生物量之和所占比例只有6%,且随时间变化不明显(表4)。太白红杉生物量大于巴山冷杉,巴山冷杉北坡生物量大于南坡(图3)。而太白红杉随时间的波动较大,北坡的生物量并不是一直高于南坡,比较近51a平均值,南坡太白红杉生物量(2.94 kgC/m^2)大于北坡(2.89 kgC/m^2),但南北坡差异不显著($P>0.05$)。

表4 1958年和2008年NPP和生物量的模拟值

Table 4 Modeled values of NPP and biomass in 1958 and 2008

位点 Site	年 Year	物种 Species	净初级生产力 NPP / ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	生物量 Biomass / (kgC/m^2)
北坡上限 North_up	1958	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.64	4.53
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.00	0.00
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.00	0.00
		灌木 Shrub	0.00	0.00
		草本 Grass	0.02	0.04
	2008	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.75	5.20
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.00	0.00
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.00	0.00
		灌木 Shrub	0.00	0.00
		草本 Grass	0.02	0.04
北坡下限 North_low	1958	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.21	1.23
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.49	4.46
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.06	0.16
		灌木 Shrub	0.02	0.09
		草本 Grass	0.02	0.04
	2008	太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.21	1.17
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.55	4.83
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.06	0.18
		灌木 Shrub	0.02	0.09

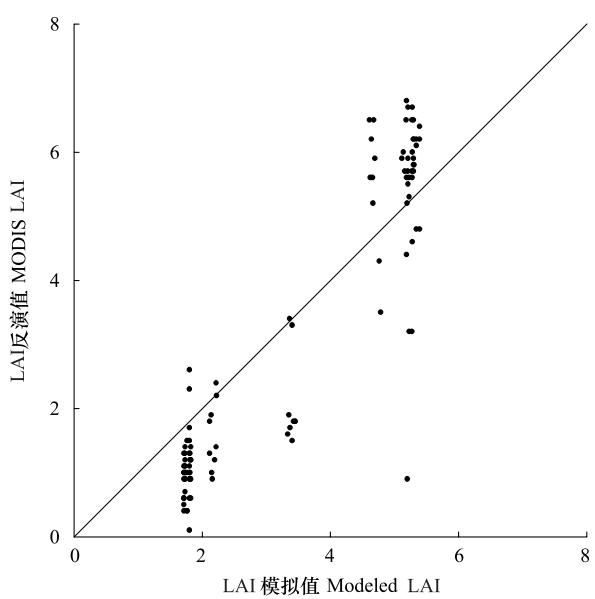


图2 2000—2008年LAI模拟月值与反演值比较

Fig. 2 Comparison of modeled month LAI with observed data during 2000 and 2008

续表

位点 Site	年 Year	物种 Species	净初级生产力 NPP / (kgC·m ⁻² ·a ⁻¹)	生物量 Biomass / (kgC/m ²)
南坡上限 South_up	1958	草本 Grass	0.02	0.04
		太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.63	4.24
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.00	0.00
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.00	0.00
		灌木 Shrub	0.03	0.17
	2008	草本 Grass	0.04	0.05
		太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.67	4.75
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.00	0.00
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.00	0.00
		灌木 Shrub	0.03	0.17
南坡下限 South_low	1958	草本 Grass	0.01	0.03
		太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.19	1.16
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.43	3.48
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.06	0.17
		灌木 Shrub	0.03	0.10
	2008	草本 Grass	0.03	0.04
		太白红杉 <i>L. chinensis</i>	0.21	1.09
		巴山冷杉 <i>A. fargesii</i>	0.51	4.16
		牛皮桦 <i>B. albo-sinensis</i> var. <i>septentrionalis</i>	0.08	0.26
		灌木 Shrub	0.03	0.12
		草本 Grass	0.02	0.02

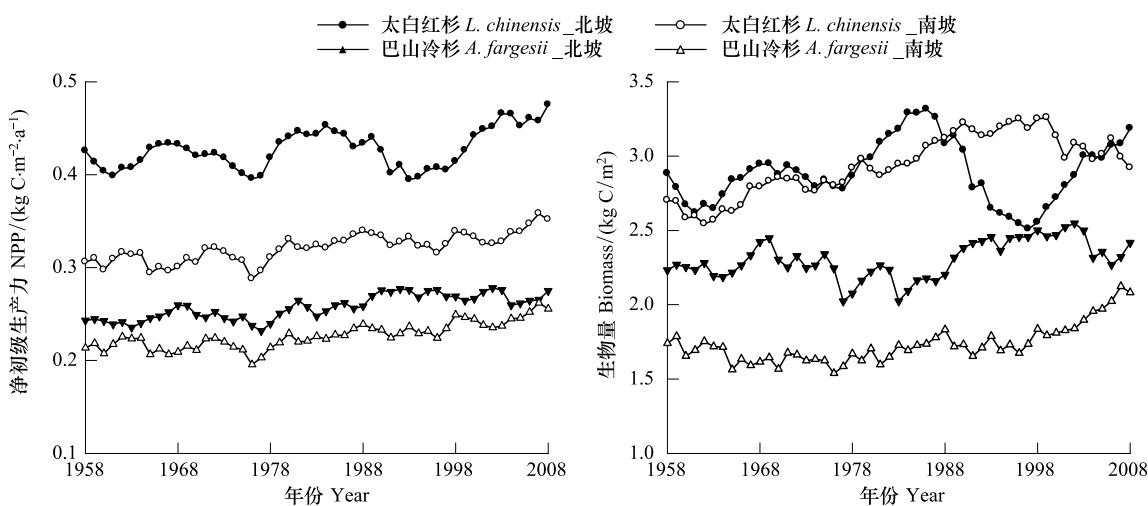


图3 1958—2008年太白红杉和巴山冷杉 NPP 和生物量的南北坡比较

Fig. 3 Comparison of NPP and biomass of *L. chinensis* and *A. fargesii* on the southern and northern slope during 1958 and 2008

1958—2008年,太白红杉和巴山冷杉的生物量在南北坡均有上升的趋势(图3)。北坡太白红杉的生物量波动较大,波动周期与NPP一致,20世纪90年代末出现最小值(2.55 kgC/m^2)。北坡巴山冷杉的生物量有先降后升的趋势,但是幅度均不明显。相对北坡,太白红杉和巴山冷杉在南坡的生物量波动较小,其中太白红杉的生物量随时间升高的幅度逐年减少,甚至从本世纪初开始有下降的趋势;而巴山冷杉生物量在南坡的升高幅度则逐年增加。

2.3 净生态系统碳交换

在 LPJ-GUESS 模型的模拟环境中, NEE 为正值表示生态系统为碳源, NEE 为负值表示生态系统为碳汇。由图 4 可见, 太白红杉林从 1958—2008 年期间总体表现为碳汇, 南北坡的 NEE 随时间有较大的年际波动, 碳汇水平平均呈现增加的趋势, 其中南坡以 $0.91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的幅度增加, 北坡以 $0.42 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的幅度增加。近 51 年南北坡 NEE 的平均值相等, 均为 $-0.023 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 南北坡差异没有达到显著水平($P > 0.05$)。

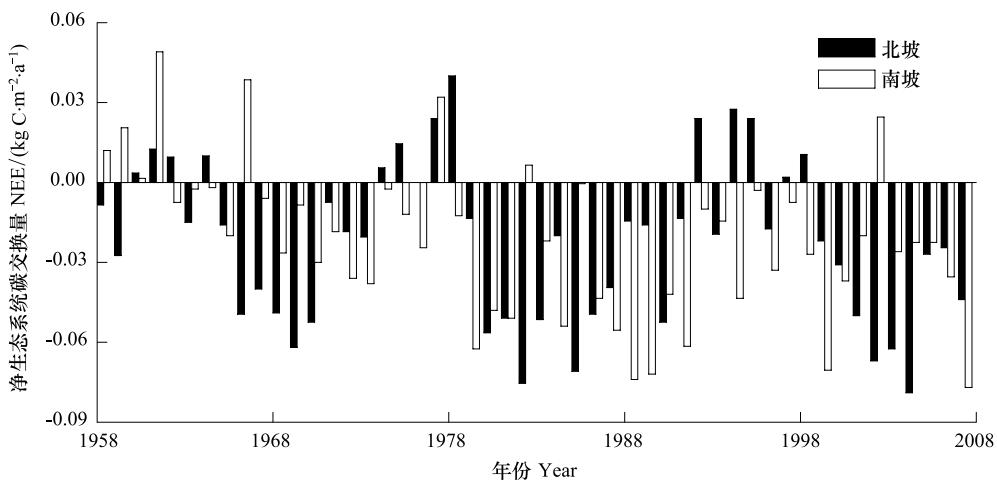


图 4 1958—2008 年太白红杉林南北坡 NEE
Fig. 4 NEE of *L. chinensis* forest on the southern and northern slope during 1958 and 2008

3 讨论

LPJ-GUESS 模型一般应用在全球或者区域尺度上^[7, 14], 本研究首次尝试对一个山体的垂直植被带进行碳循环模拟, 并进行了南北坡的比较。LPJ-GUESS 模型是由气候和 CO₂ 数据驱动, 山地小气候模型(MTCLIM 模型)提供了 LPJ-GUESS 模型所需要的气候数据, 为本次碳循环模拟研究提供了条件。很多研究地区地理位置特殊并且气象站点分布少, 难以获得温度、降水量的直接观测数据, 以往利用 LPJ-GUESS 进行的模拟研究只是将研究区附近气象台站的数据做简单的线性插值, 得到的数据有很大的不确定性^[19, 44]。本研究中 MTCLIM 模型的应用大大提高 LPJ-GUESS 模型输入数据的准确性。由于 LPJ-GUESS 模型的不确定性主要来自于模型模拟过程的随机性、参数标定的不确定性以及模型输入数据的误差^[45], 本研究通过提高气候数据的质量一定程度上减少了模拟结果的不确定性。

太白红杉林的物种组成相对简单, 分布上限由太白红杉构成纯林, 林下层有灌木和草本, 分布下限还与巴山冷杉和牛皮桦混交。模拟结果表明太白红杉林的物种组成与野外观测研究一致, 太白红杉的 NPP 和生物量在上限占有绝对的优势, 而在下限巴山冷杉比较占优势(表 4), 说明当前认为的太白红杉林的下限并非其自然界限。太白山此地带的大面积流石和人工砍伐是造成这种现象的主要原因^[46]。由于太白红杉幼苗喜阳而巴山冷杉幼苗喜阴, 所以太白红杉就成为流石上的先居者, 造成太白红杉林顺着流石下延。同样的原因, 巴山冷杉林被砍伐或发生火灾后首先被太白红杉定居, 当这些干扰达到一定的频率时, 巴山冷杉林就会被太白红杉林替代。由于模拟结果没有考虑这两个因素, 模拟结果反映的是只是气候限制的植被生长, 所以才出现当前太白红杉林下限的巴山冷杉在净初级生产和生物量方面占有优势。

太白山北坡太白红杉林 NPP 和生物量大于南坡的特征与实际观测结果和相关研究结论一致^[24]。尽管太白红杉和巴山冷杉在北坡湿冷的环境中的生长好于南坡, 但 NPP 均随着温度的升高而增加, 说明过去近 51 年太白山南北坡温度的升高有利于太白红杉林的生长。南坡气温的上升幅度大于北坡, 其 NPP 的增长速度也大于北坡, 所以 NPP 南北差异随着时间减少的趋势与南北坡的温度变化表现出一定的一致性。太白红杉林的 NPP 和生物量随温度升高而增加的趋势与温度较低的北坡有较高的 NPP 以及生物量的结果说明, 温度不是影响太白山南北坡太白红杉林 NPP 和生物量的决定因素。相对于南坡来说, 北坡的温度低, 降水量与南

坡又没有显著差异(图1),土壤水分蒸发量则相对较少,所以土壤湿度有可能是北坡太白红杉林NPP和生物量大于南坡的原因之一,当然这还需要进一步的实地观测与验证。NPP可以反映太白红杉林的生长状况,由于LPJ-GUESS模型还考虑了除生长以外的其他植被动态过程(更新和死亡)^[15],新个体的加入以及由干扰和自然寿命造成的个体死亡造成了生物量有较大的年际波动以及周期性变化。

在LPJ-GUESS模型中,NEE等于植被通量与土壤呼吸(R_s , Respiration of soil)之和,其中植被通量在数值上等于NPP^[15]。植被通量为负值,代表通量的方向是从大气到生态系统; R_s 为正值,代表通量的方向是从生态系统到大气。生态系统表现为碳汇还是碳源取决于NPP和 R_s 的比例关系。模拟结果显示太白红杉林表现为碳汇,说明太白红杉林从大气吸收的碳大于土壤释放到大气中的碳,并且碳汇有增加的趋势。但是,目前对土壤呼吸过程与气候变化关系的认识尚不够深入^[47],上面提到模拟结果不确定性的来源之一是模拟过程的不确定性,所以随着气候的变化,太白红杉林碳平衡变化趋势模拟的精确性仍有待提高。

太白红杉林碳循环的模拟结果以该林带的气候为驱动力之一,其长期动态与对应年份的气候之间必然有密切的关系。全球已经开展了大量的控制实验试图揭示环境因子与碳循环的定量关系,Lin等^[48]通过Meta分析的方法研究了控制实验中反映的全球变暖与陆地生物量之间的关系,表明全球变暖使全球木本植物生物量提高了26.7%,草本提高了5.2%。Weltzin等^[49]利用11个美国长期生态系统研究站的数据得到了平均年降水量与NPP之间的显著线性相关关系。本研究模拟的NPP、生物量和NEE等生态系统碳循环指标的长期动态与温度和降水等气候因子之间并没有显著的相关关系。一方面是因为控制实验研究的环境因子和考虑的过程相对单一,而LPJ-GUESS模型还考虑了影响生态系统碳循环的关键过程(如个体竞争、物候、群落演替等)^[15],无法用某一个因子的变化对整个生态系统的碳循环进行解释;另一方面,模型模拟目前还存在许多不可避免的不确定性。研究揭示了近51年太白红杉林南北坡碳循环的动态特征,但是要从机理上解释太白红杉林碳循环的变化规律及其南北坡差异的根本原因,尚需要在本地区开展更深入的野外调查与控制实验研究。

致谢:感谢Mats Lindeskog博士提供LPJ-GUESS模型的程序代码。

References:

- [1] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [2] Jones C D, Hughes J K, Bellouin N, Hardiman S C, Jones G S, Knight J, Liddicoat S, O'Connor F M, Andres R J, Bell C, Boo K O, Bozzo A, Butchart N, Cadule P, Corbin K D, Boucher M D, Friedlingstein P, Gornall J, Gray L, Halloran P R, Hurtt G, Ingram W J, Lamarque J F, Law R M, Meinshausen M, Osprey S, Palin E J, Chini L P, Raddatz T, Sanderson M G, Sellar A A, Schurer A, Valdes P, Wood N, Woodward S, Yoshioka M, Zerroukat M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3): 543-570.
- [3] Morales P, Sykes M T, Prentice I C, Smith P, Smith B, Bugmann H, Zierl B, Friedlingstein P, Viovy N, Sabaté S, Sánchez A, Pla E, Gracia C A, Sitch S, Arneth A, Ogee J. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. *Global Change Biology*, 2005, 11(12): 2211-2233.
- [4] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [5] Bonan G B, Levis S, Sitch S, Vertenstein M, Oleson K W. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*, 2003, 9(11): 1543-1566.
- [6] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1014.
- [7] Smith B, Samuelsson P, Wråmneby A, Rummukainen M. A model of the coupled dynamics of climate, vegetation and terrestrial ecosystem biogeochemistry for regional applications. *Tellus A*, 2011, 63(1): 87-106.
- [8] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.

- [9] Levy P E, Cannell M G R, Friend A D. Modelling the impact of future changes in climate, CO₂ concentration and land use on natural ecosystems and the terrestrial carbon sink. *Global Environment Change*, 2004, 14(1) : 21-30.
- [10] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4) : 603-628.
- [11] Woodward F I, Lomas M R. Vegetation dynamics-simulating responses to climatic change. *Biological Reviews*, 2004, 79(3) : 643-670.
- [12] Cox P M. Description of the "TRIFFID" Dynamic Global Vegetation Model. Hadley: Hadley Centre Technical Note, 2001.
- [13] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, Prentice I C, Betts R A, Brovkin V, Cox P, Fisher V, Foley J A, Friend D D, Kucharik C, Lomas M R, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A, Molling C Y. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7(4) : 357-373.
- [14] Sitch S, Huntingford C, Gedney N, Levy P E, Lomas M, Piao S L, Betts R, Ciais P, Cox P, Friedlingstein P, Jones C D, Prentice I C, Woodward F I. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology*, 2008, 14(9) : 2015-2039.
- [15] Smith B, Prentice I C, Sykes M T. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(6) : 621-637.
- [16] Prentice I C, Sykes M T, Cramer W. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecological Modelling*, 1993, 65(1/2) : 51-70.
- [17] Hickler T, Smith B, Sykes M T, Davis M B, Sugita S, Walker K. Using a generalized vegetation model to simulate vegetation dynamics in northeastern USA. *Ecology*, 2004, 85(2) : 519-530.
- [18] Tagesson T, Smith B, Löfgren A, Rammig A, Eklundh L, Lindroth A. Estimating net primary production of Swedish forest landscapes by combining mechanistic modeling and remote sensing. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2009, 38(6) : 316-324.
- [19] Liu R G, Li N, Su H X, Sang W G. Simulation and analysis on future carbon balance of three deciduous forests in Beijing mountain area, warm temperate zone of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3) : 516-534.
- [20] Grace J, Berninger F, Nagy L. Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 2002, 90(4) : 537-544.
- [21] Bai J, Yan J P, Su K H. Differential analysis of abrupt climate change between southern and northern Qinling Mountains in the past 50 years. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 38(6) : 98-105.
- [22] Song D X, Yan J P, Ma L. Study on climatic differentiation in the south and north Qinling mountains in recent 50 years. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3) : 492-498.
- [23] Zhou Q, Bian J J, Zheng J Y. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling mountains from 1951 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9) : 1211-1218.
- [24] Lin W, Hu L L, Zheng B F, Li J S. Carbon storage estimation of timberline tree *Larix chinensis*. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12) : 1470-1474.
- [25] Guo J M, Hu L L, Lin W, Zheng B F, Li J S. Soil organic carbon density of *Larix chinensis* forest beissn in Mt. Taibai in Qinling. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12) : 1464-1469.
- [26] Gerten D, Schaphoff S, Haberlandt U, Lucht W, Sitch S. Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1/4) : 249-270.
- [27] Li H T, Shen W Q, Sang W G, Li J Y. Research situation and application of MTCLIM model (Mountain Microclimate Simulation Model). *Journal of Mountain Research*, 2001, 19(6) : 533-540.
- [28] Running S W, Hungerford R D. Spatial extrapolation of meteorological data in for ecosystem modeling applications // Boston M A. *Proceedings of 16th Conference on Agriculture and Forest Meteorology*. New York: American Meteorology Society, 1983 : 192-195.
- [29] Kimball J S, Running S W, Nemani R R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85(1/2) : 87-98.
- [30] Thornton P E, Running S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(4) : 211-228.
- [31] 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(4) : 255-271.
- [32] Pan J F, Guo Q X, Wang H R. Application of mountain microclimate simulation model to climate simulation to maoershan region. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(5) : 51-54.
- [33] Lo Y H, Blanco J A, Seely B, Welham C, Kimmins J P. Generating reliable meteorological data in mountainous areas with scarce presence of weather records: The performance of MTCLIM in interior British Columbia, Canada. *Environmental Modelling and Software*, 2011, 26 (5) :

644-657.

- [34] Tatarinov F A, Cienciala E, Vopenka P, Avilov V. Effect of climate change and nitrogen deposition on central-European forests: Regional-scale simulation for South Bohemia. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(10): 1919-1927.
- [35] Fang Z, Gao S Z. The vertical vegetation spectrum in south and north slope of the Taibai Mountain, Qinling. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1963, 1(1/2): 162-163.
- [36] Hickler T, Fronzek S, Araújo M B, Schweiger O, Thuiller W, Sykes M T. An ecosystem model-based estimate of changes in water availability differs from water proxies that are commonly used in species distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(3): 304-313.
- [37] Wolf A, Callaghan T V, Larson K. Future changes in vegetation and ecosystem function of the Barents Region. *Climatic Change*, 2008, 87(1/2): 51-73.
- [38] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.
- [39] Fu Z J. Study on synecological features and biomass of *Larix chinensis* forest in Taibai Mountain. *Journal of Hanzhong Teachers College: Natural Science*, 1994, (2): 69-72.
- [40] Zhou C P, Ouyang H, Song M H. Relationships between net primary production and nitrogen cycling in Chinese forest ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 203-206.
- [41] Chen B, Wang S Q, Liu R G, Song T. Study on modeling and spatial pattern of net primary production in China's terrestrial ecosystem. *Resources Science*, 2007, 29(6): 45-53.
- [42] Lu L, Li X, Veroustraete F. Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [43] Li L, Su H X, Sang W G. Simulating impacts of summer drought on forest dynamics in Dongling Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(2): 147-158.
- [44] Wrammeby A, Smith B, Zaehle S, Sykes M T. Parameter uncertainties in the modelling of vegetation dynamics-effects on tree community structure and ecosystem functioning in European forest biomes. *Ecological Modelling*, 2008, 216(3/4): 277-290.
- [45] Zhu Z C. Characteristics and distribution of main types of forest in Taibai Mountain, Qinling. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 1981, (5): 29-39. [46] Smith P, Fang C M. Carbon cycle: A warm response by soils. *Nature*, 2010, 464(7288): 499-500.
- [47] Lin D L, Xia J Y, Wan S Q. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2010, 188(1): 187-198.
- [48] Weltzin J F, Loik M E, Schwinnig S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw M R, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.

参考文献:

- [19] 刘瑞刚, 李娜, 苏宏新, 桑卫国. 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(3): 516-534.
- [21] 白晶, 延军平, 苏坤慧. 1958—2007年秦岭南北气候变化的差异性分析. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(6): 98-105.
- [22] 宋佃星, 延军平, 马莉. 近50年来秦岭南北气候分异研究. *干旱区研究*, 2011, 28(3): 492-498.
- [23] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北1951—2009年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [24] 林伟, 胡理乐, 郑博福, 李俊生. 林线树种太白红杉碳储量估算. *环境科学研究*, 2010, 23(12): 1470-1474.
- [25] 郭建明, 胡理乐, 林伟, 郑博福, 李俊生. 秦岭太白红杉林土壤有机碳密度研究. *环境科学研究*, 2010, 23(12): 1464-1469.
- [27] 李海涛, 沈文清, 桑卫国, 李家永. MTCLIM模型(山地小气候模拟模型)的研究现状及其潜在应用. *山地学报*, 2001, 19(6): 533-540.
- [32] 潘建峰, 国庆喜, 王化儒. 山地小气候模型在帽儿山地区气候模拟中的应用. *东北林业大学学报*, 2007, 35(5): 51-54.
- [35] 方正, 高淑贞. 秦岭太白山南北坡的植被垂直带谱. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1963, 1(1/2): 162-163.
- [38] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [39] 傅志军. 太白山太白红杉林的群落学特征及生物量的研究. *汉中师院学报: 自然科学版*, 1994, (2): 69-72.
- [40] 周才平, 欧阳华, 宋明华. 中国森林生态系统氮循环特征与生产力间的相互关系. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 203-206.
- [41] 陈斌, 王绍强, 刘荣高, 宋婷. 中国陆地生态系统NPP模拟及空间格局分析. *资源科学*, 2007, 29(6): 45-53.
- [42] 卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [43] 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(2): 147-158.
- [45] 朱志诚. 秦岭太白山森林主要类型特征及其分布规律. *陕西林业科技*, 1981, (5): 29-39.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)

Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of *Alternanthera philoxeroides* stems CHE Xiuxia, CHEN Huijing, YAN Qiaodi, et al (2695)
Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain FENG Qiuhong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis* LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China CHENG Man, ZHU Qulian, LIU Lei, et al (2835)

Simulation of the carbon cycle of <i>Larix chinensis</i> forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China	LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region	CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
Age structure and point pattern of <i>Butula platyphylla</i> in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia	HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China	JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
Landscape, Regional and Global Ecology	
The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed	XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS	ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
Resource and Industrial Ecology	
Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions	LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
Research Notes	
Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid	ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO ₂ concentration	LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任编辑 欧阳志云

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第9期 (2013年5月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
行 书 学 出 版 社
地址:东黄城根北街16号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国 外 发 行 中国国际图书贸易总公司
地 址:北京399信箱
邮 政 编 码:100044

广 告 经 营 京海工商广字第8013号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元