

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

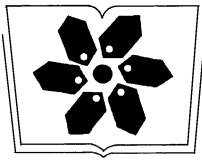
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性	刘 波, 郑雪芳, 孙大光, 等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应	尹 红, 王 靖, 刘洪滨, 等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程	李海波, 李英华, 孙铁珩, 等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划	肖 燧, 陈圣宾, 张 路, 等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例	鲁春霞, 刘 铭, 冯 跃, 等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征	许倍慎, 周 勇, 徐 理, 等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响	李宁云, 袁 华, 田 昆, 等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例	宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力	韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究	张 杰, 张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价	孙才志, 杨 磊, 胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性	黄 静, 崔胜辉, 李方一, 等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析	钟林生, 王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者	褚福印, 唐思贤, 潘虎君, 等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响	朱俊霞, 王 勇, 张美文, 等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统	祁 君, 苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究	张 琳, WANG Baode, 许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系	杨忠岐, 王小艺, 王 宝, 等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响	李 乐, 万冬梅, 刘 鹤, 等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究	宋 伦, 杨国军, 李 爱, 等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征	王海梅, 李政海, 乌 兰, 等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响	兰春剑, 江 洪, 黄梅玲, 等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理	赵风华, 王秋凤, 王建林, 等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较	巩国丽, 陈 辉, 段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响	雍石泉, 仝 川, 庄晨辉, 等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性	谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等 (7551)
芑对黑麦草根茎几种低分子量有机分泌物的影响	谢晓梅, 廖 敏, 杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定	张丽珍, 樊晶晶, 牛 伟, 等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响	安 娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建	楼 波, 徐 毅, 林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响	张远东, 刘世荣, 顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展	胡广录, 赵文智, 王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物	高 东, 何霞红, 朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征	刘 刚, 沈守云, 闫文德, 等 (7625)
氯氟菊酯和溴氟菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响	黄 林, 刘昌利, 韦传宝, 等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等	(I)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境, 同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中, 但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变, 形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭, 绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬, 远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

尹红, 王靖, 刘洪滨, 黄磊, 朱海峰. 小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应. 生态学报, 2011, 31(24): 7343-7350.

Yin H, Wang J, Liu H B, Huang L, Zhu H F. A research on the response of the radial growth of *Pinus koraiensis* to future climate change in the XiaoXing'AnLing. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7343-7350.

小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应

尹 红^{1,*}, 王 靖², 刘洪滨¹, 黄 磊¹, 朱海峰³

(1. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要: 基于 SRES A1B 温室气体排放情景, 由全球气候模式 (MPI_ECHAM5) 产生的逐日气候模拟数据驱动 TREE-RING 树轮生态机理模型, 模拟了小兴安岭红松 (*Pinus koraiensis*) 树木径向生长变化。结果表明: 在 A1B 情景下, 随着大气 CO₂ 浓度的不断增加以及局地气温的不断升高, 红松树木生长开始和结束时间显著提前, 2011—2060 年比 1961—2010 年径向生长开始时间平均提前约 5d 左右, 生长结束时间平均提前约 3d 左右。红松树木的径向生长量不断增加, 2011—2060 年比 1961—2010 年径向生长量平均增加约 35%, 径向生长量的增加主要是 CO₂ 施肥作用的结果, 在不考虑 CO₂ 施肥效应下, 只考虑降水量变化使树木径向生长量增加约 2%, 而未来 50a 的气温变化使树木径向生长量相对于 1961—2010 年减少约 23%。

关键词: 小兴安岭; 红松; 树轮生态机理模型; 气候变化

A research on the response of the radial growth of *Pinus koraiensis* to future climate change in the XiaoXing'AnLing

YIN Hong^{1,*}, WANG Jing², LIU Hongbin¹, HUANG Lei¹, ZHU Haifeng³

1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Climate change has had a significant impact on forest ecosystem. *Pinus koraiensis* is one of precious tree species in Northeast China. The coniferous and broadleaved mixed forest dominated by pine is the representative vegetation type in XiaoXing'AnLing of China. Under the climate change background, studying the response of the growth of *Pinus koraiensis* to climate change is important to understand the climate change impact on forest ecosystem. Simulation models as effective tools for assessing the climate change impact have been applied widely in different regions over the world. A process-based ecological mechanism model (TREE-RING) had been verified for simulating the radial growth of *Pinus koraiensis* in XiaoXing'AnLing of China. The results showed that simulated phenology was well coincident with observed phenology. There was a high correlation between simulated and observed cell series of *Pinus koraiensis*. Based on the validated TREE-RING model, the study simulated the growth trend of *Pinus koraiensis* in XiaoXing'AnLing under future climate scenarios and explored the response mechanism of tree growth to climate change, which is helpful to understand climate change impact, alleviate the negative effects of climate changes on tree growth and provide references for policy-making related to addressing the climate change.

For this study, we intend to use TREE-RING model to simulate the growth of *Pinus koraiensis* in the XiaoXing'AnLing based on a middle medium emissions climate change scenario (SRES A1B) generated by global climate model (MPI_

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB950104); 国家气象公益性行业科研专项 (GYHY201106013); 国家林业公益性行业科研专项 (200804001) 共同资助

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2011-10-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinh@cma.gov.cn

ECHAM5) from 1961 to 2060. The meteorological data including daily maximum temperature, daily minimum temperature and daily precipitation with the resolution of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ was interpolated to Yichun meteorological station ($47^{\circ}73'N, 128^{\circ}92'E$, 240.9 m. a. s. l) with the method of Bilinear interpolation. The analysis on the variation characteristics of climate factors from 1961 to 2060 showed that atmospheric CO_2 concentration will continue to increase and reach 563 mg/L in 2060. Maximum and minimum temperature will have a fluctuating rising tendency while precipitation will change slightly.

TREE-RING droved by climate data model was run for 100 years from 1961 to 2060. The simulated results showed that under the SRES A1B emission scenarios, with the increase in atmospheric CO_2 concentration and air temperature, the beginning and end dates of *Pinus koraiensis* growth will advance significantly in the XiaoXing'AnLing from 2011 to 2060 with a mean advance of 5 days in the beginning date and 3 days in the end date compared with 1961—2010. Annual radial growth period will prolong by about 2 days in the future fifty years. The radial growth rate will be increased by 35% in 2011—2060 compared with 1961—2010, which is mainly due to the effect of CO_2 fertilization. The individual change in precipitation will increase tree radial growth by about 2% while the individual change in air temperature will decrease tree radial growth by 23%. Sensitivity analyses were performed to see the response of the model under variable climatic environmental conditions. The results show that rising air temperature in spring (March and April) increases tree growth rate significantly, however, rising air temperature in summer (June-August) decreases tree growth rate when air temperature was increased by $1^{\circ}C$ and CO_2 concentration and precipitation were not changed.

Key Words: XiaoXing'AnLing; *Pinus koraiensis*; REE-RING Eco-physiological model; Climate change

2007 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的第四次评估报告指出,全球变暖已经是不争的事实。在不同的 SRES 温室气体排放情景下,到 21 世纪末,全球地表平均气温可能上升 $1.8^{\circ}C—4.0^{\circ}C$ [1]。全球气候变暖趋势加剧使得我国极端天气气候事件发生频率可能增加;降水分布不均现象更加明显,强降水事件发生频率增加;干旱区范围可能扩大;海平面上升趋势进一步加剧 [2]。气候变化潜在地影响我国的农牧业、森林与自然生态系统、水资源和海岸带等。已观测的气候变化对森林生态系统的影响现象表现为,气候变暖促使植物物候期提前 [3-5],生长期延长,加上大气 CO_2 浓度增加形成的“施肥效应”,使得森林生态系统的生产力增加 [6],如 Zhou 等基于卫星数据研究表明,1981—1999 年欧亚大陆北部和北美洲北部植被活力显著增长,生长期延长 [7]。基于生态系统模型的模拟研究表明气候变暖下中国东部亚热带、温带北界普遍北移 [8];中国东北主要森林类型发生显著变化 [9-10]; CO_2 浓度倍增后,中国森林生产力将有所增加,增加的幅度因地区不同而异 [11]。

红松是东北地区的珍贵树种,以红松为主的针阔叶混交林是我国小兴安岭地区最具代表性植被类型。森林在应对气候变化中扮演着重要角色,既可以作为温室气体的储藏库和吸收源,又可能因毁林、森林退化、火灾等,成为温室气体的排放源。同时,森林本身也会受到气候变化的显著影响。在未来气候变化情景下,小兴安岭地区红松树木的生长状况如何变化,对于加深理解气候变化的影响具有重要的意义。模型模拟是进行气候变化影响定量评价的方法之一,已有研究基于 TREE-RING 树轮生态机理模型对采自小兴安岭红松树轮样本建立时间序列的统计量子样本信号强度 SSS (Subsample Signal Strength) 大于 0.9 时随机选取的 9 棵树,18 个样芯进行了模拟,模拟的生育期和物候观测比较一致,红松树木细胞模拟序列和实测序列具有较好的相关性 [12]。本研究在此基础上,模拟了未来气候情景下小兴安岭红松树木的生长趋势,从树木生长的物候、径向生长、气候因子对树木生长的影响方面探讨了树木生长对气候变化的响应机制,对于理解和认识气候变化,减缓气候变化带来的负面效应,以及应对气候变化政策的制定提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

小兴安岭森林资源丰富,树种较多。其中红松为主的针阔叶混交林是小兴安岭主要森林资源。本文的研

究区在丰林国家级自然保护区(48°02′—48°12′N, 128°58′—129°15′E), 位于我国小兴安岭南坡, 黑龙江省伊春市五营区五营林业局境内, 地带性植被为温带针阔叶混交林, 总面积 18400 hm², 是中国目前保存最完整、最典型的原始红松林保护区(图 1)。全区地形平缓, 海拔 280—683 m, 夏季湿润多雨, 冬季严寒少雪。分析伊春气象站 1958—1998 年资料显示该地区年平均降水量在 450—1000 mm 之间, 6—8 月份降水在 230—700 mm 之间, 约占全年降水量的 65%。年平均气温在 1℃左右, 其中 1—3 月、11 月和 12 月份平均气温都在 0℃以下, 5 月到 9 月份平均气温一般大于 10℃以上^[12]。

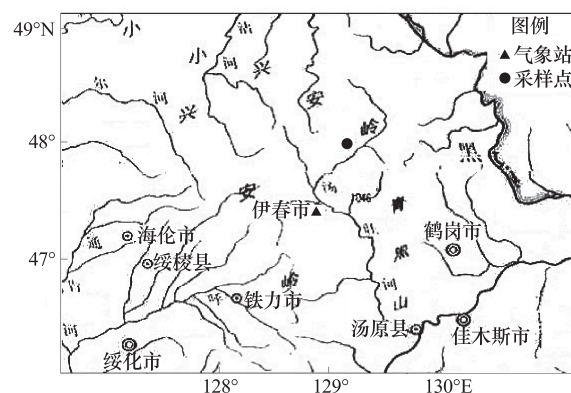


图1 采样点和气象站示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling site and meteorological station

1.2 数据与方法

1.2.1 数据资料

2000 年 IPCC《排放情景特别报告》发布了一系列新的排放情景,即 SRES 情景,SRES 设计了 4 种世界发展模式,其中 A1B 是各种能源平衡发展下的未来温室气体排放情景^[2]。本文利用全球气候模式 MPI_ECHAM5 输出的 A1B 排放情景下 1961—2060 年,空间分辨率是 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的逐日最高气温、最低气温、逐日降水量资料,利用双线性插值到各气象站点,由于伊春气象站($47^{\circ}73'N$, $128^{\circ}92'E$,海拔 240.9m)是距离采样点最近的气象基准站,因此本文利用伊春气象站的逐日预估资料对小兴安岭红松树木径向生长对未来气候变化的响应进行模拟研究。

1.2.2 模型描述

本文所使用的 TREE-RING 模型是描述树木形成层生长过程的模型^[13]。模型描述的外部环境对树木的影响主要是在形成层区域具有生命活动的细胞,影响细胞的线性生长率和细胞的分裂周期。树木的光合产物含量 $f(S)$ 、温度 $f(T)$ 和树木的水分平衡 $f(W)$ 状态 3 个因素控制相对生长速率^[12,14-15]。其中 CO_2 浓度变化对树木光合作用的影响表示为:

$$\begin{cases} p = P_m \frac{C_a - a}{b - a + P_m R^c}, & P_m R^c \geq C_a - a \\ p = P_m, & P_m R^c \leq C_a - a \end{cases} \quad (1)$$

其中最高气温年代际变化显示秋季升温最大,之后依次是春季、冬季和夏季。春季最高气温 21 世纪 30 年代温度比 20 年代要略微偏低。夏季最高气温 21 世纪 20 年代比 10 年代略有降低。秋季和冬季最高气温都是 40 年代比 30 年代略有降低。最低气温年代际变化显示秋季气温升温最高,之后依次是冬季、春季和夏季。其中夏季最低气温 21 世纪 20 年代比 10 年代略有偏低,冬季 21 世纪 40 年代比 30 年略有偏低。降水的年代际变化分析显示,秋季、春季和夏季降水略有降低,其中秋季降低最大,春季和夏季次之,冬季降水略有增加,总体上看各季节降水变化的幅度较小。

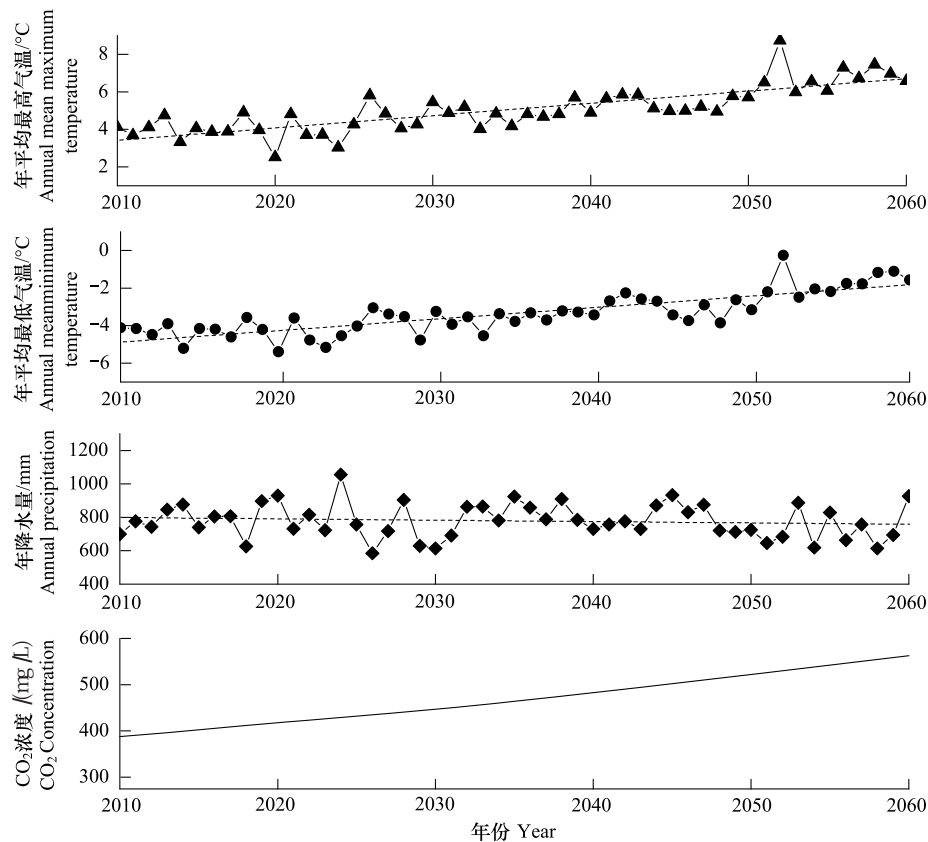


图2 A1B 情景下各气候因子及 CO₂ 浓度的变化趋势

Fig. 2 Changes in climatic factors and CO₂ concentration under SRES A1B climate scenario

表 1 A1B 情景下伊春气象站 2011—2060 年的每 10a 尺度气候要素变化

Table 1 Decadal change of climate factors under SRES A1B scenario in Yichun from 2011 to 2060

要素 Elements	季节 Season	年份 Year				
		2011—2020	2021—2030	2031—2040	2041—2050	2051—2060
最高气温/℃ Maximum temperature	春 Spring	4. 20	5. 11	4. 79	6. 36	7. 23
	夏 Summer	22. 28	21. 86	22. 36	23. 33	24. 14
	秋 Autumn	6. 38	7. 02	7. 63	7. 51	10. 03
	冬 Winter	-17. 27	-16. 89	-15. 63	-15. 93	-14. 32
最低气温/℃ Minimum temperature	春	-5. 30	-4. 61	-4. 59	-3. 58	-2. 41
	夏	14. 50	14. 43	14. 55	15. 51	16. 01
	秋	-1. 49	-1. 23	-0. 69	-0. 41	1. 70
	冬	-24. 96	-24. 58	-23. 42	-23. 46	-21. 93
降水量/mm Precipitation	春	2. 43	2. 26	2. 49	2. 13	2. 14
	夏	4. 07	4. 24	4. 32	4. 52	3. 79
	秋	1. 79	1. 18	1. 56	1. 53	1. 44
	冬	0. 49	0. 53	0. 57	0. 47	0. 62

2.2 未来气候情景下小兴安岭红松树木径向生长物候期变化

模型中径向生长开始定义为形成层区域细胞被激活,形成层细胞体积开始增大的日期(从1月1日开始算起),生长结束的日期为最后一个细胞原生质消逝,进入休眠状态的日期。利用A1B排放情景下全球气候模拟资料输出1961—2060年气候资料计算得到的,1961—2010年小兴安岭红松树木径向生长开始期平均为第126天,生长结束期平均为第284天,2011—2060年红松树木径向生长开始期平均为第121天,生长结束期平均为第281天。从红松树木径向生长开始和结束日期1961—2060年变化趋势的线性回归统计检验来看(图略),红松树木径向生长开始和结束时间显著提前,2011—2060年比1961—2010年径向生长开始时间平均提前约5d左右,径向生长结束时间平均提前约3d左右,未来50a径向生长期约延长2d左右。树木径向生长形成的树木年轮是树木形成层周期活动的结果,形成层活动受到多种因素影响,其中在温带地区,温度是影响树木生长开始时期最重要的因素,当春季气温达到一定高度时,形成层细胞才能开始活动^[16]。前期的研究结果也显示,该地区的红松树木生长开始时期主要受到气温变化控制^[12]。从未来气候变化情景数据来看,春季气温不断升高,如21世纪50年代比10年代春季气温升高约3℃的情况下,树木的生长开始时间约提前6.5d(表2)。很多研究表明,春季物候变化与气温变化密切相关,徐雨晴等^[17]分析了北京近50a春季物候变化及其对气候变化的响应,近10a来北京春季物候持续偏早,北京春温升高开花期提前,春温每升高1℃,开花期平均提前3.6d,春季树木开花物候与春季气温的年际、年代际的波动基本对应。郑景云等^[18]根据中国科学院物候观测网络26个观测点的物候资料,分析显示我国木本植物的物候变化提前与春季增温有关。本文所用的树轮年轮宽度资料与气象站点的相关分析,也表明了生长初期的气温变化对树木生长影响很大^[12]。而树木径向生长结束时间,也就是形成层休眠期从整体来看与气温升高没有直接关系。研究显示,树木的径向生长的时间主要由形成层开始日期决定^[19]。由于春季气温升高,使得树木形成层生长开始时间提前,由形成层生长自身的遗传因素决定,因此树木开花、结果以及形成层生长的结束日期也会提前。观测研究显示,只有气温达到一定的高度时树木径向生长才开始,而生长达到一定时间,尽管温度较高,树木的径向生长仍然会停止^[20]。当然秋季气温较高,对于延迟树木叶的脱落,增加光合累积具有重要的作用。而光合累积将有利于树木下一年的生长。从该地区树木生长情况可见,生长结束日期在10月上旬,而10月份气温与下一年的树轮宽度相关显著^[12]。

表2 A1B情景下小兴安岭红松10a平均径向生长期变化

Table 2 Decadal average change in radial growth period of *Pinus koraiensis* in Xiao Xing'AnLing under SRES A1B climate scenario

生长阶段 Growth stages	年份 Year				
	2011—2020	2021—2030	2031—2040	2041—2050	2051—2060
生长开始 Growth start	124.8	122.7	123.4	117.8	118.3
生长结束 Growth end	283.1	283.3	276.8	283.7	277.6
生长期 Growth periods/d	158.3	160.6	153.4	165.9	159.3

2.3 未来气候情景下小兴安岭红松树木径向生长状况

模型模拟如图3a显示在A1B排放情景下,小兴安岭红松树木的径向生长量在明显增加,2011—2060年比1961—2010年的径向生长量平均增加约35%。径向生长量不断增加的趋势,也说明了小兴安岭红松在未来气候变化情景下材积量的不断增加,树木固碳能力在显著提高,这对降低大气中CO₂含量,缓解由于温室气体引起的气候变暖能够起到一定作用。赵俊芳等^[21]模拟显示未来平衡发展(A1B)气候变化情景下,2003—2049年东北森林生态系统净初级生产力呈波动上升趋势,东北森林的吸碳总量在不断增加。杨书运等^[22]的研究结果也表明,从2005—2044年中国森林的碳储存能力在提高。吴祥定等^[23]根据树木年轮指数与气象记录之间的相关性,建立回归方程,推算在未来全球气候变暖情景下树木的径向生长量和材积量显示,年平均气温升高分别达到1、2、3℃,吉林长白落叶松径向生长量分别增加9.2%、15.7%、22.3%,材积量则分别增加24.4%、44.7%、66.3%,在贡嘎山区径向增加量则分别为5.3%、10.1%、14.7%,材积量分别为13.9%、

27.3% 和 41.6%, 也与本文的研究结果基本一致。

从很多研究结果中, 都可以看出一个共同点, 就是气候变化使树木的生长量增加。树木生长对不同气候因子的响应是怎样的, 可以借助模型进行深入研究。本文假定 2011—2060 年的 CO_2 浓度值与 1961—2010 年相同, 代入模型进行模拟结果如图 3b 所示, 通过图 3a 和 3b 对比, 可以看出 CO_2 对树木生长的助长作用, 在 2011—2060 年 CO_2 浓度与 1961—2010 年相等的情况下, 2011—2060 年比 1961—2010 年树木径向生长量减少了 21%, 说明未来 50a 的气温或降水变化使树木的生长速率降低, 当 CO_2 浓度在 1961—2010 年的基础上增加 $33 \mu\text{mol/mol}$, 可以弥补由 2011—2060 年气温或降水变化引起的树木径向生长速率降低。通过模拟进一

步显示, 在 2011—2060 气温和 CO_2 浓度与 1961—2010 年保持不变的情况下, 只降水发生变化的情况下使树木径向生长量比 1961—2010 年平均增加约 2%。而在 2011—2060 年的降水和 CO_2 浓度与 1961—2010 年保持不变的情况下, 气温变化使树木的径向生长量比 1961—2010 年平均减少约 23%, 说明温度过高会抑制树木生长。

由于该地区未来 50a 降水变化趋势较小, 而气温升高趋势明显, 因此本文对树木生长对气温变化的响应的敏感性进一步模拟分析, 利用模型对 1961—2010 年在降水和 CO_2 浓度不变的情况下, 对每月的平均温度分别增加 1°C 进行模拟, 结果与 1961—2060 年气温不变时模拟的红松树木径向生长量比较发现(表 3), 3 月和 4 月温度升高树木径向生长量分别增加约 2.5% 和 3.7%, 而 6、7 月和 8 月份气温升高树木生长量分别降低了约 5.3%、6.8% 和 5.5%, 其它月份的生长量变化不大, 说明该地区在各月份升温相同的情况下, 树木径向生长速率的降低主要由夏季 6、7 月和 8 月份的气温升高引起。分析显示这主要与光合作用对气温变化的响应有关, 光合过程中的暗反应是由酶所催化的化学反应, 因而受温度影响^[24], Peng 等^[25] 模拟研究了树种生物量随温度的变化曲线可以看出, 树木的总生物量在一定的温度范围内, 随温度的升高而增加, 但是斜率逐渐变小, 生物量达到最大值之后, 随温度的增加而降低, 斜率逐渐变大。在一定的温度范围内, 生物量的值变化较小且接近最大值, 这个温度范围为光合最适温度, 模型设定的最适温度范围为 $15\text{--}25^\circ\text{C}$ 。其中 3、4 月份温度在光合作用最低温度到最适温度下限之间, 光合速率随温度的增加线形增加, 因此这几个月份温度增加, 树木的径向生长速率增大。而 6、7、8 月份温度在最适温度上下限范围内, 随着温度的增加, 光合速率变化较小, 而随着气温升高, 呼吸消耗却在加剧, 树木的径向生长速率降低。

表 3 1961—2010 年的逐月气温增加 1°C 时模型模拟的红松径向生长变化

Table 3 Simulated radial growth change rate under rising monthly temperature by 1°C from 1961 to 2010

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
树木径向生长变化/% The change rate in radial growth	-1.0	-0.4	2.5	3.7	0.4	-5.3	-6.8	-5.5	-1.8	1.4	-1.5	-0.1

“—”表示减少

3 结论与讨论

本文应用 TREE-RING 树轮生态机理模型对我国小兴安岭红松在未来气候变化 A1B 情景下的树木径向生长状况进行了模拟, 探讨了气候变化对红松树木生长的影响机制。通过模拟研究得出以下结论: 在各种能源平衡发展(A1B)的未来气候变化情景下, 小兴安岭红松树木生长开始和结束时间不断提前, 2011—2060 年比 1961—2010 年生长开始时间平均提前约 5d 左右, 生长结束时间平均提前约 3d 左右。红松树木的径向生

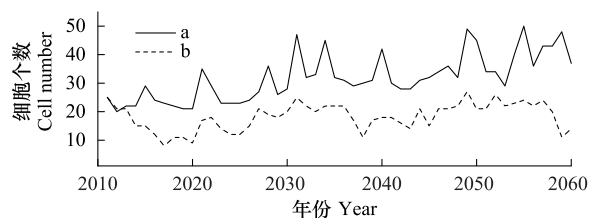


图 3 A1B 情景下小兴安岭红松树木的径向生长趋势 (a), 2011—2060 年与 1961—2010 年 CO_2 值相等的树木径向生长趋势 (b)

Fig. 3 Radial growth trend of *Pinus koraiensis* under SRES A1B climate scenario (a), Radial growth trend with the equality CO_2 of 2011—2060 year and 1961—2010 year (b)

长量不断增加,2011—2060 年比 1961—2010 年径向生长量平均增加 35%,径向生长量的增加主要是 CO₂施肥作用的结果,2011—2060 年气温和 CO₂ 浓度与 1961—2010 年保持不变的情况下,只考虑降水变化使树木生长量增加约 2%,而未来 50a 的气温变化使树木径向生长量相对于 1961—2010 年减少约 23%。在 1961—2010 年降水和 CO₂ 浓度保持不变,逐月气温升高 1℃ 的情况下,主要是春季 3、4 月气温升高使树木生长量增加明显,而夏季 6、7、8 月气温升高使树木相对生长量降低。

在本研究中也值得注意这样一个问题即本文假设的情景是考虑 CO₂对树木生长的施肥作用存在长期效应下未来气候变化对树木生长的影响,是对未来气候变化的一种情景预估。CO₂施肥作用是否具有长期效应是一个存在争议的问题,一些文献已经证实了 CO₂施肥作用的长期效应,如 Ainsworth 和 Long 基于大量的 FACE 试验观测数据分析发现,CO₂浓度增加会提高植物的光合能力^[26];Liberloo 等对杨树连续 6a 的 CO₂增加试验显示,CO₂施肥作用具有长期效应^[27]。许多研究已经对 CO₂对树木生长施肥作用的缺乏长期效应现象进行了解释,树木生长的立地条件限制根系生长^[28]和土壤氮肥的缺乏都会限制 CO₂的施肥作用^[29-30],根据采样点的实际考察,红松树木生长立地条件好,生长季树木生长茂盛,叶片颜色不存在黄叶现象,模型认为土壤氮素养分充足,该地区树木生长不会受到土壤氮肥的限制。

致谢:国家气候中心对全球气候模式气候变化预估数据进行整理、分析和惠许使用。原始数据由各模式组提供,由 WGCM (JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling) 组织 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) 搜集归类。多模式数据集的维护由美国能源部科学办公室提供资助

References:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers//Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007.
- [2] The Compilation Committee of National Assessment Report of Climate Change. China's National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2007, 1-422.
- [3] Chen X Q, Zhang F C. Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22 (1): 1-5.
- [4] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(20): 1582-1587.
- [5] Xu W D, He X Y, Chen W, Hu J B, Wen H. Responses of Shenyang urban tree phenology to climate warming. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1777-1781.
- [6] Zhu J H, Hou Z H, Zhang Z J, Luo Y J, Zhang X Q. Climate change and forest ecosystem: impacts, vulnerability and adaptation. Scientia Silvae Sinicae. 2007, 43(11):138-145.
- [7] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 2001, 106:20069-20083.
- [8] Sha W Y, Shao X M, Huang M. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China in 1980s. Science in China (Series D). 2002, 32(4): 317-326.
- [9] Leng W F, He H S, Bu R C, Hu Y M. The spatial distribution of constructive species of Northeast forest under the climate chaing. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4257-4266.
- [10] Cheng X X, Yan X D. Effects of climate change on typical forest in the northeast of China. Acta Ecologica Sinica. 2008, 28(2):534-543.
- [11] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. Acta Phytocologica Sinica. 2000, 24(5):513-517.
- [12] Yin H, Liu H B, Guo P W, Hans Linderholm. An analysis on the climatic response mechanism of the growth of Pinus koraiensis in the lower mountains of XiaoXing'AnLing. Acta Ecologica Sinica. 2009, 29(12):6333-6341.
- [13] Vaganov E A, Hughes M K, Shashkin A V. Growth dynamics of conifer tree rings: images of past and future environments. Berlin: Springer, xiv, 2006, 1-354.
- [14] Fritts H C, Vaganov E A, Sviderskaya I V, Shashkin A V. Climatic variation and tree-ring structure in conifers; Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density. Climate Research. 1991, 1(2): 97-116.
- [15] Fritts H C, Shashkin A V, Downes G M. A simulation model of conifer ring growth and cell structure. In Tree-Ring Analysis, edited by R. Wimmer

- and R. E. Vetter, Cambridge University Press, Cambridge. Gates D M. Biophysical Ecology. New York: Springer, 1999, 3-32.
- [16] Cannell M G R, Smith R L. Climatic warming, spring bud burst, and frost damage on trees. *Journal of Applied Ecology*, 1986, 23:177-191.
- [17] Xu Y Q, Lu P L, Yu Q. Response of tree phenology to climate change for recent 50 years in Beijing. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 412-420.
- [18] Zheng J Y, Ge Q S, Zhao H X. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24 (1): 28-32.
- [19] Mikola P. Temperature and tree growth near the northern timberline. In: Kozłowski TT (ed). *Tree growth*. Ronald Press, New York, 1962, 1-442.
- [20] Denne M P. Temperature and tracheid development in *Pinus sylvestris* seedlings. *Journal of Experimental Botany*. 1971, 22(2): 362-370.
- [21] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Changes in carbon budget of Northeast China forest ecosystems under future climatic scenario. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 781-787.
- [22] Yang S Y, Jiang Y L, Zhang Q G, Yang C L. The Research of carbon's storage capacity of China forest systems in the future. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33 (1): 118-120.
- [23] Wu X D, Shao X M. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring width data. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51 (suppl.): 92-101.
- [24] Wang Z. *Plant physiology*. Beijing, China Agricultural Press. 1999, 1-492.
- [25] Peng Y Y, Dang Q L. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180, 1-9.
- [26] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165, 351-372.
- [27] Liberloo M, Tulva I, Raim O, Kull O, Ceulemans R. Photosynthetic stimulation under long-term CO₂ enrichment and fertilization is sustained across a closed *Populus* canopy profile (EUROFACE). *New Phytologist*, 2007, 173, 537-549.
- [28] Drake B G, Gonzalez-Meler M A, Long S P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂?. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 1997, 48, 609-639.
- [29] Curtis P S, Wang X Z. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia*, 1998, 113, 299-313.
- [30] Rey A, Jarvis P G. Long-term photosynthetic acclimation to increased atmospheric CO₂ concentration in young birch (*Betula pendula*) trees. *Tree Physiology* 1998, 18, 441-450.

参考文献:

- [2] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京:科学出版社, 2007, 1-422.
- [3] 陈效逖, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2001, 22(1): 1-5.
- [4] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47(20): 1582-1587.
- [5] 徐文铎, 何兴元, 陈玮, 胡健波, 闻华. 沈阳城市森林主要树种物候对气候变暖的响应. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1777-1781.
- [6] 朱建华, 侯振宏, 张治军, 罗云建, 张小全. 气候变化与森林生态系统:影响、脆弱性与适应性. *林业科学*, 2007, 43(11): 138-145.
- [8] 沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(4): 317-326.
- [9] 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 胡远满. 气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布. *生态学报*, 2006, 26(12): 4257-4266.
- [10] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 534-543.
- [11] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [12] 尹红, 刘洪滨, 郭品文, Hans Linderholm. 小兴安岭低山区红松生长的气候响应机制. *生态学报*, 2009, 29(12): 6333-6341.
- [17] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 近 50 年北京树木物候对气候变化的响应. *地理研究*, 2005, 24(3): 412-420.
- [18] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应的研究. *中国农业气象*, 2003, 24 (1): 28-32.
- [21] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 未来气候情景下中国东北森林生态系统碳收支变化. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 781-787.
- [22] 杨书运, 蒋跃林, 张庆国, 杨春雷. 未来中国森林碳蓄积预估初步研究. *福建林业科技*, 2006, 33 (1): 118-120.
- [23] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试. *地理学报*, 1996, 51, 增刊, 92-101.
- [24] 王忠. *植物生理学*. 北京: 中国农业出版社, 1999, 1-492.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 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	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元