

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 23 期
Vol.30 No.23
2010



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 30 卷 第 23 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中耕地类型及其土壤氮磷储量的变化	武俊喜,程 序,焦加国,等 (6309)
海洋生态资本概念与属性界定	陈 尚,任大川,李京梅,等 (6323)
海洋生态资本价值结构要素与评估指标体系	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6331)
黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征	杜有新,潘根兴,李恋卿,等 (6338)
长白山阔叶红松林样地槭属树木木生真菌的群落组成和分布	魏玉莲,戴玉成,袁海生,等 (6348)
内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征	吴永胜,马万里,李 浩,等 (6355)
盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响	廖宝文,邱凤英,张留恩,等 (6363)
基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析	胡海清,赵致奎,王晓春,等 (6372)
不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响	赵紫华,石 云,贺达汉,等 (6380)
黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系	刘继亮,李锋瑞,刘七军,等 (6389)
刺槐树冠光合作用的空间异质性	郑 元,赵 忠,周 慧,等 (6399)
南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素	宋星宇,刘华雪,黄良民,等 (6409)
怒江三种裂腹鱼属鱼类种群遗传结构	岳兴建,汪登强,刘绍平,等 (6418)
大型水生植物对重金属的富集与转移	潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等 (6430)
依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线	徐兆礼,陈佳杰 (6442)
正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响	朱丹婷,李铭红,乔宁宁 (6451)
基于中分辨率 TM 数据的湿地水生植被提取	林 川,官兆宁,赵文吉 (6460)
基于 CVM 的三江平原湿地非使用价值评价	敖长林,李一军,冯 磊,等 (6470)
耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例	方 斌,杨 叶,郑前进,等 (6478)
自然旅游地居民自然保护态度的影响因素——中国九寨沟和英国新森林国家公园的比较	程绍文,张 捷,徐菲菲 (6487)
基于 PSR 方法的区域生态安全评价	李中才,刘林德,孙玉峰,等 (6495)
灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响	滕中华,智 丽,吕 俊,等 (6504)
秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素	马莉薇,张文辉,薛瑶芹,等 (6512)
子午岭三种生境下辽东栎幼苗定居限制	郭 华,王孝安,朱志红 (6521)
温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响	饶小珍,林 岗,张殿彩,等 (6530)
锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律	王海梅,李政海,韩国栋,等 (6538)
北京市水足迹及农业用水结构变化特征	黄 晶,宋振伟,陈 阜 (6546)
延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测	孙智辉,雷延鹏,卓 静,等 (6555)
冰川前缘土壤微生物原生演替的生态特征——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王晓霞,张 涛,孙 建,等 (6563)
储藏方式和时间对三峡水库消落区一年生植物种子萌发的影响	申建红,曾 波,施美芬,等 (6571)
云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征	刘万德,苏建荣,李帅锋,等 (6581)
青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法	曹广民,龙瑞军,张法伟,等 (6591)
基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟	顾峰雪,陶 波,温学发,等 (6598)
太原盆地土壤呼吸的空间异质性	张义辉,李洪建,荣燕美,等 (6606)
专论与综述	
热带森林碳汇或碳源之争	祁承经,曹福祥,曹受金 (6613)
景观对河流生态系统的影响	欧 洋,王晓燕 (6624)
自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响	杨连新,王云霞,赵秩鹏,等 (6635)
研究简报	
基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例	王女杰,刘 建,吴大千,等 (6646)
鹤伴山国家森林公园土壤甲螨群落结构	许士国,付荣恕 (6654)
栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应	桑玉强,张劲松,孟 平,党宏忠,等 (6661)
赤眼蜂发育速率对梯度恒温的响应	陈洪凡,岑冠军,黄寿山 (6669)
学术信息与动态	
GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用	李文杰,张时煌 (6674)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 42 * 2010-12	

基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期 碳通量及碳储量模拟

顾峰雪¹, 陶 波^{2,3,4}, 温学发², 于贵瑞^{2,*}, 李克让²

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 1000101;

3. International Center for Climate and Global Change Research, Auburn University, Auburn, AL36849, USA;

4. Ecosystem Dynamics and Global Ecology (EDGE) Laboratory, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn, AL, 36849, USA)

摘要:随着造林活动的开展,准确评估人工林的碳储量和固碳能力,对于准确估算全球和区域碳平衡具有重要意义。基于生态系统机理模型为分析和预测人工林生态系统碳储量和碳汇功能的动态特征提供了重要手段。CEVSA2 模型是在 CEVSA 模型的基础上,改进了碳水循环关键过程的定量表达方法而发展的新版本。基于改进后的 CEVSA2 模型,模拟分析了亚热带红壤丘陵陵区人工林自造林以来生态系统碳储量和碳通量的变化特征。模拟结果表明,造林后,植被碳持续增加,研究时段内平均每年的增长速率为 22%。土壤碳储量在造林后最初的 7—8a 间是逐渐下降的,而后逐渐升高,约 15a 后土壤碳增加到初始水平,随后土壤碳继续增加。生态系统的总碳储量也表现为先降低后增加,造林 4a 后,总碳储量由降低转为增加趋势,6a 后,总碳储量即超过造林当年的总碳储量。造林后,总初级生产力和净初级生产力逐渐升高,而总呼吸则先降低后升高,呼吸组分中自养呼吸所占比例逐渐升高而异养呼吸逐渐下降。人工林在造林初期表现为一个碳源,随着人工林的生长,碳汇功能逐渐增强。由此可见,造林初期,生态系统碳储量下降,生态系统向大气释放碳,随着人工林的生长,生态系统转变为一个碳汇,植被碳、土壤碳和总碳储量均显著增加。

关键词:CEVSA2 模型;人工林;碳汇功能;碳储量

Modeling Long-term changes in carbon fluxes and storage in a subtropical coniferous plantation based on CEVSA2 model

GU Fengxue¹, TAO Bo^{2,3,4}, WEN Xuefa², YU Guirui^{2,*}, LI Kerang²

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Dryland Agriculture, MOA, China, Beijing, 100081, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China

3 International Center for Climate and Global Change Research, Auburn University, Auburn, AL36849, USA

4 Ecosystem Dynamics and Global Ecology (EDGE) Laboratory, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn, AL, 36849, USA

Abstract: With the increase of tree plantation areas, how to evaluate accurately their carbon storage and sequestration is significant for estimating global or regional carbon balance. Process-based ecosystem models provide a realistic approach to analyze and predict the dynamic of C storage and fluxes after afforestation. CEVSA2 is a new version of CEVSA with improvements on some key processes of carbon and water cycles. CEVSA2 model was validated and calibrated by eddy flux data in 2003 and 2004 at Qianyanzhou station. The study site is one of the ‘ChinaFlux network’ and located in South China subtropical monsoon climatic zone. After the native vegetation, subtropical evergreen broad-leaved forest, was degraded

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2010CB833503); 国家科技支撑计划课题(2008BAD95B06); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432-4)

收稿日期:2010-03-02; **修订日期:**2010-11-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

after a long disturbance, the vegetation was dominated by grass and shrub after 1950s, and then the coniferous plantation has been established since 1983. Based on CEVSA2, we simulated simulated the change of carbon fluxes and storage in grass from 1951 to 1982, and then forest from 1983 to 2004. Based on the CEVSA2 model simulations, we analyzed the change of carbon fluxes and storage of coniferous plantation after afforestation in 1983.

The results showed that vegetation C increased at a rate of 22% after afforestation. The soil C decreased in the first 7 to 8 year after planting, and then increased gradually. Soil carbon was equal to the initial value 15 year later. Ecosystem total carbon storage also decreased in the early period after afforestation, and then increased with the growth. Total carbon storage shifted from decreasing to increasing trend in the 4th year after planting, and exceeded the initial value in the 6th year after planting. Gross and net primary productivity increased with the growth. Total ecosystem respiration decreased firstly and then increased. Autotrophic respiration ratio of total respiration increased with growth, and heterotrophic respiration ratio was decreased inversely. All these results showed that the total carbon storage decreased, and ecosystem released carbon to atmosphere during the early period of afforestation. With the growth of forest, ecosystem became a carbon sink, and vegetation, soil and total carbon storage increased obviously.

Key Words: CEVSA2 model; afforestation; carbon sequestration; carbon storage

人工林在生长过程中是重要的潜在增长的碳库。《京都议定书》第三条第 3 款明确规定了附件一国家(发达国家和部分经济转轨国家)可以利用造林、再造林和毁林(ARD)抵消第一承诺期的减排量。2000 年世界人工林面积为 18673.3 万 hm^2 , 占森林总面积的 4.8%, 每年平均造林面积为 445.8 万 hm^2 。世界人工林主要集中分布在 10 个国家, 其中中国人工林面积为 4508.3 万 hm^2 , 占世界人工林总面积的 24.1%, 居各国之首^[1]。随着今后我国自然保护区的建设和林业重点工程的实施, 人工林的面积和林分年龄都会进一步增大, 人工林的固碳能力和潜力也会进一步增大。因此准确评估人工林的碳储量和固碳能力, 对于准确估算全球和区域碳平衡具有重要意义。

以往的研究表明, 造林后生态系统的碳吸收速率具有很大的差异^[2], 这与造林前的生态系统类型、气候、人工林的类型、造林时间等因素有关^[3-7]。利用林地的清查资料、土壤的取样分析资料等可以计算分析造林对区域碳平衡的贡献和影响, 国内在这方面有大量的研究^[8-14]。但是观测的方法在区域上费时费力, 来源于文献的资料在观测方法和观测时间等方面都存在较大的差异, 在区域碳平衡的估算时会造成较大的偏差。国内以往的研究主要集中在应用观测的方法分析造林前后植被碳和土壤碳的变化, 很少有研究分析了人工林建立后, 碳储量和碳通量的动态变化特征及其内在的机理, 无法预测人工林在未来气候变化条件下的可能变化。基于过程的生态系统模型为分析和预测人工林生态系统碳储量和碳通量的动态特征提供了重要手段。

本研究区位于江西省泰和县的千烟洲, 是 1983 年左右开始进行人工林建设, 目前人工林已有 20 多年的生长历史。本研究基于一个过程模型——CEVSA2 模型, 模拟了该亚热带人工林自建立以来, 土壤碳、植被碳和碳通量及其分量的动态变化特征, 分析了造成这些变化的可能原因, 从而评价造林活动对生态系统碳储量和通量变化的影响。

1 研究方法

1.1 模拟方法

CEVSA2 是在 CEVSA 模型的基础上, 改进了生态系统水碳交换关键过程的定量表达方法发展建立的。CEVSA 模型的结构和定量表达方法可以参考相关文献^[15-18]。

生物物理子模型 主要计算陆气之间的水热交换和土壤水分的动态。模型计算了进入表面的总辐射, 地球表面的反射辐射和生态系统接收的净辐射和光合有效辐射。CEVSA2 模型采用 Penman-Monteith 方程计算蒸散过程。土壤水分动态是进入土壤的降水与蒸散损失之间的平衡, 同时考虑了冠层截留和积雪融化对土壤水分动态的影响。

植物生理生长子模型 该子模型计算植物的光合作用、呼吸作用、氮吸收速率、叶面积以及碳在植物各器官之间分配、积累、周转和凋落物产生。光合作用速率决定于叶肉组织光合酶对 CO_2 的利用效率和 CO_2 向叶肉组织的扩散速率。改进的 Ball-Berry 模型用于模拟气孔导度的动态,考虑土壤水分对气孔的控制作用。模型中根据土壤的氮含量计算植物吸收的总氮量,植物的氮含量决定了植物最大的同化速率。CEVSA2 模型主要考虑了光照和水分有效性对分配过程的影响,反映了资源利用对植物分配的制约关系,另外还考虑了分配比例随植物年龄增长的动态过程。模型基于碳平衡的方法模拟 LAI 的季节动态。在改进后的 CEVSA2 模型中,增加了物候的参数化过程,并且物候控制着分配和凋落过程^[19]。

土壤碳氮分解子模型 基于 CENTURY 模型模拟了土壤的碳氮分解过程,模型中将土壤有机质划分为 8 个碳库,每个碳库都具有特定的分解速率,它受到碳库本身特性、温度、湿度、氮的有效性和土壤质地的影响。对于温度的影响,模型采用分段函数加以模拟,并且考虑了土壤水分变化对土壤异养呼吸的影响。通过该子模型的模拟,计算土壤碳库和有效氮的动态,模拟土壤异养呼吸的季节动态。

另外,与 CEVSA 模型相比,CEVSA2 的模拟时间步长由原来的“旬”改为“日”。

1.2 模型验证

在本研究中,利用 2003—2004 年千烟洲亚热带人工针叶林涡度相关的观测数据对模型的模拟结果进行了检验,模型模拟的总生态系统生产力 (gross ecosystem productivity, GEP)、总生态系统呼吸 (ecosystem respiration, Re) 和净生态系统生产力 (net ecosystem productivity, NEP) 分别与通量观测值进行了比较 (图 1)。

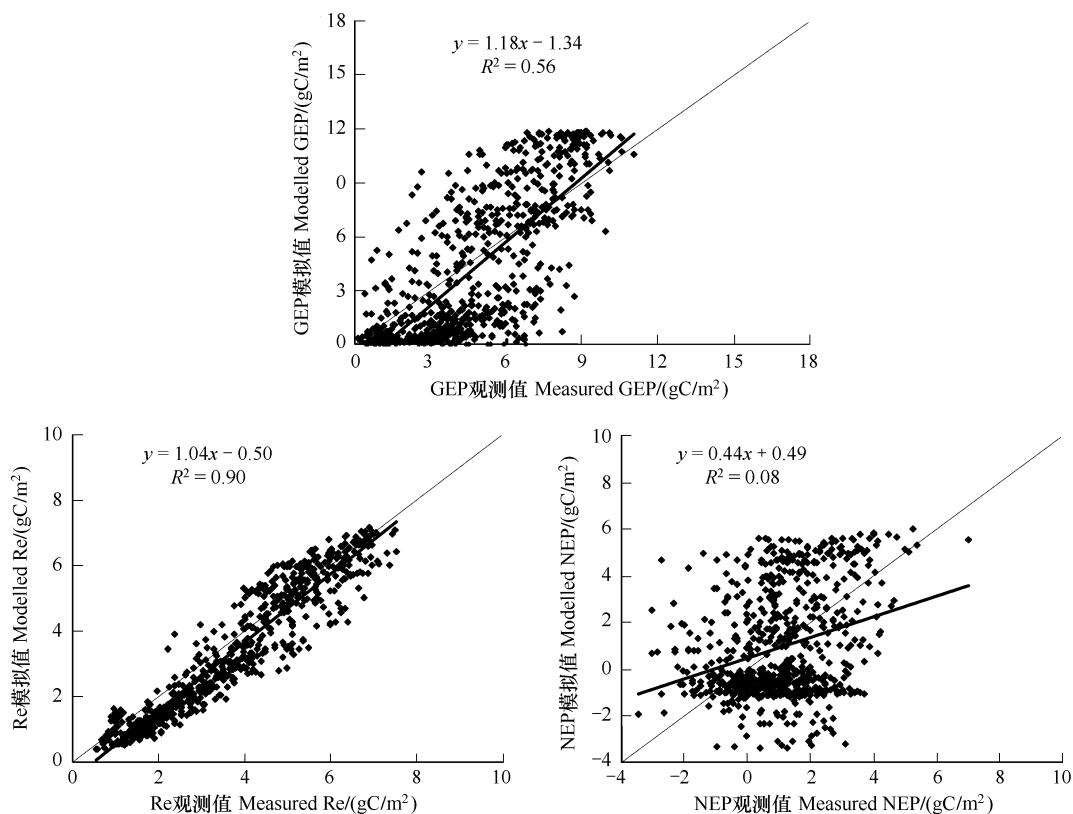


图 1 千烟洲 2003—2004 年日平均 GEP、Re 和 NEP 模拟值与观测值的比较

Fig. 1 Comparison of modeled daily GEP, Re and NEP with observations in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site

由于千烟洲地区 2003 年和 2004 年的不同时段受到不同程度干旱的影响,生态系统的碳交换具有不同的季节变化特点。模型模拟值与观测值比较结果表明,CEVSA2 模型较好地模拟该生态系统碳交换的大小和季节变化特征 (GEP、Re 和 NEP 的模拟值与观测值极显著相关, $P < 0.0001$),模型解释了 GEP 和 Re 观测值

56% 和 90% 的变异性,模型仅解释了 NEP 观测值 8% 的变异性($P < 0.001$,相关达到极显著水平)。NEP 的模拟值和观测值具有较大的差异,也是因为相对 GEP 和 R_e ,NEP 的值要小很多^[20]。

1.3 模拟方法

千烟洲地区的地带性植被应为常绿阔叶林,在常绿阔叶林破坏后,20 世纪 50 年代后以丛生的草丛和灌木为主,1983 年开始建立了常绿的人工针叶林植被。根据该地区植被的变化历史,首先以常绿阔叶林运行模型至平衡态,得到平衡态的初始状态变量。从 1951 年至 1982 年,模型模拟草地的水碳通量和碳储量,至 1982 年草地的植被碳和土壤碳输出值分别为 889 gC/m^2 和 7122 gC/m^2 。从 1983 年开始模拟了常绿人工针叶林从建立以来水碳通量和碳储量的变化,初始土壤碳库大小是草地 1982 年模型的输出值,初始植被碳给定一个很小的值: 55 gC/m^2 。为驱动模型运行,最大叶面积指数(LAI)的初始值为 $0.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。在不同植被类型的模拟中,土壤属性参数取相同的值。

1.4 研究区概况

研究区位于江西省泰和县千烟洲红壤丘陵农业开发试验站($115^\circ 04' 13'' \text{E}$, $26^\circ 44' 48'' \text{N}$)。该区年均气温 17.8°C , $\geq 0^\circ \text{C}$ 活动积温为 6523°C ,年平均降水量 1360 mm ,太阳总辐射量 $43.49 \times 108 \text{ J/m}^2$,无霜期 290d,具有典型的亚热带季风气候特征。试验区总的特点是水热资源丰富,但生长季水热明显不同步,通过多年气候资料的分析表明(图 2),在生长季 6—8 月份气温为全年最高,而降水则明显减少,为明显的干旱季节。干旱与炎热同步对植物生长极为不利,千烟洲的人工林在 6—8 月份生长季频繁受到高温干旱的胁迫^[21]。

在自然植被带上,千烟洲试验区的原生植被为中亚热带常绿阔叶林,但是由于长期资源掠夺型的人为生产活动,20 世纪 80 年代初期该区域的原生植被已被破坏殆尽。1983 年,千烟洲进行红壤丘陵小流域综合开发治理试验研究。经过 20 多年的土地利用恢复与改造,植被覆被率不断上升,目前人工针叶林主要有马尾松(*Pinus massoniana*),湿地松(*P. elliotii engelm*),杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等;阔叶树主要有樟树(*Cinnamomum camphora*)、枫香(*Liquidambar formosana Hance*)、木荷(*Schima superba Gardn et Champ*)等^[22]。涡度相关观测场位于一片人工针叶林内,模型模拟的即是人工针叶林生态系统碳储量及碳通量的变化。模型模拟的碳通量变化特征与涡度相关观测数据进行了比较。

2 结果与讨论

2.1 植被碳和土壤碳的年际变化

在杨凤婷^[23]、李家永和袁小华^[24]文献的数据中,取针叶林的观测数据,初步验证了 CEVSA2 模型对千烟洲人工针叶林长期碳储量变化的模拟结果,图 3 表明,与观测值相比,CEVSA2 模型基本模拟了人工林建立后土壤和植被碳的变化特点。

由图 3 中可以看出,土壤碳储量在造林前期下降而后又逐渐升高。尽管以往的研究表明,造林后土壤碳储量的变化在不同地区有所不同^[25],造林对土壤碳储量的影响取决于造林前的生态系统类型、气候和造林类型等^[26-28]。Paul 等^[28]总结 43 项的研究结果发现,林地年龄低于 30a 土壤通常释放碳,而超过 30a 的土壤则在深层吸收少量的碳。Guo 和 Gifford^[29]利用整合分析的方法研究发现,造林后增加土壤的碳储量。也有很多研究表明,在造林后土壤碳密度有所下降^[28,30-31],其后随着人工林建立时间的延长,土壤碳储量又逐渐增加^[32]。同时黄玫等^[33]利用 AVIM 模型在千烟洲的模拟结果同样显示土壤碳储量先下降后升高。土壤碳储量的变化是在初始土壤碳的基础上,土壤异养呼吸消耗与凋落进入土壤的碳之间的平衡。人工林建立的初

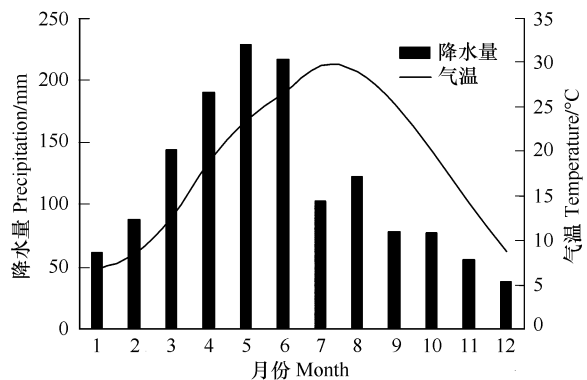


图 2 1962—2004 年多年平均月气温和降水量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of annual average monthly air temperature and precipitation at QYZ site from 1962 to 2004

期,由于土壤中已有的有机质大量分解,而由于树木生长早期植被碳积累较少,植物的凋落量也较少,土壤有机质分解释放的碳量远大于植物凋落累积在土壤中的碳,因此土壤碳储量逐渐降低。随着人工林的生长,凋落增加,土壤由于凋落而累积的碳量大于呼吸消耗的碳量,则土壤碳储量开始逐渐增加。2000 年人工林的土壤碳储量已经超过了初始值,土壤碳达到 $7886\text{gC}/\text{m}^2$,并且土壤碳依旧具有增加的趋势。通过以上分析可以看出,尽管在人工林建立的初期,土壤释放碳,但是人工林生长到一定年限后,土壤能够固定更多的碳。

图 3 表明造林后,植被碳的增加也非常显著,造林 5a 后植被碳已超过草地的植被碳,至 2004 年,人工林的植被碳已经达到 $8905\text{gC}/\text{m}^2$,并且植被碳依然具有增加的趋势。由此表明,造林能够显著提高生态系统的碳储量。

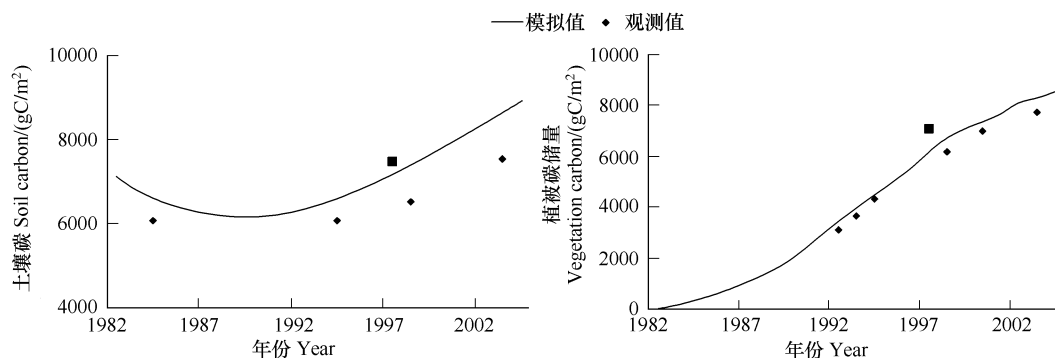


图 3 千烟洲人工林土壤碳和植被碳储量的长期变化

Fig. 3 Long-term change of soil and vegetation carbon storage at QYZ site from 1962 to 2004

注:◆观测值来源于杨风亭^[17],是所观测马尾松、湿地松、杉木人工林样地的平均值,■观测值来源于李家永等^[18]

2.2 碳通量的年际变化

从图 4 可以看出,造林后 GEP 和 Re 均呈显著增加趋势。在造林初期主要受生长控制,气候波动的影响则被生长所掩盖,GEP 和 Re 均是生长初期增长显著。随着年龄的增大,气候变化对生态系统 GEP 和 Re 的影响逐渐显著,年 GEP 和 Re 的变化更多的受到气候波动的影响而呈现年际波动的变化特点。模拟时段内年 GEP 和 Re 的变化均可用年龄的线性函数表示, R^2 分别达到 0.78 和 0.94。由图 4b 可以看出,人工林 NPP 的年际变化趋势与 GEP 一致,在造林前期升高显著,其后 NPP 受气候变化的影响而呈现年际间的波动变化。曾慧卿等^[34]基于 Biome-BGC 模型模拟了千烟洲湿地松人工林 1993—2004 年 GEP 和 NPP 的变化,结果表明,在研究时段内湿地松林 GEP 和 NPP 的平均值分别为 $1941\text{gC}/\text{m}^2$ 和 $695\text{gC}/\text{m}^2$,要略高于本研究在该时段内的模拟值。

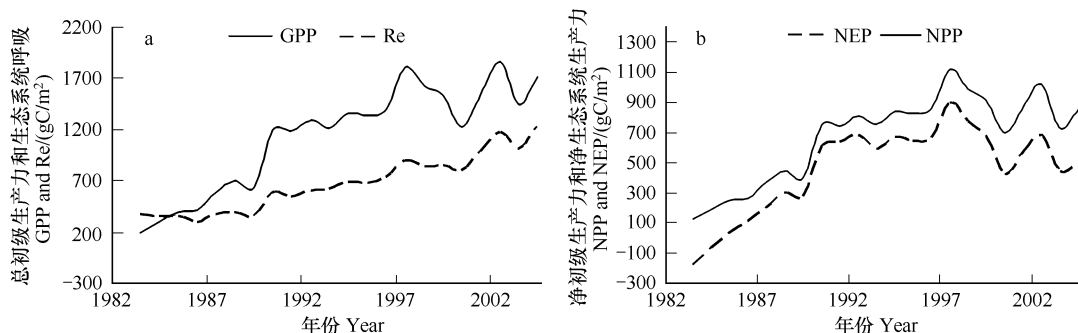


图 4 1983—2004 年千烟洲碳通量及其分量的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of carbon fluxes at QYZ site from 1982 to 2004

吴明^[35]总结文献发现,杉木林生态系统 10a 以前主要向大气释放 CO_2 ,10a 后则吸收固定 CO_2 ,不过不同

地区和树种的研究结果不尽相同。在本研究区,造林前期由于土壤碳大量分解释放,而人工林光合生产累积的碳仍较少,因此人工林在造林初期表现为一个碳源。而其后,随着 GEP 的显著增加,Re 则有下降趋势,NEP 的增长非常显著,3a 后人工林即表现为碳汇。造林 8a 后,该林地即为一年 NEP 超过 $600\text{gC}/\text{m}^2$ 的碳汇。

Kolari 等^[36]利用涡度相关观测和模型模拟分析了芬兰南部 4 处不同年龄的欧洲赤松的碳平衡特点,研究发现,4 年生的赤松林为一个碳源,NEP 为 $-262\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 12a, 40a 和 75a 的赤松林 GEP 比较接近,而呼吸决定了生态系统的碳平衡。12a 的赤松林为碳平衡,随后净碳吸收随着年龄的增长而升高,75 年林地的碳汇能力也没有受到年龄的限制。通过对千烟洲人工林生态系统碳平衡的模拟结果看,人工林生态系统的生长迅速,在种植后的 2—3a 后,人工林即为一个碳汇。

2.3 人工林生长及对 NEP 的影响

图 5a 可以看出,CEVSA2 模型基本模拟了该人工林生态系统叶面积指数和树高的动态过程。人工林生态系统最大 LAI 在最初的 4—5a 的变化基本可以忽略, LAI 增长很少。从模拟的结果看,在随后的 10a 左右时间 LAI 增长迅速,在 LAI 达到 2 以后,人工林的最大 LAI 增长更为迅速。2004 年模型模拟的最大 LAI 为 3.8,与观测值基本一致。20a 间,人工林最大 LAI 的变化趋势可以用人工林年龄的线性函数进行拟合,线性关系的 R^2 可以达到 0.98。树高与最大 LAI 的变化趋势一致,2004 年已达到 11.52m,与文献记录的千烟洲人工林的平均冠层高度相近^[21]。从模型模拟的最大 LAI 和树高的增长趋势看,目前千烟洲人工林正处于旺盛生长阶段,是植被生长最为迅速的时期。由图 5b 可以看出,植物的生长对生态系统的净碳交换具有显著的控制作用,年最大 LAI 的对数曲线很好地解释了年 NEP 的变化特征,拟合曲线的 R^2 达到 0.62。

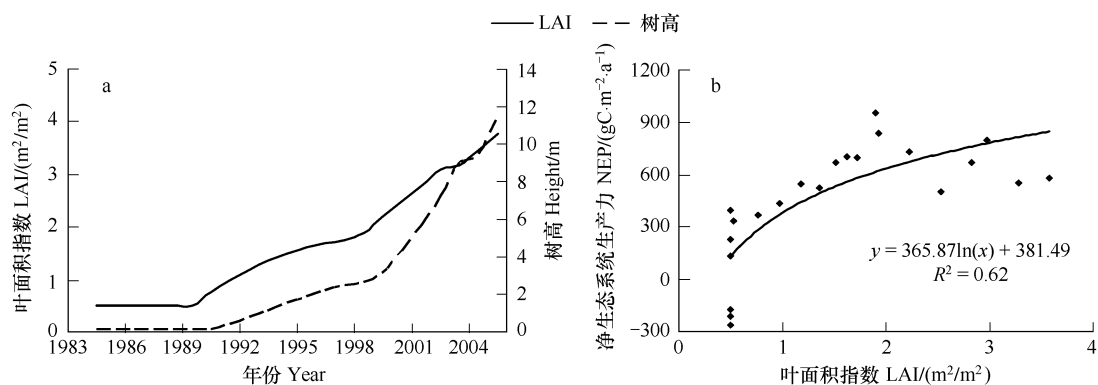


图 5 1983—2004 年千烟洲 LAI 和冠层高度的年际变化(a)及 LAI 增长对 NEP 变化的影响(b)

Fig. 5 Interannual variation of LAI and canopy height at QYZ site from 1983 to 2004

2.4 生态系统呼吸组分的变化

生态系统总呼吸的两个组分——自养呼吸(R_a)和异养呼吸(R_h)随年龄的增长也具有不同的变化趋势。图 6 表明,在造林初期,生态系统的异养呼吸要高于自养呼吸,随着年龄的增长,异养呼吸先下降后升高,而自养呼吸则随着年龄的增长而显著升高,其升高速率要大于异养呼吸的升高速率。由此造成呼吸不同组分的比例也随着年龄的增长而发生变化。在造林初期,生态系统的总呼吸以异养呼吸为主,异养呼吸占到总呼吸的 90% 以上,随着年龄的增长,异养呼吸的比例逐渐下降,而自养呼吸的比例逐渐升高,到 2004 年自养呼吸已经占到生态系统总呼吸的 70%,而异养呼吸只占 30%。

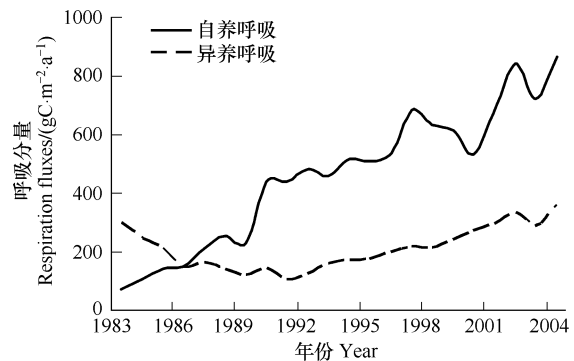


图 6 生态系统自养和异养呼吸的年际动态

Fig. 6 Interannual variations of ecosystem heterotrophic respiration and autotrophic respiration

由生长所决定的植被碳随着年龄而稳定增长,因此生态系统的维持呼吸和生长呼吸都保持稳定的增长趋势,并且随着年龄的增大,自养呼吸所占的比例也逐渐增大,因此由自养呼吸的变化决定了生态系统总呼吸在模拟时段内增长显著,并且相对于 GEP 对气候波动的敏感性,Re 保持相对的稳定。

3 结论

本研究基于改进后的 CEVSA2 模型,模拟分析了千烟洲地区自 1982 年造林至 2004 年以来,碳储量以及碳通量的变化特征。模拟结果表明,造林后植被碳持续增加;土壤碳先降低后升高,15a 后土壤碳恢复到造林初期水平,其后持续增长,造林显著增加了生态系统的碳储量。造林后总初级生产力、净初级生产力、自养呼吸均显著增加,异养呼吸和总生态系统呼吸先降低后增加。由于呼吸释放碳的大于光合固定的碳,生态系统在造林初期表现为一个碳源,其后生态系统的固碳能力显著增强,在造林 3a 后,生态系统即由碳源转为碳汇,吸收大气中的碳。

尽管造林初期,土壤碳储量下降,人工林生态系统释放碳,但是随着人工林年龄的增加,植被和土壤碳储量都显著增加,生态系统也由碳源变为碳汇,具有较强的碳吸收能力。因此,可以看出,人工林能够增加生态系统的固碳量,其在生长过程中具有较大的固碳潜力。

致谢:中国生态系统研究网络(CERN)、中国通量网(ChinaFLUX)提供通量和生态、气象常规观测数据。

References:

- [1] Guan B J. The present situation and analysis of world forest resources. *World Forestry Research*, 2003, 26(5): 1-5.
- [2] Morris S J, Bohm S, Haile-Mariam S, Paul E A. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1145-1156.
- [3] Harmon M E, Ferrell W K, Franklin J F. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science*, 1990, 247: 699-702.
- [4] Schulze E, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. *Science*, 2000, 289: 2058-2059.
- [5] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-328.
- [6] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [7] Farley K A, Kelly E F, Hofstede R G M. Soil organic carbon and water retention after conversion of grassland to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 2004, 7: 729-739.
- [8] Ren H, Peng S L, Xiang Y C. Biomass and net primary productivity in an acacia mangium plantation in Heshan, Guangdong, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 24(1): 18-21.
- [9] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The assessment of the impacts of land use change on the ecosystem carbon sink. *Engineering Science*, 2003, 5(9): 65-77.
- [10] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 593-599.
- [11] Yu Z Y, Yang Y S, Chen G S. Changes of carbon storage and carbon sequestration in plantation ecosystems on purple soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1837-1841.
- [12] Hu J Z. Carbon storage of artificial in rehabilitated lands in the upper reaches of the Yellow River. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(6): 1-8.
- [13] Wei H D, Ma X Q. A study on the carbon storage and distribution in Chinese Fir plantation ecosystem of different growing stages in mid-subtropical zone. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006, 28(2): 239-243, 267.
- [14] Wei H D, Ma X Q. Study on the carbon storage and distribution of Phoebe Bourmei plantation ecosystem of different growing stages. *Yantai Normal University Journal: Natural Science*, 2006, 22(2): 130-133.
- [15] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249-252.
- [16] Gu F X, Cao M K, Wen X F, Liu Y F, Tao B. A comparison between simulated and measured CO₂ and water flux in a sub-tropical coniferous forest. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2006, 49 (supp II): 241-251.
- [17] Tao B, Cao, M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981—2000. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(5): 745-753.
- [18] Gu F X, Cao M K, Yu G R, Wen X F, Tao B, Liu Y F, Zhang L M. Modeling carbon exchange in different forest ecosystems by CEVSA model: comparison with eddy covariance measurements. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(3): 223-234.
- [19] Arora V K, Boer G J. A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, 2005, 11: 39-59.
- [20] Dufrêne E, Davi H, François C, le Maire G, Le Dantec V, Granier A. Modelling carbon and water cycles in a beech forest Part I: Model

- description and uncertainty analysis on modeled NEE. *Ecological Modelling*, 2005, 185: 407-436.
- [21] Wen X F. Measurements of Carbon Sequestration by Long-term Eddy Covariance in a Mid-subtropical *Pinus* Plantation of Southeastern China. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [22] Liu Y F, Li J Y, Chen Y R, Lin Y M. The effects of forest rehabilitation on microclimate in red earth hilly area of China. *Journal of Natural Resource*, 2001, 16(5): 457-461.
- [23] Yang F T. The Effect of Land-use Change on the Terrestrial Carbon Cycle: An Example of Qianyanzhou Red Earth Hilly Area. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [24] Li J Y, Yuan X H. A comparative study on organic carbon storage in different land-use systems in red earth hilly area. *Resources Science*, 2001, 23(5): 73-76.
- [25] Morris S J, Bohm S, Haile-Mariam S, Paul E A. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils. *Global Change Biology*, 2007, 13, 1145-1156.
- [26] Harmon M E, Ferrell W K, Franklin J F. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science*, 1990, 247: 699-702.
- [27] Schulze E, Wirth C, Heimann M. managing forests after Kyoto. *Science*, 2000, 289: 2058-2059.
- [28] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*. 2002, 168: 241-257.
- [29] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [30] Grigal D F, Berguson W E. Soil carbon changes associated with short-rotation systems. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 1998, 14 (4): 371-377.
- [31] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 231-247.
- [32] Hu Y L, Zeng D H, Jiang T. Effects of afforested poplar plantations on the stock and distribution of C, N, P at Keerqin Sandy Lands. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4206-4214.
- [33] Huang M, Ji J J, Li K R, Liu Y F, Yang F T. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of South China. *Tellus*, 2007, 59B: 439-448.
- [34] Zeng H Q, Liu Q J, Feng Z W, Wang X K, Ma Z Q. GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region based on BIOME-BGC model. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [35] Wu M. Advances in soil carbon dynamics of Plantation. *World Forestry Research*, 2005, 18(3): 20-24.
- [36] Kolari P, Pumpanen J, Rannik Ü, Ilvesniemi H, Hari P, Berninger F. Carbon balance of different aged Scots pine forest in Southern Finland. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1106-1119.

参考文献:

- [1] 关百钧. 世界森林资源现状与分析. 世界林业研究, 2003, 26(5): 1-5.
- [8] 任海, 彭少麟, 向言词. 鹤山马占相思人工林的生物量和净初级生产力. 植物生态学报, 2002, 24(1): 18-21
- [9] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. 中国工程科学, 2003, 5(9): 65-77.
- [10] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳储量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [11] 于占源, 杨玉盛, 陈光水. 紫色土人工林生态系统碳库与碳吸存变化. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1837-1841.
- [12] 胡建忠. 黄河上游退耕地人工林的碳储量研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 1-8.
- [13] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳储量研究. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239-243, 267
- [14] 尉海东, 马祥庆. 不同发育阶段楠木人工林生态系统碳储量研究. 烟台师范学院学报, 2006, 22(2): 130-133.
- [18] 顾峰雪, 曹明奎, 于贵瑞, 温学发, 陶波, 刘允芬, 张雷明. 典型森林生态系统碳交换的机理模拟及其与观测的比较研究. 地球科学进展, 2007, 22(3): 223-234.
- [21] 温学发. 中亚热带红壤丘陵人工林生态系统 CO₂ 通量观测及其季节动态特征. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [22] 刘允芬, 李家永, 陈永瑞, 林耀明. 红壤丘陵区森林植被恢复的增湿效应初探. 自然资源学报, 2001, 16(5): 457-461.
- [23] 杨风亭. 千烟洲红壤丘陵区土地利用变化对陆地碳循环的影响. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [24] 李家永, 袁小华. 红壤丘陵区不同土地资源利用方式下有机碳储量的比较研究. 资源科学, 2001, 23(5): 73-76.
- [32] 胡亚林, 曾德慧, 姜涛. 科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C、N、P 储量和分配格局. 生态学报, 2009, 29(8): 4206-4214.
- [34] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林 GPP 和 NPP. 生态学报, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [35] 吴明. 人工林土壤碳库研究进展. 世界林业研究, 2005, 18(3): 20-24.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 23 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 23 2010

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