

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪 宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚 婧,李 颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘 露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘 波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张 健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张 明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟 希,张 淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李 兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈 林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊 伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨 磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘 帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳 林,王 信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余 杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄 蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张 义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭 建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

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/stxb201211211646

郭丽娟, 国庆喜. 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟. 生态学报, 2013, 33(13): 4090-4100.

Guo L J, Guo Q X. Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4090-4100.

集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟

郭丽娟^{1,2}, 国庆喜^{1,*}

(1. 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江工程学院, 哈尔滨 150050)

摘要: IBIS 模型是陆地碳循环模拟的有利工具, 土壤呼吸是陆地碳循环的关键生态学过程, 利用 IBIS 模型模拟估算土壤呼吸对陆地碳循环和全球变化研究具有重要意义。在地形数据、植被参数、土壤质地参数和气象数据支持下, 利用改造后的 IBIS 模型模拟 2004 年张家沟集水区 5 种森林类型的土壤呼吸, 以实测数据对模拟结果进行验证, 并分析土壤呼吸时空格局及其与土壤温湿度的关系。结果表明: (1) 改造后的 IBIS 模型模拟的土壤呼吸值与实测值相关性显著, 可较好地用于集水区尺度的森林土壤呼吸模拟估算。(2) 土壤呼吸年均值为 $571 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年土壤呼吸空间格局与生长季土壤呼吸空间格局相似, 均表现为高值区主要分布在北部、西南和东南区域, 低值区主要分布在沟谷附近, 该格局与集水区的地形、植被及其组合等因素有关。(3) 生长季内, 5 种森林类型土壤呼吸的季节性变化均呈单峰曲线形式, 土壤呼吸峰值均出现在 7 月, 其中落叶松林峰值最低, 为 85.5 gC/m^2 , 杂木林峰值最高, 为 146.3 gC/m^2 。(4) 5 种森林类型的土壤呼吸值与 5 cm 深土壤温度存在极显著的指数关系, 与土壤湿度的相关性较低, 土壤温度的变化可以解释土壤呼吸约 70% 的季节变化。

关键词: 土壤呼吸; IBIS 模型; 集水区; 季节动态; 空间变化

Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China

GUO Lijuan^{1,2}, GUO Qingxi^{1,*}

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China

Abstract: The Integrated Biosphere Simulator (IBIS) model is an important tool for terrestrial carbon cycle simulation. One of the key ecological processes of the terrestrial carbon cycle is soil respiration. Modeling soil respiration and revealing its space-time pattern using the IBIS model is of great significance to the study of the terrestrial carbon cycle and global change. However, the application of the IBIS model to a catchment with complicated terrain has not been attempted because of problems with the model mechanism. In this study, the IBIS model was improved by addition of a terrain analysis module, and modification of the redistribution module of soil water and the calculation module of solar radiation received at the ground surface. Soil respiration of the five forest types in the Zhangjiagou catchment of Heilongjiang province in northeast China was then simulated in 2004 using the improved IBIS model. The model was driven by terrain data, vegetation parameters, soil texture parameters and climate variables. The simulated values were validated with measurements, and the temporal-spatial patterns of forest soil respiration and the relationship between soil respiration and soil temperature and humidity were analyzed. The five forest types were: Larch plantation, Oak forest, Aspen-birch forest, Hardwood forest and Mixed deciduous forest. Results showed that: (1) The simulated daily soil respiration by the improved IBIS model had a significant relationship with the measured daily soil respiration. The improved IBIS model can be better

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAD37B01)

收稿日期: 2012-11-21; 修订日期: 2013-04-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gqx@nefu.edu.cn

used in simulating and estimating soil respiration of forests at the catchment scale, which may provide a favorable tool for carbon cycle simulation at the catchment scale. (2) The annual highest soil respiration of forests was $700 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and the annual mean soil respiration of forests was $571 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in the Zhangjiagou catchment. The spatial pattern of the annual soil respiration was similar to the spatial pattern of soil respiration for the growing season, which showed that high values of soil respiration were distributed in the north, southwest and southeast of the catchment, and the low values were largely in nearby valleys. The spatial pattern of soil respiration was closely related to topography, vegetation and other factors. (3) During the growing season, the five forest types showed a similar seasonal pattern in simulated soil respiration, characterized by a mono-peak curve, with a summer maximum and an early and late growing season minimum. The peak soil respiration value of the five forest types occurred in July, and was 146.3 gC/m^2 in the Mixed deciduous forest, $>121 \text{ gC/m}^2$ in the Oak forest, $>118.3 \text{ gC/m}^2$ in the Aspen-birch forest, $>114.9 \text{ gC/m}^2$ in the Hardwood forest and $>85.5 \text{ gC/m}^2$ in the Larch plantation. (4) In the growing season, the simulated soil respiration of the five forest types showed a significant index correlation ($P < 0.001$) with the simulated soil temperature at 5 cm depth, and could explain approximately 70% of the seasonal variation in soil respiration. The correlation coefficients varied from 0.6873 in the Hardwood forest to 0.7205 in the Larch plantation. There was no obvious correlation between the simulated soil respiration and the simulated soil moisture for all forest types at 5 cm depth. This showed that the dominant factor of seasonal variation in soil respiration was soil temperature and the effect of soil moisture on soil respiration was not notable.

Key Words: soil respiration; IBIS model; catchment; seasonal dynamics; spatial variation

土壤呼吸是指土壤向大气释放 CO_2 的过程^[1],主要由植物根系呼吸和土壤微生物呼吸产生,极少部分来自于土壤动物呼吸和化学氧化,是陆地碳循环的关键生态学过程^[2]。由于土壤拥有巨大的碳贮量,土壤呼吸在全球碳收支中扮演着重要角色,其变化对全球碳平衡具有重大的影响^[3]。因此,准确估算不同陆地生态系统土壤呼吸,了解土壤呼吸的时空格局,对全球碳平衡的预算、阐明全球碳循环的变化规律和全球气候变化潜在效应的评估具有重大意义^[4]。

利用模型估算土壤呼吸已成为碳循环研究的重要方法。统计模型是土壤呼吸模拟常用的模型之一,这类模型多数只是利用气候因子对土壤呼吸作用建立的水热统计模型^[5-7],对土壤呼吸估算误差较大,难以推广应用到区域或全球尺度。随着人们对生态系统碳循环过程作用机制研究的不断深入和完善,人们越来越多地使用生态系统过程模型^[8-10]模拟土壤呼吸,过程模型具有较完善的植物生理生态学基础,综合考虑了生物和非生物因素,机理清楚,模拟精度较高,成为探索生态系统对气候变化响应的重要工具。IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 模型是生态系统过程模型的典型代表,对陆地生态过程模拟具有独特的优越性,能够将不同时间尺度(从分钟到年)的植物生理、生态及生物物理过程有机结合起来^[11-12],体现了全球碳循环过程的复杂性,代表着全球碳循环模型的研究方向^[13],受到众多学者的普遍关注。在国外,IBIS 模型广泛应用于北美洲、欧洲和非洲地区的土壤呼吸及碳循环研究,涉及森林、草地和农田等生态系统^[14-19]。近年来,在我国的应用也逐渐增多^[20-25],主要集中在东北地区,如王萍^[20]利用 IBIS 模拟了大小兴安岭森林生态系统土壤呼吸,刘曦等^[21]运用 IBIS 模拟了黑龙江和吉林两省部分地区的森林土壤呼吸,均取得较好的模拟效果。

虽然 IBIS 模型能够快速实现区域或全球尺度上的碳循环模拟,但由于模型只能模拟离散的样点(plot)^[21-23],无法针对连续的植被空间开展模拟,没有考虑地形对土壤水分流动、太阳辐射差异等的影响,造成对森林碳循环模拟的机理上存在欠缺。森林集水区涵盖溪流、沟谷和山坡等多种地形条件,是将地形因素融入 IBIS 模型模拟森林碳循环的理想尺度。因此,进一步改造完善 IBIS 模型,利用 IBIS 模型在集水区尺度模拟森林土壤呼吸,可以拓展 IBIS 模型的森林碳循环研究尺度,为准确估算复杂地形条件下森林土壤呼吸提供有利工具,为模型以集水区为模拟基本单元向区域或全球尺度外推提供新的研究思路。

本研究引入 GIS 技术,基于集水区尺度改造 IBIS 模型,以东北东部张家沟集水区 5 种森林类型为研究对

象,在模型验证的基础上,估算 2004 年张家沟集水区森林土壤呼吸,分析土壤呼吸时空格局及其影响因子,探讨 IBIS 模型在集水区尺度碳循环研究的适用性,旨在细致刻画地形的空间变异和植被格局对森林土壤呼吸的影响,量化东北东部森林土壤碳通量,揭示东北东部森林土壤碳通量的变异规律,为气候变化下区域碳循环研究提供科学依据和可行的预测方法。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省尚志市帽儿山实验林场老爷岭生态站张家沟集水区,面积约 150 hm²,海拔 400—636 m。老爷岭生态站(127°30′—127°34′E,45°20′—45°25′N)属于大陆性气候,四季较为分明,年均气温 2.8℃,年均湿度 70%,常年偏西南风,年均降水量 723.8 mm,年蒸发量 1093.9 mm,年均日照时数 2471.3 h,无霜期 120—140 d。该地区土壤多为肥沃的暗棕色森林土,植被属于长白山植物区系,原地带性顶级群落为茂密的红松林和阔叶红松林。19 世纪末到全国解放前,原始森林被大规模破坏(采伐、火烧、开垦等),直到全国解放后,经过多年的封山育林恢复为天然次生林相,由于天然次生林未经人类强烈干扰而成为东北东部典型的天然次生林区,主要树种有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭(*Acer mono*)、春榆(*Ulmus pumila*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、紫椴(*Tilia amurensis*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)等。

2 研究方法

2.1 IBIS 模型

1996 年,美国威斯康星-麦迪逊大学 Foley 等开发研制了 IBIS 模型^[11]。该模型实现一个集成框架内地表水热过程、陆地生物地球化学循环和植被动态的模拟,主要包含 5 个模块(图 1)^[12]:地表模块(土壤、植被与大气之间的能量及水分交换)、植被冠层生理模块(冠层光合作用与气孔导度)、植被物候模块(植物萌发与落叶)、植被动态模块(植被功能型间的分配、转换与竞争)和土壤地球生物化学模块(地面凋落物及地下各个碳库之间的碳氮分解、流动和交换)。

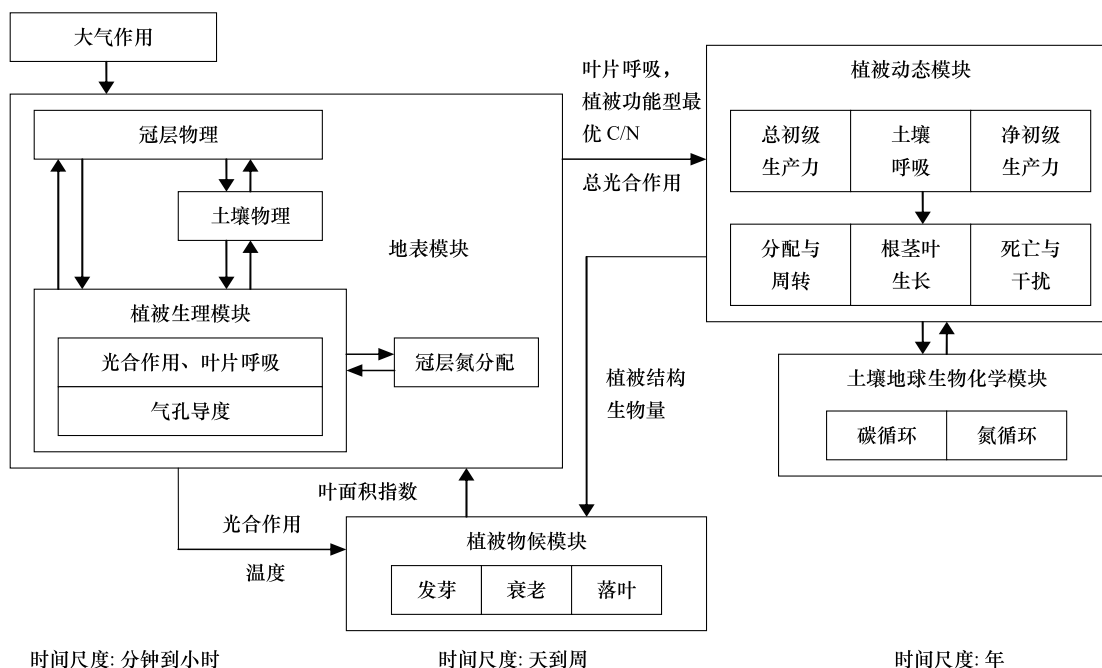


图 1 IBIS 模型原理图^[12]

Fig. 1 Schematic of Integrated Biosphere Simulator^[12]

模型采用缓性碳库(微生物活性碳库、被保护碳库、未被保护有机质碳库)和惰性碳库来表达土壤有机碳的周转特征。土壤碳库主要分布于土壤表面和地下的枯落物中,由枯枝落叶、死亡的细根和惰性较强的土壤

有机质库组成。枯落物和细根被分为易分解(DPM)、木质化(RPM)和结构性(SPM)3个部分,每部分都有特定的C/N。其中易分解及结构性部分中的枯落物碳直接供微生物分解,木质化部分转化为土壤有机质。由于模型区分了缓性碳库和惰性碳库,强调了微生物碳库和活跃碳库在土壤呼吸中的作用,因此有效提高了有机碳周转的模拟精度。

2.2 模型改造

IBIS 模型以样点作为基本模拟单位,然后通过设置样点点阵实现尺度上推,完成区域或更大尺度上的碳过程模拟。但模型中样点无地形起伏变化,样点之间无土壤水分流动,不考虑地形对太阳辐射的影响,简化了一些关键的生态学过程。本次模型改造的重点是引入 GIS 技术,以一个集水区作为模拟的基本尺度,将集水区分为规则的格网,以一个单元格(10 m×10 m)作为模拟的最小单位,实现 IBIS 模型对复杂地形条件下,连续植被空间碳水过程的细致模拟,充分体现碳过程的空间异质性。改造具体内容如下:

(1)模型增加了地形分析模块 由集水区 DEM 数据生成区域的坡向、坡度栅格数据,由海拔数据计算出每个单元格的东、西地平线角度栅格数据,分别读取集水区的海拔、坡度、坡向、东坡角、西坡角、东南坡角、西南坡角、南坡角等地形栅格数据。

(2)模型增加了土壤水分再分配计算模块。地形通过影响降水再分配,直接影响了土壤水分的空间分布,而水分的空间分布又会对集水区内的地表径流、土壤特性和植被的净初级生产力等生态学过程产生重要影响 模型通过读取集水区水流向、汇流值、地形等数据,基于 Fairfield 和 Leymarie^[26]提出的 D8 算法,将每个栅格单元同其相邻的 8 个栅格单元之间坡降进行比较,被处理的栅格单元中心同相邻的 8 个栅格单元中坡降最大的一个栅格单元中心之间直线方向就定义为被处理栅格单元的水流方向,有效的水流方向分为为东北、东、东南、南、西南、西、西北和北,最终得到土壤水分在不同单元格之间的径流与水量分配动态。

(3)模型改进了地表太阳辐射计算模块 利用改进的山地小气候模型^[27],对基准气象站每日最高(低)气温和降水量等数据进行空间插值,计算出集区内每个单元格的日最高(低)气温、降水量以及日均温等气象数据,计算随高度变化的大气压力比值,调整坡度、坡向、东西地平线的遮蔽效应,对大气透明度进行光学空气质量与云量的矫正,把大气顶端辐射通量的衰减作为大气透明度的函数处理,计算坡面上和水平面上的潜在辐射量,再用散射辐射比例、直射辐射比例关系分别计算直射辐射和散射辐射,得到冠层平均太阳辐射^[28]。

$$\text{STAD_DIR} = \text{SLOPE_PORTRAD} \times \text{T_FINAL} \times \text{PDIR} \quad (1)$$

式中,STAD_DIR 表示直接辐射(W/m^2),SLOPE_POTRAD 表示坡面潜在辐射量(W/m^2),T_FINAL 表示每日总的大气透明度(无量纲),PDIR 表示直接辐射的比例(无量纲)。

$$\text{STAD_DIF} = \text{FLAT_PORTRAD} \times \text{T_FINAL} \times \text{PDIF} \quad (2)$$

式中,STAD_DIF 表示散射辐射(W/m^2),FLAT_POTRAD 表示平面潜在辐射量(W/m^2),PDIF 表示散射辐射的比例,T_FINAL 表示每日总的大气透明度(无量纲),PDIF 表示散射辐射的比例(无量纲)。

$$\text{RAD} = \text{STAD_DIR} + \text{STAD_DIF} \quad (3)$$

式中,RAD 表示冠层平均太阳辐射(W/m^2)。

(4)模型筛选了适合中国东北地区的植被功能型(PFTs) 共 8 种,分别是寒温带常绿针叶树种、寒温带落叶针叶树种、寒温带落叶阔叶树种、温带常绿针叶树种、温带落叶阔叶树种、温带落叶针叶树种、落叶灌木和草本。设置了中国东北东部森林集水区的 5 种森林类型,分别是落叶松林、蒙古栎林、杨桦林、硬阔林和杂木林。

此外,IBIS 原模型采用 Visual Fortran 语言编程,源程序中数据格式为 NetCDF 格式,改造后的模型采用 Visual C#语言编程,数据改为常用的纯文本格式。改造后的 IBIS 模型结构清晰,更加方便使用。

2.3 数据

(1)模型输入数据 模型的主要输入数据包括地形数据、气象数据、植被类型和土壤质地参数等。地形数据通过地形图矢量化处理,在 ArcGIS 软件支持下得到张家沟集水区 10 m 空间分辨率的 DEM 数据(图 2),

基于 DEM 数据,提取坡度、坡向和汇流值等栅格图层;气象数据来源于老爷岭气象站实测气象数据,主要包括大气温湿度、降水量、风速和云覆盖率等气象变量;植被类型来源于矢量化的张家沟集水区林相图(共 21 个小班),将每个小班按照优势树种归类合并,统一划分为 5 种森林类型(图 3);土壤质地参数由中国土壤质地图及以往实测数据得到。模型其它输入参数,如植被碳分配系数、比叶面积、气孔导度、叶面积指数、光合生理参数和凋落物储量等数据来源于文献^[12,23]。

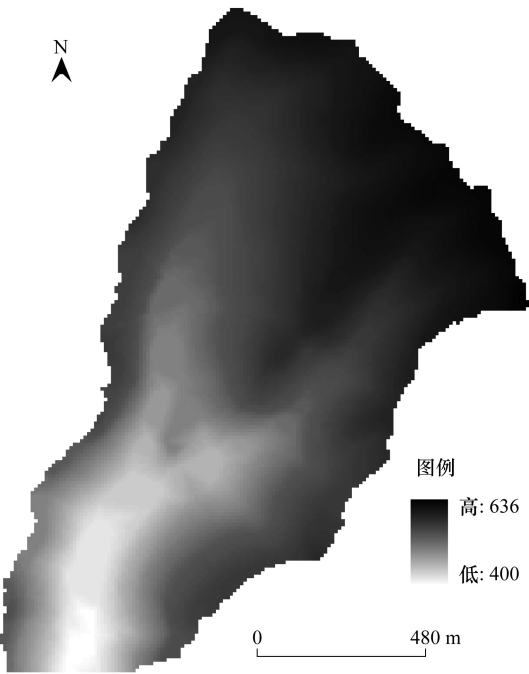


图2 张家沟集水区 DEM(m)数据

Fig. 2 The DEM(m) of the Zhangjiagou catchment

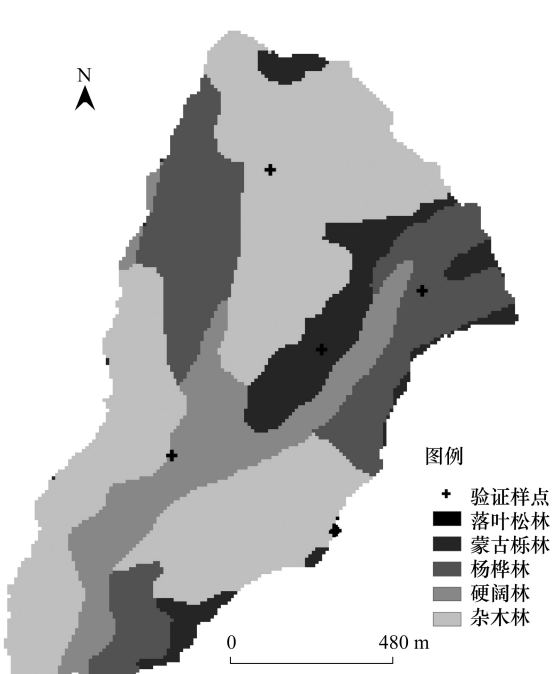


图3 张家沟集水区森林类型分布图

Fig. 3 Distribution of forest type in the Zhangjiagou catchment

(2)模型验证数据 利用 2004 年帽儿山生态站实测的 5 种森林类型土壤呼吸数据^[29]对模型模拟验证样点的土壤呼吸结果验证分析。实测地 5 种森林类型的立地条件及种类组成见表 1。5 种森林类型验证样点的选择是利用 GIS 技术,将森林类型分布图、坡度、坡位、坡向图层及研究区栅格编号的 GRID 图层进行叠加处理,选取与实测数据相同树种组成和立地环境条件相近的森林类型。IBIS 模型按照追踪模拟动态指定栅格方式估算 5 种森林类型的土壤呼吸值。

表 1 5 种森林类型种类组成及立地条件

Table 1 Vegetation composition and site characteristics of the five forest types

森林类型 Forest type	坡位 Location	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	林龄 Age /a	胸径 Diameter breast height /cm	断面积 Basal area /(m ² /hm ²)	优势树种 Dominant species
落叶松林 Larch plantation	下坡位	3	西南向	47	15.1	29.0	落叶松 <i>Larix olgensis</i>
蒙古栎林 Oak forest	上坡位	23	南向	56	14.0	38.2	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>
杨桦林 Aspen-birch forest	中坡位	16	西南向	55	11.2	27.6	白桦 <i>Betula platyphylla</i> 山杨 <i>Populus davidiana</i>
硬阔林 Hardwood forest	下坡位	7	北向	50	12.8	26.6	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i> 胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i> 黄檗 <i>Phellodendron amurense</i>
杂木林 Mixed deciduous forest	中坡位	14	西南向	55	13.1	34.9	无优势种 No dominant species

3 结果与分析

3.1 模型验证

在以往的研究中,IBIS 模型已经应用于中国东北东部森林生态系统的土壤呼吸模拟,通过模型验证,均取得了较好的模拟效果^[22-23]。本研究基于帽儿山生态站 5 种森林类型 2004 年生长季土壤呼吸日实测数据,并将日实测值与 IBIS 模型验证样点模拟的张家沟集水区森林土壤呼吸结果一一对应,进行模拟值的验证。由图 4 可知,5 种森林类型的土壤呼吸日模拟值与实测值吻合较好,相关性达到极显著水平($R^2=0.8363$, $P<0.01$, $n=42$),说明改造后的 IBIS 模型对张家沟集水区森林土壤呼吸的模拟结果是可靠的,该模型适用于集水区尺度的东北东部森林土壤呼吸的估算。

3.2 土壤呼吸的空间变化

3.2.1 年土壤呼吸空间格局

IBIS 模型模拟的 2004 年张家沟集水区土壤呼吸最高值达 $700 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,最低值为 $0 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均值为 $571 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由图 5 可知,研究区地形上整体呈现比较平缓的钟形,土壤呼吸的高值区($>571 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)主要分布在集水区的北部、西南和东南区域,而低值区($<571 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)主要分布在集水区的中心区,呈“Y”形分布,在溪流处达到最低值。集水区土壤呼吸的空间分布格局与该区域的水热条件差异和植被类型分布紧密相关,其中土壤呼吸高值区域的植被类型为杂木林,地形条件多为阳坡,坡度较大,水热条件较好。而低值区域植被类型为硬阔林等,多处于沟谷附近,辐射相对较少。

3.2.2 生长季土壤呼吸空间变异规律

本研究以 2004 年生长季每月 15 日为例,分析模型模拟的集水区土壤呼吸在不同时期的空间变异情况。由图 6 可知,研究区土壤呼吸日最高值在生长季呈现出先增加后逐渐减小的变化趋势,但空间格局变化不显著。5 月的高值区范围较大,中心的沟谷区(主要分布着硬阔林)附近土壤呼吸值较高,6—10 月间高值区范围明显减少,整体上与年土壤呼吸的空间分布格局(图 5)基本一致。其中 7、8 月的高值区(杂木林为主)、低值区(除杂木林外的其余 4 种林型)分布较为集中且均匀,分布格局最为相近。尤其值得一提的是,7 月是在整个生长季中同一林型内部土壤呼吸值差异最小的月份,这可能是 7 月的土壤呼吸值主要受到高温高湿的影响,地形等其它环境要素对其影响不大。

3.3 土壤呼吸的季节动态

对张家沟集水区 5 种森林类型土壤呼吸生长季的模拟结果表明(图 7),研究区土壤呼吸呈现明显的季节

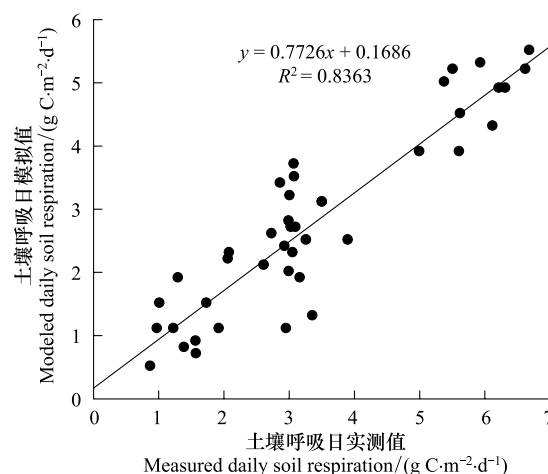


图 4 土壤呼吸模拟值与土壤呼吸实测值比较

Fig. 4 Comparison of modeled and measured soil respiration

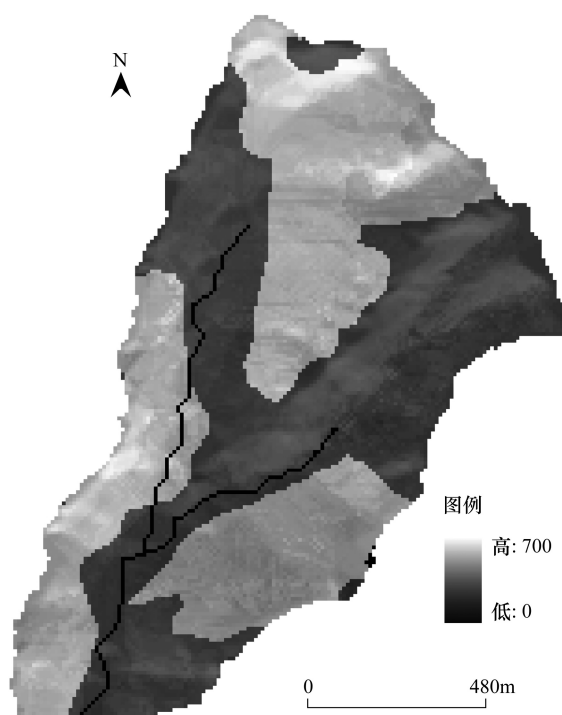


图 5 年土壤呼吸($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)空间分布图

Fig. 5 Spatial pattern of annual soil respiration ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) in the Zhangjiagou catchment in 2004

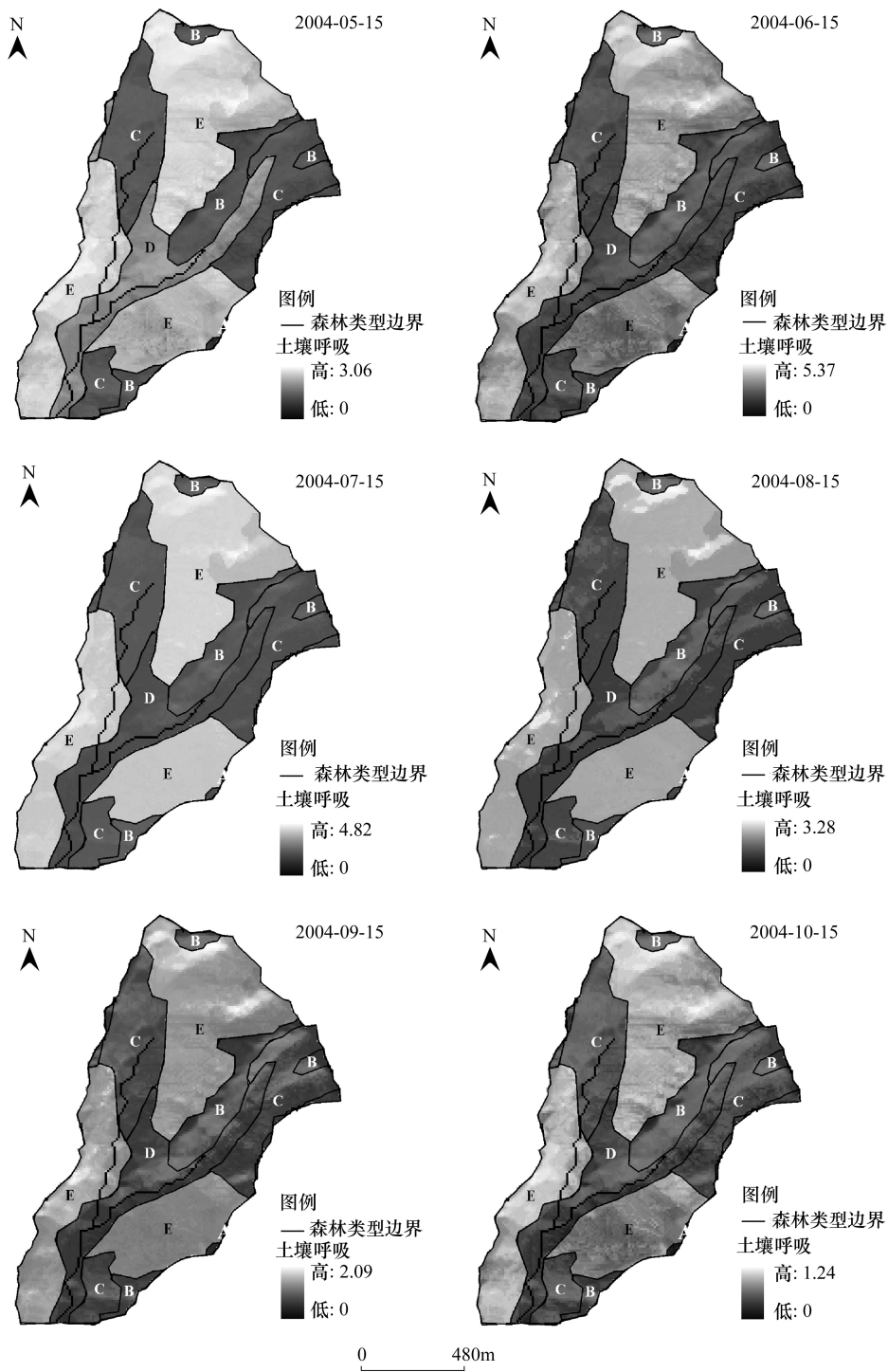


图 6 生长季土壤呼吸 ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) 空间分布图

Fig. 6 Spatial pattern of daily soil respiration ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) for the growing season in the Zhangjiagou catchment in 2004

A:落叶松林 Larch plantation; B:蒙古栎林 Oak forest; C:杨桦林 Aspen-birch forest; D:硬阔林 Hardwood forest; E:杂木林 Mixed deciduous forest

变化,季节变化曲线呈单峰形式,与气温的季节变化基本一致。总体来看,6月、7月和8月的土壤呼吸值明显高于5月、9月和10月,5种森林类型的土壤呼吸峰值均出现在7月,杂木林的土壤呼吸峰值最高,落叶松林的土壤呼吸峰值最低。各森林类型土壤呼吸变化范围为:杂木林 $39.7\text{--}146.3 \text{ gC/m}^2$,蒙古栎林 $33.8\text{--}121$

gC/m^2 , 杨桦林 33.7—118.3 gC/m^2 , 硬阔林 29—114.9 gC/m^2 , 落叶松林 22.4—85.5 gC/m^2 。

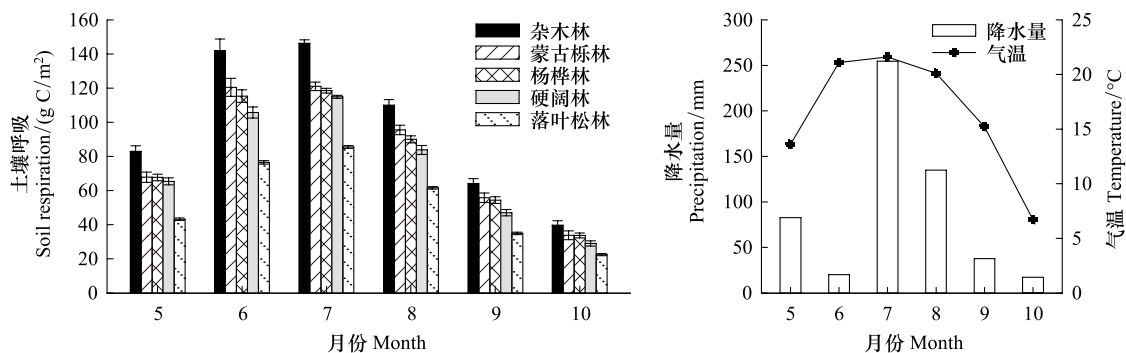


图7 不同森林类型土壤呼吸、气温和降水量的季节变化

Fig.7 Seasonal changes of soil respiration for different forest type, temperature and precipitation in the Zhangjiagou catchment in 2004

3.4 土壤温度、土壤湿度对土壤呼吸的影响

利用 IBIS 模型模拟的生长季内 5 种森林类型土壤呼吸值与土壤温度(地下 5 cm)建立回归模型(图 8), 结果表明:土壤呼吸与土壤温度间存在极显著($P < 0.001$)的指数正相关关系。复相关系数 R^2 分别为:硬阔林 0.6873, 杂木林 0.692, 杨桦林 0.7044, 蒙古栎林 0.7052, 落叶松林 0.7205。

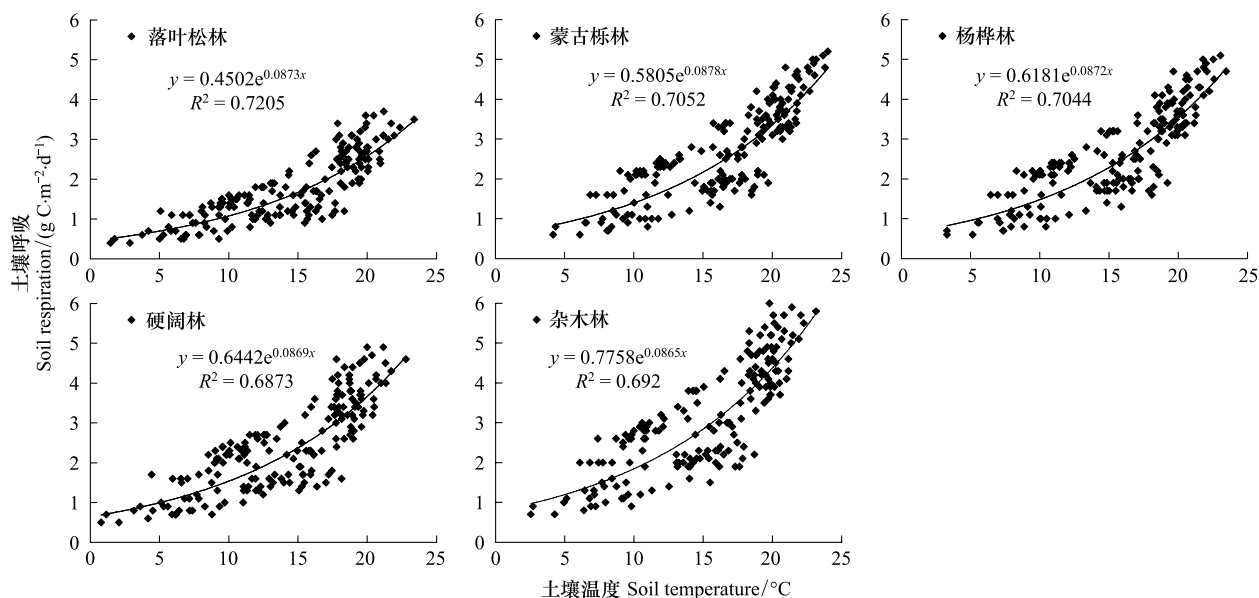


图8 不同森林类型生长季土壤呼吸与土壤温度关系

Fig.8 The relationship between soil respiration and soil temperature in different forest type for the growing season in 2004

土壤湿度对土壤呼吸的影响比较复杂,当土壤出现干湿交替时,土壤呼吸也会出现与土壤干湿交替类似的变化,这可能与干旱时受抑制的土壤微生物和酶活性突遇增湿而迅速增强有关。从 IBIS 模型模拟的生长季内 5 种森林类型土壤呼吸与土壤湿度(地下 5 cm)的回归模型可以看出(表 2),复相关系数 R^2 在 0.0715—0.1205 之间,土壤湿度与土壤呼吸没有明显的指数相关关系,土壤湿度对土壤呼吸的解释作用较低。这可能是由于集水区水分比较充足,土壤湿度不是限制土壤呼吸的主导因子,土壤湿度对土壤呼吸的影响往往被土壤温度的影响所遮盖。

4 结论与讨论

本研究利用改造后的 IBIS 模型模拟 2004 年张家沟集水区森林土壤呼吸,土壤呼吸模拟值与实测值拟合较好。总体来看,模型模拟结果基本可靠,适用于集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的估算,能够较好地反

映张家沟集水区土壤呼吸的时空格局及其影响因素。

表 2 不同森林类型生长季土壤呼吸与土壤湿度关系

Table 2 The relationship between soil respiration and soil moisture in different forest type for the growing season in 2004

森林类型 Forest type	方程 Equation	R^2
落叶松林 Larch plantation	$y = 0.3394e^{0.0215x}$	0.1205
蒙古栎林 Oak forest	$y = 0.9101e^{0.015x}$	0.0727
杨桦林 Aspen-birch forest	$y = 0.8395e^{0.0159x}$	0.086
硬阔林 Hardwood forest	$y = 0.7231e^{0.0157x}$	0.0715
杂木林 Mixed deciduous forest	$y = 0.9152e^{0.0171x}$	0.0976

从细微尺度到集水区或者景观水平的各种空间尺度上土壤呼吸存在着异质性^[30]。引起不同空间尺度上土壤呼吸异质性的原因是不同的,细根的空间分布、植物光合作用、叶面积指数、凋落物、土壤质地、土壤微生物组成及地形因子等均能解释土壤呼吸的空间异质性^[31-32]。在本研究中,将改造后的 IBIS 模型应用于地形变化复杂的集水区尺度,土壤呼吸空间分布格局充分体现了地形因子、植被及其组合对土壤呼吸的影响,空间异质性明显。研究区年土壤呼吸格局和日土壤呼吸格局具有相似特点,低值区呈“Y”形分布,高值区为楔形嵌入式,主要原因是集水区的地形差异引起太阳辐射、温度、土壤水分和植被分布的不同,干旱、辐射多的山脊分布着蒙古栎林,低温潮湿的沟谷区分布着硬阔林,山地主要是杨桦林,杂木林生长较为广泛,水热条件较好。在土壤呼吸空间分布图上(图 5),土壤呼吸高值与低值区域分界边线明显,最直接的原因是受到模型植被数据影响。本研究采用小班数据和林相图为植被源数据,数据精度虽高,但造成土壤呼吸空间分布与植被类型图相近,土壤呼吸值变化突兀。今后应结合高分辨率的遥感影像提取植被叶面积指数^[33],使得各植被类型土壤呼吸值空间变化更加真实。进一步细化地表模块,明确不同地形条件下土壤质地、水分及其理化性质对土壤呼吸的影响,提高模型模拟精度。

本研究中,模型模拟 5 种森林类型土壤呼吸的季节性变化明显,呈单峰曲线趋势,即植物生长旺盛时期(夏季)土壤呼吸最高,而生长季初期和末期土壤呼吸最低,这与绝大多数温带森林生态系统的研究结果基本一致^[34-36]。这是因为温带森林生态系统的温度在不同季节间均存在明显差异,同时,影响土壤呼吸的生物因素,如植物的生长代谢及微生物的活动等,在生长季的不同时期受温度影响,随着温度升高而增强,从而导致土壤呼吸具有明显的季节性变化。具体表现为 5 月初植物开始生长,土壤呼吸增加;6 月温度升高明显,土壤呼吸增加显著;7 月高温、高湿的环境条件最适于有机物分解、根系呼吸和微生物活动,植物生长进入旺盛期,因而土壤呼吸作用在此时达到较大值;8—9 月,随着温度降低和降水减少,限制了土壤有机物分解、根系呼吸和微生物活动,土壤呼吸作用减弱;10 月植物进入休眠期,土壤呼吸持续下降。在生长季中,5 种森林类型土壤呼吸最大值为杂木林,其次为蒙古栎,最小值为落叶松林。主要原因是不同植被类型的光合特性不同,光合能力强的植被,它的光合产物向土壤输送量就多。同时,不同植被类型条件下的土壤质地、有机碳含量、植物碳分配格局、凋落物产量及养分的差异也会引起土壤呼吸差异。史宝库等^[34]在小兴安岭丰林自然保护区的研究中也发现 5 种林型中,落叶松林的土壤呼吸值最低。周海霞等^[36]在帽儿山也得到人工落叶松林土壤呼吸要小于其它次生林的土壤呼吸,这些研究结果与本研究的模拟结果相一致,也在一定程度上说明模型模拟结果的可靠性。

土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸变化的主要环境因子。本研究采用模型模拟的 5 种森林类型生长季逐日土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度分别进行的回归分析,结果表明土壤呼吸与土壤温度有较高的相关性,存在显著的指数关系,土壤温度可以解释 5 种森林类型土壤呼吸约 70% 的季节变化,土壤呼吸与土壤湿度的相关性较低。该结论与其它研究结果相近,如史宝库等^[34]在小兴安岭丰林自然保护区的研究中发现 5 种林型的土壤温度变化能够解释约 64% 左右的季节变化。张宪权等^[37]的研究表明,东北地区 4 种主要林分的土壤呼吸与温度呈指数相关,但与土壤湿度的相关性较差。本研究中,集水区 2004 年 6 月降水极少(图 7),土

壤湿度也是生长季最低的,但是土壤呼吸值却仅次于7月,这可能是由于集水区水分比较充足,水分不是限制土壤呼吸的关键因子,土壤湿度对土壤呼吸的影响往往被土壤温度的影响所遮盖。由此可见,土壤温度是集水区土壤呼吸季节变化的主导因子^[38],土壤湿度对土壤呼吸的影响不显著。

References:

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77-91.
- [2] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3-27.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [4] Han G X, Zhou G S. Review of spatial and temporal variations of soil respiration and driving mechanisms. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 197-205.
- [5] Tang J W, Misson L, Gershenson A, Cheng W X, Goldstein A H. Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3/4): 212-227.
- [6] Jiang Y, Wang B, Wang Y R. Spatial and temporal variation of soil respiration and models of *Phyllostachys pubescens* in Dagangshan of Jiangxi. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2010, 34(6): 47-52.
- [7] Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, Mouvondy W J, Saint-André L, Joffre R, Jourdan C, Bonnefond J M, Berbigier P, Hamel O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1/3): 149-160.
- [8] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhardt T M, Schultz R C. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields. *Plant and Soil*, 2001, 229(1): 117-124.
- [9] Wang Y, Zhang N, Yu G R. Simulation of carbon cycle in Qianyanzhou artificial masson pine forest ecosystem and sensitivity analysis of model parameters. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1656-1666.
- [10] Hashimoto S, Ugawa S, Morisada K, Wattenbach M, Smith P, Matsuura Y. Potential carbon stock in Japanese forest soils-simulated impact of forest management and climate change using the CENTURY model. *Soil Use and Management*, 2012, 28(1): 45-53.
- [11] Foley J A, Prentice 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.
- [12] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [13] Mao L X, Sun Y L, Yan X D. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [14] El Maayar M, Price D T, Delire C, Foley J A, Black T A, Bessemoulin P. Validation of the integrated biosphere simulator over Canadian deciduous and coniferous boreal forest stands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D13): 14339-14355.
- [15] Delire C, Foley J A. Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D14): 16895-16909.
- [16] Snyder P K, Foley J A, Hitchman M H, Delire C. Analyzing the effects of complete tropical forest removal on the regional climate using a detailed three-dimensional energy budget: An application to Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D21): D21102.
- [17] Liu J X, Price D T, Chen J M. Nitrogen controls on ecosystem carbon sequestration: A model implementation and application to Saskatchewan, Canada. *Ecological Modelling*, 2005, 186(2): 178-195.
- [18] Kucharik C J, Barford C C, El Maayar M, Wofsy S C, Monson R K, Baldocchi D D. A multiyear evaluation of a dynamic global vegetation model at three AmeriFlux forest sites: Vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange. *Ecological Modelling*, 2006, 196(1/2): 1-31.
- [19] Twine T E, Kucharik C J. Climate impacts on net primary productivity trends in natural and managed ecosystems of the central and eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(12): 2143-2161.
- [20] Wang P. Simulation of Carbon Balance of Forest Ecosystems in Daxing'an and Xiaoxing'an Mountains. Haerbin: Northeast Forestry University, 2009: 20-25.
- [21] Liu X, Guo Q X, Liu J W. Simulation of spatial pattern of soil respiration in forests in the eastern part of northeast China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(12): 58-61, 64-64.
- [22] Guo Q X, Zhang H Y, Wang X C, Wang C K. Simulation of soil respiration for typical forests in Northeast China: Localized application of IBIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2295-2303.

- [23] Liu X, Guo Q X, Wang C K. Simulating net primary production and soil-surface CO₂ flux of temperate forests in northeastern China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(1): 30-39.
- [24] Lu X H, Jiang H, Liu J X, Zhou G M, Zhu Q, Peng C H, Wei X H, Chang J, Liu S R, Liu S G, Zhang Z, Wang K, Zhang X Y, Solomon A. Spatial and temporal variability of nitrogen deposition and its impacts on the carbon budget of China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1997-2030.
- [25] Liu W L, Zhang L B, Gong B. IBIS model-based simulation study on variation of ecological carbon sink potential in Shenzhen city. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 260-261: 981-987.
- [26] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 1991, 27(5): 709-717.
- [27] 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.
- [28] Glassy J M, Running S W. Validating diurnal climatology logic of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon. *Ecological Applications*, 1994, 4(2): 248-257.
- [29] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2103-2114.
- [30] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [31] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [32] Laik R, Kumar K, Das D K, Chaturvedi O P. Labile soil organic matter pools in a calcioriented after 18 years of afforestation by different plantations. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 71-78.
- [33] Liu S R, Wang H, Luan J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [34] Shi B K, Jin G Z, Wang Z Y. Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5416-5428.
- [35] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [36] Zhou H X, Zhang Y D, Sun H L, Wu S Y. Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [37] Zhang X Q, Wang W J, Zhu Y G, Zhang W L. The difference between different components of soil respiration in several types of forests in northeastern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(2): 46-47, 73-73.
- [38] Jassal R S, Black T A, Novak M D, Gaumont-Guay D, Nesic Z. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1305-1318.

参考文献:

- [4] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 197-205.
- [6] 姜艳, 王兵, 汪玉如. 江西大岗山毛竹林土壤呼吸时空变异及模型模拟. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(6): 47-52.
- [9] 王媛, 张娜, 于贵瑞. 千烟洲马尾松人工林生态系统的碳循环模拟及模型参数的敏感性分析. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1656-1666.
- [13] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2189-2195.
- [20] 王萍. 大小兴安岭森林生态系统碳平衡模拟研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009: 20-25.
- [21] 刘曦, 国庆喜, 刘经纬. 东北东部森林土壤呼吸空间分布格局的模拟. *东北林业大学学报*, 2010, 38(12): 58-61, 64-64.
- [22] 国庆喜, 张海燕, 王兴昌, 王传宽. 东北典型森林土壤呼吸的模拟——IBIS模型的局域化应用. *生态学报*, 2010, 30(9): 2295-2303.
- [27] 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.
- [33] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [34] 史宝库, 金光泽, 汪兆洋. 小兴安岭5种林型土壤呼吸时空变异. *生态学报*, 2012, 32(17): 5416-5428.
- [36] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 吴世义. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [37] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 张万里. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性. *东北林业大学学报*, 2005, 33(2): 46-47, 73-73.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《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工作者,探索生态学奥秘,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

本期责任副主编 彭少麟

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 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元