

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

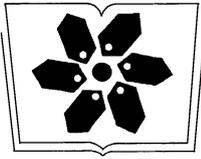
## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

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 32 卷 第 23 期      2012 年 12 月 (半月刊)

## 目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测 .....	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响 .....	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟 .....	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响 .....	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响 .....	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变 .....	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟 .....	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例 .....	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性 .....	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例 .....	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究 .....	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子 .....	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响 .....	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化 .....	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响 .....	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用 .....	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响 .....	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应 .....	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征 .....	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例 .....	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响 .....	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响 .....	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型 .....	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性 .....	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响 .....	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序 .....	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响 .....	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性 .....	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素 .....	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析 .....	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应 .....	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例 .....	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响 .....	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化 .....	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较 .....	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险 .....	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
<b>专论与综述</b>		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述 .....	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述 .....	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



**封面图说:** 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201203230397

任小丽, 何洪林, 刘敏, 张黎, 周磊, 于贵瑞, 王辉民. 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟. 生态学报, 2012, 32(23): 7313-7326.

Ren X L, He H L, Liu M, Zhang L, Zhou L, Yu G R, Wang H M. Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7313-7326.

## 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林 碳水通量模拟

任小丽<sup>1,2</sup>, 何洪林<sup>1,\*</sup>, 刘敏<sup>3</sup>, 张黎<sup>1</sup>, 周磊<sup>1,2</sup>, 于贵瑞<sup>1</sup>, 王辉民<sup>1</sup>

(1. 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 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 华东师范大学, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

**摘要:**人工林生态系统是我国森林生态系统的重要组成部分,在全球碳平衡中的作用越来越受到重视。利用千烟洲亚热带人工针叶林通量观测站的碳水通量和气象观测数据,通过模型数据融合方法对碳水循环过程模型——SIPNET 模型关键参数进行反演,模拟了 2004—2009 年千烟洲人工林生态系统的碳水通量。结果表明:仅用碳水通量观测数据优化模型参数时,净生态系统碳交换量(NEE)模拟效果较好( $R^2=0.934$ ),而生态系统蒸散(ET)模拟效果较差( $R^2=0.188$ );同时用碳水通量观测数据优化时,NEE 模拟效果稍差( $R^2=0.929$ ),但 ET 模拟效果显著提升( $R^2=0.824$ ),说明利用碳水通量观测数据同时优化,SIPNET 模型才能较好地模拟试验站点碳水通量。在此基础上,开展了人工林生态系统碳通量对降水变化响应的敏感性分析,发现降水量减少对光合作用的影响比对呼吸作用的影响更为强烈,且碳水通量同时参与优化时模型才能较好地模拟碳通量随降水减少而快速降低的趋势,表明如果不能同时利用碳水通量进行参数优化,模型无法正确揭示生态系统碳循环对降水变异的响应。

**关键词:**人工林;碳水通量;模型数据融合;SIPNET 模型

## Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach

REN Xiaoli<sup>1,2</sup>, HE Honglin<sup>1,\*</sup>, LIU Min<sup>3</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHOU Lei<sup>1,2</sup>, YU Guirui<sup>1</sup>, WANG Huimin<sup>1</sup>

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shanghai Key Laboratory for Urban Ecology and Sustainability, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract:** As one of the most widespread forest types, China's plantation plays an important role in global carbon balance. It is crucial to reduce the uncertainties in the estimation of carbon and water fluxes of plantation ecosystems, and model-data fusion technique provides an effective way. The purpose of this research is to improve the modeling accuracy of SIPNET model, the simplified Photosynthesis and Evapo-Transpiration(ET) model through two experiments, namely NEE alone and NEE & ET multi-constraints. The model-data fusion method used here is a combination of Metropolis-Hastings algorithm and Simulated Annealing algorithm. Based on eddy fluxes and meteorological observation data of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation during 2004—2009 in ChinaFLUX (Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Research Network), we estimated the key parameters of SIPNET model and simulated the corresponding carbon and water fluxes. Comparisons

**基金项目:**中国科学院先导专项(XDA05050600);国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833500);国家自然科学基金项目(41071251)

**收稿日期:**2012-03-23; **修订日期:**2012-07-23

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

between the measured and modeled net ecosystem exchange of carbon dioxide (NEE) showed that the SIPNET model had approximately equivalent fits to the observed NEE under two optimization procedures ( $R^2$  decreased from 0.934 to 0.929, and RMSE increased from 0.736 g C/m<sup>2</sup> to 0.763 g C/m<sup>2</sup>). In the case of ET, the NEE and ET parameterization produced a markedly better fit to the observed ET than the NEE parameterization ( $R^2$  increased from 0.188 to 0.824, and RMSE decreased from 0.152 cm to 0.053 cm). As for transpiration, when optimized by observed NEE alone, SIPNET largely underestimated annual accumulated transpiration in 2004 compared with the measurements of sap flow technique. In comparison, while optimization based on NEE and ET, SIPNET led to a better fit of annual cumulative estimation of transpiration in 2004 to the sap flow measurement. These results indicated that the SIPNET model parameterized using NEE and ET observed fluxes could well reproduce the characteristics of carbon and water fluxes. In other words, more information can be extracted from simultaneous optimization, since there is additional process information in water flux observation data. Furthermore, we conducted a sensitivity test of precipitation on carbon fluxes through reduction of precipitation. We found that photosynthesis was more sensitive to precipitation reduction than respiration, and the model optimized using NEE and ET reproduced the response of NEE to precipitation reduction better than that optimized using NEE alone. In addition, we detected that the difference of NEE response to precipitation reduction in two optimizations of the SIPNET model was caused by gross ecosystem production rather than ecosystem respiration. Therefore, parameter estimation using NEE and ET altogether improved the performance of SIPNET model. And without optimization using both NEE and ET, the response of ecosystem carbon cycle to precipitation variation may be misrepresented.

**Key Words:** plantation; carbon and water flux; model-data fusion; SIPNET model

森林生态系统是陆地生态系统的主体,在调节全球碳平衡、减缓全球气候变化等方面具有不可替代的作用<sup>[1-2]</sup>。森林生态系统碳水循环及其驱动机制研究已成为气候变化研究的热点问题之一<sup>[3-4]</sup>。我国自 20 世纪 70 年代以来,人工林生态系统面积逐渐增加且居世界首位,已成为我国森林生态系统的重要组成部分,了解其碳水收支状况对评价我国森林生态系统固碳速率和潜力具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

生态系统机理模型是模拟和分析生态系统关键过程,研究生态系统与气候之间相互作用的重要手段<sup>[7-9]</sup>。但由于人们对生态系统关键过程及其控制机制的理解不足,以及模型参数和输入数据的限制,导致模型模拟结果存在不确定性<sup>[10-11]</sup>。近年来逐渐发展起来的模型数据融合方法利用观测数据优化生态模型过程参数,完善模型结构,提高模型模拟精度,为降低生态系统碳水收支模拟和预测的不确定性提供了一种有效途径<sup>[12-14]</sup>。

模型数据融合是通过模型和数据的有机整合,充分利用获取的观测数据,运用数学方法优化模型参数,使模拟结果与观测值达到最佳匹配,以更准确地认识、模拟和预测生态系统变化的方法<sup>[12,15]</sup>。由于大多生态模型都包含难以准确估计的关键参数,因此目前生态系统模型数据融合研究主要集中在模型的参数估计方面,利用观测数据优化模型关键参数。大多研究或侧重于利用碳通量观测数据优化碳循环过程参数<sup>[16-18]</sup>,或侧重于使用生物计量数据获取碳库周转参数<sup>[19-20]</sup>,也开展了结合碳通量和生物计量数据优化碳循环模型关键参数的研究<sup>[21-25]</sup>,但同时充分利用碳水通量观测数据耦合碳水循环机理过程,进行参数反演进而探讨碳水通量及其关系的研究较少<sup>[26-28]</sup>。其中 Moore 等基于模型数据融合方法,同时使用碳水通量观测数据在美国 Niwot Ridge 针叶林反演了 SIPNET 模型的关键参数,并分析了降水变化对亚高山森林生态系统碳收支的影响,揭示了碳水通量同时优化模型参数对深入了解森林生态系统碳循环过程机理具有重要意义。

我国亚热带人工林在江西、湖南、湖北、浙江、广东、福建与广西等地均有分布,面积广阔<sup>[29]</sup>。千烟洲人工针叶林是我国典型的亚热带人工林生态系统,雨热不同季,存在季节性干旱<sup>[30]</sup>,相关学者已开展了千烟洲人工林的碳、水通量及其干旱响应的模型模拟研究<sup>[31-35]</sup>,但模型参数率定多人工完成,导致参数具有一定主观性,且缺少碳水通量同时优化模型参数的研究,难以深入了解碳水循环过程机理。本文将 SIPNET 模型应用

于千烟洲亚热带人工林生态系统,基于2004—2009年气象和碳水通量观测数据,对SIPNET模型进行敏感性分析以确定关键参数;并利用模型数据融合技术,优化模型关键参数,进而模拟分析千烟洲2004—2009年碳水通量状况。在此基础上,设置了降水减少实验,探讨了降水变化对碳吸收的影响,为深入开展亚热带人工林生态系统碳水循环机理研究提供支持。

## 1 数据和方法

### 1.1 站点概况和研究数据

千烟洲亚热带常绿人工针叶林通量观测站(26°44'52" N, 115°03'47" E, 110.8 m)位于中国生态系统研究网络(CERN)的千烟洲试验站内,地处江西省泰和县境内赣江中游典型红壤丘陵区。试验区年均气温17.9℃,年均降水量1485.1 mm,平均相对湿度84%,温暖湿润,夏热冬凉,具有典型的亚热带季风气候特征<sup>[36-38]</sup>。通量塔周围近1 km<sup>2</sup>范围内森林覆盖率高达90%,近100 km<sup>2</sup>范围内森林覆盖近70%,林分为1985年前后开始营造的人工林。塔周围主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelm)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)<sup>[39]</sup>,植被冠层高度大约为12 m。由于林分基本郁闭,林下植被很少<sup>[40]</sup>。

研究数据包括模型驱动、反演及验证数据。模型驱动数据为2004—2009年的30 min气象观测数据,主要包括气温、土壤温度、光合有效辐射、降水、水汽压、风速,均由千烟洲站通量塔常规自动气象观测系统测定。模型反演和验证数据为经过质量控制、缺失数据插补后的30 min涡度相关碳水通量观测数据,具体处理流程参见李春等<sup>[41]</sup>。其中,2004—2006年通量数据用于模型关键参数优化;2007—2009年通量数据用于模型验证。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 模型描述

SIPNET模型(Simplified Photosynthesis and Evapo-Transpiration model)<sup>[16-18,28,42-43]</sup>是美国新罕布什尔大学复杂研究中心在PnET模型(Photosynthesis-EvapoTranspiration)<sup>[44-47]</sup>的基础上,为避免由参数过多导致的“过参数化”,进行适当简化而得到的生态系统碳水循环过程模型。该模型已成功应用于美国Harvard落叶林和Niwt Ridge针叶林的碳水循环过程模拟。

SIPNET模型包含2个植被碳库(木质碳库和叶片碳库)、1个土壤碳库以及1个水循环子模型,以半日(昼和夜)为时间尺度模拟森林生态系统的碳水动态过程,主要包括生态系统光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、碳分配等过程。本文仅简要阐述SIPNET模型的碳库和土壤水分变化、光合作用与蒸腾作用耦合过程的模拟方法以及模型参数。

#### (1) 碳库及土壤水分变化

SIPNET模型中生态系统各碳库及土壤水分变化由一系列常微分方程来表达:

$$\frac{dC_w}{dt} = GPP - R_a - L_w - L \quad (1)$$

$$\frac{dC_L}{dt} = L - L_L \quad (2)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = L_w + L_L - R_h \quad (3)$$

$$\frac{dW}{dt} = P - ET - D \quad (4)$$

式中, $C_w$ 为木质碳库大小(g C/m<sup>2</sup>), $C_L$ 为叶片碳库大小(g C/m<sup>2</sup>), $C_s$ 为土壤碳库大小(g C/m<sup>2</sup>), $W$ 为土壤含水量(cm), $t$ 为时间(d);GPP是总初级生产力, $R_a$ 是自养呼吸, $L_w$ 是木质凋落物, $L$ 是叶生长量, $L_L$ 是叶凋落物, $R_h$ 是异养呼吸; $P$ 是降水量, $ET$ 是蒸发散, $D$ 是径流(包括地表径流和渗漏)。模型中碳通量单位均为g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,水通量单位为cm/d。

#### (2) 光合作用与蒸腾作用及其耦合过程

SIPNET 模型中光合作用的表达与 PnET 模型一致,是植物最大同化速率与 4 个环境因子(温度因子  $D_{temp}$ 、饱和水汽压差因子  $D_{VPD}$ 、光因子  $D_{light}$  和水分因子  $D_{water}$ )影响权重的乘积。模型首先计算无水分胁迫情况下的植被潜在光合速率( $GPP_{pot}$ ),即只考虑温度、VPD 和光对光合作用的影响:

$$GPP_{pot} = GPP_{max} \cdot D_{temp} \cdot D_{VPD} \cdot D_{light} \quad (5)$$

模型中生态系统蒸发散( $ET$ )包括植被蒸腾( $T$ )、冠层截留蒸发( $E_i$ )和土壤蒸发( $E_s$ )三部分(如果地面有雪,也包括雪的升华)。潜在蒸腾( $T_{pot}$ )是土壤水分饱和情况下的植被蒸腾,取决于无水分胁迫下植物光合能力( $GPP_{pot}$ )与实际水分利用效率( $WUE, mg CO_2 g^{-1} H_2O$ )两者之间的关系,其中  $WUE$  与  $VPD$  呈倒数关系:

$$T_{pot} = \frac{GPP_{pot}}{WUE} \quad (6)$$

$$WUE = \frac{K_{WUE}}{VPD} \quad (7)$$

模型中植被潜在蒸腾和植物实际可利用水分两者的较小者决定了植被蒸腾大小(式 8),其中植物可利用水分( $W_a$ )受土壤含水量( $W$ )影响(式 9,  $f$  为植物可利用水占土壤含水量的比例)。植被光合作用的水分限制因子  $D_{water}$  表达为实际蒸腾与潜在蒸腾的比例(式 10),结合式 5 即可得到生态系统  $GPP$ :

$$T = \text{Min}(T_{pot}, W_a) \quad (8)$$

$$W_a = W \cdot f \quad (9)$$

$$D_{water} = \frac{T}{T_{pot}} \quad (10)$$

$$GPP = GPP_{pot} \cdot D_{water} \quad (11)$$

### (3) SIPNET 模型参数

SIPNET 模型共有 42 个参数,包括 5 个初始状态变量(如初始植被木质碳库、初始土壤碳库等)、9 个光合作用相关参数(如最大净同化速率、冠层消光系数等)、7 个呼吸作用相关参数(如土壤和植被基础维持呼吸等)、10 个水分相关参数(如冠层截留蒸发占降水比例、土壤田间持水量等)、8 个物候相关参数(如植物长叶积温阈值等)以及 3 个植物生理相关参数(如叶片面积含碳量、质量含碳量等)(表 1)。

表 1 SIPNET 模型参数和初始状态变量

Table 1 SIPNET parameters and initial conditions

参数 Parameters	说明 Description	单位 Units
初始状态相关参数 Initial state values		
$C_{w,0}$	初始植被木质碳库大小	gC/m <sup>2</sup>
$LAI_i$	初始叶面积指数大小(LAI, Leaf Area Index)	m <sup>2</sup> (leaf)/m <sup>2</sup>
$C_{s,0}$	初始土壤碳库大小	gC/m <sup>2</sup>
$W_{s,0}$	初始土壤水分占土壤田间持水量的比例	—
$W_{p,0}$	初始雪盖的雪量	cm H <sub>2</sub> O equiv/m <sup>2</sup>
光合作用相关参数 Photosynthesis parameters		
$A_{max}$	最大净 CO <sub>2</sub> 同化速率	nmol CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> (leaf) s <sup>-1</sup>
$A_d$	平均日最大光合作用占 $A_{max}$ 的比重	—
$K_F$	叶片基础呼吸占 $A_{max}$ 的比例	—
$T_{min}$	光合作用最低温度	°C
$T_{opt}$	光合作用最适温度	°C
$K_{VPD}$	$D_{VPD}$ 计算中的斜率( $D_{VPD} = 1 - K_{VPD} \cdot VPD^{E_{VPD}}$ )	kPa <sup>-1</sup>
$E_{VPD}$	$D_{VPD}$ 计算中的指数( $D_{VPD} = 1 - K_{VPD} \cdot VPD^{E_{VPD}}$ )	—
$PAR_{1/2}$	光合作用半饱和 PAR 值	mol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
$k$	冠层 PAR 消光系数	—

续表

参数 Parameters	说明 Description	单位 Units
物候相关参数 Phenology parameters		
$D_{on}$	植物长叶日期	Day of year( DOY)
$GDD_{on}$	植物长叶积温阈值	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$
$T_{on}$	植物长叶土壤温度阈值	$^{\circ}\text{C}$
$D_{off}$	植物落叶日期	Day of year( DOY)
$L_g$	生长初期叶片生长的碳量	$\text{g C}/\text{m}^2$
$L_f$	生长末期凋落叶的碳占叶片碳库的比例	—
$A_L$	NPP 分配至叶片的比例	—
$K_L$	植物叶碳周转速率	$\text{gC g}^{-1} \text{C a}^{-1}$
自养呼吸相关参数 Autotrophic respiration parameters		
$K_A$	$0^{\circ}\text{C}$ 参考温度下植物基础维持呼吸	$\text{gC g}^{-1} \text{C a}^{-1}$
$Q_{10b}$	温度每上升 $10^{\circ}\text{C}$ 植物呼吸增加的倍数	—
$S_{fa}$	土壤冻结时叶片呼吸的减弱程度	—
$S_{ft}$	土壤冻结时的土壤温度	$^{\circ}\text{C}$
土壤呼吸相关参数 Soil respiration parameters		
$K_s$	$0^{\circ}\text{C}$ 参考温度下无水分胁迫的土壤基础呼吸	$\text{gC g}^{-1} \text{C a}^{-1}$
$Q_{10,s}$	土壤温度上升 $10^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸增加的倍数	—
$R_{sm}$	土壤水分对土壤呼吸的影响指数	—
水分相关参数 Moisture parameters		
$f_i$	降雨中冠层截留蒸发所占比例	—
$f_d$	到达地面的降水产生地表径流的比例	—
$V_s$	雪的融化速率	$\text{cm H}_2\text{O equiv } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{d}^{-1}$
$f$	土壤水分中植物可利用水分的比例	—
$f_f$	土壤冻结时可用水分占未冻结时可用水的比例	—
$K_{\text{WUE}}$	WUE 计算中的 1 个常量( VPD 与 WUE 的乘积)	$\text{mg CO}_2 \text{ kPa g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$
$W_c$	土壤田间持水量	$\text{cm}$
$R_d$	空气动力学阻力( $r_d$ ) 计算中的 1 个常量( $r_d = R_d/u$ )	—
$R_{\text{soil},1}$	土壤表面阻力( $r_{\text{soil}}$ ) 计算中的第 1 个常量( $r_{\text{soil}} = e^{R_{\text{soil},1} - R_{\text{soil},2} \cdot (W/W_c)}$ )	—
$R_{\text{soil},2}$	土壤表面阻力( $r_{\text{soil}}$ ) 计算中的第 2 个常量( $r_{\text{soil}} = e^{R_{\text{soil},1} - R_{\text{soil},2} \cdot (W/W_c)}$ )	—
植物生理相关参数 Tree physiological parameters		
SLW	叶片面积含碳量	$\text{g C}/\text{m}^2$
$C_{\text{frac}}$	叶片质量含碳量	$\text{g C}/\text{g}$
$K_w$	植物木质碳周转率	$\text{g C g}^{-1} \text{C a}^{-1}$

### 1.2.2 参数优化方法

SIPNET 模型中参数优化算法为 Metropolis 模拟退火算法,是结合了模拟退火和马尔可夫链-蒙特卡罗方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)中 Metropolis-Hastings 算法的一种启发式全局搜索算法<sup>[48-49]</sup>。其思想是根据贝叶斯公式,结合参数先验知识,运用 Metropolis 准则融合观测数据信息,从而得到参数后验分布。该算法优点在于可较快搜索到全局最优解,避免局部最优;并提供参数后验分布信息,量化参数不确定性。算法具体流程为:

(1) 确定优化参数集  $P$  的初值和范围,以及控制参数变化范围变量  $t$  的初值;

(2) 从当前参数集  $P$  中随机选取参数  $\theta$ ,根据当前  $\theta$  值  $\theta_{i,\text{current}}$ 、 $\theta$  的先验取值范围 range 以及  $t$  值生成候选参数值  $\theta_{i,\text{new}}$  (式 12),构成候选参数集;

$$\theta_{i,\text{new}} \in (\theta_{i,\text{current}} - 0.5 \cdot t \cdot \text{range}, \theta_{i,\text{current}} + 0.5 \cdot t \cdot \text{range}) \quad (12)$$

(3) 计算当前参数集和候选参数集对应的后验概率密度  $p(\theta_{\text{current}} | D)$  和  $p(\theta_{\text{new}} | D)$ ; 如果  $p(\theta_{\text{new}} | D) > p$

( $\theta_{\text{current}} | D$ ), 则接受候选参数集, 作为下次迭代中的当前参数集, 并减小  $t$  值。否则计算候选参数集和当前参数集后验概率密度的比率  $R$ , 并从  $(0, 1)$  均匀分布中随机选取  $U$ , 如果  $R \geq U$  则接受候选参数集, 否则拒绝候选参数集。如果候选参数集被拒绝, 仍然使用本次迭代的当前参数集作为下次迭代的当前参数集, 并增大  $t$  值;

(4) 重复 2—3 步, 直到参数接受概率收敛于指定阈值(40%) 为止; 之后固定  $t$  值再重复 2—3 步 50 万次, 取最后 70%—80% 参数集作为后验分布的样本进行统计分析。

### 1.2.3 参数敏感性分析方法

参数敏感性分析有助于明确 SIPNET 模型各参数对碳水循环过程的影响程度, 从而确定对模型模拟具有重要影响的关键参数。模型模拟值对参数的敏感性一般用敏感度系数表示<sup>[50]</sup>:

$$\beta = \frac{\Delta \text{Run}}{\Delta P} \quad (13)$$

式中,  $\beta$  为模型模拟值 (Run) 对参数  $P$  的敏感度系数;  $\Delta P$  为参数  $P$  的变化率 (%),  $\Delta \text{Run}$  为参数  $P$  发生  $\Delta P$  变化率时模型模拟值的相应变化率 (%)。

本文通过计算 SIPNET 模型各参数增加和减少 10% 时模型模拟值的变化百分率, 从而计算对应的敏感性 (式 14 和 15), 利用二者中的较大值计算模型模拟值对参数的敏感度系数:

$$VR_{+10\%} = 100 \times \frac{|\text{run}_{+10\%} - \text{run}_{\text{ref}}|}{\text{run}_{\text{ref}}} \quad (14)$$

$$VR_{-10\%} = 100 \times \frac{|\text{run}_{-10\%} - \text{run}_{\text{ref}}|}{\text{run}_{\text{ref}}} \quad (15)$$

式中,  $\text{run}_{\text{ref}}$  为参数  $P$  不变时对应的模拟值,  $\text{run}_{+10\%}$  和  $\text{run}_{-10\%}$  分别为参数  $P$  增加和减少 10% 时对应的模拟值;  $VR_{+10\%}$  和  $VR_{-10\%}$  分别为参数  $P$  增加和减少 10% 时模拟值变化的百分率。

## 2 结果和讨论

### 2.1 参数敏感性分析

通过对 SIPNET 模型的 42 个参数进行敏感性分析, 确定对模拟结果影响较大的参数, 明确模型的关键参数。计算 SIPNET 模型碳水通量模拟结果 (NEE、ET、GPP、RE、T) 对各参数的敏感度系数 ( $\beta_{\text{NEE}}$ ,  $\beta_{\text{ET}}$ ,  $\beta_{\text{GPP}}$ ,  $\beta_{\text{RE}}$ ,  $\beta_{\text{T}}$ ),  $\beta_{\text{NEE}}$  超过 0.1 的参数视为对模型影响较大的关键参数, 如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 对 NEE 影响较大的参数有  $A_d$ 、 $Q_{10,S}$ 、 $C_{\text{frac}}$  和  $A_{\text{max}}$ , 其中  $A_d$  和  $A_{\text{max}}$  对 GPP 影响显著, 是影响光合作用的关键参数;  $Q_{10,S}$  对 RE 影响占首位, 是呼吸作用的关键参数;  $C_{\text{frac}}$  为植物生理相关参数, GPP 对其敏感度系数明显高于 RE。表中  $\beta_{\text{NEE}}$ 、 $\beta_{\text{GPP}}$  和  $\beta_{\text{RE}}$  的最大值分别为 3.53、1.16 和 1.36, 表明参数变化对 NEE 的影响明显大于对 GPP 和 RE 的影响, 这是由于 NEE 是 GPP 和 RE 这两个方向相反且量级相近的较大通量平衡的结果, GPP 和 RE 各自较小波动就可能引起 NEE 较大变化。

生态系统蒸腾是蒸散的主要组分, 它们关键参数基本一致, 包括  $C_{\text{frac}}$ 、 $A_{\text{max}}$ 、 $A_d$ 、 $K_{\text{WUE}}$  和 SLW; 由于蒸散包括土壤蒸发, 因此  $R_{\text{soil},1}$  也是其关键参数。其中光合作用关键参数  $A_{\text{max}}$ 、 $A_d$  和生态系统水分利用效率计算中的常数  $K_{\text{WUE}}$  对蒸散和蒸腾有较大影响, 体现了生态系统碳水过程耦合关系。

### 2.2 参数优化结果分析

在模型参数敏感性分析的基础上, 结合参数初值可获得性和精度, 选取了 17 个参数作为待优化参数 (表 3)。本研究利用千烟洲 2004—2006 年气象和碳水通量观测数据反演参数, 获取最优参数集和参数后验分布。为分析不同类型反演数据对参数约束作用的差异, 采用 2 种方式优化参数: ①仅利用 NEE 观测数据反演参数 (实验 1, 参数后验分布如图 1); ②同时使用 NEE 和 ET 观测数据反演参数 (实验 2, 参数后验分布见图 2)。

根据参数后验分布, 参数优化结果通常可归为 3 类: 良约束、差约束和击边约束<sup>[16]</sup>。①良约束: 参数为正态分布, 标准差相对较小, 表明参数能够被观测数据较好约束, 其后验均值可近似反映真实参数值。实验 1 有 9 个, 实验 2 有 11 个。②差约束: 参数分布较分散, 标准差较大, 主要因为反演数据中不包含其相关信息, 对

其无约束作用。实验 1 和实验 2 均没有差约束参数,表明碳水通量能较好约束 SIPNET 模型参数。③击边约束:参数值聚集在先验范围的一边,通常由于参数先验范围选取不合理所致,通过修改参数先验范围可能转变为良约束。实验 1 有 8 个,实验 2 有 6 个。结果表明,实验 2 碳水通量同时参与优化显著降低了模型待优化参数的不确定性。其中实验 2 较实验 1 明显改善的参数有  $R_d$ 、 $f_i$  和  $K_{WUE}$ ,均为水通量相关参数,表明 ET 数据中隐含其相关信息。

表 2 SIPNET 模型关键参数对模拟结果的影响  
Table 2 Sensitivity of SIPNET model key parameters

参数 Parameters	NEE 对各参数 的敏感度系数	ET 对各参数 的敏感度系数	GPP 对各参数 的敏感度系数	RE 对各参数 的敏感度系数	T 对各参数 的敏感度系数
	$\beta_{NEE}$	$\beta_{ET}$	$\beta_{GPP}$	$\beta_{RE}$	$\beta_T$
$A_d$	3.53	0.60	1.04	0.07	1.04
$Q_{10,S}$	3.47	0.00	0.00	1.36	0.00
$C_{frac}$	3.12	0.64	1.16	0.39	1.12
$A_{max}$	3.09	0.64	1.12	0.35	1.12
SLW	2.75	0.56	0.98	0.28	0.97
$C_{S,0}$	1.73	0.00	0.00	0.68	0.00
$K_S$	1.65	0.00	0.00	0.65	0.00
$k$	1.47	0.22	0.43	0.03	0.39
$LAI_i$	1.37	0.35	0.57	0.26	0.60
$PAR_{1/2}$	1.22	0.17	0.36	0.02	0.30
$Q_{10,v}$	0.80	0.02	0.04	0.26	0.04
$K_F$	0.47	0.04	0.07	0.28	0.07
$A_L$	0.34	0.09	0.15	0.07	0.15
$W_C$	0.32	0.16	0.10	0.02	0.15
$K_L$	0.27	0.07	0.11	0.05	0.12
$K_{WUE}$	0.25	0.56	0.09	0.02	0.97
$K_{VPD}$	0.20	0.05	0.06	0.00	0.08
$T_{opt}$	0.18	0.12	0.29	0.37	0.22
$E_{VPD}$	0.17	0.05	0.05	0.00	0.09
$R_{soil,1}$	0.15	0.65	0.06	0.03	0.09
$T_{min}$	0.13	0.01	0.04	0.00	0.02

表 3 待优化参数及其取值说明

Table 3 SIPNET parameters allowed varying during optimization procedure

参数 Parameters	参数初值和范围 Initial guess and range	来源 Source	参数 Parameters	参数初值和范围 Initial guess and range	来源 Source
$W_{S,0}$	0.098(0—1)	CERN 数据	$A_{max}$	8.3(0—34)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>
$K_F$	0.1(0.05—0.3)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$T_{min}$	2(-8—8)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>
$T_{opt}$	24(5—30)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$K_{VPD}$	0.05(0.01—0.25)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>
$PAR_{1/2}$	17(4—27)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$A_L$	0.225(0—1)	杨风亭 <sup>[36]</sup>
$K_A$	0.006(0.0006—0.06)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$Q_{10,v}$	1.66(1.4—2.6)	于贵瑞等 <sup>[51]</sup>
$K_S$	0.06(0.003—0.6)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$Q_{10,s}$	1.99(1.4—5)	郑泽梅 <sup>[52]</sup>
$R_{sm}$	1(0—2)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$f_i$	0.22(0—0.25)	魏焕奇等 <sup>[35]</sup>
$f$	0.088(0.001—0.16)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>	$K_{WUE}$	23.6(0.01—109)	ChinaFLUX 数据估算
$R_d$	36.5(1—1500)	Sacks 等 <sup>[17]</sup>			

### 2.3 碳水通量模拟

基于千烟洲 2004—2009 年气象观测数据,利用实验 1 和实验 2 的优化参数对千烟洲人工林生态系统的

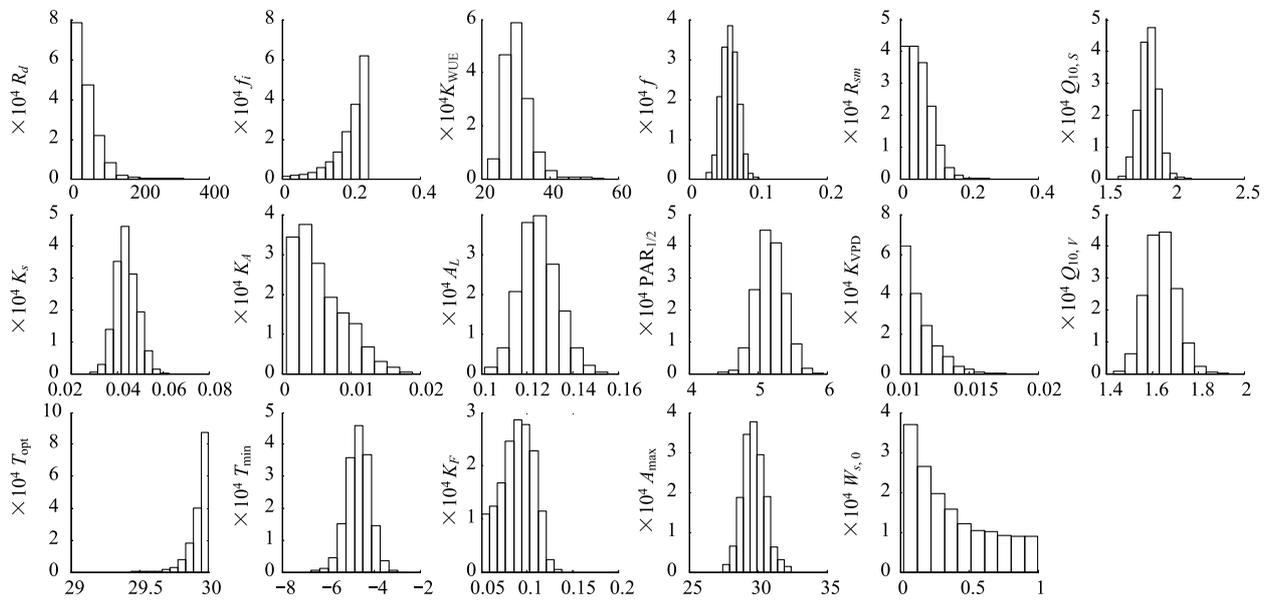


图1 实验1 参数后验分布图(只使用 NEE 数据约束)

Fig. 1 Parameter posterior distribution of experiment 1

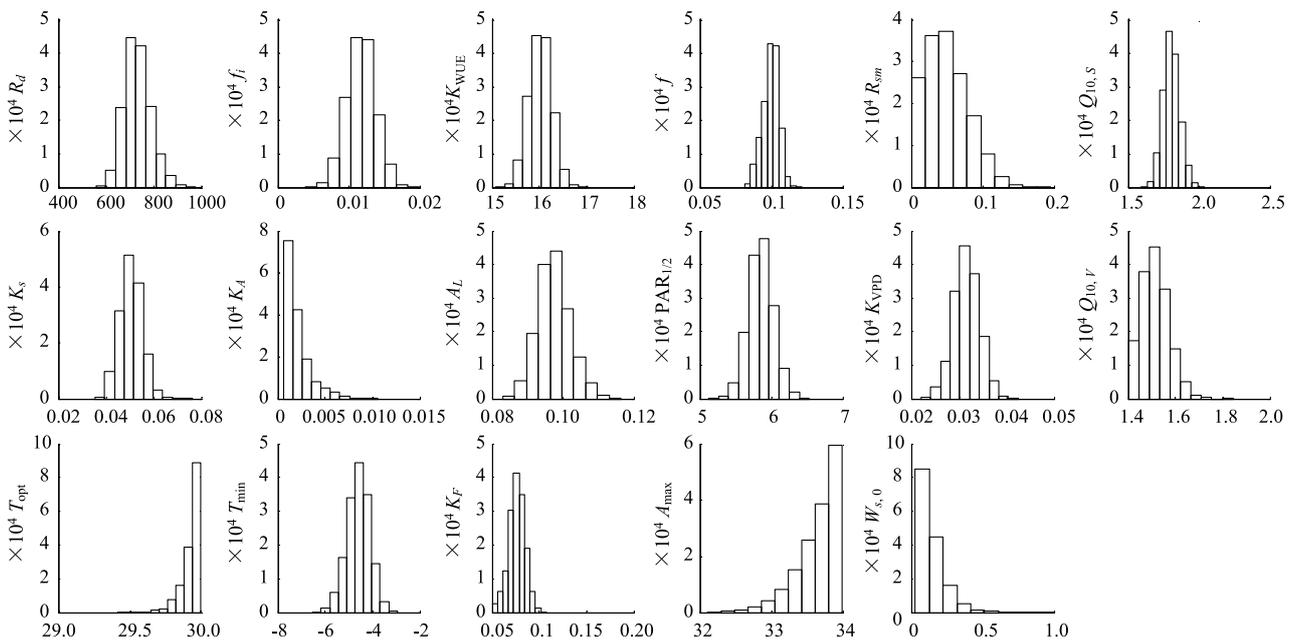


图2 实验2 参数后验分布图(同时使用 NEE&amp;ET 约束)

Fig. 2 Parameter posterior distribution of experiment 2

碳水通量进行模拟,并对其模拟性能进行了对比评价。图3为实验1和实验2 NEE、ET 半日尺度模拟值与实测值的散点图,实验1能较好地模拟 NEE,  $R^2$  达到 0.934, 但 ET 模拟效果较差,  $R^2$  仅有 0.188; 实验2也能较好地模拟 NEE,  $R^2$  为 0.929, 且 ET 模拟效果较实验1有明显改善,  $R^2$  提升到 0.824。从图3(A)和(C)可看出,在 NEE 较大和较小处散点图较平缓,说明在极值附近模拟效果稍差,中值附近模拟效果较好。这可能与 SIPNET 模型中误差协方差矩阵设置有关,目前模型中假设所有数据点误差的方差相同,而已有研究发现 NEE 的方差并不是均质的,而是与其大小呈线性关系<sup>[53-54]</sup>,进而导致模型在 NEE 较大和较小处模拟效果相对较差。

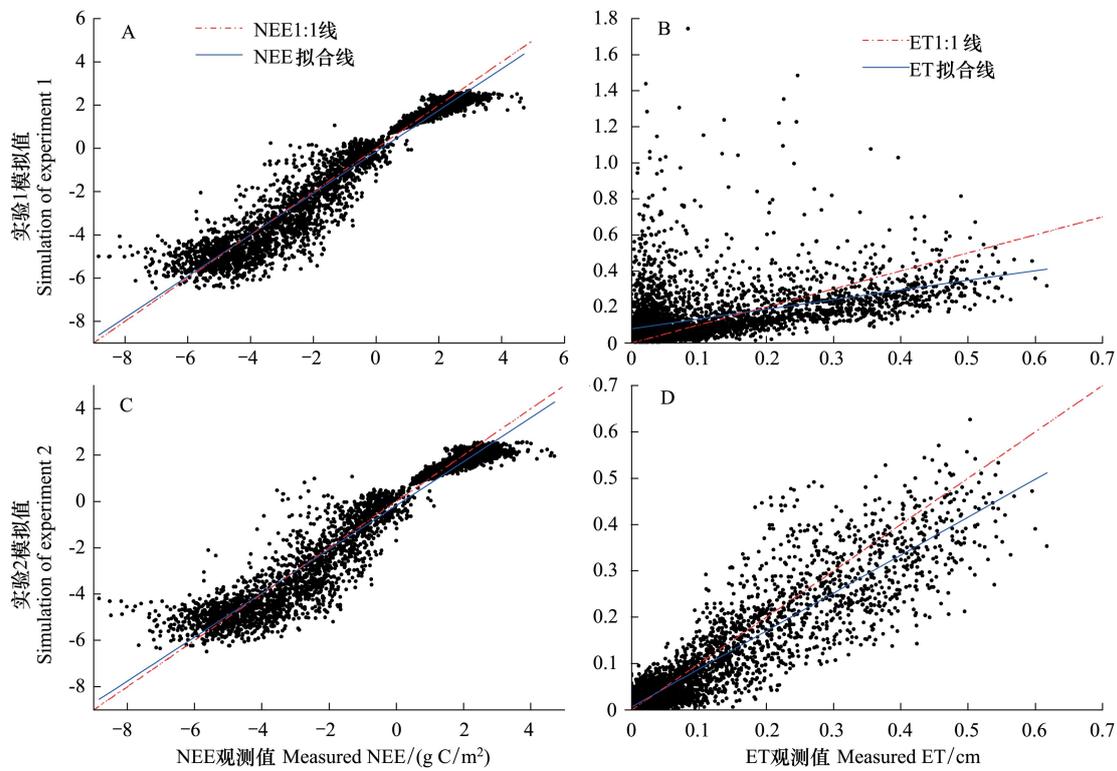


图3 实验1和实验2半日尺度NEE和ET模拟值与实测值散点图

Fig. 3 Half-daily estimates of NEE and ET estimated from experiment 1&2 compared to measured quantities

图4为实验1和实验2半日尺度NEE、ET模拟值与观测值的RMSE对比图,实验2 NEE模拟效果除2004年和2008年以外其余年份都较实验1稍差;实验1的NEE平均RMSE为0.736 g C/m<sup>2</sup>,实验2为0.763 g C/m<sup>2</sup>;由于增加了ET观测数据参与优化,实验2所有年份ET模拟效果均优于实验1,ET的平均RMSE由0.152 cm降到0.053 cm,降低了65%。说明同时利用碳水通量优化参数可显著提升模型的综合模拟精度。

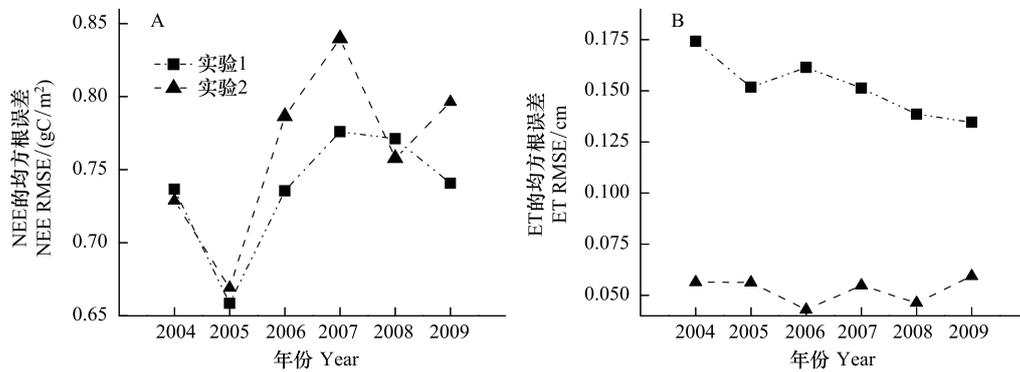


图4 实验1和实验2半日尺度NEE、ET模拟值与实测值的RMSE对比图

Fig. 4 RMSE of half-daily estimates of NEE and ET estimated from experiment 1&2 and measured quantities

本研究使用树干液流数据进行蒸腾模拟的验证。刘琪璟等对千烟洲站2004年树干液流测定结果显示林地通过树木蒸腾耗散的水分为4769.643 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,相当于477 mm降水量<sup>[55]</sup>。本文实验1模拟的2004年蒸腾总量为223.209 mm,显著低于树干液流实测值;实验2模拟值为455.472 mm,与实测值较为接近。由此可见只用碳通量约束SIPNET模型参数会明显低估蒸腾量,而同时利用碳水通量约束模型参数可显著改善蒸腾模拟效果。

生态系统蒸腾与蒸发散的比值(T/ET)对研究植被水分运移的生态机理以及碳水循环关系具有重要意

义。实验2模拟的年均  $T/ET$  为 63%，略高于宋霞<sup>[56]</sup> 基于涡度相关和树干液流数据估计的 57%，略低于魏焕奇<sup>[35]</sup> 利用 Priestley-Taylor 方程模拟的 65%。Wang<sup>[57]</sup> 采用激光同位素分析仪对生物圈 2 号 25%—100% 覆盖度植被的  $T/ET$  观测结果为 61%—83%，本研究结果在其范围内。图 5 是实验 2  $T/ET$  月尺度年际变异情况，1—2 月、11—12 月年际变异较大，可能与 1—2 月早春低温<sup>[58]</sup>、11—12 月凋落物量较多<sup>[59]</sup>、11 月—翌年 2 月降雪等有关。

#### 2.4 降水条件对碳通量影响的模拟分析

千烟洲人工林虽然降水充沛，但降水量季节分配不均，水热不同步；降水多集中于春季和初夏（3—6 月），温度则在 7—8 月达到最高，这种雨热不同季的现象，易导致季节性干旱<sup>[37]</sup>，对生态系统碳水循环过程影响较

为强烈。本研究将降水数据减少 10%—70%，分别利用实验 1 和实验 2 的优化参数进行模型正演，进一步分析千烟洲人工林净碳吸收对水分供应的敏感性。图 6 展示的是实验 1、2 模拟的 2004—2009 年碳通量各组分年总量均值对降水减少的响应。从图 6 (A) 可看出实验 1、2 对降水减少 10%—30% 响应均较为迟缓，NEE 年总量均值平均降低速率为 1% 和 2%，这可能与水分胁迫不严重情况下，水循环过程对生态系统净碳吸收影响较弱有关；当降水减少 40%—70% 时，水分胁迫较严重，实验 1、2 NEE 年总量均值平均降低速率为 19% 和 37%，实验 2 的响应敏感性明显大于实验 1，较好地表现出净碳吸收年总量随降水减少而快速降低的趋势。

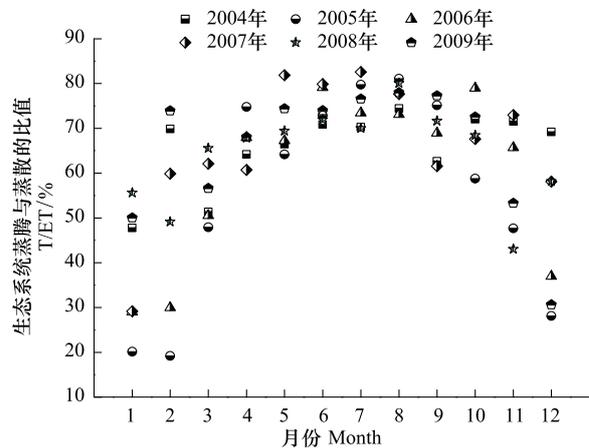


图 5 月尺度  $T/ET$  年际变异

Fig. 5 The ratio of monthly modeled transpiration to evapotranspiration

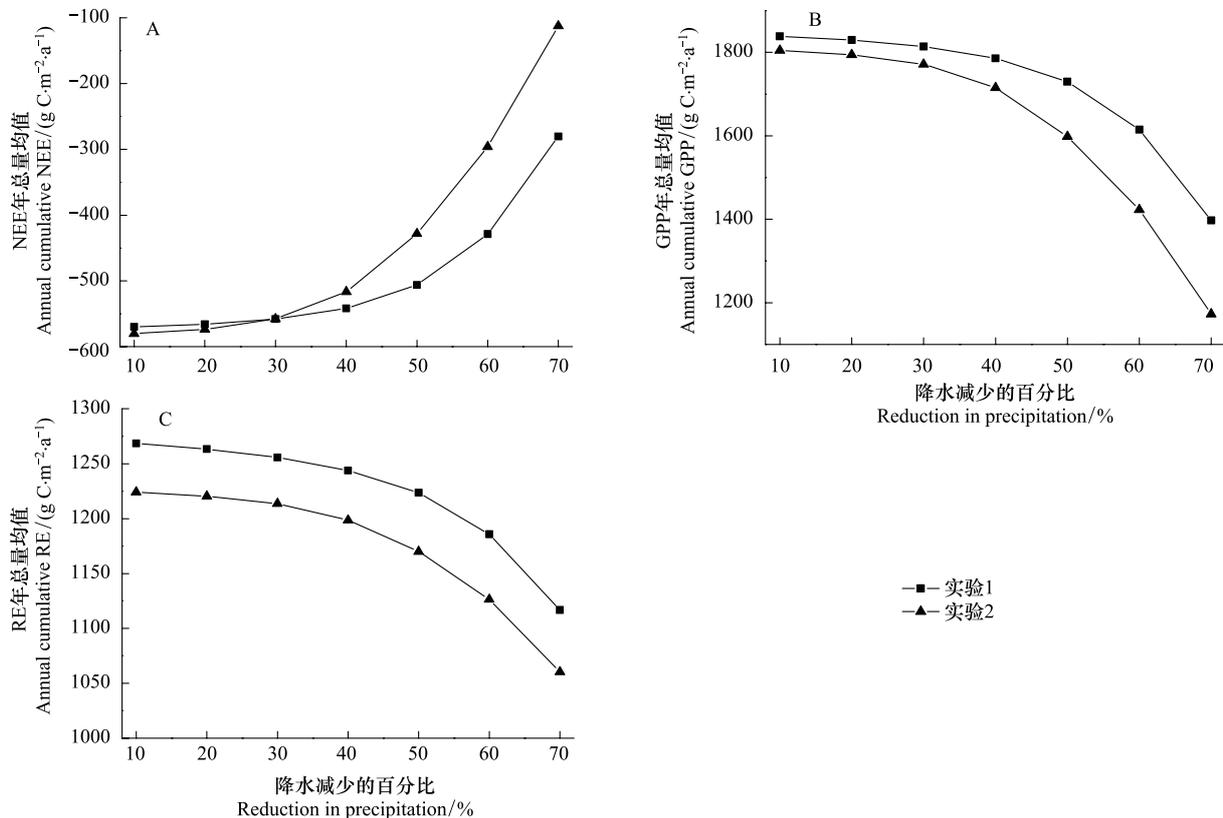


图 6 碳通量模拟值对降水变化的响应

Fig. 6 The sensitivity of modeled annual cumulative carbon fluxes to reductions in precipitation of experiment 1 & 2

表明如果不能同时利用碳水通量进行参数优化, SIPNET 模型无法正确揭示生态系统碳循环对降水变异的响应。

从图 6 (B)和(C)可看出, GPP 和 RE 均随降水减少呈降低趋势,但实验 2 由于考虑了 *ET* 观测数据对模型的约束, GPP 年总量均值平均减小速率为 7%, 显著大于实验 1 的 4%, 而 *RE* 减小速率均约为 2%, GPP 减小速度明显大于 *RE*, 即水分亏缺对光合能力的影响比对呼吸影响更为强烈。表明干旱胁迫对千烟洲人工林生态系统光合作用的影响大于呼吸作用, 即对 GPP 总量的削弱大于对 *RE* 总量的削弱, 从而导致生态系统净碳吸收减少。已有研究表明 GPP 和 *RE* 都会受到干旱胁迫的影响, 但响应程度有所不同<sup>[30]</sup>, 光合作用响应更为强烈<sup>[32]</sup>, 本研究与其结论基本一致。实验 2 加入 *ET* 约束后 GPP 随降水减小的降低速率从实验 1 的 4% 增大到 7%, 而 *RE* 的减小速率保持在 2%, 由此可见两个实验 NEE 对降水减少的响应差异主要源于 GPP, 而非 *RE*。

### 3 结论

本文结合千烟洲人工林碳水通量观测数据和 SIPNET 生态系统过程模型, 探讨了应用模型数据融合方法优化模型关键参数, 进而模拟分析我国亚热带人工林碳水通量的可行性, 为利用模型数据融合方法开展我国人工林生态系统碳循环过程研究提供了参考。主要结论如下:

(1) 用碳通量观测数据约束模型时, NEE 模拟值与实测值较为一致, 但水通量模拟效果较差; 碳水通量同时约束时, 虽然 NEE 模拟精度略有下降, 但 *ET* 和 *T* 模拟精度显著提升。表明模型数据融合方法的应用能够改善模型模拟效果, 且同时使用碳水通量观测数据约束的模型更适用于千烟洲站点碳循环过程模拟, 为相关定量研究和机制探讨提供了基础。

(2) 开展了降水条件对碳通量影响的模拟分析, 结果表明千烟洲人工林降水量减少对光合作用和呼吸作用影响较大, 且光合作用的响应更为强烈。说明在预测未来气候变化条件下的陆地生态系统碳循环动态时, 必须重视对降水变化的预测, 及其对生态系统光合作用和呼吸作用的可能影响。

(3) 模型能够较好地模拟千烟洲人工林的碳水通量, 但在 NEE 高值和低值区存在不可忽视的误差, 分析认为与参数优化算法中误差协方差矩阵设定有关, 今后需考虑观测数据误差的方差异质性以进一步提高模型模拟精度, 为模型改进提供了依据。

### References:

- [ 1 ] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [ 2 ] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [ 3 ] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [ 4 ] O'Grady A P, Tissue D T, Beadle C L. Canopy processes in a changing climate. *Tree Physiology*, 2011, 31(9): 887-892.
- [ 5 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 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): 1009-1013.
- [ 7 ] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [ 8 ] Cao M K, Yu G R, Liu J Y, Li K R. Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial ecosystem carbon cycle. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, 48(Suppl I): 17-32.
- [ 9 ] Bonan G B. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2008: 379-386.
- [ 10 ] Luo Y Q, Weng E S, Wu X W, Gao C, Zhou X H, Zhang L. Parameter identifiability, constraint, and equifinality in data assimilation with ecosystem models. *Ecological Applications*, 2009, 19(3): 571-574.

- [11] Lin J C, Pejam M R, Chan E, Wofsy S C, Gottlieb E W, Margolis H A, McCaughey J H. Attributing uncertainties in simulated biospheric carbon fluxes to different error sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(2): GB2018, doi: 10.1029/2010GB003884.
- [12] Raupach M R, Rayner P J, Barrett D J, DeFries R S, Heimann M, Ojima D S, Quegan S, Schimullius C C. Model-data synthesis in terrestrial carbon observation: methods, data requirements and data uncertainty specifications. *Global Change Biology*, 2005, 11(3): 378-397.
- [13] Wang Y P, Trudinger C M, Enting I G. A review of applications of model-data fusion to studies of terrestrial carbon fluxes at different scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1829-1842.
- [14] Peng C H, Guiot J, Wu H B, Jiang H, Luo Y Q. Integrating models with data in ecology and palaeoecology: advances towards a model-data fusion approach. *Ecology Letters*, 2011, 14(5): 522-536.
- [15] Williams M, Richardson A D, Reichstein M, Stoy P C, Peylin P, Verbeeck H, Carvalhais N, Jung M, Hollinger D Y, Kattge J, Leuning R, Luo Y, Tomelleri E, Trudinger C M, Wang Y P. Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences*, 2009, 6(7): 1341-1359.
- [16] Braswell B H, Sacks W J, Linder E, Schimel D S. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 335-355.
- [17] Sacks W J, Schimel D S, Monson R K, Braswell B H. Model-data synthesis of diurnal and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes at Niwot Ridge, Colorado. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 240-259.
- [18] Sacks W J, Schimel D S, Monson R K. Coupling between carbon cycling and climate in a high-elevation, subalpine forest: a model-data fusion analysis. *Oecologia*, 2007, 151(1): 54-68.
- [19] Luo Y Q, White L W, Canadell J G, DeLucia E H, Ellsworth D S, Finzi A C, Lichter J, Schlesinger W H. Sustainability of terrestrial carbon sequestration; a case study in Duke Forest with inversion approach. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1): 1021, doi: 10.1029/2002GB001923.
- [20] Xu T, White L, Hui D F, Luo Y Q. Probabilistic inversion of a terrestrial ecosystem model: analysis of uncertainty in parameter estimation and model prediction. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(2): GB2007, doi: 10.1029/2005GB002468.
- [21] Williams M, Schwarz P A, Law B E, Irvine J, Kurpius M R. An improved analysis of forest carbon dynamics using data assimilation. *Global Change Biology*, 2005, 11(1): 89-105.
- [22] Zhang L, Yu G R, He H L, Zhang L M. Carbon cycle modeling of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain of China using the model-data fusion approach. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1044-1055.
- [23] Carvalhais N, Reichstein M, Ciais P, Collatz G J, Mahecha M D, Montagnani L, Papale D, Rambal S, Seixas J. Identification of vegetation and soil carbon pools out of equilibrium in a process model via eddy covariance and biometric constraints. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2813-2829.
- [24] Richardson A D, Williams M, Hollinger D Y, Moore D J P, Dail D B, Davidson E A, Scott N A, Evans R S, Hughes H, Lee J T, Rodrigues C, Savage K. Estimating parameters of a forest ecosystem C model with measurements of stocks and fluxes as joint constraints. *Oecologia*, 2010, 164(1): 25-40.
- [25] Zhang L, Luo Y, Yu G. Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of eastern China: applications of probabilistic inversion. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: G01010, doi: 10.1029/2009JG001004.
- [26] Wang Y P, Leuning R, Cleugh H A, Coppin P A. Parameter estimation in surface exchange models using nonlinear inversion: how many parameters can we estimate and which measurements are most useful? *Global Change Biology*, 2001, 7(5): 495-510.
- [27] Santaren D, Peylin P, Viovy N, Ciais P. Optimizing a process-based ecosystem model with eddy-covariance flux measurements: a pine forest in Southern France. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2013, doi: 10.1029/2006GB002834.
- [28] Moore D J P, Hu J, Sacks W J, Schimel D S, Monson R K. Estimating transpiration and the sensitivity of carbon uptake to water availability in a subalpine forest using a simple ecosystem process model informed by measured net CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1467-1477.
- [29] Liu Y F, Song X, Yu G R, Sun X M, Wen X F, Chen Y R. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, 48(Suppl I): 123-132.
- [30] Sun X M, Wen X F, Yu G R, Liu Y F, Liu Q J. Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southeastern China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006, 49(Suppl II): 110-118.
- [31] Gu F X, Cao M K, Wen X F, Liu Y F, Tao B. A comparison between simulated and measured CO<sub>2</sub> and water flux in a subtropical coniferous forest. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006, 49(Suppl II): 241-251.
- [32] Mi N, Yu G R, Wang P X, Wen X F, Sun X M, Zhang L M, Song X, Wang S S. Modeling seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux in a subtropical coniferous forest using the EALCO model. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [33] Mi N, Yu G R, Wen X F, Zhang Y S. Use a simulation model to study the difference response of water and heat flux to drought in mid-subtropical

- planted forest. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8/9): 1196-1203.
- [34] 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.
- [35] Wei H Q, He H L, Liu M, Zhang L, Yu G R, Min C C, Wang H M, Liu Y. Modeling evapotranspiration and its components in Qianyanzhou plantation based on remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 2012, (5): 778-789.
- [36] Yang F T. The Impact of Land Use of Red Soil Hilly Area in Southern China to Terrestrial Carbon Cycle-Qianyanzhou Experimental Station As A Case Study [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2005.
- [37] Zhang L M. Ecophysiological Controls on Seasonal Variations of Ecosystem Carbon Exchange of Typical Forest Ecosystems along NSTEC [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2006.
- [38] Li J, Liu Y F, Yang X G, Li J. Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2449-2456.
- [39] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006, 49(Suppl II): 99-109.
- [40] Wen X F. Measurements of Carbon Sequestration by Long-Term Eddy Covariance in A Mid-subtropical Pinus Plantation of Southeastern China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2005.
- [41] Li C, He H L, Liu M, Su W, Fu Y L, Zhang L M, Wen X F, Yu G R. The design and application of CO<sub>2</sub> flux data processing system at ChinaFLUX. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565.
- [42] Zobitz J M, Moore D J P, Sacks W J, Monson R K, Bowling D R, Schimel D S. Integration of process-based soil respiration models with whole-ecosystem CO<sub>2</sub> measurements. *Ecosystems*, 2008, 11(2): 250-269.
- [43] Hu J, Moore D J P, Burns S P, Monson R K. Longer growing seasons lead to less carbon sequestration by a subalpine forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 771-783.
- [44] Aber J D, Federer C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, 92(4): 463-474.
- [45] Aber J D, Ollinger S V, Federer C A, Reich P B, Goulden M L, Kicklighter D W, Melillo J M, Lathrop R G Jr. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research*, 1995, 5(3): 207-222.
- [46] Aber J D, Reich P B, Goulden M L. Extrapolating leaf CO<sub>2</sub> exchange to the canopy: a generalized model of forest photosynthesis compared with measurements by eddy correlation. *Oecologia*, 1996, 106(2): 257-265.
- [47] Aber J D, Ollinger S V, Driscoll C T. Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in response to land use and atmospheric deposition. *Ecological Modelling*, 1997, 101(1): 61-78.
- [48] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, Teller A H, Teller E. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6): 1087-1092.
- [49] Hurr G C, Armstrong R A. A pelagic ecosystem model calibrated with BATS data. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1996, 43(2/3): 653-683.
- [50] Churkina G, Tenhunen J, Thornton P, Falge E M, Elbers J A, Erhard M, Grunwald T, Kowalski A S, Rannik U, Sprinz D. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 168-184.
- [51] Yu G R, Wen X F, Li Q K, Zhang L M, Ren C Y, Liu Y F, Guan D X. Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forests in China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, 48(Suppl I): 93-105.
- [52] Zheng Z M. The Controlling Factors and Evaluation of The Spatio-Temporal of Variability of Soil Respiration of Terrestrial Ecosystems in China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2009.
- [53] Richardson A D, Hollinger D Y, Burba G G, Davis K J, Flanagan L B, Katul G G, Munger J W, Ricciuto D M, Stoy P C, Suyker A E, Verma S B, Wofsy S C. A multi-site analysis of random error in tower-based measurements of carbon and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(1/2): 1-18.
- [54] He H L, Liu M, Sun X M, Zhang L, Luo Y Q, Wang H M, Han S J, Zhao X Q, Shi P L, Wang Y F, Ouyang Z, Yu G R. Uncertainty analysis of eddy flux measurements in typical ecosystems of ChinaFLUX. *Ecological Informatics*, 2010, 5(6): 492-502.
- [55] Liu Q J, Zeng H Q, Ma Z Q. Carbon sequestration of Pinus elliottii plantation in relation with water consumption in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5322-5330.
- [56] Song X. The Seasonal Variations and Controlling Mechanisms of Ecosystem Water Use Efficiency for Subtropical Plantation Conifer in Qianyanzhou [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2007.
- [57] Wang L X, Caylor K K, Villegas J C, Barron-Gafford G A, Breshears D D, Huxman T E. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody

plant cover; assessment of a stable isotope technique. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37; L09401, doi: 10.1029/2010GL043228.

- [58] Zhang W J, Wang H M, Yang F T, Yi Y H, Wen X F, Sun X M, Yu G R, Wang Y D, Ning J C. Underestimated effects of low temperature during early growing season on carbon sequestration of a subtropical coniferous plantation. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1667-1678.
- [59] Chen Y R. Nutrient element dynamic analysis of withered leaves from artificial forest of masson pine on the experimental plot in Qianyanzhou. *Jiangxi Science*, 2000, 18(1): 19-23.

#### 参考文献:

- [8] 曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 李克让. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 1-14.
- [22] 张黎, 于贵瑞, 何洪林, 张雷明. 基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1044-1055.
- [29] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 温学发, 陈永瑞. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 109-117.
- [30] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 刘允芬, 刘琪璟. 中亚热带季节性干旱对千烟洲人工林生态系统碳吸收的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 103-110.
- [31] 顾峰雪, 曹明奎, 温学发, 刘允芬, 陶波. 亚热带针叶林水碳通量的模拟及其与观测的对比研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 224-233.
- [32] 米娜, 于贵瑞, 王鑫兴, 温学发, 孙晓敏, 张雷明, 宋霞, 王树森. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变异的模拟. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [33] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 张玉书. 我国中亚热带人工林水热通量对干旱差异响应的模拟研究. *生态环境学报*, 2011, 20(8/9): 1196-1203.
- [34] 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.
- [35] 魏焕奇, 何洪林, 刘敏, 张黎, 于贵瑞, 闵程程, 王辉民, 刘影. 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究. *自然资源学报*, 2012, (5): 778-789.
- [36] 杨风亭. 中国南方红壤丘陵区土地利用对陆地碳循环的影响: 以千烟洲试验站为例 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [37] 张雷明. 中国东部南北森林样带典型生态系统碳收支特征及其生理生态学机制 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2006.
- [38] 李菊, 刘允芬, 杨晓光, 李俊. 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2006, 26(8): 2449-2456.
- [39] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨风亭, 陈永瑞, 刘琪璟. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的季节变异特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 91-102.
- [40] 温学发. 中亚热带红壤丘陵人工林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测及其季节动态特征 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [41] 李春, 何洪林, 刘敏, 苏文, 伏玉玲, 张雷明, 温学发, 于贵瑞. ChinaFLUX CO<sub>2</sub> 通量数据处理系统与应用. *地球信息科学*, 2008(5): 557-565.
- [51] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 张雷明, 任传友, 刘允芬, 关德新. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 84-94.
- [52] 郑泽梅. 中国陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素及其定量评价 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [55] 刘琪璟, 曾慧卿, 马泽清. 江西千烟洲湿地松人工林碳蓄积及其与水分的关系. *生态学报*, 2008, 28(11): 5322-5330.
- [56] 宋霞. 中亚热带人工针叶林生态系统水分利用效率的季节动态及其环境控制机制研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007.
- [59] 陈永瑞. 千烟洲试验区马尾松人工林凋落叶及其营养元素的数量动态. *江西科学*, 2000, 18(1): 19-23.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis ..... LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) ... .. SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study ..... LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China ..... YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau ..... CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China ..... GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach ..... REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ..... ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method ..... LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ..... ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing ..... FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island ..... WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province ..... QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau ... .. WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities ..... LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land ..... XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) ..... FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering ..... CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains ..... DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China ..... SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones ..... WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China ..... WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like ..... XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ..... ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* ..... WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve ..... LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils ..... WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. .... LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ..... ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation ..... XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing ..... LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China ..... FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton ..... GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle ..... WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study ..... HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City ..... FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects ..... HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ..... ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,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

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 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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