

基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量季节变异的模拟

米娜^{1,2} 于贵瑞^{2*} 王盘兴¹ 温学发² 孙晓敏²
张雷明² 宋霞² 王树森³

(1 南京信息工程大学, 南京 210044) (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 100101)
(3 加拿大遥感中心, 渥太华)

摘要 EALCO 模型是一个基于生理生态学过程, 模拟生态系统下垫面与大气之间水、热和碳通量交换的综合模型。将该模型应用在亚热带常绿针叶林, 对其生态系统过程进行了模拟, 以深入探讨季节性干旱对生态系统过程的影响。对 EALCO 模型进行了参数化与初始化并对模型的光合作用时段和落叶机制进行了改进, 以更好地模拟亚热带人工针叶林生态系统。千烟洲通量观测站自 2002 年底开始应用涡度相关技术对中亚热带人工针叶林生态系统进行通量观测, 该站点 2003 年经历了一次较严重的季节性干旱(由高温与少雨综合作用造成), 降水量仅为多年平均值的 65%, 而 2004 年的年降水量与多年平均值较为接近。利用该站点 2003 和 2004 年特殊的气候条件, 使用其通量观测数据对模型的模拟效果进行检验。从模拟结果的总体趋势来看, 模型能较好地从小时、日及年尺度上反映两年内土壤-植被-大气之间的碳交换状况。总初级生产力(Gross primary production, *GPP*)在一年中呈现单峰型变化, 遇高温及干旱胁迫 *GPP* 值下降。由于受到干旱胁迫的影响, 2003 年 *GPP* 值比 2004 年偏低 12.9%。模拟结果显示 2003 年 *GPP* 值比 2004 年偏低 11.2%。观测数据与模拟结果均显示, 水分胁迫期间净碳交换量(Net ecosystem production, *NEP*)模拟值与实测值的日变化均呈现一种“偏差”, 即一天中生态系统碳交换量最大值出现在上午某一时刻, 之后逐渐降低。模拟结果显示, 水分匮乏对光合能力的影响比对生态系统呼吸作用的影响更为强烈, 因而导致了净生态系统生产力的降低。进一步分析表明, 水分匮乏期间, 晴天正午之前, 深层土壤(> 20 cm)水分的匮乏抑制了光合作用能力, 正午之后, 高温与深层土壤水分匮乏共同削弱光合作用能力, 影响各占一半。

关键词 人工针叶林 碳通量 EALCO 模型 生态系统过程 季节性干旱

MODELING SEASONAL VARIATION OF CO₂ FLUX IN A SUBTROPICAL CONIFEROUS FOREST USING THE EALCO MODEL

MI Na^{1,2}, YU Gui-Rui^{2*}, WANG Pan-Xing¹, WEN Xue-Fa², SUN Xiao-Min², ZHANG Lei-Ming², SONG Xia², and WANG Shu-Sen³

¹Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China, ²Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, and ³Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Canada

Abstract Aims Seasonal drought frequently occurs in the mid-subtropical region of China and commonly combines with high temperature. Our objectives were to test the sensitivity of carbon exchange to this seasonal drought and discuss the influence of seasonal drought on carbon assimilation.

Methods We used flux measurements obtained from eddy covariance technology since October 2002 over a human-planted forest ecosystem at Qianyanzhou (QYZ) (26°44' N, 115°03' E, 110.8 m als.). The EALCO (ecological assimilation of land and climate observations) model is parameterized to simulate the ecosystem carbon exchange process in the human-planted evergreen forest. Simulation results were validated using half-hourly carbon fluxes and daily and annual *GPP* (gross primary production), *NEP* (net ecosystem production) and *TER* (total ecosystem respiration) estimated from eddy covariance measurements.

Important findings In general, the model can effectively simulate the two years' carbon fluxes among soil-plant-atmosphere on hourly, daily and annual scales. Both simulations and observations showed strong impact

收稿日期: 2006-10-16 接受日期: 2007-02-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2002CB412501) 国家自然科学基金面上项目(30670384)和国家自然科学基金重大项目(30590381)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

of drought on *GPP* in 2003. Compared with 2004, the annual *GPP* in 2003 was 12.9% lower according to observations (1 610 vs. 1 865 g C·m⁻²) and 11.2% lower according to model results (1 637 vs. 1 844 g C·m⁻²). The diurnal variations of *NEP* from both observations and simulations during the period of soil water deficit showed asymmetric format, i.e., the peak value of carbon exchange accrued at a certain time in the morning and then decreased with time. Modeling results indicated that water stress has more influence on photosynthesis than *TER*, which led to the decrease of *NEP*. Further analysis suggested that deep soil water content controls canopy photosynthesis in sunny days before noon during soil water stress. Afternoon, both high temperature and deep soil water content eliminate the *GPP*, and their elimination percents are equal. On cloudy days, radiation and deep soil water content primarily determine the photosynthesis, and temperature becomes a generally minor controlling factor.

Key words coniferous plantation, carbon flux, EALCO model, ecosystem processes, seasonal drought

全球碳循环与气候系统紧密地耦合在一起(Cao & Woodward, 1998; Cox *et al.*, 2002),在一个具有植被覆盖的陆地表面,植物的能量、水和碳过程之间紧密地联系在一起,受低层大气状况的制约同时给大气以反馈。基于生态系统过程模拟生态系统能量与物质通量的模型是研究生态系统与气候之间相互作用,分析陆地生态系统碳水循环过程机制的一种有效手段。近年来,对于气候-生态系统之间相互作用关系的科学认识已经体现在各种基于过程的生态系统模型中(Amthor *et al.*, 2001; Grant, 2001; Ma & Shaffer, 2001; McGechan & Wu, 2001),其中 EALCO (Ecological assimilation of land and climate observation) 模型(由加拿大路面过程模型 CLASS 发展而来)(Wang *et al.*, 2001, 2002a, 2002b)在研究生态系统与气候之间相互作用关系中发挥了一定的作用(Grant *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2006; Wang & Davidson, 2007),该模型的优势之处主要表现在:1)使用 30 min 为时间步长进行模拟,当把该模型嵌入气候模型后,有助于研究生物圈-大气圈交互作用中的细微过程,提高模型在长时间尺度上的预测能力;2)通过将植物的水平衡方程和能量平衡方程耦合起来,从而实时地求出每个时间步长的植物冠层温度和冠层水势,真正意义上将陆面碳、能量和水过程动态地耦合起来;3)在植物 C 过程中考虑 N 元素的影响,N 元素的缺乏对植物的生长产生抑制作用。Wang 等(2002b)曾对加拿大北方落叶林(白杨 *Populus tomentosa*)和针叶林(黑云杉 *Picea mariana*)的生态系统 CO₂ 交换在小时、日和年时间尺度上进行了模拟检验,结果显示该模型分别可以解释两种林型 86% 和 54% 的 CO₂ 交换特征。亚热带常绿针叶林作为全球陆地表面的植被类型之一,对全球的碳收支产生了重要的影响,也是 EALCO 模型所包含的生态系统类型之一,但对这种生态系统类型的模拟效果还没有进行过检验。位于中国江西省泰和县内

的千烟洲通量站(中亚热带人工林生态系统)采用涡度相关技术开展通量观测已有 3 年多(2002 年 10 月至今)的时间,该数据积累为模型的验证工作提供了良好的基础。本研究应用 EALCO 模型对千烟洲通量站亚热带人工林生态系统的碳通量进行模拟,主要目的在于将模型进行参数化并校准模型使其能够代表亚热带常绿针叶林生态系统;使用观测数据检验 EALCO 模型对该生态系统碳通量的模拟效果;探讨季节性干旱对生态系统碳通量的影响。本研究中模型检验的时间段包括一个降水匮乏年份(偏低 35% 的 2003 年)和一个降水正常年份(2004 年),这种特殊的气候年景为研究工作提供了天然的实验平台。

1 研究方法

1.1 模型描述

EALCO 模型以常规气象数据(入射长波及短波辐射、降水、空气温度、风速、大气压和比湿)作为驱动变量。模型主要包括 4 个模块,即 1)辐射传输模块;2)水传输模块(主要计算气孔和根系的阻力);3)植物模块(主要模拟自养的碳和氮的转化);4)土壤模块(主要模拟异养的碳和氮的转化)。

1.1.1 植物的光合作用

EALCO 模型中,光合作用的计算主要是基于 Farquhar 等(1980)发展的生物化学模型,叶片的 CO₂ 同化速率(V_L)用下式表示,

$$V_L = \min(V_d, V_c) \quad (1)$$

V_d 和 V_c 分别代表暗反应和光反应速率,计算公式参见文献(Wang *et al.*, 2001)。实际的植物光合作用还会受到植物水分条件的限制,因此将叶片实际的光合速率(V_1)用下式表示,

$$V_1 = V_L(\psi_c) \quad (2)$$

$f(\psi_c)$ 代表冠层水势对光合作用的影响函数

(Wang *et al.* , 2001 ;Kimmins , 1997) ,

$$f(\psi_c)=\frac{1}{2}\left[\cos\left(\frac{\psi_c-\psi_{c,min}}{\psi_{c,max}-\psi_{c,min}}\pi\right)+1\right]\tag{3}$$

式中,冠层水势低于 $\psi_{c,min}$ 时, $f(\psi_c)=0$;高于 $\psi_{c,max}$ 时, $f(\psi_c)=1$ 。它们的取值见附表A。

EALCO模型中将冠层能量平衡模块(式4)(Versegby *et al.* , 1993)与水分传输模块(式5)(Wang *et al.* , 2001)耦合起来,通过数值迭代将两个诊断变量,冠层温度(T_c)与冠层水势(ψ_c)的值在每一个时间步长中求出。

$$\begin{cases} Q_{H,c}+Q_{E,c}+Q_{S,c}+R_{N,c}=0 \\ \frac{\rho_a[q_a-q_{sa}(T_c)]}{r_a+r_c}-\sum_{i=1}^n\frac{\rho_w(\psi_c-\psi_{s,i})}{r_{r,i}+r_{x,i}+r_{s,i}} \\ -C_wC_{str,plant}\frac{\partial\psi_c}{\partial t}=0 \end{cases}\tag{4}$$

式(4)中, $Q_{H,c}$ 和 $Q_{E,c}$ 分别代表植被与大气之间的显热和潜热交换, $Q_{S,c}$ 代表冠层热贮存的变化量, $R_{N,c}$ 代表冠层的净辐射,式(4)中的各项都可以表示为已知的边界层条件和两个未知诊断变量(ψ_c 和 T_c)的函数。式(5)左侧3项分别代表冠层蒸腾、根对水的吸收、植物水贮存量的变化,其中, ρ_a ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)和 q_a ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别代表湿空气密度和比湿; $q_{sa}(T_c)$ 代表冠层温度为 T_c 时的饱和比湿; r_a 代表边界层阻力,根据莫宁-奥布霍夫相似理论导出公式,具体算法见文献(Abdella & McFarlane , 1996); r_c 代表冠层气孔阻力。阴叶和阳叶的气孔阻力($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)可由 CO_2 同化速率、相对湿度和外界 CO_2 浓度计算得出(Ball *et al.* , 1987),即

$$r_1=1/(mh_sA_1/C_a+b)\tag{6}$$

式中, m 和 b 为参数,表示叶片气孔阻力(r_1)对叶表面相对湿度(h_s)、 CO_2 浓度(C_a ,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)和叶片净光合速率(A_1 ,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的综合响应(取值见附表A)。冠层导度通过叶面积指数从单叶扩展到冠层,

$$\frac{1}{r_c}=\frac{LAI_{sunlit}}{r_{1,sunlit}}+\frac{LAI_{shaded}}{r_{1,shaded}}\tag{7}$$

式(5)中, n 为模型中土壤的分层数($=7$), ρ_w 和 $\psi_{s,i}$ 分别代表水的密度和土壤的水势,土壤和根系系统对水的阻力用根围(土壤)的阻力(Soil rhizosphere resistance, $r_{r,i}$)、根的轴向阻力(Root axial resistance, $r_{x,i}$)和根的半径阻力(Root radial resistance, $r_{s,i}$)之和来表示。它们的表达式及参数取值参见文献(Wang *et al.* , 2002a)。 C_w 和 $C_{str,plant}$ 分别代表植物的水容量(Water capacitance, $\text{kg}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)和每

一个时间步长的总的结构性碳量。植物水容量定义为:在冠层水势下,单位生物量中储存水的变化速率。联立方程(4)和(5),通过数值迭带即可以求解 ψ_c 和 T_c 。式(7)中, r_c 代表冠层阻力, $r_{1,sunlit}$ 和 $r_{1,shaded}$ 分别代表阳叶和阴叶的叶片气孔阻力, LAI_{sunlit} 和 LAI_{shaded} 分别代表阳叶和阴叶的叶面积指数。

叶片尺度上的光合作用通过下式扩展到冠层,

$$V_c=LAI_{sunlit}V_{1,sunlit}+LAI_{shaded}V_{1,shaded}\tag{8}$$

1.1.2 根对氮的吸收

根对氮的吸收速率主要由两方面因素决定,一是土壤提供氮的能力;二是根对氮吸收的动力学。氮从土壤流向根的表面,流动一方面通过土壤对水的吸收的物质流动,主要由蒸散作用所驱动,另一方面是通过土壤溶液中氮浓度梯度差所产生的扩散作用来实现。两者之和即为根对氮的吸收量。即

$$Q_{N,i}^N=Q_{N,i}^m+Q_{N,i}^d\tag{9}$$

式中, $Q_{N,i}^N$ 、 $Q_{N,i}^m$ 和 $Q_{N,i}^d$ 分别代表植物根系的氮吸收量、通过物质流动的氮吸收量和通过扩散作用的氮吸收量。详细计算方法参见文献(Wang *et al.* , 2001)。

1.1.3 维持呼吸

植物组织中的底物碳首先用来进行植物的维持呼吸以满足植物的能量所需。维持呼吸的算法为,

$$R_{m,x}=r_{m,x}C_{str,x}\frac{f(T_c)}{f(T_{ref})}\tag{10}$$

式中, $R_{m,x}$ 代表植物组织 x 的维持呼吸量, x 代表植物的叶、茎或根; $r_{m,x}$ 代表参考温度下的维持呼吸系数($\text{kg}\cdot\text{C}\cdot\text{kg}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)。 $C_{str,x}$ 代表植物组织 x 的结构性碳量; $f(T_c)$ 和 $f(T_{ref})$ 分别代表冠层温度和参考温度下的函数值。函数表达形式如下,

$$f(T_c)=T_c e^{(A-H_a/RT_c)}\left(1+e^{(H_{dl}-ST_c)/RT_c}+e^{(ST_c-H_{dh})/RT_c}\right)\tag{11}$$

式中, T_c 代表冠层温度, A 为参数, R 为气体常数, S 、 H_a 、 H_{dl} 和 H_{dh} 分别代表熵变化量、活化能、低温钝化作用能量和高温钝化作用能量。

1.1.4 植物的生长及生长呼吸

植物维持呼吸之后剩余的底物碳用来进行植物组织的生长及生长呼吸,生长呼吸的大小与植物组织的生长量成正比,即

$$R_{g,x}=r_{g,x}G_X^C\tag{12}$$

式中, $R_{g,x}$ 代表植物组织 x 的生长呼吸量, $r_{g,x}$ 代表生长呼吸系数, G_X^C 代表用来进行植物组织结构

建成的底物碳量。

1.1.5 植物的凋落

植物组织的凋落速率主要受到植物组织的大小和植物物候的影响。EALCO 模型中凋落碳和氮的量计算如下列公式所示，

$$L_X^C = p_X l_X C_X \quad (13)$$

$$L_X^N = p_X l_X (1 - t_N) N_X \quad (14)$$

式中， L_X^C 代表植物组织 X(叶、茎或根) 的凋落速率， L_X^N 代表凋落物中对应的氮量， p_X 代表植物物候的影响， l_X 代表效率常数， t_N 代表氮的再次迁移系数。详细介绍参见文献(Wang *et al.* , 2001)。

1.1.6 植物的结构建成

模型在每一个时间步长的最后都可求出植物各库中的结构性碳量，根据叶片及根的结构性碳量即可求出植物的叶面积指数及根的长度，

$$LAI = C_{S,L} / SLA \quad (15)$$

$$L_{R,i} = C_{S,R,i} / (\pi c \rho_R a^2) \quad (16)$$

式中， $C_{S,L}$ 为叶片中的结构性碳量； SLA 为比叶面积，取值见附表 A； $L_{R,i}$ 为土层 i 中细根的长度，由根系的结构性碳量($C_{S,R,i}$)转化而来； c 和 ρ_R 分别为碳的浓度和根生物量的密度。

1.2 站点描述

1.2.1 研究区域

本研究所选区域为干烟洲试验站，通量塔位于江西省泰和县中国生态系统研究网络干烟洲试验站内(26°44' N , 115°03' E , 110.8 m asl.)。通量塔周围近 1 km² 范围内森林覆盖高达 90%，林分为 1985 年前后营造的人工林。塔周围主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*) 和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)，平均树高为 12 m，林龄多为 20 年左右。林下植被灌木有木(*Loropetalum chinense*)、黄端木(*Adinandra millettii*)、米饭花(*Lyonia compta*) 等；草本有狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、暗鳞鳞毛蕨(*Dryopteris cycadina*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*) 等。站区内主要土壤类型为红壤，成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩。据 1985 ~ 2004 年本站地面气象观测数据统计，站区年平均气温 17.9 °C，平均年降水量 1 485.1 mm，最大年降水量 2 410.4 mm(2002 年)，最小年降水量 854.9 mm(2003 年)。有关该站点的详细情况参见文献(Liu *et al.* , 2006)。

从干烟洲站点多年(1985 ~ 2002 年) 的降水量统计可以看出，该站点的降水主要集中在春季及初夏

(3 ~ 6 月)，占年降水总量的 51%，7 月至翌年 2 月降水相对较少，并且少雨季节与强蒸发、高温时期叠合。研究者把这种降水主要集中于某个季节(几个月) 而其它月份降水相对较少的现象称为季节性干旱。季节性干旱在我国江西省、湖南省(黄道友等，2004) 及美国的西部(Hanson & Weltzin , 2000) 等地区均经常发生。将 2003 和 2004 年各月的降水与温度与该站点的多年平均值进行比较，可以看出，2003 年除 5 和 8 月的降水量高于多年平均值外，其它月份均小于多年平均值，尤其是 7 月降水量仅有 3.9 mm，平均温度比多年平均温度高 3 °C。2004 年除 10 月降水远远小于多年平均值外，其它月份的降水格局与多年平均状况较为一致。2003 年降水总量比多年平均值偏低 35%。本研究将 2003 和 2004 年分别作为干旱年份和正常年份进行 CO₂ 通量的模拟。两年中逐日的降水和各层土壤水分状况参见图 1。

1.2.2 观测系统及通量数据处理

干烟洲通量观测站采用涡度相关技术(EC) 测定植被-大气间 CO₂ 通量。利用三维超声风速仪(Model CSAT-3 , Campbell Scientific) 测定风速和温度脉动。利用红外线 CO₂/H₂O 气体分析仪(Model Li-7500 , Licor Inc.) 测定 CO₂/H₂O 密度脉动。通量仪器安装在大约 3 倍冠层高度即 39.6 m 处。仪器设备详情见 Liu 等(2004) 的详细介绍。为了配合 CO₂ 通量观测，该站点辅以常规气象要素系统，其中常规气象要素主要包括辐射、温度、湿度等要素的测定。通量数据采集后，需要对净生态系统 CO₂ 交换量(Net ecosystem exchange , *NEE*) 进行密度校正与坐标轴旋转，同时还需要做数据筛选以及缺失数据的插补等工作，从而估算生态系统呼吸(Total ecosystem respiration , *TER*) 和生态系统总初级生产力(Gross primary production , *GPP*)，详细方法见文献(Zhang *et al.* , 2006)。

1.3 模型参数化及初始化

本研究中，将模型进行参数化使其能够代表亚热带常绿针叶林生态系统，模型以 30 min 为时间步长，对 2003 和 2004 年的数据进行全年的运行。模型的输入变量均由针叶林冠层上方的观测塔获得。模型的初始条件如土壤的温度和水分状况等使用已有模型给出的值。植物与土壤库中的碳、氮含量初始值从站点的观测数据与相关的参考文献中获得。

EALCO 模型中光合作用的计算主要是基于 Farquhar 等(1980) 发展的生物化学模型。模型中 V_{cmax} 和 J_{max} 分别代表叶片的最大羧化能力和最大电子传递

速率,它们的值随温度的变化而发生改变。在模型中, V_{cmax} 和 J_{max} 对温度的响应用修订的 Arrhenius 温度函数 $f(T_c)$ (Sharpe & DeMichelle, 1977) 表达(式 11) 式(11)中, A 为参数,它决定了 $f(T_c)=1$ 时的冠层温度。为了使模型适用于干烟洲人工针叶林生态系统,本研究修改了式(11)中参数的取值。参考 Liu 等(2006)的研究结果,设置 $A=8.8$,此时 $f(T_c)$ 在温度介于 27~32℃ 之间时达到最大值,如图 2 所示,当温度介于 27~32℃ 之间时光合作用能力最大,即温度小于 27℃ 或大于 32℃ 时,函数值下降,对光合能力产生一定的削弱作用。

亚热带常绿针叶林生态系统全年进行光合作用,因此本研究将模型对植物同化作用的模拟时段改为全年进行光合作用。干烟洲试验区人工林的凋落量以生长季末期 11 和 12 月为最高峰(陈永瑞, 2000),本研究中将模型模拟凋落量的计算方法进行了修改,用式(17)表示,即凋落量与冠层的结构碳量和冠层最小结构碳量之差成比例,

$$L_{\text{plant}}=(C_{\text{str } \alpha}-C_{\text{str } \alpha \text{ min}})\zeta$$

(17)

式中, L_{plant} 代表植物凋落量; $C_{\text{str } \alpha}$ 和 $C_{\text{str } \alpha \text{ min}}$ 分别代表细根、树叶及枝条的结构性碳量和最小结构性碳量; ζ 是系数,在不同的生长阶段取值不同,取值列于附表 A。

依据土壤有机物质被微生物分解的难易程度将土壤有机质分成 3 个库:活性物质(Active)、难分解物质(Slow)和腐殖质(Humus)。植物的凋落物根据其生物化学特征也分成 3 个库:水溶性的(Water-extractable,包括碳水化合物和蛋白质)、纤维素(Cellulose)和木质素(Lignin)。多碳、氮库模型在运行前需要自运行过程(Riedo *et al.*, 2000; Ito & Olikawa,

2002; Peng *et al.*, 2002),自运行的目的是使模型中各库达到一个动态的平衡,以保证输出结果的可靠性。本研究使用降水量接近于平均水平的 2004 年气象数据对模型进行自运行,在植物和土壤库达到平衡后(运行 20 年,碳氮含量见附表 A),开始用 2003 和 2004 年的连续气象数据作为驱动数据运行模型并输出结果。

1.4 高温对生态系统光合能力的影响

与 2004 年相比,2003 年光合作用的下降百分比与温度影响所占的百分比如式(18,19)所示,

$$P_G=\frac{GPP_{2004}-GPP_{2003}}{GPP_{2003}}\times 100\%$$

(18)

$$P_T=\frac{f(T_{c,2004})-f(T_{c,2003})}{f(T_{c,2004})}\times 100\%$$

(19)

式中, P_G 和 P_T 分别代表光合作用能力下降的百分比和冠层温度影响所占的百分比, $f(T_c)$ 的表达式见式(11)。

2 模拟结果与讨论

2.1 CO₂ 通量的日变化

2.1.1 模拟结果

为了检验模型对 CO₂ 通量日变化的模拟效果,分别选取 2003 和 2004 年 5 月(多雨季)和 7 月(干旱季)中的 7 d 进行检验,其中 2003 年 7 月干烟洲站的降水只有 3.9 mm,经历了比较严重的水分胁迫状况。土壤表层(5 cm)体积含水量降低至 0.10 m³·m⁻³,深层(50 cm)土壤体积含水量降至 0.30 m³·m⁻³(图 1)。图 3 描述了模型对 CO₂ 通量日变化模拟的效果,两年中 DOY123~129、203~209 分别代表了不同大气与土壤湿度下的状况。

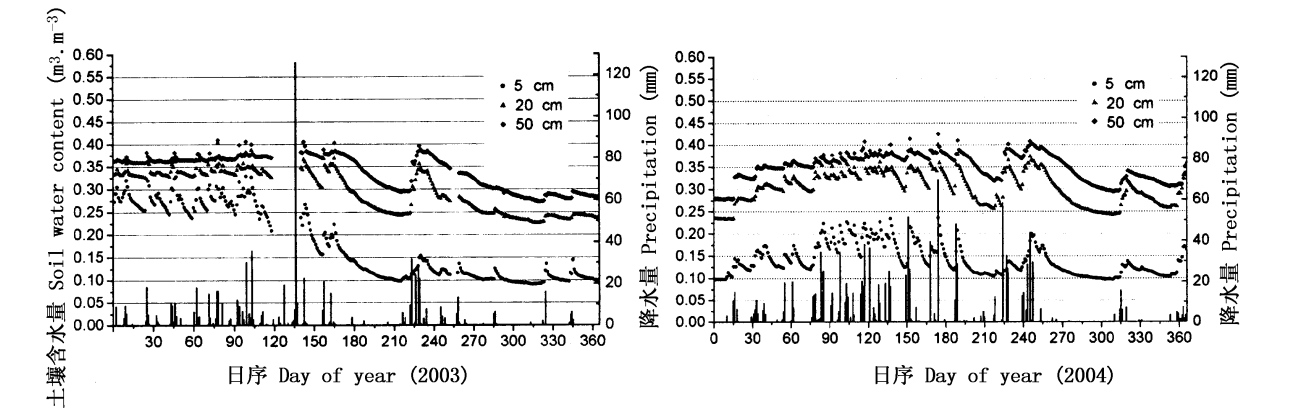


图 1 干烟洲 2003 和 2004 年逐日降水(柱形图)和各层土壤水分百分含量
Fig.1 Daily precipitation and soil water content of each layer in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site

在不同的土壤水分状况下,30 min 的净碳交换量(NEP)模拟值与实测值变化趋势基本一致(图 3)。图 3(b)中模拟与实测的 NEP 值的日变化均呈现一种“偏态”分布,即生态系统对碳的吸收高峰发生在上午某一时刻。在图中所示的 DOY203~209 的 7 d 中,2003 年的 NEP 值明显低于 2004 年,从平均状况来看,峰值从 2004 年的 $16\ \mu\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 2003 年的 $11\ \mu\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,这主要是由于受到了水分以及高温胁迫的影响。其中 2003 年 DOY205~207 的 3 d 中 CO_2 通量的日变化略显不同,主要是因为 DOY205 有 0.9 mm 的降水,接下来的 DOY206~207 是多云的天气,其中 DOY206 日最高太阳短波辐射值不到 $600\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,而其它晴天的日最高太阳短波辐射值均接近或超过 $900\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,这种微量的降水以及多云天气引起了空气饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)的降低,但是观测与模拟结果均表明,这些因素并没有使日 CO_2 交换量在数值上发生根本的变化,却使其日变化形式有所改变。综上所述可以看出,模型在较短的时间步长(半小时)下能够较好地模拟 NEP 对环境条件的响应。

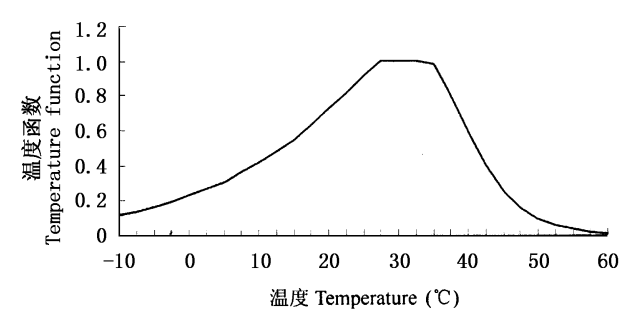


图 2 温度对光合能力的影响函数
Fig.2 Temperature function effects on photosynthesis

为了进一步探明引起 NEP 日变化的原因,有必要研究 GPP 和 TER 的日变化。图 4 给出了 DOY203~209 的 GPP 和 TER 的模拟值。可以看出,几天内生态系统呼吸的日变化并无较大差异,每日均呈现单峰型变化形式,峰值出现在下午,与气温峰值出现的时刻较为一致。比较图 3(b)、图 3(d)和图 4 可以发现, GPP 的变化在一定程度上决定了 NEP 的日变化。因此,2003 年 DOY205~207 这 3 d 净生态系统 CO_2 交换量的日变化与其它 4 d 不同,主要是因为太阳辐射、空气温度、湿度的变化引起了冠层光合作用能力发生了改变,进而使光合作用的日变化发生了改变。此外,比较 2003 与 2004 年 DOY203~209 的 GPP 与 TER 可以发现,导致 2003 年 DOY203~

209 的 NEP 减少的主要原因在于 GPP 的减少。从图 4 可以看出,2003 与 2004 年同期相比, GPP 下降 20%~60%, TER 下降 5%~18%,此期间干旱胁迫对生态系统光合能力的影响比对生态系统呼吸作用的影响更为剧烈。

为了在半小时尺度上检验模型对 CO_2 通量模拟的效果,本研究用 2003 年 1 月至 2004 年 12 月的观测值与模拟值统计,其中 2003 和 2004 年 NEP 的有效观测值数量分别为 12 849 和 13 141,这些有效的观测值代表了各种环境状况以及所有的植物生长阶段。对各年以及两年的统计结果列于表 1。

2.1.2 高温与土壤水分匮乏对生态系统光合作用能力的影响

为了进一步探明高温干旱期间温度与土壤含水量对生态系统光合作用能力的影响哪个占主导地位,本研究分别讨论晴天与多云天(或雨天)温度和土壤水分对生态系统光合作用能力的影响。根据常规气象观测记录,2003 年 DOY203~204、208~209 为晴天,DOY205~207 为多云天(或雨天)(图 5、图 6)。

从 DOY203~206 辐射与温度图(图 5)可以看出,2003 年晴天与 2004 年同期的辐射状况基本相同,因此推测引起两年间光合作用能力差异的环境因子主要为温度与土壤水分状况。晴天中,2003 年的温度高于 2004 年,温差达 2~12 °C 不等(图 5)。土壤水分状况如图 1 所示,2004 年土壤水分体积含水量高于 2003 年,表层土壤(5 cm)水分含量相差 1%左右,深层土壤水分含量相差 3%~6%,可见土壤水分状况的差异主要体现在深层土壤。

P_C 和 P_T 的计算结果见图 7。模型模拟的 2003 年晴天光合作用能力比 2004 年同期低 20%~60%。2003 年高温对光合作用能力有显著的降低作用,最多时降低 40%左右(DOY209)。综上所述,在晴天,过高的温度与土壤深层水分匮乏同时对光合作用能力产生削弱作用。温度对光合作用能力的削弱作用从中午 12:00~13:00 开始表现明显,随着时间推移削弱作用增强,至 16:00~17:00 左右增至最强,之后逐渐下降。因此,在 13:00 以前光合作用能力的减弱主要是由深层土壤水分的差异造成的,12:00~13:00 以后,光合能力的减弱受到高温与土壤水分匮乏的共同影响,影响强度各占一半(图 7)。这一事实也解释了晴天时光合能力在下午削弱更多的原因(图 3b、图 7)。

阴天或雨天状况下,温度不是降低光合能力的主要因素,辐射与深层土壤水分是制约光合能力的

主要因素。由于不受高温的影响,光合能力减弱百分比的日变化与晴天日变化有所不同(图7),不存在上午削弱少,下午削弱多的现象。

2.2 CO₂ 通量的季节变化

由于NEP是GPP与TER的差值,因此评价模型对GPP和TER的模拟效果有助于诊断对NEP模拟产生的误差。但是,在实际的通量观测中并无法

直接获得冠层GPP和TER的值,因此本研究中采用Falge等(2001)的插值方法对GPP及TER的值进行估算,具体方法见文献(Zhang, 2006)。图8给出了2003和2004年GPP和TER模拟值与“实测值”。

模型中GPP值的大小主要受到太阳辐射、温度和土壤水分状况的调节。2003年7月干旱胁迫期间GPP值减小(图8)主要由冠层水势和冠层温度所

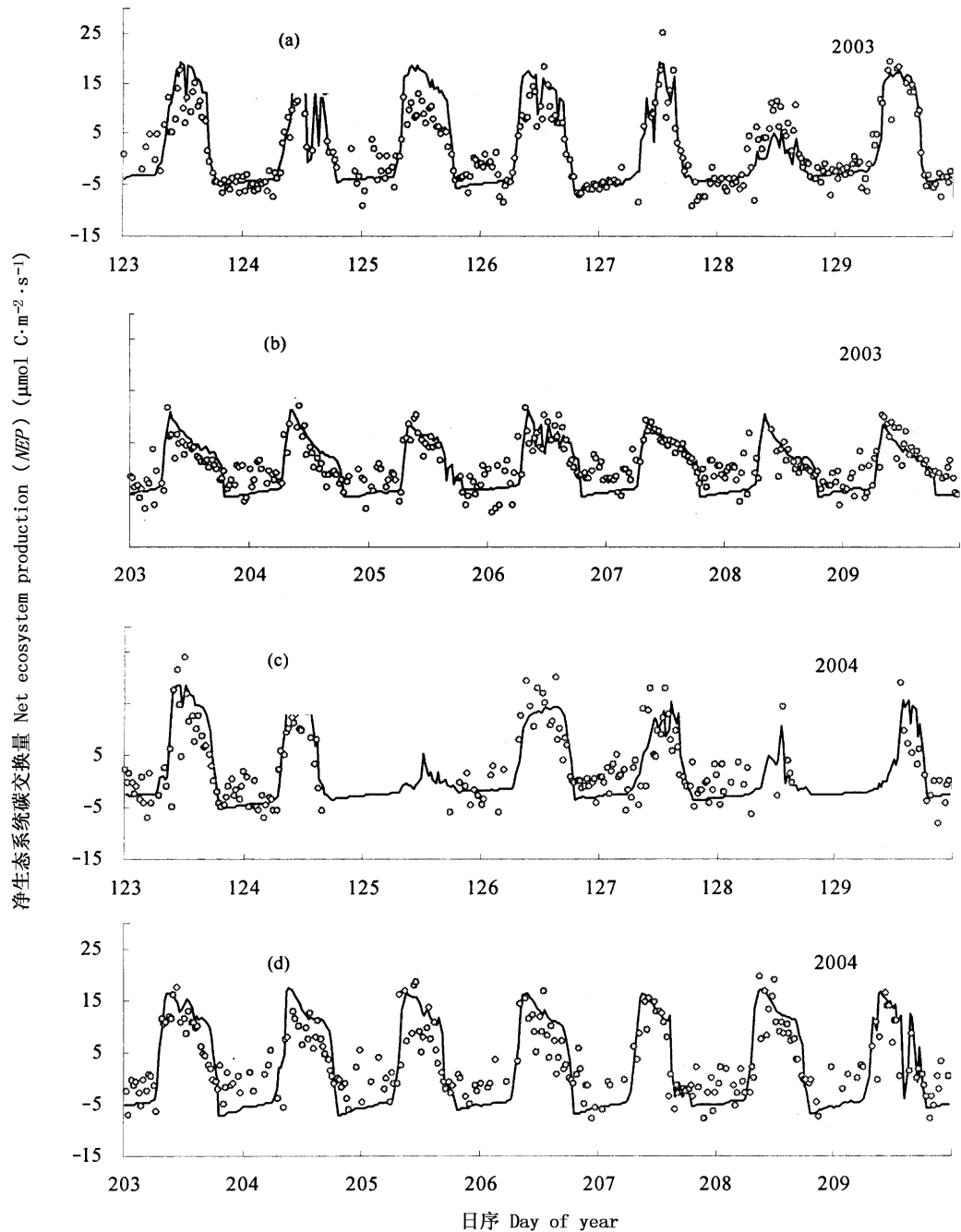


图3 2003和2004年DOY203~209 NEP的模拟值(线)与观测值(点)
Fig.3 Modeling results (line) and observation (dot) of NEP from DOY203 to DOY209 in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site

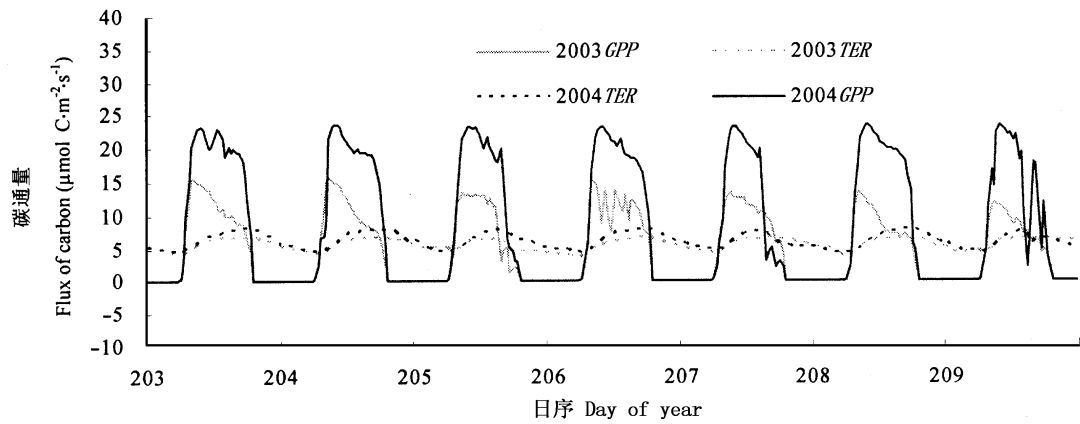


图 4 2003 和 2004 年 DOY203 ~ 209 的 *GPP* 和 *TER* 模拟值
Fig.4 Modeling results of *GPP* and *TER* from DOY203 to DOY209 in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site
GPP : 总初级生产力 Gross primary production *TER* : 总生态系统呼吸 Total ecosystem respiration

表 1 半小时尺度 CO_2 通量 (*NEP*) ($\mu\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 观测值 (*x*) 与模拟值 (*y*) 的回归统计
Table 1 Statistics from the regression of simulated (as *y*) on observed (as *x*) half-hourly net ecosystem CO_2 fluxes ($\mu\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

变量 Item	年 Year	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	标准差 Standard deviation	记录数 Observations
净 CO_2 交换量 Net CO_2 flux (<i>NEP</i>)	2003	0.91	- 0.34	0.68	3.66	12 849
	2004	0.91	- 0.02	0.67	4.17	13 141
	2003 ~ 2004	0.91	- 0.18	0.68	3.93	25 990

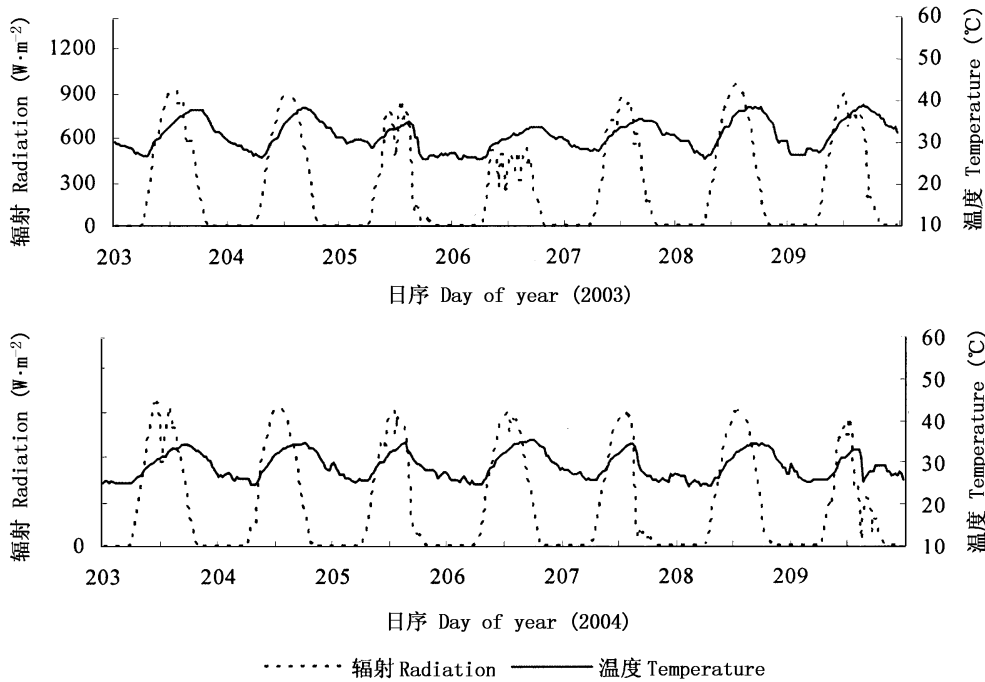


图 5 2003 与 2004 年辐射与温度状况 (DOY203 ~ 209)
Fig.5 Radiation and temperature conditions from DOY203 to DOY209 in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site

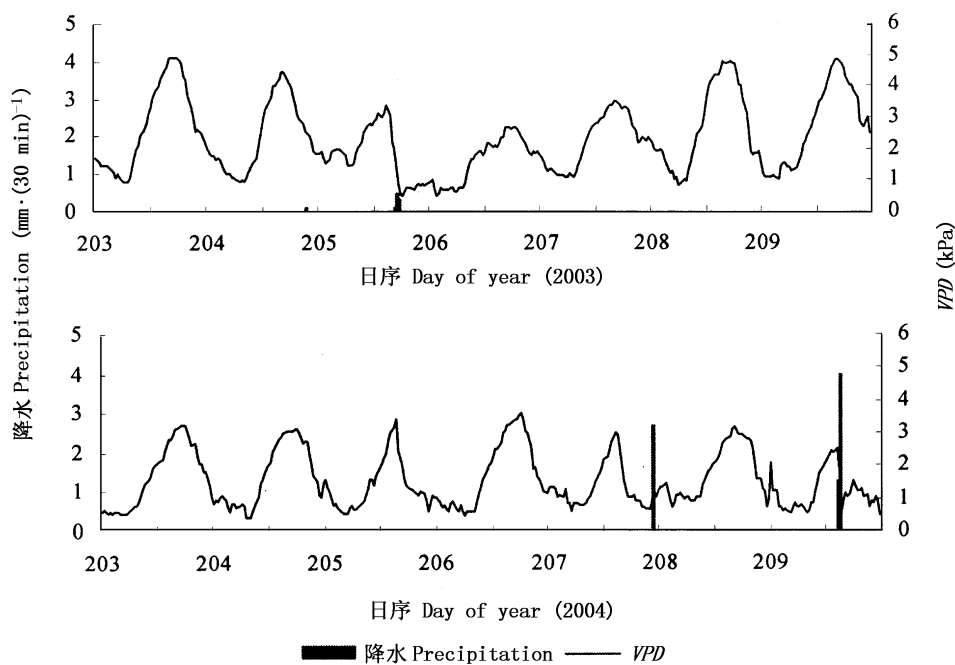


图 6 2003 与 2004 年降水与空气饱和水汽压差 (VPD) 状况 (DOY203 ~ 209)
Fig.6 Precipitation and vapor pressure deficit (VPD) conditions from DOY203 to DOY209 in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site

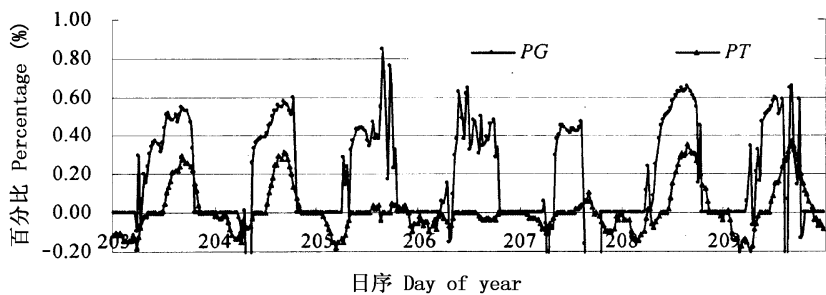


图 7 光合能力下降的百分数 (圆点) 与冠层温度影响所占的百分数 (三角点),
 T_c 代表模型模拟的冠层温度, P_G 和 P_T 的含义见式 (17) 和 (18)

Fig.7 Decline percent of photosynthesis capacity in 2003 compared to the same time in 2004 and influence percent of temperature on canopy photosynthesis.
 T_c represents the simulated canopy temperature. The calculation equation of P_G and P_T refer to equation (17) and (18)

决定(式 2 和式 11))。在此期间,生态系统呼吸强度也有所减弱,主要是由植物自养呼吸和土壤异养呼吸的减小所引起(图略)。其中自养呼吸的减小主要是由生长呼吸的减小所导致(图略),植物的生长呼吸量主要由植物的生长量决定。由于植物在此期间光合产物下降导致了植物生长量的下降,因此生长呼吸量有所降低。土壤异养呼吸的减弱是因为此期间土壤水分匮乏抑制了土壤微生物的活动,进而减弱了土壤异养呼吸量。模拟结果与实测结果均显示,在 2003 年 7 月的干旱胁迫期间,水分匮乏及高温对 GPP 值的削弱大于对 TER 值的削弱,因此导致了此期间 NEP 值的减少。两年中,日 NEP 的“实测

值”与模拟值比较见图 9。
由图 8 可见,除 2003 年 7 月干旱胁迫前期和 2003 年 10 月模型对 GPP 的模拟值稍高外,其它时间的模拟结果变化趋势均与“实测”结果较为一致。2003 年模型对 TER 的模拟与“实测”结果较为一致,但同样在 7 月干旱胁迫前期和 10 月存在生态系统呼吸高估的现象。干旱胁迫初期模型对 GPP 以及 TER 的高估可能是由于模型对干旱的响应存在滞后性造成的。基于对 GPP 与 TER 的分析,则可以很容易地分析出模型对 NEP 模拟产生误差的原因。由图 9 可见,从两年的总体情况来看,NEP 实测值与模拟值较为一致,模型能够较好地模拟该人工林的

净生态系统碳交换量。

2.3 年碳收支状况

通过将半小时模拟值进行累加就可以得到年总的生态系统碳收支组分的值,将其与估算值进行比较,结果列于表2。由于2003年QYZ生态系统受到较严重的干旱胁迫,因此与2004年相比GPP值偏低12.9%,模拟值也很好地反映出了GPP这种年际间的差异,2003年比2004年偏低11.2%。本研究对

NEP的模拟结果高于估算值,但Zhang等(2006)的研究结果显示,在经过摩擦风速筛选和能量平衡校正后,QYZ站点2003年的净生态系统生产力为 $468.7\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,由此可见,本研究的模拟值具有一定的合理性。两年中,模型模拟的土壤呼吸占生态系统呼吸的38%,这一结果与Liu等(2006)报道的结果42.5%~58.9%基本一致。

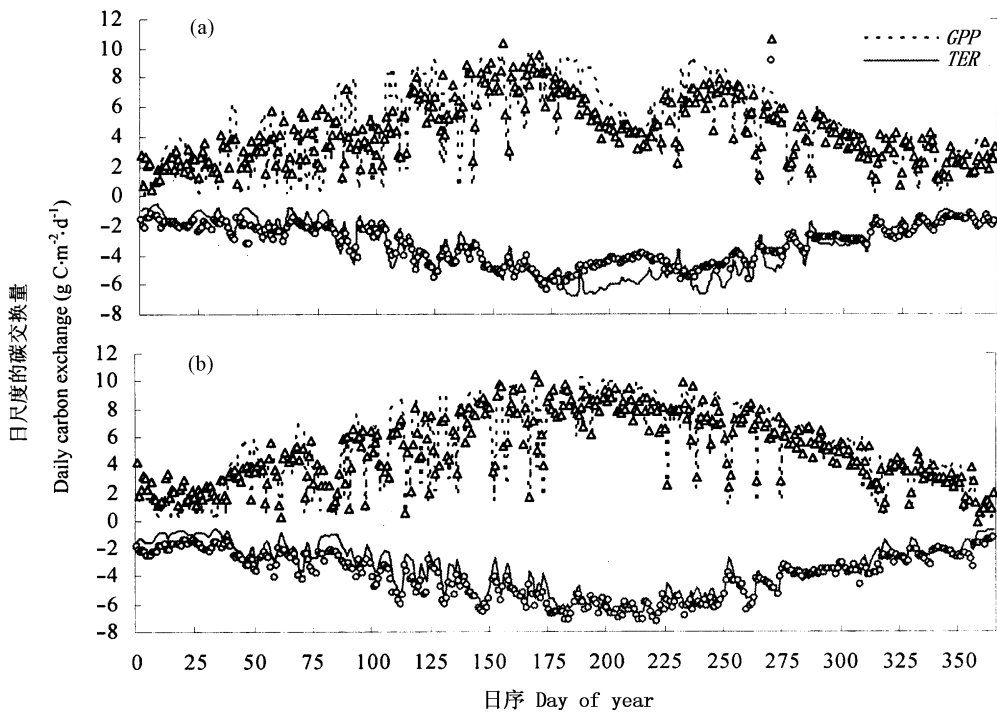


图8 2003~2004年日总初级生产力(GPP)与总生态系统呼吸(TER)的模拟值(线)与‘实测值’(点)

Fig.8 Modeling results (line) and observations (dot) of daily GPP and TER in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site
年观测值(x)与模拟值(y)的回归统计结果 Regression results between observation data (x) and modeling results (y) GPP : $y = 1.18x - 0.76$, $R^2 = 0.76$ (2003); $y = 1.15x - 0.81$, $R^2 = 0.88$ (2004) TER : $y = 1.25x - 0.84$, $R^2 = 0.82$ (2003); $y = 1.05x - 0.78$, $R^2 = 0.94$ (2004) GPP、TER : See Fig. 4

表2 碳循环组分模拟值与基于观测的估算值的比较

Table 2 Simulated annual carbon balance components vs. some observation-based estimations at Qianyanzhou site ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

变量 Variable	2003		2004	
	模拟值 Simulation	估算值 Estimated ¹⁾	模拟值 Simulation	估算值 Estimated ¹⁾
GPP	1 637.5	1 610.4	1 844.1	1 865.8
NPP	546.8	—	728.9	—
NEP	404.4	387.2	582.1	423.8
R _{above}	− 765.8	—	− 768.3	—
R _{soil}	− 467.3	—	− 493.7	− 536.5
TER	− 1 233.1	− 1 223.3	− 1 262.0	− 1 442.0

GPP : 总初级生产力 Gross primary production NPP : 净初级生产力 Net primary production NEP : 净生态系统生产力 Net ecosystem production
R_{above} 植物地上部分呼吸 Above ground respiration of plant soil respiration R_{soil} 土壤呼吸(地下部自养呼吸+土壤异养呼吸) Soil respiration (below-ground autotrophic respiration + heterotrophic respiration) TER (R_{above} + R_{soil}) : 总生态系统呼吸 Total ecosystem respiration “—” 无估算值 正值代表生态系统吸收碳, 负值代表生态系统释放碳 Positive value represents absorbe carbon from atmosphere and negative value represents release carbon to atmosphere 1) Liu *et al.*, 2006

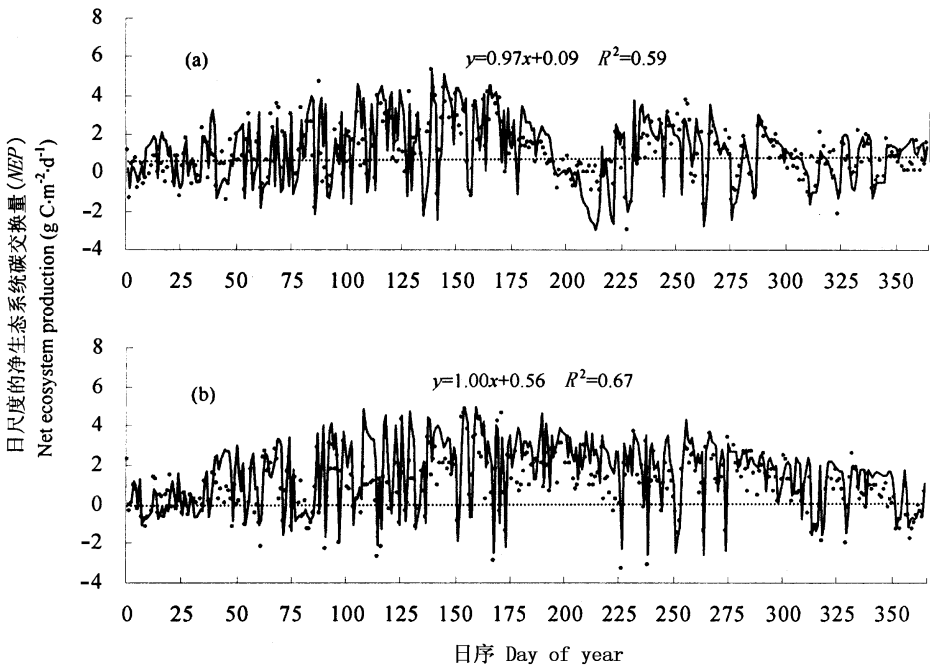


图9 2003~2004 年日净 CO₂ 交换量(NEP)的模拟值(线)与“实测值”(点)
Fig.9 Modeling results(line) and observations(dot) of daily NEP in 2003 and 2004 at Qianyanzhou site
NEP :见表 2 See Table 2

3 结 论

本研究试图通过对 EALCO 模型进行参数化使其代表亚热带常绿针叶林生态系统 ,从而使该模型具有更广泛的植被类型代表性 ,同时以基于生态系统机理过程的模型为工具分析了季节性干旱对生态系统光合作用能力的影响。在本研究中 ,将原来模型对光合作用的模拟时段改为全年进行碳同化作用 ,同时应用较简单的落叶机制来模拟植物的凋落 (见 1.3 节)。从总体趋势来看 ,模型能较好地从中半小时、日及年尺度上反映两年内土壤-植被-大气之间的碳交换状况。实测数据与模拟结果都显示 2003 与 2004 年干烟洲生态系统的碳平衡存在较大的年际差异 ,2003 年该站点受到水分及高温胁迫的影响 ,在干旱胁迫期间 ,冠层水势的降低以及高温导致了此期间总初级生产力的降低。2003 年 GPP 实测值比 2004 年偏低 12.9% ,2003 年模拟值比 2004 年偏低 11.2% ,两者的结果比较一致。模拟结果显示 ,在晴天正午之前对光合能力产生抑制的因素主要是深层土壤水分 ,正午之后深层土壤水分匮乏与高温共同影响生态系统光合能力 ,两者对光合能力的削弱作用各占一半。模型下一步的工作应集中在进一步改善模型对凋落物的模拟 ,同时将植物根对

氮的吸收与土壤氮动态耦合起来 ,基于辅助实验对植物氮状况进行测定 ,以实现氮元素模拟的验证 ,增强模型在长期尺度上运行的精确度。

参 考 文 献

Abdella K, McFarlane NA (1996). Parameterization of the surface-layer exchange coefficients for atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 80, 223 – 248.

Amthor JS (1989). *Respiration and Crop Productivity*. Springer Verlag, New York.

Amthor JS, Chen JM, Clein JS, Frohling SE, Goulden ML, Grant RF, Kimball JS, King AW, McGuire AD, Nikolov NT, Potter CS, Wang SS, Wofsy SC (2001). Boreal forest CO₂ exchange and evapotranspiration predicted by nine ecosystem process model: intermodel comparisons and relationships to field experiments. *Journal of Geography Research—Atmosphere*, 106, 33623 – 33648.

Ball JT, Woodrow IE, Berry JA (1987). A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggens J ed. *Progress in Photosynthesis Research*. Vol. 4. Martinus-Nijhoff, Dordrecht, 221 – 224.

Cao M, Woodward FI (1998). Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393, 249 – 252.

Chen YR (陈永瑞) (2000). Nutrient element dynamic analysis of

- withered leaves from artificial forest of masson pine on the experimental plot in Qiangyanzhou. *Jiangxi Science* (江西科学), 18, 19–24. (in Chinese with English abstract)
- Cox P, Friedlingstein P, Rayner P (2002). Modeling climate carbon cycle feedbacks: a cross disciplinary collaboration priority. *IGBP Global Change Newsletter*, 49, 12–14.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R (2001). Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agriculture and Forest Meteorology*, 107, 43–69.
- Farquhar GD, Von Caemmerer S, Berry JA (1980). Biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149, 78–90.
- Grant RF (2001). A review of the Canadian ecosystem model ecosys. In: Shaffer MJ, Ma L, Hansen S eds. *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press, Boca Raton, 173–263.
- Grant RF, Arain A, Arora V, Barr A, Black TA, Chen J, Wang S, Yuan F, Zhang Y (2005). Intercomparison of technique to model high temperature effects on CO₂ and energy exchange in temperate and boreal coniferous forests. *Ecological Modelling*, 188, 217–252.
- Hanson PJ, Weltzin JF (2000). Drought disturbances from climate change: response of United States forests. *Science of the Total Environment*, 262, 205–220.
- Huang DY (黄道友), Wang KL (王克林), Huang M (黄敏), Chen HS (陈洪松), Wu JS (吴金水), Zhang GP (张广平), Peng TB (彭廷柏) (2004). Seasonal drought problems in the red soil hilly region of the middle subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 2516–2523. (in Chinese with English abstract)
- Ito A, Olikawa T (2002). A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 151, 143–176.
- Kimmins JP (1997). *Forest Ecology: a Foundation for Sustainable Management* 2nd edn. Prentice Hall, New Jersey.
- Larcher W (1995). *Physiological Plant Ecology* 3rd edn. Springer, Austria.
- Li XR (李轩然), Liu QJ (刘琪璟), Cai Z (蔡哲), Ma ZQ (马泽清) (2007). Specific leaf area and leaf area index of conifer plantation in Qiangyanzhou station of subtropical China. *Journal of Plant Ecology* (Chinese Version) (植物生态学报), 31, 93–101. (in Chinese with English abstract)
- Liu RF, Song X, Yu GR, Sun XM, Wen XF, Chen YR (2004). Seasonal variation of CO₂ flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation. *Science in China Series D*, 48 (Suppl. I), 123–133.
- Liu RF, Yu GR, Wen XF, Wang YH, Song X, Li J, Sun XM, Yang FT, Chen YR, Liu QJ (2006). Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from sub-tropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D*, 49(Suppl. II), 99–109.
- Ma L, Shaffer MJ (2001). A review of carbon and nitrogen processes in nine US soil nitrogen dynamic models. In: Shaffer MJ, Ma L, Hansen S eds. *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press, Boca Raton, 55–102.
- McGechan MB, Wu L (2001). A review of carbon and nitrogen processes in European soil nitrogen dynamic models. In: Shaffer MJ, Ma L, Hansen S eds. *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press, Boca Raton, 103–172.
- Peng C, Jiang H, Apps MJ, Zhang Y (2002). Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in central Canada: a process model simulation. *Ecological Modelling*, 155, 177–189.
- Riedo M, Gyalistras D, Fuhrer J (2000). Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: simulation of site-specific sensitivity to an increase in atmospheric CO₂ and to climate change. *Ecological Modeling*, 134, 207–227.
- Sharpe PSH, DeMichelle DW (1977). Reaction kinetics of poikilothermic development. *Journal of Theoretical Biology*, 64, 649–670.
- Song X (宋霞), Liu RF (刘允芬), Xu XF (徐晓锋), Yu GR (于贵瑞), Wen XF (温学发) (2004). Comparison study on carbon dioxide, water and heat fluxes of the forest ecosystem in red earth hilly zone over winter and spring. *Resources Science* (资源科学), 26(3), 96–104. (in Chinese with English abstract)
- Verseghy DL, McFarlane NA, Lazare M (1993). CLASS—a Canadian land surface scheme for GCMs. II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology*, 13, 347–370.
- Wang S, Davidson A (2007). Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142, 133–142.
- Wang S, Grant R, Verseghy DL, Black TA (2001). Modeling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS—the Canadian Land Surface Scheme. *Ecological Modeling*, 142, 135–155.
- Wang S, Grant R, Verseghy DL, Black TA (2002a). Modeling carbon-coupled energy and water dynamics of a boreal aspen forest in a general circulation model land surface scheme. *International Journal of Climatology*, 22, 1249–1265.
- Wang S, Grant R, Verseghy DL, Black TA (2002b). Modeling carbon dynamics of boreal forest ecosystems using the Canadian Land Surface Scheme. *Climate Change*, 55, 451–477.
- Wang S, Trishchenko A, Khlopenkov K, Davidson A (2006). Comparison of IPCC AR4 climate model simulations of surface albedo with satellite products over northern latitudes. *Journal of Geography Research—Atmosphere*, 111, D21108, doi: 10.1029/2005JD006728.
- Zhang LM, Yu GR, Sun XM, Wen XF, Ren CY, Song X, Liu YF, Guan DX, Yan JH, Zhang YP (2006). Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern

forest transect in China. *Science in China Series D*, 49 (Suppl. II), 47 – 62.

Zhou ZT (周志田), Chen SK (成升魁), Liu RF (刘允芬), Li JY (李家永) (2002). CO₂ emission of soil under different land-

use types in subtropical red soil hilly areas in China: preliminary exploration. *Resources Science* (资源科学), 24(2), 83 – 88. (in Chinese with English abstract)

附表 A 模型中使用的参数及其取值
Appendix A Parameters in the model

符号 Symbol	描述 Description	取值 Value	单位 Unit	来源 Source
$\varphi_{c\ min}$	式(3)	− 200	m H ₂ O	Larcher, 1995 ; Kimmins , 1997
$\varphi_{c\ max}$	式(3)	0	m H ₂ O	Larcher, 1995 ; Kimmins , 1997
m	式(6)	7		Ball <i>et al.</i> , 1987
b	式(6)	0.008	mol·m ^{−2} ·s ^{−1}	Ball <i>et al.</i> , 1987
$r_{m\ F}$	式(10), 叶 Leaf	4.8 × 10 ^{−8}	Kg C·kg C ^{−1} ·S ^{−1}	Amthor , 1989
$r_{m\ S}$	式(10), 茎 Stem	1.6 × 10 ^{−8}	Kg C·kg C ^{−1} ·S ^{−1}	Amthor , 1989
$r_{m\ R}$	式(10), 根 Root	2.4 × 10 ^{−8}	Kg C·kg C ^{−1} ·S ^{−1}	Amthor , 1989
A	式(11)	8.8(16.9*)		
S	式(11)	71(710*)	J·K ^{−1} ·mol ^{−1}	
H_a	式(11)	36 000(57 500*)	J·mol ^{−1}	
H_{dh}	式(11)	220 000(226 000*)	J·mol ^{−1}	
H_{dl}	式(11)	175 000(192 000*)	J·mol ^{−1}	
$r_{g\ X}$	式(12)	0.42		Amthor , 1989
V_{cmax}	最大羧化能力 Maximum catalytic activity of Rubisco	35	μmol·m ^{−2} ·s ^{−1}	Farquhar <i>et al.</i> , 1980
J_{max}	最大电子传递速 Potential rate of whole – chain electron transport	87	μmol·m ^{−2} ·s ^{−1}	Farquhar <i>et al.</i> , 1980
TreeDesi	树的密度 Density of tree	0.199 1	trees·m ^{−2}	宋霞等 , 2004
SLA	比叶面积 Specific leaf area	12	m ² ·kg ^{−1}	李轩然等 , 2007
ζ	决定凋落量的系数 Coefficient	0.000 2	(DOY210 ~ 250)	本研究 This study
		0.000 65	(DOY250 ~ 365)	
Clay	粘土百分含量 Percent of clay	18	%	CERN 数据 CERN tada
Sand	沙土百分含量 Percent of sand	20	%	CERN 数据 CERN tada
SOM	有机物质含量 Content of soil organic matter	3	%	周志田等 , 2002
SOILC	土壤碳含量 Content of soil carbon	8.7(6.80* *)	Kg C·m ^{−2}	自运行后 2003 年 1 月 1 日的值 Data simulated from January 1 , 2003
SOILN	土壤氮含量 Content of soil nitrogen	0.87	Kg N·m ^{−2}	自运行后 2003 年 1 月 1 日的值 Data simulated from January 1 , 2003

* : 括号内的数为计算维持呼吸时所用的参数值 Parameteration for maintaining respiration calculation

** : 干烟洲主要林分类型土壤 1 m 深表土层贮碳量 Carbon sequestration under 1 m deep soil at Qianyanzhou site