

长白山森林生态系统 CO₂ 和水热通量的模拟研究*

王秋凤^{①④} 牛 栋^② 于贵瑞^{①**} 任传友^{①④} 温学发^{①④}

Chen Jingming^③ Ju Weimin^③

(①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ②中国科学院资源环境科学技术局生态处, 北京 100864;

③Department of Geography, University of Toronto, Toronto M5S 3G3, Canada; ④中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 以基于过程的 BEPS 模型为基础, 根据长白山温带阔叶红松林生态系统的生态过程机制, 建立了能够描述半小时尺度生态系统通量日变化的模拟模型 BEPS. 应用该模型对 2003 年长白山温带阔叶红松林生长季内的 CO₂ 和水热通量的模拟结果表明: 模型模拟的净生态系统生产力 (NEP), 潜热通量 (LE), 显热通量 (H_s) 与涡度相关系统的实测数据相关性较好, R² 值分别达到 0.68, 0.75, 0.71. 模拟的长白山温带阔叶红松林生态系统的年累积 NEP 为 300.5 gC·m⁻², 与实测值也非常接近, 说明应用该模型可以较好地模拟长白山温带阔叶红松林生态系统的 CO₂, 水和热量交换过程. 根据模型对不同气候变化情景下的 NEP 和蒸散 (ET) 的分析得出: 长白山温带阔叶红松林生态系统的 NEP 对气候变化比较敏感, 在气候变暖条件下该生态系统的碳汇功能可能会减弱. 此外, 作为基于过程的模型, BEPS 对最大羧化速率 (V_{cmax}) 和最大气孔导度 (g_{max}) 等植物生理生态特征参数的变化反应也比较敏感.

关键词 碳循环 水循环 BEPS 模型 涡度相关技术 ChinaFLUX

CO₂ 等温室气体排放所导致的全球变暖, 以及世界范围内的淡水资源短缺问题, 已经向科学家、政策制定者和公众们提出了严峻的挑战, 从而使陆地生态系统碳循环和水循环研究成为全球变化科学 (global change science) 研究中的核心科学问题. 为了准确地预测未来的全球变化趋势, 寻求地球生态系统碳循环和水循环调控管理的有效途径, 必须要

了解陆地生态系统碳循环和水循环的各种过程与反馈机制. 生态系统能量与物质 (水和碳) 通量动力学模型是分析陆地生态系统碳循环和水循环过程机制和预测循环通量的一种有效手段. 20 世纪 90 年代以来这一领域的研究取得了重大进展, 许多科学家从各自不同的学科角度建立了一系列碳水耦合循环模型. 这些模型大致可以分为生物地理模型、生物物理模

2004-07-14 收稿, 2004-11-02 收修改稿

* 国家自然科学基金项目 (批准号: 30225012) 和国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CB412501) 及中国科学院知识创新工程重大项目 (编号: KZCX1-SW-01-01A) 共同资助

** E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

型、生物地球化学模型和遥感模型几种类型,代表性的模型有 BIOME-BGC^[1], BATS^[2], FOREST-BGC^[3], AVIM^[4], SiB₂^[5], TEM^[6,7], IBIS^[8], BEPS^[9,10]等. 其中, BEPS 模型以其所需参数较少,实用性强的特点,被广泛应用于不同区域和不同尺度生态系统的研究之中^[10-14].

上述各模型虽然可以用于生态系统碳水循环过程的模拟,但由于数据的限制,模型的验证仍然是一个值得关注的问题. 涡度相关技术以其可以实时长期地观测生态系统碳水和能量通量的特点,不仅为生态系统碳循环和水循环研究提供了坚实的数据基础,同时也为碳水循环模型的参数确定和模拟结果检验提供了可靠的数据来源. 近年来,涡度相关技术已成为多个生物圈的生物地球化学循环国际计划的主要技术手段,已经建立了可以覆盖不同地区的多个通量观测网络,ChinaFLUX 也于 2002 年正式建成^[15,16].

长白山温带阔叶红松林是我国东北东部中温带湿润气候区最重要的森林植被类型,为全球变化中国东北样带东部最典型的生态系统^[17],也是 ChinaFLUX 的观测站点之一. 对该生态系统进行水碳通量模拟研究,开发具有本土特色的通量过程模拟模型,不仅可以为 ChinaFLUX 其他类型生态系统的碳水循环模拟提供借鉴,更重要的是,可以为站点观测的通量数据向更大尺度的外推提供模型化方法的基础. 本文的目的在于,利用长白山的通量观测数据,探讨 BEPS 模型应用和改进的技术途径,以及模型的参数化方法,并利用模型模拟长白山温带阔叶红松林生态系统的 CO₂ 和水热通量变化过程特征,分析气候变化和植被的生理生态参数变化对生态系统通量的影响,以期为区域或全球尺度的碳循环和水循环及其与环境变化之间的相互作用机理研究提供基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

本研究所选区域为中国科学院长白山森林生态系统定位站一号标准地,位于吉林省东南部. 该区地势平坦,属受季风影响的温带大陆性气候,年平均气温为 3.6℃,平均年降水 713 mm (1982~2000 年的多年平均值),盛行东南风. 植被类型为长白山温带阔

叶红松林,林型为成熟原始林,主要优势种有红松 (*Pinus koraiensis*), 紫椴 (*Tilia amurensis*), 蒙古栎 (*Quercus mongolica*), 水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 和色木槭 (*Acer mono*). 红松的平均冠层高度为 26 m, 平均胸径为 32~46 cm, 森林密度约为 560 株/ha (>8 cm). 生长旺季整个冠层的最大 LAI 约为 6 m²·m⁻². 该区的土壤为火山灰母质上发育成的山地暗棕色森林土,表层有机质层较厚.

1.2 实验设计与数据获取

长白山通量观测塔位于 42°24'09"N, 128°05'45"E, 海拔 738 m. 塔高 62 m, 塔上设置了开路涡度相关测量系统和 7 层常规气象观测系统,同步观测林地冠层的 CO₂、水热通量和气象条件. 其中开路涡度相关系统是由一个三维超声风速仪 (CSAT3, CAMPBELL, USA) 和一个快速响应的红外气体分析仪 (LI-7500, LI-COR Inc., USA) 构成,安装高度为 40 m, 传感器朝向盛行风方向. 在通量测定的同时,对土壤水分和土壤温度进行实时观测,其中土壤水分采用 TDR (CS616-L, Campbell, USA) 测定,设置了三个不同深度 (5, 20, 50 cm), 土壤温度采用 105T (Campbell, USA) 测定,测定的深度分别为 1, 5, 20, 50 和 100 cm.

通量原始数据采样频率为 10 Hz, 气象数据的采样频率为 0.5 Hz. 本研究中采用各变量的 30 min 平均值,数据的计算由 LoggerNet (Campbell Science Ins.) 软件自动完成. 观测从 2002 年 8 月 24 日开始,本文取 2003 年的数据进行分析. 通量数据在使用前经过了一系列的订正和数据筛选工作: 对 30 min 的通量数据进行坐标轴倾斜校正,并用 Webb^[18]提出的方法对水热传输引起的密度效应进行校正. 以夜间摩擦风速 $u_* > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为标准对数据进行了筛选 (临界 u_* 的确定参见文献 [19, 20]). 计算净生态系统交换 (NEE) 时还要考虑储存项的影响,本研究中储存项使用 Li-7500 测定的 CO₂ 浓度进行估算 (计算方法参见文献 [21]).

2 模型描述

2.1 BEPS 模型概述

BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 模型是 Liu 等^[9]以 FOREST-BGC 为基础建立的一个

基于过程的生物地球化学循环模型, 可以用于模拟生态系统的碳、水和能量平衡. 模型中涉及了生态系统的生化、生理和物理等多个过程, 综合了生态学、生物物理学、植物生理学、气象学和水文学的方法, 该模型最初用于模拟加拿大北方森林生态系统的生产力, 之后被 Bunkei^[14], 刘明亮¹⁾等人分别用于东亚地区和中国陆地生态系统生产力的模拟. Liu 等^[9~11]和 Chen 等^[13]对 BEPS 模型也进行了多次改进, 形成了适合于不同研究目的、以日为最小时间分辨率的多个版本^[10~13].

2.2 模型中的主要控制方程

2.2.1 模型中碳循环过程的主要控制方程

(1) 光合作用. 模型中光合作用模拟的基础是 Farquhar 的叶片尺度瞬时光合模型, Chen 等^[13]对其进行了空间尺度扩展, 得到的模型如下:

$$A_c = \frac{1}{2}((C_a + K)g + V_m - R_d - [((C_a + K)g + V_m - R_d)^2 - 4(V_m(C_a - \Gamma) - (C_a + K)R_d)g]^{1/2}), \quad (1)$$

$$A_j = \frac{1}{2}((C_a + 2.3\Gamma)g + 0.2J - R_d - [((C_a + 2.3\Gamma)g + 0.2J - R_d)^2 - 4(0.2J(C_a - \Gamma) - (C_a + 2.3\Gamma)R_d)g]), \quad (2)$$

式(1)和(2)中 A_c 和 A_j 分别为 Rubisco 限制和光限制的净光合速率, C_a 为大气中的 CO₂ 浓度, V_m 为最大羧化速率, R_d 为白天叶片的暗呼吸, K 为酶动力学函数, Γ 为没有暗呼吸时的 CO₂ 补偿点, J 为电子传递速率, g 为气孔导度. 光合速率取 A_c 和 A_j 中的较小值.

利用方程(1)和(2)分别计算阳生叶和阴生叶的光合作用后, 冠层总光合由方程(3)求得:

$$A_{canopy} = A_{sun}LAI_{sun} + A_{shade}LAI_{shade}, \quad (3)$$

其中 A_{canopy} 为冠层总光合, A_{sun} 为阳生叶的光合, A_{shade} 为阴生叶的光合, LAI_{sun} 和 LAI_{shade} 分别为阳生叶和阴生叶的叶面积指数.

(2) 呼吸作用. 生态系统的呼吸分为自养呼吸和异养呼吸两部分. 其中自养呼吸又包括维持呼吸(R_m)和生长呼吸(R_g), 维持呼吸可由下式计算:

$$R_m = \sum_{i=1}^3 M_i \alpha_{25}^i Q_{10}^{\frac{T-25}{10}}, \quad (4)$$

式(4)中 $i = 1, 2, 3$ 分别代表叶、树干和根, M_i 为各器官的生物量, α_{25}^i 为各器官的呼吸系数, Q_{10} 为呼吸作用的温度敏感系数, T 为空气温度.

根据 Bonan 的研究, 生长呼吸占总第一性生产力(GPP)的 25%, 因此有^[22]:

$$R_g = 0.25GPP, \quad (5)$$

模型中的土壤呼吸主要考虑土壤水分和土壤温度的影响.

$$R_h = R_{h,10}f(\theta)f(T_s), \quad (6)$$

其中, $R_{h,10}$ 为土壤温度为 10℃ 时的土壤呼吸速率.

2.2.2 模型中水循环过程的主要控制方程

模型中的水循环过程考虑了大气降水、冠层截留、穿透降水、融雪、雪的升华、冠层蒸腾、冠层和土壤蒸发、地表径流及土壤水分变化等多个过程. 其中地上部分的蒸散用下式计算:

$$ET = T_{plant} + E_{plant} + E_{soil} + S_{ground} + S_{plant}, \quad (7)$$

其中 ET 为蒸散量, T_{plant} 为植被的蒸腾量, E_{plant} 和 E_{soil} 分别为植被和土壤的蒸发量, S_{plant} 和 S_{ground} 分别为植物表面雪的升华和地面雪的升华量, 式中各项均采用修正后的 Penman-Monteith 方程计算.

2.3 BEPS 模型的建立和参数化方法

BEPS 模型最小的时间分辨率为日, 不能描述以小时为尺度的生态系统通量的日动态变化. 本文根据长白山温带阔叶红松林生态系统碳和水热通量的部分测定资料, 对其进行了必要的调整, 重新界定了模型中的一些植被和土壤参数, 形成了具有半小时分辨率的 BEPS 模型(图 1).

2.3.1 模型的建立

由于时间尺度不同, 考虑的过程也必然不同. 研究中以 BEPS 模型的框架为基础, 植被光合、蒸腾等主要过程的模拟仍采用原思路, 但由于 BEPS 模型中对地下过程的考虑较粗, 根据生态系统过程机制,

1) 刘明亮. 中国土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究. 中国科学院遥感应用研究所, 博士学位论文, 2001

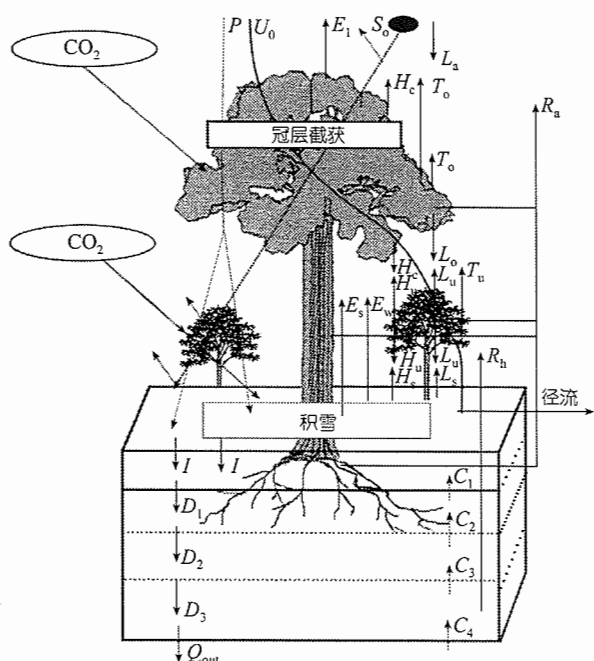


图 1 BEPS 模型主要过程示意图

BEPS 模型细化了对土壤过程的模拟.

首先, 充分考虑了土壤内部的热量和水分传输过程, 借鉴 Sellers 的方法^[5], 对土壤进行了分层处理. 各层次土壤水分的模拟采用方程(8):

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \begin{cases} I - E_{soil} - Q_i - T_i, & i = 1 \\ Q_{i-1} - Q_i - T_i, & i = 2, 3, 4, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

式中 i 表示土壤的不同层次, θ_i 为土壤不同层次的含水量, I 为降落到土壤表面的降水, Q_i 为土层间水分的传输, T_i 为不同土层中的植被蒸腾损失水分.

有研究表明, 土壤与大气的碳交换大约占陆地表层生态系统碳总量的 $2/3$ ^[23]. 因此对土壤呼吸估算的精度将在很大程度上影响整个生态系统的碳交换量的评价. 可是在 BEPS 模型中, 只考虑了土壤水分和土壤温度对土壤呼吸的影响, 而实际上土壤呼吸还受土壤有机质的组成、土壤质地等因子的影响. 因此, 根据 CENTURY 模型^[24]中的相关模块, 把土壤分为 9 个碳库, 如茎叶凋落物、根系凋落物、土壤微生物、快和慢分解土壤腐殖质等. 每个碳库有各自的分解和转化参数, 并与土壤温度、土壤湿度、土壤质地和凋落物性质(木质素与氮的比值)有关, 土壤呼吸速率可以用下式描述:

$$R_h = \sum_{i=1}^9 C_i K_{\max}^i f(T_s) f(\theta) f(li) f(te), \quad (9)$$

式(9)中的 $i = 1, 2, \dots, 9$ 分别代表土壤中不同的碳库, C_i 为土壤中各碳库的含碳量, $K_{\max}^i$ 为各碳库的最大分解速率, $f(T_s)$ 为土壤温度对土壤分解速率的影响因子, $f(\theta)$ 为土壤水分对土壤分解速率的影响因子, $f(li)$ 为纤维素影响因子, $f(te)$ 为土壤质地影响因子.

2.3.2 模型参数化

BEPS 模型对土壤过程考虑较细, 所需的土壤参数较多, 主要的土壤参数包括土壤质地、土壤容重、土壤有机质含量、土壤饱和导水率、土壤导热率等. 上述各参数均可以通过土壤质地资料进行估算. 利用长白山温带阔叶红松林实测的土壤质地数据, 根据 Saxton 等^[25]提出的经验方程, 对模型所需的各土壤参数进行了估算. 为了使模型能够模拟长白山森林生态系统的通量特征, BEPS 模型对相应的与植被有关的参数也做了调整. 所采用的主要植被参数、取值及来源列于表 1.

表 1 模型中的主要植被参数

参数	取值	来源
最大气孔导度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	8	文献[26]
叶片集聚指数	0.6	文献[9]
最大羧化速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	50	文献[10]
上层最大叶面积指数/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	4.5	CERN 数据
下层最大叶面积指数/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	2.5	CERN 数据
上层最小叶面积指数/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	1.5	CERN 数据
下层最小叶面积指数/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	0	CERN 数据
上层冠层高度/m	26	实测值
下层冠层高度/m	8	实测值

3 结果分析

3.1 气象变量的变化特征

太阳辐射、大气温度、相对湿度和降水等气象变量是 BEPS 模型的主要驱动变量, 其变化直接影响模型的输出结果. 图 2 给出了 2003 年长白山温带阔叶红松林生态系统的太阳辐射、大气温度、相对湿度和降水的年变化. 由图 2 可知, 太阳辐射作为影响大气温度的主要因素, 其变化与大气温度的变化趋势基本一致(图 2(a), (b)); 2003 年观测期间太阳辐射日总量的最大值为 $1.68 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均值为 $7.39 \times$

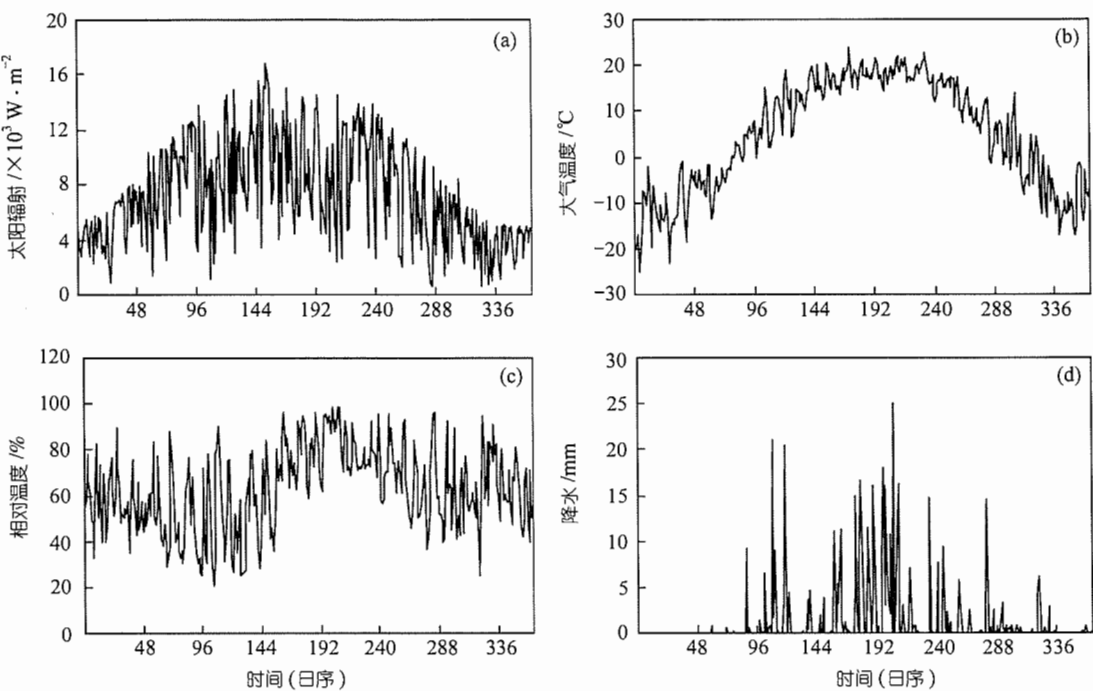


图2 2003 年长白山温带阔叶红松林生态系统的气象条件
(a) 太阳辐射; (b) 大气温度; (c) 相对湿度; (d) 降水. 其中太阳辐射和降水为日总量, 相对湿度和大气温度为日平均值

10³ W·m⁻²; 年平均气温为 4.8℃, 高于多年平均值的 3.6℃, 最高气温为 24.0℃, 最低气温为-24.9℃; 年降水量约为 537 mm, 低于多年平均值, 60%以上的降水集中在生长季的 6~8 月期间. 与历史平均值比较, 2003 年长白山的气候特征为偏暖偏干年份.

3.2 模拟结果

3.2.1 土壤温度与土壤水分的模拟

土壤温度和土壤水分是影响土壤有机质分解的重要因子, 对土壤呼吸估计的准确性有重要影响. 2003 年长白山温带阔叶红松林生长季期间, 50 cm 的土壤含水量均大于田间持水量 (26.9%), 5 cm 和 20 cm 的土壤含水量均大于凋萎系数(12%), 说明该地区水分充足, 几乎不存在水分限制. 对该生态系统不同深度土壤温度和土壤含水量的模拟结果表明, 模拟值与实测值基本吻合. 表 2 给出了土壤温度和土壤水分模拟值与实测值之间的回归统计特征. BEPS 模型对土壤温度的模拟效果好于土壤水分, 二者的 R² 值均达到了极显著水平.

表2 土壤温度与土壤水分模拟值与实测值的回归分析结果

	深度/cm	直线回归斜率	R ²	n
土壤温度	1	1.0036	0.9407	7680
	5	1.0133	0.9164	7680
	20	0.9965	0.922	7680
土壤水分	5	1.1066	0.7398	7680
	20	0.9036	0.6005	7680
	50	0.8445	0.5089	7680

3.2.2 CO₂ 通量的模拟

在研究植被与大气之间的 CO₂ 交换时, 通常以净生态系统碳交换(NEE)来表示生态系统的 CO₂ 通量, 而在碳循环研究中, 更为普遍关注的是净生态系统生产力(NEP), 以便能更清晰地判断一个生态系统是碳源还是碳汇. 因此, 本文采用净生态系统生产力来表示 CO₂ 通量. 在数值上, NEP = -NEE.

BEPS 模型具有较高的时间分辨率, 可以计算出每 30 min 的 NEP, 因而可以较好地反映 NEP 对一天内天气条件变化的响应. 模型模拟的 NEP 与实测值之间具有较好的相关关系, 模型可以解释 2003 年长白山温带阔叶红松林生长季期间 NEP 变化的 68%. 图 3 比较了生长季内不同时期(前期, 中期和后

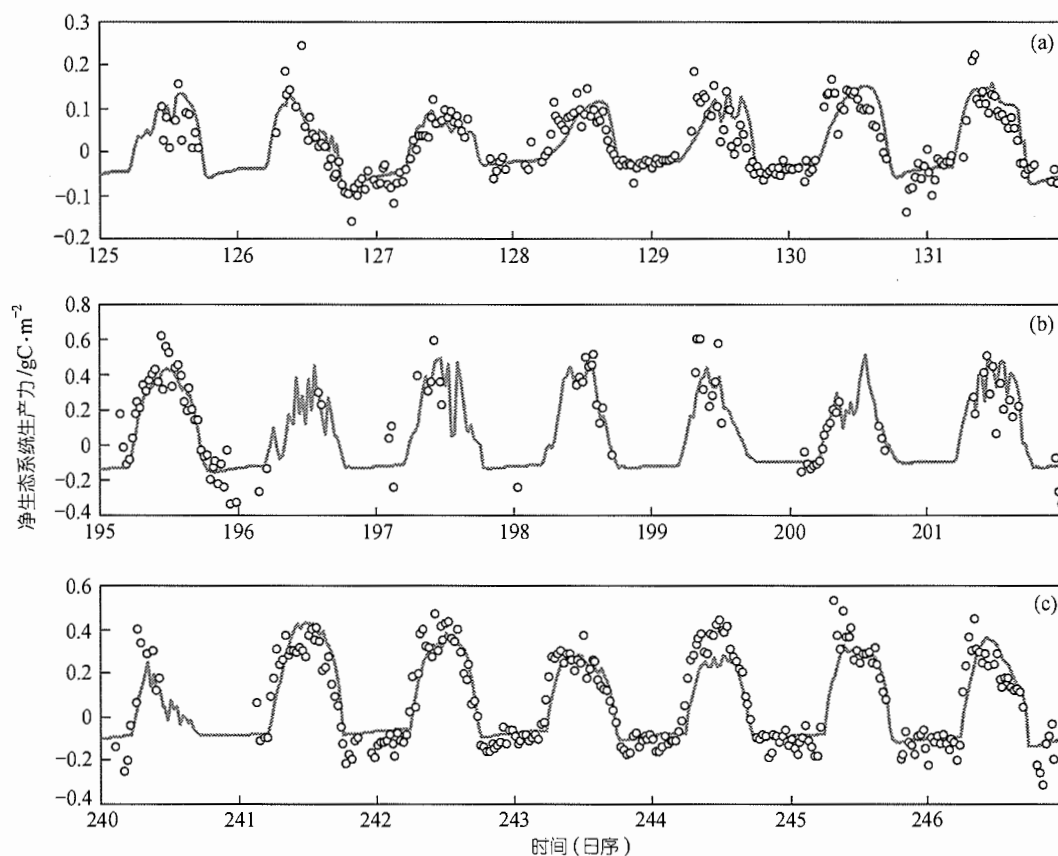


图 3 2003 年生长季内不同时期 CO_2 通量的日变化

(a) 前期(日序 125~131); (b) 中期(日序 195~201); (c) 后期(日序 240~246), 点为实测值, 线为模拟值

期)模拟与实测的 CO_2 通量的日变化. 为检验在不同天气条件下模型模拟 NEP 日变化的能力, 分别在各个时期选择了几个具有不同天气条件的连续观测日(用一年中的日序表示). 图 3 中第 126, 128, 130, 131, 195, 241~246 d 为晴天, 第 125, 127, 196~201, 240 d 为多云或阴雨天. 由图 3 可知, 模型模拟的 NEP 与实测值的日变化非常相似. 在太阳辐射较强的天气条件下光合作用也比较强, 因此晴天日间的 NEP 较多. 多云或阴雨天时要低, 由于受降水的影响, 生长季中期后六天日间 NEP 值均较小, 可用的通量数据也较少, 但是模型仍较真实地描述了 NEP 的日变化过程(图 3(b)). 在生长季的不同时期, 模拟的正午 NEP 基本上都低于实测值, 这可能与模型中的植被参数 V_{cmax} 的参数化方法有关. 此外, 不同时期生态系统碳吸收的能力不同, 在生长季中期, 树木处于旺盛生长期, 此

时的光合作用较强, NEP 在正午时刻可以达到 $0.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于生长季前期($0.24 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)和后期($0.53 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$).

3.2.3 潜热通量和显热通量的模拟

2003 年长白山温带阔叶红松林生长季内不同时期(前期, 中期, 后期)模拟和实测的潜热通量(LE)具有相似的日变化特征(图 4). 在夜间 LE 接近于 0, 由清晨开始, 随着植物蒸腾和土壤蒸发的增强, LE 不断上升, 中午达到最大, 之后由于温度逐渐下降, LE 又随之下降. 生长季中期晴天正午的 LE 大于 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 高于生长季前期的 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和后期的 $390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明在生长盛期植物蒸腾和土壤蒸发均较强. 在各时期中, 晴天的 LE 均明显高于阴天和雨天. 生长季内三个不同时期 LE 的模拟值与实测值都吻合得较好, 模拟与实测的 LE 具有较强的相关性($R^2 =$

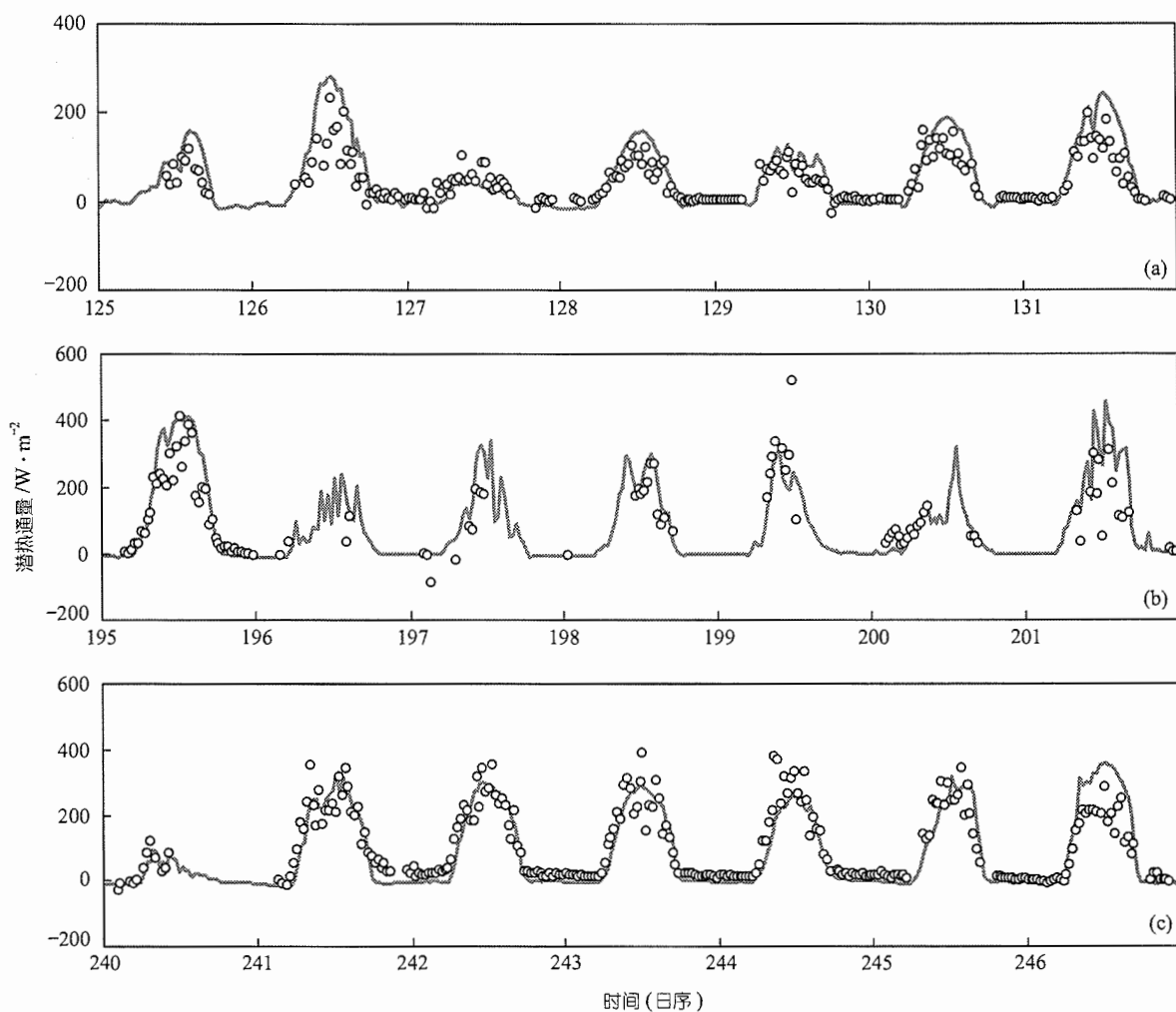


图 4 2003 年生长季内不同时期潜热通量的日变化

(a) 前期(日序 125~131); (b) 中期(日序 195~201); (c) 后期(日序 240~246), 点为实测值, 线为模拟值

0.86). 生长季前期和中期模型模拟值偏高, 而生长季后期模拟值略低(图 4). 这与土壤温度和土壤水分的模拟存在偏差有关.

森林蒸散是由植物蒸腾和土壤蒸发两个组分构成的. 贺庆棠^[27]指出, 森林蒸散量中 60% 以上热量消耗在森林植物的蒸腾上. 通过实验来测定蒸散中不同组分所占的比例比较困难, 而利用模型却很容易实现. 研究结果显示: 该生态系统 2003 年年蒸散量为 297 mm, 其中植物蒸腾量 189 mm, 占年总蒸散量的 63.6%, 这与上述的森林蒸腾量占蒸散量的比例基本一致.

通过模型模拟与实测的显热通量的比较, 表明模型可以解释 2003 年生长季期间 71% 的 H_s 日变化. 但是从总体上看, 模型模拟的显热通量偏低(图 5).

3.3 模型的敏感性分析

3.3.1 气候变化对长白山温带阔叶红松林生态系统 CO_2 和水汽通量的影响

利用涡度相关系统的实地测量数据, 可对当前气候条件下森林生态系统的 CO_2 和水热传输状况进行研究. 但是仅凭实测资料很难预测它们在气候变化情景下的变化情况, 而模型却为此类研究提供了一种有效工具. 应用 BEPS 模型, 以当前的气候条件

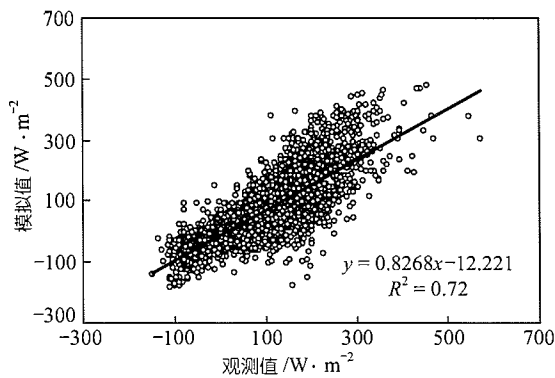


图 5 2003 年生长季内显热通量模拟值与实测值的比较

作对照, 采用人为控制气象条件的方法设置了不同的气候变化情景(太阳辐射、空气相对湿度和降水的增减幅度分别设为 $\pm 20\%$, 大气温度的变幅设为 $\pm 2^\circ\text{C}$), 我们分析了气候变化对长白山温带阔叶红松林生态系统 CO_2 和水汽通量的影响。

图 6 给出了当前气候条件和变化气候条件下模型模拟的累积 NEP 和 ET 的季节变化。除太阳辐射外, NEP 对其他气象变量的变化反应都比较敏感。温度

对 NEP 的影响主要通过改变生长季的长短来体现。当温度升高时, 生长季开始时间提前而结束的时间延迟, 使生长季延长; 而温度降低, 生长季缩短。另外, 在温度升高情景下, 年累积的 NEP 呈降低的趋势, 这是由温度增加导致了呼吸作用增强所致。相对湿度的变化主要是通过影响气孔导度, 从而影响 NEP 。当相对湿度增加时, 大气与植物细胞间的水气压差减小, 气孔开放程度增加, 光合同化作用增强, NEP 增加。降水对 NEP 的影响与温度的影响相反。 ET 对降水的变化最为敏感, 降水变化 $\pm 20\%$ 会使 ET 变化 $+14\%$ 到 -16% , 而 ET 对相对湿度变化的响应为, 无论相对湿度增加还是减小, 模拟的 ET 都不同程度地降低。实际上, 各气象变量之间存在较强的相关性, 它们对生态系统 CO_2 和水热通量的影响常常交织在一起, 所以仅仅独立地考察单个因子变化对生态系统的影响是不够的, 在今后的研究中还应加强对气候变量综合影响的分析。

由图 6 还可以看出, 当生长季开始后(即积雪融化叶片展开后), 长白山温带阔叶红松林的碳吸收和

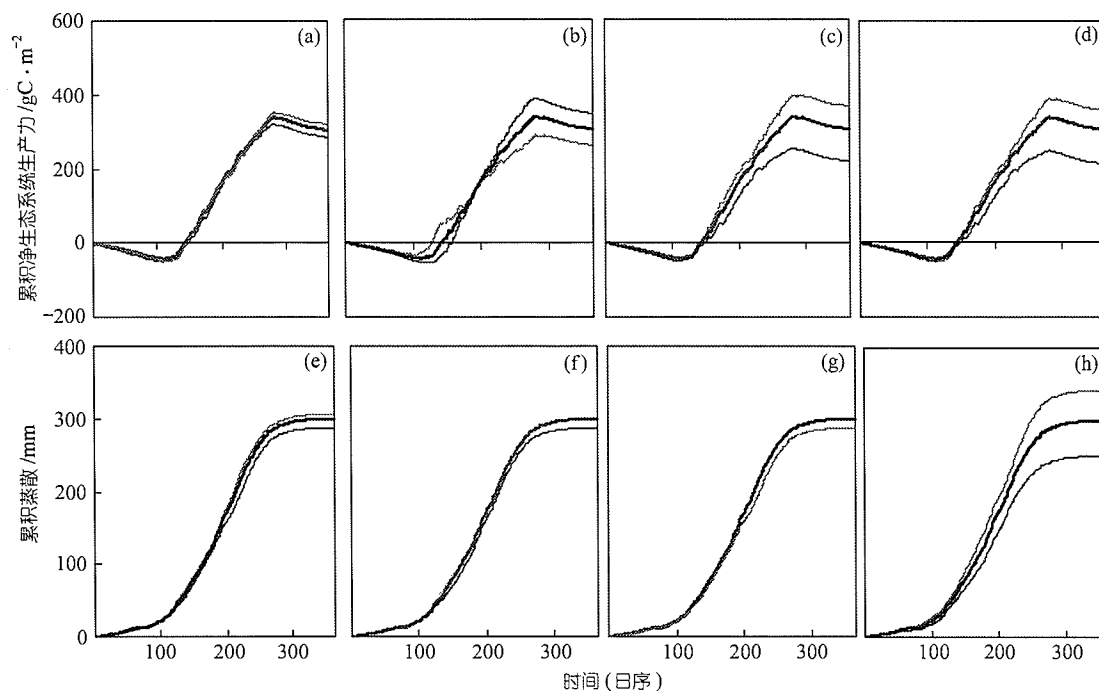


图 6 模拟的 2003 年净生态系统生产力和蒸散的累积值及其对气候变化的响应

粗线表示当前气候条件下的结果, 细灰线表示气象条件值增加, 细黑线表示气象条件值减少; (a)和(e)表示辐射的影响(变化 $\pm 20\%$); (b)和(f)表示空气温度的影响($\pm 2^\circ\text{C}$); (c)和(g)表示相对湿度的影响(变化 $\pm 20\%$); (d)和(h)表示降水的影响(变化 $\pm 20\%$)

蒸散均迅速增加, 生长季之前的 *NEP* 和 *ET* 对一年中的其他时段的影响并不是很大, 说明长白山温带阔叶红松林的年 *NEP* 和 *ET* 累积的关键是在生长季. 模型模拟的结果表明, 2003 年长白山温带阔叶红松林生态系统年 *NEP* 累积值为 $300.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 在实测值 $222 \pm 92 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围之内¹⁾. 进一步说明模型对碳通量模拟具有较高的精度. 同时也说明尽管该林地成熟林, 但仍然具有碳汇的功能, 这与张娜等^[28]对该生态系统的研究结果相符.

3.3.2 模型对植物生理参数的响应

BEPS 模型是基于过程的模型, 与植被有关的参数值的确定对模拟结果有较大的影响. 本文就模型对植物生理参数的敏感性进行了分析. 所选的参数为最大羧化速率(V_{cmax})和最大气孔导度(g_{max}). 分析结果表明: V_{cmax} 对 *NEP* 的影响较大, V_{cmax} 增加 20% 会使 *NEP* 增加 5.7%, V_{cmax} 降低 20% 可导致 *NEP* 减少 8.2%; 无论 g_{max} 增加还是减小 *NEP* 均表现为减小; g_{max} 对 *ET* 的影响显著, 当 g_{max} 增加 20% 时, *ET* 增加 1.9%, g_{max} 减小 20% 时, *ET* 减小 2.2%. 因此, 在应用 BEPS 模型模拟碳和水通量时, 应慎重确定植物生理参数 V_{cmax} 和 g_{max} , 以便获得理想的模拟结果.

4 结论

本文在 BEPS 模型的基础上, 根据长白山温带阔叶红松林生态系统的生态过程机制, 建立了能够描述半小时尺度生态系统通量日变化动态的模拟模型 BEPSh. 应用该模型对长白山温带阔叶红松林生态系统的 CO₂ 和水热通量进行了模拟. 模拟结果显示: 净生态系统生产力、潜热通量和显热通量的模拟值和实测值均达到极显著相关, R^2 分别为 0.68, 0.75 和 0.71. 模拟的 *NEP*, *LE* 和 H_s 的日变化和季节变化特征也与实测结果基本吻合, 但是模型在模拟中午时段的变化特征时还存在着一定的偏差, 需要做进一步的改进.

模型模拟的 2003 年净生态系统生产力为 $300.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明尽管该林地成熟林, 但仍然具有较强的碳汇功能. 模型模拟的 2003 年的年总蒸散量为

297 mm, 占全年总降水量的 60%. 对生态系统植物蒸腾和土壤蒸发分离评价结果表明, 该生态系统的植物蒸腾量为 189 mm, 占年总蒸散量的 63.6%.

应用 BEPS 模型分析了不同气候变化情景下长白山温带阔叶红松林生态系统 CO₂ 和水汽通量的响应. 结果表明: 净生态系统生产力对气候变化比较敏感, 温度升高时, 累积的 *NEP* 呈降低的趋势, 表明在全球变暖的条件下, 该生态系统的碳源功能可能会减弱.

参 考 文 献

- 1 Running S W, Hunt E R Jr. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: Ehleringer J R, Field C, eds. Scaling processes between leaf and landscape levels. Prlando: Academic press, 1993. 141~158
- 2 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM, NCAR/TN-275-STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1986
- 3 Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes or regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological modeling, 1988, 42: 125~154
- 4 Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. Journal of Biogeography, 1995, 22: 445~451
- 5 Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. Journal of Climate, 1996, 9(4): 676~705
- 6 McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: Sensitivity to changes in vegetation nitrogen concentration. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11: 173~189
- 7 McGuire A D, Melillo J M, Randerson J T, et al. Modeling the effects of snowpack on heterotrophic respiration across northern temperate and high latitude regions: Comparison with measurements of atmospheric carbon dioxide in high latitudes. Biogeochemistry, 2000, 48: 91~114
- 8 Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global biogeochemical cycles, 1996, 10(4): 603~628

1) Zhang J H, Han S J, Yu G R. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a 200-year-old Chinese broad-leaved Korean pine mixed forest

- 9 Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing input. *Remote sensing and environment*, 1997, 62: 158~175
- 10 Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(27): 735~754
- 11 Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity mapped for Canada at 1-km resolution. *Global ecology and biogeography*, 2002, 11: 115~129
- 12 Liu J, Chen J M, Cihlar J. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass. *Water resources research*, 2003, 39(7): 1189
- 13 Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological modeling*, 1999, 124: 99~119
- 14 Bunkei M, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 58~66
- 15 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统通量研究进展. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 15~29
- 16 孙晓敏, 朱治林, 袁国富, 等. 涡度相关技术中平均周期参数的确定及其影响分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 30~36
- 17 金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 19~21
- 18 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85~100
- 19 Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2: 169~182
- 20 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 主要气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 103~107
- 21 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 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*, 2004, 34(增刊 II): 84~94
- 22 Bonan G B. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 2817~2831
- 23 Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and life zones. *Nature*, 1982, 298: 156~159
- 24 Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global biogeochemical cycles*, 1993, 7(4): 785~809
- 25 Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science society of America Journal*, 1986, 50: 1031~1036
- 26 Kelliher F M, Leuning R, Raupach M R, et al. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and forest meteorology*, 1995, 73: 1~16
- 27 贺庆棠. *气象学*. 北京: 中国林业出版社, 1991
- 28 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 等. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 643~652