

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第15期 Vol.32 No.15 **2012**

中国生态学会
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 15 期

2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响.....	张艳博, 罗 鹏, 孙 庚, 等 (4605)
北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素.....	王苏铭, 张 楠, 于琳倩, 等 (4618)
温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型	施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, 等 (4630)
洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响	刘 娜, 王克林, 段亚锋 (4641)
大辽河口水环境污染生态风险评估.....	于 格, 陈 静, 张学庆, 等 (4651)
标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数	渠晓东, 刘志刚, 张 远 (4661)
不同年龄段大连群体菲律宾蛤仔 EST-SSR 多样性	虞志飞, 闫喜武, 张跃环, 等 (4673)
基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性	杨晓明, 戴小杰, 朱国平 (4682)
广东罗坑自然保护区鳄蜥生境选择的季节性差异.....	武正军, 戴冬亮, 宁加佳, 等 (4691)
甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质.....	魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等 (4700)
短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态.....	赵雪梅, 孙向阳, 康向阳, 等 (4714)
放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响.....	丁小慧, 官 立, 王东波, 等 (4722)
UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH ₄ 排放的影响	娄运生, 周文麟 (4731)
基于核磁共振波谱的盐芥盐胁迫代谢组学分析.....	王新宇, 王丽华, 于 萍, 等 (4737)
广西甘蔗根际高效联合固氮菌的筛选及鉴定.....	胡春锦, 林 丽, 史国英, 等 (4745)
不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响.....	安 辉, 刘鸣达, 王耀晶, 等 (4753)
大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.....	白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (4762)
川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态.....	崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等 (4772)
内生真菌角担子菌 B6 对连作西瓜土壤尖孢镰刀菌的影响	肖 逸, 戴传超, 王兴祥, 等 (4784)
西江颗粒直链藻种群生态特征.....	王 超, 赖子尼, 李跃飞, 等 (4793)
大型人工湿地生态可持续性评价.....	张依然, 王仁卿, 张 建, 等 (4803)
孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变	赵增友, 袁道先, 石胜强, 等 (4811)
树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (4819)
豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系	杨 宁, 赵护兵, 王朝辉, 等 (4827)
一次陆源降雨污水引起血红哈卡藻赤潮的成因.....	刘义豪, 宋秀凯, 靳 洋, 等 (4836)
盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力.....	王艳芳, 沈永明 (4844)
城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例.....	邵天然, 李超骥, 曾 辉 (4852)
黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势.....	王介勇, 吴建寨 (4861)
重庆市生态功能区蝴蝶多样性参数	李爱民, 邓合黎, 马 琦 (4869)
专论与综述	
干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展.....	王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等 (4890)
土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素.....	栾军伟, 刘世荣 (4902)
森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展.....	程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等 (4914)
湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展	范俊楠, 赵建伟, 朱端卫 (4924)
研究简报	
刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响.....	吕改云, 何怀东, 杨丹菁, 等 (4932)
学术信息与动态	
全球气候变化与粮食安全——2012 年 Planet Under Pressure 国际会议述评	安艺明, 赵文武 (4940)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-08



封面图说: 水杉是中国特有种, 国家一级保护植物, 有植物王国“活化石”之称, 是 1946 年由中国的植物学家在湖北的利川磨刀溪发现的。水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉确在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍。水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 枝叶繁茂, 入秋后叶色金黄。自发现后被人们在中国南方广泛种植, 成为著名的绿化观赏植物, 现在中国水杉的子孙已遍及中国和世界 50 多个国家和地区。

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

DOI: 10.5846/stxb201107281106

施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, Takeshi Ohta. 温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型. 生态学报, 2012, 32(15): 4630-4640.

Shi T T, Gao Y F, Yuan F H, Takeshi Ohta. Simulation of CO₂ and H₂O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4630-4640.

温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应 ——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型

施婷婷^{1,2}, 高玉芳¹, 袁凤辉^{2,*}, Takeshi Ohta³

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;

3. Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Furo-cho, Chikusa-ku, Japan, 464-8601)

摘要: 利用 Leuning 建立的耦合的光合作用、气孔导度和能量平衡方程, 以将冠层分成多层的方式, 包括 Gaussian 五点积分法、将冠层平均分为多层的方法, 逐层计算温带混交林的碳水通量, 最后累加至冠层尺度, 以模拟 CO₂ 和 H₂O 通量。该模型以常规气象观测数据作为驱动变量, 计算出冠层与大气之间的碳水交换, 与涡动相关系统的通量观测数据进行比较, 分析了不同的冠层分层方式对多层模型模拟结果的影响。从 3 个温带混交林通量站涡动相关系统的能量平衡闭合度来看, 中国长白山站 CBS、韩国 GDK 和日本 MMF 站点的能量平衡比率 (EBR) 分别为 0.76、0.66 和 1.07, 居于国际同类观测范围 (0.34—1.2) 的中上水平, 因此, 涡动相关系统的观测数据较为可靠。从碳水通量的日变化来看, 用 Gaussian 五点积分法将冠层分为五层的模型能较好的模拟碳水通量的“单峰形”日变化趋势。夜间 F_c 为负值且变化趋势较为平缓, 表明生态系统进行呼吸作用释放 CO₂, 从日出开始 F_c 逐渐变为正值, 表明生态系统进行光合作用吸收 CO₂, F_c 在中午时分达到最大值, 下午 F_c 逐渐减小, 日落之后又回复到夜间的负值。H₂O 通量的日变化曲线与 CO₂ 通量相似, 且模拟值与涡动相关实测值具有较好的一致性。在多层模型中, 对冠层采用不同的分层方法, 对碳水通量模拟结果有一定的影响。以 Gaussian 五点积分法将冠层分为五层的方法作为对照, 分别将冠层平均分为 2、5、10、20 层的方法得到的碳水通量与其进行比较。从平均值来看, 分层越多, H₂O 通量模拟值越低, 而 CO₂ 通量模拟值越高。不同的分层方法产生的差异, 主要来自于不同层的辐射吸收、温湿度、风速等环境要素的垂直廓线差异, 且叶片光合作用对光的响应是非线性的。

关键词: 碳通量; 能量平衡; 蒸散; 光合作用

Simulation of CO₂ and H₂O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model

SHI Tingting^{1,2}, GAO Yufang¹, YUAN Fenghui^{2,*}, Takeshi Ohta³

1 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information, Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Furo-cho, Chikusa-ku, Japan, 464-8601

Abstract: A stomatal conductance-photosynthesis-energy balance model developed by Leuning is used to estimate CO₂ and H₂O fluxes of temperate mixed forests. The canopy is divided into multiple layers, using both Gaussian integration and average-layer method. The fluxes are calculated layer by layer and then accumulated for the whole canopy. The model

基金项目: 南京信息工程大学科研基金资助; 国家自然科学基金项目 (41105112); 江苏高校优势学科建设工程 (PAPD)

收稿日期: 2011-07-28; **修订日期:** 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: carolstt@gmail.com

calculates CO_2 and H_2O exchange between atmosphere and canopy based on the input of meteorological variables. We compare the modeled fluxes with those measured by eddy covariance system, and analyze the influence of different layer-methods on the modeled fluxes. The energy balance ratios (EBR) of CBS, GDK and MMF sites are 0.76, 0.66 and 1.07, respectively, which is reasonable according to the international reported range (0.34—1.2). The results of the Gaussian integration method agree well with the eddy covariance fluxes, showing the diurnal CO_2 fluxes as bell shaped. The CO_2 flux (F_c) is negative and stable during the night, which suggests that forest ecosystems release CO_2 to the atmosphere. After sunrise, F_c increases gradually to positive values, peaking at noon, and decreases in the afternoon to the negative night values. The diurnal cycle of H_2O fluxes (LE) is similar to that of F_c , and the modeled LE agree well with the measured LE . The estimated fluxes are influenced by the different layer-methods. We compared CO_2 and H_2O fluxes from dividing the canopy into 2, 5, 10 and 20 layers averagely with the fluxes from Gaussian integration method. Larger numbers of layers produce lower LE and higher F_c . The fluxes from different layer-methods are sensitive to the vertical profiles of absorbed radiation, temperature, humidity and wind speed. Furthermore, the leaf photosynthesis responds nonlinearly to the radiation.

Key Words: CO_2 flux; energy balance; evapotranspiration; photosynthesis

近百年来,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,全球变化对陆地生态系统的影响包括了从叶片生理生态到植被地带分布等多个尺度及其相互作用的复杂过程。同时陆地生态系统的改变又将反馈作用于全球变化,不同的植被类型通过改变地表反射率、蒸发散、地表粗糙度等影响植被与大气之间的物质(如 CO_2 、 H_2O 等)和能量(如太阳辐射、动量、热量等)交换来影响气候变化^[1]。只有深入探讨陆地生态系统的生理过程机制及其环境控制原理,才能进一步探明陆地生态系统的碳汇功能和蒸发散过程,为人类应对气候变化以及减缓其所带来的影响奠定理论基础。当今各国学者普遍采用涡度相关技术对生态系统尺度的碳水通量进行观测^[2],而常见的碳水通量估算模型包括统计模型^[3]、基于过程的碳水耦合综合模型^[4-5]以及基于遥感的模型^[6]。统计模型的优点是形式简单,资料易得,对大范围的碳水通量模拟具有指导意义,但经验性较强,难以推广到其它地区,物理意义不明确,不具备预测能力。遥感模型的研究起步较晚,数据主要来源于卫星遥感、航空遥感和地面遥感,其优点是可以对大面积甚至是全球范围内的碳水通量进行估算,但缺点是必需结合局地气象观测资料且包含经验参数。基于过程的碳水通量耦合模型机理明确,将植物的生理特征、冠层结构、土壤特征与气候条件结合起来,具有一定的理论基础,物理意义明确,不仅可以在单叶尺度模拟碳水通量^[7-8],而且可以拓展到冠层^[9]和生态系统尺度^[4-5],甚至应用到区域尺度^[10]和一些全球气候模式^[11]。

本研究以 3 个温带混交林生态系统为研究对象,采用基于生理生态学过程的冠层多层模型对其碳水通量进行模拟,重点揭示温带混交林碳源汇强度和蒸发散量及其时空变化格局,通过与涡动相关实测数据的比较,验证了模型在垂直结构复杂的温带森林上的适用性,并探讨了不同的冠层分层方式对该碳水通量耦合模型的影响,为将来模型在不同冠层上的应用奠定了一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 模型描述

本文利用 Leuning 建立的单叶尺度气孔导度-光合作用-能量平衡耦合模型对温带混交林的光合作用和蒸散作用进行模拟,考虑叶面积指数分布和土壤呼吸规律,采用多层模拟方法进行尺度上推,得到温带混交林冠层尺度的 CO_2 和 H_2O 通量模型。该冠层模型包括 3 个部分:冠层的辐射吸收、耦合的单叶尺度气孔导度-光合作用-能量平衡模型和冠层尺度碳水通量模拟。

1.1.1 冠层的辐射吸收

计算冠层的辐射吸收是模拟光合作用和蒸发散的第一步,光合有效辐射(Q)的漫射部分(Q_{d0})和直射部分(Q_{b0})可以表示如下:

$$Q_{d0} = f_d \cdot Q_0 \quad (1)$$

$$Q_{b0} = (1 - f_d) \cdot Q_0 \quad (2)$$

式中,下标 0 表示是冠层顶部的数值。 f_d 为入射太阳辐射中漫射辐射所占的比例^[12]。实际上,光合有效辐射 Q_0 与太阳总辐射 S_0 之间有简单的转换关系,大约为 $1 \text{ W/m}^2 (S_0) = 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (Q_0)$ ^[4]。由于光合作用对光的响应是非线性的,多以阴叶与阳叶所吸收的辐射必须分开计算,以避免将所有叶片同等对待导致冠层同化作用的过高估计^[13]。本为假设叶角分布为球形,用指数廓线来近似计算直射和漫射辐射。叶片在遮阴时(阴叶)吸收到的光合有效辐射(Q_{sh})为入射漫射辐射(Q_{ld}')和散射辐射(Q_{lbs})之和^[12]:

$$Q_{sh}(\xi) = Q_{ld}'(\xi) + Q_{lbs}(\xi) \quad (3)$$

$$Q_{ld}'(\xi) = Q_{d0} \cdot k_d' \cdot (1 - \rho_{cd}) \cdot \exp(-k_d' \cdot \xi) \quad (4)$$

$$Q_{lbs}(\xi) = Q_{b0} \cdot [k_b' \cdot (1 - \rho_{cb}) \cdot \exp(-k_b' \cdot \xi) - k_b \cdot (1 - \sigma_l) \cdot \exp(-k_b \cdot \xi)] \quad (5)$$

式中, ξ 为由冠层顶部向下累积的叶面积指数, k_d' 为光曾对漫射辐射的消光系数, k_b' 为冠层对直射辐射的消光系数, σ_l 为叶片的散射系数(对于可见光 $\sigma_l=0.2$;对于近红外辐射 $\sigma_l=0.8$)。 k_d 和 k_b 分别是理想冠层(由“黑体”叶片组成)中漫射辐射和直射辐射的消光系数。 ρ_{cb} 和 ρ_{cd} 分别为冠层对直射辐射和漫射辐射的反射系数。

1.1.2 单叶尺度碳水通量模型

在单叶尺度上,将阴叶和阳叶区分开,采用耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡联合方程,分别计算其通量。Leuning 等^[4]在 Ball 等^[14]提出的半经验气孔导度模型上进行了修正,将气孔对 CO_2 的导度(g_{sc})与 CO_2 同化速率(A_n)、叶片表面的饱和水汽压差(V_{pds})和 CO_2 浓度(C_s)建立如下关系式:

$$g_{sc} = g_{sc0} + \frac{a_1 \cdot f_{sm} \cdot A_n}{(C_s - \Gamma) \cdot (1 + V_{pds}/V_{pds0})} \quad (6)$$

式中, g_{sc0} 是在光补偿点 $A_n=0$ 时,气孔对 CO_2 的最小导度, Γ 为 CO_2 补偿点, a_1 是与 CO_2 同化作用、 CO_2 分压、湿度以及温度相关的参数, V_{pds} 为叶片表面的饱和水汽压差, V_{pds0} 是反映气孔导度对 V_{pds} 敏感性的经验系数。函数 f_{sm} 反映了土壤含水量对气孔导度的限制^[15]。根据连续性原理建立的气体传输方程,叶片表面的 CO_2 浓度(C_s)、细胞间隙的 CO_2 浓度(C_i)和空气中的 CO_2 浓度(C_a)有以下关系式:

$$C_s = C_a - A_n/g_{bc} \quad (7)$$

$$C_i = C_a - A_n/g_{tc} \quad (8)$$

式中, g_{bc} 和 g_{tc} 分别为叶片叶片边界层对 CO_2 的导度和气孔下腔到叶片边界层以外的大气之间的 CO_2 总导度。

叶片吸收的净辐射可以分为潜热和显热,Penman-Monteith 方程用于计算潜热^[4],而显热可由能量平衡方程来计算:

$$LE = \frac{s \cdot Y \cdot R_n^* + \rho_a \cdot c_p \cdot V_{pda} \cdot g_{bh}}{s \cdot Y + \gamma \cdot g_{bh}/g_{tw}} \quad (9)$$

$$H = Y \cdot (R_n^* - LE) \quad (10)$$

根据方程(10)得到的显热,可计算叶温与气温之差:

$$T_l - T_a = H/(\rho_a \cdot c_p \cdot g_{bh}) \quad (11)$$

式中, R_n^* 为叶片吸收的等温净辐射, LE 和 H 分别为叶片与大气之间的潜热和显热交换, c_p 为干空气的定压比热容, ρ_a 为空气密度, V_{pda} 为大气的饱和水汽压差, γ 为干湿表常数, s 为饱和水汽压对温度的斜率, g_{tw} 为从气孔下腔到叶片边界层以外的大气之间 H_2O 总导度, g_{bh} 为边界层对热量的导度, Y 为与辐射导度和 g_{bh} 有关的系数。

Farquhar 等^[16]针对 C_3 植物提出了一个光合作用生化模型。该模型中, CO_2 同化速率(A_n)受到二磷酸核酮糖羧化氧化酶(Rubisco)活性、1,5-二磷酸核酮糖(RuP_2 , 光合作用所需的底物)再生速率(A_j , 即电子传递

速率)的限制,用公式表示如下:

$$A_n = \min \{ A_v, A_j \} - R_d \quad (12)$$

式中,“ $\min \{ \}$ ”表示“取最小值”, R_d 为光照条件下的暗呼吸。von Caemmerer and Farquhar^[17] 认为,当细胞间隙 CO_2 分压较低且光照较强时 RuP_2 将达到饱和状态,此时 A_v 由 RuP_2 饱和时 Rubisco 酶的羧化速率决定:

$$A_v = V_{\text{cmax}} \cdot \frac{C_i - \Gamma}{C_i + K_c \cdot (1 + O_i/K_o)} \quad (13)$$

式中, V_{cmax} 为 RuP_2 和 CO_2 饱和时的最大催化活性, O_i 为细胞间隙氧气浓度, K_c 和 K_o 分别是 CO_2 和 O_2 的 Michealis 常数。当细胞间隙 CO_2 分压较高或者光照较弱时, RuP_2 称为限制因子,光合作用电子传递速率限制了 RuP_2 的再生速率,此时, CO_2 同化速率可用以下公式表示:

$$A_j = \frac{J}{4} \cdot \left(\frac{C_i - \Gamma}{C_i \cdot 2\Gamma} \right) \quad (14)$$

式中, J 为给定光照条件下的电子传递速率,用光响应的非直角双曲线方程来计算。

1.1.3 冠层尺度碳水通量模拟

以上过程(1.1.2 节)是在叶片尺度上进行的,多层模型将冠层划分为水平的若干层次,并将每一层的阴叶和阳叶区分开^[18]。植被和环境的垂直结构是构建模型时首先要解决的关键问题,在对多层模型进行参数化时,树木生理参数和环境要素在冠层内随着深度而变化,且在阴叶和阳叶中分别计算。Hirose 和 Verger^[19] 和 Leuning 等^[4] 将冠层中不同深度(ξ)的风速(u)、 V_{cmax} 用以下公式计算:

$$u(\xi) = u_0 \cdot \exp(-k_u \cdot \xi) \quad (15)$$

$$V_{\text{cmax}} = V_{\text{cmaxtop}} \cdot \exp(-k_n \cdot \xi/\xi_t) \quad (16)$$

u_0 为冠层以上的风速, V_{cmaxtop} 为冠层顶部 $\xi=0$ 时的 V_{cmax} 值, ξ_t 为整个冠层总的叶面积指数, k_u 为冠层中风速的衰减系数, k_n 为冠层中叶片氮含量的分布系数。

多层模型的特点之一就是根据冠层的结构对冠层进行分层,按照每层不同的环境特点逐层求解光合作用速率,最后累加至冠层水平。本文的多层模型在对冠层进行分层时,根据每一层叶面积在总叶面积中所占权重不同,采用了 Gaussian 五点积分法将冠层划分为 5 层^[4],以及将冠层平均划分为 2、5、10、20 层的方法。Gaussian 五点积分法,使用标准化的 Gaussian 距离 $G_x(n) = 0.04691, 0.23075, 0.5000, 0.76925, 0.95309$,其相应的权重 $G_w(n) = 0.11846, 0.23931, 0.28444, 0.23931, 0.11846$ 。Gaussian 距离在冠层中被用于选择冠层深度($\xi = \xi_t G_x(n)$), ξ 为从冠层顶部向下累积的叶面积指数),并在这个深度上估算该层冠层碳水通量。整个冠层在时刻 t 的净光合速率 $A_c(t)$ 和蒸散速率 $LE_c(t)$ 可用下式计算:

$$A_c(t) = \xi_t \cdot \sum_{n=1}^5 [(A_{sl}f_{sl} + A_{sh}f_{sh})G_w(n)] \quad (17)$$

$$LE_c(t) = \xi_t \cdot \sum_{n=1}^5 [(LE_{sl}f_{sl} + LE_{sh}f_{sh})G_w(n)] \quad (18)$$

1.1.4 生态系统尺度碳水通量模拟

森林生态系统中植物和土壤都参与碳水交换过程,因此,冠层的多层模型必须再结合土壤呼吸和蒸发才能拓展到生态系统尺度的碳水通量模型。由于灌木和草本生长在林冠下层,光照很弱,与乔木冠层相比,其光合作用和蒸散都较小,本研究中忽略不计。考虑土壤呼吸 R_{soil} 和土壤蒸发 LE_{soil} ,生态系统尺度的 CO_2 和 H_2O 通量为:

$$A_{\text{eco}} = A_c + R_{\text{soil}} \quad (19)$$

$$LE_{\text{eco}} = LE_c + LE_{\text{soil}} \quad (20)$$

式中, R_{soil} 和 LE_{soil} 可以分别与土壤温度 T_s ^[20] 和气温 T_a ^[21] 建立以下关系式:

$$R_{\text{soil}} = a2 \cdot \exp(b2 \cdot T_s) \quad (21)$$

$$LE_{\text{soil}} = a3 + b3 \cdot \exp(c3 \cdot T_a) \quad (22)$$

1.2 地点与仪器描述

本研究数据来自亚洲通量网数据库(AsiaFlux Database)的3个温带混交林观测站点:中国的长白山站点(CBS)、韩国的 Gwangneung 站点(GDK)和日本的 Moshiri 站点(MMF)。CBS 站地处北纬 42°24'N,东经 126°06'E,海拔 738m,年平均气温 3.6℃,年平均降水量 695mm,林型为温带针阔叶混交林,平均株高约 26m,最大叶面积指数约为 6 m²/m²;GDK 站地处北纬 37°45'N,东经 127°9'E,年平均气温 11.5℃,年平均降水量 1332mm,林型为温带针阔叶混交林,平均株高约 18m,最大叶面积指数约为 6 m²/m²;MMF 站地处北纬 44°19'N,东经 142°16'E,林型为温带混交林,平均株高约 25m,最大叶面积指数约为 3.44 m²/m²。研究站点均安装有开路涡动相关系统和常规气象观测仪器(表 1)。本文对 3 个站点的观测时间为 5 月 1 日至 9 月 30 日(CBS 和 GDK 站为 2007 年,MMF 站为 2005 年)。

表 1 观测系统及高度
Table 1 Study instrumentation

观测项目 Variables	仪器 Instrumentation	观测高度 Level
常规气象观测系统 Automatic meteorological observing system		
大气温湿度 Atmospheric temperature and humid	HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland	60m(CBS), 40m(GDK), 32m(MMF)
风速 Wind speed	A100R, Vector Instruments, Denbighshire, UK 034A, RMYoung, USA 010C, MetOne, USA	60m(CBS), 30m(GDK) 32m(MMF)
大气压 Atmospheric pressure	CS105, Vaisala, Helsinki, Finland LI-7500, Li-Cor, USA LI-7500, Li-Cor, USA	2m(CBS) 40m(GDK) 32m(MMF)
光合有效辐射 Photosynthetic active radiation	LI-190Sb, LiCor Inc., USA	32 m(CBS), 20m(GDK), 30m(MMF)
净辐射 Net radiation	CNR-1, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands	32 m(CBS), 40m(GDK), 30(MMF)
土壤湿度 Soil moisture	CS616_L, Compbell Sci., USA	地下 20cm(CBS)
	CS-615, Campbell Sci., USA CS-616 (Campbell Sci., USA)	地下 30cm(GDK) 地下 30cm(MMF)
土壤温度 Soil temperature	107_L, Campbell Sci., USA	地下 5cm(CBS)
	TCAV, Campbell Sci., USA	地下 10cm(GDK)
	C-PT100, Climatec, Japan	地下 5cm(MMF)
土壤热通量 Soil heat flux	HFP01, HukseFlux, The Netherlands	地下 3cm(CBS)
	HFP-3, Campbell Sci., USA	地下 10cm(GDK)
	PHF-01, REBS Inc., USA	地下 5cm(MMF)
开路涡动相关系统 Open path eddy covariance system		
超声风速仪 Triaxial sonic anemometer	CSAT3, Campbell Sci., USA	40m(CBS)
	CSAT3, Campbell Sci., USA	40m(GDK)
	R3-50, Gill Instruments, UK	32m(MMF)
CO ₂ /H ₂ O 红外气体分析仪 CO ₂ /H ₂ O infrared gas analyzer	Li-7500, Li-Cor, USA	40m(CBS), 40m(GDK), 32m(MMF)
显热通量 Sensible heat flux	CSAT3, Campbell Sci., USA;	40m(CBS), 40m(GDK), 32m(MMF)

2 结果分析与讨论

2.1 能量平衡闭合度分析

根据热力学第一定律和涡动相关观测的基本假设,理论上能量平衡闭合度可以作为观测系统性能和数据质量评价的一个有效途径。能量平衡闭合是指涡动相关系统直接观测的潜热和显热湍流通量之和($LE+H$)与可用能量(净辐射减去生态系统储热量,如净辐射减去土壤热通量(R_n-G))之间的平衡。本研究中采用最小二乘法和能量平衡比率(Energy Balance Ratio, EBR)^[22]的方法对能量闭合状况进行评价,这两种方法的计算公式如下:

$$OLS \quad y = ax + b$$

(19)

式中, x 为 (R_n-G) , y 为 $(LE+H)$ 。

$$EBR = \frac{\sum (LE + H)}{\sum (R_n - G)}$$

(20)

根据 OLS 法,将湍流通量 $(LE+H)$ 与可用能量 (R_n-G) 建立线性回归关系 OLS(图 1),OLS 和 EBR 的统计分析见表 2。生长季 5 月至 9 月 CBS、GDK 和 MMF 站点的 OLS 线斜率分别为 0.61、0.52 和 0.80,截距分别为 17.93、17.83 和 31.59 W/m^2 ,相关系数分别为 0.85(可用数据 6606)、0.85(可用数据 4479)和 0.79(可用数据 6851)。筛选 8:00 至 18:00 的白天数据(大多为可用能量大于零),CBS 站点超过 75% 的数据都在 1:1 线下面,GDK 站点超过 90% 的数据在 1:1 线下面,表明这两个站点涡动相关系统对大多数湍流通量都有低估现象,而 MMF 站点的数据在 1:1 线上下近似均匀分布。在许多通量研究站点,包括草地和森林等的能量不闭合现象已有广泛报道^[22-24],根据以上文献报道, $LE+H$ (因变量)与 R_n-G (自变量)的回归线(OLS)斜率普遍低于 1,从 0.55 至 0.99 不等,截距为-32.9 至+36.9 W/m^2 ,相关系数为 0.64 至 0.96。能量平衡比 EBR 从 0.34 至 1.2 不等,其中 0.6—0.8 之间的值居多,本研究中,CBS、GDK 和 MMF 站点的 EBR 分别为 0.76、0.66 和 1.07,居于国际同类观测的中上水平,因此,涡动相关系统的观测数据较为可靠。

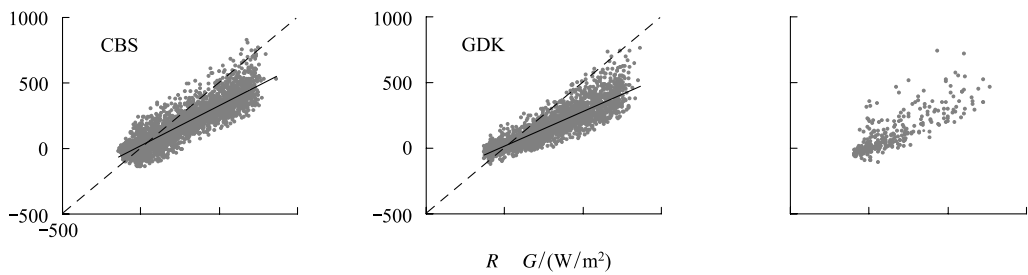


图 1 能量平衡闭合度分析,横坐标为可用能量 (R_n-G) ,纵坐标为涡相关实测的显热和潜热通量之和 $(LE+H)$

Fig. 1 Analysis on the energy balance closure, with available energy flux (x -axis, R_n-G) versus eddy covariance latent and sensible flux (y -axis, $LE+H$)
图中实线为回归线($y=ax+b$),虚线为 1:1 线

表 2 OLS 方法(斜率、截距、相关系数 R^2)和 EBR 方法对能量平衡闭合度的分析,自变量 x 为可用能量 (R_n-G) ,因变量 y 为湍流通量 $(LE+H)$, n 为可用数据

Table 2 Ordinary least squares (OLS) and energy balance ratio (EBR) for energy balance closure with x of available energy (R_n-G) and y of latent heat plus sensible heat ($LE+H$) n was available data

	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	n	EBR	x 均值 Averaged x	y 均值 Averaged y
CBS	0.61	17.93	0.85 **	6066	0.76	122.17	92.71
GDK	0.52	17.83	0.85 **	4479	0.66	128.03	84.97
MMF	0.8	31.59	0.79 **	6851	1.07	114.94	123.01

** 表示 P 值小于 0.001

能量不闭合现象是冠层上方湍流通量观测中普遍存在的现象,有较多通量站的观测数据结果为实测湍流通量小于可能能量,造成能量不闭合的原因可能包括以下方面^[22-24]:(1)由能量平衡各项的源区面积不同而造成的取样误差,如潜热主要来自叶片、显热主要来自干热土壤表面等;(2)涡动相关技术对湍流通量观测时的低频和高频损失;(3)热量和水汽的水平/垂直对流;(4)由于传感器的相互独立以及观测塔的结构而导致的系统和观测误差;(5)对出热通量的观测不够精确以及对其它能量源汇的忽略。

为避免因能量不闭合对模拟结果的检验产生的误差,本研究中应用 Twine 等^[24]提出的能量闭合方法对涡动相关系统观测的能量通量进行了闭合度订正。该方法假定由涡动相关系统观测的显热(H_{obs})和潜热

(LE_{obs}) 通量之比($\beta = H_{\text{obs}}/LE_{\text{obs}}$)是正确的,再根据能量平衡方程和可用能量(净辐射减去土壤热通量, $R_n - G$),重新计算出显热和潜热的大小,即经过能量平衡闭合度订正过的显热(H)和潜热(LE)通量为:

$$H = \frac{R_n - G}{1 + 1/\beta} \quad (21)$$

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (22)$$

用此方法订正过的潜热通量用于下文(2.2节)中对模拟的 LE 进行检验。

2.2 碳水通量的模拟结果

为检验多层模型对碳水通量的模拟效果,分别选取生长季天气晴朗的连续十天数据进行检验,以 Gaussian 五点积分法与涡度相关观测进行比较,碳水通量模拟值与实测值变化趋势基本一致(图2为 CO_2 通量 F_c ,图3为 H_2O 通量 LE)。夜间 F_c 为负值,表明生态系统进行呼吸作用释放出 CO_2 ,从日出开始,叶片逐渐开始光合作用吸收 CO_2 ,直至吸收的 CO_2 超过生态系统呼吸释放出的 CO_2 量,植被与大气之间的 CO_2 通量由负值变为正值,表明白天森林生态系统净吸收 CO_2 。随着太阳辐射和气温的逐渐升高, CO_2 通量在午时左右达到最大值,约为 $20\text{--}30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,下午太阳辐射和气温降低, CO_2 通量也逐渐减小,直至傍晚接近于零,此后,呼吸作用释放出 CO_2 量又超过了光合作用吸收的 CO_2 量,植被与大气之间的 CO_2 通量恢复到夜间的负值,约为 $0\text{--}5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,表明生态系统在夜间净释放 CO_2 。 H_2O 通量的日变化曲线与 CO_2 通量相似,夜间 LE 较低且变化较小,在日出后,逐渐升高,12:00 左右达到最大值,约为 $300\text{--}400 \text{ W/m}^2$,以后逐渐降

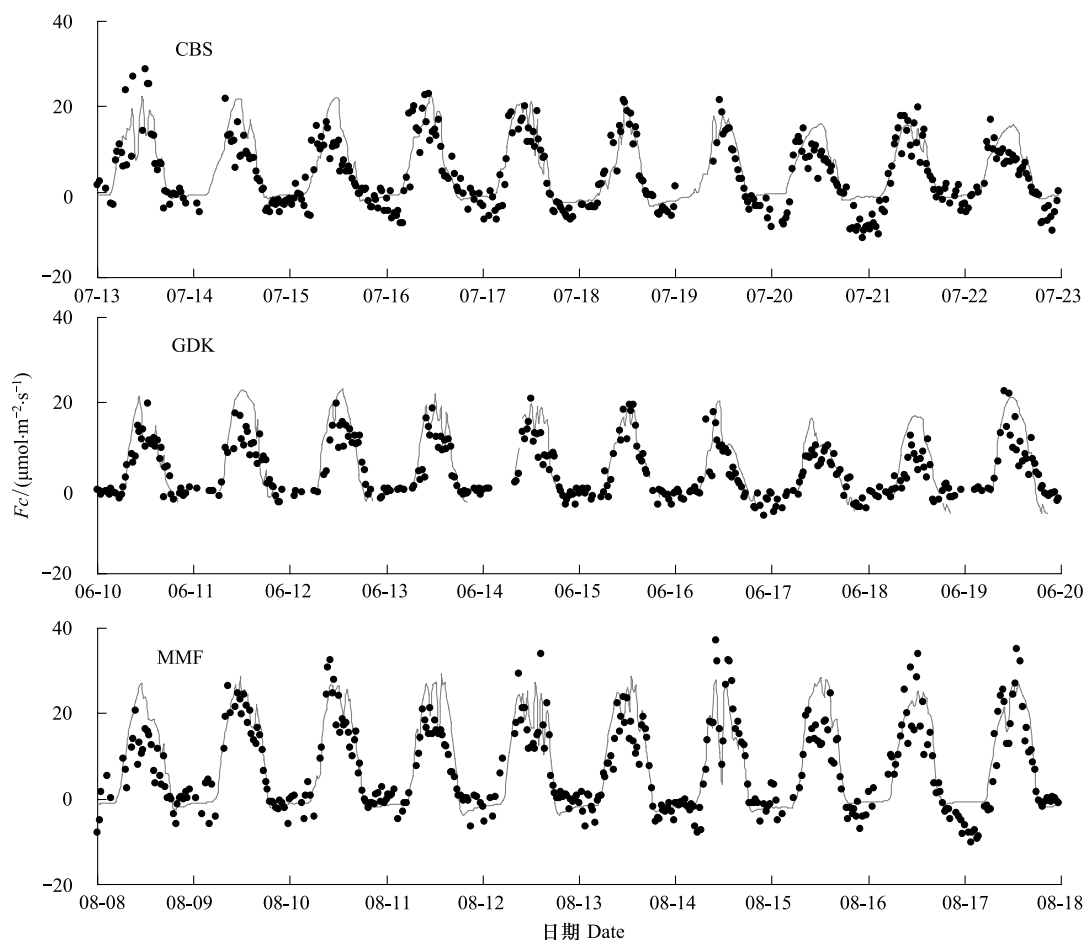


图2 连续10d的 CO_2 通量(F_c)模拟值(线)与实测值(点)的比较

Fig. 2 Diurnal cycles of modeled (line) and measured (dot) CO_2 fluxes (F_c) for ten days

低直到日落后又趋于稳定,夜间 LE 多在 50 W/m^2 以下。 LE 是能量平衡的一个分量,主要受能量相关的因子驱动,包括太阳辐射、气温;此外, LE 还是水量平衡的一个分量,受到水分条件的限制,如土壤和空气湿度等。由图 2 和图 3 可以看出, CO_2 和 H_2O 通量的模拟数据在夜间较为平稳,这是因为呼吸作用主要与气温有关,而夜间气温起伏较小,因而夜间 F_c 较为稳定。 LE 模拟值的负值较少且夜间的绝对值也较小,在 $(0 \pm 10) \text{ W/m}^2$ 之间,而夜间和日出日落时 LE 实测值变化较大且出现不少负值 $(0 \sim -50 \text{ W/m}^2)$,可见夜间的模拟效果不如白天好,这是因为夜间涡动相关实测 LE 负值是由大气中的水汽凝结过程产生的,多层模型对冠层 LE 的模拟是从叶片尺度上推到冠层,而对夜间发生在大气中的水汽变化过程无法模拟,因而夜间模拟的偏差较大。

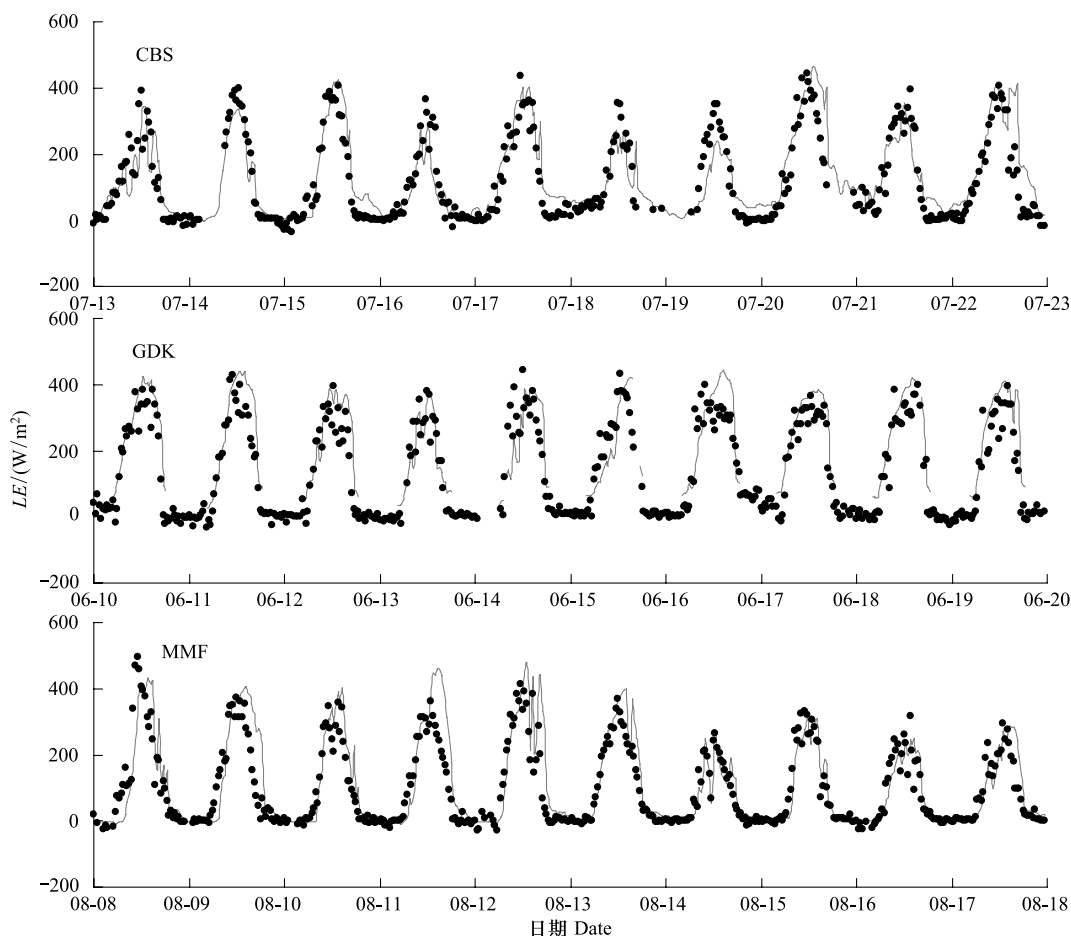


图 3 连续 10d 的 H_2O 通量(LE)模拟值(线)与实测值(点)的比较

Fig. 3 Diurnal cycles of modeled (line) and measured (dot) H_2O fluxes (LE) for ten days

2.3 不同的冠层分层方式对模型模拟结果的影响

在多层模型中,不同的分层方法首先对辐射吸收产生影响,由于辐射使光合作用和蒸发散的主要驱动因子之一,因而这对 CO_2 和 H_2O 通量的计算结果也会产生一定的影响。表 3 分析了冠层平均分为 2、5、10、20 层的碳水通量与 Gaussian 五点积分法的碳水通量的比较。结果表明,分层方法的不同对 CO_2 通量的影响大于 H_2O 通量。从平均值来看,Gaussian 法(表 3 中的 x 均值)比平均分层的方法(表 2 中的 y 均值)得到的 CO_2 通量和 H_2O 通量都高。从表 2 中的斜率和 y 均值可以看出,分层越多, H_2O 通量模拟值越低,而 CO_2 通量模拟值越高。以 CBS 站点为例,用 2、5、10、20 层方法模拟的 CO_2 通量平均值分别为 1.01 、 2.61 、 3.12 和 $3.19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, H_2O 通量平均值分别为 90.45 、 89.71 、 85.28 和 80.02 W/m^2 。该多层模型中,计算每一层的碳水通量时,辐射吸收、温湿度、风速等环境输入变量均以每一层垂直方向上中点的数值来计算。这几种分层方法产生的差异,主要来自于不同层的辐射吸收、温湿度、风速等环境变量垂直廓线的差异。另外,由于叶片光合

作用对光的响应是非线性的,因而模型采用越少的分层方法(如2层),其所产生的辐射误差将放大碳水通量模拟结果的误差。分层越多,各层辐射吸收的拟合越精确,但计算速度越慢。多层模型将环境因子作为模型的输入变量,成功模拟了植被冠层与大气之间的 CO_2 和 H_2O 交换,但是该模型也存在着不足之处,在模型检验方面,用实测资料检验多层模型在理论上是可行的,但在实际操作上较困难,虽然能够得到整个冠层水平上的通量数据,但要得到每一层的数据是非常困难的^[18]。

表3 对冠层采用不同分层方式得到的通量的线性回归分析,自变量 x 为 Gaussian 五点积分法得出的通量,因变量 y 为将冠层平均分为 2、5、10 和 20 层的方法得到的通量, R^2 为相关系数, n 为可用数据

Table 3 Linear regression of fluxes from different layered methods, with x of Gaussian integration and y of average layered methods. R^2 and n were correlation of determination and available data, respectively

CBS site	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	n	x	y
LE 2-layer	0.91	1.36	0.99 **	6911	97.37	90.45
LE 5-layer	0.88	4.07	0.99 **	6911	97.37	89.71
LE 10-layer	0.8	7.53	0.99 **	6911	97.37	85.28
LE 20-layer	0.71	10.58	0.98 **	6911	97.37	80.02
Fc 2-layer	0.38	-0.44	0.78 **	6911	3.83	1.01
Fc 5-layer	0.71	-0.1	0.98 **	6911	3.83	2.61
Fc 10-layer	0.73	0.3	0.98 **	6911	3.83	3.12
Fc 20-layer	0.79	0.15	0.99 **	6911	3.83	3.19
GDK site						
LE 2-layer	0.89	-0.63	0.98 **	3194	157.77	142.51
LE 5-layer	0.87	5.77	0.99 **	3194	157.77	139.83
LE 10-layer	0.77	13.37	0.99 **	3194	157.77	135.35
LE 20-layer	0.67	19.86	0.98 **	3194	157.77	124.8
Fc 2-layer	0.45	-1.61	0.68 **	3194	5.81	1.02
Fc 5-layer	0.73	-0.37	0.96 **	3194	5.81	3.87
Fc 10-layer	0.8	0.48	0.99 **	3194	5.81	5.12
Fc 20-layer	0.74	1.08	0.96 **	3194	5.81	5.36
MMF site						
LE 2-layer	0.94	1.15	0.99 **	7029	49.79	48.19
LE 5-layer	0.93	1.5	0.99 **	7029	49.79	47.91
LE 10-layer	0.87	2.82	0.99 **	7029	49.79	46.16
LE 20-layer	0.79	4.41	0.96 **	7029	49.79	43.57
Fc 2-layer	0.67	0.15	0.93 **	7029	4.66	2.98
Fc 5-layer	0.68	0.2	0.96 **	7029	4.66	3.38
Fc 10-layer	0.85	-0.01	0.99 **	7029	4.66	3.94
Fc 20-layer	0.82	0.11	0.99 **	7029	4.66	3.95

3 结论

通过联立光合作用、气孔导度和能量平衡方程,多层模型能够以迭代法求出每一时间步长的 CO_2 和 H_2O 通量。本研究针对3个温带混交林生态系统,利用常规气象观测数据作为模型输入变量,计算出冠层与大气之间的碳水通量,并与涡动相关系统的通量观测数据进行比较,验证了该多层模型对碳水通量的模拟结果,并分析了不同的冠层分层方式对多层模型模拟结果的影响。得出以下结论:

(1)首先分析了3个温带混交林通量站涡动相关系统的能量平衡闭合度, CBS、GDK 和 MMF 站点的能量平衡比率(EBR)分别为 0.76、0.66 和 1.07,居于国际同类观测范围(0.34—1.2)的中上水平,因此,涡动相关系统的观测数据较为可靠。

(2)从 CO_2 通量(F_c)和 H_2O 通量(LE)的日变化来看,用 Gaussian 五点积分法将冠层分为五层的模型能

较好的模拟碳水通量的日变化趋势。夜间 F_c 为负值且变化趋势较为平缓,约为 $0-5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,从日出开始 F_c 逐渐变为正值,随着净辐射和气温的逐渐升高, F_c 在中午时分达到最大值,约为 $20-30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,下午 F_c 逐渐减小,日落之后又回复到夜间的负值。 H_2O 通量的日变化曲线与 CO_2 通量相似,且模拟值与涡动相关实测值具有较好的一致性,夜间 LE 较低且变化较小,日出后,逐渐升高,12:00 左右达到最大值,约为 $300-400 \text{ W/m}^2$,以后逐渐降低直至日落后又趋于稳定。

(3) 在多层模型中,对冠层采用不同的分层方法,对碳水通量模拟结果有一定的影响。本研究以 Gaussian 五点积分法将冠层分为五层的方法作为对照,分别将冠层分为 2、5、10、20 层的方法得到的碳水通量与其进行比较。从平均值来看,分层越多, H_2O 通量模拟值越低,而 CO_2 通量模拟值越高。不同的分层方法产生的差异,主要来自于不同层的辐射吸收、温湿度、风速等环境要素的垂直廓线差异,且叶片光合作用对光的响应是非线性的,因此,采用冠层分层较少的方法,将可能对碳水通量的模拟结果产生较大的偏差。

从本研究的结果来看,模型对夜间碳水通量模拟,在数值上与实测值还存在一定的偏差,Ball-Berry 模型的气孔导度对土壤含水量响应的经验性较强,下一步工作应将根系-枝干-叶片途径的水势与土壤含水量和空气湿度联系起来,以提高气孔导度的模拟精度。此外,该模型对林下灌草和凋落物碳水过程的模拟存在一定的欠缺,下一步工作应该进一步改善模型对灌草和掉落物的模拟。

致谢:感谢亚洲通量网(AisaFLUX)提供通量和气象常规观测数据。

References:

- [1] Zhou G S, Wang Y H, Bai L P, Xu Z Z, Shi R X, Zhou L, Yuan W P. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 692-707.
- [2] Wang Y, Zhou G S, Jia B R, Li S, Wang S H. Comparisons of carbon flux and its controls between broad-leaved Korean pine forest and Dahurian larch forest in northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4376-4388.
- [3] Shen X, Zhang M Z, Qi X B. Comparison of regional forest carbon estimation methods based on regression and stochastic simulation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6): 1-8.
- [4] Leuning R, Kelliher F M, De Pury D G G, Schulze E D. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopies. *Plant, Cell and Environment*, 1995, 18(10): 1183-1200.
- [5] Wang Y P, Leuning R. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I: model description and comparison with a multi-layered model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1/2): 89-111.
- [6] Wang S H, Zhang M Z, Zhao P A, Chen J X. Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [7] Yu Q, Ren B H, Wang T Y, Sun S F. A simulation of diurnal variations of photosynthesis of C_3 plant leaves. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(6): 867-880.
- [8] Leuning R. Modelling stomatal behaviour and photosynthesis of *Eucalyptus grandis*. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1990, 17(2): 159-175.
- [9] Sellers P J, Berry J A, Collatz G J, Field C B, Hall F G. Canopy reflectance, Photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(3): 187-216.
- [10] McMurtrie R E, Leuning R, Thompson W A, Wheeler A M. A model of canopy photosynthesis and water use incorporating a mechanistic formulation of leaf CO_2 exchange. *Forest and Ecology Management*, 1992, 52(1/4): 261-278.
- [11] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Berry J A, Field C B, Dazlich D A, Zhang C, Collelo G D, Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. part I: model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 679-705.
- [12] Goudriaan J, van Laar H H. Modelling Potential Crop Growth Processes. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994: 238-238.
- [13] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/3): 231-242.
- [14] Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions // Biggens J, ed. *Progress in Photosynthesis Research*. The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1987: 221-224.
- [15] Cox P M, Huntingford C, Harding R J. A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 79-94.

- [16] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 1980, 149 (1): 78-90.
- [17] von Caemmerer S, Farquhar G D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, 1981, 153(4): 376-387.
- [18] Amthor J S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis Research*, 1994, 39(3): 321-350.
- [19] Hirose T, Werger M J A. Maximizing daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. *Oecologia*, 1987, 72(4): 520-526.
- [20] Wang M, Han S J, Wang Y S. Important factors controlling CO₂ emission rates from forest soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 24-29.
- [21] Shi T T, Guan D X, Wu J B, Zhang M, Wang A Z, Jin C J, Han S J. Measurement of evapotranspiration above broadleaved-Korean pine forests in the Changbaishan Mountains with eddy covariance technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(6): 1-8.
- [22] Wilson K B, Goldstein A H, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meywes T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [23] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 416-429.
- [24] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, Cook D R, Houser P R, Meyers T P, Prueger J H, Starks P J, Wesely M L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 279-300.

参考文献:

- [1] 周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 许振柱, 石瑞香, 周莉, 袁文平. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. *气象学报*, 2004, 62(5): 692-707.
- [2] 王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 李帅, 王淑华. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较. *生态学报*, 2010, 30(16): 4376-4388.
- [3] 沈希, 张茂震, 祁祥斌. 基于回归与随机模拟的区域森林碳分布估计方法比较. *林业科学*, 2011, 47(6): 1-8.
- [6] 汪少华, 张茂震, 赵平安, 陈金星. 基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟. *生态学报*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [7] 于强, 任保华, 王天铎, 孙菽芬. C₃ 植物光合作用日变化的模拟. *大气科学*, 1998, 22(6): 867-880.
- [20] 王淼, 韩士杰, 王跃思. 影响阔叶红松林土壤 CO₂ 排放的主要因素. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 24-29.
- [21] 施婷婷, 关德新, 吴家兵, 张弥, 王安志, 金昌杰, 韩士杰. 用涡动相关技术观测长白山阔叶红松林蒸散特征. *北京林业大学学报*, 2006, 28(6): 1-8.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.15 August ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau	4605
Distribution pattern and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing	4618
Simulation of CO ₂ and H ₂ O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model	4630
Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area	4641
Integrated water risk assessment in Daliao River estuary area	4651
Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity	4661
Genetic diversity analysis of different age of a Dalian population of the Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> by EST-SSR	4673
Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) purse seine catch in the western Indian Ocean	4682
Seasonal differences in habitat selection of the Crocodile lizard (<i>Shinisaurus crocodilurus</i>) in Luokeng Nature Reserve, Guangdong	4691
Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu	4700
Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid <i>Populus tomentosa</i> plantations	4714
Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia	4722
Effect of elevated ultraviolet-B (UV-B) radiation on CH ₄ emission in herbicide resistant transgenic rice from a paddy soil	4731
NMR spectroscopy based metabolomic analysis of <i>Thellungiella salsuginea</i> under salt stress	4737
Screening and identification of associative nitrogen fixation bacteria in rhizosphere of sugarcane in Guangxi	4745
Effects of different rice-crab production modes on soil labile organic carbon and enzyme activities	4753
The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains	4762
Changes of soil faunal communities during the restoration progress of <i>Abies faxoniana</i> Forests in Northwestern Sichuan	4772
The effects of the endophytic fungus <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 on <i>Fusarium oxysporum</i> in a continuously cropped watermelon field	4784
Population ecology of <i>Aulacoseira granulata</i> in Xijiang River	4793
Evaluation of ecosystem sustainability for large-scale constructed wetlands	4803
MIS3b vegetation and climate changes based on pollen and charcoal on Qianxi Plateau	4811
The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge	4819
Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area	4827
Occurrence characteristics of <i>akashiwo sanguinea</i> bloom caused by land source rainwater	4836
Analysis on landscape pattern change and its driving forces of Yancheng National Natural Reserve	4844
Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: a case study in Futian central district, Shenzhen, China	4852
Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta	4861
The diversity parameters of butterfly for ecological function divisions in Chongqing	4869
Review and Monograph	
Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas	4890
Temperature sensitivity of soil respiration: uncertainties of global warming positive or negative feedback	4902
The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review	4914
The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes	4924
Scientific Note	
Cutting effects on growth and wastewater purification of <i>Cyperus alternifolius</i> in constructed wetland	4932

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 15 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 15 (August, 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:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元