北方黑云杉林冠内空气 CO_2 浓度及其上方通量模拟*

申双和　孙照渤

（南京信息工程大学气象灾害实验室，南京，210044）

陈镜明

（多伦多大学地理规划系，多伦多，M5S 3G3）

摘　要

考虑植物阴叶和阳叶对环境的反应、植物叶片丛聚特性以及叶片氮素水平的垂直差异，建立了黑云杉林与大气之间物质输送和能量交换的一维完全多层模式。模式中对阳叶和阴叶的叶面积指数借用 Chen J M 等提出的方法，并经过修改以适用于多层模拟。叶水平的光合作用 c 运用 Farq uhar 方程并与 CO_2 传导方程联列获得。模式验证的资料取自 BOREAS(Boreal Ecosystem-fAtmosphere Study)研究计划中加拿大 Saskatchewan 的南试验区，属于温带气候。通过对冠 o 层上方的显热、感热和 CO_2 通量、以及植物光合作用、蒸腾作用和气孔传导等生理作用 t 过程的实测值进行了计算结果的验证，结果表明：计算的显热通量比实测值偏低，潜热通量则略高于实测值，而 CO_2 通量只有在较高水平时偏高，3 个通量的计算值与实测值比较接近，R^2 分别为 0.71，0.78 和 0.65，取得了较好的效果。气孔导度、光合作用和蒸腾作用的模拟结果表明，三者的实测与模拟值之间的 R^2 分别达到 0.57，0.69 和 0.66，均通过 0.01 显著度检验，且无显著的系统偏差。因此，可以认为在多层模拟中充分考虑叶片不同受光状况，不同氮素水平以及叶片丛聚特性的影响有助于更好地研究植被与大气的交换过程。

关键词：黑云杉，CO_2 通量，完全多层模式，二叶模型，叶片丛聚。

1　引　言

数十年来，对于生物与大气间的质量输送和能量交换的研究已经取得长足进展，并提出许多不同的模式[1~4]。这些描述土壤-植被-大气系统(SPAS)的输送模式其复杂性由简到繁、适用范围由小到大、涉及的生物物理参数由少到多。通常可以将这些模式分为两大类：一类属于大叶模式，另一类属于多层模式。而在多层模式中有两种情况，一种是只考虑太阳辐射环境和风速的垂直差异，而像气温、水汽压、CO_2 浓度等其他因子则假设不随冠层深度变化；另一种则充分考虑了这些因素的垂直差异，从而试图能更加客观地表征冠层内实际的物理学和生物学现象，它不仅能预报生物与大气间的物质与能量交换，而且有助于理解控制这些交换的过程。

后来发现，大叶模式和多层模式都存在着一种缺陷，这就是没有将阳叶和阴叶区分开来，如 Sellars 等[1]最新版本的简明生物模式(SiB2)就是将冠层看成一个大叶片，通过求解冠层顶部叶片能量平衡、气孔导度、光合作用耦合方程，然后再标定到整个冠层。又如 Gu 等[3]研制的冠层微气象学和质量输送与能量交换的多层综合模式，谢正桐等[5]研制的陆气耦合模式，以及季劲钧等[6]研制的冠层传输多层模式等均未区别叶片受光状况，将每一层作为一张叶片处理。理论上来讲这些都是缺乏机理性的处理方法[7]。一方面阳叶与阴叶具有不同的光截取，因而具有不同的温度和湿度，气孔的导度显然也就不同，从而导致叶片光合作用用差异较大，而叶

* 初稿时间：2004 年 6 月 30 日；修改稿时间：2005 年 1 月 12 日。
资助课题：国家自然科学基金项目(B29200)。
作者简介：申双和，男，1957 年生，教授，博士生导师。主要从事农业气象、生态环境气象研究。

片光合作用对光的反应是非线性的，如果在模式中不加区别地用平均叶片辐射吸收来表示冠层吸收，结果会显著地高估冠层的光合作用[8]。在晴朗干燥的天气下，阳叶的温度有时甚至要比阴叶高几度，忽略这种温度差异可能会偏估冠层的感热通量和显热通量。在多层模式中同时考虑不同受光叶片的气孔导度特性在过去的研究中尚未见报道。Wang 和 Leuning[9]虽然建立了二叶模式用来分别计算阳叶和阴叶的显热、潜热和 CO_2 通量，他们把整个冠层作为一层考虑，因此不能很好地揭示冠层内物质输送与能量交换的复杂特性。其二，过去所使用的冠层内辐射传输模式的主要缺点就是没有处理叶片丛聚问题。大多植物冠层叶片集中为树冠叶、树枝叶和嫩枝叶 3 类，因此改变着冠层内的辐射透射状况[10]。由于树叶丛聚会减少光学深度导致更多的辐射透过叶层，因此，对叶片丛聚的冠层，决定透射率大小的是有效而不是实际叶面积指数。如果在多层模式中将丛聚指数引入辐射传输的计算，将能够更加客观地揭示冠层内不同受光状态叶片的光吸收和光合作用。其三，冠层内叶片氮的分布对光合作用的影响早就被广泛认识到，实际观测实验结果已经表明，新叶和老叶之间的光合作用强度有一定的差异，造成这种差异的主要原因就是因为新叶中的氮素含量较高，可以达到其最大可能含量，光合作用活性较强，而老叶的氮含量可能处在一个底限值。在冠层内，新叶总是分布在冠层层顶，越是向下，叶龄越大，因而叶片中氮素含量也就越低。过去模式的设计都是把冠层内植物叶片的氮含量作为常数，这种处理也会带来垂直方向上光合作用分布的误差，从而影响冠层碳通量的估算。

本文综合考虑生态系统中碳循环过程中涉及的大气物理、水文、生理生态、生物化学等过程，运用模型计算阴叶和阳叶的光合作用，引入丛聚指数计算冠层叶片的光截取，考虑到叶片氮素的差异对光合作用的影响，建立黑云杉林植被与大气之间物质输送和能量交换的完全多层模式，通过实测数据进行模式的验证。

2 资料来源

资料取自 BOREAS 计划在加拿大中部属温带气候的萨斯喀彻温省南研究区的试验。试验区域包括 Albert 王子国家公园(53°59′N，105°07′W；海拔高度为 628.94 m)。植被为古黑云杉林，叶面积指数 4.0，树木平均高度 12 m。试验计划从 1993 年开始到 1996 年结束，试验区的观测资料包括使用涡度相关测定的感热、潜热和 CO_2 通量以及使用自动气象 m 站采集常规的气象资料，测定高度为距地面 20 m。通量仪器安装在植被均匀分布面积为 1 km^2 以上的林地上方，此外还包括土壤热通量和土壤温度剖面的实时测定。自动气象站测定的要素包括：净辐射、总辐射、气温、比湿、水汽压、风速、风向和降水。土壤热通量使用埋于深度为 7 cm 的热流板测定。上述资料时间为 1994 年第 144～155 天(5～6 月)，第 200～209 天(7 月)和第 251～261 天(9 月)，并使用 Campbell 21-X 采集器，通过软件 TELCOM.EXE 处理为 30 min 的平均值。冠层内 CO_2 廓线测定高度分别为距地面 9，3，1，0.5，0.25 和 0.05 m，每一高 6 度上有一管道与螺旋开关相连，由开关控制测定高度，通过气泵将所在高度空气吸入 LI 6262 IRGA 以分析 CO_2 浓度，每隔 30 min 一次将数据传输到数据采集器。分别在 1994 年 7 月 24 日、8 月 27 和 28 日测定冠层上部叶片气孔导度、光合作用、蒸腾作用、叶面温度、CO_2 浓度、相对湿度，同时测定环境温度、CO_2 浓度、水汽压和上方的 PPDF 等，使用的测定仪器有 LI6S200 便携式光合系统、上述 IRGA，MPH-1000 气体交换系统和 Dew-10 露点反射镜等。

3 模式简介及计算步骤

将空气 CO_2、水汽等标量守恒方程应用于黑云杉林，方程中的源-汇项，包括呼吸作用与光合作用及蒸腾作用。这里使用 Farquhar 等[11]提出的叶片光合作用 CO_2 同化模型，该模型定量有效地描述了植物光合作用与环境和生理因子之间的关系，应用非常广泛。模型中的一个重要参量——叶片细胞间隙内 CO_2 浓度不能直接测得，因此，联列 Farquhar 光合模型和叶片 CO_2 传导模型，从而消去叶片细胞间隙内 CO_2 浓度[12]。假设植物和土壤的呼吸作用强度仅由空气温度决定。由于阳叶和阴叶所处的环境条件不同，气孔导度不同，因此光合作用和蒸腾作用强度也就不同。我们分别计算阴、阳叶吸收的光合有效辐射、水汽扩散，然后再按各自叶面积的权重加权求和获得每一层光合作用和蒸腾作用。

3.1 冠层内外标量扩散输送模式

对于水平均匀的刚性冠层，一维标量通量可以用标量守恒方程描述为

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial z}=S(z,t) \tag{1}$$

式中 C 为标量物质浓度,F 为该标量物质(如 CO_2,H_2O 等)的垂直通量,$S(z,t)$是一定时间、地面上方某一高度处植物 的源或汇强度。通量可以表达为

$$F=-K_C\frac{\partial C}{\partial z} \tag{2}$$

式中 K_C 是冠层内或冠层上方物质 C 的扩散系数,可以用有关公式计算[13],并经过稳定,度修正[14]。

对 CO_2,H_2O 和感热的单位冠层高度的源强度,式(1)中 $S(z,t)$分别从下面式中得到

$$S_c(z,t)=[g_c(C_i-C_a)+r_p] \tag{3}$$

$$S_v(z,t)=g_v(e_i-e_a)L \tag{4}$$

$$S_h(z,t)=c_p g_h(T_l-T_a)L \tag{5}$$

式中 g_c,g_v 和 g_h 分别为单位叶面积 CO_2,H_2O 从细胞间隙到冠层空气和热量从叶表面到冠层空气的导度。C_a,C_i 分别是冠层空气和细胞间隙 CO_2 浓度,e_a,e_i 分别是冠层空气和细胞间隙的水汽压,T_a,T_l 分别是冠层空气和叶面温度。L 是在高度 z 单位高度的叶面积指数,c_p 为定压空气比热。r_p 是单位叶面积的植物呼吸强度。

各标量的导度可以用阻力形式表示成

$$g_c=\frac{1}{r_{sc}+r_{bc}} \tag{6}$$

$$g_v=\frac{1}{r_{sv}+r_{bv}} \tag{7}$$

$$g_h=\frac{1}{r_{bh}} \tag{8}$$

式中 r 为各标量的扩散阻力,是相应导度的倒数。r_{sc}和 r_{sv}是 CO_2 和 H_2O 从细胞间隙扩散到叶表面的气孔阻力,而 r_{bc},r_{bv}和 r_{bh}是 CO_2,H_2O 和热.量从叶表面扩散到冠层空气的边界层阻力。这里有 $r_{sv}:r_{sc}=1.6:1.0$,$r_{bc}:r_{bv}:r_h=0.76:1.08:1.00$。

r_{bc}用下式计算

$$r_{bc}=\frac{1}{c[u(z)/W]^{1/2}} \tag{9}$$

式中 c 为常数,$c=0.01\ m/s^{1/2}$,$u(z)$为高度 z(m)处的风速(m/s),W 是叶片平均宽度(m)。

3.2　叶片瞬时总光合作用

叶片水平上的光合作用计算可以通过联列 Farquhar 等[11]提出的经典模型和传导模型[1,15,16],其目的是要消去叶片细胞间隙 CO_2 这一变量。依此方法,Chen 等[12]推导得到下列叶片水平上的光合作用计算模型

$$A_c=\frac{1}{2}\Big\{(C_a+K)g_c+V_m-r_d-\{[(C_a+K)g_c+V_m-r_d]^2-4[V_m(C_a-\Gamma)-(C_a+K)r_d]g_c\}^{\frac{1}{2}}\Big\} \tag{10}$$

$$A_j=\frac{1}{2}\Big\{(C_a+2.3\Gamma)g_c+0.2J-r_d-\{[(C_a+2.3\Gamma)g_c+0.2J-r_d]-4[0.2J(C_a-\Gamma)-(C_a+2.3\Gamma)r_d]g_c\}^{\frac{1}{2}}\Big\} \tag{11}$$

式中 A_c 和 A_j 分别是 Rubisco 限制和光限制的总光合作用,V_m 是最大羧化速率,J 是电子传送速率;Γ 是无暗呼吸时的 CO_2 补偿点,K 是酶动力学函数,g_c 正如前述,是叶边界层外部大气到细胞间隙空间路径的 CO_2 气孔导度,r_d 是白天叶片暗呼吸。Γ 和 K 都是取决于温度的参量。Γ 可以表示成[17,18]

$$\Gamma=1.92\times10^{-4}[O_2]1.75^{\frac{T-25}{10}}$$

式中$[O_2]$是大气中的氧浓度,在 1000 hPa 大气压下为 210 hPa ,T 是空气温)度(℃),K 可以写成

$$K=K_C\left(1+\frac{[O_2]}{K_O}\right) \tag{13}$$

式中 K_C 和 K_O分别是 CO_2 和 O_2 的 Michaleis-Menten 常数,单位为 Pa。$K_C=30\times2.1^{\frac{T-25}{10}}$,$K_O=30000\times1.2^{\frac{T-25}{10}}$[17],$V_m$ 可以表示成温度和叶片氮素含量的函数[19]

$$V_m=V_{25}2.4^{\frac{T-25}{10}}f(T)f(N) \tag{14}$$

式中 V_{25}是气温在 25 ℃时的 V_m,随植被类型改变而改变,$f(T)$和 $f(N)$分别是温度和氮素限制的因子,表示成

$$f(T)=\left\{1+\exp\left[\frac{-220000+710(T+273)}{R_a(T+273)}\right]\right\}^{-1} \tag{15}$$

$$f(N)=\frac{N_l}{N_m} \tag{16}$$

式中 R_a 为摩尔气体常数,N_l 是叶片氮素含量,N_m 是最大氮含量。

考虑到冠层内叶片氮的分布对光合作用的影响,这里将冠层内叶片氮素含量作为一个随冠层深度(用叶面积指数表示)而变化的参量。具体方法是:在新叶的最大可能含氮量与老叶的最低含氮量

之间，光合作用才会随氮素含量的变化而变化[20~22]，冠层内叶片中的氮素含量可以不受其吸收的辐射强弱的影响。因此，可以用下式来描述其变化[23]。

$$N=(N_m-N_b)\exp(-k_nL_c/L_t)+N_b \quad (17)$$

式中 N 是叶片氮素含量，N_m 是最大可能氮素含量，N_b 是最低氮素含量，L_c 是从冠层顶部向下到所涉及层的累积叶面积指数，L_t 是冠层总叶面积指数，k_n 是叶片氮素含量在冠层中的衰减系数，这里取0.713[21]。在原式中，氮素含量使用的单位是 mmol/m^2，这里使用%来表示氮素含量，并取 N_b=0.5%，N_m=1.5%[12]。

据 Collatz 等[17]，

$$r_d=0.015V_m \quad (18)$$

方程(23)中电子传输速率 J 定义为[12]

$$J=J_M\frac{P_f}{P_f+2.1J_M} \quad (19)$$

式中 P_f 是叶片吸收的光合作用光子通量密度；J_M 是叶片细胞内光合作用碳还原循环中电子输送的光饱和率，和 Rubisco 活性有关

$$J_M=29.1+1.64V_m \quad (20)$$

气孔的 CO_2 导度 g_c（μmol/(m^2 · s · Pa)）表示为[15]

$$g_c\approx\frac{10^6g_s}{R_a(T+273)} \quad (21)$$

式中 g_s 是气孔导度(mm/s)。

因此，净 CO_2 同化率可以从下式得到

$$A=\min(A_c,A_j)-r_d \quad (22)$$

计算出 g_c 后，运用式(6)～(9)就可以计算出 g_v 和 g_h。由于各层 T 和 D_v 与冠层内长波辐射吸收和发射有关，每计算一次各层 T 和 D_v 后再利用式(1)得到梯度扩散输送后的结果即为所求的最后各层 T 和 D_v。

3.3 阳叶和阴叶面积指数

本文使用 Chen 等[12]提出的方法计算阳叶面积指数，其中包含了植物丛聚指数对冠层辐射状况的影响

$$L_{c,s}=\Theta\cos\theta\left(1-e^{-\frac{0.5\Omega L_c}{\cos\theta}}\right) \quad (23)$$

式中 θ 为太阳天顶角，Ω 是植物丛聚指数，Θ 是最大阳叶叶面积，取 2.0。$L_{c,s}$ 是从冠层顶部向下到所考虑层累积阳叶面积指数，因此，累积阴叶面积指数为

$$L_{c,h}=L_c-L_{c,s} \quad (24)$$

对某一层而言，阳叶面积指数 L_s 应是该层和上一层之间累积阳叶面积指数之差，设 L 是某层叶面积指数，则相应的阴叶面积指数为

$$L_h=L-L_s \quad (25)$$

本文分别就阳叶和阴叶对各层进行了气孔导度以及光合作用的计算，一层中总的光合作用就等于以阳叶和阴叶面积指数为权重系数加权求和：

$$A=A_sL_s+A_hL_h \quad (26)$$

式中 A_s 和 A_h 分别是阳叶和阴叶光合作用强度。A_s 和 A_h 之间的差异主要来自于气孔导度 g_c 的差异，因而是阳叶和阴叶之间吸收辐射的差异，需要分两种情况分别计算 g_c。

3.4 气孔导度

方程(21)中气孔导度 g_s 定量描述植物通过气孔行为对所处环境的反应，这些环境因子通常包括光合作用光通量（P_f），温度（T）和水汽压差（D_v）[24,25,12]，即

$$g_s=\max(g_Mf(P_f)f(T)f(D_v),g_m) \quad (27)$$

式中 g_M 和 g_m 分别是最大和最小气孔导度，环境函数是 0～1 的标量，f. 的形式参考文献[12]。

3.5 冠层内的辐射传输

3.5.1 冠层内太阳直接辐射和光合有效辐射

到达植物冠层上方的太阳总辐射包括直接辐射和散射辐射两部分，运用对北方环境进行修正和验证的经验公式[26,27]，散射辐射用下式计算

$$\frac{S_d}{S_g}=\begin{cases}0.943+0.734R-4.9R^2+\\1.796R^3+2.058R^4 & R<0.8\\0.13 & R\geqslant0.8\end{cases} \quad (28)$$

式中 S_g 是到达冠层上方的太阳总辐射，单位 W/m^2，R 是比值，等于 $S_g/S_o\cos\theta$，S_o 是太阳常数，θ 是太阳天顶角，S_b 是冠层上方直接辐射部分，因此是散射辐射的剩余部分。阳叶吸收的辐射根据下式计算[28]

$$S_s=\frac{\cos\alpha}{\cos\theta}S_b+S_h \quad (29)$$

式中 S_s 为阳叶吸收的辐射，α 是平均叶倾角，S_h 是平均阴叶吸收的辐射，对球形叶倾角分布的北方冠层，据研究[10]，取 α=60°可以很好地近似描述太阳天顶角 θ 从 30°到 60°的情况。S_d 是与 $\cos\theta$ 成比例变化，因此 S_s 在一天内变化很小。这里将该方程用于所有太阳高度角的情况来计算 S_{sl}，而在考虑植物

丛聚影响的基础上,计算 S_h[12]

$$S_h = \frac{S_d - S_{d,u}}{L_c} + C \tag{30}$$

式中 $S_{d,u}$是植物冠层下方的散射辐射,C 来源于直接辐射的多次散射[28]:

$$C = 0.07\Omega S_b(1.1 - 0.1L_c)e^{-\cos\theta} \tag{31}$$

式中丛聚指数 Ω,对北方森林松类取 0.5[10]。

到达林地的散射辐射使用下式计算

$$S_{d,u} = S_d e^{-\frac{0.5\Omega L_c}{\cos\bar{\theta}}} \tag{32}$$

式中 $\bar{\theta}$ 是散射辐射传输的典型天顶角,随叶面积指数有微小变化

$$\cos\bar{\theta} = 0.537 + 0.025L_c \tag{33}$$

对多层冠层,各层阳叶和阴叶吸收的辐射可以这样计算:从冠层顶部向第 i 层和 $i+1$ 层累积的叶面积指数分别是 $L_{c,i}$和 $L_{c,i+1}$,将方程(30)～(33)中的 L_c 分别用 $L_{c,i}$和 $L_{c,i+1}$代入,从而计算各自的 S_s,在第 i 层阳叶吸收的辐射就是第 i 层和第 $i+1$ 层 S_s 的差值,而相应阴叶吸收的辐射就是两层 S_h 的差值。

到达土壤的短波辐射就是 $\rho_s(1-\rho)S_g$ 与冠层吸收的总辐射的差值,其中 ρ_s 是土壤反射率,由 ESES 模式输出[29],ρ 为森林冠层的反射率,可以用下式计算[30]

$$\rho = \left(\frac{1-(1-\sigma)^{1/2}}{1+(1-\sigma)^{1/2}}\right)\left(\frac{2}{1+1.6\sin\beta}\right) \tag{34}$$

式中 σ 是叶片对可见光的散射系数,其大小为 0.2,β 为太阳高度角。

3.5.2　冠层内长波辐射的传输

模拟植物冠层内的长波辐射传输要比模拟太阳辐射传输复杂,因为冠层要素和土壤都是重要的辐射源,其辐射强弱依赖于冠层要素(即叶片)温度和土壤温度,因此正确模拟叶温和土壤温度是较好模拟冠层内长波辐射传输的必要条件。为了简化计算,这里考虑叶片和土壤都是强辐射体,因此可以假设为黑体,运用植物冠层内长波辐射传输方程可以求解长波辐射场[31,32]。为使迭代计算更加快捷,这里使用 LRTM(长波辐射传输矩阵)技术[32]。

假设冠层内叶层总数为 m,则叶层 i 所吸收的净长波辐射为 L_i,则 L_i 可表示成下式

$$L_i = \lambda_{i,m+1}L_{0,\downarrow} + \sum_{j=1}^{m}\sigma T_{ij}^4\lambda_{ij} + \lambda_{i0}\sigma T_{s0}^4$$
$$i = 0,1\cdots m+1 \tag{35}$$

这里将天空和土壤看成两个特殊的冠层,式中 $L_{0,\downarrow}$ 为从冠层上方向下的天空长波辐射,T_{s0}为土壤表面温度,系数 λ_{ij} 取决于该层叶倾角分布和叶面积指数,可以根据长波辐射传输方程计算。这样就构成了一个维数为$(m+2)\times(m+2)$的矩阵,运用冠层长波积分函数,可以比较容易计算得到该矩阵[32]。由于矩阵要素值只受冠层几何结构影响,而独立于叶温,因此可以对给定的冠层一次性计算即可,这样可以节省大量计算时间。这种方法的另一优点在于在计算植物冠层内长波辐射传输时不需要假设叶温和气温相同[33,34]。

冠层上方来自天空的长波辐射强弱主要来自于大气和天空状况,这里使用下式计算[35]

$$L_{0,\downarrow} = \sigma T_a^4\left[1 - \left(1 - \frac{L_{c,\downarrow}}{\sigma T_a^4}\right)C_e\right] \tag{36}$$

式中 T_a 为参考高度的气温,σ 是史蒂芬-波尔兹曼常数,$L_{c,\downarrow}$ 是晴空条件下冠层上方向下的长波辐射,C_e 是经验系数,$L_{c,\downarrow}$ 可表示成[36]

$$L_{c,\downarrow} = (0.614 + 0.0557\sqrt{e_a})\sigma T_a^4 \tag{37}$$

式中 e_a 是参考高度的空气水汽压。

3.5.3　冠层能量平衡

冠层内各层的能量平衡包括净辐射、水汽交换和感热交换,不同受光状态的叶片分别处理,然后按阳叶和阴叶加权求和。对于土壤来说,其能量平衡包括净辐射、感热交换、土壤蒸发、热通量,这里使用 ESES 模式计算后两者[29],土壤感热交换用下式计算

$$H_0 = \rho_a c_p(T_{s0} - T_{al})g_{bh0} \tag{38}$$

式中 T_{al}为贴近土壤空气层气温,g_{bh0}是土壤表面到贴近气层的热传导率,计算方法参见文献[37]。

3.6　呼吸作用

3.6.1　植物自养呼吸

植物的自养呼吸通常由维持性呼吸和生长性呼吸组成,即

$$R_a = R_m + R_g \tag{39}$$

式中 R_a 为自养呼吸,R_m 为维持性呼吸,R_g 为生长性呼吸。

由于植物各个器官的呼吸强度有所差别,因此往往分开考虑,即

$$R_a = \sum_i(R_{m,i} + R_{g,i}) \quad i = 1,2,3 \tag{40}$$

式中 $i=1$ 代表叶片,$i=2$ 代表茎,$i=3$ 代表根。

维持性呼吸一般作为温度的函数[12]

$$R_{m,i} = M_i r_{m,i} Q_{10}^{(T-T_b)/10} Q_{10} \tag{41}$$

式中 M_i 是植物器官 i 的生物量，$r_{m,i}$ 是器官 i 的维持性呼吸系数或基温时的呼吸速率，Q_{10} 是温度敏感因子，T_b 是基温。

生长性呼吸一般认为与温度无关，与 G_p（gross primary production）成正比，即

$$R_{g,i} = r_{g,i} r_{a,i} G_p \tag{42}$$

式中 $r_{g,i}$ 是器官 i 的生长性呼吸系数，$r_{a,i}$ 是器官 i 的碳分配比例，$G_p = A - r_d$。

3.6.2 土壤呼吸

土壤呼吸主要受土壤温度和湿度影响，在土壤湿度比较适宜的情况下，土壤呼吸只受温度的影响，可以假设林下土壤水分基本不成为土壤呼吸的限制因子，因此这里使用下列函数关系）估算[38]

$$R_{soil} = R_{10} e^{308.56(1/56.02-1)/(T_{s0}-227.13)} \tag{43}$$

式中 $R_{10} = 3.26\ \mu mol/(m^2 \cdot s)$。

综合考虑冠层内的辐射、水、热、CO_2 输送过程以及土壤中水文循环过程，建立了黑云杉林多层模拟模式，该模式包括：(1)冠层内的空气扩散；(2)冠层内的辐射传输；(3)叶片和地表的能量平衡；(4)叶-气、土-气之间显热、水汽和 CO_2 交换；(5)土壤水文循环（ESES[29]）。

模式的具体计算步骤如下：

(1)计算叶面积指数垂直分布；(2)输入日、时间、气象（温、湿、风、净辐射）、土壤（凋萎适度、田间持水、土壤温湿度）、植物资料（株高、叶面积指数分布）；(3)输入或计算边界条件和初始条件；(4)计算空气稳定度、空气扩散系数分布；(5)太阳高度、直接辐射、散射辐射；(6)阴叶、阳叶面积；(7)计算LRTM矩阵；(8)冠层太阳辐射分布；(9)初步估计叶片气孔导度；(10)冠层长波辐射分布廓线；(11)冠层能量平衡；(12)光合作用、呼吸作用、气孔导度；(13)土壤能量平衡、土壤（根）呼吸；(14)冠层内和林下温、湿、CO_2 分布廓线；(15)(11)～(15)迭代计算，直到接近某一限定；(16)潜热、感热、CO_2 净通量；(17)细胞间隙 CO_2 浓度；(18)结束或重复(2)～(17)。

模拟计算中有关参数的符号及取值参见文献[12]。

4 模式验证

这里主要将模式输出结果与实测值进行比较，包括净 CO_2 通量、潜热、感热通量和土壤热通量；冠层内 CO_2 浓度垂直分布和动态变化；冠层 CO_2 导度、光合作用和蒸腾作用。

4.1 通量模拟结果

(1) 感热通量：比较1994年生长期内(5～9月)黑云杉林上方观测到的感热通量与本文多层二叶模式拟合的结果(图1)可知，模式模拟的值稍稍偏高，8月份之前，模拟值较好，但在9月份，模拟值偏高较明显。尽管如此，从总体来说，模拟值与实测值之间相关性仍然很好，R^2 达到了0.71，通过0.001显著度检验。因此，模式在计算林冠.感热通量方面是比较可信的。

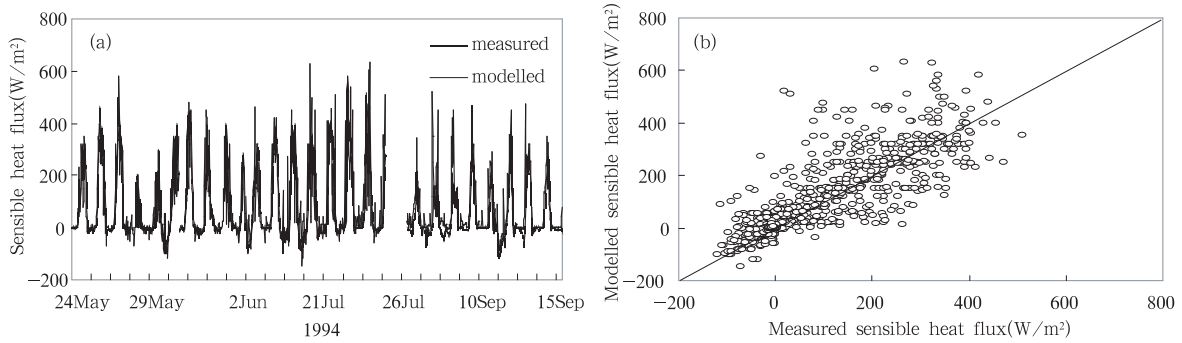


图1 黑云杉林上方生长季内感热通量模拟与实测值的时间演变(a)和分布(b)(SSA-OBS)

Fig. 1 Time series (a) and distribution (b) of modeled and measured sensible heat fluxes over the canopy (SSA-OBS)

(2)潜热通量：图2所示是潜热通量模拟与实测曲线以及模拟值与实测值的相互关系。可以看出，对于潜热通量的模拟效果要好于感热通量的模拟效果，但是与感热通量计算值偏高的情况相反，潜热通量在某些时候被低估了。正如前述，这种低估的可能性只有两个：一是计算的气孔导度偏低，即气孔阻力偏大，二是计算的冠层水汽压偏高，气孔与空气的水汽压差减小。由于没有实际叶片温度的观测值，

所以这里暂时还不能做进一步的阐明。尽管如此,本文提出的多层二叶模式在描述潜热通量的日变化方面非常客观,R^2 为 0.78,通过 0.001 显著度检验。模拟结果比较可信,与实测值的比较证明该模式可以作进一步的应用研究。

(3)土壤热通量:土壤热通量模拟曲线很好地反

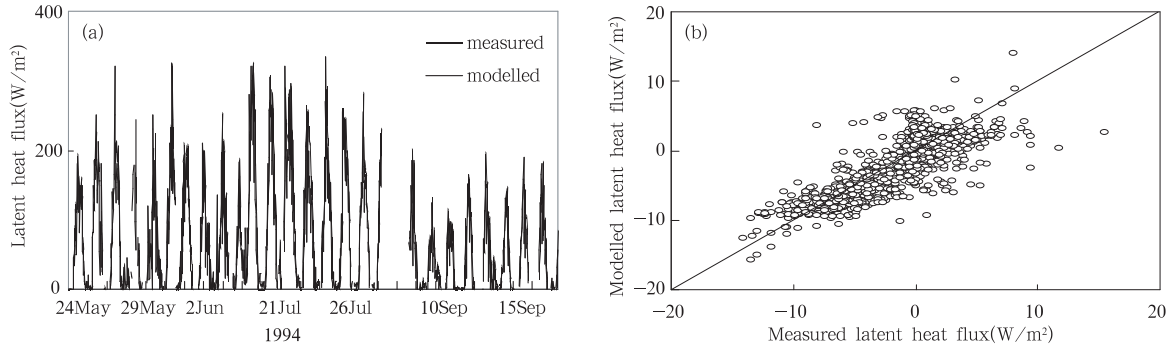


图 2　黑云杉林上方生长季内潜热通量模拟与实测值的时间演变(a)和分布(b)(SSA-OBS)

Fig. 2　Time series (a) and distribution (b) of modeled and measured latent heat fluxes over the canopy (SSA-OBS)

映了实测结果(图略),但是模拟曲线的日振幅明显比测定值的日振幅要大些,由于测定土壤热通量的热流板被埋入地下 7 cm 深处,而计算值是土壤最表面层的通量,因此在 7 cm 厚的土层本身就会具有一定的热惯性,从而使测定值的波动减小。

(4) CO_2 通量:冠层 CO_2 通量的计算涉及到许多因素,包括叶片光合作用、树身及土壤呼吸作用等生理过程,还包括冠层内外的物理过程。这些过程既相互独立又相互联系,因此综合这些复杂的生理物理过程是模式的重要内核[34]。

从图 3 可以看出:(1)各月模拟时段内实测值与计算值的日变化规律非常明显,两者达到很好的一致性,计算和实测的日最高与日最低值出现时间同步;(2)计算值与实测值比较接近,基本反映了实际森林冠层上方 CO_2 通量的变化和大小;(3)模式存在的误差也比较明显,特别是在白天光合作用增强的时候,有些时候计算的 CO_2 通量偏高,其原因一方面可能是低估了冠层内的 CO_2 蓄积,因为随着光合作用增强,植物同化周围空气中的 CO_2,所以冠层内外形成 CO_2 浓度梯度,上方空气中的 CO_2 向下传输。但是当光合作用增强的时候往往也伴随呼吸作用增强,如果从土壤中呼吸出的 CO_2 堆积在冠层底部,则植物将从外界吸收更多的 CO_2,因此负的通量增大,但是假如土壤释放的 CO_2 及时扩散到冠层叶片集聚的地方,这时候冠层内外的 CO_2 浓度差将不会太大,所计算的向下 CO_2 通量较小。总体 R^2 为 0.65,并通过 0.005 显著度检验。

4.2　冠层空气 CO_2 浓度

图 4 是生长季内 SSA-OBS 不同时间冠层内模拟的 CO_2 浓度和实测值对比,从图中看出 CO_2 浓度

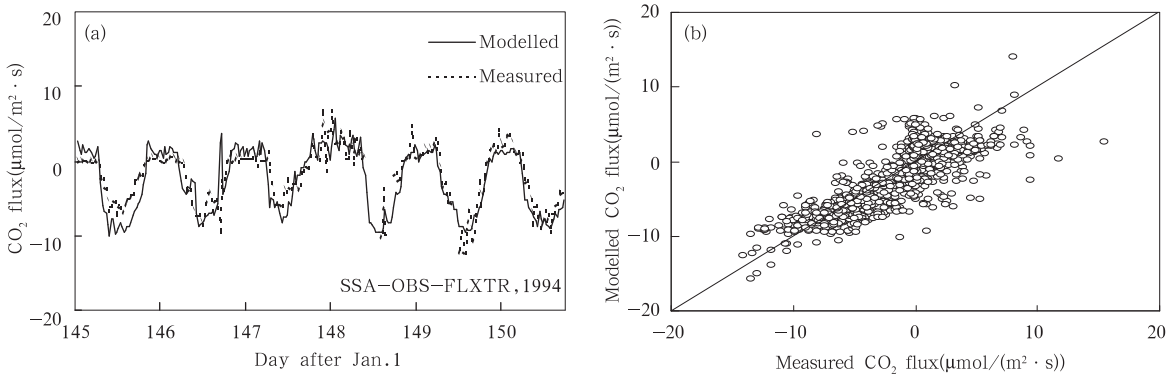


图 3　生长季内黑云杉林冠层上方 CO_2 通量的模拟值与实测值的时间演变(a)和分布(b)

Fig. 3　Time series (a) and distribution (b) of modeled and measured CO_2 fluxes over the canopy (SSA-OBS)

的模拟值从时间和空间上较好地描述了北方森林冠层内碳循环的变化规律。(1)任一高度的 CO_2 浓度都有一定的时间变化,往往表现为夜间到凌晨 CO_2 浓度都在较高水平,而白天则浓度较低,这是因为夜间森林碳平衡中只有呼吸作用,因而是 CO_2 的源,而白天由于光合作用和呼吸作用的共同存在,且呼吸作用往往低于光合作用,使得森林成为 CO_2 的汇。(2)冠层内存在着明显的 CO_2 浓度梯度,越往下层,CO_2 浓度越高,因为接近林地时,土壤和根系的呼吸作用释放大量 CO_2,使得在一天的大多时间里林内下层 CO_2 浓度都维持在较高水平。而在上层,由于空气交换和湍流扩散作用,CO_2 浓度基本接近林冠上方空气中浓度值。林冠内的 CO_2 浓度梯度的大小随时间显著变化,白天(如 10:00),由于湍流加强,近地层混合一直影响到林冠内部,使得林内 CO_2 浓度的分布非常均匀,浓度廓线几近一条与地面的垂线。但是在夜间,随着湍流混合的逐渐减弱,CO_2 浓度梯度逐渐增大,在 0:00 浓度梯度达到最大,此后由于冠层内空气气温进一步降低,植物的呼吸作用有所减弱,浓度梯度不再进一步发展,到 06:00 还会适当减小。(3)与实测值相比较,CO_2 浓度模拟的效果在不同高度和不同时间也不相同,如在白天,模拟曲线与实测值很好地吻合,而在夜间,模拟曲线与实际情况偶尔差异显著,特别是对 7 月 21 日的模拟,显然没有将急剧的浓度垂直变化模拟出来,主要是因为在林地有大量的苔藓类植物,这类植物白天可以吸收散射光进行光合作用,而夜间则只有呼吸释放 CO_2,加上从土壤中释放的根和微生物呼吸出的 CO_2,使得贴近地面的林下空气中的 CO_2 浓度保持较高水平。(4)从模式对冠层内 CO_2 浓度的计算结果看,基本上反映了森林冠层内的浓度分布情况,不管是在时间上还是在空间上对模拟结果都可以得到比较合理的生物物理学解释,说明本模式的机理性较强,揭示了森林生态系统内碳循环的作用过程,具有比较广泛的应用价值。

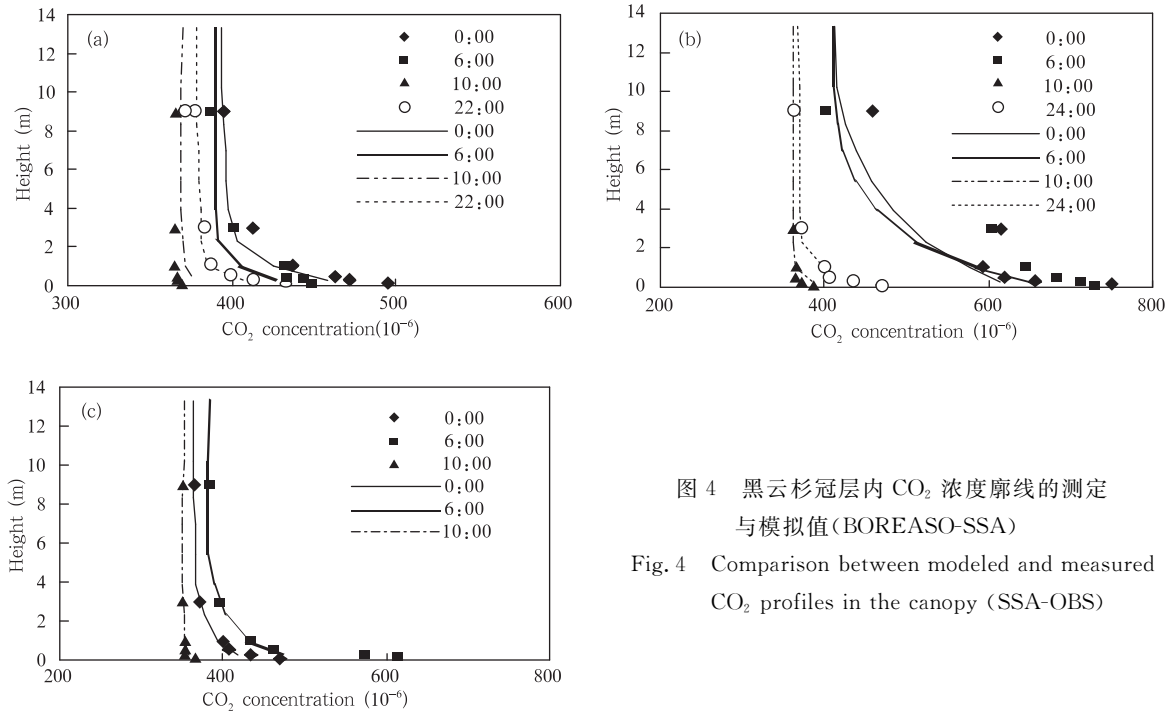


图 4 黑云杉冠层内 CO_2 浓度廓线的测定与模拟值(BOREASO-SSA)

Fig. 4 Comparison between modeled and measured CO_2 profiles in the canopy (SSA-OBS)

4.3 生理作用过程

由于影响森林生态系统内碳平衡的主要植物生理过程是光合作用和呼吸作用,这里我们使用在BOREAS南部研究区(SSA)古黑云杉林内的测定资料与模式计算结果进行比较,来探讨多层二叶模式在描述这类生理过程方面的效果。

图 5 所示的是 1994 年 7 月 24 日气孔导度和光合作用实测值与模拟结果比较,从图中看出,气孔导度的模拟值与测定值之间的相关系数平方(R^2)达到 0.57,光合作用为0.69,蒸腾作用为0.66,样本数

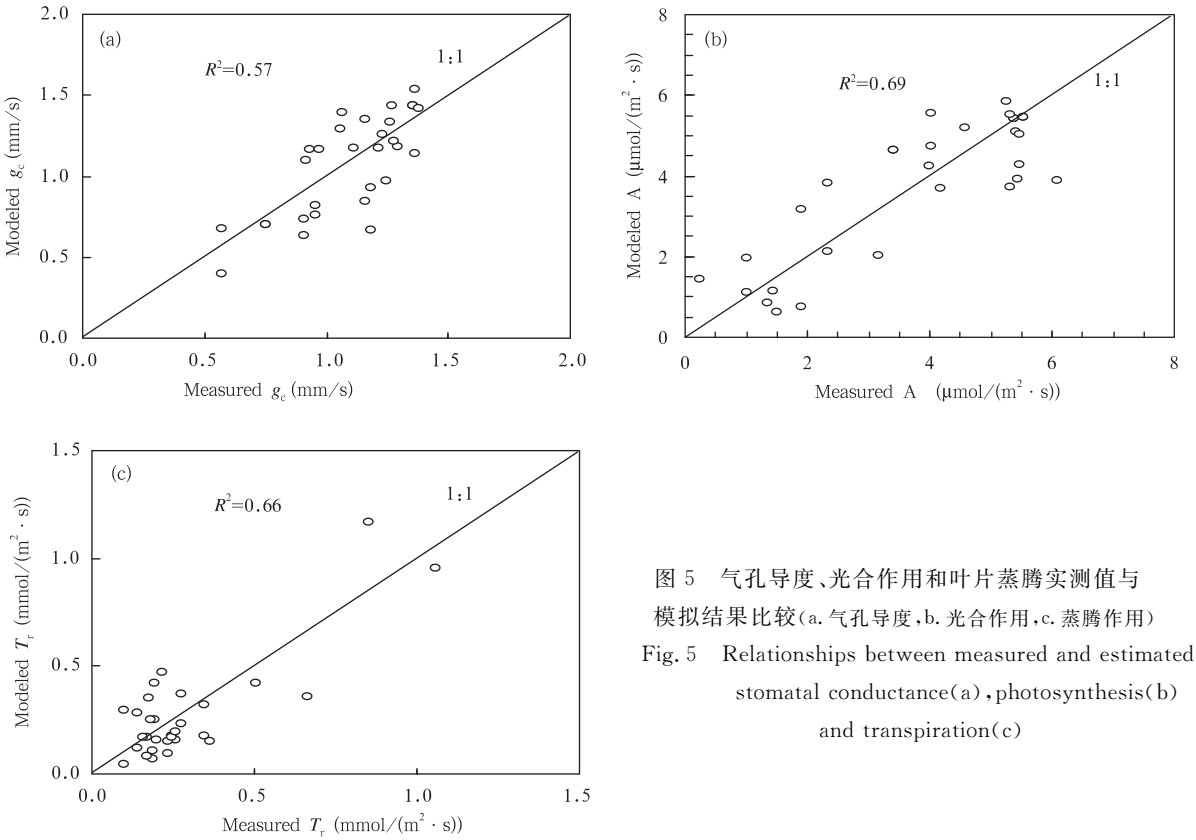


图 5　气孔导度、光合作用和叶片蒸腾实测值与模拟结果比较(a. 气孔导度,b. 光合作用,c. 蒸腾作用)

Fig. 5　Relationships between measured and estimated stomatal conductance(a), photosynthesis(b) and transpiration(c)

为 28,三者均通过0.01显著度检验。蒸腾的散布点相对集中在 0.5 (mmol/(m^2 · s))以内,超过此值以上的数据点只有 3 个,因此,其模拟效果的可信性相对来说稍差一些。不过从图可以看出三者基本上没有显著的系统偏差。

5　结论与讨论

本文研制的黑云杉林植被与大气之间物质输送和能量交换模式具有较强的机理性,充分考虑了阴叶和阳叶对环境的反应差异,同时考虑黑云杉树叶丛聚的特性,通过对各通量及冠层内空气 CO_2 浓度、叶片气孔导度、光合作用和蒸腾作用的模拟值与实测值比较,取得了较好的效果。可以认为该模式可进一步用于研究森林冠层内的物质输送特性。当然在模式中由于没有考虑到林地苔藓类的光合、呼吸作用,因此会造成冠层下方 CO_2 浓度估计值在夜间偏低的情况,同时,苔藓类植物也会影响到地表蒸发从而影响冠层热量平衡方程中的各个分量估算。因此,如何正确处理好这部分与大气的交换对更好地研究整个冠层与大气的交换有着重要的意义,这有待今后进一步更详细的工作。

参考文献

[1] Sellers P J, Randall D A, et al. A revised land surface parameterization (SiB_2) for atmospheric GCMs. Part I: model formulation. J Climate, 1996, 9: 676－705

[2] Baldocchi D D. A lagrangian random-walk model for simulating water vapor, CO_2 and sensible heat flux densities and scalar profiles over and within a soybean canopy. Bound-Layer Meteo, 1992, 61: 113－144

[3] Gu L, et al. Micrometeorology, biophysical exchanges and NEE decomoposition in a two-story boreal forest-development and test of an integrated model. Agricultural and Forest Meteorol, 1999, 94: 123－148

[4] 吴红颜,申双和,徐为根. 棉田 SPAS 水热传输的多层模式. 南京气象学院学报,2001,24(1):137～142
Wu Hongyan, Shen Shuanghe, Xu Weigen. A multilayer model for moisture and the1rmal transfer from cotton canopy. J Nanjing Inst Meteoro (in Chinese) 2001,24(1):137－142

[5] 谢正桐,李家春,姚德良. 考虑植被影响的陆气耦合模式. 力学学报,1998 ,30(3):267～276
Xie Zhengtong, Li Jiachun. A land-air coupled model with vegetation impact. J Mechanics (in Chinese), 1998, 30(3): 267－276

[6] 季劲钧,胡玉春.一个植物冠层物理传输和生理生长过程的多层模式.气候与 环境研究,1999,4(2):152～164
Ji Jinjun, Hu Yuchun. A multilayer model for physical transfer and physiological growth of plant canopy. Climatic and Environmental Res (in Chinese) 1999,4(2):152－164

[7] Norman J M. Scaling processes between leaf and canopy levelso. In: Ehleringer J R, Field C B. Eds. Scaling Physiological Processes: Leaf to Global. Londone: Academic Press, 1993. 356 pp

[8] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I: Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteoro,1986, 38: 225－237

[9] 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 Meteorol, 1998, 91: 89－111

[10] Chen J M. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosy nthetically active radiation in boreal conifer stands. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1996, 34: 1353－1368

[11] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. Planta, 1980, 149:78－90

[12] Chen J M, Liu J, Cihlar J,et al. Daily canopy photosynthesis model tahrough temporal and spatial scaling for remote sensing applicatiaons. Ecological Modelling,1999,124: 99－119

[13] Monteith J L, Unsworth M. Principles of Environmental Physics. LondAon: Edward Arnol, 1980. 241pp

[14] Piters-Lidard C D, Zion M S, Wood E F. A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes. J Geophys Res, 1997, D4:4303－4324

[15] Leuning R. Modelling stomatal behaviour and photosynthesis of Eucalyptzus Grandis. Aust J Plant Physiol, 1990, 17: 159－175

[16] Sellars P J, Mintz Y, Sud Y C,et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J Atmos Sci, 1986, 43: 305－331

[17] Collatz G J, Ball J T, Crivet C,et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. Agricultural Forest Meteoro, 1991,54: 107－136

[18] Sellers P J, Berry J A, Collatz G J,et al. Canopy reflectance, photosynt hesis and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. Remote Sensing of Environment, 1992, 42: 187－216

[19] Bonan G B. Land-atmosphere CO_2 exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. J Geophys Res, 1995,100: 2817－2831

[20] Hirose T, Werger M J A. Maximising daily canopy photosynthesis with res:pect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy. Oecologia, 1987, 72: 520－526

[21] de Pury D G G, Farquhar G D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. Plant Cell Envir, 1997t,20: 537－557

[22] Anten N P R, Schieving F, Werger M J A. Patterns of light and nitrogenddistribution in relation to canopy carbon gain in C3 and C4 mono-and dicotyledonous species. Oecologia, 1995, 101:504－513

[23] Waullschleger S D. Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 apla, nts-a retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. J Exp Botanyn, 1993, 44:907－920

[24] Jarvis P G, Morison J I L. Stomatal control of transpiration and photoksynthesis. In: Jarvis P G, Mansfield T A III ,Ed. Stomatal physiology. New York: Ceambridge University Press, 1981. 247－279

[25] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processesmfor regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary Aproduction processes. Ecol Model, 1998, 42: 125－154

[26] Erbs D G, Klein S A, Duffie J A. Estimaiton of diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar Energy, 1982, 28: 293－304

[27] Black T A, Chen J M , Lee X, et al. Characteristics of shortwave and longwave irradiatnces under a Douglas-fir forest stand. Can J Forest Res, 1991, 12: 1020－1028

[28] Norman J M. Simulation of microclimates. In: Hatfield J L, Thormason I J,Ed. Biometeorology in Integrated Pest Management. New York: Academic Press, 1982. 65－99

[29] Chen B, Chen J M. A model for interpreting high-tower CO_2 concentratinon records for the surface carbon balance information, A supplement to Eos, Transactiogns. American Geophysical Union, 2002, 83: 112

[30] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global raldiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II: Calculation of canopy photosynthesis. Agricultural and Forest Meteoro,1986, 38: 231－242

[31] Ross J. The radiation regime and architecture of plant stands. The Hagu e: Dr. W. Junk Publishers, 1981. 391pp

[32] Gu L,Shugart H H, Fuentes J D, et al. Micrometeorology, biophysical excthanges and NEE decomposition in a two-story boreal forest-development and test of an integrated model. Agricultural and Forest Meteoro, 1999, 94: 123－148

[33] Jones H G. Plant Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental pPlant Physiology. 2nd ed. New York:Cambridge University Press, 1992. 428pp

[34] Baldocchi D D, Harley P C. Scaling carbon dioxide and water vapor exchan. ge from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. Plant Cell and Environ, 1995, 18: 115－173

[35] Kondu J, Xu J. A proper method for estimating sensible heat flux above anhorizontal-homogeneous vegetation canopy using

radiometric surface observations. J Appl Meteoro, 1997, 36: 1696－1711

[36] 左大康,周允华,项月琴等. 地球表层辐射研究. 北京:科学出版社,1991. 469pp
Zuo Dakang, Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, et al. Studies on Radiation i n the Epigeospher. Beijing: Science Press, 1991. 469 pp.

[37] Monteith J L, Unsworth M. Principles of Environmental Physics. rLondon: Edward Arnol, 1990. 291pp

[38] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 1994, 8: 315－323

MODELLING OF AIR CO_2 CONCENTRATION AND FLUX IN/ABOVE A BOREAL BLACK SPRUCE STAND

Shen Shuanghe　Sun Zhaobo

(*Nanjing University of Information Sci Tech*, *Nanjing* 210044)

Chen Jingming

(*University of Toronto*, *Toronto*, *Canada M5S 3G3*)

Abstract

A complete multilayer model of vegetation-atmosphere exchange has been developed for a boreal black spruce stand, taking into account response of sunlit and shaded leaves to ambient conditions respectively, leaf clumping and nitrogen level in the leaves at different layers. The established model consists of one dimensional air diffuse meteorological equation for transfer of water, heat, CO_2 within and above the forest canopy, a two-leaf submodel for leaf-air exchange, and an exponential function for distribution of nitrogen level in leaves with height of canopy. Estimation of sunlit and shaded leaf area index was borrowed from Chen′s method, modified for layer-by-layer by the authors of this paper. Photosynthesis at leaf level was computed by combining Farquhar′s equations and CO_2 conductance equation. Soil temperature, moisture, and thermal and water fluxes between adjacent soil layers, obtained from ESES, were used for calculating exchanges of radiation, latent and sensible heat between soil surface and its immediately overlying canopy air. Data for model validation came from a southern study area (53°59′N, 105°07′W) of BOREAS (Boreal Ecosystem-Atmosphere Study) located in Saskatchewan, Canada and beloging to temperate climatic zone. The involved data, just covering main growing season in 1994, were sensible heat flux, latent heat flux, CO_2 flux which were all measured by eddy correlation method, and soil heat flux measured by thermal flow plate, CO_2 concentration profile by LI 6262 IRGA, net radiation and other regular meteorological elements such as air temperature, humidity, wind speed, and air pressure. Measurements of leaf photosynthesis, transpiration and stomata conductivity to CO_2 were made by LI6200 portable photosynthesis system. The validation for physiological progresses of the leaf stomata conductance, photosynthesis and transpiration shows that there were good agreements and no marked systematic discrepancies between the measurements and the estimates. The flux modeling indicates that sensible heat fluxes were slightly overestimated in comparison with observed ones, and between them a squared correlation coefficient (R^2) amounted to 0.71 but the difference fluctuated from time to time. In contrast to the sensible heat flux, estimates of latent thermal flux were a little lower than observed ones and R^2 reached 0.78. CO_2 flux simulation had the lowest R^2 of 0.65 and slightly underestimated when it goes over 7 μmol/(m^2 · s). CO_2 concentration was of the biggest R^2 of 0.90 although there were larger errors in the canopy air close to the forest floor, rising from omitting moss respiration. Analysis of these flux simulations leads to conclude that the complete multilayer model of vegetation-atmosphereresented achieves good results and is helpful to better investigation into vegetation-atmosphere exchange process because of its well dealing with the leaf radiance absorption, nitrogen level and clumping.

Key words: CO_2 flux, Complete multiplayer model, Two-leaf submodel, Leaf clumping, Black spruce.