

地表面物理过程与生物地球化学过程 耦合反馈机理的模拟研究*

季劲钧 余 莉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 利用大气—植被相互作用模式 (AVIM) 研究地表面物理过程与生物地球化学过程耦合的机理和实现方法, 其基础是植物与非生物环境之间物质和能量交换等物理过程影响植物的生理生长过程, 使得植被宏观形态和相应的地表的动力学参数上发生显著变化, 又反过来作用于植被与大气、土壤之间的物理交换过程。这种气候与生物圈双向反馈过程是在季节和年际时间尺度上的主要相互作用机理。应用 AVIM 于内蒙古半干旱草原, 模拟了在大气状况强迫下, 草原生态系统初级生产力, 植被与大气之间 CO_2 、潜热和感热的交换, 揭示了地表物理和生物学过程耦合反馈机理。

关键词 大气生物圈相互作用 陆面过程模式 生物地球化学过程 草地生态系统

1 引言

地球系统中各层圈之间通过物理、化学和生物学过程相互联系在一起。陆地表面就是大气、土壤和生物圈之间这些相互作用过程活跃的界面。气候变化小组^[1]在总结和评价了近年来气候和环境研究的最近进展之后指出, 在预测未来气候的若干问题中最主要的不确定性之一是缺乏对系统中生物地球化学循环过程的了解。例如温室气体等在地球系统中的循环和变化过程, 人类活动引起的对温室气体循环和变化的干扰等。因此研究环境变化和趋势预测中, 在研究物理气候系统的同时应研究与生物地球化学过程的耦合, 给予这些过程和耦合方式以定量的描述。而首先要进行的是 CO_2 在大气、土壤和生物圈之间的交换过程的模式化研究。

关于大气、植被、土壤之间的物质和能量交换过程, 文献[2]中提出了一个大气与植被相互作用模式 (AVIM), 模式中既包含植被、土壤、大气之间的热量和水分交换的生物物理过程, 又包含了植物光合、呼吸等 CO_2 交换的植物生理过程, 相互作用构成一个系统。随后 Sellers 等^[3]和 Bonan^[4]相继提出包括植物生理过程的 SiB2 和 LSM 模式, 也都包含了植被与大气之间的热量水分和 CO_2 的交换。与前者相比主要的差别在于后两个模式植被特征参数 (如叶面积指数) 的年变化是给定的, 或由遥感信息导出, 不受气候变化的影响。而 AVIM 中植被的变化由植物生长模式决定, 因而随气候变化而改变, 实现了大气与植被的相互作用过程。

1997-12-19 收到, 1998-02-15 收到修改稿

* 本研究工作得到国家攀登项目“我国未来 (20~50 年) 生存环境变化趋势的预测研究”和国家自然科学基金项目 49575264 的支持

由于半干旱草原对气候的变化十分敏感, 比较容易观测到气候与生态系统的年际变化, 现利用我国内蒙古半干旱草原的气候和生物实测资料, 通过 AVIM 对大气、植被和土壤之间生物物理过程和生物化学过程的耦合反馈机理作一探讨。

2 AVIM 模式结构

本文以 AVIM 模式[1]为基础, 针对草原生态系统的特点作了一些调整和改进。下面就 AVIM 作一简介。

AVIM 的结构是基于如下机理: 陆地表面植被与其非生物环境(即大气和土壤)之间瞬时的物质(水分、 CO_2 等)和能量(辐射、感热和潜热等)交换等物理过程影响植物的生理生长过程。从而

发生植被宏观形态上的显著变化(如植株高度、叶面积指数等), 改变了地表的动力学参数, 又反过来影响植被与大气和土壤之间的各种瞬时的物理交换过程。AVIM 的结构如图 1, 包含了大气、植被冠层和土壤表层三个部分。

图 1 的左侧是系统的物理过程, 构成了陆面过程模式(LPM), 其详细结构和过程参数化见文献[5]。现简述如下:

植被冠层被假定为水平均一的, 覆盖度为 σ_f 。土壤分为三层, 上两层对应温度日变化和季节变化的影响深度, 下层保持气候平均值。

冠层温度 T_f 和液态水

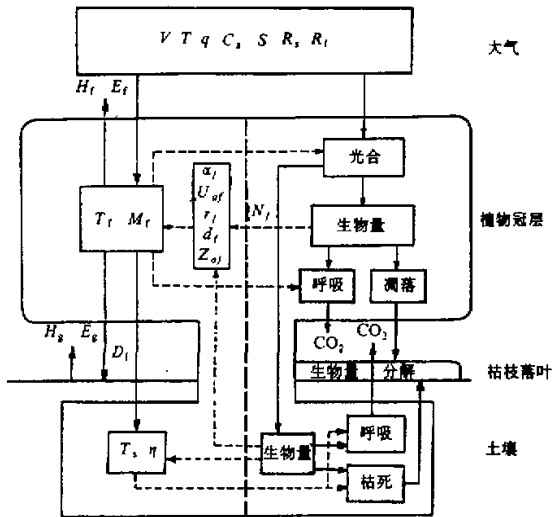


图1 大气植被相互作用模式 (AVIM) 结构框图

由上至下是大气、植物冠层和土壤表层。左侧是层间辐射、热量和水的传输过程; 右侧是植物生理过程。实线表示物质和能量的传递, 虚线表示相互作用。 V 、 T 、 q 和 C_s 是观测高度上大气的风速、温度、比湿和 CO_2 浓度, P 、 S 和 R_l 是到达地表的降水温度、短波和长波辐射; T_f 和 η 是土壤温度和湿度, U_{of} 、 d_f 、 Z_{of} 是冠层中风速、冠层的零平面位移和粗糙度, 其余符号见文中说明

(或雪) M_f 变化方程分别为

$$C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = R_{nf} - H_f - LE_f, \quad (1)$$

$$\frac{dM_f}{dt} = P_f - D_f - \frac{1}{\rho_w} \cdot E_w, \quad (2)$$

下标“f”表示与冠层有关的量, 其中 C_f 为冠层的热容量, 正比于叶面指数 N_f 。 R_{nf} ,

H_f 和 E_f 分别为冠层的净辐射, 感热和潜热通量。 P_f 、 D_f 和 E_w 是冠层截留的降水、下滴水和湿部的蒸发。 ρ_w 是水的密度。 (1) 式中,

$$R_{nf} = \sigma_f [S(1 - \alpha_{fhe} - \gamma_{ph})(1 - e^{-k \cdot N_f}) + R_L^1 + \sigma T_1^4 - 2\sigma T_f^4]. \quad (3)$$

S 是到达冠层的短波辐射, α_{fhe} 和 k 是冠层的反射率和消光系数。 R_L^1 是到达冠层的大气长波辐射, γ_{ph} 是光合作用吸收的短波辐射部分, 由于占冠层辐射收支的很小一部分 (约 1%~2%), 所以一般略而不计, 但在光合作用过程中是必须考虑的。 T_1 是表层土壤温度。土壤的温度和湿度方程的分层形式为

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{(\rho C d)_i} \left[\lambda_{i+1,i}(W) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{i+1,i} - \lambda_{i,i-1}(W) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{i,i-1} \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \frac{1}{d_i} \left[D_{i+1,i}(W) \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_{i+1,i} - D_{i,i-1}(W) \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_{i,i-1} \right] + \frac{\partial K_w}{\partial z} - S_w, \quad (5)$$

其中 T_i 和 W_i 是 i 层土壤温度和湿度, 且 $W = \theta / \theta_s$, θ 和 θ_s 是体积比土壤湿度及其饱和值, 即孔隙度。 (5) 式右端第一、二、三项分别为水的垂直扩散、重力下渗和冠层的蒸腾。土壤热传导率 λ , 水的扩散率 D 和导水率 K_w 都是土壤湿度的函数。对于 $i=1$ 即土壤表层, 地表面的热和水分通量为

$$F_T = - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = S_g(1 - \alpha_g) + R_{Lg} - \sigma T_1^4 - H_g - LE_g - L_{SN} S_N, \quad (6)$$

$$F_w = - D \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right) = \frac{1}{\theta_s} \left[P_g - \frac{1}{\rho_w} E_g + S_N \right]. \quad (7)$$

下标“g”是表示与地表有关的量, (6) 式右端各项分别为地表吸收的短波辐射和长波辐射, 射出长波辐射, 感热和潜热项及融雪耗热。 P_g 为落到地面的降水和冠层下滴水。 S_N 为融雪量, E_g 是地面蒸发, L 和 L_{SN} 分别是水汽潜热和雪的融解热。

(1) ~ (7) 式中的各感热和潜热通量 (包括蒸腾) 有如下的形式:

$$F = \rho_a \Delta \psi / r, \quad (8)$$

式中 ρ_a 是地表空气密度, $\Delta \psi$ 传输量的差值, r 是传输通道的阻抗。 $r = (u \cdot C_D)^{-1}$, u 是传输通道的风速, C_D 是曳力系数。在植被、土壤表面与大气之间的 C_D 与植被的高度、植被冠层和土壤的动力学粗糙度以及叶子的度量和取向有关, 同时与植被的叶面积指数和覆盖度有关, 如气孔阻抗

$$r_f = r_0 (\sigma_f \cdot N_f)^{-1}, \quad (9)$$

r_0 是单位叶面积上对水的气孔阻抗。所以随着植物的生长, 植被的结构和形态发生变化, 土壤、植被与大气之间物理量的交换也相应地不断变化。气孔阻抗与叶片光合速率有一定的关系, 这一点下节再作说明。

图 1 的右侧是系统中的植被的生理生长过程。植物被分为根、茎、叶三部分和一个凋落物层。各部分的生物量 (干物质) 的变化方程如下:

$$\frac{dM_j}{dt} = \eta_j (1 - \sigma_j) \left[A - \sum_{j=1}^3 R_{mj} \right] - \beta_j \cdot M_j - L_{oj}, \quad j = f, s, r. \quad (10)$$

下标“j”为 f、s、r, 分别代表与叶、茎和根有关的量。 M_j 为生物量, η_j 是光合产物在

各组织中的分配系数。 σ_j 是各组织的光呼吸系数。 A 为总光合速率, R_{mj} 是维持呼吸, β_j 枯枝叶的凋落速率, L_{oj} 是动物的消费, 人类的采伐和林火等, 其具体函数形式由所考虑的消费方式而定。详细的各过程模式化见文献[2]和[6]。

总光合速率 A 受环境因子和叶子本身状态所控制, 如叶丛温度 T_f , 气孔中 CO_2 浓度 C_i , 叶水势和叶内氮浓度 N 等

$$A = P_{\max} \cdot f(C_i) \cdot f(T_f) \cdot f(\Psi) \cdot f(N). \quad (11)$$

具体函数形式见文献[2,6], 这里 $P_{\max}$ 是在最佳条件下的光合速率, 取 Michaelis-Menten 形式,

$$P_{\max} = \frac{P_0}{k} \ln \frac{P_0 + B \cdot I_0}{P_0 + B \cdot I_0 \cdot e^{-k \cdot N_f}}. \quad (12)$$

P_0 是光饱和光合速率, B 是光补偿点光合曲线斜率。 I_0 是冠层顶的光合有效辐射。

光合速率同时也是大气中 CO_2 向气孔的扩散速率^[7], 于是有

$$A = (C_a - C_i) \cdot g_s / 1.6, \quad (13)$$

C_a 是冠层大气 CO_2 浓度, g_s 是气孔对水的导度。1.6 是气孔对水与对 CO_2 的导度之比。由于叶面蒸腾的水汽和 CO_2 同化都通过叶片气孔, 所以气孔对水汽和 CO_2 交换的阻抗 (或导度) 有对应关系, 由实验可知^[8]气孔导度与叶面光合速率有线性关系:

$$g_s = m \cdot \frac{P_0 e_s}{C_s e_i} \cdot A + b, \quad (14)$$

式中 g_s 为气孔导度, P_0 为地面气压, C_s , e_s 是叶面 CO_2 浓度和水汽压, e_i 是气孔内水汽压, m 和 b 是实验常数。用冠层 CO_2 浓度 C_a 和水汽压 e_a 代替 C_s 和 e_s , 则

$$g_s = m \cdot \frac{P_0}{C_a} \cdot r_h A + b, \quad (15)$$

r_h 是对应叶温的相对湿度。由 (11)、(13) 和 (15) 式, 可求得光合速率和气孔导度。由 A 可计算 g_s , 从而得到 r_h , 反馈回模式物理部分, 计算冠层的蒸腾。

维持呼吸强度主要随温度变化, 可表达为

$$R_{mi} = \alpha_i M_i Q^{(T-T_0)/10}, \quad i = f, s, r, \quad (16)$$

α_i 为呼吸强度系数, Q 约为 2。即温度增加 10°C 呼吸增强一倍。地上部分 T 为冠层温度; 地下部分 T 为土壤温度。生长呼吸强度与干物质增长率成正比。

枝茎的凋落和根的死亡看作是随机的, 其凋落率与组织的平均生存期有关。而叶丛的枯黄和凋落与温度和物候等因子有关。凋落物层的干物质 M_d 的变化是:

$$\frac{dM_d}{dt} = \beta_{ab} \cdot M_{ab} - \beta_d \cdot M_d, \quad (17)$$

β_{ab} 凋落率, β_d 分解率, 是土壤湿度和温度的函数。

现结合草原生态系统的特点, 对 AVIM 作几点调整和改进。首先将草地的叶和茎合并为地上生物量 M_{ab} , 根部则为地下生物量 M_{un} , 这与实际场地测量相一致。其次, 草地的覆盖率与地上生物量有正变关系, 根据中国内蒙古草原的不同类型和不同生

长期测定资料文献[9,10]得到图 2 的统计关系, 图中竖线为实测值, 曲线为拟合值, 于是有

$$\begin{cases} \sigma_f = f(M_{ab}) = \frac{M_{ab}}{M_{0.5} + M_{ab}}, & M_{ab} \leq M_{abm}, \\ \sigma_f = \sigma_{\max}, & M_{ab} > M_{abm}, \end{cases} \quad (18)$$

其中, $M_{0.5}$ 是 $\sigma = 0.5$ 时的地上生物量, 在这里, 分别取 $M_{abm} = 350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $M_{0.5} = 110 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $\sigma_{\max} = 0.9$ 。地上生物量指绿色部分, 可以进行光合作用, 同时可获得叶面积指数的变化。

$$\frac{dM_{ab}/dt}{\rho_f} = \frac{dN_f}{dt}, \quad (19)$$

ρ_f 是单位生物量的叶面积。对草原来说, 老叶枯黄但仍留在植株上。地上的枯叶 (litter 层) 也覆盖地面, 影响冠层的动力学参数。故与地上绿色部分一起考虑, 即定义

$$N_{fs} = \frac{1}{\rho_f} (M_{ab} + M_d), \quad (20)$$

根据文献[2]文中的公式, 由 N_f 可以推导出

冠层的动力学粗糙度 Z_{of} 、零平面位移 d_0 和反射率 α_f 。这些参数将随着植物生长而变化, 不断影响地表能量和物质输送的强度。

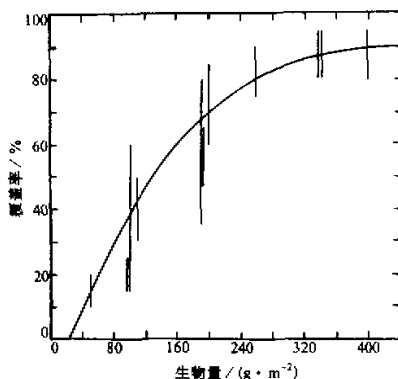


图 2 内蒙古草原地上生物量与覆盖度相关图
竖直线是实测覆盖度变化值, 曲线为拟合值

3 草原生态系统年际变化模拟

用上述 AVIM 模式研究草原气候生态系统的物理过程, 生物学过程的资料是取自内蒙古呼伦贝尔盟新巴尔虎右旗, 该地位于中纬度温带半干旱草原带。年平均温度为 -1°C , 年降水量约为 300 mm 左右。模拟时段为 1984 年 1 月 1 日~1987 年 12 月 31 日, 共 4 年。观测资料有每日的地表空气温度、风速、降水量、相对湿度和云量。植被是半干旱典型草原。土壤是干草原栗钙土。有 1984~1987 年 5~9 月地上生物量观测值^[11]。每年 10 月到次年 4 月为积雪期。5~9 月为生长季节。

由于缺少大气辐射的实测资料, 现利用该地天文辐射加以云量的修正。大气长波辐射以地表的空气温度、湿度和云量确定。

温度的日振幅设为云量的函数。云量多温度日振幅小, 云量少振幅大。空气相对湿度的变幅由温度决定, 保持每日绝对湿度不变。模式的物理过程积分步长为 30 min, 生理过程步长为 1 h, 干物质积累步长为 1 d。模式从 1984 年 1 月 1 日 0:00 开始积分, 连续 4 年。

3.1 一年模拟

首先分析 1985 年一年的模拟。这一年降水量基本正常。6~8 月降水量约为 230

mm。雨季在6月中旬开始(图4下)。4月中旬以后,积雪融化,温度升至 0°C 以上。草原返青,开始生长。但春季干燥而风大,温度高,土壤水分少,光合作用弱,生长慢。7月降水多,土壤湿润。有效光合辐射达到了最大值,光合作用率迅速增大,达 $6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (干物质)(图3)以后逐渐下降,这是因为雨季降水渐渐减少,以致土壤水分也变干。9月以后气候骤冷且干,光合作用逐渐下降而至停止。维持呼吸随温度增高和生物量变化而变化,并随天气状况(主要是温度)而出现波动。夏季呼吸最强,秋季随温度下降而减小。在积雪期,呼吸作用甚微。 P_N 表示光合速率与维持呼吸之差,它的变化见图3。

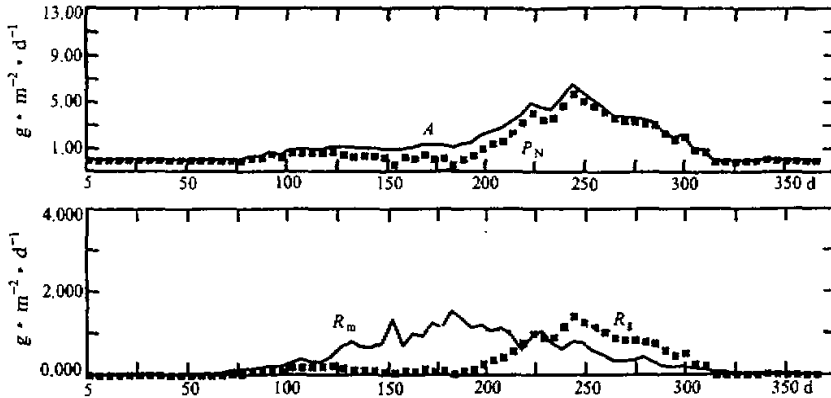


图3 1985年草地逐候光合速率(A)、净光合速率(P_N)、维持呼吸(R_m)和生长呼吸(R_g)

单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。横坐标为候数

地上生物量在7月间由于光合作用增强而迅速增加,8、9月达到最大值。以后光合作用减弱,呼吸速率超过光合速率,生物量为负积累。到了9月末10月初温度降至 0°C 以下,草逐渐枯黄凋落。从图4中看与观测值一致,约 $147\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,是半干旱典型草原平均值。而地下生物量在夏秋季有一积累过程,到10月达到峰值,约 $570\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

对比地上地下生物量的变化过程,地下生物量滞后于地上部分。这是由于光合同化物优先供给能够进行再生产的叶、茎的绿色部分,然后用于根部积累。这个地带的草原,通常地下部分生物量要比地上部分大3倍以上^[12]。

上面的分析已经清楚地说明气候的季节变化通过物理过程决定植冠和土壤温度和湿度,直接影响植物的各生理过程,影响且在很大程度上决定了植物生长的年变程和 CO_2 的交换,这是大气与生态系统相互作用的一个方面。同时植物的生长不断改变植被叶面积指数,覆盖度等,因而改变地表的动力学参数,影响地气间物理量的交换强度。关于这一点将在下面多年的模拟中一起讨论。

3.2 多年模拟

现在来分析新巴尔虎右旗1984年~1987年气候生态系统连续4年的模拟结果。这4年的气候状况有显著差异,最主要的是降水年际变化很大(图4下)。1984年降水量丰富,草原雨季6~8月降水量达到386 mm,比常年多一倍。1985、1987年降水基本

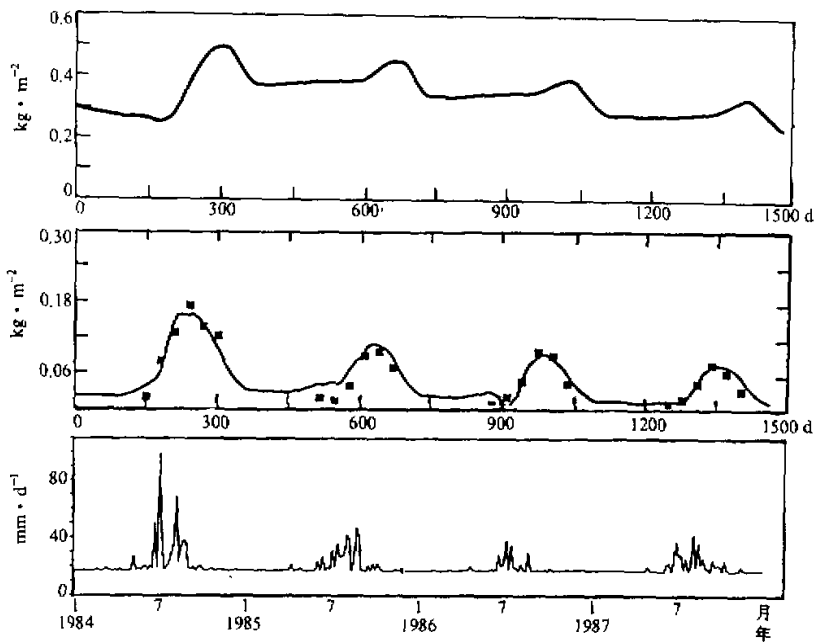


图4 呼伦贝尔盟模拟的地下生物量(上)、实测(点)和模拟的地上生物量(中)和降水(下)的变化(1984~1987)。横坐标为总积分日数(下同)

正常,雨季降水约230 mm左右,主要集中在7、8月。而1986年降水明显偏少,年总量不足200 mm,气温偏高。对于中纬度半干旱草原来说热量资源是充分的,但水分供给不足是草生长的主要限制因子。因此草地生物量对生长季节的降水、土壤湿度十分敏感。这一点在下面的数值模拟中看得很清楚。

图4是1984~1987共4年地上地下生物量的模拟值和实测的地上生物量(点)和降水量。对比地上生物量的模拟值与实测值(图4中),两者的变化是相当一致的。特别是与生长期降水的关系更说明生物量的年变化和年际变化对降水的敏感是充分反映出来了。1984年季风雨来得早,雨量丰沛。土壤湿度较大,地上生物量增加迅速,7、8月达到 $175 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这对该地区半干旱典型草原是较高的了。雨季持续到9月,土壤温度仍然较高,生物量保持较大值,地下生物量的积累落后于地上生物量,10月达到最大值约 $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冬季仍保持较高的数值。1985年,1987年降水基本正常,地上生物量最高值出现在9月;达到 $152 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,而观测值约 $146 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。1986年6~8月降水较少,光合速率相对较低。最大地上生物量接近一般年份接近实测值,可能与湿度有关。1985~1987年地下生物量有下降的趋势。显然与气候变干有关,积累的光合产物不足以补充呼吸等的消耗。

草地生物量的积累引起植物冠层形态的变化,如植株的高度,叶丛的密度以及覆盖度等,其中最重要的是叶面积指数。

叶丛的分布和密度不仅影响辐射在冠层中的传输、吸收和反射,而且影响气流在冠层中的分布,湍流交换的强度以及冠层总体的阻抗等。因此作为冠层形态的重要参数—叶面积指数直接与冠层的物理参数:冠层的反射率,动力学粗糙度和零位移平面相联系。具体形式见文献[2,6]。图5是绿叶与黄叶总面积指数(N_{fs})与冠层粗糙度和反射率的变化。可见粗糙度与 N_{fs} 变化是一致的。非生长期 Z_{oc} 约为0.03 m。7、8月生物量最大时 Z_{oc} 可增至0.06 m。1984年最大,1985、1986、1987年也达到0.05 m左右。而反射率与 N_{fs} 的变化相反。冬季草地枯黄,有积雪,反射率可达0.3甚至0.4。7、8月则降至0.2以下。这对地表辐射收支产生显著的影响。

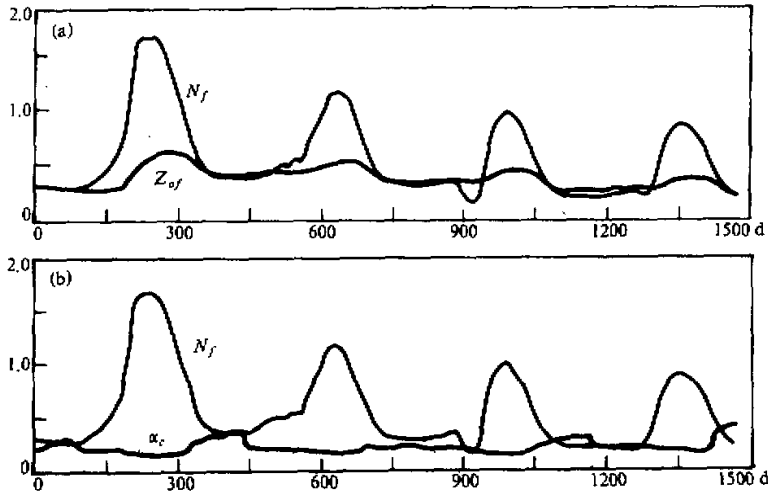


图5 模拟总叶面指数(N_{fs} , a、b, 细实线)和冠层的粗糙度(Z_{of} , a, 粗线)和反射率(α_r , b, 粗线)变化(1984~1987年), Z_{oc} 单位为 dm

植物的生长过程也是大气与生态系统 CO_2 的交换过程。下面计算了地气之间的 CO_2 通量:

$$F_{CO_2} = -(P_t - R_g - R_m) + R_d, \quad (21)$$

其中 P_t 是总光合速率, R_g 和 R_m 分别是植株的生长呼吸和维持呼吸,而 R_d 是落叶层的分解率。这里没有包含土壤中碳的释放、微生物的分解等。但根的呼吸已经在 R_m 和 R_g 中了。图6a是1984~1987年4年的 F_{CO_2} 的变化。正值表示草丛为 CO_2 的源,呼吸和落叶的分解释放的碳大于光合同化的大气中的 CO_2 。由图可见在每年冬季非生长季节,植被与大气之间 CO_2 的交换几乎为零,此时光合作用停止,由于寒冷和积雪覆盖,根的呼吸和有机物分解也很微弱。除了在1985、1986、1987年生长期之初有短期的正值外,其余时间为负值。植物生长的同时也将大气中 CO_2 储存在生物体内。1984年负通量最强,8、9月份超过 $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,1985、1986年次之,7、8月已达 $6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,1987年最弱,最大通量在 $4 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右。这样的变化趋势与这4年生物量的变化是一致的。

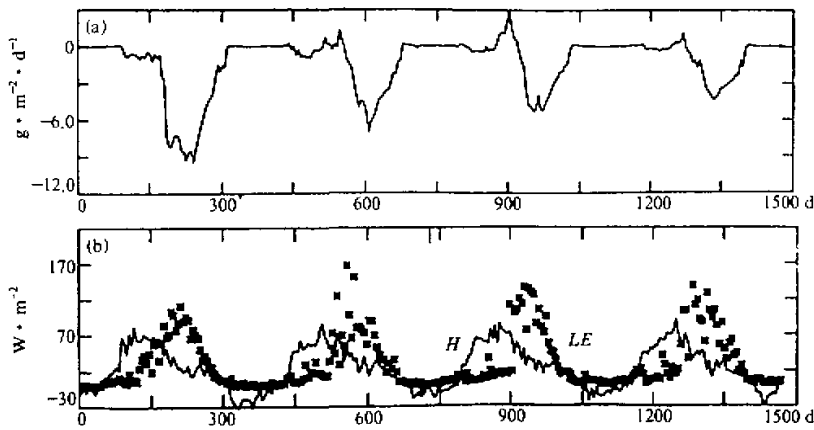


图6 模拟逐候草地大气 CO_2 通量 (a) 和地表感热潜热 (b, 细线为感热) 通量的变化 (1984~1987 年)

植冠物理参数的变化改变了能量的收支和水分和热量交换的强度, 是生物的生理生态过程对地表物理过程的反馈。地表潜热和感热的变化 (图 6b) 反映了这种过程的特点。如 1984 年积雪融化后, 4 月中感热的急骤增大, 5、6 月达到最高, 日平均通量为 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。随着草的生长、叶面积指数、密度和动力粗糙度都增大。蒸腾作用不断增长, 8 月日平均值可达到 100 m^{-2} 以上。同时感热大幅度下降。直到 10 月份草地完全枯黄以后, 感热和潜热将随着地表净辐射一起降到很小的数值。1985~1987 年总的年变化趋势是一致的。但年际变化是明显的, 而且与气候及草地的生长状况有直接联系。主要反映在感热和潜热的分配之中。1985 年雨季来得迟, 且草场地上生物量约为 1984 年的 $2/3$, 所以感热通量在春季和初夏保持较高的值, 潜热到 7 月才明显增大, 并且起伏很大。1986 年有类似的情况。1987 年受气候影响, 草场生物量低, 地表净辐射值也略小, 感热和潜热都较弱。但夏秋时潜热变化很大, 受短暂降水的影响。

4 结语

AVIM 所讨论的是气候与生态系统之间季节和年际变化尺度地表生物物理与植物生理生态过程的相互作用过程。生态系统的组成是不变的, 而功能是变化的。模式中植被的生物量以及形态特征是不不断变化的。植被不再是由一组特征物理参数所描述的“固定”物质层, 而是有生理过程的, 受环境条件而变化的生物。

模式物理部分是可与气候模式相耦合的陆面过程模式, 可以计算大气、植被、土壤之间瞬时的水、热通量。所以 AVIM 也可以与气候模式直接耦合, 不仅能输出地气间热通量, 还可计算初级生产力和地气 CO_2 通量。

内蒙古半干旱草原 4 年的模拟表明了能够反映出草地生长和地气物理量交换的季节变化和年际变化, 特别是草地生态系统对气候年际变化的响应。

致谢: 林紫葳为本文做了许多技术工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Houghton, J. T., G. J. Jenkins and J. J. Ephraums, 1995, *Climate Change—The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, 1~350.
- 2 Ji Jinjun, 1995, A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface, *Journal of Biogeography*, **22**, 445~451.
- 3 Sellers, P. J. et al., 1996, A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation, *Journal of Climate*, **9**, 676~705.
- 4 Bonan, G. B., 1996, A Land Surface Model (LSM 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: Technical description and users guide, NCAR/TN-417+STR, NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, U.S.A., 1~123.
- 5 Ji Jinjun and Hu Yuchun, 1989, A simple land surface process model for use in climate study, *Acta Meteorologica Sinica*, **3**, 344~353.
- 6 李劲钧, 1996, 陆地表面物理和生物学过程年度变程的模拟, 全球变化与我国未来的生存环境, 符淦斌、严中伟编, 北京: 气象出版社, 248~258.
- 7 Campbell, G. S., 1977, *An Introduction to Environmental Biophysics*, Springer-Verlag, New York, 1~245.
- 8 Collatz, G. J., J. T. Ball, C. Grivet and J. A. Berry, 1991, Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer, *Agricultural and Forest Meteorology*, **54**, 107~136.
- 9 邢旗、吕新龙, 1993, 内蒙古典型草原地上生物量动态研究, 中国北方草地畜牧业动态监测研究(一), 北京: 中国农业出版社, 160~166.
- 10 任志娟、色音巴图、武凤山、张文荣、李石磊, 1993, 中国北方主要草地类型地上生物量是区域分异的初步研究, 中国北方草地畜牧业动态监测研究(一), 北京: 中国农业出版社, 133~142.
- 11 色音巴图、武凤山、石永怀、李石磊、任志娟, 1993, 内蒙古锡林郭勒草原地上生物量区域分析与动态研究, 中国北方主要草地畜牧业动态监测研究(一), 北京: 中国农业出版社, 184~197.
- 12 姜恕、戚秋慧、孔德珍, 1985, 羊草草原群落和大针茅草原群落生物量的初步比较研究, 草原生态系统研究, 第一集, 北京: 科学出版社, 12~32.

A Simulation Study of Coupled Feedback Mechanism between Physical and Biogeochemical Processes at the Surface

Ji Jinjun and Yu Li

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The mechanism and approach of intercoupling between physical and biogeochemical processes at land surface are investigated by the use of an atmosphere-vegetation interaction model (AVIM). The basis for the feedback mechanism is that on seasonal and interannual scales, the physical exchange processes of materials and energy between plant and abiotic environment and physiological processes influence plant growth, leading to significant change in macromorphology of plant, and then the changes in surface dynamical parameters, in turn, affect physical exchange processes between vegetation, atmosphere and soil. By using the AVIM to semi-arid steppe in Inner-Mongolia, China, net primary production of grass ecosystem, exchanges of CO₂, sensible and latent heat fluxes between vegetation and the atmosphere are simulated. The results show that the seasonal and interannual variations of NPP are significantly affected by the climate; meanwhile, the budget and partitioning of energy at the surface are also affected by the growth of steppe.

Key words atmosphere-biosphere interaction land surface process model biogeochemical process grass ecosystem