

一个植物冠层物理传输和生理 生长过程的多层模式^{*}

季劲钧 胡玉春

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 通过提出一个多层的植物冠层和土壤的模式, 对冠层中辐射、热量、水汽和二氧化碳的传输等过程, 光合、呼吸等生理过程以及土壤中水、热传输等过程进行了详细描述, 并把物理过程与生理过程联系起来, 实现了植被与大气的双向反馈; 应用此模式于小麦生长期各主要过程的模拟, 给出了与观测值一致的结果。

关键词 大气植被相互作用 农业生态系统 陆面过程

1 引言

陆地表面发生在大气与植被、土壤之间的能量、水分和二氧化碳等物质交换的物理过程和生物化学过程是相互作用、相互联系的。地气间水分和热量的传输受植被覆盖和土壤物理性质的影响, 而植被的生长和碳、氮元素等的传输又受气候状况的影响。定量的描述这些相互作用过程的模式在发展中。近年来, 提出了一些既能模拟地表物理过程又能模拟碳交换的模式, 如 AVIM^[1]、SiB2^[2]、LSP^[3]、IBIS^[4]等。这些模式可以直接模拟陆地表面能量和物质的交换。所不同的是, AVIM 模式包含了植物生理生长过程以及对地表物理量交换过程的反馈, 其基本思想是植被与大气、土壤间瞬时的物质(水分、二氧化碳等)和能量(辐射、感热和潜热等)交换的长期积累使得植被不断生长并发生宏观形态上的显著变化, 如植被覆盖和叶面积指数等, 而这些变化反过来又强烈影响植被与大气、土壤间各种瞬时的物理交换过程。为更准确地表达冠层中的湍流交换过程和光合作用, 在上述理论基础上, 本文提出了一个多层的植物冠层和土壤模式^[5], 详细描述了冠层中辐射、热量、水汽和二氧化碳传输过程, 光合、呼吸等生理过程以及土壤中水、热传输过程等。利用这一新模式对小麦全生长期进行模拟, 给出了与观测值一致的结果。

2 模式的作用过程

模式包含两个子模块: 一个是关于植物冠层内部及与大气、土壤之间的水、热、CO₂ 交换和系统物理状态变化的模块(PHY); 另一个是关于植被群体生理和生长过程

1998-09-04 收到

^{*} 国家攀登计划和国家自然科学基金项目(49575264)资助

的模块 (VEG)。两部分通过相互作用而耦合成一个系统。

为了给出冠层中辐射传输、光合作用的强弱, 层间湍流交换的强度以及土壤中热和水分运动的详细状况, 将植被冠层和土壤表层分为若干层。假定各层水平方向上是均一的, 只考虑垂直方向上的结构。

2.1 物理交换子模块 (PHY)

这个模块内包含了近地层大气、植物冠层与土壤表层的各种物理过程, 各层的风分布和湍流强度, 辐射在冠层中的传输, 水分、 CO_2 和热量在大气、冠层和土壤之间的输送等以及由此确定的植被、土壤温湿状况。

太阳辐射是地表水热传输和光合作用的唯一能源。模式中考虑了植被冠层对太阳短波直射辐射和散射的吸收、反射和透射以及长波发射的吸收和透射, 并与冠层的结构相联系。

到达冠层的短波辐射 S_0 有直接 $S_{d,k}^{\downarrow}$ 和散射 $S_{dif,k}^{\downarrow}$ 两部分。冠层中第 k 层的传输方程为

$$S_{d,k}^{\downarrow} = S_{d,k-1}^{\downarrow} \cdot X_{d,k}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1a)$$

$$S_{dif,k}^{\downarrow} = S_{dif,k-1}^{\downarrow} \cdot X_{dif,k}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1b)$$

式中, $X_{d,k}$ 、 $X_{dif,k}$ 分别为直射和散射辐射透过率。根据 Ross^[6] 的研究, 透过率可分为直接和间接两部分。对直射透过率, 相应的表达式为

$$X_{d,k} = X'_{d,k} + X''_{d,k},$$

$$X'_{d,k} = \exp(-k_d L_k),$$

$$X''_{d,k} = (1 - X'_{d,k})\tau_1,$$

式中, L_k 是第 k 层的叶面积指数, τ_1 是冠层平均短波透过率, k_d 是叶丛对短波的消光系数, 是太阳高度角和叶倾角的函数。对散射辐射, 假定叶丛均匀分布, 相应的透过率是

$$X_{dif,k} = X'_{dif,k} + X''_{dif,k},$$

$$X'_{dif,k} = \exp(-0.833 L_k),$$

$$X''_{dif,k} = (1 - X'_{dif,k})\tau_1.$$

k 层由上向下的短波辐射是

$$S_k^{\downarrow} = S_{d,k}^{\downarrow} + S_{dif,k}^{\downarrow} = S_{d,k-1}^{\downarrow} X_{d,k-1} + S_{dif,k-1}^{\downarrow} X_{dif,k-1}. \quad (2)$$

反射辐射由直射太阳辐射的反射和对间接短波的反射 $S_{rd,k}^{\uparrow}$ 、 $S_{rdif,k}^{\uparrow}$ 组成

$$S_{r,k}^{\uparrow} = S_{rd,k}^{\uparrow} + S_{rdif,k}^{\uparrow}, \quad (3)$$

$$S_{rd,k}^{\uparrow} = S_{d,k-1}^{\downarrow} (1 - X_{d,k}) r_1,$$

$$S_{rdif,k}^{\uparrow} = S_{dif,k-1}^{\downarrow} (1 - X_{dif,k}) r_1,$$

r_1 是叶丛平均反射率。向上的短波辐射为

$$S_{k-1}^{\uparrow} = S_k^{\downarrow} X_{dif,k-1} + S_{r,k-1}^{\uparrow}. \quad (4)$$

冠层顶总的反射辐射是 $S_n^{\uparrow}$, 反射率为

$$\alpha_t = S_n^\uparrow / S_0^\downarrow, \quad (5)$$

α_t 是叶丛结构的函数。各层吸收的短波辐射是

$$S_{ak} = S_{k+1}^\uparrow - S_k^\uparrow + S_{k-1}^\downarrow - S_k^\downarrow. \quad (6)$$

冠层上方向下的大气长波辐射为

$$R_a^\downarrow = [n + (1-n)0.67(1670q_a)^{0.08}] \sigma T_a^4, \quad (7)$$

式中, n 为云量, T_a 、 q_a 冠层上方参考层的气温和比湿, σ 是 Stefan-Boltzman 常数。第 k 层冠层向上、向下的长波辐射通量分别是

$$R_k^\uparrow = R_{k+1}^\uparrow X_{l,k} + R_{c,k}^\uparrow, \quad (8)$$

$$R_k^\downarrow = R_{k-1}^\downarrow X_{l,k} + R_{c,k}^\downarrow, \quad (9)$$

其中, $R_{c,k}$ 是冠层的长波射出辐射, 且

$$R_{c,k}^\downarrow = R_{c,k}^\uparrow = I_{ci,k}(1 - X_{l,k}) = \epsilon_f \sigma T_{c,k}^4 (1 - X_{l,k}),$$

其中, ϵ_f 为冠层比辐射率, $T_{c,k}$ 是第 k 层叶丛温度。设叶丛辐射强度各向同性, 叶丛各方位均匀分布, 则长波辐射透过率只是叶倾角 θ 的函数, 即

$$X_{l,k}(L_k, \theta, \varphi) = e^{-G(\theta)L_k / \cos\theta},$$

其中, $G(\theta)$ 为单位叶面积指数在 θ 方向上的投影。对半球积分就可得到层内长波辐射

$$R_k^\downarrow = R_{k-1}^\downarrow X_{l,k} + I_{c,k}(1 - X_{l,k}),$$

$$R_k^\uparrow = R_{k+1}^\uparrow X_{l,k} + I_{c,k}(1 - X_{l,k}),$$

其中, $X_{l,k} = 2\pi \int_0^{\pi/2} e^{-G(\theta)L_k / \cos\theta} \cos\theta \sin\theta d\theta$ 是冠层疏密程度的度量。第 k 层的长波辐射收支为

$$R_{a,k} = R_{k+1}^\uparrow - R_k^\uparrow + R_{k-1}^\downarrow - R_k^\downarrow. \quad (10)$$

土壤表面净总辐射通量为

$$R_{soil} = S_n^\downarrow (1 - \alpha_s) + R_n^\downarrow \epsilon_s + \epsilon_s T_s^4 \sigma, \quad (11)$$

式中, S_n 、 R_n 分别为冠层接地层的短、长波辐射通量; α_s 是土壤表面反射率, 与土壤湿度有关; ϵ_s 土壤比辐射率; T_s 表层土壤温度。

对冠层内外的湍流交换强度的研究已有许多。过去的研究和评论指出高阶湍流闭合方案能成功地模拟出植冠内外的湍流结构。一阶闭合 (K 理论) 方案有局限性和近似合理性, 但因近似地保留了冠层内湍流交换过程的主要结果而被广为应用。本模式仍采用湍流交换的 K 理论, 主要是考虑计算的经济性和与其它过程参数化相协调。为尽可能逼近实际, 对冠层内外风的结构作了仔细分层, 冠层上方分为惯性层和粗糙层。冠层内分为叶丛集中的上层和冠盖下的近地层。各层中, 风的分布有明显差异。

惯性层即常通量层, 在植冠的有效表面以上, 湍流能充分发展, 中性层结时风速近

于对数分布, 根据 Monin-Obukhov 相似理论进行层结修正。粗糙层在惯性层之下, 紧靠冠层顶, 平均流明显依赖于冠层起伏的尺度, 粗糙元引起的涡流侵入平均流, 这种效应使风速的垂直梯度比对数分布要小。根据实际观测, 现假定粗糙层风速呈线性分布^[7]:

$$V(z) = V_m - \frac{V_*}{\kappa} \left(1 - \frac{z - d_0}{z_w - d_0} \right), \quad h \leq z < z_w \quad (12)$$

$$K_m(z) = \kappa V_* (z_w - d_0), \quad (13)$$

式中, h , z_w 分别是冠层顶平均高度和粗糙层高度, κ 是 von Karman 常数。

$$z_w = \tilde{\alpha}(h - d_0) + d_0,$$

其中, d_0 是零平面位移, $\tilde{\alpha} = 1.5$ 。

冠层叶丛集中层中风衰减很快, 取指数分布:

$$V(z) = V(h) \exp[-\alpha_v (1 - z/h)], \quad z_l < z < h \quad (14)$$

$$K_m(z) = K_m(h) \exp[-\alpha'_v (1 - z/h)], \quad z_l < z < h \quad (15)$$

式中, α_v , α'_v 是叶面积指数的函数, 由实测数据确定。在冠层下部近地面层叶丛相对稀少, 风速呈对数分布。此层的高度依冠层结构而定^[8]。

由此, 根据大气参考层的风速和大气层结就可以确定风的垂直廓线和各层湍流交换系数 K_m 的大小, 从而可以计算各层的空气动力学阻力:

$$r_{z, z+\Delta z} = \int_{\Delta z} \frac{1}{K_m} dz \approx \frac{\Delta z}{K_{m, \Delta z}}. \quad (16)$$

模式中假定粗糙层和冠层内动量、水、热、 CO_2 湍流交换系数相等, 即

$$K_m = K_h = K_e = K_c. \quad (17)$$

冠层的温度和叶片上水量控制方程以及相应的能量收支 (辐射传输、感热和潜热湍流交换) 和水量平衡 (降水截留、冠层过量水下滴和叶片蒸发) 等过程的参数化与 LPM 模式相同^[9,10]。

植被冠层从地面到植株的平均高度等分为 N 层。土壤从地面到土层底部分为不等距的 N_s 层, 上部土层薄, 下部厚。现直接写出分层的温度、湿度差分方程, 时间积分采用部分隐式差分格式, 植被冠层的温度和水方程为

$$C_{c,k}^n \frac{T_{c,k}^{n+1} - T_{c,k}^n}{\Delta t} = S_{a,k}^{n,n+1} + R_{a,k}^{n,n+1} - H_{c,k}^{n,n+1} - \lambda E_{c,k}^{n,n+1}, \quad (18)$$

$$\frac{M_{c,k}^{n+1} - M_{c,k}^n}{\Delta t} = P_{c,k}^n - \frac{1}{\rho_w} E_{cw,k}^n, \quad (19)$$

式中, 下标 k 表示第 k 层冠层的变量, $C_{c,k}$ 是冠层热容量, $H_{c,k}$, $\lambda E_{c,k}$ 分别是感热和潜热通量, $P_{c,k}$ 是接收的降水, E_{cw} 为叶丛湿部的蒸发, 上标“ n ”表示时间。

$$H_{c,k} = \rho_0 c_p (T_{c,k} - T_k) / r_{b,k}, \quad (20)$$

$$\lambda E_{c,k} = \rho_a [q_s(T_{c,k}) - q_k] / (r_{b,k} + r_{s,k}) \quad (21)$$

式中, ρ_a 、 ρ_w 为地面空气和水的密度, c_p 为空气定压比热, T_k 、 q_k 是第 k 层空气的温度和比湿, $q_s(T_c)$ 是 T_c 时饱和比湿, r_b 、 r_s 是叶面边界层阻抗和气孔阻抗。冠层的潜热通量由两部分组成, 即湿部 (有液态水覆盖) 的蒸发 E_{cw} 和干部的蒸腾 E_{tr} , 分别为

$$E_{cw,k} = \delta_k \rho_a [q_s(T_{c,k}) - q_k] / r_{b,k}, \quad (22)$$

$$E_{tr,k} = (1 - \delta_k) \rho_a [q_s(T_{c,k}) - q_k] / (r_{b,k} + r_{ts}), \quad (23)$$

式中, δ_k 是冠层湿部的比例。当冠层水量超过最大允许量 M_{cmax} 时, 就形成下滴。

土壤温度变化服从固体介质热传导方程, 土壤热容量和热传导系数是土壤湿度的函数。土壤湿度 (含水量) 变化服从非饱和土壤的 Darcy 定律。土壤水势和导水系数也是土壤湿度的函数, 参数化方法见文献[9]。

分层的土壤温度方程和上、下边界条件是

$$(\rho c)_{s,j} \frac{\partial T_{s,j}}{\partial t} = \left[\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{j,j-1} - \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{j,j+1} \right] / \Delta z_{s,j}, \quad j = 1, 2, \dots, N_s \quad (26)$$

$$\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{z=0} = G_s = R_{soil} - H_s - \lambda E_s, \quad (27)$$

$$\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{z=-z_D} = 0, \quad (28)$$

$T_{s,j}$ 是第 j 层土壤温度。模式假定与深层土壤无热量交换。

土壤湿度 $W = \eta / \eta_s$, η 是土壤体积含水量, η_s 是其饱和值。 W 方程的分层形式及边界条件是

$$\frac{\partial W_j}{\partial t} = \left[\left(D \frac{\partial W}{\partial z} - K_w \right)_{j,j-1} - \left(D \frac{\partial W}{\partial z} - K_w \right)_{j,j+1} \right] \frac{1}{\Delta z_j} - S_{u,j}, \quad j = 1, 2, \dots, N_s \quad (29)$$

$$\left(D \frac{\partial W}{\partial z} - K_w \right)_{z=0} = P_s - R_{of} - \frac{E_s}{\rho_w}, \quad (30)$$

$$\left(D \frac{\partial W}{\partial z} - K_w \right)_{z=-z_D} = 0, \quad (31)$$

式中, P_s 是土壤表面接收的降水和冠层下滴水,

$$P_s = P(1 - \sigma_c) + D_{cn}, \quad (32)$$

R_{of} 是地表径流, E_s 土壤表面蒸发, $S_{u,j}$ 是第 j 层根从土壤中抽吸的水, 各土层根部吸收之和即为冠层的蒸腾。 P 是降水强度, D_{cn} 是 N 层冠层的下滴水。

$$S_{u,j} = \rho_{r,j} E_{tr,j} / \rho_w, \quad (33)$$

$\rho_{r,j}$ 是相对根系密度, 即第 j 层根长对总土壤根长之比。模式中未考虑与地下水的交换。

大气与地表之间二氧化碳的交换由三部分组成: 冠层与大气之间的湍流输送, 叶片的光合作用以及植物和土壤的呼吸。光合作用在下一节说明。冠层内二氧化碳浓度 c 的变化为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial c}{\partial z} \right) + r_c, \quad (34)$$

K_c 是 CO_2 湍流交换系数, r_c 是光合和呼吸的源汇项。上式的分层方程为

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} = \left[\left(K_c \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{k-1,k} - \left(K_c \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{k,k+1} \right] \frac{1}{\Delta z_k} + r_{c,k}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (35a)$$

或

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} = \frac{1}{\Delta z_k} \left(\frac{c_{k-1} - c_k}{r_{k,k-1}} - \frac{c_k - c_{k+1}}{r_{k+1,k}} \right) + r_{c,k}, \quad (35b)$$

$r_{k,k-1}$ 、 $r_{k+1,k}$ 是层间阻抗。边界条件为

$$c_1 = c_a, \quad z = h \quad (36)$$

$$K_c \frac{\partial c}{\partial z} = F_{cs}, \quad z = 0 \quad (37)$$

c_a 是冠层顶大气 CO_2 浓度; F_{cs} 为土壤表面 CO_2 通量, 由土壤微生物和根系呼吸组成:

$$F_{cs} = R_{os} Q_{10}^{(T_{sp} - T_{os})/10}, \quad (38)$$

R_{os} 为温度 T_{os} 下的土壤比呼吸率, Q_{10} 一般取 2, T_{sp} 为土层平均温度。

冠层内和冠层之上的湍流交换强度与粗糙度 Z_0 、零移平面 D_0 和叶面积指数 LAI 有关^[11], 冠层中辐射传输和反射率也和冠层结构有关。这些参数都随植物生长而变化。同时物理模式决定的辐射和温度状况也将影响植物生理生长过程。这将在下节论及。

2.2 植物生长子模块

这一模块包括叶片的光合作用、器官的呼吸、同化物的分配等过程。植株由叶丛、支干和根组成 (对于作物还有籽粒)。

单位面积的光合速率用光合速率-光响应曲线 (M-M 公式) 表示:

$$P_1 = \frac{\alpha P_{\max} S_{\text{par}}}{\alpha S_{\text{par}} + P_{\max}}, \quad (39)$$

P_1 是光合速率, $P_{\max}$ 是饱和光合速率, S_{par} 是光合有效辐射强度, α 为光合补偿点曲线斜率。群体的光合速率应乘以冠层的叶面积指数。考虑到光合有效辐射在冠层中的直射透射和散射, 将叶丛分为只接受散射光的蔽阴部分 L_{sh} 和同时接受直接辐射和散射的向阳部分 L_{lit} , 并有

$$L_{k,\text{lit}} = L_k (1 - e^{-K_d L_k}) / K_d, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (40)$$

$$L_{k,\text{sh}} = L_k - L_{k,\text{lit}}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (41)$$

K_d 是直接辐射衰减系数, 下标“lit”和“sh”分别表示直接受光和蔽阴。光合有效辐射也可分为三部分: 直接入射辐射、向上和向下的散射辐射, 可分别表达如下:

$$S_{\text{par, lit}, k} = (S_{\text{d, par}, k}^{\downarrow} + S_{\text{dif, par}, k-1}^{\downarrow} + S_{\text{dif, par}, k+1}^{\uparrow}) / L_{k, \text{lit}}, \quad (42)$$

$$S_{\text{par, sh}, k} = (S_{\text{dif, par}, k-1}^{\downarrow} + S_{\text{dif, par}, k+1}^{\downarrow}) / L_{k, \text{sh}}, \quad (43)$$

下标“par”指光合有效辐射。这样，群体的总光合速率是

$$P_{g, k} = P_{g, \text{lit}, k} + P_{g, \text{sh}, k}, \quad (44)$$

右端各有相应的表达式

$$P_{g, \text{lit}, k} = \frac{\alpha P_{\max} S_{\text{par, lit}, k} L_{k, \text{lit}}}{\alpha S_{\text{par, lit}, k} + P_{\max}}, \quad (45)$$

$$P_{g, \text{sh}, k} = \frac{\alpha P_{\max} S_{\text{par, sh}, k} L_{k, \text{sh}}}{\alpha S_{\text{par, sh}, k} + P_{\max}}. \quad (46)$$

实际光合作用要受环境因子的影响，一般表达为各影响因子的综合：

$$\tilde{P}_{g, k} = P_{g, k} F(T_{c, k}) F(W) F(\text{CO}_2), \quad (47)$$

影响因子表达式见文献[1]， W 是根系层平均土壤含水量。

本模式把植被的呼吸分为维持呼吸和生长呼吸。冠层中叶丛的维持呼吸只与冠层温度有关：

$$R_{\text{mf}, k} = R_{\text{mf}0} Q_{10}^{(T_{c, k} - T_0)/10} M_{f, k}, \quad (48)$$

式中， $R_{\text{mf}0}$ 为 T_0 时的呼吸速率， Q_{10} 约为2， $M_{f, k}$ 为该层叶丛生物量（干物质）。同样，茎、根和籽粒的呼吸速率是器官温度的函数，不再分层：

$$\begin{cases} R_{\text{ms}} = R_{\text{ms}0} Q_{10}^{(T_c - T_0)/10} M_s, \\ R_{\text{mg}} = R_{\text{mg}0} Q_{10}^{(T_c - T_0)/10} M_g, \\ R_{\text{mr}} = R_{\text{mr}0} Q_{10}^{(T_s - T_0)/10} M_r, \end{cases} \quad (49)$$

下标 f、s、g、r 分别表示与叶、茎、籽粒和根有关的量。 T_c 和 T_s 是冠层和土层的平均温度。生长呼吸与器官生物量的增长率成正比，即

$$R_{g, i} = \eta_i \frac{\Delta M_i}{\Delta t} \beta_i, \quad i = f, s, g, r \quad (50)$$

β_i 是一比例系数，近似为常数， η_i 是干物质分配系数。

净光合速率是总光合速率减去维持呼吸：

$$P_n = \tilde{P}_g - \sum_i R_{m, i}, \quad i = f, s, g, r \quad (51)$$

再分配到各器官上，即生物量的增加，于是有

$$\frac{dM_i}{dt} = \eta_i P_n (1 - \beta_i) - D_i, \quad i = f, s, g, r \quad (52)$$

D_i 为凋落率，通常与生物量有关，同时受气候等因子的影响。有关的过程参数化方法见文献[1, 11]。叶子的生物量变化与叶面积指数 L 有关，即

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{\rho_f} \frac{dM_f}{dt}, \quad (53)$$

ρ_f 为叶面积密度 (m^2/kg)。有了总的叶面积指数的变化, 再按一定的冠层结构函数分配到每一层上, 确定 L_k 的变化, 从而改变冠层中的物理过程。

植物生理过程、光合、呼吸和凋落都与冠层和土壤的温度状况和光辐射、 CO_2 传输有关, 这些相互作用过程把模式中物理过程与生物学过程联系在一起。

3 模式的结构和积分

以上给出了大气、植被和土壤之间各种物理过程和生物过程的定量形式以及植被、土壤温湿状态方程和生物量变化方程。这些过程 and 变化有不同的特征时间尺度。现在根据过程的特征时间分为三个层次: 首先, 最快的是物理过程, 包含在 PHY 模块中, 取积分时间步长为 $5 \sim 30 \text{ min}$; 其次, 是植物生理过程, 如光合、呼吸等, 随太阳辐射、温度和湿度变化, 有明显的日变程, 取时间步长为 1 h ; 再次, 是光合同化物的分配和器官生物量积累, 数天之内才有显著变化, 所以, 每 1 天计算 1 次。图 1 显示了模式的计算流程和模块之间的关联。将大气变量 (温、湿、风、辐射、降水和 CO_2 浓度等)、植被形态参数 (株高、LAI 等) 和土壤物理参数 (土壤容重、饱和热传导率、饱和水势孔隙度等) 输入物理模块 (PHY), 以决定植冠、土壤温湿变化和感热、潜热通量等, 进而输入生理生长模块 (VEG) 计算生理过程, 输出 CO_2 通量, 然后是植物各组织的生物量积累。同时, 植被形态和结构 (如叶面积指数等) 也发生了变化, 由此导出新的植冠动力学参数 (如粗糙度等), 再反馈到物理模块。这就实现了植物生理过程和物理过程之间的双向反馈。

4 冬小麦生长过程模拟

上述陆地表面生物物理和生理过程模式适用于各种生态系统。但要全面地检验模式必须有完整的同时性的大气、植被和土壤的物理和生物学的观测资

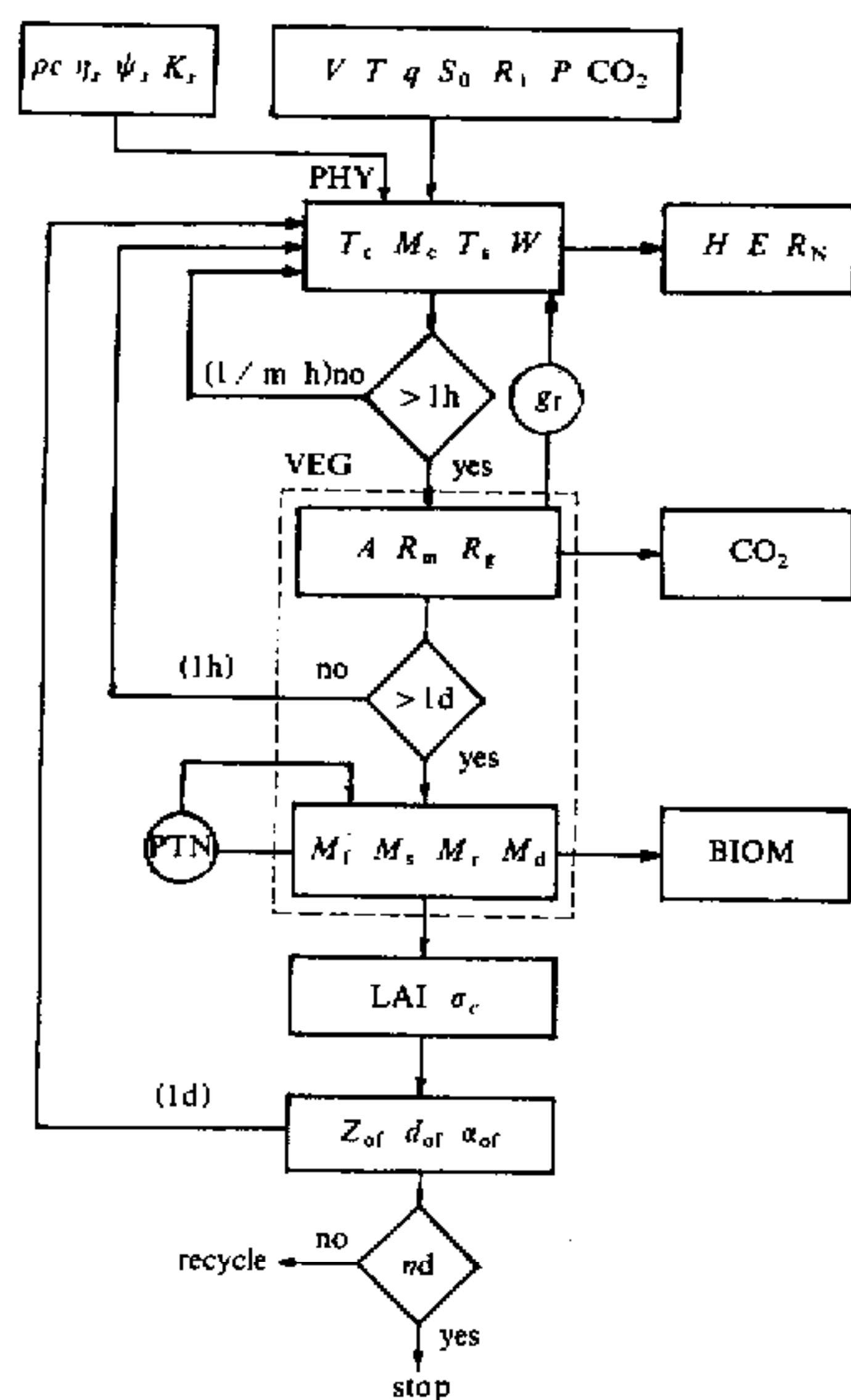


图 1 模式结构和计算流程图

由上向下是大气、土壤参数, PHY 和 VEG 模块, 右端为输出量, BIOM 为各器官的生物量, PTN 是光合产物的分配, 其余符号见文中

料。中国华北禹城试验站提供了农业生态系统的有关资料系列。

试验的作物是冬小麦。观测从小麦返青开始, 经拔节、孕穗、抽穗、灌浆和黄熟各生长期, 即从 1992 年 3 月 23 日至 6 月 4 日共 74 天。植株的平均高度在观测开始时为 20~30 cm, 黄熟时为 70~80 cm。叶面积指数最大在抽穗期, 约 6.5。

模式中植冠分为 10 层, 从株高到地面均匀分布。设叶面积指数随高度呈指数分布, 冠层中部最大。土壤分为不等距的 10 层, 自地面向下各层厚度为 0.02、0.08、0.1、0.15、0.25、0.4、0.5、0.5、0.5、0.5 m。土壤为壤土。模式输入的大气变量是短波辐射、风速、温度、湿度、降水和 CO_2 浓度。积分时段从小麦返青直到收割。

首先来看地表物理状态和地表通量的模拟结果。模式合理地模拟了植冠层和土壤各层的温度和湿度状况, 给出了土壤湿度的变化历程。土壤湿度是小麦生长的关键性影响因子, 生长期内有 5 次降水和 3 次灌溉。降水集中在 5 月上、中旬, 最强一次为 26.4 mm; 灌溉分别在拔节期、孕穗期和黄熟期, 每次 100 mm 左右。所以供小麦生长的主要水源是灌溉。图 2 是 5 cm 和 80 cm 深处的土壤体积含水量, 模拟的变化趋势与观测值是一致的。80 cm 深层含水量最高, 在 0.4 上下变化动, 5 cm 深处含水量较低, 变化

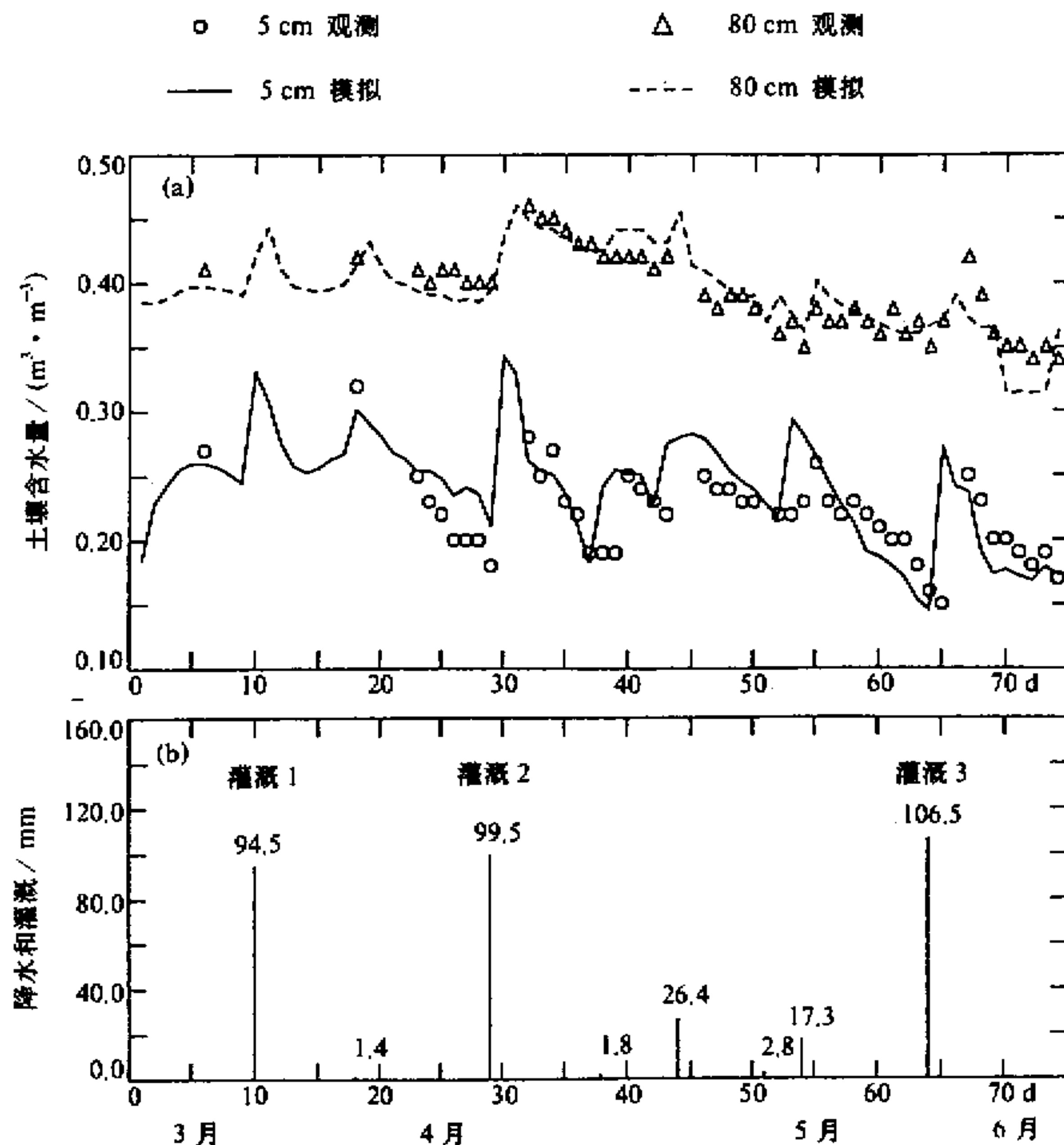


图 2 模拟时段内 5 cm 和 80 cm 深的土壤含水量 (a) 和降水、灌溉的变化 (b)

于 0.15~0.30 之间。每次降水或灌溉都在含水量上出现一个峰值, 雨后迅速下降, 浅层更明显。4 月下旬以后含水量有逐渐下降的趋势, 是因为叶面积指数增大, 蒸腾加大了。

模拟期内, 我们还进行了麦田的净辐射、感热、潜热和土壤热通量的测量(但缺少冠层内部的观测)。图 3 是地表各物理通量日总量的观测和模拟。可以看到, 净辐射明显地逐渐增大, 生长后期到达 $1.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 这主要是由于从 3 月到 6 月太阳辐射增强。同时, 随小麦生长, 反射率也减小了, 吸收辐射增加了, 其中有几次低谷对应了降水过程, 云量增大减少了太阳短波辐射。在孕穗期及抽穗初净辐射的模拟值偏高, 其间, 麦田叶面积指数最大在 5.0 以上。而长波辐射传输中未考虑冠层对长波的反射, 使夜间的长波吸收增大导致净辐射值高。其它时段的观测和模拟是相当一致的。

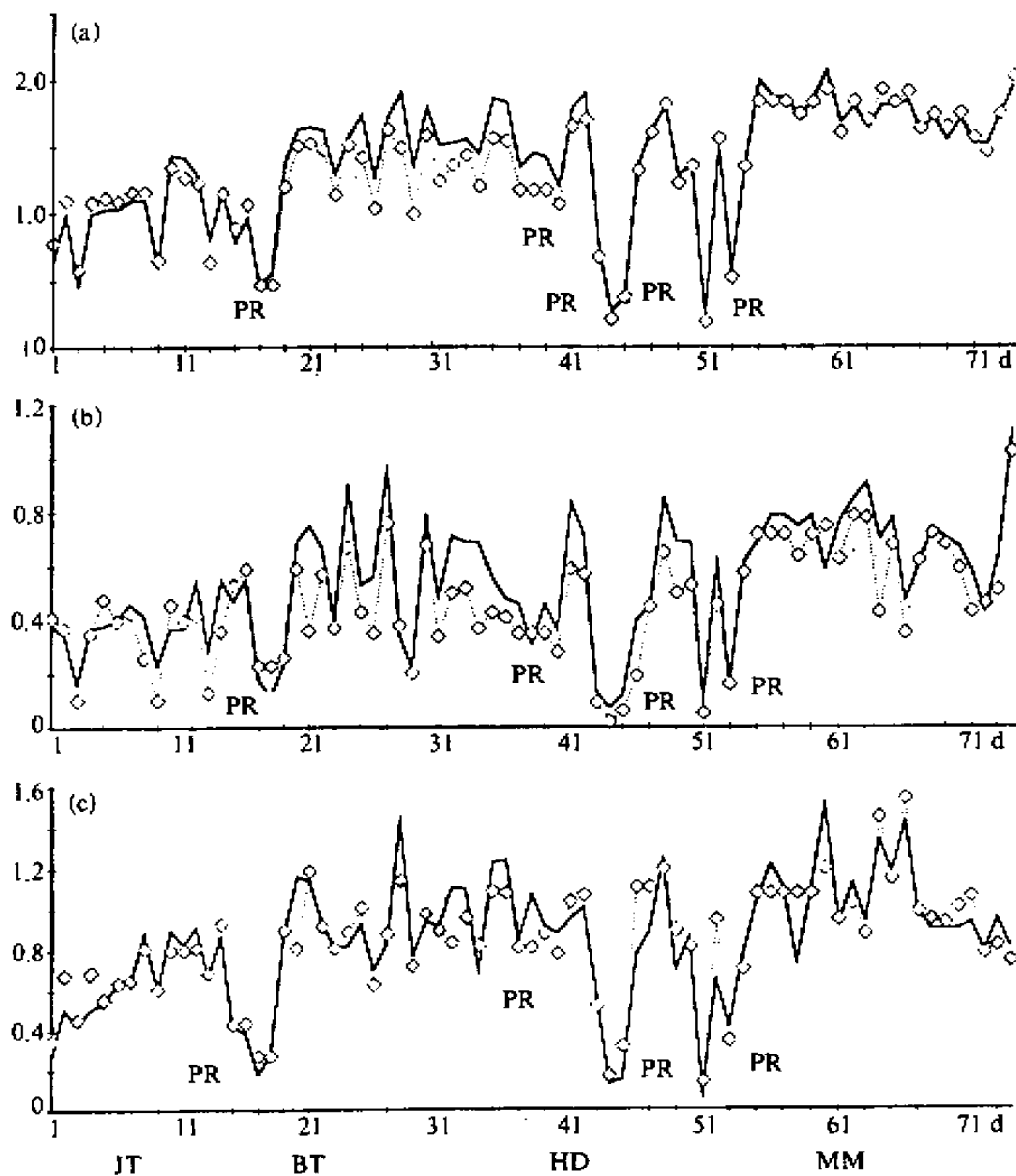


图 3 模拟期小麦田能量平衡各分量的日总量变化

(a) 净辐射; (b) 感热; (c) 潜热, 单位: $10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。虚线为观测值, 实线为模拟值。

PR 表示降水, JT、BT、HD、MM 分别表示拔节、孕穗、抽穗和灌浆黄熟期

感热通量在拔节期和抽穗期较弱, 孕穗期较强, 灌浆黄熟期最强。潜热通量也是在拔节期最弱, 而以后除抽穗后期因净辐射的几次低谷与感热通量同时降低外, 强度变化不大。总的说来, 整个模拟期波文比在 0.5~0.7 之间, 潜热强于感热, 拔节时净辐射值, 感热和潜热通量值都较低, 波文比约为 0.5。孕穗期间, 小麦植株增长迅速, 潜热增长大于感热, 波文比大于 0.6。黄熟期辐射强, 气温高, 小麦叶片变黄, 蒸腾略有下降, 同时感热通量明显增强。我们看到地表吸收的辐射能在感热、潜热通量之间的分配与小麦的生长情况相联系。随着小麦的生长, 地上生物量不断变化, 冠层的结构也随之变化, 这就影响着冠层间和其上的湍流交换强度和蒸腾的变化等。就整个模拟时段而言, 模拟与观测的比较, 其结果是成功的。模拟的感热和潜热通量的变化趋势与观测很一致, 反映了不同生长期通量变化的特点和数值。在孕穗期感热通量模拟值偏高与净辐射值高有关。下面的相关计算也说明这一点。对于净辐射、感热和潜热通量而言, 观测与模拟值之间的相关为

$$R_{n,mod} = 0.062 + 1.003 R_{n,obv}, \quad r = 0.992$$

$$H_{mod} = 0.072 + 1.019 H_{obv}, \quad r = 0.805$$

$$\lambda E_{mod} = -0.011 + 1.011 \lambda E_{obv}, \quad r = 0.818$$

下标“mod”和“obv”分别表示模拟值和观测值, r 是相应的相关系数。

模式同时模拟了冬小麦自返青到黄熟生长的全过程。图 4 是小麦各组分生物量的观测和模拟值。生物量观测基本上每 10 天 1 次, 由图 4 可以看出小麦生长的规律性。拔节期和孕穗期, 光合同化产物主要分配给光合组织——绿叶和营养生长器官——绿茎和根, 小麦叶茎根迅速增长, 叶面积达到最大值, 无籽粒生长; 进入抽穗期, 更多的同化物被储存, 形成籽粒, 随着生物量增加和气温升高, 各器官维持呼吸不断增大, 叶片的

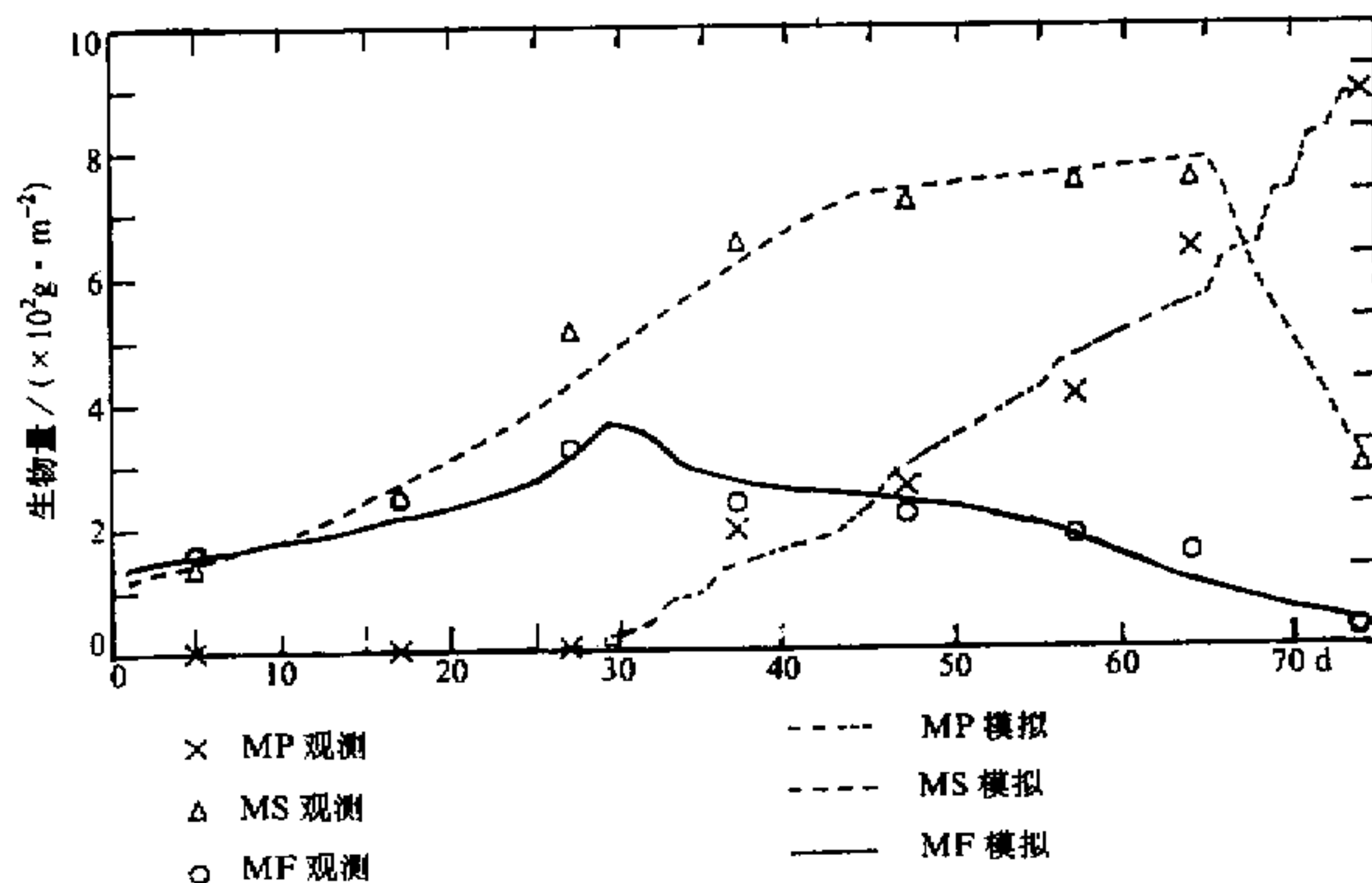


图 4 小麦各组分生物量的模拟和观测比较

MF: 绿叶, MS: 绿茎, MP: 籽粒

呼吸和枯黄超过同化物的分配, 叶生物量下降, 籽粒干重迅速增加; 黄熟后, 叶储存的同化物向其它器官转移, 绿茎生物量由稳定而减小, 籽粒干重达到最大。模拟的结果基本上反映了上述的生长规律。华北地区春夏季的辐射和温度可以满足小麦生长的需要, 但气候干燥少雨, 生长期内 3 次灌溉保证了小麦的正常生长。

小麦生长的过程, 也是麦田与大气 CO_2 交换的过程。图 5 给出了 CO_2 通量, 包括 3 个部分, 即小麦光合作用从大气中的吸收和小麦呼吸及土壤微生物分解向大气中的放出。在模拟的前 50 天, 即小麦灌浆之前为正值, 作物生态系统是 CO_2 的汇, 最大值达 $2.8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应叶面积指数最大时段, 此后一直下降, 灌浆开始后通量值为负, 即释放到大气中的 CO_2 大于吸收, 作物成为 CO_2 的源, 最大值在黄熟期, 光合已停止而呼吸最强。

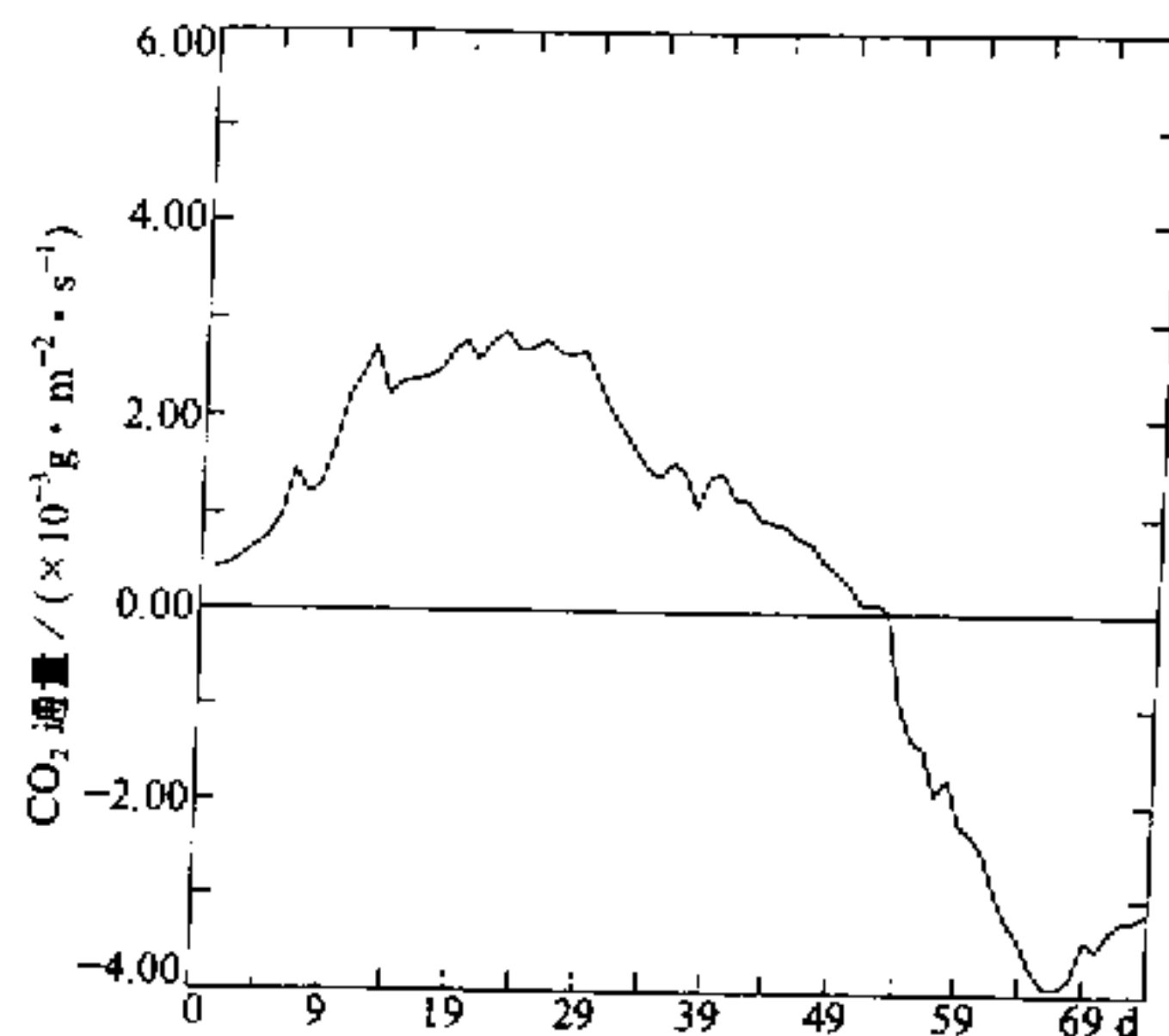


图 5 小麦田与大气 CO_2 通量模拟
正值表示由大气输入小麦田, 负值相反

5 结语

本文在 LPM 和 AVIM 模式的基础上建立了一个多层植冠层和土壤层的大气植被相互作用模式, 详细描述了冠层中辐射传输和水热交换过程, 因而能准确地计算植物的光合、呼吸等生理过程。另一方面, 植物因生长而引起生理和形态上的变化也影响地气间的能量和物质的输送。在冬小麦的模拟中可以看到这种相互反馈的作用过程。小麦的返青、拔节和黄熟都与太阳辐射和气温密切相关, 而孕穗、灌浆过程决定于土壤水分的供给。地气间水、热通量的变化与小麦的生长阶段, 特别是叶面积指数紧紧相联。

多层大气植被模式的发展为模拟和预测植物生长和地气间水、热和 CO_2 通量和了解冠层和土壤层的交换过程和生理过程的联系提供了一个有效的工具。

致谢 本研究一直得到叶笃正院士的指导和支持, 在此深致谢意。项月琴研究员、莫兴国博士提供了禹城资料, 林紫薇做了许多技术性工作, 一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Ji Jinjun, 1995, A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface, *Journal of Biogeography*, 22, 445~451.
- 2 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.
- 3 Bonan, G. B., 1995, Land-atmosphere CO_2 exchange simulated by a land surface process model coupled to an

- atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **100**, 2817~2831.
- 4 Foley, J. A., et al., 1996, An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 603~628.
 - 5 胡玉春, 1995, 植被与大气、土壤相互作用的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
 - 6 Ross, J., 1981, The Radiation Regime and Architectural of Plant Stands, Ed. W. Junk, The Hague, 1~15.
 - 7 Raupack, M.R. and Thom, A. S., 1981, Turbuence in and above plant canopies, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 97~129.
 - 8 Norman, J. M., 1979, Modification of Aerial Envinronment, Eds. B. J. Barfield and J. F. Gerber, ASAE, 1~45.
 - 9 Ji Jinjun and Hu Yuchun, 1989, A simple land surface process model use for climate study, *Acta Meteorologica Sinica*, **3**, 342~351.
 - 10 季劲钧、胡玉春, 1992, 大气-植被-土壤模式及初步试验, 气候变化若干问题研究, 李崇银主编, 北京: 科学出版社, 205~214.
 - 11 季劲钧, 1996, 陆地表面物理和生物学过程年变程的模拟, 全球变化与我国未来的生存环境, 符淙斌、严中伟主编, 北京: 气象出版社, 248~258.

A Multi-Level Canopy Model Including Physical Transfer and Physiological Growth Processes

Ji Jinjun and Hu Yuchun

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

Abstract Based on a feedback mechanism between physiological growth processes of plant and abiotic environment—soil and atmosphere, a multi-level Atmosphere-Vegetation Interaction Model (AVIM) to link physical transfer and physiological growth processes at land surface is proposed. Observational data of winter wheat field collected from Yucheng agricultural ecosystem station, North China, March-June 1992, has been used to simulate the wheat growth and surface fluxes with the multi-level AVIM. The results show that energy budgets, thermal and moisture states of canopy and soil are well simulated, and the simulated biomass of tissues, leaf area index and CO₂ flux are in agreement with the observations.

Key words atmosphere-vegetation interaction modeling agricultural ecosystem land surface process