

评估4种寒区陆面、水文过程模式及在青藏高原的应用前景

段志华, 张钰, 张伟, 王一博

(兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 近年来, 青藏高原冻土区气候环境呈现出逐年恶化的趋势, 主要表现在永久冻土锐减, 冻土活动层逐渐增厚, 地表植被情况退化严重等, 这一地区的气候环境、水环境和生态环境等越来越受到各国研究者的关注和重视。陆面过程模式的作用已得到许多学者的认可, 如何构建更有效的针对寒区的陆面过程模式成为寒区研究的重点、热点之一。本文分别选取美国、西欧和加拿大(两个)4个寒区陆面过程模式(依次为 SHAW、COUPMODEL、EASS、CRHM), 对4个模式的原理和物理机制进行了说明和对比; 同时, 简要介绍了4个模型在寒区研究过程中已取得的进展, 部分模式已经成功应用于青藏高原冻土区并取得了相当好的模拟效果。对比分析4种模式, 指出了4种现存模式的优缺点和相应的改进方案, 证明4种模式可以在青藏高原冻土区单独使用, 并指出几种模式耦合可能成为未来解决青藏高原冻土区甚至全球冻土区陆面过程问题的重要途径。

关键词: 冻土区; SHAW; COUPMODEL; EASS; CRHM; 耦合; 水文过程; 青藏高原

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2012)06-0043-08

Application research of four cold regions land surface and hydrological model to Qinghai – tibet plateau frozen soil region

DUAN Zhihua, ZHANG Yu, ZHANG Wei, WANG Yibo

(College of Earth & Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In recent years, the climatic environment of Qinghai – Tibet plateau frozen soil regions is becoming worse and worse year by year, which mainly consists of obvious permafrost decrease, more thickness of the frost soil active layer and degeneration of the vegetation. Climatic, water and ecological environment of this region is focused by researchers from many countries and districts. The ability of land surface model is approved by lots of scientists and it is emphasis of cold regions research that how to construct cold regions land surface model. This paper choose four land surface model (SHAW、COUPMODEL、EASS、CRHM) from USA, Western Europe and Canada (including two) and analysis principle and physical mechanisms of four models. At the same time, brief introduction of application in cold regions of four models, some models have been used to the Qinghai – Tibet plateau frozen soil regions and made quite a good simulation results, is included in this paper. By comparing four models, the paper found individual advantages, disadvantages and thinks that four models can be used on the Qinghai – Tibet plateau frozen soil regions individually and it is a significant approach to solve land surface problems of Qinghai – Tibet plateau, even global frozen soil regions as several models couple each other.

Key words: frozen soil; SHAW; COUPMODEL; EASS; CRHM; coupling; hydrological proces; Qinghai – Tibet plateau

1 概述

作为气候系统的一部分, 青藏高原冻土变化作

为亚洲乃至全球气候变化的重要驱动因子, 对气候变化研究起着关键的作用。近年来, 随着全球气候变暖, 青藏高原冻土区冻土活动层厚度逐渐增大, 永

收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2012-10-08

基金项目: 冻土国家重点实验室开放基金 (SKLFSE201109)

作者简介: 段志华 (1988-), 男, 甘肃靖远人, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源与工程水文。

通讯作者: 张钰 (1963-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授级高工, 研究方向为流域生态水文、水资源调查评价、水资源配置。

久冻土区面积正逐渐萎缩^[1-2]。在过去的20年中,重要的永久冻土退化事件已经或正在发生^[3]。较长期的温度观测也显示:在过去的35年内,青藏高原北麓永久冻土的海拔下限提高了25 m,而青藏高原南麓的永久冻土海拔下限更是在过去的20年内提高了50~80 m^[4-5];同时,从1996年到2001年5年的时间内,冻土活动层厚度增加了0.15~0.5 m,地表以下6 m处观测的土壤温度升高了0.1℃~0.3℃^[5]。李新等预测,到2100年,青藏高原将有1/3到1/2的永久冻土将消失或者退化为季节性冻土区^[6]。伴随着冻土退化,在过去15年间(1986-2000),青藏高原的高寒草甸也出现了较严重的退化^[7],进而加剧了永久冻土的退化,活动层厚度继续增大。

所谓陆面过程,是指发生在大气、地表(即下垫面,例如植被、雪盖、冰川等)和土壤层之间的能量、水分和动力交互作用的过程总和。陆面过程主要研究地表以上的能量重分配过程、地气间的能量传输、地表以下的能量传输和地-气及地下的水分、物质运移;同时,陆面过程更加关注地表状况,主要包括地表类型、反照率和叶面积指数等。从20世纪80年代开始,陆面过程开始逐渐成为各国水文、气象、环境和生态等方面专家的重视^[8-9],并且出现了学科交叉的趋势,很多重要的实验研究计划得以实施,例如FIFE(第一次国际卫星陆面气候计划试验)^[10]、LBA(亚马逊流域大尺度生物-大气圈试验)、QXP2-MEX(青藏高原气象科学实验)、GAME-Tibet^[11](全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究)和CAMP-Tibet(全球协调加强观测计划(CEOP)亚澳季风之青藏高原试验研究)等,这些研究在陆面过程方面都取得了重大的进展。

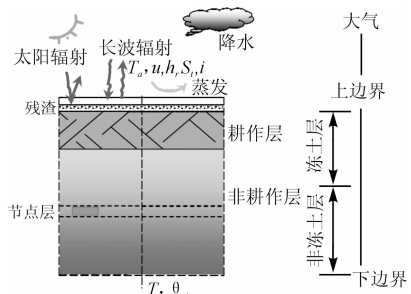
陆面过程模式主要应用基于物理机制或经验公式建立起来的计算机模型对陆面过程问题进行研究分析,进而预测未来情况下陆面过程各因素的变化趋势。由于青藏高原特殊的高海拔地理位置和高原严寒气候条件,特别是雪盖、冰川和冻土的存在,很多陆面过程模式在该地区无法使用或应用效果很不好。为此,包含细化了积雪融化过程、冰川消融及积雪成冰过程和冻土冻融过程的陆面过程模式研究成为该地区陆面过程模式研究的重点。本文主要介绍寒区陆面过程模式的基本原理,详细介绍近期发展起来的可以应用在寒旱区的陆面过程模式(SHAW(The Simultaneous Heat and Water Model)、COUP-MODEL(Coupled Heat and Mass Transfer Model for

Soil-Plant-Atmosphere System)、EASS(Remote Sensing-Based Ecosystem-Atmosphere Simulation Scheme)和CRHM(Cold Regions Hydrological Model))的特点、已取得的研究成果和模式在青藏高原冻土区的应用展望。

2 四种寒区陆面过程模式

2.1 SHAW

Flerchinger和Saxton(美国农业部农业研究服务中心西北流域研究中心)等人于1989年提出SHAW模型,并于1996年对模型进行了修正,其后Flerchinger等人及其他研究者又对Shaw模型部分进行了简单的修正。Shaw模型是一维的陆面过程模型,模型最初的目的是细化模拟冻土的冻结、融化过程。Shaw模型的基本物理结构如图1所示。



T_a :气温; u :风速; h_r :相对湿度; S_t :太阳辐射;
 i :降水; T :土壤湿度; θ :含水量

图1 SHAW模型结构示意图

2.1.1 SHAW模型基本原理

(1)能量传输过程。①能量平衡原理

$$R_n + H + L_v E + G = 0 \quad (1)$$

式中: R_n 、 H 、 $L_v E$ 、 G 依次为净辐射、感热、潜热和土壤热通量。

②净辐射。

$$\tau_d = \tau_t \left[1 - \exp\left(\frac{0.6(1 - B/\tau_t)}{B - 0.4}\right) \right];$$

$$S_s = S_b \sin\beta / \sin\varphi_s \quad (2)$$

式中: τ_d 、 τ_t 、 B 、 S_s 、 S_b 、 β 、 φ_s 分别为大气扩散透射系数、大气总投射系数、大气最大晴空传导度、直接辐射、漫射辐射、光线与地面的夹角和太阳高度角。

③冠层内的太阳辐射。

$$\tau_{b,j} = \exp\left(-\sum_{j=1}^{NP} K_j L_{i,j}\right) \quad (3)$$

式中: $\tau_{b,j}$ 、 K_j 、 $L_{i,j}$ 分别为冠层 j 内的直透射率、叶面积指数和消光系数。

④长波辐射。

$$L_i = \varepsilon_{ac} \sigma T_K^4 \quad (4)$$

式中: ε_{ac} 、 σ 、 T_K 分别为大气发射率、波尔兹曼常数和空气温度。

⑤ 感热通量。

$$H = -\rho_a c_a \frac{(T - T_a)}{\gamma_H} \quad (5)$$

式中: ρ_a 、 c_a 、 T_a 依次为相对高度处空气密度、热容量(比热)和温度, T 、 γ_H 则为交互界面处的温度和热传输过程中表面阻抗。

⑥ 通过冠层的热通量。

$$\rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_a c_a k_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H_1 \quad (6)$$

式中: ρ_a 、 c_a 、 T 分别为冠层内的空气密度热容量(比热)和温度, t 、 k_e 、 H_1 、 z 分别代表时间、冠层内的传导系数、传递的感热和从冠层顶部算起的高度。

⑦ 雪盖中的热通量。

$$\begin{aligned} \rho_{SP} c_i \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 L_f \frac{\partial w_{SP}}{\partial t} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_{SP} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial R_n}{\partial z} - L_S \left(\frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: ρ_{SP} 、 w_{SP} 、 k_{SP} 分别代表密度、液态水体积含水量和热传导度, c_i 、 ρ_1 、 L_f 、 L_S 、 R_n 、 q_v 、 ρ_v 依次为冰的热容量、水密度、融化潜热、升华潜热、雪中净向下辐射、水汽通量和水汽密度。

⑧ 枯落物中的热传输。

$$C_r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_r \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial R_n}{\partial z} - L_v \left(\frac{h_r \rho'_{vs} - \partial \rho_v}{\gamma_h} \right) \quad (8)$$

式中: C_r 、 T 代表枯落物的体积热容量和温度, k_r 、 h_r 、 ρ'_{vs} 、 ρ_v 、 γ_h 、 R_n 分别代表热传输系数、相对湿度、饱和水汽密度、水汽密度、边界层阻抗和净向下辐射。

$$\begin{aligned} \text{⑨ 土壤中的热传输。} \quad C_r \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_i L_f \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho_1 c_1 \frac{\partial q_1 T}{\partial z} - L_v \left(\frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: C_r 、 T 、 ρ_i 、 θ_i 、 k_s 、 ρ_1 、 c_1 、 q_1 、 q_v 、 ρ_v 分别为土壤体积热容量、土壤温度、冰密度、体积含冰量、土壤热导率、水密度、水的热容量、液体水通量、水汽通量和水汽密度。

(2) 水分传输过程。① 冠层中的水通量。

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) + E_1 \quad (10)$$

式中: E_1 为叶面的蒸散发。

$$\text{② 冠层中的蒸散发。} \quad T_j = \sum_{k=1}^{NS} \frac{\psi_k - \psi_{\chi,j}}{r_{r,j,k}}$$

$$= \sum_{k=1}^{NS} \frac{\psi_{x,j} - \psi_{l,i,j}}{r_{l,i,j}} = \sum_{k=1}^{NS} \frac{\rho_{vs,i,j} - \rho_{v,j}}{r_{s,i,j} + r_{h,i,j}} L_{i,j} \quad (11)$$

式中: T_j 、 ψ_k 、 $\psi_{\chi,j}$ 、 $\psi_{l,i,j}$ 、 $r_{l,i,j}$ 、 $r_{r,j,k}$ 、 $\rho_{vs,i,j}$ 、 $\rho_{v,j}$ 分别为冠层 j 的总蒸散率、冠层 k 的水势、木质部水势、叶水势、土壤对水流的阻抗、叶对水流的阻抗、气孔内的水汽密度和冠层空隙中水汽密度。

③ 流经枯落物的水通量。

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h_r \rho'_{vs} - \rho_v}{r_h} \right) \quad (12)$$

式中: ρ_v 、 K_v 、 h_r 、 ρ'_{vs} 、 r_h 依次为: 水汽密度、气体对流传输系数、相对湿度、饱和水汽密度和水汽传输阻抗。

④ 土壤内的水通量。

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + \frac{\rho_i \partial \theta_i}{\rho_1 \partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) + \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U \quad (13)$$

式中: K 、 ψ 、 U 分别代表: 非饱和水力传导度、土壤基质势和水流源汇项。

⑤ 溶质通量。

$$\rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = \rho_l \frac{\partial}{\partial z} \left((D_H + D_m) \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \rho_l \frac{\partial (q_l c)}{\partial c} - \rho_b V \quad (14)$$

式中: ρ_b 、 S 、 D_H 、 D_m 、 q_l 、 c 、 V 依次为土壤容重、总的溶质、水动力扩散系数、分子扩散系数、液态水通量、溶质浓缩和溶质消散或萃取源汇项。

2.1.2 SHAW 应用 经过多次修正和改进, 现有的 SHAW 模型具有同时模拟冠层、雪层、枯落物层和土壤层的水、热运移能力。SHAW 模型可以对冻土区土壤冻结、雪的融化、径流、土壤温度、水分和蒸散发等进行较精确的模拟。

早在 1991 年, Flerchinger 等就对模型进行了验证, 模型输出了模拟的地温和水势, 模型的输出结果与实测值实现了很好的吻合: 其中, 地温模拟的模型有效系数达到了 0.97; 但是, 随着深度的增加, 模型的有效系数逐渐降低, 显示了模型对更深程度的模拟存在问题^[12]。Flerchinger 等也就冠层对土壤水、热的模拟进行了改进, 对模型和参数化方案进行了优化, 其中包括叶面积指数从常数变为植被状况的函数, 把蒸散发的起始温度从 1℃ 增加到了 7℃ 增加了模型的模拟深度等。这些改进使模型的有效系数得到了很大的提高, 特别是在土壤水分的模拟方面^[13]。随后, Flerchinger 等又对模型模拟不同冠层暂时能量平衡的能力进行了检验, 结果显示模型对灌丛的模拟有效性达到了 65%, 草地则高达 98%, 而两种覆盖类型的地表温度模拟则达到了 94%^[14]。通过改进能量在残留物中的传导度, 模型

的有效性进一步提高^[15]。近期, Flerchinger 对表面的辐射交换进行了模拟, 尽管模型的平均偏差 (MBE) 达到了 $-5\text{W}/\text{m}^2$ 到 $-10\text{W}/\text{m}^2$, 但模拟还是提供了很好的参考依据^[16]。

由于 SHAW 模型较好的模拟效果, 国内很多科研工作者的已将其应用于国内的科学研究, 在黄土高原、内蒙古草原、黑河流域和青藏高原得到了较广泛的应用。康尔泗等利用 SHAW 模型模拟了黑河上游祁连山区青海云杉林和草地两种不同下垫面的能量平衡和水平衡, 结果显示: 能量平衡方面, 阳坡青海云杉林吸收的净辐射比阴坡草地多, 草地释放的潜热远大于感热, 而青海云杉林则正好相反, 但差距没有草地大; 在水平衡方面, 草地的水分流失以土壤蒸发为主, 青海云杉林的蒸散比草地少得多, 据此可以解释森林具有更好的保水效果^[17]。周剑等对青藏高原多年冻土分布的风火山左冒空流域, 不同覆盖情况下的土壤水热进行了模拟, 表明该区的能量交换主要受冻土、植被、表层土壤含水量控制, 植被对冻土具有明显的隔热保温作用, 大大降低了冻土对气候变化的响应^[18]。青藏高原唐古拉监测点的模拟结果则显示

SHAW 对活动层陆面能量通量和土壤温度模拟较好, 对某些土壤水分模拟不是太理想^[19]。SHAW 模型在青藏高原上使用需进一步修正。

2.2 Coupmodel

Coupmodel 是 Winsoil 模型的更新版本, 模型于 2004 年是由 Jansson and Karlberg (瑞典皇家工学院) 基于达西定律和傅里叶函数开发而成的。模型本身包含多个子模块, 整合了陆面过程中的各个环节, 包括辐射、蒸散发、截留、融雪、冰川的冻融和重冻结、表面流、水热在地-气和地表以下交互、冻土的冻融过程、下渗、地下水的流动和碳氮循环, 实现了模型的结构化。Coupmodel 包含了很多参数化方案, 主要包括基于物理机制构建的复杂参数化方案和简化的经验参数化方案, 用户可以方便地自由选取。Coupmodel 加入了不确定性分析, 模拟结果可以作为一个模拟的区间输出, 方便用户对模型的输出结果进行综合的评估。同时, 模型可以对自动对参数进行估计和修正, 在实测数据不足的情况下, 模型的模拟结果可以作为参考。Coupmodel 模型的水热过程和 C-N 过程详见图 2、图 3。

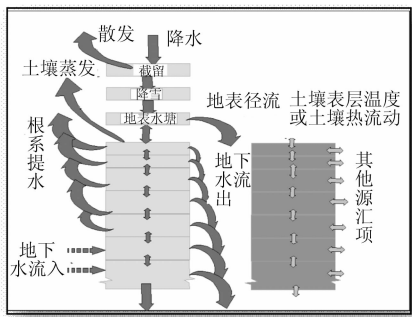


图 2 Coupmodel 中的水热过程示意图

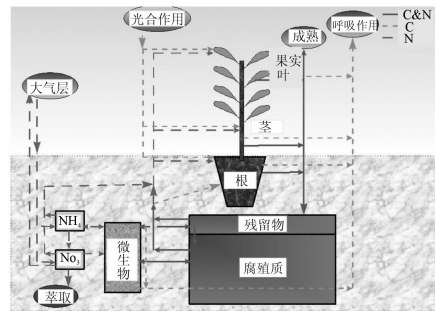


图 3 Coupmodel 中的 C-N 过程示意图

2.2.1 Coupmodel 几个重要公式

(1) 土壤热通量。

$$q_h = -k_h \frac{\partial T}{\partial z} + C_w T q_w + L_v q_v \quad (15)$$

式中: h, v, w 分别代表热、水汽和液态水, q, k, T, C, L, z 分别是通量、传导度、土壤温度、热容、潜热和深度。

(2) 冻土热传导系数。

$$k_{ho,i} = \left(1 + hQ \left(\frac{\theta}{100}\right)^2\right) k_{ho} \quad (16)$$

其中: Q, k_{ho}, θ, h 分别代表土壤层热量、土壤中热传导度、含水量、试验参数。

(3) 土壤中水通量。

$$q_w = -k_h \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1\right) - D_v \frac{\partial c_v}{\partial z} + q_{bypass} \quad (17)$$

式中: $k_h, \psi, z, c_v, D_v, q_{bypass}$ 分别代表: 非饱和水力传导度、水张力、深度、水汽浓缩、水汽弥散系数和绕流通量。

(4) 空气动力学阻抗。

$$r_a^* = \frac{\ln^2 \left(\frac{z_{ref} - d}{z_0}\right)}{k^2 u} \quad (18)$$

其中: z_{ref}, d, z_0, k, u 分别代表相对高度、位移高度、粗糙度、卡曼常数和风速。

2.2.2 Coupmodel 应用 模型自开发出来以后, 地-气和土壤内的水热运输已经得到了大量科学实验的验证, 模型在生态作用过程中的作用的得到了充分的证明, 模型的能力和模拟效果逐渐得到了认可。

Louise Karlberg 等成功模拟了咸水作用下的植

物光合作用和蒸腾作用^[20]。J. R. Christiansen 等利用新西兰同种土壤类型上毗邻的落叶山毛榉林和常青针叶林研究了不同树木种类和人工造林对水平衡和冻土区水分流动的影响,同时也模拟了两种林地的 C、N 过程^[21]。在瑞典北部针叶林区,利用 Coupmodel 的不确定性估计,模拟了主要的碳、水和热通量,主要物种平均生产碳为 $641 \pm 74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,总的生态呼吸碳为 $570 \pm 55 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,净生态生产碳为 $71 \pm 37 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[22]。模型对整个 N 循环也可以进行很好的模拟^[23-24]。

在国内,Coupmodel 同样得到了广泛的应用。应用黄土高原 2001 年到 2004 年观测资料,评估了植被覆盖对冬小麦水平衡和水资源利用效率影响,模拟结果显示:与常态下的植被覆盖相比,认为增加植被覆盖面积可以提高土壤的水存储能力大约 5% ~ 8%,可以减少大约 11% ~ 13% 的土壤蒸发,同时,小麦的蒸散量增加了 2% ~ 5%,从而提高了水资源的有效利用能力^[25]。不同土地管理体制对水平衡的影响也得到了很好的模拟结果^[26]。在冻土区,阳勇等利用黑河流域 2005 - 2007 年连续两年气象观测资料模拟了该区高山草甸冻土带水热传输过程,结果表明:地温的模拟结果明显好于土壤水分的模拟,且浅层好于深层,这可能与模型设置的土壤完全冻结临近温度阈值偏高有关^[27]。模型在冻土区特别是青藏高原的应用较少,在青藏高原多年冻土区,张伟^[28]等利用长江源区风火山观测站 2005 - 2008 年的气象和土壤水热观测数据,成功模拟了地气间的水热运移过程和多年冻土活动层冻结 - 融化过程;同时,Bayes 参数优化估计算法可有效估计多年冻土区的模型参数,有效改善模型模拟结果的精度,为缺少资料寒区的水文过程模拟提供了有效地途径。

2.3 EASS

2007 年,陈报章(中国科学院地理科学与资源研究所)等构建了具有自主知识产权的集陆面过程和生态过程于一体的综合模型,EASS。该模式遵循 SPAC(Soil - Plant - Atmosphere Continuum) 一体化理论,是一个多尺度、多元数据融合的综合陆面过程模式。该模型与遥感定量反演的地学物理参数融合,在国际上首次把树冠簇团指数(foliage clumping index)引入陆面过程模型中,优化了冠层内辐射传输的模拟,强化了土壤层 - 冻土层 - 冰雪层的水、热交换的模拟(面向用户,层数可变),较显著提高了陆地表层与大气之间的能量、物质(包括水、碳、氮等)交换过程的模拟精度。该模型已被加拿大、美

国和欧洲许多研究人员应用于陆地生态系统碳、水、能量循环过程、陆面格局与变化规律以及定量估算各种尺度陆地表层 C 源/汇分布信息等方面的研究中。EASS 的物理结构示意图如图 4 所示。

2.4 EASS 中两个重要公式

(1) 太阳直射的叶面积指数。

$$LAI_{sum} = 2\cos\beta_z \left[1 - \exp\left(\frac{-0.5\Omega LAI}{\cos\beta_z}\right) \right] \quad (19)$$

式中: β_z 、 Ω 、 LAI 依次为: 太阳高度角、树冠簇团指数、叶面积指数。

(2) 冠层温度。

$$t_c = t_r +$$

$$\frac{I_p - (\psi_0 - \psi_f)(\theta_0 - \theta_f) \ln \frac{(1 + I_p)}{(\psi_0 - \psi_f)(\theta_0 - \theta_f)}}{k_0} - t_p \quad (20)$$

式中: t_r 、 I_p 、 ψ_0 、 ψ_f 、 θ_0 、 θ_f 、 k_0 、 t_p 分别代表: 累计持续时间、潜在渗流率、土壤水分吸力、凋萎点土壤水分吸力、含水量、初始含水量、土壤水力传导度、降水持续时间。

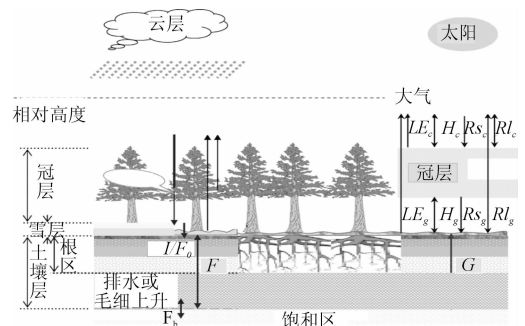


图 4 EASS 模型物理结构示意图

EASS 自研发以来,还没有得到广泛的应用。陈报章等人仅在模型建立之初,对模型进行了验证。结果显示,在两个地点四年的冠层表面温度按日模拟都与实测值拟合较好;2001 年净辐射、感热、潜热和能量通量的模拟结果较真值表现出了一致性;模型对蒸散发的模拟效果也较好^[29]。目前,EASS 还缺乏试验验证,特别是在寒区,但模型本身基于遥感技术反演地表参数的理念有利于模型在大尺度上地面资料的获取。

2.5 CRHM

CRHM 由 Pomeroy (加拿大萨斯喀彻温大学水文学研究中心)等人基于水文物理过程的参数化方案研发而成的,模型的目的是对高海拔、高纬度地区中尺度的水文循环过程进行模拟。该模型属于模块化的分布式模型,便于用户使用。CRHM 最大的优

点在于其开放性,用户可以根据自己研究区域的实际情况,采用 dll 添加需要的模块。现有的 CRHM 可以模拟土壤渗流、雪的融化、辐射过程、蒸散发、风吹雪的运动、截留、升华、土壤水平衡、水储存、表面径流、地下径流和流动的路径等。CHRM 主要为了达到以下目的:实现水平衡的空间分布计算,使用有重要水文参考价值的参数进行自然景观单元划分,建立对地表和气候敏感的陆面过程模式,能够有效地与其它模式进行耦合,实现与 GIS 有机融合等。

2.5.1 CHRM 中两个重要的算法

(1) 风吹雪运动。

$$\frac{dSWE}{dt}(x) = P - p \left[\nabla F(x) + \frac{\int E_B(x) dx}{x} \right] - E - M \quad (21)$$

式中: $dSWE/dt$ 代表表面雪累积, P 为净降雪率, p 为风吹雪发生的概率, F 为顺风传输率, E 为雪表面升华速率, M 为雪融化速率, E_B 为风吹雪升华速率。

(2) 蒸发热通量。

$$Q_E = \frac{G[s(Q^* - Q_C) + C v d d_a / r_a]}{sG + \gamma} \quad (22)$$

式中: C 、 $v d d_a$ 、 r_a 、 s 、 γ 、 G 依次为:空气热容量、水汽密度亏损、空气动力学阻抗、饱和水汽密度曲线斜率、干湿球常数、相对蒸发量。

2.5.2 CRHM 应用

2007 年 Pomeroy 首次提出 CRHM,其科学性很快受到科研工作者的重视^[30]。Xing Fang 等分析了加拿大大草原干旱对积雪融化产生的敏感性响应,显示较少的降水、较高的气温和较低初始土壤水分条件导致融雪融化产流量大大降低^[31-32]。Coupmodel 具有较强的细化风吹雪过程的能力,可以有效模拟复杂环境中雪水当量的空间分布;同时,检验了模型依据相同地形学特点和空气动力属性划分不同生态景观单元的能力,经与调查的结果相比,显示了模型划分的有效性^[33]。把近地面的气象条件和生态观测条件作为模型的输出,应用能量平衡和气动力学的方法, Coupmodel 可以较精确地估计极端干旱条件下的蒸散发^[34]。2010 年, C. R. Ellis 等为了进一步检验 Coupmodel 模拟积雪融化和累积的能力,分别模拟了不同海拔、纬度、森林密度和气候的积雪融化和累积,结果显示,模型对上述因素的变化具有较强的敏感性^[35]。

2.6 四种模式简单对比分析

四种陆面过程模式都是基于能量平衡和质量守恒建立起来的,考虑了不同的下垫面条件,对陆面过程研究的重点也各不相同,但总体上四种模式都具有较好模拟陆面过程的能力。四种陆面过程模式对比分析详见表 1。

表 1 四种陆面过程模式对比分析

模式名称	开发者	模型时间	主要研究区域	模型尺度	模型目标	模型优势	存在缺陷
SHAW	Gerald N. Flerchinger	1989	美国	单点,一维	实现冠层地-气和土壤内水-热交互作用的同步模拟	模型较简单,能较好地模拟冻土区的水热运输,模型已得到大量的科学验证	模型对陆面过程考虑不够全面,忽略了很多重要的环节;模型算法简单,对部分过程的模拟不够准确
Coup-model	Jansson and Karlberg	2004	西欧	单点,一维	对整个陆面过程进行较好模拟,包括截留、渗流和 C-N 运输	模块化的程序结构,多参数化方案可以自由选取,涵盖陆面过程的各个环节	一维的陆面过程模式,在流域尺度上很难得到应用
EASS	陈报章	2007	加拿大	区域尺度	实现区域尺度上的能量分割,连续估计 C 同化速率	首次提出树冠簇团指数,利用 RS 反演陆面参数	模型暂时还没有得到相关地区的验证
CRHM	J. W. Pomeroy	2007	加拿大	流域中尺度	加入寒区陆面过程算法,实现寒区小尺度到中尺度水文循环模拟	模式可以直接应用于流域,开放的设计允许模型用户添加适合自己研究区域的模块	对冠层等的处理过于粗糙,缺少多参数化方案的选取

3 展 望

经过分析 4 种陆面过程模式的物理机制和已取

得研究成果,模型的模拟结果与实测的结果表现出了很好的一致性,表明四种陆面过程模式基本可以达到在青藏高原冻土区使用的目的。同时,四种模

型在单独使用时都存在简化寒区陆面过程某一环节情况,对寒区陆面过程流域尺度的研究不够,如何对四种模式进行耦合形成一个包含细化寒区陆面过程各个环节(特别是积雪、冰川、冠层和冻土)的、包含多参数优化方案且融合遥感和GIS技术的多尺度寒区陆面过程模型成为未来研究的重点。

参考文献:

- [1] Zhao Lin, Ping Chien - Lu, Yang Daqing, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai - Xizang (Tibetan) Plateau, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 43:19 - 31.
- [2] Pang Qiangqiang, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Active layer thickness calculation over the Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 57:23 - 28.
- [3] Jin Huijun, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Permafrost and climatic change in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26:387 - 404.
- [4] 南卓铜,高泽深,李述训,等. 近30年来青藏高原西大滩多年冻土变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 817 - 823.
- [5] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: F02S03.
- [6] Li Xin, Cheng Guodong, Jin Huijun, et al. Cryospheric change in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62:210 - 218.
- [7] Wang Genxu, Wang Yibo, Li Yuanshou, et al. Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai - Tibet Plateau, China[J]. *Catena*, 2007, 70:506 - 514.
- [8] 周余华,叶伯生,胡和平. 土壤冻融条件下的陆面过程研究综述[J]. *水科学进展*, 2005, 16(16): 887 - 891.
- [9] Li Ning, Chen Feixiong, Cheng Guodong, et al. Theoretical frame of the saturated freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35:73 - 80.
- [10] 杨兴国,牛生杰,郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21(3): 83 - 89.
- [11] 马耀明,姚檀栋,王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究_GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展[J]. *高原气象*, 2006, 25(2):344 - 351.
- [12] Flerchinger G N, Pierson F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991(S6):227 - 246.
- [13] Flerchinger G N, Hanson C L, Wight J R, et al. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed[J]. *Water Resource Research*, 1996, 32(8): 2539 - 2548.
- [14] Flerchinger G N, Kustas W P, Weltz M A. Simulating surface energy fluxes and radiometric surface temperatures for two arid vegetation communities using the SHAW model. [J] *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37:449 - 460.
- [15] Flerchinger G N, Sauer T J, Aiken R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface[J]. *Geoderma*, 2003, 116:217 - 233.
- [16] Flerchinger G N, Xiao W, Sauer T J, et al. Simulation of within - canopy radiation exchange[J]. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57: 5 - 15.
- [17] Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, et al. Simulation of energy and water balance in soil - vegetation - atmosphere transfer system in the mountain area of Heihe River Basin at Hexi Corridor of northwest China[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 48(4): 538 - 548.
- [18] 周剑,王根绪,李新,等. 高寒冻土地区草甸草地生态系统的能量 - 水分平衡分析. [J] *冰川冻土*, 2008, 30(3):398 - 407.
- [19] 赵林,李韧,丁永健. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究. [J] *冰川冻土*, 2008, 30(6): 930 - 937.
- [20] Louise Karlberg, Alon Ben - Gal, Per - Erik Jansson, et al. Modelling transpiration and growth in salinity - stressed tomato under different climatic conditions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190:15 - 40.
- [21] Christiansen J R, Elberling B, Jansson P E, et al. Modelling water balance and nitrate leaching in temperate Norway spruce and beech forests located on the same soil type with the Coupmodel[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237:545 - 556.
- [22] Magnus Svensson, Per - Erik Jansson, David Gustafsson, et al. Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 213:331 - 344.
- [23] Josefine Norman, Per - Erik Jansson, Neda Farahbakhshazad, et al. Simulation of NO and N₂O emissions from a spruce forest during a freeze/thaw event using an N - flux submodel from the PnET - N - DNDC model integrated to CoupModel[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 216:18 - 30.
- [24] Josefine Nylinder, Maria Stenberg, Per - Erik Jansson, et al. Modelling uncertainty for nitrate leaching and nitrous oxide emissions based on a Swedish field experiment with organic crop rotation[J]. *Agriculture, Ecosystems and En-*

- vironment, 2011, 141: 167 – 183.
- [25] Zhang Shulan, Lars Lovdahl, Harald Grip, et al. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93: 283 – 298.
- [26] Zhang Shulan, Elisabeth Simelton, Lars Lovdahl, et al. Simulated long – term effects of different soil management regimes on the water balance in the loess plateau, China [J]. *Field Crops Research*, 2007, 100: 311 – 319.
- [27] 阳勇, 陈仁升, 吉喜斌, 等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 30 – 35.
- [28] 张伟, 王根绪, 周剑, 等. 基于 CoupModel 的青藏高原土多年冻土区土壤水热过程模拟[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1099 – 1109.
- [29] Chen Baozhang, Jing M Chen, Ju Weimin. Remote sensing based ecosystem – atmosphere simulation scheme (EASS) – model formulation and test with multiple year data [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 209: 277 – 300.
- [30] Pomeroy J W, Gray D M, Brown T, et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 2650 – 2667.
- [31] Xing Fang, John W Pomeroy. Snowmelt runoff sensitivity analysis to drought on the Canadian prairies [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 2594 – 2609.
- [32] Xing Fang, John W Pomeroy. Drought impacts on Canadian prairie wetland snow hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(15): 2858 – 2873.
- [33] John Pomeroy, Matt MacDonald, Chris DeBeer, et al. Modeling alpine snow hydrology in the Canadian rocky mountains [J]. *Western Snow Conference*, 2009.
- [34] Robert W Armstrong, John W Pomeroy, Lawrence W Martz. Estimating evaporation in a prairie landscape under drought conditions [J]. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 2010, 35(2): 173 – 186.
- [35] Ellis C R, Pomeroy J W, Brown T, et al. Simulation of snow accumulation and melt in needleleaf forest environments [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(6): 925 – 940.

(上接第 42 页)

- [28] 刘成, 陈卫, 黄廷林, 等. 两种预氧化剂处理高藻水的对比实验研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 41(2): 252 – 256.
- [29] Rodriguez E, Majado M E, Meriluoto J, et al. Oxidation of microcystins by permanganate: Reaction kinetics and implications for water treatment [J]. *Water Research*, 2007, 41(1): 102 – 110.
- [30] 张琳, 李晶晶, 高庚申. Fenton 法去除微囊藻毒素及有机污染物的研究 [J]. *环保科技*, 2011, 17(4): 14 – 18.
- [31] Liu I, Lawton L A, Bahnemann D W, et al. The photocatalytic decomposition of microcystin – LR using selected titanium dioxide materials [J]. *Chemosphere*, 2009, 76(4): 549 – 553.
- [32] Pelaez M, A. A. de la Cruz, E. Stathatos, et al. Visible lightactivated N – F – codoped TiO₂ nanoparticles for the photocatalytic degradation of microcystin – LR in water [J]. *Catalysis Today*, 2009, 144(1 – 2): 19 – 25.
- [33] 陈晓国, 潘新鹏, 杨红刚, 等. 不同光源下 TiO₂ 膜对 MC – RR 光催化降解的比较研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1): 46 – 49.
- [34] 梁文艳. 杀灭和降解水中藻细胞与藻毒素的电磁效应 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [35] 史红星. 官厅水库微囊藻毒素分析及电化学降解 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [36] Song W, de la Cruz A A, Rein K, et al. Ultrasonically induced degradation of microcystin – LR and – RR: identification of products, effect of pH, formation and destruction of peroxides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(12): 3941 – 3946.
- [37] Chen W, Sheng Y, Cao Z, et al. Efficacy of enhanced ultrasonic coagulation of high – algae water from Taihu lake [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2011, 38(1): 110 – 113.
- [38] 欧桦瑟, 高乃云, 隋铭皓, 等. 超声辐照降解 MC – RR 动力学的影响因素 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(2): 784 – 792.
- [39] Shen Q, Zhu J, Cheng L, et al. Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation [J]. *Desalination*, 2011, 271(1 – 3): 236 – 240.
- [40] Liu X, Chen Z, Zhou N, et al. Degradation and detoxification of microcystin – LR in drinking water by sequential use of UV and ozone [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(12): 1897 – 1902.
- [41] 张维, 董泽琴, 张琳, 等. UV/Fenton/TiO₂ 光催化氧化降解微囊藻毒素的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(9): 4775 – 4778.