

条件非线性最优扰动方法在陆面过程模式 参数优化中的扩展应用初探*

李红祺¹⁾ 郭维栋^{1)2)†} 孙国栋³⁾ 张耀存¹⁾

1)(南京大学大气科学学院, 南京大学气候与全球变化研究院, 南京 210093)

2)(RCE-TEA, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

3)(LASG, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

(2010年3月23日收到; 2010年4月29日收到修改稿)

本文旨在探讨条件非线性最优扰动(CNOP)方法在陆面过程模式的参数优化工作方面的扩展应用. 使用通用陆面模式(CoLM)和CEOP地面基准站——吉林通榆站退化草地2006年生长季的资料, 针对土壤颜色、砂土比例和叶面积指数等关键模式参数, 使用感热通量、潜热通量和浅层土壤湿度作为检测变量, 设计了单参数和多参数优化试验. 结果表明, CNOP扩展方法得到的优化参数提高了CoLM对检测变量的模拟能力, 并且多参数的优化结果明显优于单参数的优化结果, 在模式模拟偏差较大的土壤湿度方面改进尤为显著. 此外, 使用了差异进化算法(DE)作为优化算法的CNOP扩展方法还具有编程简单, 可移植强, 收敛速度快等特点, 使得CNOP扩展方法在陆面过程模式参数优化工作方面表现出极强的应用和发展潜力.

关键词: 条件非线性最优扰动(CNOP), 陆面过程模式, 参数优化

PACS: 92.60.Kc

1. 引言

条件非线性最优扰动^[1,2] (conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP)方法最早是由我国科学家提出并发展起来的, 定义为非线性动力系统中, 满足一定约束条件, 并且在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动. 该方法面世之后数年间已被广泛运用到天气和气候非线性系统研究的多个方面, 如 ENSO 可预报性研究^[3]、热盐环流^[4] (thermohaline circulation, THC) 敏感性问题、集合预报初始扰动^[5] 以及台风目标观测^[6] 等多个方面, 并获得了一系列的成果. 近年来, 随着研究者对天气、气候系统中的非线性作用的关注持续提高^[7-12], 对于处理和研究动力系统中非线性影响的方法的开发和应用^[13,14] 也成为了当前研究焦点之一. CNOP所具有的预报时刻最大非线性发展这一特性, 使得它充分考虑了动力系统的非线性特征, 衡量了非线性在动力系统从初始时刻演变到预报时刻这一过

程中起到的作用, 从而成为衡量动力系统非线性发展的一个得力的工具. 最近, 穆穆等^[15] 进一步将CNOP方法推广到既考虑初始扰动又考虑模式参数扰动的情况, 使得该方法在模式参数优化领域的应用成为可能.

陆面过程是天气和气候过程中极为重要的一个环节, 包含着大量的物质能量交换过程, 现行的陆面过程模式涉及了极为复杂的土壤水热传输、植被生理生化、陆-气间物质能量交换等过程^[16-19], 包含了大量的模式参数, 这些参数有些是可以通过野外观测直接获得的, 有些则不能通过观测获得, 而只能通过经验、半经验或者统计的方法得到一个近似合理估计值^[20,21]. 另外由于观测条件的限制, 野外观测常常不能进行或者观测的结果准确度并不满足实际需求. 这就迫使我们必须使用观测以外的方法来获得更为合理的参数值, 而这也正是参数优化工作的目标.

目前在陆面过程模式参数优化领域已经出现了一些方法, 如 Multi-criteria Approach (MC) 方

* 国家自然科学基金(批准号: 40775050, 40810059003)和国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2006CB400501)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: guowd@nju.edu.cn

法^[22], Multi-Objective Complex Evolution (MOCOM-UA)^[23], 集合卡尔曼滤波 (Ensemble Kalman Filter, EnKF)^[24-26] 方法等. 这些方法在某种程度上优化了模式参数, 改进了模式的模拟能力, 但也在某些方面存在不足, 如数学物理意义不够明确、计算资源要求高、编程工作繁琐以及可移植性不强等等, 而 CNOP 方法在上述方面有着相当的优势, 因此本文尝试将 CNOP 方法推广到陆面过程模式的参数优化工作中, 以其获得一个简单易用而高效的陆面参数优化方法.

2. CNOP 的概念模型

假定非线性动力模式有如下形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + F(v) = 0, \\ v|_{t=0} = v_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $v(x, p, t) = (v_1(x, p, t), v_2(x, p, t), \dots, v_n(x, p, t))$, $v \in \Omega$ (Ω 是欧氏空间 R^n 中的一个区域) 为模式状态向量, $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, v_0 为向量 v 的初始状态 t 代表时间, $T < +\infty$. 方程 (1) 中的 F 是一个非线性微分算子, p 是非线性动力模式中预设的参数, v_0 是向量 v 的初始状态. 假定确切的知道非线性动力系统方程 (1) 和初始状态 v_0 以及非线性动力模式的参数 $\bar{p}$, 那么, 通过合适的初始值积分方程 (1), 就可以确定系统未来的状况, 即系统 (1) 在预报时刻 τ 的数值解可以写成如下的形式:

$$v(x, \tau) = M_\tau(v_0, \bar{p}), \quad (2)$$

这里 M_τ 的是离散的传播算子, 代表了数值模式, 如果将系统 (1) 的初值取为 U_0 和 $U_0 + u_0$, 参数给定值 $\bar{p}$ 为 $\bar{p} + p$ 和, 那么 (1) 式的解 $U(x, t)$ 和 $U(x, t) + u(x, t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} U(\tau) &= M_\tau(U_0, \bar{p}), U(\tau) + u(\tau) \\ &= M_\tau(U_0 + u_0, \bar{p} + p), \end{aligned} \quad (3)$$

这里 u_0 代表初始扰动, p 代表参数扰动, $u(\tau)$ 则描绘了由初始扰动和参数扰动导致的模式数值解在预报时刻的非线性偏差. 如果上述扰动是初始误差和参数误差, 则 $u(\tau)$ 代表了模式的预报误差.

对于给定的适当限制条件 (如范数约束) $\|\cdot\|$, $\|\cdot\|_v$, $\|\cdot\|_p$, 我们考虑如下的非线性优化问题:

$$J(u_{0\delta}^*, p_{\delta}^*) = \max_{\|u_0\|_v \leq \delta_1, \|p\|_p \leq \delta_2} J(u_0, p), \quad (4)$$

式中

$$J(u_0, p) = G(M_\tau(U_0 + u_0, \bar{p} + p) - M_\tau(U_0, \bar{p})), \quad (5)$$

其中, $\|u_0\|_v \leq \delta_1$ 和 $\|p\|_p \leq \delta_2$ 分别是初始扰动和参数扰动的约束条件, 具体应用中可以是某预先实际好的范数, 也可以根据实际需要, 满足某一物理规律, 依据具体的物理问题而定, 函数 $G(\cdot)$ 度量了扰动的非线性发展.

3. CNOP 扩展的公式依据

分析 (4) 式可知, CNOP 的计算实质同样是最优化求解问题, 即在满足约束条件下, 初始扰动 (或者参数扰动) 经过非线性系统衍化, 在预报时刻能达到的最大 (最优) 值, 而陆面过程模式参数优化工作也可以归纳为最优值求解问题, 即求的一个最合适的参数值 (调整值), 使得模式的模拟结果在最大程度上接近真值 (观测值). 那么, 对 (5) 式进行变形如下:

$$\begin{aligned} J(u_0, p) &= -G(M_\tau(U_0 + u_0, \bar{p} + p) \\ &\quad - M_\tau(U_0, \bar{p})). \end{aligned} \quad (6)$$

假设初始值准确无误, 即不考虑初始误差

$$J(p) = -G(M_\tau(\bar{p} + p) - M_\tau(\bar{p})), \quad (7)$$

并以真值 (观测值) 取代模拟值 $M_\tau(\bar{p})$,

$$J(p) = -G(M_\tau(\bar{p} + p) - \text{OBS}), \quad (8)$$

在这里, 我们对 T 做了重新定义: T 不再代表预报时刻, 而是代表从初始时刻到预报时刻这个时间段内的每一个积分时刻, 即所要获得的不再是预报时刻的最优解, 而是在整个模式积分过程中获得的满足约束条件的最优解. 参数的约束条件用该参数实际取值的范围来表示, 我们认为则经过上述扩展之后的 CNOP 方法可以用来求取参数的最优值, 实现模式参数优化的功能.

过去计算 CNOP 都是使用基于伴随的非线性优化迭代方法, 计算量很大, 不满足我们要找寻一个计算负荷小的优化方法这一目标, 因此, 我们在试验中用差异进化算法 (differential evolution, DE) 来计算 CNOP, DE 的简单原理和流程如下节.

4. 差异进化算法

DE 算法是上世纪 90 年代末, Price 等^[27] 提出的一种结构简单易于应用的全局优化算法, 其原理大致可以描述为: 在随机样本空间中进行无差别的取样, 然后做差值计算, 通过自选的放缩函数对差值和样本空间值做修订, 然后经过交叉比较处理之

后,再对比最优解要求,判断是结果输出还是回到差值修订步,再次计算,直到满足最优解阈值条件输出为止,其结构图简单如下(图1):

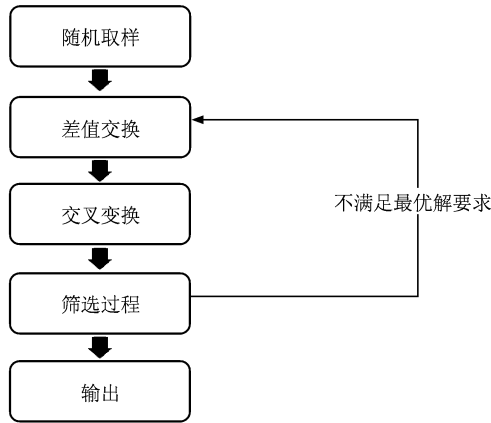


图1 DE算法流程图

1) 随机取样.

2) 差值变换,常用变换公式为

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F \cdot (x_{r_2,G} - x_{r_3,G}), \quad (9)$$

其中 $v_{i,G}$ 为差值变换中间变量, $x_{i,G}$ 为目标(待优化)参数向量, $i = 1, 2, 3, \dots, NP$, 为每一个目标参数随机值编号, NP 为随机样本数, $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 是相互独立的整形随机索引数. $F \in [0, 2]$, 为实型常量, 用于控制差值变率 $(x_{r_2,G} - x_{r_3,G})$ 的幅度. 随机索引数在每次循环时均需重新取值, 所以 $NP \geq 4$. G 表示进化辈数.

3) 交叉变换, 是为了保证扰动参数向量具有尽可能的离散分布, 为此, 试验向量形式如下:

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}), \quad (10)$$

其中

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & (\text{randb}(j) \leq CR) \text{ 或 } j = \text{rnbr}(i), \\ x_{ji,G}, & (\text{randb}(j) > CR) \text{ 和 } j \neq \text{rnbr}(i) \end{cases} \quad (11)$$

$j = 1, 2, \dots, D,$

上式中, $\text{randb}(j) \in [0, 1]$ 是第 j 进化步时的随机数, 满足均匀分布. $CR \in [0, 1]$ 是交叉常数, 具体值由主观确定. $\text{rnbr}(i) \in 1, 2, \dots, D$ 是随机索引. D 为参数维度, 即参数数目. $u_{i,G+1}$ 必须至少从 $v_{i,G+1}$ 中继承一个参数值.

4) 筛选过程(selection), 通过检验函数, 对当前步骤的试验向量 $u_{i,G+1}$ 和目标向量 $x_{i,G}$ 作比较, 取出其中最小值作为下一步的 $v_{i,G+2}$, 若已经满足输出条件则输出结果.

5. 试验设计与试验结果分析

为了检验 CNOP 扩展到陆面过程模式参数优化工作的可行性与效果, 我们使用 CEOP 陆面基准站——吉林通榆观测站退化草地观测点^[28] 2006 年 5 月 28 日零时到 2006 年 8 月 31 日 23 时 30 分强化观测资料和通用陆面模式^[29-31] (Common Land Model, CoLM), 针对土壤颜色、砂土比例、黏土比例和叶面积指数(以 2003 年观测资料为蓝本, 以一个系数 $\text{LAI}_{\text{index}}$ 作为放缩系数获得新的叶面积指数资料), 分别作了单参数(土壤颜色), 多参数(土壤颜色、砂土比例和叶面积指数)两个优化试验, 试验中已根据当地的实际情况对模式中部分控制参数的数值做了修改(如冠层高度和与之相关的粗糙度、零平面位移等等).

试验中所用目标函数 $G(\cdot)$ 为一非负组合函数, 其公式形式及其组成部分如下所述(criteria):

$$\text{criteria}(\theta) = \left| \frac{1}{m \left(\sum_{j=1}^n w_j \right)} \left(\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n (w_j f_{i,j}(\theta)) \right) \right) \right|, \quad (12)$$

上式中 θ 为目标变量(如潜/感热通量, 浅层土壤温/湿度等等), $f_{i,j}(\theta)$ 为子判据, 分别为均方根误差 DRMS、偏差 BIAS、符号变率 NSC, 具体计算形式如下:

$$\text{DRMS}(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (q_i^{\text{sim}}(\theta) - q_i^{\text{obs}}(\theta))^2}, \quad (13)$$

$q_i^{\text{sim}}, q_i^{\text{obs}}$ 分别表示目标变量的观测和模拟值, N 为模拟时长,

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \left| \sum_i q_i^{\text{sim}}(\theta) - q_i^{\text{obs}}(\theta) \right|, \quad (14)$$

$$\text{NSC} = \left| \frac{n_1}{n_1 + n_2} - 0.5 \right|, \quad (15)$$

式中的 n_1, n_2 分别为观测值与模拟值之差的符号随时间变化的次数, 符号变率表示了模拟值与观测值在均值上的差异. m 为目标变量数量, n 为子判据函数数目, w 为各子判据函数的权重系数(权重系数由经验根据实际情况取得, 尽量保证各变量和判据的量级大致相当).

我们将经由参数优化试验前后的参数变化与目标函数变化列表于下(表1, 2).

试验资料所在地通榆退化草地观测点地处半干旱区域, 从上世纪 60 年代起, 沙漠化、盐碱化情况

表1 单参数优化试验参数信息

参数名	优化前 参数值	参数 范围	优化后 参数值	备注
土壤颜色 ¹⁾	8	1—8	1	1→8, 浅→深

1) 土壤颜色为整数型参数.

表2 多参数优化试验参数信息

参数名	优化前 参数值	参数 范围	优化后 参数值	备注
土壤颜色	8	1—8	1	1→8, 浅→深
砂土比例	50	0—100	61.96	砂土含量
粘土比例	50	0—100	38.04	粘土比例
LAI_{index}	1	0.01—2.5	2.47	$LAI = LAI_{index} \times LAI_{2003}$

表3 优化试验前后各子判据变化¹⁾

	感热通量			潜热通量			浅层土壤温度			浅层土壤湿度		
	D	B	N	D	B	N	D	B	N	D	B	N
优化前	72.97	38.92	0.34	91.69	37.97	0.23	11.35	10.81	0.5	0.1	0.08	0.48
单参数	55.67	25.18	0.25	89.31	37.83	0.24	10.68	10.23	0.5	0.1	0.08	0.48
多参数	38.84	15.97	0.24	84.20	37.28	0.26	11.41	10.05	0.5	0.04	0.06	0.04

1) D: DRMS, B: BIAS, N: NSC (具体含义见公式 2.2(b—d)); 斜体表示优化试验结果使得模式模拟能力提高, 黑体表示多参数较单参数优化试验有进一步改进的地方.

表4 优化试验前后总体目标函数和各目标变量与观测值的相关系数¹⁾

	Criteria	感热通量	潜热通量	浅层土壤温度	浅层土壤湿度
优化前	42.00	0.66	0.60	0.84	0.778
单参数	37.56	0.85	0.62	0.85	0.781
多参数	33.68	0.86	0.67	0.86	0.82

1) 相关系数均通过 0.05 显著水平检验.

为了更加直观的表达经由 CNOP 扩展方法参数优化之后的 CoLM 在模拟能力上的改进, 图 2 给出了感热通观测、优化前、单参数和多参数优化后的模拟值的比较. 图 2 很明显的呈现出了参数优化之后模式模拟能力的改进, 以及多参数优化试验结果相较于单参数优化实验而言, 对模式模拟能力更进一步的改进.

多参数优化实验比较单参数优化试验效果更佳, 这在对浅层土壤湿度的模拟中表现得更为明显, 多参数优化试验将单参数优化试验所未能进行优化的浅层土壤湿度在相当的程度上进行了改进, 使得其与观测值更加接近, 改进了 CoLM 模式对浅层土壤湿度的模拟能力. 如图 3 所示.

以上结果表明, 经过扩展之后的 CNOP 方法在陆面过程模式的参数优化工作中确实可以使用, 并且其在多参数优化试验方面的表现优于单参数优化试验.

日益严重. 优化后的参数中土壤颜色较浅, 砂土含量高都呼应了当地土壤特性, 而该地区植被生长状况受到降水影响很大, 2006 年该地区降水充沛, 植被生长茂盛, 植株高度与覆盖度均大大超过较早的 2003 年, 所以优化后的叶面积指数也在一定程度上表现出了这一关系.

表 3, 表 4 则从目标函数和组成目标函数的各子判据在参数优化前后的表现, 证实了 CNOP 扩展到陆面过程模式参数优化工作中的可行性, 表 4 还通过参数优化前后各目标变量与观测值之间的相关系数的变化, 从另一个方面检验了 CNOP 扩展到参数优化工作中的可行性与实际效果.

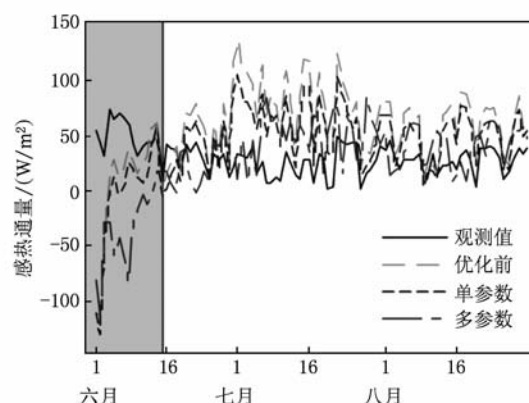


图2 模式模拟的感热通量与观测值的对比 (阴影部分为 spin-up 时间)

此外, 使用 DE 算法之后的 CNOP 扩展, 因其不需要计算伴随模式, 故此在计算消耗和计算效率上表现出了它的优势, 如图 4, 图 5, 单参数与多参数优化试验中最优值稳定出现的时间分别是调用模式

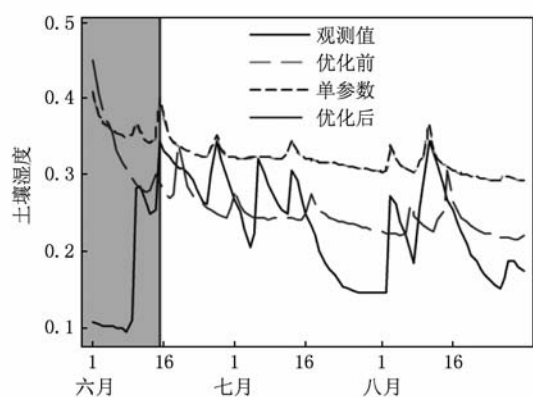


图3 模式模拟的浅层土壤湿度与观测值的对比(阴影部分为 spin-up 时间)

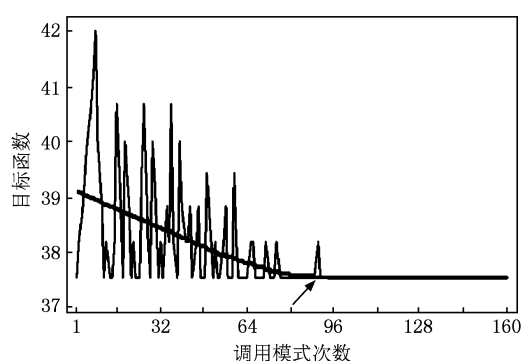


图4 单参数优化试验目标函数随调用模式次数变化(粗实线为平滑线,箭头所指为最优值稳定处)

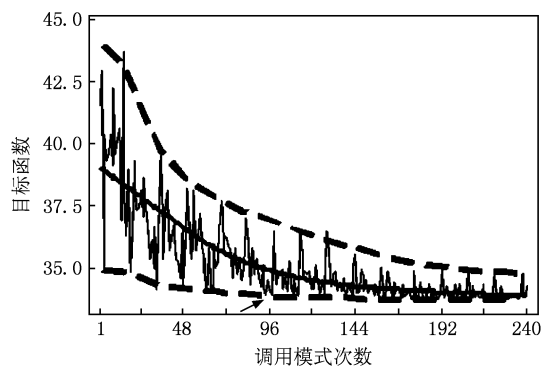


图5 同图4,但为多参数优化试验,粗虚线为上下限

90 次和 140 次左右,优化试验消耗机时少,计算效率高.

6. 结 论

本文对 CNOP 方法在陆面过程模式的参数优化工作中的扩展应用做了简单的尝试,利用通用陆面(过程)模式(CoLM)和 CEOP 基准站——吉林通榆退化草地站长期连续加强观测资料,设计了单参数和多参数两个优化试验,使用感/潜热通量和浅层土壤温/湿度作为目标变量,对优化试验的结果进行检验.检验结果表明,优化试验的结果(如优化土壤颜色为最浅,与当地退化草原下垫面盐碱化土壤呼应)改进了模式的模拟能力,并且多参数优化试验结果在单参数优化试验结果的基础上有进一步改善,有效地改进了模式对土壤湿度的模拟能力.这些结果说明,CNOP 方法确实可以应用于陆面过程模式的参数优化工作,并且其数理基础明晰,使用 DE 算法作为其最优算法之后,编程简单、计算量小、收敛较快,在实际的使用和推广方面有较大的应用潜力.

但在初步尝试中也存在一些问题,如试验中(8)式的约束条件和目标函数的选择,有人为主观的因素,需要在实际工作中根据实际需要进行调整;试验的积分时间也较短,还需要进行更长时间、更大数量多参数的优化试验以检验该方法的适用性和实用能力;对浅层土壤温度模拟的改进还不够显著,等等.

本文的结果也表明,陆面过程模式参数优化虽然在某一阶段或者某些方面有明显的效果,但必须明确参数化方案本身即为某种程度上对真实物理过程的近似,在陆面过程研究中对模式物理过程的发展不可偏废.除此之外,外场观测实验数据质量的评估和控制对于客观的认识模式参数优化的贡献也有重要的作用.

感谢中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)刘辉志研究员和石立庆高工在通榆站资料提供上的大力帮助.

- [1] Mu M, Duan W S 2003 *Chinese Science Bulletin* **48** 747 (in Chinese) [穆 穆、段晚锁 2003 科学通报 **48** 747]
 [2] Mu M, Duan W S, Wang B 2003 *Nonlinear Proc. Geoph.* **10**

- 493
 [3] Duan W S, Mu M, Wang B 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D23105
 [4] Mu M, Sun L, Henk D A 2004 *J. Phys. Oceanogr* **34** 2305

- [5] Mu M, Jiang Z N 2007 *Chinese Science Bulletin* **52** 1457 (in Chinese) [穆 穆、姜智娜 2007 科学通报 **52** 1457]
- [6] Wang B, Tan X W 2009 *Acta Meteorologica Sinica* **67** 175 (in Chinese) [王 斌、谭晓伟 2009 气象学报 **67** 175]
- [7] Gong Z Q, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3180 (in Chinese) [龚志强、封国林、董文杰、李建平 2006 物理学报 **55** 3180]
- [8] Hou W, Lian Y, Feng G L, 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 0589 (in Chinese) [侯 威、廉 毅、封国林 2007 物理学报 **56** 0589]
- [9] Mo J Q, Lin Y H, Lin W T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6692 (in Chinese) [莫嘉琪、林一骅、林万涛 2009 物理学报 **58** 6692]
- [10] Da C J, Chou J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2595 (in Chinese) [达朝究、丑纪范 2008 物理学报 **57** 2595]
- [11] Gong Z Q, Zhou M W, Gao X Q, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强、邹明玮、高新全、董文杰 2005 物理学报 **54** 3947]
- [12] Gao X Q, Zhang W 2005 *Chin. Phys. Soc.* **14** 2370
- [13] Gong Z Q, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3619 (in Chinese) [龚志强、封国林 2007 物理学报 **56** 3619]
- [14] Mo J Q, Zhang W J, Chen X F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7397 (in Chinese) [莫嘉琪、张伟江、陈贤峰 2009 物理学报 **58** 7397]
- [15] Mu M, Duan W S, Wang Q, Zhang R *Nonlinear Processes in Geophysics* (in press)
- [16] Sun S F 2005 *Biophysical and Biochemical Mechanisms and Their Parameterization in Context of Land Surface Processes* (Vol. 1) (Beijing: China Meteorological Press) p1—20 (in Chinese) [孙菽芬 2005 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 (北京: 气象出版社) 第1—20页]
- [17] Bastidas L A, Hogue T S, Sorooshian S, Gupta H V Shuttleworth W J 2006 *J. Geophys. Res.-Atoms.* **111** D20101
- [18] Sun S F 2002 *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* **25** 1 (in Chinese) [孙菽芬 2002 新疆气象 **25** 1]
- [19] Xue G Y, Zhou S Q, Sun Z B, Chen G Y, Yang Y C, Chen H M 2005 *Bulletin of Science and Technology* **21** 378 (in Chinese) [薛根元、周锁铨、孙照渤、陈国勇、杨煜灿、陈红梅 2005 科技通报 **21** 378]
- [20] Wang Y P, Baldocchi D, Leunig R, Flage E, Vesala T 2006 *Global Change Biology* **12** 1
- [21] Park S J, Park S U, Ho C H 2010 *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* **21** 5
- [22] Zhu D Q 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [朱德琴 2007 博士学位论文 (北京: 中国科学院大气物理研究所)]
- [23] Song Y M 2008 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [宋耀明 2008 博士学位论文 (南京: 南京大学大气科学学院)]
- [24] Nie S P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [聂肃平 2008 博士学位论文 (北京: 中国科学院大气物理研究所)]
- [25] Zheng F, Zhu J, Zhang R H, Zhou G Q 2006 *Geophysical Research Letters* **33** 19604
- [26] Zheng F, Zhu J, Zhang R H, Zhou G Q 2006 *Adv. Atoms. Sci.* **23** 615
- [27] Price K, Storn R 1997 *Dr. Dobbs J.* **22** 18
- [28] Liu H Z, Dong W J, Fu C B 2004 *Climatic and Environmental Research* **9** 378 (in Chinese) [刘辉志、董文杰、符淙斌 2004 气候与环境研究 **9** 378]
- [29] Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E 2001 *Common Land Model (Technical Documentation and User's Guide) User's Guide*
- [30] Dai Y J 2003 *Bulletin of the American Meteorological Society* **84** 1013
- [31] Dai Y J 2005 *The Common Land Model (CoLM) User's Guide*

Using conditional nonlinear optimal perturbation method in parameter optimization of land surface processes model^{*}

Li Hong-Qi¹⁾ Guo Wei-Dong^{1)2)†} Sun Guo-Dong³⁾ Zhang Yao-Cun¹⁾

1) (School of Atmospheric Sciences, Institute for Climate and Global Change Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2) (RCE-TEA, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

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

(Received 23 March 2010; revised manuscript received 29 April 2010)

Abstract

In this paper, we attempted to extend the application of conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) to the optimization of parameters in land surface model. We used the common land model and data of Tongyu station, which is a reference site of the CEOP in the semi-arid regions, and used three key parameters (soil color, soil sand/lay proportion and leaf area index) as parameters to be optimized. Two experiments are designed in our work, namely the single-parameter optimization and the triple-parameter optimization. Notable improvements in simulating sensible heat flux (SH), latent heat flux (LH), soil temperature (TS) and moisture (MS) at shallow layers were achieved by using the optimized parameters. In addition, the latter experiment shows a better performance than the former. All results above illustrate that the application of CNOP method can be extended to parameters optimization of land surface model. And what is more, due to its other advantages, such as the clear mathematical meaning, the simple design structure, and the fast computing speed, it shows a great potential for further applications in parameters optimization of related problems.

Keywords: conditional nonlinear optimal perturbation, parameters optimization, land surface model

PACS: 92.60.Kc

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40775050, 40810059003) and National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB400501).

[†] Corresponding author. E-mail: guowd@nju.edu.cn