

谢东东, 孙国栋, 邵爱梅, 等. 2013. 草原生态系统模式中参数不确定性导致的模拟结果不确定性研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 375–386, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11179. Xie Dongdong, Sun Guodong, Shao Aimei, et al. 2013. A study of simulation uncertainties caused by parameter uncertainties in a grassland ecosystem model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 375–386.

草原生态系统模式中参数不确定性导致的 模拟结果不确定性研究

谢东东^{1,2} 孙国栋² 邵爱梅¹ 穆穆^{3,2}

1 兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071

摘要 基于五变量草原生态系统理论模式, 应用与参数有关的条件非线性最优扰动(CNOP-P)方法, 探讨了由参数不确定性导致的草原生态系统模式模拟结果的不确定性问题。参数的不确定性可能来源于观测和(或)对物理过程描述等的不确定性。选取了五变量草原生态系统模式中具有物理意义的 32 个模式参数进行数值试验。试验结果表明, 对所考察的 32 个模式参数, 在一定的不确定性和给定的优化时刻范围内, 单独优化每个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态与同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 的模态并不相同。比较了上述两类参数误差以及随机参数误差对草原生态系统模拟的差异。随机参数误差与上述优化方法所得参数误差的不确定性范围大小相同。数值结果表明, 同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 类型参数误差使得草原生态系统模拟的不确定性程度最大。这种影响表现在使得草原生态系统转变为沙漠生态系统, 或者使得草原生态系统转变为具有更多生草量的草原生态系统。上述数值结果不依赖于优化时间和参数不确定性程度的大小。这些数值结果建议我们应当考虑多参数的非线性相互作用来研究草原生态系统模式模拟的不确定性问题, 并且揭示出 CNOP-P 方法是讨论上述问题的一个有用的工具。

关键词 参数不确定性 草原生态系统 模拟结果不确定性 条件非线性最优扰动

文章编号 1006-9585 (2013) 03-0375-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11179

A Study of Simulation Uncertainties Caused by Parameter Uncertainties in a Grassland Ecosystem Model

XIE Dongdong^{1,2}, SUN Guodong², SHAO Aimei¹, and MU Mu^{3,2}

1 Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

Abstract The uncertainties in grassland ecosystem simulations caused by uncertainties in the parameters were studied using a theoretical five-variable grassland ecosystem model and a conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP-P) method. Uncertainties in the parameters may originate in uncertainties in the observations and/or descriptions of the

收稿日期 2011-11-21 收到, 2013-02-23 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40905050、40875063

作者简介 谢东东, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事草原生态系统模拟不确定性的研究。E-mail: xiedd03@163.com

通讯作者 孙国栋, E-mail: sungd@mail.iap.ac.cn

physical processes associated with the parameter, amongst other things. 32 model parameters that have physical meanings in the five-variable grassland ecosystem model were selected for use in numerical experiments. The results showed that when these parameters had the same degree of uncertainty, and the same optimization time, the combination of CNOP-Ps optimized for each parameter was different from the CNOP-P optimized for all 32 model parameters. The authors compared the grassland ecosystem simulations with the two types of parameter errors described above and with random parameter errors with the same degree of uncertainty as the optimized parameter errors. It was concluded that the CNOP-P for the 32 model parameters optimized at the same time led to the maximum uncertainty in the grassland ecosystem simulation, which was that the grassland ecosystem was either transformed into a desert ecosystem or another grassland ecosystem with more biomass. These results were independent of the size of the parameter uncertainties and the optimization time, and they show that nonlinear interactions between several parameters in the model are important to the uncertainties in the grassland ecosystem simulation. The results also imply that the CNOP-P method is a useful tool for assessing uncertainties in the grassland ecosystem simulation.

Keywords Parameter uncertainty, Grassland ecosystem, Simulation uncertainty, Conditional nonlinear optimal perturbation

1 引言

草原生态系统是陆地生态系统中一个重要的组成部分。中国区域草原面积大约为 4.0×10^8 ha, 约占中国区域国土面积的41.7% (Fang et al., 2010)。草原是一个脆弱的开放系统, 与其周围环境有着各种能量和物质交换。土壤—植被—大气相互作用及其对全球和区域的气候和生态系统各自的反馈响应是最基本的前沿问题之一 (吕达仁等, 1997)。草原生态系统的模拟研究一直都是关注的热点 (Klausmeier, 1999)。

草原生态系统的动力学模式是草原生态系统模拟研究的有效工具。模式参数化过程是建立动力学模式所必需的步骤之一。曾晓东等 (2004) 指出植物与周围环境的各种能量和物质传递和交换是非常复杂的, 为了给出具有可靠数学物理基础的、并可在理论上给出重要结论的实用模式, 一种可行的方法是参数化方法, 即用宏观量和少量参数对所研究的物理过程进行描述。曾晓东等 (2004) 还指出在草原生态动力学模式中包含了大量的模式参数, 大部分模式参数可以通过物理定律、数学的逻辑推理和观测事实获得, 然而有些模式参数不能通过上述方法获得, 只能通过模式参数敏感性试验获得。很显然, 通过这些方法得到的参数值将存在误差, 从而导致草原生态系统的模拟存在不确定性。最优化方法是衡量由参数不确定性导致的草原生态系统模拟不确定性程度的一个重要方法。

在陆面过程模式参数优化领域已经有不少方法。“one-at-a-time”(OAT)方法 (Wilson et al., 1987a,

1987b; Pitman, 1994) 是将某一个参数从其标准值到其最大或最小可能值进行扰动, 其余参数不变, 用来研究模式模拟结果的变化。除此之外, second-order 分析 (Sorooshian and Gupta, 1985)、Fourier amplitude test (FAST) (Collins and Avissar, 1994; Saltelli et al., 1999) 和 Adjoint methods (Errico, 1997; Margulis and Entekhabi, 2001) 也是模式参数优化的重要方法。然而, 上述方法并没有考虑模式参数之间的相互作用及其对模式模拟结果的影响。Bastidas (1998) 基于 regional sensitivity analysis (RSA) 方法提出了一种多判据方法, 称为 multi-objective generalized sensitivity analysis (MOGSA)。MOGSA 方法考虑了多参数的相互作用。Jackson et al. (2003) 采用 Bayesian Stochastic Inversion (BSI) 方法, 使用荷兰 Cabauw 的数据, 对 Chameleon Surface Model (CHASM) 进行参数优化和模拟结果不确定性分析。Xia et al. (2004) 应用 CHASM 模式和 7 个观测站点数据, 进行了参数优化和模拟结果的不确定性分析。结果显示, BSI 方法和多判据方法得到的参数明显改善了感热和潜热通量的模拟。Pathak et al. (2007) 基于 Global Sensitivity Analysis (GSA) 方法研究了 Cotton 模式中模式参数对模式预报的敏感性, GSA 方法表明对干物质产量影响最大的模式参数是比叶面积指数 (SLAVR), Local sensitivity analysis 表明影响最大的模式参数是消光系数 (KCAN)。宋耀明 (2008) 利用 Multi-Objective Complex Evolution (MOCOM-UA) (Yapo et al., 1997) 方法对通用陆面模式 (CoLM) 中的 30 个模式参数进行了优化, 通过参数优化试验得到了 CoLM 模式地表参数在通榆退化草地较为恰当的取值范围,

一定程度上减小了源于参数取值的模拟误差，参数优化前后各目标变量的均方根误差变化如下：感热通量的均方根误差由 43.86 减小到 33.22、潜热通量由 52.31 减小到 44.26、土壤浅层温度由 3.74 减小到 3.61、土壤浅层湿度由 0.048 减小到 0.030。Chen et al. (2009) 用 Multi-criteria 方法 (Gupta et al., 1998) 优化了 BATS 中的模式参数，参数优化后的模式提高了对感热通量、潜热通量和地表通量的模拟能力，尤其是对于干旱地区（敦煌站）的模拟更接近于观测。除此之外，还有一些在时间、空间上不能直接或者广泛测量的功能参数（如土壤水导率、气孔导度、空气动力学阻抗等），不能预先给定，只能用观测资料，通过反复试验 (trial-and-error) 过程进行估算，在有效的参数取值空间内得到更小的参数取值空间，减小模式模拟的不确定性。通过上述方法能够获得较为合理的模式参数值，提高模式的模拟能力。但从非线性的角度出发，很难回答当考虑模式中多参数不确定性时，草原生态系统模拟不确定性程度的大小，也不能衡量草原生态系统模拟不确定性的最大程度。

与参数有关的条件非线性最优扰动 (conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP-P) 方法是由 Mu et al. (2010) 提出，该方法是在条件非线性最优扰动 (conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP) 方法 (Mu et al., 2003) 上的扩展。CNOP-P 是满足一定参数误差约束大小的所有参数误差中，在所考察的时间段结束时，具有最大模拟结果不确定性的参数误差。Duan and Zhang (2010) 利用 CNOP-P 方法研究了 ENSO 事件的春季预报障碍 (SPB) 现象。李红祺等 (2011) 用该方法对陆面过程模式中的参数进行了优化。Wang et al. (2011) 和王强 (2011) 用该方法考察了模式参数误差对黑潮路径变异的影响。而之前这一思想也已经应用到 ENSO 的可预报性研究 (骆海英, 2008) 和 ENSO 事件的春季预报障碍 (SPB) 研究中 (余堰山, 2009)。上述研究都考虑了多个参数误差对模式模拟结果的影响。另外，在 CNOP-P 方法中，模式模拟的不确定性程度是通过直接积分非线性模式度量，没有用到任何线性近似的假设，因此，CNOP-P 方法相对于线性近似的方法更具有普适性。CNOP-P 方法所具有的考察时段内模拟不确定性程度最大这一特性，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中起到的作用，从而成为

动力系统研究中的一个有力的工具。另外，CNOP 方法在草原生态系统模拟对初始误差的不确定性研究中也得到了较好的应用 (Mu and Wang, 2007; Sun and Mu, 2009; Wang et al., 2010)。

本文应用 CNOP-P 方法和五变量草原生态系统理论模式，探讨了草原生态系统模式中由参数不确定性导致的模拟结果不确定性的最大程度。基于 Zeng et al. (2006) 提出的五变量草原生态系统理论模式，选取模式中具有物理意义的 32 个参数，用 CNOP-P 方法分别进行单参数和多参数优化，尝试寻找到使得草原生态系统模拟不确定性程度最大的参数误差，以及分析这些参数误差对草原生态系统模拟结果的影响。最后为了探讨数值结果对优化时间和参数不确定性范围大小的依赖程度，进行了单参数和多参数优化对不同的优化时间和参数不确定性范围大小的敏感性试验，并将其数值结果进行比较。

2 模式、方法和试验设计

2.1 模式

五变量草原生态系统模式是由三变量草原生态系统模式和给定植被冠层的三层水文相互作用模式耦合而成 (曾庆存等, 2005)。五变量草原生态系统模式中的变量为：生草量 (M_c)、枯草量 (M_d)、植被层水分含量 (W_c)、表土层水分含量 (W_s) 和根系层水分含量 (W_r)。五变量草原生态系统理论模式如下：

$$\frac{dM_c}{dt} = \alpha^* [G(M_c, W_r) - D_c(M_c, W_r) - C_c(M_c)], \quad (1a)$$

$$\frac{dM_d}{dt} = \alpha^* [\beta' D_c(M_c, W_r) - D_d(M_d) - C_d(M_d)], \quad (1b)$$

$$\frac{dW_c}{dt} = P_c(M_c) + E_r(M_c, W_r) - E_c(M_c, W_r) - R_c(M_c), \quad (1c)$$

$$\frac{dW_s}{dt} = P_s(M_c) - E_s(M_c, W_s, M_d) + R_c(M_c) - Q_{sr}(W_s, W_r) - R_s(M_c, W_s, M_d), \quad (1d)$$

$$\frac{dW_r}{dt} = P_r(M_c) + \alpha_r R_s(M_c, W_s, M_d) - E_r(M_c, W_r) + Q_{sr}(W_s, W_r) - R_r(M_c, W_r), \quad (1e)$$

其中， α^* 代表生草的最大生长率， G 、 D_c 、 C_c 分别代表生草的生长率、枯萎率和消耗率； $\beta' D_c$ 、 D_d 、 C_d 分别代表枯草的堆积率、降解率和消耗率； P_c 、

P_s 分别代表植被冠层和表土层截留的降水输入量, P_r 代表因土壤有大缝隙而直接到达根系层的降水输入量; E_s 代表土壤表层蒸发量, E_r 代表根系层吸取土壤水分上传至冠层供蒸腾的量, E_c 代表 E_r 加上叶面截留降水直接蒸发到大气中的水分含量; Q_{sr} 代表通过土壤水分传导(扩散)机制由表土层传到根系层的通量; R_c 代表植被冠层无法截留大气的降水而流入地表面的水分、 R_s 代表表土层的径流量、 R_r 代表根系层的径流量。根据 Zeng et al. (2003, 2004, 2005) 提出的假设, 不考虑高频变率的变化, 方程 (1c) 转化为

$$P_c(M_c) + E_r(M_c, W_r) - E_c(M_c, W_r) = 0, R_c = 0. \quad (2)$$

因此, 由公式 (1a)、(1b)、(1d) 和 (1e) 组成了一组新的常微分方程组。该方程组中,

$$M_c = x\tilde{x}, M_d = z\tilde{z}, W_s = y_1\tilde{y}_1, W_r = y_2\tilde{y}_2,$$

其中, \tilde{x} 、 \tilde{y}_1 、 \tilde{y}_2 、 \tilde{z} 为该草原群落中生草量、枯草量、表土层水分含量和根系层水分含量的特征值。x 代表生草量, z 代表枯草量, y_1 代表表土层水分含量, y_2 代表根系层水分含量(这些变量都是无

量纲的)。方程组右端项的表达式以及参数标准值等可以参考 Zeng et al. (2004, 2006) 和 Sun and Mu (2009)。湿润度指数 μ 是表征主要气候条件的参数, 用来衡量地表干湿状况, 大小等于年平均降水量和地表蒸发潜力的比值。本文研究的生态系统中生草量和枯草量都不为零定义为草原, 生草量和枯草量都为零则定义为沙漠。Zeng et al. (2004) 探讨了三变量草原生态系统模式中草原(沙漠)生态系统平衡态对于湿润度指数 μ 这一控制参数的稳定性, 并指出存在分岔点 μ_1 和 μ_2 。当湿润度指数 $\mu < \mu_1$ 时, 只有一个线性稳定的沙漠平衡态。对于 $\mu_1 < \mu < \mu_2$, 存在一个线性不稳定的草原平衡态和两个线性稳定的平衡态, 即草原平衡态和沙漠平衡态。当 $\mu > \mu_2$ 时, 系统只有一个线性稳定的草原平衡态和一个线性不稳定的沙漠平衡态。Sun and Mu (2009) 的研究中关于五变量草原生态系统模式也得出了类似的结果。为了进行本文的研究, 重复了 Sun and Mu (2009) 的工作, 得到了分岔点 $\mu_1 = 0.310$ 和 $\mu_2 = 0.345$ 。图 1 给出了五变量草原生态系统模式各变量对于湿润度指

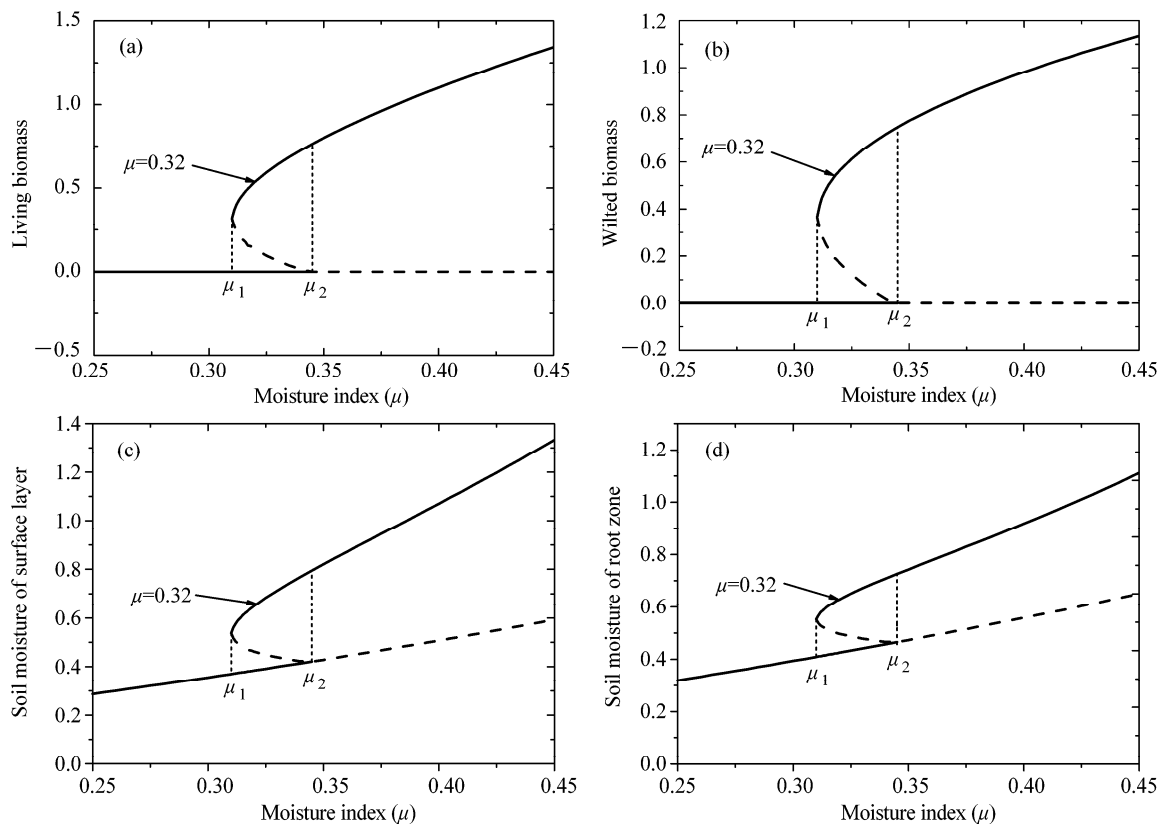


图 1 平衡态随湿润度指数 μ 的变化: (a) 生草量; (b) 枯草量; (c) 表土层水分含量; (d) 根系层水分含量。实线代表线性稳定的平衡态, 虚线代表线性不稳定的平衡态

Fig. 1 The equilibrium states for the different moisture index μ : (a) Living biomass; (b) wilted biomass; (c) soil moisture of surface layer; (d) soil moisture of root zone. Solid and dashed lines denote linearly stable and linearly unstable equilibrium states, respectively

数 μ 取不同值时的平衡态情况。

2.2 与参数有关的条件非线性最优扰动

考虑状态向量 \mathbf{X} 的发展方程:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = F(\mathbf{X}, \mathbf{P}), \\ \mathbf{X}|_{t=0} = \mathbf{X}_0, \end{cases} \quad (3)$$

其中, \mathbf{X}_0 表示状态变量 \mathbf{X} 的初始状态。 $\mathbf{P}=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示模式参数向量, m 是方程 (3) 中参数的个数, F 是一个微分算子。在离散状态下, 方程 (3) 在 T 时刻的解可以表示为:

$$\mathbf{X}(T) = M_T(\mathbf{P})(\mathbf{X}_0). \quad (4)$$

用 \mathbf{p}' 表示公式 (4) 中参数 \mathbf{P} 的误差, 那么模式的解可写为如下形式:

$$U(T) = M_T(\mathbf{P})(U_0), \quad U(T) + u_p(T) = M_T(\mathbf{P} + \mathbf{p}')(U_0), \quad (5)$$

其中, M 是一个非线性传播算子, U 是方程 (4) 的数值解, $u_p(T)$ 度量了由参数误差 \mathbf{p}' 导致状态变量在 T 时刻偏离参考态的大小。

定义如下非线性最优化问题:

$$J(\mathbf{p}^*) = \max_{\mathbf{p}' \in C_p} J(\mathbf{p}'), \quad (6)$$

其中, $\mathbf{p}' \in C_p$ 表示对参数误差的约束, 并且

$$J(\mathbf{p}') = \|M_T(\mathbf{P} + \mathbf{p}')(U_0) - M_T(\mathbf{P})(U_0)\|. \quad (7)$$

对于给定的范数 $\|\cdot\|$, 公式 (6) 中最优化问题的解 \mathbf{p}^* 为 CNOP-P, 表示在一定参数误差约束条件下, 在 T 时刻使得目标函数 J 达到最大的一类参数误差。

2.3 试验设计

本文中, 利用四阶龙格库塔方法求解常微分方程组 (1a)、(1b)、(1d) 和 (1e) 的数值解, 时间 t 是无量纲量, 1 代表实际的一年, 积分时间步长为 $\Delta t = 1/24$ (半个月)。选取了模式中有物理意义的所有参数, 共 32 个。表 1 给出了这些参数的详细介绍。选取的参考态为湿润度指数 $\mu = 0.32$ 情况下线性稳定的草原平衡态。本文中这一草原平衡态称为基态, 即图 1 中箭头所指的位置, $x=0.537$, $z=0.566$, $y_1=0.650$, $y_2=0.628$ 。用 L_2 范数度量 $J(\mathbf{p}')$, 即

$$J(\mathbf{p}') = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y_1)^2 + (\Delta y_2)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (8)$$

其中, Δx 、 Δy_1 、 Δy_2 和 Δz 分别代表生草量、表土层水分含量、根系层水分含量和枯草量偏离基态的大小。CNOP-P 是使得草原生态系统在 T 时刻偏离基态最大的一类参数误差, 这类误差也导致草原生态系统模拟产生最大的不确定性。利用 L-BFGS-B 优化算法求解公式 (6), 得到 CNOP-P。L-BFGS-B

优化算法用来解决有约束或无约束的非线性最优化问题, 需要提供目标函数以及目标函数的梯度, 这个梯度用作优化时的搜索方向, 不需要提供目标函数的 Hessian 矩阵。因此, 该优化算法可以很好地解决本文中所研究的非线性最优化问题。关于 L-BFGS-B 算法的详细可以参考 Byrd et al. (1995) 和 Zhu et al. (1997)。

为了考虑单个参数和多个参数不确定性导致的草原生态系统模拟结果的不确定性, 分别进行了单参数优化 (对每一个参数分别进行优化, 共优化 32 次) 和多参数优化 (同时优化 32 个参数)。每个参数的不确定性范围为 1%, 表示参数误差占模式参数标准值的相对误差 (例如, α_s 的模式参数标准值是 0.9, 它的误差范围是 $[-0.9 \times 1\%, 0.9 \times 1\%]$)。参数的不确定性可能来源于观测和 (或) 对物理过程的描述等的不确定性。优化终止时刻 T 为 10 a。为了探讨随机参数误差对草原生态系统模拟结果不确定性的程度, 本文采用了两组随机参数误差。这两组随机参数误差是由不确定性范围大小为 1% 的参数误差随机组合得到。

为了探讨数值结果是否依赖于参数不确定性范围的大小和优化时间, 进行了敏感性试验。选取参数误差不确定性范围大小分别为 1%、5% 和 10%, 并且优化时间分别选取为 10 a 和 20 a。这样可以得到 1%&10yr、1%&20yr、5%&10yr、5%&20yr、10%&10yr 和 10%&20yr 这 6 组试验。1%&10yr 表示参数不确定性的范围为 1%, 优化时间为 10 a, 其他 5 组试验类似。

3 数值结果

3.1 单参数和多参数优化结果

首先给出参数不确定性范围为 1% 和优化时间为 10 a 的数值结果。表 2 中, 第一列是选取的 32 个参数, 第二列是参数在模式中的标准值, 第三列是分别优化每个参数所得 CNOP-Ps (CNOP-Ps 表示 CNOP-P 的复数形式, 文中指 32 个单参数优化的 CNOP-P) 的联合模态, 第四列是同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 的模态。从表 2 中发现, 优化单个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态 (第三列) 与同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 的模态 (第四列) 不同, 他们的区别在于有些参数误差的符号刚好相反。这一数值结果说明, 单参数优化研究草原生态

表 1 模式中参数标准值及物理意义

Table 1 Standard values and physical meanings for model parameters

参数	标准值	物理意义
ε_{gx}	1.0	控制与生草量相关的生长率 G , 对生草量 M_c 起正反馈作用
ε_{gy}	1.0	控制与根系层水分含量相关的生长率 G , 对生草量 M_c 起正反馈作用
β_x	0.1	控制生草枯萎率 D_c , 对生草量 M_c 起负反馈作用
ε_{dx}	1.0	控制与生草量相关的枯萎率 D_c , 对枯萎率 D_c 起正反馈作用
ε_{dy}	1.0	控制与根系层水分含量相关的枯萎率 D_c , 对枯萎率 D_c 起负反馈作用
γ_x	0.1	控制生草消耗率 C_c , 对消耗率 C_c 起正反馈作用
ε_{cx}	1.0	控制与生草量相关的消耗率 C_c , 对消耗率 C_c 起正反馈作用
β'	0.5	表征枯草的地面堆积效应, 取值 0.5 表示有一半的枯草堆积在地面上
β_z	0.1	控制枯草降解率 D_d , 对降解率 D_d 起正反馈作用
ε_{dz}	1.0	控制与枯草量相关的降解率 D_d , 对降解率 D_d 起正反馈作用
α_c	0.1	控制植被冠层截留的降水输入量
μ	0.32	湿润度指数, 表征气候条件的参数, 对生草量 M_c 起正反馈作用
α_s	0.9	控制表土层截留的降水输入量, 取值范围为 0~1
ε_r	1.0	控制生草的地面覆盖度 σ_r , 对 σ_r 起正反馈作用
κ_1	0.4	反映生草遮阴效应的重要参数, 对表土层水分含量 W_s 起正反馈作用
ε_1	0.7	控制与生草量相关的地表蒸发量 E_s , 对地表蒸发量 E_s 起负反馈作用
ε_2	1.0	控制与表土层含水量相关的地表蒸发量 E_s , 对地表蒸发量 E_s 起正反馈作用
ε_3	1.0	控制与枯草量相关的地表蒸发量 E_s , 对 E_s 起负反馈作用(枯草遮阴机制)
φ_{rs}	0.6	控制植被蒸腾量 E_r , 对 E_r 起正反馈作用
κ_1'	1.0	反映生草的蒸腾能力, 对植被蒸腾量 E_r 起正反馈作用
ε_1'	1.0	控制与生草量相关的植被蒸腾量 E_r , 对 E_r 起正反馈作用
ε_2'	1.0	控制与根系层含水量相关的植被蒸腾量 E_r , 对 E_r 起正反馈作用
λ_s	0.015	控制地表层径流量 R_s , 对 R_s 起正反馈作用
κ_s	0.5	反映生草阻止地表径流的能力, 对 R_s 起负反馈作用
ε_{s1}	0.7	控制与生草量相关的地表层径流量 R_s , 对 R_s 起负反馈作用
ε_{s2}	1.0	控制与地表层含水量相关的地表层径流量 R_s , 对 R_s 起正反馈作用
ε_{s3}	1.0	控制与枯草量相关的地表层径流量 R_s , 对 R_s 起负反馈作用
λ_r	0.015	控制根系层径流量 R_r , 对 R_r 起正反馈作用
κ_r	0.7	反映生草阻止根系层径流的能力, 对 R_r 起负反馈作用
ε_{r1}	0.7	控制与生草量相关的根系层径流量 R_r , 对 R_r 起负反馈作用
ε_{r2}	1.0	控制与根系层含水量相关的根系层径流量 R_r , 对 R_r 起正反馈作用
α_r	0.3	控制地表层径流流入根系层的量, 对根系层水分含量 W_r 起正反馈作用

系统模拟不确定性所得 CNOP-Ps 的联合模态与多参数优化研究草原生态系统模拟不确定性所得 CNOP-P 的模态是有差别的。

为了研究草原生态系统模拟对不同类型参数误差的不确定性程度, 我们不仅利用上述两种参数

表 2 单参数优化和多参数优化所得 CNOP-Ps

Table 2 CNOP-Ps calculated for parameters optimized alone and simultaneously

参数	标准值	单参数 CNOP-Ps	多参数 CNOP-P
ε_{gx}	1.0	-0.01	-0.01
ε_{gy}	1.0	-0.01	-0.01
β_x	0.1	0.001	0.001
ε_{dx}	1.0	0.01	0.01
ε_{dy}	1.0	-0.01	-0.01
γ_x	0.1	0.001	0.001
ε_{cx}	1.0	-0.01	0.01
β'	0.5	0.005	-0.005
β_z	0.1	-0.001	0.001
ε_{dz}	1.0	-0.01	0.01
α_c	0.1	-0.001	0.001
μ	0.32	-0.0032	-0.0032
α_s	0.9	0.009	0.009
ε_r	1.0	-0.01	0.01
κ_1	0.4	0.004	-0.004
ε_1	0.7	-0.007	-0.007
ε_2	1.0	0.01	0.01
ε_3	1.0	0.01	-0.01
φ_{rs}	0.6	-0.006	0.006
κ_1'	1.0	0.01	-0.01
ε_1'	1.0	-0.01	0.01
ε_2'	1.0	-0.01	0.01
λ_s	0.015	-0.00015	0.00015
κ_s	0.5	0.005	-0.005
ε_{s1}	0.7	-0.007	-0.007
ε_{s2}	1.0	0.01	0.01
ε_{s3}	1.0	-0.01	-0.01
λ_r	0.015	-0.00015	-0.00015
κ_r	0.7	0.007	0.007
ε_{r1}	0.7	-0.007	0.007
ε_{r2}	1.0	0.01	0.01
α_r	0.3	-0.003	-0.003

误差, 而且引入了两组随机参数误差。图 2 给出了 CNOP-P、单参数优化所得 CNOP-Ps 的联合模态以及两组随机参数误差对草原生态系统模拟结果不确定性程度的差异。从图 2 中可以发现, 同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 型参数误差使得草原生态系统各个变量在初始时刻都大幅减小, 模式积分 60 a 后, 生草量和枯草量为 0, 表土层和根系层水分含量减小为 0.4, 并且达到平衡态, 该草原生态系统转变为沙漠生态系统。优化单个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态使得草原生态系统各个变量在初始时刻略有减小, 模式积分 30 a 后草原生态系统趋于一个新的草原生态系统。该草原生态系统与基态相比, 其生草量和枯草量都变少。随机参数误差类型一导致的草原生态系统模拟在初始时刻使得草原

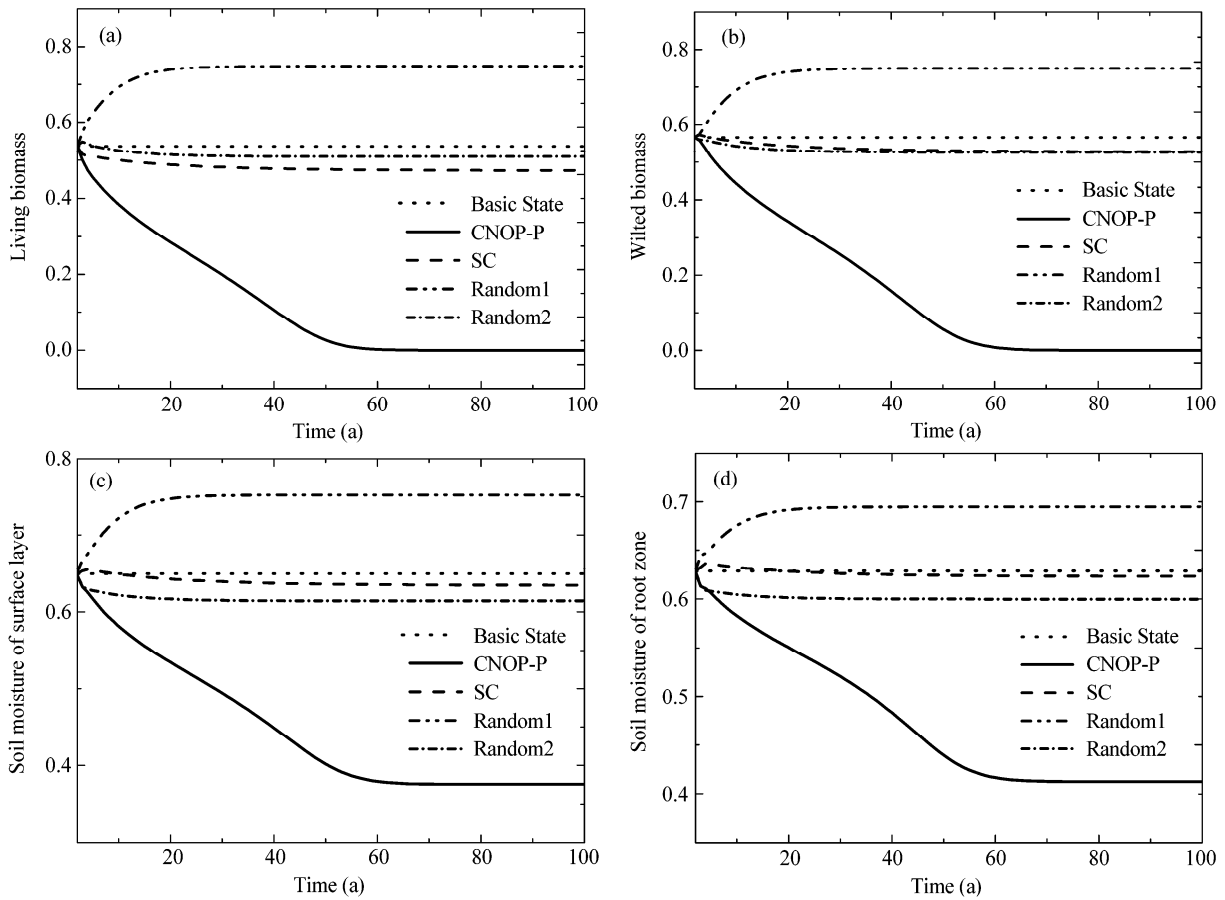


图2 参数不确定性范围大小为1%和优化时间为10a的情况下，(a)生草量、(b)枯草量、(c)表土层水分含量、(d)根系层水分含量对草原生态系统模拟结果的影响。“Basic State”表示基态；“CNOP-P”表示同时优化32个参数所得CNOP-P对草原生态系统模拟结果的影响；“SC”代表“Simple Combination”，表示优化单个参数所得CNOP-Ps的联合模态对草原生态系统模拟结果的影响；“Random1”和“Random2”表示在相同约束大小情况下的随机参数误差类型1和2模态对草原生态系统模拟结果的影响

Fig. 2 The impact of (a) living biomass, (b) wilted biomass, (c) soil moisture of surface layer, and (d) soil moisture of root zone on the grassland ecosystem simulation with size of 1% in the parameters uncertainties and optimization time being 10 years. “Basic State” lines refer to basic state. “CNOP-P” lines refer to the grassland ecosystem simulation caused by the CNOP-P from parameters optimized simultaneously. “SC” lines refer to the grassland ecosystem simulation caused by the simple combination of the CNOP-Ps from separately optimizing each parameter. “Random1” and “Random2” lines refer to the grassland ecosystem simulations caused by the random parameter errors 1 and 2 with the same error size of parameters uncertainties

生态系统各个变量增大，积分20a后趋于草原生态系统，该草原生态系统与基态相比，其生草量和枯草量增加。随机参数误差类型二导致的草原生态系统模拟也趋于草原生态系统，但该草原生态系统与基态相比，其生草量和枯草量略微减少。比较这四种类型的参数误差对草原生态系统模拟结果不确定性的差异，发现同时优化32个参数所得CNOP-P型参数误差对草原生态系统模拟结果的不确定性程度最大，使之转变为沙漠生态系统。

我们尝试分析了同时优化所有参数所得CNOP-P的模态及其对草原生态系统模拟结果的不确定性影响与优化单个参数所得CNOP-Ps的联合模态及其影响不同的原因。从图2可见，同时优化

所有参数所得CNOP-P不利于草原生态系统的发展。分析单独优化每个参数所得CNOP-P对草原生态系统的影响，发现部分CNOP-Ps有利于草原生态系统的发展，而另一部分则不利于草原生态系统的发展。另外，也可以从参数的正（负）反馈机制分析。例如，参数 ϵ_{gx} 对 M_c 起正反馈作用，而单个优化参数 ϵ_{gx} 所得CNOP-P为负扰动(-0.01)。因此，单独优化参数 ϵ_{gx} 所得CNOP-P不利于草原生态系统的发展。其他参数可以进行类似的正（负）反馈机制分析。我们分析了所考察的32个参数的CNOP-Ps，发现表2中第3列中不同于第4列的CNOP-Ps的参数值都是有利于草原生态系统发展的。这样就解释了单独优化每个参数所得CNOP-Ps

的联合模态与同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 的模态不同的原因。

3.2 敏感性分析

为了探讨上述单独优化每个参数和同时优化所有参数得到的 CNOP-Ps 是否依赖于参数不确定性范围的大小和优化时间的选取,进行了下面的数值试验。

3.2.1 单独优化每个参数

改变优化时间和不确定性范围的大小,单独优化模式中所考察的 32 个参数中的每个参数,分析 CNOP-Ps 的联合模态。表 3 给出了优化结果。表 3 中第 1 列为参数,第 2 列为参数在模式中的标准值,第 3~8 列分别为不同的不确定性范围的大小和优化时间情况下每个参数对应的 CNOP-Ps。从表 3 发现,在相同的优化时间和不同的不确定性范围的大小情形下,单独优化同一个参数所得的 CNOP-Ps 值都在边界上,符号相同;在相同的不确定性范围大小和不同的优化时间情形下,单独优化同一个参数所得 CNOP-Ps 有 5 个参数结果不同,它们的符号刚好相反,这 5 个参数分别是 ε_{cx} 、 β' 、 ε_3 、 κ_1' 、 λ_s 。我们尝试分析了 β' 对于优化时间不同而 CNOP-P 符号相反的原因。表 1 中看出 β' 对枯草量 M_d 起正反馈作用,因此正扰动促进 M_d 发展,负扰动抑制 M_d 发展。在优化终止时刻为 10 a 时,叠加正扰动后的目标函数值为 0.1511,叠加负扰动后的目标函数值为 0.1452,因此,10 a 内促进作用明显。在优化终止时刻为 20 a 时,叠加正扰动后的目标函数值为 0.1965,叠加负扰动后的目标函数值为 0.2058,因此,20 a 内抑制作用更明显。通过上面分析得出:优化时间 10 a 的 CNOP-P 是正扰动,而优化时间 20 a 的 CNOP-P 是负扰动。其它 4 个参数可以用类似的分析解释其 CNOP-P 对优化时间的改变而不同的原因。综上分析发现,优化单个参数在相同的优化时间和不同的约束大小下所得 CNOP-Ps 数值都在边界上,符号相同。5 个参数在相同的约束大小,优化时间 10 a 和 20 a 所得 CNOP-Ps 的大小相同,符号相反。

3.2.2 同时优化所有参数

也进行了同时考虑 32 个参数的试验,即改变优化时间和参数不确定性范围的大小同时优化所有参数,分析 CNOP-Ps 的模态。表 4 给出了优化结果。表 4 中第 1 列为参数,第 2 列为模式参数标准值,第 3 列为不确定性范围大小为 1% 和优化时间

表 3 在不同的优化时间和不确定性范围大小情形下单参数优化所得 CNOP-Ps

Table 3 CNOP-Ps calculated for parameters optimized alone for different optimization time and different sizes of the parameters uncertainties

参数	标准值	CNOP-Ps 值					
		1%& 10yr	1%& 20yr	5%& 10yr	5%& 20yr	10%& 10yr	10%& 20yr
ε_{gx}	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_{gy}	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
β	0.1	0.001	0.001	0.005	0.005	0.01	0.01
ε_{dx}	1.0	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
ε_{dy}	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
γ_x	0.1	0.001	0.001	0.005	0.005	0.01	0.01
ε_{cx}	1.0	-0.01	0.01	-0.05	0.05	-0.1	0.1
β'	0.5	0.005	-0.005	0.025	-0.025	0.05	-0.05
β_z	0.1	-0.001	-0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
ε_{dx}	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
α_c	0.1	-0.001	-0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
μ	0.32	-0.0032	-0.0032	-0.016	-0.016	-0.032	-0.032
α_s	0.9	0.009	0.009	0.045	0.045	0.09	0.09
ε_f	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
κ_1	0.4	0.004	0.004	0.02	0.02	0.04	0.04
ε_1	0.7	-0.007	-0.007	-0.035	-0.035	-0.07	-0.07
ε_2	1.0	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
ε_3	1.0	0.01	-0.01	0.05	-0.05	0.1	-0.1
φ_{rs}	0.6	-0.006	-0.006	-0.03	-0.03	-0.06	-0.06
κ_1'	1.0	0.01	-0.01	0.05	-0.05	0.1	-0.1
ε_1'	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_2'	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
λ_s	0.015	-0.00015	0.00015	-0.00075	0.00075	-0.0015	0.0015
κ_s	0.5	0.005	0.005	0.025	0.025	0.05	0.05
ε_{s1}	0.7	-0.007	-0.007	-0.035	-0.035	-0.07	-0.07
ε_{s2}	1.0	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
ε_{s3}	1.0	-0.01	-0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
λ_t	0.015	-0.00015	-0.00015	-0.00075	-0.00075	-0.0015	-0.0015
κ_f	0.7	0.007	0.007	0.035	0.035	0.07	0.07
ε_{r1}	0.7	-0.007	-0.007	-0.035	-0.035	-0.07	-0.07
ε_{r2}	1.0	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
α_t	0.3	-0.003	-0.003	-0.015	-0.015	-0.03	-0.03

为 10 a 所得 CNOP-P 的模态,后几列类似。我们发现同时优化所有参数在相同的不确定性范围大小和不同的优化时间情形下所得 CNOP-Ps 的模态完全相同(如第 3 列和第 4 列完全相同)。比较第 3、5 和 7 列发现,在相同的优化时间和不同的不确定性范围大小下所得 CNOP-Ps 的模态不完全相同(如参数 α_s 分量在扰动约束大小 5% 为负值而在不确定性范围大小 1%、10% 为正值,第 3 列和第 5 列符号完全相反)。我们尝试分析了优化结果不同的原因。由于参数约束条件 1% 时, CNOP-P 不利于生态系统的发展,而 5% 时有利于生态系统的发展,因此第 3 列和第 5 列符号完全相反。参数约束大小 10% 和 5% 时的 4 个参数误差分量符号不同是

表 4 同表 3，但为 32 个模式参数同时优化
Table 4 Same as Table 3, but for 32 model parameters optimized simultaneously

参数	标准值	CNOP-Ps 值					
		1%& 10yr	1%& 20yr	5%& 10yr	5%& 20yr	10%& 10yr	10%& 20yr
ε_{gx}	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
ε_{gy}	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
β_x	0.1	0.001	0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
ε_{dx}	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_{dy}	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
γ_x	0.1	0.001	0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
ε_{cx}	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
β'	0.5	-0.005	-0.005	0.025	0.025	0.05	0.05
β_z	0.1	0.001	0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
ε_{dz}	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
α_c	0.1	0.001	0.001	-0.005	-0.005	-0.01	-0.01
μ	0.32	-0.0032	-0.0032	0.016	0.016	0.032	0.032
α_s	0.9	0.009	0.009	-0.045	-0.045	0.09	0.09
ε_t	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
κ_1	0.4	-0.004	-0.004	0.02	0.02	0.04	0.04
ε_1	0.7	-0.007	-0.007	0.035	0.035	0.07	0.07
ε_2	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_3	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
φ_{s3}	0.6	0.006	0.006	-0.03	-0.03	-0.06	-0.06
κ_1'	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
ε_1'	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_2'	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
λ_s	0.015	0.00015	0.00015	-0.00075	-0.00075	-0.0015	-0.0015
κ_s	0.5	-0.005	-0.005	0.025	0.025	0.05	0.05
ε_{s1}	0.7	-0.007	-0.007	0.035	0.035	0.07	0.07
ε_{s2}	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
ε_{s3}	1.0	-0.01	-0.01	0.05	0.05	0.1	0.1
λ_r	0.015	-0.00015	-0.00015	0.00075	0.00075	-0.0015	-0.0015
κ_r	0.7	0.007	0.007	-0.035	-0.035	0.07	0.07
ε_{r1}	0.7	0.007	0.007	-0.035	-0.035	0.07	0.07
ε_{r2}	1.0	0.01	0.01	-0.05	-0.05	-0.1	-0.1
α_r	0.3	-0.003	-0.003	0.015	0.015	0.03	0.03

由参数之间的非线性作用造成的，参数误差范围变大后，参数间的非线性作用更显著，这也是我们下一步工作研究的重点。

综上所述，我们得出单独优化同一个参数所得 CNOP-Ps 个别参数依赖于优化时间的选取；同时优化所有参数所得 CNOP-Ps 依赖于参数不确定性范围大小的选取。

比较表 3 和表 4 各列发现，优化单个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态和同时优化所有参数所得 CNOP-P 的模态不同，因此这个结论是不依赖于优化时间和参数不确定性范围大小的选取。我们再分析参数不确定性范围大小为 5% 和优化时间为 10 a

时两类 CNOP-P 类型参数误差以及两组随机参数误差对草原生态系统模拟结果的不确定性。图 3 给出了 4 种参数误差类型导致的五变量草原生态系统模式模拟结果的不确定性程度。从图 3 中可见，同时优化 32 个参数所得 CNOP-P 型参数误差使得草原生态系统各个变量在初始时刻增长较快，模式积分 20 a 后，趋于一个新的草原生态系统，该草原生态系统与基态相比，其生草量和枯草量更多。优化单个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态使得草原生态系统各个变量在初始时刻减小，模式积分 30 a 后草原生态系统趋于沙漠生态系统。随机参数误差类型一使得草原生态系统各个变量在初始时刻快速减小，积分 10 a 后趋于沙漠生态系统。随机参数误差类型二使得草原生态系统缓慢发展为新的草原生态系统。比较这 4 种类型的参数误差对草原生态系统模拟结果不确定性的影响，我们发现同时优化 32 个参数所得的 CNOP-P 型参数误差对草原生态系统模拟结果的不确定性程度最大。参数不确定性范围大小为 10% 的情况与上述试验结果类似。

4 总结和讨论

本文基于一个五变量草原生态系统模式，选取一个线性稳定的草原平衡态作为参考态，对该模式中具有物理意义的 32 个模式参数，用 CNOP-P 方法进行了单参数和多参数优化试验，对单参数 CNOP-Ps 的联合模态与同时优化所有参数所得 CNOP-P 的模态进行了比较，并且分析了它们对草原生态系统模拟结果不确定性的影响。同时比较了 CNOP-P 型参数误差与随机参数误差对草原生态系统模拟结果不确定性影响的差异。另外，改变优化时间和参数不确定性范围大小，分别进行了单个参数优化和所有参数同时优化的敏感性试验。结果表明，优化单个参数所得 CNOP-Ps 的联合模态与同时优化所有参数所得 CNOP-P 的模态不同；同时优化所有参数所得 CNOP-P 型参数误差对草原生态系统模拟结果的不确定性程度最大。这种影响表现在使得草原生态系统转变为沙漠生态系统，或者使得草原生态系统发展为另一种具有更多生草量的草原生态系统。敏感性试验表明，上述数值结果不依赖于优化时间和参数不确定性范围大小的选取。本研究中所有试验所得的 CNOP-P 值都在参数约束的边界上，可能的原因是模式比较简单，忽略了一些

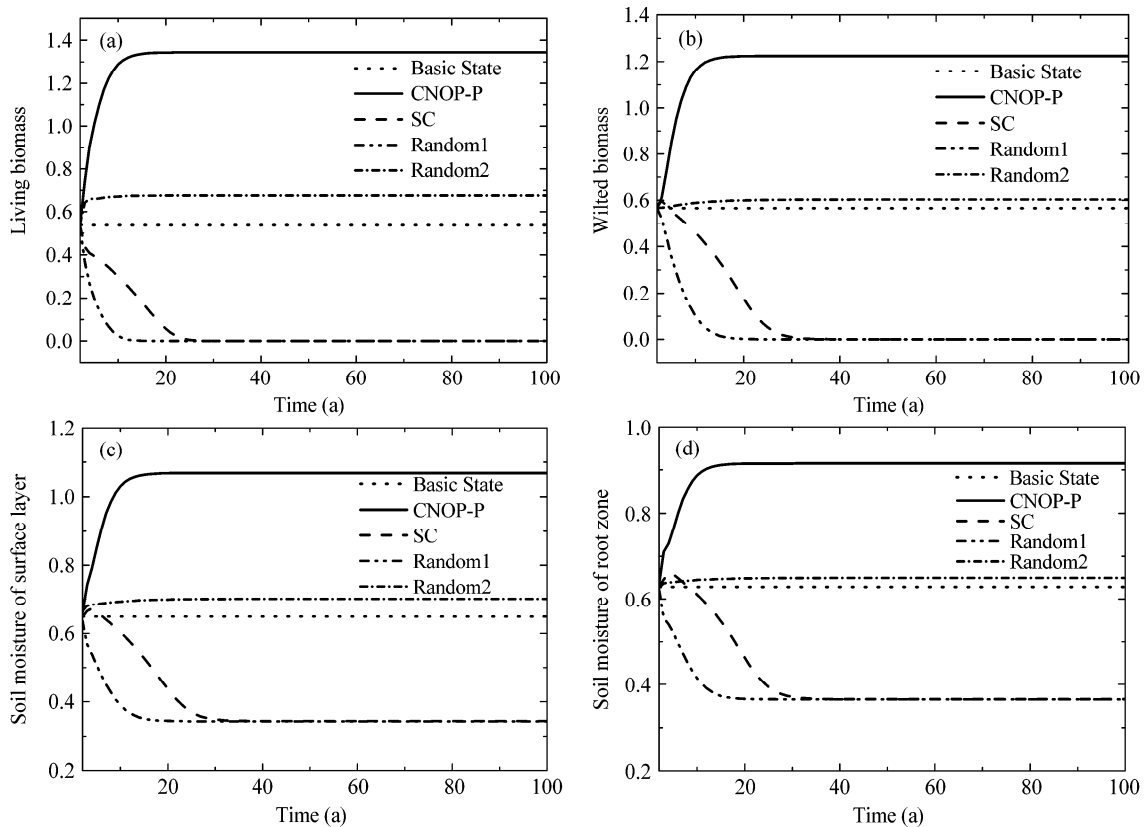


图3 同图2, 但参数误差约束大小为5%

Fig. 3 Same as Fig. 2, but with error size of 5% in the parameters uncertainties

复杂的物理过程。这些数值结果表明 CNOP-P 方法对参数不确定性导致草原生态系统模拟结果不确定性研究是一个有用的工具。

本文的工作是在一定参数不确定性范围内, 将 CNOP-P 方法应用于参数不确定性导致的草原生态系统模拟结果不确定性的研究。我们找到了一类参数误差, 这类参数误差使得草原生态系统模拟结果不确定性程度最大。这类参数误差可以指导我们更好地模拟草原生态系统, 避免产生最大的模拟结果不确定性或者预报误差。本文的研究只是一个基础性的研究工作, 得到了一个初步的研究结果, 我们今后的工作将进一步研究确定多参数中导致最大模拟不确定性的参数组合, 通过观测或同化等手段改善这些参数, 尽可能地提高模式的模拟性能。另外, 文中的研究还需要进一步完善, 如试验中参数不确定性范围大小设定为参数标准值的 1%, 这一不确定性范围大小可能根据参数的不同而不同。本文研究中选取的目标函数是用草原生态系统中生草量、枯草量、表土层和根系层水分含量来度量, 下一步工作可选取草量或者土壤水分含量为考察对象

来分析草原生态系统模拟结果的不确定性。本文中的敏感性试验结果, 也需要进一步的物理解释。

参考文献 (References)

- Bastidas L A. 1998. Parameter estimation for hydrometeorological models using multi-criteria methods [D]. Ph. D. dissertation, Dep. of Hydrology and Water Res., Univ. of Arizona, Tucson, 204pp.
- Byrd R H, Lu P, Nocedal J, et al. 1995. A limited memory algorithm for bound constrained optimization [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 16 (5): 1190–1208.
- Chen W, Zhu D Q, Liu H Z, et al. 2009. Land–air interaction over arid/semi-arid areas in China and its impact on the East Asian summer monsoon. Part I: Calibration of the land surface model (BATS) using multicriteria methods [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (6): 1088–1098.
- Collins D C, Avissar R. 1994. An evaluation with the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) of which land surface parameters are of greatest importance in atmospheric modeling [J]. *J. Climate*, 7 (5): 681–703.
- Duan W S, Zhang R. 2010. Is model parameter error related to a significant spring predictability barrier for El Niño events? Results from a theoretical model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (5): 1003–1013.

- Errico R M. 1997. What is an adjoint model? [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78 (11): 2577–2591.
- Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. 2010. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Science China Life Sciences*, 53: 757–765, doi:10.1007/s11427-010-4029-x.
- Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and non-commensurable measures of information [J]. *Water Resour. Res.*, 34: 751–761.
- Jackson C, Xia Y L, Sen M K, et al. 2003. Optimal parameter estimation and uncertainty analysis of a land surface model: A case study from Cabauw, Netherlands [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D18), 4583, doi:10.1029/2002JD002991.
- Klausmeier C A. 1999. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation [J]. *Science*, 284: 1826–1828.
- 李红祺, 郭维栋, 孙国栋, 等. 2011. 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 [J]. *物理学报*, 60 (1): 784–790. Li Hongqi, Guo Weidong, Sun Guodong, et al. 2011. Using conditional nonlinear optimal perturbation method in parameter optimization of land surface processes model [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 784–790.
- 骆海英. 2008. 一类模式误差对 ENSO 可预报性影响的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 118pp. Luo Haiying. 2008. Impact of a kind of model error on the predictability of ENSO [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 118pp.
- 吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 1997. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用—科学问题与实验计划概述 [J]. *气候与环境研究*, 2 (3): 199–209. Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. 1997. Inner Mongolia semi-arid grassland soil–vegetation–atmosphere interaction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2 (3): 199–209.
- Margulis S A, Entekhabi D. 2001. A coupled land surface–boundary layer model and its adjoint [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2: 274–295.
- Mu M, Wang B. 2007. Nonlinear instability and sensitivity of a theoretical grassland ecosystem to finite-amplitude perturbations [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14: 409–423.
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10: 493–501.
- Mu M, Duan W S, Wang Q, et al. 2010. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17: 211–220.
- Pathak T B, Fraise C W, Jones J W, et al. 2007. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO cotton model development [J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50 (6): 2295–2302.
- Pitman A J. 1994. Assessing the sensitivity of a land-surface scheme to the parameter values using a single column model [J]. *J. Climate*, 7: 1856–1869.
- Saltelli A, Tarantola S, Chan K. 1999. A quantitative, model independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. *Technometrics*, 41: 39–56.
- Sorooshian S, Gupta V K. 1985. The analysis of structural identifiability: Theory and application to conceptual rainfall-runoff models [J]. *Water Resour. Res.*, 21 (4): 487–495.
- 宋耀明. 2008. 陆面过程模式在中国的数值模拟研究 [D]. 南京大学大气科学学院博士学位论文, 175pp. Song Yaoming. 2008. Numerical simulation study of land surface model in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 175pp.
- Sun G D, Mu M. 2009. Nonlinear feature of the abrupt transitions between multiple equilibria states of an ecosystem model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (2): 293–304.
- Wang B, Wang J P, Huo Z H, et al. 2010. Application of the conditional nonlinear optimal perturbations method in a theoretical grassland ecosystem [J]. *Chinese Quarterly Journal of Mathematics*, 25 (3): 422–429.
- Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. 2011. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (1): 118–134, doi:10.1007/s00376-011-0199-0.
- 王强. 2011. 黑潮路径变异的可预报性研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 104pp. Wang Qiang. 2011. The predictability studies of the Kuroshio path variations [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 104pp.
- Wilson M F, Henderson-Sellers A, Dickinson R E, et al. 1987a. Sensitivity of the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26: 341–362.
- Wilson M F, Henderson-Sellers A, Dickinson R E, et al. 1987b. Investigation of the sensitivity of the land-surface parameterization of the NCAR Community Climate Model in regions of tundra vegetation [J]. *J. Climatol.*, 7: 319–343.
- Xia Y, Yang Z L, Jackson C, et al. 2004. Impacts of data length on optimal parameter and uncertainty estimation of a land surface model [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D07101, doi:10.1029/2003JD004419.
- Yapo P O, Gupta H V, Sorooshian S. 1997. Multi-objective global optimization for hydrologic models [J]. *J. Hydrol.*, 204 (1–4): 83–97.
- 余堰山. 2009. ENSO 事件春季可预报性障碍问题研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 115pp. Yu Yanshan. 2009. Studies of ENSO “Spring Predictability Barrier” problem [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 115pp.
- Zeng Q C, Zeng X D, Wang A H, et al. 2003. Models and numerical simulation of atmosphere–vegetation–soil interactions and ecosystem dynamics [C]// *Proceedings of ICCP6-CCP2003*. Beijing: Rinton Press Inc., 18pp.
- 曾庆存, 曾晓东, 王爱慧, 等. 2005. 大气和植被生态及土壤系统水文过程相互作用的一些研究 [J]. *大气科学*, 29 (1): 7–19. Zeng Qingcun, Zeng Xiaodong, Wang Aihui, et al. 2005. Some studies of the hydrological interactions in the atmosphere–ecosystem–soil system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 29 (1): 7–19.
- 曾晓东, 王爱慧, 赵钢, 等. 2004. 草原生态动力学模式及其实际检验 [J]. *中国科学 (C 辑)*, 34 (5): 481–486. Zeng Xiaodong, Wang

- Aihui, Zhao Gang, et al. 2005. Ecological dynamic model of grassland and its practical verification [J]. *Science in China (Ser. C)*, 48 (1): 41–48.
- Zeng X D, Shen S S P, Zeng X B, et al. 2004. Multiple equilibrium states and the abrupt transitions in a dynamical system of soil water interacting with vegetation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: 5501, doi:10.1029/2003GL01891.
- Zeng X D, Zeng X B, Shen S S P, et al. 2005. Vegetation–soil water interaction within a dynamical ecosystem model of grassland in the semi-arid areas [J]. *Tellus*, 57B: 189–202.
- Zeng X D, Wang A H, Zeng Q C, et al. 2006. Intermediately complex models for the hydrological interactions in the atmosphere–vegetation–soil system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23 (1): 127–140.
- Zhu C, Byrd R H, Nocedal J. 1997. Algorithm 778: L-BFGS-B, FORTRAN subroutines for large scale bound constrained optimization [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 23 (4): 550–560.