科学通报 2014 年 第 59 卷 第 23 期: 2329
简 报 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

应用双重优化方法估计碳通量

郑珩[①], 李勇[①*], 陈镜明[②③], 王婷[④], 黄勍[①], 盛瑶[①②]

① 北京师范大学数学科学学院, 北京 100875;
② Department of Geography and Program in Planning, University of Toronto, Toronto M5S 3G3, Canada;
③ 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;
④ Department of Mathematics and Statistics, University of Otago, Dunedin 9054, New Zealand
* 联系人, E-mail: liyong@bnu.edu.cn

贝叶斯综合反演方法(BSIM)利用先验 CO_2 通量和大气 CO_2 浓度观测数据估计碳通量分布, 其结果在很大程度依赖于先验碳通量的偏差. 实际应用中, 通常用生态碳通量模型计算先验通量, 可是不恰当的短期生态过程的模拟将引起先验通量的刻度误差, 从而导致 BSIM 估计结果的偏差. 我们提出了一种双重优化算法, 它由 2 个模型组成: 一个是大气传输模型, 它描述了大气中 CO_2 浓度观测和真实地表通量之间的关系, 表达式如下:

$$c = \mathbf{G}s + \eta, \tag{1}$$

其中, c 为大气 CO_2 浓度观测, $\boldsymbol{s}$ 为真实地表通量, $\mathbf{G}$ 为大气传输矩阵, η为观测误差, 均值为 $\mathbf{0}$, 方差阵为 $\mathbf{R}$; 另一个是生态系统模型, 它描述了真实地表通量与生态系统模型通量之间的关系. 这里根据植被类型引入了一系列调整因子作为新的状态变量来修正先验通量, 同一植被类型通量具有相同的调整因子:

$$s=\mathrm{S_M}\lambda+s_{\mathrm{FF}}+s_{\mathrm{FIRE}}+\varepsilon, \tag{1}$$

其中 $\lambda=\left(\lambda_1^{(1)}\ \lambda_2^{(1)}\ \lambda_3^{(1)}\cdots\lambda_1^{(k)}\ \lambda_2^{(k)}\ \lambda_3^{(k)}\right)^{\mathrm{T}}$ 是调整因子向量, $\mathrm{S_M}=\left(s_{\mathrm{ER}}^{(1)}\ -s_{\mathrm{GPP}}^{(1)}\ s_{\mathrm{OCE}}^{(1)}\cdots s_{\mathrm{ER}}^{(k)}\ -s_{\mathrm{GPP}}^{(k)}\ s_{\mathrm{OCE}}^{(k)}\right)$代表由生态系统模型(如 BEPS, CASA 等)计算得到的模型通量矩阵, $s_{\mathrm{ER}}^{(i)}$, $s_{\mathrm{GPP}}^{(i)}$ 和 $s_{\mathrm{OCE}}^{(i)}$ 代表第 i 个类型的呼吸、光合作用和海洋通量, s_{FF} 和 s_{FIRE} 分别代表石化和火灾排放, ε 是模型误差均值为 $\mathbf{0}$, 方差阵为 $\mathbf{R}$. 结合上面两个模型, 我们构造了一个类似于 BSIM 的损失函数:

$$\tilde{J}(\lambda,s)=\frac{1}{2}(\mathrm{G}s-c)^{\mathrm{T}}\mathrm{R}^{-1}(\mathrm{G}s-c)+\frac{1}{2}\left(s-(\mathrm{S_M}\lambda+s_{\mathrm{FF}}+s_{\mathrm{FIRE}})\right)^{\mathrm{T}}\mathrm{Q}^{-1}\left(s-(\mathrm{S_M}\lambda+s_{\mathrm{FF}}+s_{\mathrm{FIRE}})\right).$$

在这个函数里, λ和 s 是未知的状态变量. 通过极小化上面的函数, 可以同时获得调整因子和碳通量的估计. 我们称这种同时优化刻度因子和碳通量的方法为双优化方法(DOM).

由 DOM 得到的通量具有很多优于 BSIM 的性质: 在修正的生态系统模型(2)假设下, DOM 所得通量估计是真实通量期望的无偏估计(BSIM 却是有偏的); DOM 可以获得比 BSIM 更小的损失值; DOM 所得到的调整因子是一致最小无偏方差估计.

我们通过一个真实系统的模拟实验来确认 DOM 的效果. 在这个系统中, 全球被划分为 50 个大区域(39 个陆地和 11 个海洋). 待估通量为 50 个区域 1999~2003 年的月度通量. 生态系统模型包含 6 个植被和 1 个海洋类型, 同一个类型通量的调整因子相同. 实验中, 我们先给定真实通量和调整因子以生成模拟浓度观测和有偏的模型通量数据, 然后利用 DOM 估计调整因子和通量并与真实值作比较. 1000 次的重复模拟结果显示: DOM 所得的调整因子和真实值非常接近, 均方根误差控制在 0.011~0.3998 之间且显著地小于 BSIM, 如图 1 所示.

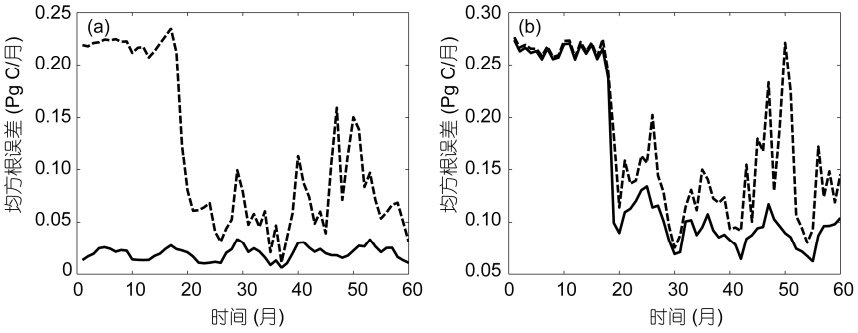

图 1 DOM 的均方根误差曲线(实线)与 BSIM 的均方根误差曲线(虚线)比较
(a) 北太平洋地区; (b) 加利福尼亚北部地区

全文见: Zheng H, Li Y, Chen J M, et al. Applying a dual optimization method to quantify carbon fluxes: Recent progress in carbon flux inversion. Chin Sci Bull, 2014, 59: 222–226, doi: 10.1007/s11434-013-0016-5