

# 拓展傅里叶幅度敏感性检验 (EFAST) 在陆面过程模式中参数敏感性分析的应用探索\*

王建栋<sup>1)2)</sup> 郭维栋<sup>1)†</sup> 李红祺<sup>3)</sup>

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

2) (清华大学环境学院, 北京 100084)

3) (中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

(2012年9月19日收到; 2012年10月17日收到修改稿)

本文旨在探讨拓展傅里叶幅度敏感性检验 (EFAST) 在陆面参数敏感性分析中的应用. 基于 2008 年吉林通榆观测站的退化草地观测资料, 针对通用陆面过程模式 (CoLM) 的关键陆面参数, 使用地表感热通量、潜热通量作为检验变量, 尝试将 EFAST 方法运用到陆面过程模式参数敏感性试验中. 在充分考虑单个参数敏感性的基础上, 将参数间的耦合作用考虑进来, 研究了相互影响制约下的多参数变化对非线性系统的影响, 并且对这种非线性影响进行了定量分析. 敏感性分析结果表明: 土壤砂土比例、最小水分透过孔隙度为影响地表感热通量与潜热通量的关键参数, 验证了 EFAST 方法在陆面过程模式参数敏感性分析方面的可行性. 本项研究对于外场观测试验的设计和发展陆面模式物理过程参数化方案具有积极的指导意义.

**关键词:** 陆面过程模式, 陆面参数, EFAST 方法, 参数敏感性

**PACS:** 02.60.Cb

**DOI:** 10.7498/aps.62.050202

## 1 引言

陆地占据了地球表面约三分之一面积, 其表面与大气之间不断进行着各种尺度的相互作用, 以及复杂的能量、动量和物质交换, 这些过程影响整个天气气候系统的演变<sup>[1,2]</sup>, 在某些局地或时段甚至起着关键性的作用. 因此, 陆面过程研究是天气气候变化研究的重要组成部分, 而陆面过程模式正式是陆面过程研究的一种重要手段和途径.

随着陆面过程研究的深入进行, 陆面过程模式中参数化方案越来越多, 也越来越复杂. 现有的陆面过程参数化方案之间的相互比较已经趋于径流与蒸散发之间的水分分配以及感热、潜热通量间的能量分配差别分析<sup>[3,4]</sup>, 而这些差异是模式组成以及模式参数差别的综合反映. 陆面过程方案比较

计划 (PILPS)<sup>[5,6]</sup> 的研究表明, 在表现影响水和能量分配的关键陆面过程中, 不同陆面过程方案结果差别很大, 其主要原因来自模式的发展理念、结构组成 (如模式在表现生物物理和水文过程时的复杂程度)、相近参数定义有效性的不同<sup>[7-9]</sup>.

参数化方案的广泛应用, 给原本就包含不少参数的陆面过程模式带来了更多的参数, 这些参数对于模式物理过程的准确描述起着重要的作用<sup>[10]</sup>. 陆面过程参数化方案中这些参数的预设值有些可以通过野外实际观测获得, 有些只能通过经验、半经验或者统计的方法来得到估计值, 而即便是理论上可以观测获得的参数, 也往往由于观测条件限制, 精度得不到保证, 导致了观测值并不可信<sup>[11,12]</sup>. 这些参数取值的不确定性必然会对陆面过程模式的模拟结果造成影响, 但这些参数的不确定性对模式模拟结果造成影响的程度如何是我们不得不关注

\* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2011CB952002)、国家自然科学基金 (批准号: 40975049, 40810059003)、江苏高校优势学科建设工程和国家基础科学人才培养基金项目 (批准号: J1103410) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guowd@nju.edu.cn

的问题. 参数敏感性研究正是针对上述问题展开的.

通过陆面过程模式参数敏感性分析可以: 1) 通过对模式中参数的筛选, 指导野外观测试验, 在有限的资源限制下, 对敏感度高的参数优先进行观测; 2) 指导陆面模式参数化过程的发展, 应优先发展与敏感度较高的陆面参数直接有关的物理过程参数化方案, 节省人力和机时.

McCuen 和 Snyder<sup>[13]</sup> 定义敏感性为一个因子同另一个因子变化的比率. 不同的敏感性分析方法已经发展并应用到水文和陆面过程模式中, 例如复合判据逼近<sup>[14]</sup> (multi-criteria approach, MC) 方法、多目标复演进全域优选法<sup>[15]</sup> (multi-objective complex evolution, MOCOM-UA) 方法、一阶二距 (first order second moment, FOSM) 方法<sup>[16]</sup> 以及伴随矩阵 (adjoint methods) 方法<sup>[17]</sup> 等等, 这些方法在一定程度上优化了模式参数, 改进了模式的模拟能力, 为实际应用提供了理论上的指导. 然而上述方法也存在某些方面的不足, 以 OAT 方法<sup>[18,19]</sup> 为例, 某个参数从其标准值到其最大或最小值扰动, 其余参数不变, 研究模式结果的变化, 这就完全忽略了参数之间的相互作用和影响. 这些方法通常只考虑一阶分量, 而没有考虑参数相互耦合作用, 因此无法准确地对非线性系统做出定量分析. 而 Saltelli<sup>[23,24]</sup> 提出的拓展傅里叶幅度敏感性检验 (extended Fourier amplitude sensitive test, EFAST) 方法解决了上述问题. 并在水文, 农业, 物理模型等系统中取得了良好效果<sup>[25-31]</sup>, 而在陆面模式敏感性分析中的应用据目前所知尚属首次.

## 2 EFAST 方法

EFAST 方法是 Saltelli 等人<sup>[23,24]</sup> 在傅里叶振幅敏感性检验 (Fourier amplitude sensitivity test, FAST) 方法<sup>[32]</sup> 的基础上, 结合 Sobol'<sup>[33]</sup> 方法, 在模型方差分析基础上提出的全局性敏感性分析方法. 其具体运算框架如图 1.

EFAST 方法的基本思想来自于贝叶斯定理<sup>[35,36]</sup>, 即认为模式输出结果的敏感性可以用模式结果的方差来反应. 参数  $x$  的敏感性可以用下式来表示:

$$\text{Sensitivity}_x = \frac{\text{var}_x[E(Y|X)]}{\text{var}(Y)}, \quad (1)$$

其中  $Y$  为模式的输出值,  $x$  为输入参数,  $E(Y|X)$  为在  $x$  取某一定值时  $Y$  的期望,  $\text{var}_x$  是  $x$  遍历  $x$  的取

值范围时的方差.

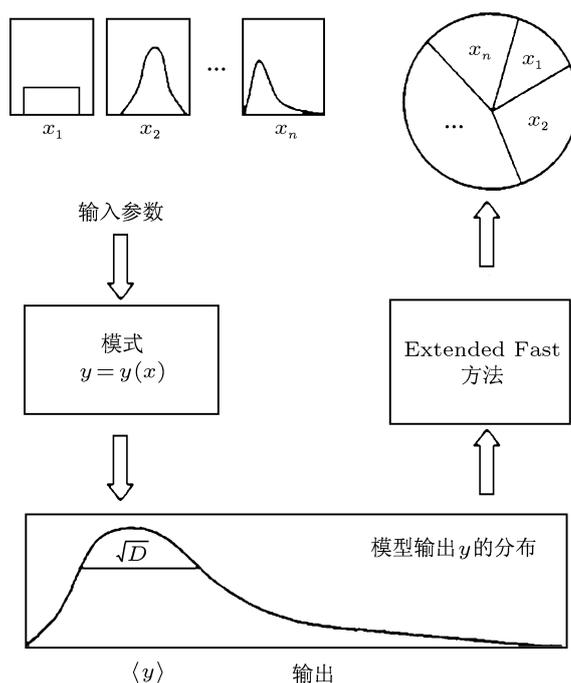


图 1 EFAST<sup>[34]</sup> 方法框架图

现假定模式为  $y = f(X)$ , 输入参数为  $X = X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 则  $X$  存在于某一  $n$  维空间  $K^n$  中. 要使  $X$  遍历  $X$  的取值范围时, 不妨将  $X$  看做一随机变量, 满足概率分布  $P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 那么  $Y$  的  $r$  阶距  $y^{(r)}$  满足

$$\langle y^{(r)} \rangle = \int_{K^n} f^r(x_1, x_2, \dots, x_n) P(x_1, x_2, \dots, x_n) dx. \quad (2)$$

可以用多维傅里叶变换, 理论上可以将  $X$  变为一维形式, 即将空间  $K^n$  映射到某一维空间, 进一步求解. 具体做法为选定一转换函数  $G_i$ , 使得

$$x_i(s) = G_i(\sin \omega_i s), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

其中  $s$  为一标量,  $-\infty < s < +\infty$ ;  $\{\omega_i\}$  为  $x_i$  所对应的整数频率. 选取合适的取值可以使得遍历取值范围.

将 (3) 式代入 (2) 式得

$$\bar{y}^{(r)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^r(x_1(s), x_2(s), \dots, x_n(s)) ds. \quad (4)$$

将 (4) 式中  $r$  分别取 2 和 1, 可以分别求出  $\bar{y}$  的二阶矩和一阶矩, 即  $\bar{y}^{(2)}$  与  $\bar{y}^{(1)}$ , 代入下式:

$$\text{var}(Y) = \bar{y}^{(2)} - (\bar{y}^{(1)})^2 \quad (5)$$

可得  $\text{var}(Y)$ .

进而,对  $f(s)$  进行傅里叶级数展开得

$$y = f(s) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \{A_j \cos js + B_j \sin js\}, \quad (6)$$

其中

$$A_{\omega_i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos \omega_i s ds, \quad (7)$$

$$B_{\omega_i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin \omega_i s ds.$$

那么,由第  $i$  个参量引起的方差变化为,  $\omega_i$  的整数倍的振幅平方和,即

$$\text{var}_{x_i}[E(Y|x_i)] = \sum_{p \in Z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2). \quad (8)$$

通过 (6), (7) 式我们即可求得模式的总方差和参数  $i$  引起的一阶方差,即可根据 (8) 式求得模式中参数  $i$  忽略与其他参数耦合以后的一阶敏感性值,

$$S_i = \frac{\text{var}_{x_i}[E(Y|x_i)]}{\text{var}(Y)}. \quad (9)$$

而对于某一参数  $i$  在考虑参数耦合作用后的总敏感性值 (total sensitivity index), 我们需要考虑参数之间的耦合部分, 则

$$S_{Ti} = 1 - \frac{\text{var}_{x_{-i}}[E(Y|x_{-i})]}{\text{var}(Y)}, \quad (10)$$

其中,  $E(Y|x_{-i})$  为  $E(Y|x_i)$  的余补集则可以求出总的敏感性  $S_{Ti}$ .

敏感性分析试验借助敏感性和不确定性分析软件 Simlab 的 FAST 模块实现. Simlab 是由 Joint Research Centre of the European Commission<sup>[37]</sup> 基于蒙特卡洛方法设计的非商业软件.

### 3 通用陆面过程模型 (CoLM)

本实验所用的数值模式为通用陆面过程模式 (common land model, CoLM). 该模式是 Dai 等<sup>[38]</sup> 在 LSM, BATS, IAP94 等陆面过程模式的基础上, 综合这些模式的优点设计并发展而来的. 该模式设计初就利用了全球不同气候带的不同下垫面类型野外观测试验结果进行了大量的验证试验, 结果表明 CoLM 模式对各种典型下垫面的陆气相互作用均具有良好的模拟能力<sup>[39]</sup>.

CoLM 中包含了大量的参数化方案, 如为了充分刻画不同层次上土壤的温度和湿度的演变特征, 除了将土壤进行不均匀分层之外, 还采用了雪的多层参数化方案; 描述植被冠层  $\text{CO}_2$  和水汽时采用了

能表现这两者同时进出植被冠层的光合作用-气孔导率模型; 计算叶面温度、光合作用-气孔导率时, 采用了单层双叶模型等等. 这些参数化方案在提高 CoLM 模拟能力的同时, 不可避免的给 CoLM 带来了大量的预设参数.

以反应土壤反照率的土壤颜色和地面覆盖情况的植被类型为例, CoLM<sup>[38]</sup> 根据土壤的性质将土壤依照土壤色谱分为 8 类, 由 1 到 8 土壤颜色逐渐加深, 对应不同的土壤颜色, 设定了不同的裸土反照率; 而 CoLM 中 USGS 方案将地表植被覆盖划分为 25 类 (包括海洋和湖泊), 对应植被覆盖类型, 设定了如零平面位移、粗糙度、叶面阻抗、根系深度以及叶面尺度等等大量参数.

### 4 试验设计

为验证 EFAST 方法在复杂陆面过程模型中的应用能力, 本文中在半干旱区下垫面陆面环境中使用该方法进行了一系列的陆面参数敏感性分析实验, 实验所选用的资料主要来源于国际能量和水分循环协同观测计划 (CEOP) 地面基准站——吉林通榆观测站的退化草地观测<sup>[40]</sup> 以及 2008 年夏季“中国干旱/半干旱区协同观测试验”中通榆退化草地下垫面.

实验分为两部分: 第一部分选取 4 个陆面参数, 并与 OAT 方法结果相对照, 以验证 EFAST 方法在 CoLM 模式中的可行性; 第二部分进一步选取 13 个陆面参数, 来寻找 CoLM 模式中的高敏感度陆面参数. 各参数的取值范围见表 1. 其输出结果包括与地表-大气相互作用密切相关的地表感热通量 (sensible heat flux, SH)、潜热通量 (latent heat flux, LH). 衡量模式模拟性能的判据函数分别采用了模拟值与观测值的均方根误差 (DRMS)、偏差 (BIAS) 以及符号变化率 (NSC). 具体计算形式如下:

$$\text{DRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_t^N (q_t^{\text{sim}} - q_t^{\text{obs}})^2}, \quad (11)$$

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \left| \sum_t^N (q_t^{\text{sim}} - q_t^{\text{obs}}) \right|, \quad (12)$$

$$\text{NSC} = \left| \frac{n_1}{n_1 + n_2} - 0.5 \right|, \quad (13)$$

其中,  $q_t^{\text{sim}}$  和  $q_t^{\text{obs}}$  分别为目标变量的模拟值和观测值,  $N$  为模拟时长,  $n_1, n_2$  分别为模拟值和观测值之差为正和负的次数. 符号变率表示了模拟值与观测值在均值上的差异. 在陆面参数敏感性分析中, 对

SH 与 LH 所得的敏感性结果使用综合判据表示, 如下式所示:

$$\text{criteria} = \left| \frac{1}{m \left( \sum_{j=1}^n w_j \right)} \left( \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n (w_j f_{i,j}(\theta)) \right) \right) \right|, \quad (14)$$

其中  $f_{i,j}(\theta)$  为子判据, 分别为均方根误差 DRMS、偏差 BIAS、符号变率 NSC,  $m$  为目标变量的个数, 此处为 2, 即 SH 与 LH,  $n$  为子判据的个数,  $w$  为各子判据的权重系数, 即均方根误差 DRMS、偏差 BIAS、符号变率 NSC 的权重<sup>[17]</sup>, 分别取为 3, 2, 1.

表 1 选取的陆面参数及其取值范围

| 参数名       | 描述                    | 参数范围  | 在模式中的作用             |
|-----------|-----------------------|---|---------------------|
| sand      | 土壤砂土比例/%              | 0—100                                       | 用于土壤水热性质参数化的重要参数    |
| Csoil     | 冠层下土壤拖曳系数             | 0.0004—0.04                                 | 模式冠层动力计算所需系数        |
| Dew       | 最大露水厚度/mm             | 0.01—1                                      | 计算水覆盖叶面百分比所需        |
| Trsmx     | 满植被覆盖湿土最大水分传输率/(mm/s) | $2.0 \times 10^{-5}$ — $2.0 \times 10^{-3}$ | 参与土壤水分传输计算          |
| d50par    | 50%根深土壤深度/cm          | $2.0 \times 10^{-5}$ — $2.0 \times 10^{-3}$ | 根深影响植被水分吸收能力        |
| d95par    | 95%根深土壤深度/cm          | 56—224                                      | 同上                  |
| wimp      | 最小水分透过孔隙度             | 0.005—0.5                                   | 与孔隙度一起影响土壤水分渗透      |
| wfact     | 高水分含量区域比              | 0—1   | 计算格点湿度饱和和区域所占比例     |
| dispar    | 零平面位移/m               | 0~0.1                                       | 计算稳定度、地表温度风等要素的重要参数 |
| betapar   | 根廓线系数                 | -3.2—-1.0                                   | 计算每层根系比例的重要参数       |
| zmpar     | 地表大气粗糙度               | 0—0.1                                       | 计算稳定度、地表温度风等要素的重要参数 |
| sqrtdipar | 叶面大小平方倒数              | 0.5—2                                       | 涉及植被所有过程的重要参数       |
| smpmax    | 潜在萎蔫点/mm              | $-1.5 \times 10^4$ — $-1.5 \times 10^6$     | 计算有效根系分布            |

### 5 试验结果与讨论

表 2 为基于 2008 年通榆退化草地观测资料获得的 CoLM 模式 4 参数一阶敏感性分析结果.

表 2 2008 年通榆退化草地一阶敏感性分析

|        | SH/%  |       |       | LH/%  |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | DRMS  | BIAS  | NSC   | DRMS  | BIAS  | NSC   |
| sand   | 51.37 | 62.58 | 95.03 | 62.55 | 67.19 | 94.50 |
| Csoilc | 1.00  | 6.27  | 1.39  | 1.28  | 10.03 | 3.29  |
| Dew    | 47.54 | 31.00 | 2.01  | 36.05 | 22.62 | 1.75  |
| Trsmx  | 0.09  | 0.15  | 1.57  | 0.13  | 0.17  | 0.45  |

表 3 OAT 方法所得敏感性排序

|        | SH   |      |     | LH   |      |     |
|--------|------|------|-----|------|------|-----|
|        | DRMS | BIAS | NSC | DRMS | BIAS | NSC |
| sand   | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1   |
| Csoilc | 3    | 3    | 3   | 3    | 3    | 2   |
| Dew    | 2    | 2    | 2   | 2    | 2    | 3   |
| Trsmx  | 4    | 4    | 4   | 4    | 4    | 4   |

对比表 3, 发现此结果与 OAT 方法<sup>[41]</sup>得到的排序结果是一致的. 由于这两种方法都没有考虑参数之间的耦合作用, 因此间接证明了 EFAST 方法在陆面模式参数敏感性分析中应用的可行性.

在上述工作的基础上, 考虑各陆面参数之间的耦合作用以后, 可以得到各个参数总的敏感性分析(如表 4).

表 4 2008 年通榆退化草地陆面参数总敏感性分析结果

(斜体字表示敏感性排序发生变化)

|        | SH/%  |       |              | LH/%  |       |              |
|--------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|
|        | DRMS  | BIAS  | NSC          | DRMS  | BIAS  | NSC          |
| sand   | 59.63 | 47.89 | 51.16        | 62.89 | 55.96 | 50.32        |
| Csoilc | 10.86 | 7.82  | <i>30.33</i> | 13.41 | 9.80  | 17.16        |
| Dew    | 24.29 | 39.53 | <i>11.52</i> | 17.90 | 27.86 | <i>15.83</i> |
| Trsmx  | 5.22  | 4.75  | 6.99         | 5.80  | 6.38  | <i>16.70</i> |

从表 4 可见, 考虑参数间的耦合作用后, 各参数的敏感性排序与一阶敏感性分析所得结果的差异并不大(其中, SH-NSC 和 LH-NSC 中, Csoilc 和 Dew 的排序稍有不同, 在表中以斜体字表示). 但值得注意的是, 各参数敏感性所占的比例有了显著变化. 其原因就在于这组试验考虑了不同陆面参数之间的耦合作用. 因为不同陆面参数之间的相互作用是客观存在的, 因此表 4 的结果更符合客观实际, 这也正是 EFAST 方法的优势所在.

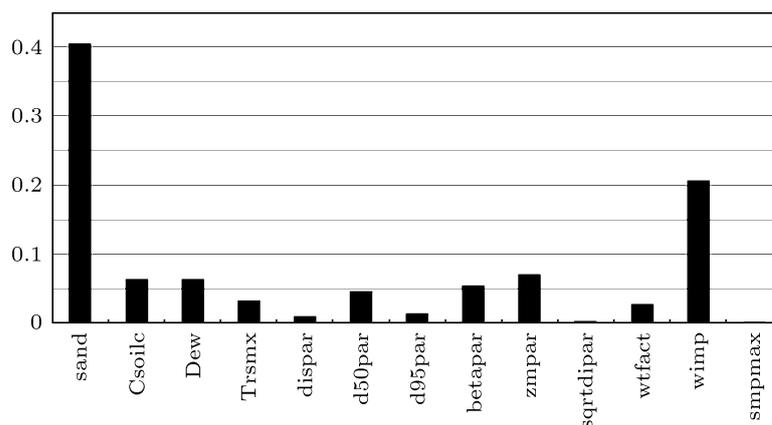


图2 2008年通榆退化草地地面参数一阶敏感性分析

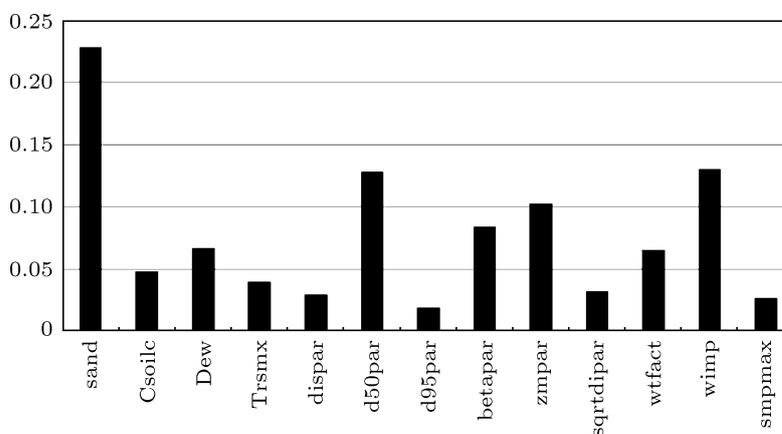


图3 2008年通榆退化草地地面参数总敏感性分析

另外, 本文中尝试进行了更多参数的敏感性分析, 如图2, 图3所示. 从中可以看出, sand 和 wimp 为试验参数中高敏感值的参数, 这与我们的认识相符: sand 代表了土壤成分中砂土的含量, 它在模式中直接影响了土壤粒径、孔隙度以及土壤热容量、导热率、导水率等与土壤水热传输及地表能量分配息息相关的参数. 而 wimp 则决定了水分可以在土壤中渗透的最小孔隙度, 直接影响水热传输过程, 进而影响到潜热的释放. 而值得注意的是, d50par 在一阶参数敏感性分析中敏感性并不高, 却在耦合中有着较大作用. 其原因如图4所示: 以三参数为例, 从中我们可以看出, 一阶敏感性分析中有一部分(图4 else 部分)参数对方差的贡献并没有考虑进去, 导致了敏感性分析出现误差. 这也从另一个方面证明了, 在参数敏感性分析试验中考虑参数之间的耦合作用是必要的, 也说明了将考

虑参数耦合作用的 EFAST 方法引入陆面模式敏感性分析中的重要性.

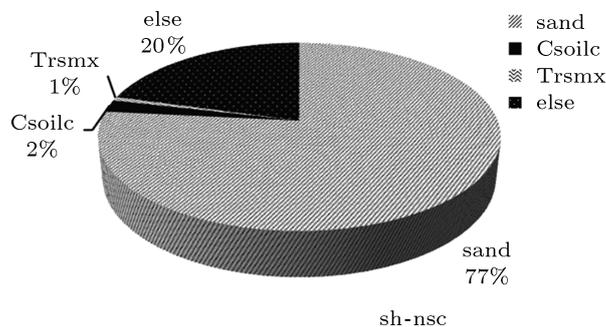


图4 一阶敏感性分析示意图

## 6 结论

传统上使用 OAT 方法分析模式参数敏感性往往忽略了参数间的耦合作用的影响, 给模式敏感性

分析带来了误差,而且对于非线性系统不能进行定量化分析. EFAST 方法可有效克服上述缺点,在陆面模型分析中具有较大应用潜力.

本文基于 CoLM 模式,利用 EFAST 方法对 2008 年吉林通榆观测站的退化草地观测进行参数敏感性分析表明:土壤砂土比例、最小水分透过孔隙度为影响地表感热通量与潜热通量的关键,验证了 EFAST 方法在陆面模式敏感性分析中的可行

性.然而,在本文中由于时间所限,存在模拟时间较短(不超过一年)的问题,且仅使用了一个站点的资料和一个陆面模式 CoLM,尚未在更多不同的下垫面类型和陆面过程模式上做尝试.在以后的工作中,将增加试验的时间长度,采用更多不同模式和下垫面类型的资料,来进一步验证 EFAST 方法在陆面过程模式参数敏感性分析中的应用.

- [1] Houghton J T 1996 *Climate change 1995: the science of climate change* (Cambridge Univ Pr) p572
- [2] Crossley J, Polcher J, Cox P, Gedney N, Planton S 2000 *Climate Dynamics* **16** 949
- [3] Henderson-Sellers A 2006 *Global and Planetary Change* **51** 3
- [4] Liang X, Guo J 2003 *Journal of Hydrology* **279** 182
- [5] Henderson-Sellers A, Irranejad P, Sharmeen S, Phillips T J, McGuffie K, Zhang H 2003 *GEWEX News* 3-6
- [6] Irranejad P, Henderson-Sellers A, Sharmeen S 2003 *Geophysical Research Letters* **30** 17 1904
- [7] Song Y M, Guo W D, Zhang Y C 2009 *Climate and Environmental Research* **14** 229 (in Chinese) [宋耀明, 郭维栋, 张耀存 气候与环境研究 2009 **14** 229]
- [8] Song Y M, Guo W D, Zhang Y C 2009 *Climate and Environmental Research* **14** 243 (in Chinese) [宋耀明, 郭维栋, 张耀存 气候与环境研究 2009 **14** 243]
- [9] Song Y M, Guo W D, Zhang Y C 2009 *Advances in Atmospheric Sciences* **26** 319
- [10] Liu J, Arndt C, Hertel T W 2004 *Journal of Economic Integration* **19** 626
- [11] Li H Q, Gou W D, Sun G D, Zhang Y C, Fu C B 2011 *Advan. in Atmos. Sci.*
- [12] Li H Q, Gou W D, Sun G D, Zhang Y C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 019201 (in Chinese) [李红祺, 郭维栋, 孙国栋, 张耀存 2011 物理学报 **60** 019201]
- [13] McCuen R H, Snyder W M 1986 *Hydrologic modeling: statistical methods and applications* (Prentice-Hall) p568
- [14] 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)]
- [15] 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)]
- [16] Wilson M, Henderson-Sellers A, Dickinson R, Kennedy P 1987 *J. Clim. Appl. Meteorol* **26**
- [17] Pitman A 1994 *Journal of Climate* **7** 1856
- [18] Dolinski K 1983 *Structural Safety* **1** 211
- [19] Errico R M 1997 *Bulletin of the American Meteorological Society* 782577
- [20] Jackson C, Xia Y, Sen M K, Stoffa P 2003 *J. Geophys. Res.* 108 (D18) 4583
- [21] Noura B, David C W, Mohamed H B, Mohamed M E 2012 *Ecological Indicators* **15** 271
- [22] Cai F, Zhou G S, Li R P, Ming H Q 2011 *Advances in earth science* **26** 300
- [23] Saltelli A, Tarantola S, Chan K P S 1999 *Technometrics* **41** 39
- [24] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F 2000 *Statistical Science* **15** 377
- [25] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, Pinty B, Tarantola S 2002 *Remote Sensing of Environment* **82** 188
- [26] Crossetto M, Tarantola S, Saltelli A 2000 *Agriculture, ecosystems & environment* **81** 71
- [27] Matsushita B, Xu M, Chen J, Kameyama S, Tamura M 2004 *Ecological modelling* 178371
- [28] Tang J, Zhuang Q 2009 *Journal of Geophysical Research* **114** 724
- [29] Tang Y, Reed P, Van Werkhoven K, Wagener T 2007 *Water Resources Research* **43** 6415
- [30] Wu J, Xu F S, Chen Z X, Chen J 2009 *Transactions of the CSAE* **25** 136 (in Chinese) [吴锦, 余福水, 陈仲新, 陈晋 2009 农业工程学报 **25** 136]
- [31] Xiao S Q, Xie G F 2010 *Acta Physica Sinica* **59** 4808 (in Chinese) [肖松青, 谢国锋 2010 物理学报 **59** 4808]
- [32] Cukier R, Fortuin C, Shuler K E, Petschek A, Schaibly J 1973 *The Journal of Chemical Physics* 593873
- [33] Sobol I M 1990 *Matematicheskoe Modelirovanie* **2** 112
- [34] Saltelli A, Tarantola S, Chan K P S 1999 *American Statistical Association and the American Society for Quality Technometrics*
- [35] Yan P C, Hou W, Qian Z H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 139202 (in Chinese) [颜鹏程, 侯威, 钱忠华 2012 物理学报 **61** 139202]
- [36] Hao C Q, Wang J, Deng B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148901 (in Chinese) [郝崇清, 王江, 邓斌 2012 物理学报 **61** 148901]
- [37] Joint Research Centre of the European Commission <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>
- [38] Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E 2001 *Common Land Model* (Technical Documentation and User's Guide) User's Guide
- [39] Dai Y J 2005 *School of geography Beijing Normal University*
- [40] Liu H Z, Dong W J, Fu C B 2004 *Climatic and Enviromental Research* **9** 378 (in Chinese) [刘辉志, 董文杰, 符淙斌 2004 气候与环境研究 **9** 378]
- [41] Li H Q 2010 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [李红祺 2010 博士学位论文南京:南京大学大气科学院]

# Application of extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method in land surface parameter sensitivity analysis\*

Wang Jian-Dong<sup>1)2)</sup> Guo Wei-Dong<sup>1)†</sup> Li Hong-Qi<sup>3)</sup>

1) (*ICGCR, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

2) (*School of environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*Numerical Weather Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

(Received 19 September 2012; revised manuscript received 17 October 2012)

## Abstract

In this paper, we explore the application of extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) to land surface parameter sensitivity analysis. Based on observations of Tongyu site (Jilin province) at a degraded grassland in 2008, the EFAST method is verified and applied. The sensible heat flux and latent heat flux are used as the test variables. With the full consideration of the sensitivity of individual parameters, the coupling between the parameters is taken into account. We explore the influence on the nonlinear system under the constraints of the interaction of multiple land surface parameters with a quantitative analysis. The results show that sand content in the soil (sand) and minimal porosity of permeable water are the key factors which affect the heat sensible flux and latent heat flux significantly, which is consistent with the existing result. The sensitivity result confirms the feasibility of the EFAST method. The results of this paper are expected to guide people in designing the field observation and development of parameterization schemes in land surface model.

**Keywords:** land surface model, land surface parameter, EFAST method, Parameter sensitivity

**PACS:** 02.60.Cb

**DOI:** 10.7498/aps.62.050202

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB952002), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40975049, 40810059003, J1103410), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

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