

孟春雷, 张朝林, 刘长友. 2012. CoLM 模式地表温度变分同化研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 985–994, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11184. Meng Chunlei, Zhang Chaolin, Liu Changyou. 2012. Variational assimilation of land surface temperature from Common Land Model (CoLM) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 985–994.

CoLM 模式地表温度变分同化研究

孟春雷¹ 张朝林² 刘长友³

¹ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

² 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

³ 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 本文采用变分方法对通用陆面模式 (CoLM) 中的地表温度进行同化。同化伴随约束条件采用 CoLM 模式中的地表及植被能量平衡方程, 调节因子采用裸土及植被蒸发比。采用美国通量网 (AmeriFlux) 中的 Bonville 站数据对同化方法进行了单点验证, 验证结果表明同化后地表温度以及蒸散结果更加接近于实测值。选取中国华北地区对同化方法进行区域验证, 结果显示每天仅采用白天一次观测值对地表温度进行同化的方法是有效的。通过对同化前后地表温度误差直方图比较可以发现, 在有 MODIS 观测值的区域, 同化后白天地表温度误差大大降低, 同时, 同化后地表蒸散空间分布图也发生了变化。单点验证以及区域验证结果都表明了变分同化方法是可靠的。变分同化方法可以改进陆面模式模拟结果, 对于地表过程研究中的植被生态、水文等研究具有重要意义, 同时, 陆面模式可以与数值预报模式进行耦合, 改进数值预报结果。

关键词 变分同化 CoLM 模式 地表温度 蒸发比 蒸散

文章编号 1006-9895(2012)05-0985-10

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11184

Variational Assimilation of Land Surface Temperature from Common Land Model (CoLM)

MENG Chunlei¹, ZHANG Chaolin², and LIU Changyou³

¹ Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

² Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

³ National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract A variational data assimilation algorithm for assimilating land surface temperature (LST) in the Common Land Model (CoLM) is implemented using the land surface and canopy energy balance as the adjoint physical constraint. In this data assimilation algorithm, the evaporative fraction (EF) of soil and canopy is adjusted according to the surface temperature observations. The analysis results from CoLM with the LST assimilation algorithm are well compared with the field observations from AmeriFlux data at Bondville site. This algorithm is also tested at the regional scale located in East China. These results indicate that the surface temperature assimilation method is efficient and effective when only one-time observational data per day are available. From the histogram of the LST error, it can be concluded that the LST after assimilation is improved much compared with the MODIS observations especially in the daytime. The evapotranspiration patterns also change much after the assimilation. All these can prove the robustness of the algorithm which this paper proposes in assimilation applications to the CoLM. The variational assimilation method this paper develops can improve the simulation results of land surface model, and has an important meaning to the land surface processes such as land surface

收稿日期 2011-10-09, 2012-02-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41005156, 国家科技支撑计划重点项目 2008BAC37B04

作者简介 孟春雷, 1976 年出生, 男, 副研究员, 主要从事城市气象及陆面模式发展及同化研究。E-mail: clemeng76@163.com

hydrology and vegetation ecology etc. Meanwhile, the land surface model also could be coupled with the numerical prediction model, and then the variational algorithm also can improve the results of numerical forecast.

Key words variational data assimilation, Common Land Model (CoLM), land surface temperature, evaporative fraction, evapotranspiration

1 引言

观测与模拟是地球表层科学研究的两种基本手段,二者缺一不可,但又是一对矛盾体。无论是常规观测还是遥感观测都无法完整和连续地表达地表时空信息。观测获得的都是瞬时值,而地表过程无论在时间还是空间上都是连续的。因此迫切需要借助于模型把观测转化为具有时空一致性的数据集。现有的陆面过程模型通常都包含了复杂的陆面过程参数化方案,但是它们的模拟精度依然较差,模型不是完美的,存在着模型的物理机制、参数化方案和数值计算方法等方面的缺陷。要充分发挥观测与模拟各自的优势,就必须对它们进行有机集成。同化方法是指在考虑数据时空分布的基础上,在数值模型的动态运行过程中融合新的观测数据的方法,模式同化可以把观测与模拟二者的优点结合起来,从而得到空间、时间上均连续且较准确的模拟结果。

地表参数(包括地表温度和土壤湿度)同化方法主要包括变分方法与集合卡曼滤波方法等。目前,国内研究以集合卡曼滤波方法为主(张生雷等, 2006; Li et al., 2007; Yang et al., 2007; Tian et al., 2008a, 2008b; 张生雷等, 2008; 贾炳浩等, 2010; 聂肃平等, 2010; Tian et al., 2010; 师春香等, 2011)。国外很多学者采用变分方法同化地表温度以及土壤湿度,并且把能量和水分平衡方程作为约束条件。起初学者们采用土壤湿度指数(soil moisture index)作为调节因子来同化地表温度。采用的模型包括强迫—恢复模型(Castelli et al., 1999; Boni et al., 2001a)以及热扩散模型(Boni et al., 2001b)。由于土壤湿度指数在一天里是不断变化的,因此必须每个时间步长都要求有地表温度观测值(Castelli et al., 1999)或者考虑采用权重函数来进行修正(Boni et al., 2001a, 2001b)。后来,学者采用一天之内或者整个同化窗口保持常数的参数作为调节因子,这些调节因子包括蒸发比(EF)以及显热传输系数等(Margulis and Entekhabi, 2003; Caparrini et al., 2004a; Tian et al., 2009)。一些研究采用遥感数据对同化方法作了区域验证(Reichle et al., 2001a,

2001b; Caparrini et al., 2003; Caparrini et al., 2004b)。

本文的主要目的是发展一种简化的变分同化方法对陆面模式中的地表温度进行同化,以改进陆面模式模拟结果。既简化了变分同化方法,同时又达到了较好的改进效果。本文首次采用变分同化方法对通用陆面模式(CoLM)进行同化,对变分方法进行了简化,根据蒸发比具有在一天之内几乎为常数的特点,采用蒸发比作为调节因子,对地表温度进行同化,同时蒸发比与地表蒸散直接相关,因此同化地表温度的结果可以改进模式对蒸散的模拟。本文发展了一种解析算法求解代价函数中的权重,这种方法既加强了同化算法的理论基础,又简化了变分同化方法。

2 模式及同化方法

2.1 CoLM 陆面模式

CoLM是在CLM(Bonan et al., 2002; Zeng et al., 2002; Dai et al., 2003, 2004; Oleson et al., 2004)的基础上发展起来的,在许多方面进行了改进(例如双层大叶模型等),并且可以与中尺度模式或其它大气环流模式耦合。

CoLM陆面模式裸地地表能量平衡方程可表示如下:

$$c\Delta z \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{t_k}{\Delta z} (T_2 - T_g) + R_{n,g} - H_g - E_g, \quad (1)$$

式中, c 为土壤体积比热容(单位: $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), t_k 为热导率(单位: $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), Δz 为土壤表层厚度(单位: m), T_g 为裸地地表温度(单位: K), T_2 为第二层土壤温度(单位: K), $R_{n,g}$ 、 H_g 和 E_g 分别为净辐射、显热通量和裸地蒸发。

冠层能量平衡方程可表示如下:

$$R_{n,csun} - H_{c,sun} - E_{c,sun} = 0, \quad (2-1)$$

$$R_{n,sha} - H_{c,sha} - E_{c,sha} = 0, \quad (2-2)$$

式中, $R_{n,csun}$ 、 $R_{n,sha}$ 为阳光照射植被和阴影植被吸收净辐射, $H_{c,sun}$ 、 $H_{c,sha}$ 阳光照射植被和阴影植被显热通量, $E_{c,sun}$ 、 $E_{c,sha}$ 阳光照射植被和阴影植被蒸散。

2.2 代价函数构建及求解

为了简化变分同化方法,同时将地表温度同化与地表通量模拟结合起来,本文采用调整蒸发比的

方法变分同化地表温度, 采用 CoLM 模式中的地表及植被能量平衡方程作为同化伴随约束条件, 代价函数可用下式表示:

$$J(T_g, T_{\text{lsun}}, T_{\text{lsha}}, \gamma_{\text{ss}}, \gamma_{\text{sv}}, \gamma_v, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{C_1}{2} [T_R(t_1) - T_{\text{obs}}(t_1)]^2 + \frac{C_T}{2} \int_{t_0}^{t_1} (T_R - T_{\text{obs}})^2 dt + \frac{C_{\gamma_{\text{ss}}}}{2} \int_{t_0}^{t_1} (\gamma_{\text{ss}} - \gamma_{\text{ss}}')^2 dt + \frac{C_{\gamma_{\text{sv}}}}{2} \int_{t_0}^{t_1} (\gamma_{\text{sv}} - \gamma_{\text{sv}}')^2 dt + \frac{C_{\gamma_v}}{2} \int_{t_0}^{t_1} (\gamma_v - \gamma_v')^2 dt + \int_{t_0}^{t_1} \lambda_1 \left[c\Delta z \frac{\partial T_g}{\partial t} - \frac{t_k}{\Delta z} (T_2 - T_g) - R_{n,g} + H_g + E_g \right] dt + \int_{t_0}^{t_1} \lambda_2 (H_{c,\text{sun}} + E_{c,\text{sun}} - R_{n,\text{csun}}) dt + \int_{t_0}^{t_1} \lambda_3 (H_{c,\text{sha}} + E_{c,\text{sha}} - R_{n,\text{csha}}) dt, \quad (3)$$

方程左端为被优化的状态向量, 其中 T_g 、 T_{lsun} 、 T_{lsha} 分别表示地面温度、太阳照射面冠层温度和阴影面冠层温度, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为 Lagrange 乘子, γ_{ss} 、 γ_{sv} 、 γ_v 分别为无植被覆盖裸土、植被覆盖下地表与植被蒸发比。

方程右端第一项为同化窗口初始时刻的背景误差, 第二项为同化系统的观测误差。 T_R 为地表辐射温度, 即变分同化观测算子。 CoLM 模式采用下式计算地表辐射温度:

$$T_R = \left(\frac{L \uparrow}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

式中, σ 表示 Stefan-Boltzmann 常数, $L \uparrow$ 为向上长波辐射, 可以采用下式表示:

$$L \uparrow = L_v \uparrow + L_g \uparrow, \quad (5)$$

式中 $L_v \uparrow$ 、 $L_g \uparrow$ 分别为冠层和地表向上长波辐射, 可以分别由下式计算:

$$L_v \uparrow = F_{\text{cover}} \sigma (1 - c_g) (F_{\text{sun}} T_{\text{lsun}}^4 + F_{\text{sha}} T_{\text{lsha}}^4) + F_{\text{cover}} \sigma \varepsilon_g c_g T_g^4, \quad (6)$$

$$L_g \uparrow = (1 - F_{\text{cover}}) (1 - \varepsilon_g) L_a \downarrow + (1 - F_{\text{cover}}) \sigma \varepsilon_g T_g^4, \quad (7)$$

式中, F_{cover} 为没有积雪覆盖的植被覆盖率, c_g 为植被间隙率, F_{sun} 、 F_{sha} 分别为阳光照射与阴影植被覆盖率, ε_g 为地表发射率, $L_a \downarrow$ 为向下长波辐射。

方程 (3) 右端第三、第四和第五项表示蒸发比误差, γ_{ss} 、 γ_{sv} 和 γ_v 可以分别用下式表示:

$$\gamma_{\text{ss}} = \frac{E_{\text{ss}}}{E_{\text{ss}} + H_{\text{ss}}}, \quad (8)$$

$$\gamma_{\text{sv}} = \frac{E_{\text{sv}}}{E_{\text{sv}} + H_{\text{sv}}}, \quad (9)$$

$$\gamma_v = \frac{E_v}{E_v + H_v}, \quad (10)$$

式中, E_{ss} 、 E_{sv} 和 E_v 分别为无植被覆盖裸土、植被覆盖下地表与植被蒸发, 可以表示如下:

$$E_g = E_{\text{ss}} + E_{\text{sv}}, \quad (11)$$

$$E_v = E_{c,\text{sha}} + E_{c,\text{sun}}. \quad (12)$$

方程 (3) 右端第六、第七和第八项为伴随约束条件, 即地面、阳光照射面植被和阳光阴影面植被能量平衡方程。 C_1 、 C_T 、 $C_{\gamma_{\text{ss}}}$ 、 $C_{\gamma_{\text{sv}}}$ 和 C_{γ_v} 为权重, 计算方法将在后面讨论。

对代价函数求一阶变分, 合并同类项, 即可得到 Euler-Lagrange 方程:

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{c\Delta z} \left(\frac{t_k}{\Delta z} - \frac{\partial R_{n,g}}{\partial T_g} + \frac{\partial H_g}{\partial T_g} + \frac{\partial E_g}{\partial T_g} \right) + \frac{C_T}{c\Delta z} (T_R - T_{\text{obs}}) \frac{\partial T_R}{\partial T_g}, \quad (13-1)$$

$$\lambda_1(t_1) = \frac{C_1}{c\Delta z} [T_{\text{obs}}(t_1) - T_R(t_1)] \frac{\partial T_R(t_1)}{\partial T_g(t_1)}, \quad (13-2)$$

$$\lambda_2 \left(\frac{\partial H_{c,\text{sun}}}{\partial T_{\text{lsun}}} + \frac{\partial E_{c,\text{sun}}}{\partial T_{\text{lsun}}} - \frac{\partial R_{n,\text{csun}}}{\partial T_{\text{lsun}}} \right) + C_T (T_R - T_{\text{obs}}) \frac{\partial T_R}{\partial T_{\text{lsun}}} = 0, \quad (14)$$

$$\lambda_3 \left(\frac{\partial H_{c,\text{sha}}}{\partial T_{\text{lsha}}} + \frac{\partial E_{c,\text{sha}}}{\partial T_{\text{lsha}}} - \frac{\partial R_{n,\text{csha}}}{\partial T_{\text{lsha}}} \right) + C_T (T_R - T_{\text{obs}}) \frac{\partial T_R}{\partial T_{\text{lsha}}} = 0, \quad (15)$$

$$\gamma_{\text{ss}} = \gamma_{\text{ss}}' - \frac{\lambda_1}{C_{\gamma_{\text{ss}}}} \frac{\partial E_g}{\partial \gamma_{\text{ss}}}, \quad (16)$$

$$\gamma_{\text{sv}} = \gamma_{\text{sv}}' - \frac{\lambda_2}{C_{\gamma_{\text{sv}}}} \frac{\partial E_g}{\partial \gamma_{\text{sv}}}, \quad (17)$$

$$\gamma_v = \gamma_v' - \frac{\lambda_2}{C_{\gamma_v}} \frac{\partial E_{c,\text{sun}}}{\partial \gamma_v} - \frac{\lambda_3}{C_{\gamma_v}} \frac{\partial E_{c,\text{sha}}}{\partial \gamma_v}. \quad (18)$$

代价函数中权重的选取对于同化方法的计算精度至关重要, 权重通常表示为误差协方差矩阵的拟矩阵, 对于水平方向上相对独立的一维垂直方向 CoLM 陆面模式, 即为方差的倒数, 可以由式 (19)~(22) 表示:

$$C_T = \frac{n^2}{(T_R - T_{\text{obs}})^2}, \quad (19)$$

$$C_{\gamma_{\text{ss}}} = \frac{n^2}{(\gamma_{\text{ss}} - \gamma_{\text{ss}}')^2}, \quad (20)$$

$$C_{\gamma_{\text{sv}}} = \frac{n^2}{(\gamma_{\text{sv}} - \gamma_{\text{sv}}')^2}, \quad (21)$$

$$C_{\gamma_v} = \frac{n^2}{(\gamma_v - \gamma_v')^2}. \quad (22)$$

将式 (16)~(18) 代入式 (20)~(22), $C_{\gamma_{ss}}$ 、 $C_{\gamma_{sv}}$ 和 C_{γ_v} 可以表示如下:

$$C_{\gamma_{ss}} = n^2 \cdot \left(\lambda_1 \frac{\partial E_g}{\partial \gamma_{ss}} \right)^2, \quad (23)$$

$$C_{\gamma_{sv}} = n^2 \cdot \left(\lambda_1 \frac{\partial E_g}{\partial \gamma_{sv}} \right)^2, \quad (24)$$

$$C_{\gamma_{ss}} = n^2 \cdot \left[\left(\lambda_2 \frac{\partial E_{c, \text{sun}}}{\partial \gamma_v} \right)^2 + \left(\lambda_3 \frac{\partial E_{c, \text{sha}}}{\partial \gamma_v} \right)^2 + 2 \left(\lambda_2 \lambda_3 \frac{\partial E_{c, \text{sun}}}{\partial \gamma_v} \frac{\partial E_{c, \text{sha}}}{\partial \gamma_v} \right)^2 \right], \quad (25)$$

式中, n 为迭代次数。

3 单点验证

3.1 数据来源

观测数据来自美国通量网 (AmeriFlux) (Baldocchi et al., 2001)。Bondville ($40^{\circ}0.366' \text{N}$, $88^{\circ}17.512' \text{W}$) 站点是美国中部地区非常典型的一个站点, 大部分土地都用于农业生产。目前, 国际上很多陆面过程—气候模式、水文环境研究以及卫星遥感产品验证都利用这个站点的资料。本文采用 Bondville 站点地表温度观测数据对 CoLM 模式进行同化, 同化窗口选择 2001 年第 202 天至第 222 天。Bondville 站采用热红外测温仪和涡度相关仪测量地表温度和显热、潜热通量, 观测频率都为半小时。

3.2 结果及讨论

为了确保同化方法的普适性, 本文采用每天一个时刻的观测数据进行同化, 由于白天蒸散较强, 因此必须确保蒸发比在白天基本上为常数。图 1 为同化窗口所有 20 天各个时刻蒸发比平均值。可以看出蒸发比在 08 时到 16 时 (北京时, 下同) 之间基本上为常数, 而在夜间由于显热和潜热通量均较小, 还可能出现负值, 因此存在明显波动。我们采用 14 点观测数据来进行同化。

图 2 为同化前后地表温度与观测值比较图。从图 2 可以看出, 同化后, 地表温度均方根误差 (RMSE) 由 2.66 K 降为 1.20 K。尤其是在较高温度的白天, 同化后结果改进更加明显。由于白天蒸发比基本上为常数, 将同化后调整得到的蒸发比扩展到全天, 就可以改进全天尤其是白天地表温度模拟结果。

图 3 为同化前后蒸散与观测值比较图。从图 3

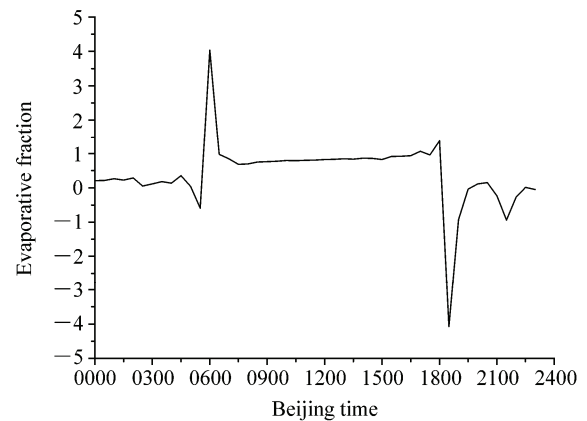


图 1 所有 20 天各个时刻蒸发比平均值

Fig. 1 Diurnal variation of average evaporative fraction (EF) along the assimilation window

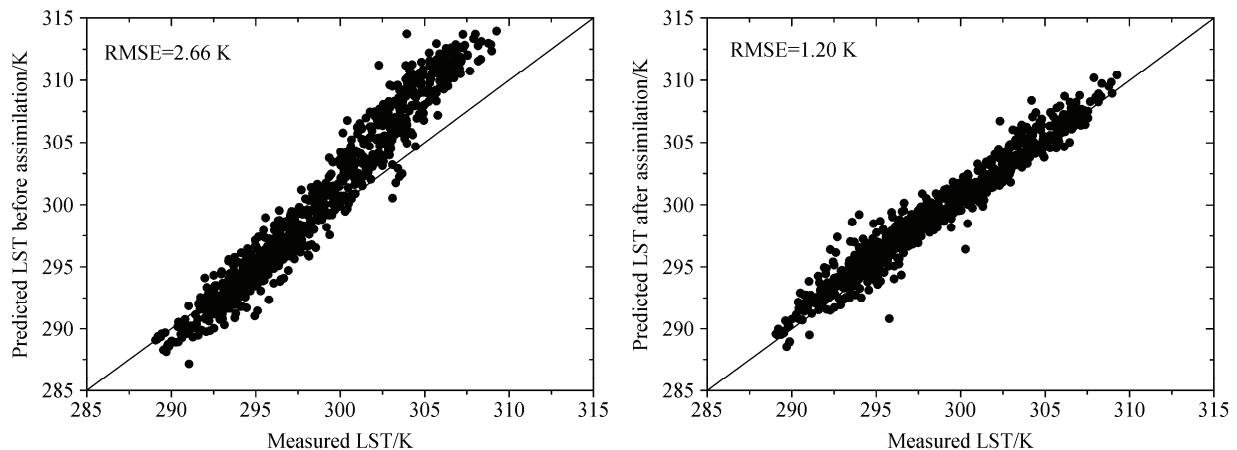


图 2 同化前后地表温度随时间变化与观测值比较 (单位: K)

Fig. 2 Comparison between the observed and simulated land surface temperature with and without assimilation

可以看出, 蒸散RMSE由 176.96 W/m^2 下降到 90.74 W/m^2 。尤其是在蒸散较高的白天, 同化前蒸散模拟结果明显偏低, 同化后得到很大改进。由于蒸发比与蒸散直接相关, 地表温度同化就可以同时改进白天蒸散模拟结果。由于夜晚蒸散值较低, 因此同化前后变化不大而且对全天蒸散模拟不会造成很大

影响。

4 区域验证

4.1 数据来源及处理

研究区域范围为 ($35^\circ\text{N}\sim 40^\circ\text{N}$, $115^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$), 同化时间为2003年8月11日至20日, 即第223~232

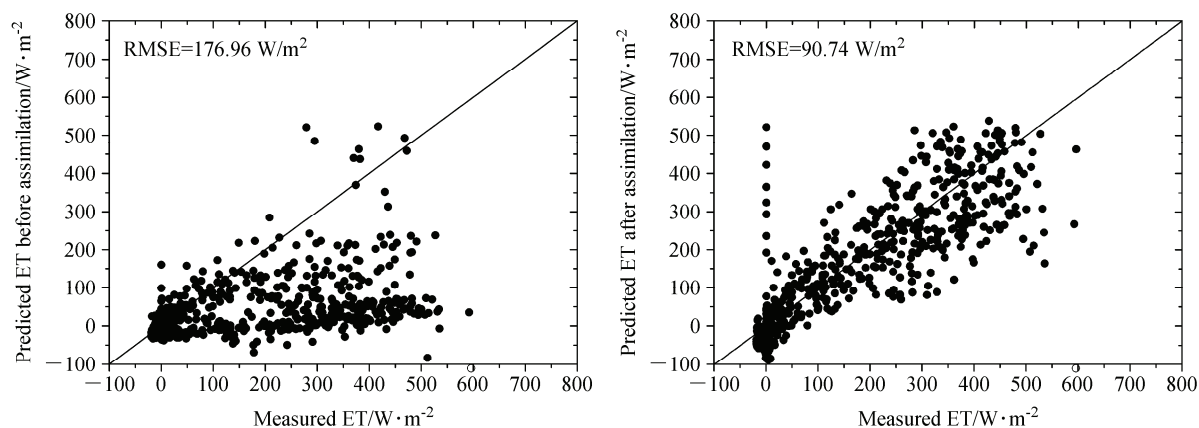


图3 同化前后蒸散随时间变化与观测值比较 (单位: W/m^2)

Fig.3 Comparison between the observed and simulated evapotranspiration (ET) with and without assimilation

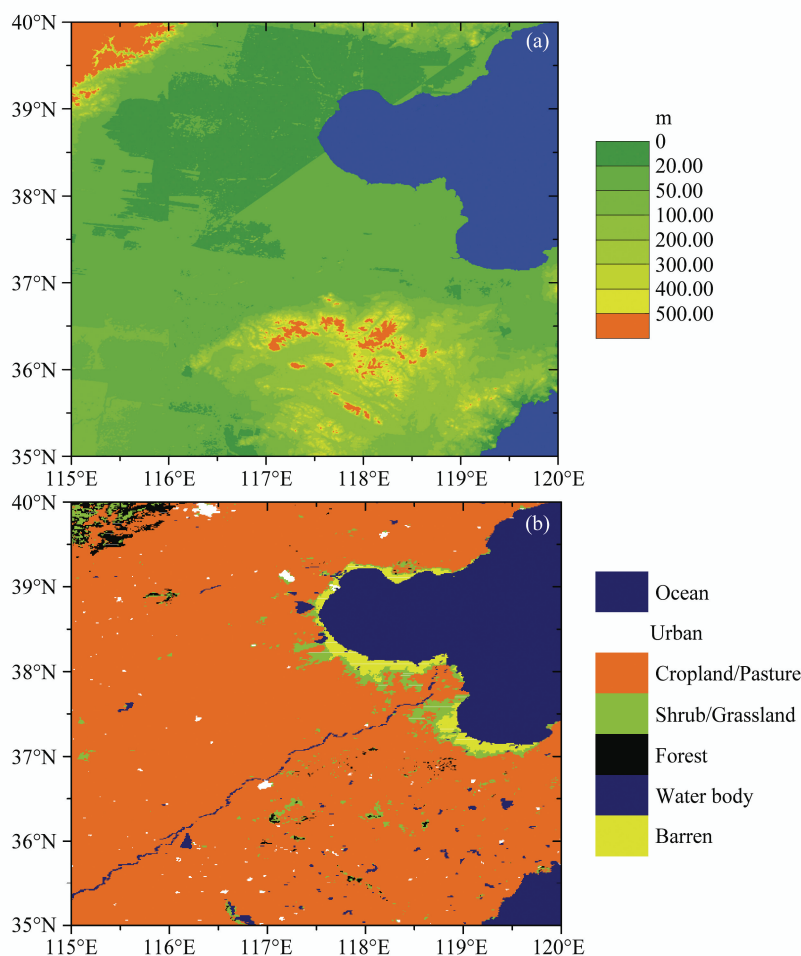


图4 研究区域DEM (a) (单位: m) 与地表覆盖类型图 (b)

Fig.4 (a) Digital Elevation Model (DEM) and (b) land use map of the research region (originated from USGS data)

天。气象强迫资料采用 NASA 再分析资料 (Rodell et al., 2004), 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 3 小时。强迫资料需插值到模式要求的半小时时间分辨率。对于气温、空气湿度、风速、长波辐射以及气压, 时间插值采用三次样条函数方法; 对于降水资料随机模型为插值常用方法。

遥感数据采用 MODIS 叶面积指数 (LAI) 及地表温度 (LST) 资料。LST 数据分为 Terra 卫星白天和晚上以及 Aqua 卫星白天和晚上每天 4 次观测, 本文采用 Terra 卫星白天遥感数据进行同化, 采用 Aqua 卫星白天遥感数据作为结果比较, 以检验同化方法对不同时刻地表温度同化结果; LAI 数据采用线性时间插值方法, 同时假设每天为常数。遥感数据均采用算术平均方法升尺度到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空间分辨率。

4.2 结果及讨论

图4为研究区域数字高程 (DEM) 以及地表覆盖类型图。由图 4 可以看出, 研究区域内只有西北角太行山区和鲁中山地海拔高度大于 500 m, 其它地区以平原为主, 海拔较低。由地表覆盖类型图可以看出, 研究区域以灌溉农田为主。由于地表覆盖类型以及 DEM 数据来源于 CoLM 原始数据, 即美国地质调查局 (USGS) 30s 分辨率数据, 因此与实际结果存在一定误差。

图5为第232天CoLM经验公式计算与MODIS反演叶面积指数 (LAI) 比较。可以看出绝大部分区域 MODIS 反演结果低于 CoLM。

图6为同化时间段有观测数据天数空间分布图, 可以看出研究区域中部, 有观测数据天数较多, 而西南和东南部区域几乎没有观测数据。

图7为研究区域 Aqua 卫星白天地表温度观测数据与同化前后地表温度 (LST) 误差直方图。误差是指同化前后模拟地表温度减去观测地表温度。由图7可以看出, 同化后, 大部分区域白天 LST 模拟结果得到了较大提高。同化前, 大部分区域 LST 模拟结果与 Aqua 白天卫星反演结果误差高达 10~12 K, 同化后误差减少到 2~6 K。

图8为研究区域同化前后所有 Aqua 卫星白天时刻地表温度平均值比较。由图8可以看出, 同化后, 观测数据天数较多的中部地区地表温度有所降低。而在没有观测数据的西南部地区, 由于同化后采用 MODIS 反演 LAI 值较低, 所以地表温度有所增加。

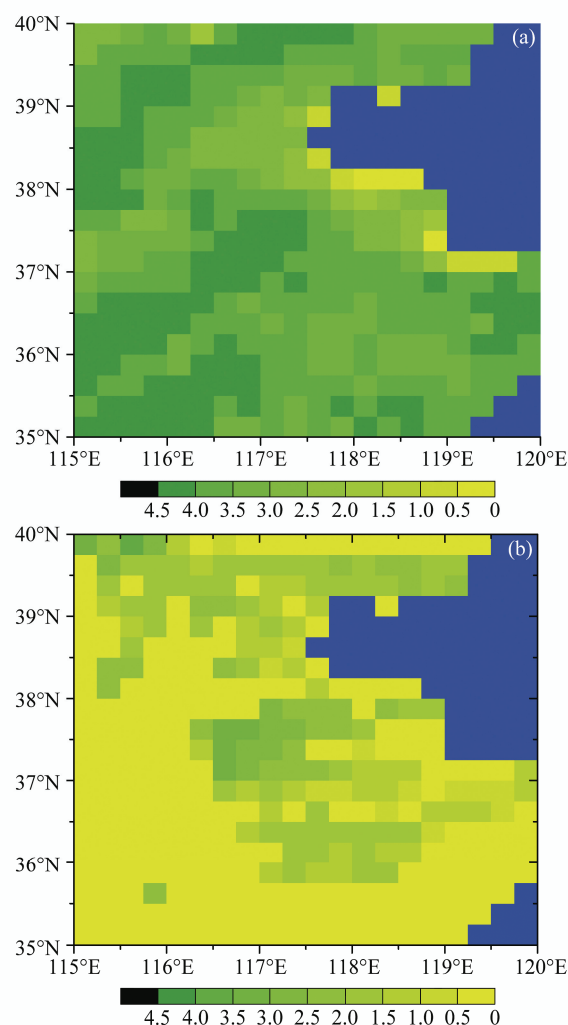


图5 CoLM (a) 与 MODIS (b) 反演叶面积指数 (LAI) 比较
Fig.5 Spatial patterns of the LAI (leaf area index) at 1200 BT (Beijing time) 20 Aug (Julian day 232) from (a) CoLM and (b) MODIS

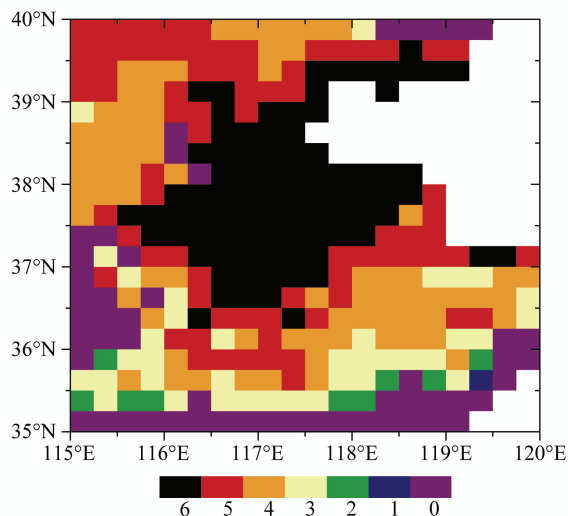


图6 同化时间段有观测数据天数空间分布图 (单位: 天)
Fig.6 Number of days with available assimilated remotely sensed land surface temperature data

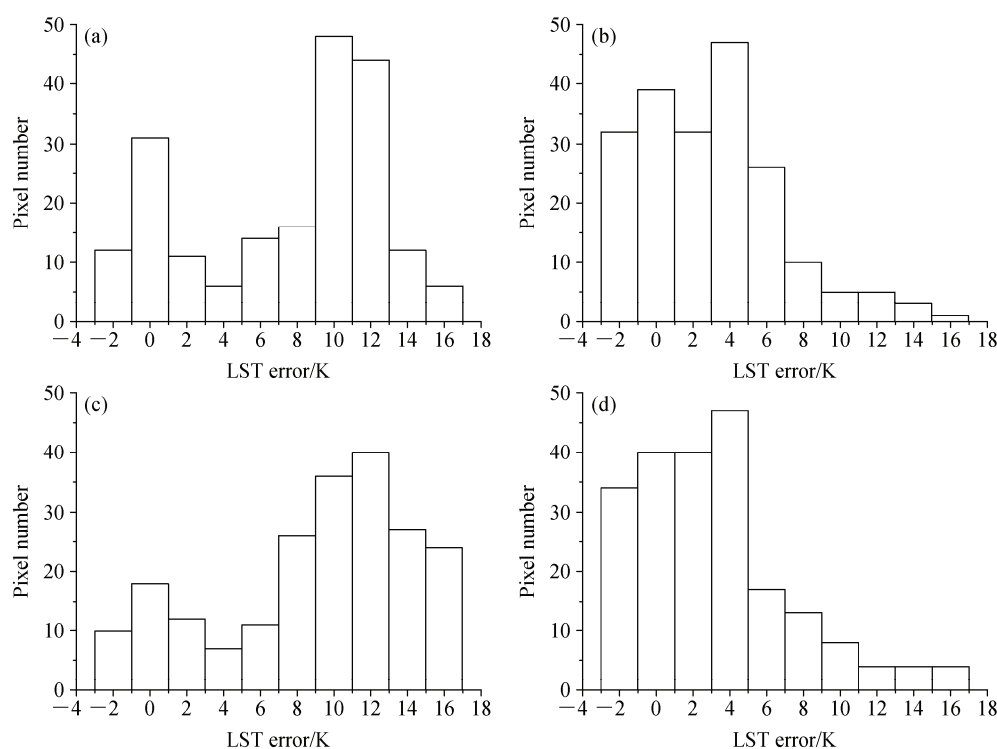


图 7 研究区域 Aqua 卫星白天地表温度观测数据与同化前 (a、c)、同化后 (b、d) 地表温度误差直方图 (单位: K): (a、b) 第 230 天 13:00; (c、d) 第 232 天 12:30

Fig.7 Histograms of the errors between the Aqua daylight observed LST and the CoLM simulation (a, c) before and (b, d) after assimilation in the research region: (a, b) 1300 BT on day 230; (c, d) 1230 BT on day 232

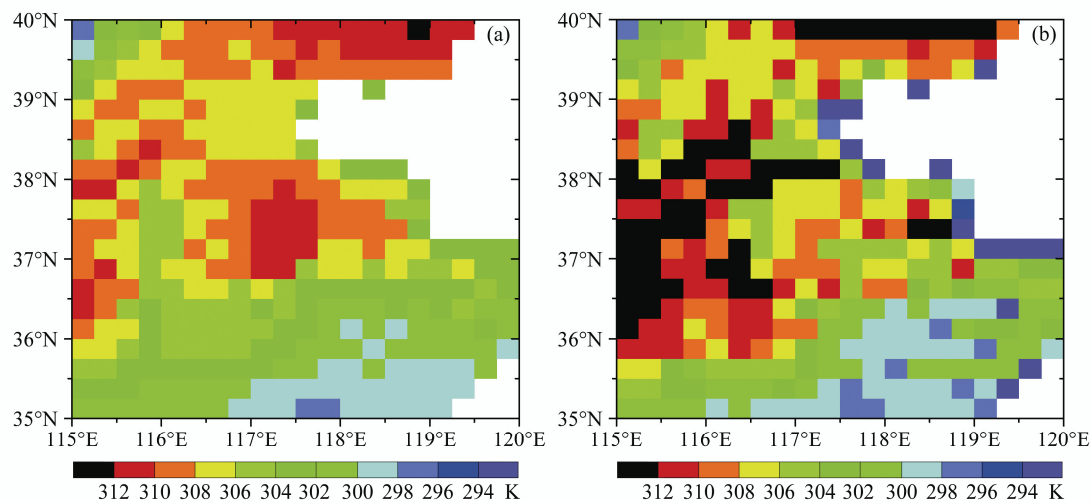


图 8 同化前 (a)、后 (b) 所有 Aqua 卫星白天时刻地表温度平均值比较 (单位: K)

Fig.8 Spatial patterns of the land surface temperature from the CoLM runs (a) before and (b) after LST assimilation averaged for all the Aqua day observation times

图 9 为第 232 天 12 时同化前后蒸散模拟结果空间分布图比较结果。由图 9 可以看出, 同化后, 在研究区域的西部和中部蒸散模拟结果有所增加, 东南和西南部地区有所减少。原因和图 8 类似, 研究区域的西部和中部, MODIS 反演地表温度同化到了模式中; 而东南和西南部地表温度没有同化, 蒸

散结果的变化仅反映了同化前后 LAI 的变化。

图 10 为第 232 天 12 时同化前后表层土壤湿度模拟结果空间分布图比较结果。由图 10 可以看出, 同化后, 在绝大部分有地表温度观测值的地区, 土壤湿度为零。这是由于本文仅同化地表温度, 为了弥补地表温度模拟值与遥感反演结果之间的误差,

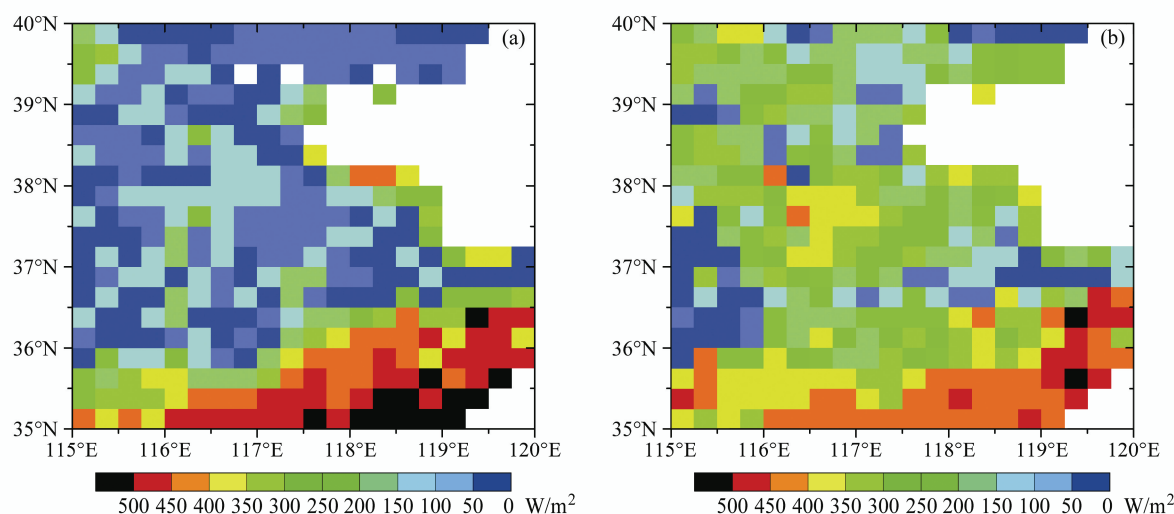


图9 第232天12时同化前(a)、后(b)蒸散(ET)模拟结果空间分布图比较结果(单位: W/m^2)

Fig. 9 Spatial patterns of the simulated evapotranspiration (ET) from the CoLM runs (a) before and (b) after LST assimilation at 1200 BT on Julian day 232

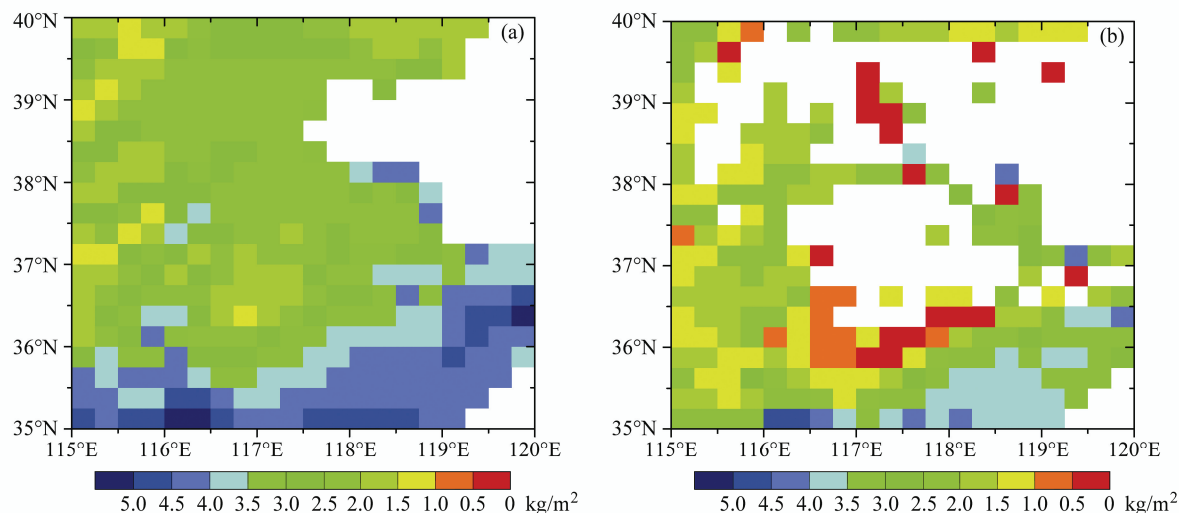


图10 第232天12时同化前(a)、后(b)表层土壤湿度模拟结果空间分布图比较结果(单位: kg/m^2)

Fig. 10 Spatial patterns of the simulated surface-layer soil moisture from the CoLM runs (a) before and (b) after LST assimilation at 1200 BT on Julian day 232

即减小模拟地表温度, 土壤水分被排空了。而对于研究区域的东南和西南部, 地表温度没有同化, 由于 LAI 有所减小, 因此表层土壤湿度有所减小。

5 结论

本文采用变分方法, 采用蒸发比作为调节因子, 对CoLM陆面模式中的地表温度进行同化, 并且发展了一种求解代价函数中权重的解析算法。采用美国通量网中Bondville站点以及中国华北地区遥感及观测结果进行单点及区域验证。结果证明了变分同化方法是简单可靠的, 主要结论如下:

(1) 通过 Bondville 站单点验证, 结果表明每天

采用白天一个时刻的观测值对地表温度进行同化即能得到较好的同化结果。

(2) 单点验证结果表明, 同化后地表温度及蒸散模拟结果在白天改进非常明显, 在夜晚改进较小, 这是因为白天蒸发比 (EF) 几乎可以看作常数, 而夜间蒸发比波动较为明显的缘故。

(3) 区域验证结果表明, 同化后白天地表温度模拟结果可以得到较大提高。

(4) 区域验证结果还表明, 通过调整蒸发比的方法对地表温度进行同化能够改变模式对区域蒸散空间分布的模拟结果。

(5) 地表温度同化可以显著改变表层土壤湿度

模拟结果。

下一步, 需要对同化方法进行敏感性分析, 通过采用不同下垫面、不同 LAI、不同观测时刻地表温度情况下单点、区域验证, 进一步完善变分同化方法。另外, 夜间地表水分凝结对于蒸散及地表温度的贡献不能忽略, 同时表层土壤湿度的模拟结果对于土壤蒸发模拟至关重要, 因此, 下一步考虑将地表温度与土壤湿度同化相结合, 进一步改进地表参数模拟结果。

致谢 感谢北京师范大学戴永久教授提供CoLM陆面模式, 感谢唐荣林博士生提供并处理MODIS观测数据。感谢窦有俊博士提供的无私帮助。

参考文献 (References)

- Baldocchi D D, Falge E, Gu Lianhong, et al. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (11): 2415–2434.
- Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, et al. 2002. The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model [J]. *J. Climate*, 15 (22): 3123–3149.
- Boni G, Castelli F, Entekhabi D. 2001a. Sampling strategies and assimilation of ground temperature for the estimation of surface energy balance components [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39 (1): 165–172.
- Boni G, Entekhabi D, Castelli F. 2001b. Land data assimilation with satellite measurements for the estimation of surface energy balance components and surface control on evaporation [J]. *Water Resour. Res.*, 37 (6): 1713–1722.
- Caparrini F, Castelli F, Entekhabi D. 2003. Mapping of land-atmosphere heat fluxes and surface parameters with remote sensing data [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 107 (3): 605–633.
- Caparrini F, Castelli F, Entekhabi D. 2004a. Variational estimation of soil and vegetation turbulent transfer and heat flux parameters from sequences of multisensor imagery [J]. *Water Resour. Res.*, 40: W12515, doi: 10.1029/2004WR003358.
- Caparrini F, Castelli F, Entekhabi D. 2004b. Estimation of surface turbulent fluxes through assimilation of radiometric surface temperature sequences [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (1): 145–159.
- Castelli F, Entekhabi D, Caporali E. 1999. Estimation of surface heat flux and an index of soil moisture using adjoint-state surface energy balance [J]. *Water Resour. Res.*, 35 (10): 3115–3125.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013–1023.
- Dai Yongjiu, Dickinson R E, Wang Yingping. 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance [J]. *J. Climate*, 17 (12): 2281–2299.
- 贾炳浩, 谢正辉, 田向军, 等. 2010. 基于微波亮温及集合Kalman滤波的土壤湿度同化方案 [J]. *中国科学 (D辑): 地球科学*, 40 (2): 239–251.
- Jia Binghao, Xie Zhenghui, Tian Xiangjun, et al. 2009. A soil moisture assimilation scheme based on the ensemble Kalman filter using microwave brightness temperature [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences (in Chinese)*, 52 (11): 1835–1848, doi: 10.1007/s11430-009-0122-z.
- Li Xin, Huang Chunlin, Che Tao, et al. 2007. Development of a Chinese land data assimilation system: Its progress and prospects [J]. *Progress in Natural Science*, 17 (8): 881–892.
- Margulis S A, Entekhabi D. 2003. Variational assimilation of radiometric surface temperature and reference-level micrometeorology into a model of the atmospheric boundary layer and land surface [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (7): 1272–1288.
- 聂肃平, 朱江, 罗勇. 2010. 不同模式误差方案在集合 Kalman 滤波土壤湿度同化中的比较试验 [J]. *大气科学*, 34 (3): 580–590.
- Nie Suping, Zhu Jiang, Luo Yong. 2010. Comparison experiments of different model error schemes in ensemble Kalman filter soil moisture assimilation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 580–590.
- Oleson K W, Dai Y J, Bonan G B, et al. 2004. Technical Description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR.
- Reichle R H, Entekhabi D, McLaughlin D B. 2001a. Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: a four-dimensional variational data assimilation approach [J]. *Water Resour. Res.*, 37 (9): 2353–2364.
- Reichle R H, McLaughlin D B, Entekhabi D. 2001b. Variational data assimilation of microwave radiobrightness observations for land surface hydrology applications [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39 (8): 1708–1718.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (3): 381–394.
- 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 2011. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度EnKF数据同化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (3): 375–385.
- Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 54 (9): 1430–1440, doi: 10.1007/s11430-010-4160-3.
- Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Dai Aiguo. 2008a. An ensemble-based explicit four-dimensional variational assimilation method [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D21124, doi: 10.1029/2008JD010358.
- Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Dai Aiguo. 2008b. A land surface soil moisture data assimilation system based on the dual-UKF method and the Community Land Model [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D14127, doi: 10.1029/2007JD009650.
- Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Dai Aiguo, et al. 2009. A dual-pass variational data assimilation framework for estimating soil moisture profiles from AMSR-E microwave brightness temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D16102, doi: 10.1029/2008JD011600.
- Tian Xiangjun, Xie Zhengxue, Dai Aiguo. 2010. An ensemble conditional nonlinear optimal perturbation approach: Formulation and applications to parameter calibration [J]. *Water Resour. Res.*, 46: W09540, doi: 10.1029/2009WR008508.

- Yang K, Watanabe T, Koike T, et al. 2007. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85A: 229–242, doi: 10.2151/jmsj.85A.229.
- Zeng X, Shaikh M, Dai Y, et al. 2002. Coupling of the common land model to the NCAR community climate model [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1832–1854.
- 张生雷, 谢正辉, 田向军, 等. 2006. 基于土壤水模型及站点资料的土壤湿度同化方法 [J]. *地球科学进展*, 21 (12): 1350–1362. Zhang Shenglei, Xie Zhenghui, Tian Xiangjun, et al. 2006. A soil moisture assimilation scheme with an unsaturated soil water flow model and in-site observation [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (12): 1350–1362.
- 张生雷, 谢正辉, 师春香, 等. 2008. 集合 Kalman 滤波在土壤湿度同化中的应用 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1419–1430. Zhang Shenglei, Xie Zhenghui, Shi Chunxiang, et al. 2008. Applications of ensemble Kalman filter in soil moisture assimilation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1419–1430.