

郭雅凯, 王国杰, 沈菲菲, 等. 两类订正方案在集合均方根滤波土壤湿度同化中的对比研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 210–218.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.052

# 两类订正方案在集合均方根滤波土壤湿度同化中的对比研究

郭雅凯<sup>1</sup>, 王国杰<sup>2</sup>, 沈菲菲<sup>3</sup>, 闵锦忠<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学地理与遥感学院, 江苏南京 210044;

3. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏南京 210044)

**摘要:**利用 Noah 陆面模式, 基于集合均方根滤波(ensemble square-root filter, 简称 ENSRF)算法, 结合观测和模式 2 类订正方法, 通过构建多个融合同化方案, 进行土壤湿度同化研究。其中, 模式订正采用粒子群优化算法估计模式参数, 观测订正则将观测季节性尺度的特征调整到与模式气候态相当的水平。结果表明, 观测订正能够有效减少观测与模式季节尺度差异, 从而间接减少同化中的观测误差, 而模式订正则有效减少模式参数在同化中产生的误差; 引入观测和模式订正后的同化都要优于原始观测且未订正模式的传统同化方案, 而单独引入模式或者观测订正并不能够提供给同化方案最佳误差订正信息; 结合尺度化的观测订正和参数优化的模式订正, 能够使传统土壤湿度 ENSRF 估计方案得到最大程度的改善。

**关键词:**集合均方根滤波; 土壤湿度; 观测订正; 模式订正; 融合同化方案

**中图分类号:**S152.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1002-1302(2018)12-0210-08

土壤湿度影响着陆气交换中的水平衡和能量平衡, 从而对区域气候和天气过程中的降水预报产生重要影响。因此, 准确估计土壤湿度是数值预报的研究热点, 对于农业灌溉和环境工程等领域也有重要意义。近几十年来, 土壤湿度同化方法得到迅速发展。早期基于经验插值、订正和逼近方案, 被证实对较小尺度上的土壤湿度估计有改进<sup>[1]</sup>; 随后, 基于最优估计理论的多种非线性卡尔曼滤波发展起来<sup>[2-6]</sup>; 基于变分理论的多种方案也相继被提出<sup>[7-10]</sup>。这些方案都较为严格地遵守贝叶斯理论假设以获得理论最优解, 但须要对土壤湿度方程进行线性简化<sup>[11]</sup>; 在实际应用中, 这种简化对于高维非线性和多参数的陆面模式而言几乎是不可能的。因此, 集合卡尔曼滤波被引入土壤湿度同化方案中<sup>[12]</sup>。在真实的非线性系统中, 集合卡尔曼滤波的预报误差会偏离正态分布, 导致解析解是次优的; 然而, 它具有较好的移植性, 并且能够提供随时间变化的预报误差方差<sup>[13-15]</sup>, 因而在土壤湿度同化中得到了较广泛的应用<sup>[16-21]</sup>。

土壤湿度同化融合了地表遥感或场地观测资料和陆面模式预报场, 通常这些观测在时空上是不连续的, 融合过程是通过衡量二者代表性误差的组权重比来实现的<sup>[22-23]</sup>。理想资料同化的一个重要假设是观测误差和模式误差严格满足正态分布特征, 并且能够被准确估计; 但在实际应用中, 这些误差是不可避免的, 原因在于观测误差来自于仪器误差和估计方法缺陷等, 而模式误差来源于模式参数、高度非线性物理方程等

多个不同来源。由于这 2 类误差难以准确估计, 因此如何恰当的订正这些系统性的偏差是决定同化成功的关键因素<sup>[24]</sup>。

土壤湿度观测的误差订正, 通常将观测与模式的气候尺度特征(一般为季节特征, 约 3 个月)调整至 1 个相匹配的程度<sup>[25-26]</sup>, 进而利用这个重新调整后的观测值来代替原始观测值进行同化。这样做的好处在于基于模式特征的分析结果在同化过程中可以被调整到符合观测的特征, 但它并不假设模式或观测的季节特征哪个更准确, 因此也可以逆向订正, 而且整个订正过程独立于同化系统, 便于实施。然而, 该方案不内置于同化模型中, 无法调整动态变化的模式误差。

一般而言, 订正土壤湿度动态变化的模式误差, 首先假设观测无偏, 再利用观测增量(或者背景增量)和分析增量的比值来进行订正<sup>[27-28]</sup>。它的优势在于能调整瞬时变化的模式误差; 然而它主要应用于减少非线性观测算子(遥感资料前向模式)的不确定性<sup>[29]</sup>, 且对于非突变性的偏差(线性观测算子)调整不佳。模式误差的另一重要来源是模式参数, 近年来许多关于陆面参数的校准算法开始应用于实际的模式误差研究中<sup>[30-33]</sup>。其中, 一类方案基于模式瞬时状态, 结合算法和非线性观测算子模型的参数来寻找最优观测增量, 进而减小瞬变误差<sup>[34-37]</sup>; 另一类方案则利用算法单独估计模式参数<sup>[38]</sup>。前者能估计瞬时误差, 但无法在高维度的参数空间中实际应用; 后者适用面广, 但只能估计静态参数。最近研究指出, 这 2 类方案在同一框架中能各自提供给集合卡尔曼滤波同化系统几乎相当的信息量, 这些信息的融合使得同化效果相较于单方面订正有显著改进<sup>[39]</sup>。鉴于此, 为进一步探究这些订正方案对土壤湿度同化方案的影响, 本研究新发展基于集合均方根滤波(ensemble square-root filter, 简称 ENSRF)<sup>[40]</sup>同化的模式和误差订正方案。利用粒子群优化(particle swarm optimization, 简称 PSO)<sup>[41]</sup>来订正模式静态参

收稿日期: 2017-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41561124014、41375099); 江苏省自然科学基金青年科学基金(编号: BK20160954); 江苏省北极阁基金(编号: BJG201510、BJG201604)。

作者简介: 郭雅凯(1987—), 男, 河南南阳人, 博士, 工程师, 从事陆面资料同化研究。E-mail: guoyk@nuist.edu.cn。

数,并结合观测误差订正<sup>[25-26]</sup>,形成土壤湿度融合同化方案。首先分别利用观测、模式订正结果与原始观测、Noah 陆面模式的模拟结果进行比较,分析了前两者的效果;其次,分别与 ENSRF 结合形成融合方案,并与传统未订正方案作对比分析 2 种方案的表现;最后,通过分析各个方案之间的误差和相关性来研究其对最终同化效果的影响。

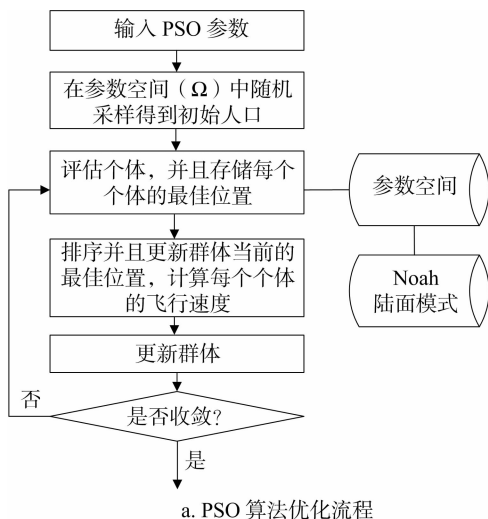
## 1 方法介绍

### 1.1 订正方案

观测订正采用标准正态离散的尺度化方案,该方案主要对观测和模拟的分布特征进行简单匹配,其分布特征采用均值和标准差表示,时间尺度为 1 季(3 个月)<sup>[26]</sup>。基于尺度化方案的订正技术的主要目的在于能够捕捉到模式与观测在季节尺度上的差异,其订正公式可以写为:

$$\theta_i^+ = \bar{\theta}_i^m + (\theta_i^- - \bar{\theta}_i^0) \frac{\sigma_i^m}{\sigma_i^0} \quad (1)$$

式中: $\theta_i^+$  和  $\theta_i^-$  分别表示订正后和订正前的土壤湿度; $\bar{\theta}_i^m$  和  $\bar{\theta}_i^0$  分别表示模式模拟和观测平均气候态; $\sigma_i^m$  和  $\sigma_i^0$  则分别表示模式模拟和观测气候态的标准偏差。采用研究时间段的前 3 个月作为气候态的统计特征。

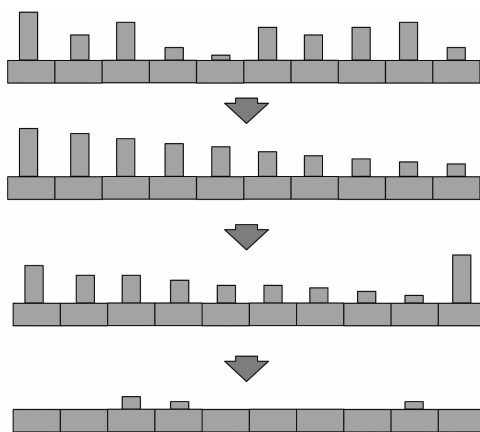


模式订正采用 Eberhart 等于 1995 年首次提出的 PSO 方案<sup>[41]</sup>,该方案对陆面模式标校可以简单描述为寻找最优模拟对应的陆面模式参数,即订正模式参数。其“进化”过程可简单表述为当前粒子的位置(即备选最优解)通过与之前该粒子的最优位置和群体最优粒子位置的比较获得新的“进化选择”方向;然后所有粒子根据自己的“进化选择”完成更新;当所有粒子完成更新而且又满足停止判断的条件时,就获得了新的整个群体最优位置(即全局最优解)(图 1)。另外,在模式优化中采用多个判断形式来通信,包含目标方程和物理约束,其公式可以写为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - O_i)^2}{n}}; \quad (2)$$

$$\theta_w < \theta_i < \theta_{ref} (i=1,2)。 \quad (3)$$

式(2)即均方根误差(root mean square error,简称 RMSE)的目标方程。其中, $n$  表示观测个数; $y$  表示模拟值; $O$  表示观测值;式(3)即土壤湿度( $\theta$ )的物理约束。 $i$  表示土壤层数;模式中的上部 2 层土壤湿度要在凋萎点( $\theta_w$ )和田间持水量( $\theta_{ref}$ )之间变化,引入物理约束的目的在于得到更符合实际情况的模式参数。



b. 粒子和群体的“竞争进化”的方式

图1 算法介绍

### 1.2 同化算法

对于常规的土壤湿度集合卡尔曼滤波方案,观测更新方程可以写成以下形式:

$$\theta_i^o - \theta_i^f = K(\theta_i^o - H\theta_i^f), i \in (1, 2, \dots, n)。 \quad (4)$$

式中: $\theta$  表示状态变量土壤湿度; $i$  表示某一集成员; $n$  是集合总数; $f$  表示预报场; $a$  表示分析场; $o$  表示观测变量; $H$  表示观测算子; $K$  表示卡尔曼滤波权重,为预报误差方差和观测误差方差的组合权重比。

由于在式(4)中,高斯分布的观测误差须要通过人为加入正态分布的噪声来得到,而这样会使同化方案引入新的误差。在假定观测误差不相关的情况下,引入参数  $\alpha = (1 + \sqrt{\frac{R}{P+R}})^{-1}$ <sup>[40]</sup>,这样观测更新方程可以写为:

$$\bar{\theta}_i^o - \bar{\theta}_i^f = K(\bar{\theta}^o - H\bar{\theta}_i^f); \quad (5)$$

$$\theta_i'^a - \theta_i'^f = -\tilde{K}H\theta_i'^f; \quad (6)$$

$$\tilde{K} = \alpha K。 \quad (7)$$

式中: $\bar{\theta}$  和  $\theta'$  分别表示均值和扰动; $R$  和  $P$  分别表示观测和预报误差协方差。 $\tilde{K}$  表示集合卡尔曼滤波中扰动成员的权重。与式(4)不同的是,式(5)、式(6)中的观测不需要加扰,从而减少了因人为引入的误差。垂直方向上观测信息的传播依赖于观测算子在垂直方向上的设计;采用 1 个基于土壤层厚度的简单线性插值方案,能够确保土壤液态水分的上下运动,与 Zhang 等采用的方案<sup>[42]</sup> 相似。

总之,试验所采用的方法是 1 个包含多接口的融合性框架,包含了陆面模式、优化模块、参数空间和同化系统等 4 个模块(图 2)。其中,参数空间在优化模块和陆面模式之间通信,陆面模式在参数空间和同化系统之间通信,优化模块和同化系统相对独立。另外,陆面模式包含 1 个独立的强迫资料

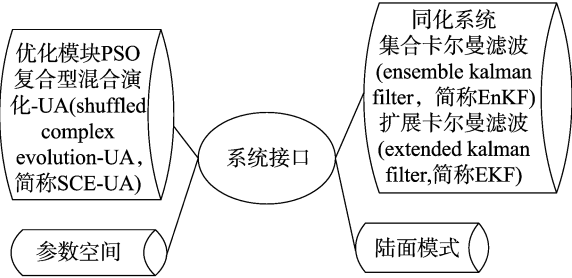


图2 同化方案、优化方案、参数空间和陆面模式等各个模块接口示意

接口,参数空间有独立的观测资料接口。

2 模型与试验

2.1 模式和资料

Noah 陆面模式(3.4.1 版本)土壤层厚度分别为 10、30、60、100 cm,而且还包含了冠层和深层根区层<sup>[43]</sup>。它在一维垂直层上采用季节尺度的能量平衡和日调整的水平衡作为主要的物理约束。Noah 模式包含了明确但复杂的生物化学过程。这些过程与土壤、植被和水等许多模式参数相联系;另外,该模式的时间离散化方案采用了隐式中央插分的格式来满足其在极小时间步长下模拟的稳定性和有效性<sup>[44]</sup>。但是,这导致其具有许多不确定的参数选择,尤其是在时间尺度低于前面主要物理约束的时间尺度时更加明显。再者,此 Noah 陆面模式还采用了 Mellor - Yamada - Janjic (MYJ) 近地表参数化方案来计算地表土壤和近地表大气之间的交换<sup>[45]</sup>。

原始资料来源于美国通量网,它提供了 Noah 模式所需的所有基于观测的强迫资料,时间间隔为 0.5 h。假设强迫资料是完美的,这样研究就可以集中于土壤层的湿度模拟。所采用的 Bondville 站(40.01°N,88.37°W)位于美国中部半干旱地区,降水较少,因此它能提供较为清晰的陆气耦合特征;其中,1998 年资料包含一些短时缺测(2~3 h)和明显的错误;由于数值模型要求在时间上不间断地输入,因此通过简单的线性插值来填补这些短时的缺测值。该资料还包含有对应模式输出的 0.5 h 间隔的多层土壤湿度资料。另外,其提供的地表特征也对应于美国地质调查局(U. S. Geological Survey, 简称 USGS)的定义标准(表 1)。

表 1 Bondville 站地表特征

类型	详细描述	资料覆盖时间
植被类型	草地	
土壤类型	粉质黏壤土	
坡度类型(类)	9	热启动时间从 4 月 30 日 14:30 至 7 月 31 日 14:30
最小植被覆盖率	0.01	
最大植被覆盖率	0.96	同化时间从 7 月 31 日 14:30 至 8 月 10 日 14:30
风测量高度(m)	6	
温度测量高度(m)	3	

根据参考文献[33-34,39]确定参数空间中的土壤、植被和通用的默认参数值以及其上下限,包括初始条件的上下限,但初始条件的默认值从模式 3 个月的“热启动”中得到(表 2)。这里参数的选择代表 Noah 模式在校校时间段内模拟中所必须用到的参数,并不表示最好的参数选择。这是因为在不同的天气条件下,地表的特征和近地表大气的气象特

征相对差异较大。

2.2 试验设计

试验时间从世界时 1998 年 7 月 31 日 14:30 至 8 月 10 日 14:30,模拟 10 d 作为集合热启动,保证物理量之间相互匹配。之后向后预报,从 8 月 10 日开始,共 10 d 时间。其中,在第 224 天到第 229 天之间,近地表温度降低,气压升高(图 3-a),风转向且风速扰动增大(图 3-b),对应有较弱降水和地表土壤湿度增大(图 3-c)。在该时段,降水使得表层土壤湿度明显增加,伴随的地表气象条件显著变化,导致原来较为稳定的陆气耦合特征减弱,这些都为陆面模式精确模拟土壤湿度变化带来较大的不确定性。

基于此,设计一系列土壤湿度同化方案的试验,包括这些方案融合的观测订正和模式优化等先验信息。其中,观测订正采用标准正态离散尺度化方案作为一个先验的观测信息(scaled observation,简称 SOBS),而模式优化(optimization,简称 OPT)包含了基于原始观测(observation,简称 OBS)的方案(OPT1)和基于 SOBS 的方案(OPT2),这些方案提供一个先验的模式订正信息。由于这些先验信息是彼此相关的,因此采用其与 ENSRF 融合而成的多类组合试验来比较它们在同化方案中的实际应用效果。

首先,利用 Noah 陆面模式 3 个月模拟产生的初始参数值,进行开放循环模拟(open loop,简称 OL)作为同化效果的对比试验。再者,原始观测(OBS)和 ENSRF 结合形成传统土壤湿度集合卡尔曼滤波同化方案 A1;OBS 与 OPT2 结合形成只带有模式订正的同化方案 A3;同样地,结合 OBS、OPT1 和 ENSRF 形成 A5;由于 A1、A3 和 A5 中都不包含观测订正信息,可以简单称为未订正观测试验。最后,结合 SOBS 与 ENSRF 形成带有观测订正的同化方案 A2;结合 SOBS、OPT2 和 ENSRF 形成同时带有模式和观测订正信息的同化方案 A4;同样地,结合 SOBS、OPT1 和 ENSRF 形成 A6;由于 A2、A4 和 A6 中包含了订正观测信息,可以称为订正观测试验(表 3)。

3 结果与分析

3.1 订正结果比较

由图 4 可以看出,原始观测(图 4-a,OBS)与开放循环(图 4-a,OL)在第 224 天之后差别越来越大,最后达到约 5% 的误差,其二者的相关系数(图 4-b)为 0.792。原始观测(OBS)经过对应模式订正之后的模拟(图 4-a,OPT1)与 OBS 之间误差较 OBS 与 OL 误差明显降低,最大误差在降水开始时,约为 2%,而且二者相关系数(图 4-c)也明显提升至 0.965。再者,订正观测(SOBS)的结果(图 4-a)与开放循环最大误差在结束时刻刻约为 3%,相较于 OL 与 OBS 误差明显降低。基于 SOBS 的模式订正之后模拟(图 4-a,OPT2)与 SOBS 之间的相关系数(图 4-d)几乎接近于 1,达到 0.975。

另外,OPT2 与 OBS 之间误差相较于 OBS 和 OL 之间误差有所降低,这是由于 SOBS 中包含了有效的原始观测信息,而 OPT2 也向 SOBS 靠近,从而使原本不太相关的 OPT2 和 OBS 之间的误差间接减少;类似地,OPT1 与 SOBS 之间的误差相较于 OL 与 OBS 之间的误差也间接减小。由图 4-b、图 4-c 和图 4-d 可以看出,观测与模拟之间的线性拟合斜率分别为 0.535、0.947、0.981,且灵敏度依次提高。前两者之

表 2 需要标校的 Noah 陆面模型参数

类型	参数	描述	默认值	下限	上限
植被(11)	topt	最佳蒸腾作用温度(K)	298	293	303
	cmcmx	冠层水参数(m)	$0.5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$
	cfactr	冠层水参数	0.5	0.1	2.0
	rsmax	最大叶孔阻抗(m)	5 000	2 000	10 000
	rsmin	最小叶孔阻抗(m)	40	40	1 000
	rgl	冠层阻抗中的太阳辐射项参数	100	30	150
	hs	冠层阻抗中的水汽压项参数	36.35	36.35	55
	snup	雪深阈值(m)	0.04	0.02	0.08
	laimax	最大叶面积指数	2.9	0.05	6.0
	laimin	最小叶面积指数	0.52	0.05	5.0
	z0	粗糙度长度(m)	0.12	0.01	0.99
土壤(10)	bb	“b”参数	8.72	3.0	9.0
	drysmc	干土壤总的水含量的极限	0.12	0.02	0.2
	fl1	土壤热扩散系数	-1.12	-3.209	0.162
	maxsmc	土壤空隙	0.46	0.3	0.55
	refsmc	田间含水量	0.39	0.15	0.50
	satpsi	饱和基质势	0.62	0.01	0.7
	satdk	饱和流体传导率(m/s)	$2.04 \times 10^{-6}$	$0.05 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
	satdw	饱和土壤扩散率	$1.35 \times 10^{-5}$	$5.71 \times 10^{-6}$	$2.33 \times 10^{-5}$
	wltsmc	凋萎点	0.12	0.01	0.138
	qtz	土壤石英含量	0.1	0.1	0.9
通用(8)	sbeta	计算植被对土壤感热影响的参数	-2.0	-4	-1
	fxexp	裸土蒸发指数	2.0	0.2	4.0
	csoil	土壤矿物质部分的热容	$2 \times 10^6$	$1.26 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$
	refdk	饱和水扩散率	$2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-5}$
	refkdt	饱和地表入渗参数	3.0	0.1	10.0
	frzk	冰阈值	0.15	0.10	0.25
	zbot	底层温度深度(m)	-8	-20	-3
	czil	计算热量粗糙长度的参数	0.1	0.05	0.8
初始(16)	smc1	第1层土壤湿度(100%)	<b>0.353 643 2</b>	0.05	0.5
	smc2	第2层土壤湿度(100%)	<b>0.432 022 6</b>	0.05	0.5
	smc3	第3层土壤湿度(100%)	<b>0.377 082 6</b>	0.05	0.5
	smc4	第4层土壤湿度(100%)	<b>0.337 547 0</b>	0.05	0.5
	sh2o1	第1层土壤液态水含量(100%)	<b>0.333 643 2</b>	0.05	0.5
	sh2o2	第2层土壤液态水含量(100%)	<b>0.372 022 6</b>	0.05	0.5
	sh2o3	第3层土壤液态水含量(100%)	<b>0.317 082 6</b>	0.05	0.5
	sh2o4	第4层土壤液态水含量(100%)	<b>0.337 547 0</b>	0.05	0.5
	stc1	第1层土壤温度(K)	<b>292.072 5</b>	260	300
	stc2	第2层土壤温度(K)	<b>291.932 8</b>	260	300
	stc3	第3层土壤温度(K)	<b>291.296 4</b>	260	300
	stc4	第4层土壤温度(K)	<b>289.932 1</b>	260	300
	t1	地表温度(K)	<b>295.147 6</b>	260	300
	cmc	冠层水含量(kg/m <sup>2</sup> )	<b>0</b>	0	0.001
	emissi	地表排放	<b>0.959 388 7</b>	0.0	1.0
	albedo	地表反照率	<b>0.190 611 2</b>	0.08	0.70

注:圆括号内数值表示特定类型参数的总个数,个;加粗数值表示来自于模式热启动。

间灵敏度的提升表明了模式订正对于减少模式误差的必要性;后两者之间灵敏度的提高表明了结合观测订正和模式订正具有进一步减小同化方案误差的可能性。

总之,由于观测订正结合了模式气候态和观测气候态的信息,明显减少了观测中季节性的误差;尽管模式参数对此次降水时段模拟有着较大的影响而且这种影响是高度非线性的,但模式订正对于校正模拟偏差有明显改进作用。

3.2 同化结果比较

集合预报的结果(图5,蓝色阴影区)显示了整体集合成

员在第224天发生降水之后,土壤湿度对降水的响应明显,但估计偏低,有明显的系统性偏差。对于未做订正的观测(图5-a),在降水时段之前A1、A3与A5方案模拟结果类似,相较于OBS(红实线)都高估了土壤湿度;在之后的时段中,A5离OBS较近,A1与A3类似且相较于OBS都低估了土壤湿度。对于订正之后的观测(图5-b),在降水时段之前A2、A4和A6模拟结果类似,相较于SOBS(红实线)都高估了土壤湿度;在之后的时间段中A6高估了土壤湿度,而A2与A4类似低估土壤湿度。

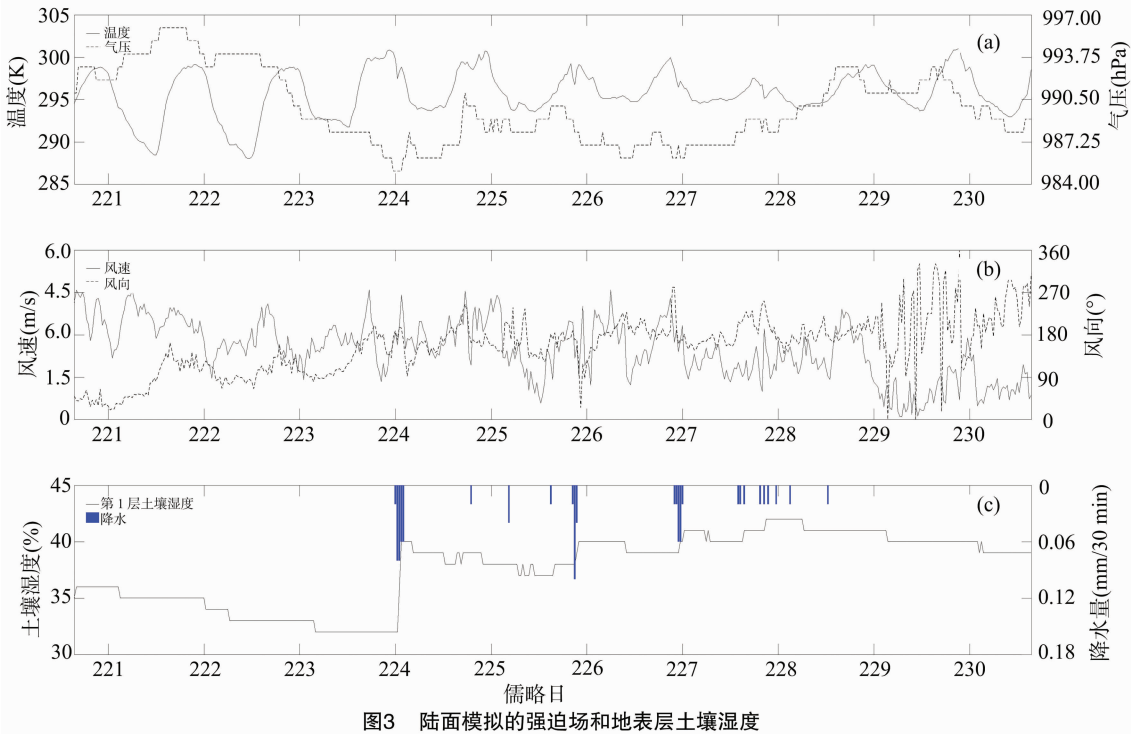


图3 陆面模拟的强迫场和地表层土壤湿度

表 3 试验设计

名称	简述	观测状态	模式参数
OBS	原始观测	未订正	无
SOBS	利用 3 个月的模拟和观测气候态来订正 OBS	订正	无
OL	开放循环	无	未订正
OPT1	利用原始观测 (OBS) 优化模式参数	OBS	订正
OPT2	利用订正观测 (SOBS) 优化模式参数	SOBS	订正
A1	集合均方根滤波 (ENSRF)	OBS	未订正
A2	ENSRF	SOBS	未订正
A3	ENSRF	OBS	OPT2
A4	ENSRF	SOBS	OPT2
A5	ENSRF	OBS	OPT1
A6	ENSRF	SOBS	OPT1

由图 6 - a 可以发现,在降水事件前后,A1、A3、A5 与 OBS 之间的最大误差均达到 3.8%。而在几乎整个同化时间窗内,A5 与 OBS 之间的绝对误差要明显小于 A1 和 A3,尤其在同化时间段后期更加明显。A5 相较于 A1 的改进,表明结合 OBS 进行模式订正后明显优于常规的同化方案。而 A5 相对于 A3 的改进,表明结合 OBS 进行模式订正优于结合 SOBS 进行模式订正的方案。A1 与 OBS 之间的误差和 A3 与 OBS 之间的误差则没有明显的差别,说明结合 SOBS 的订正对于传统的同化方案没有改进。进一步说明,基于 SOBS 的模式订正对目标有较强的选择性,而使得 A3 方案同化 OBS 失效。

由图 6 - b 可知,A2、A4、A6 与 SOBS 之间的最大误差发生在降水时段前后,达到 2.7%;而在之后的时间段内,A2 与

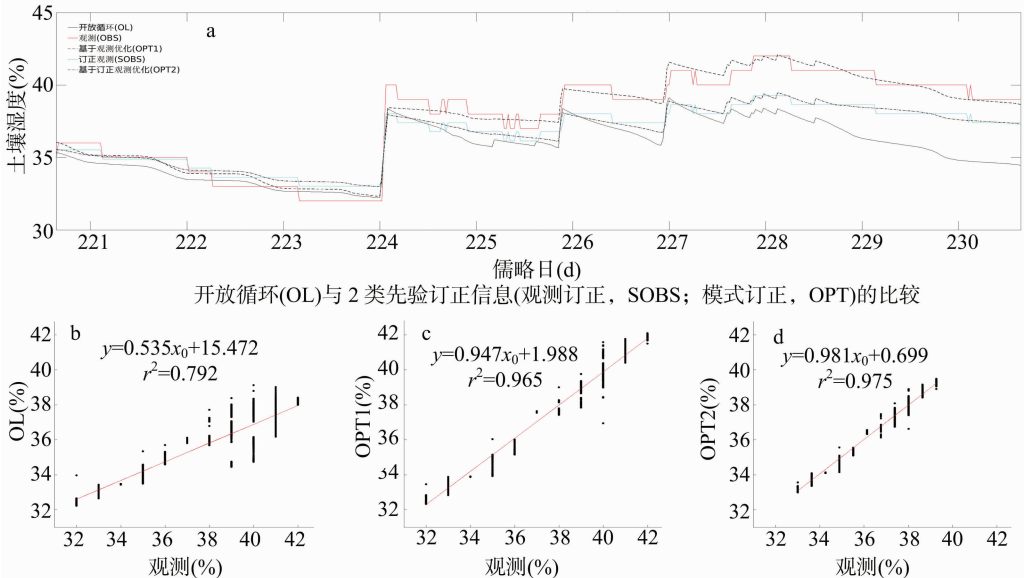


图4 地表层土壤湿度模拟和观测的订正结果对比

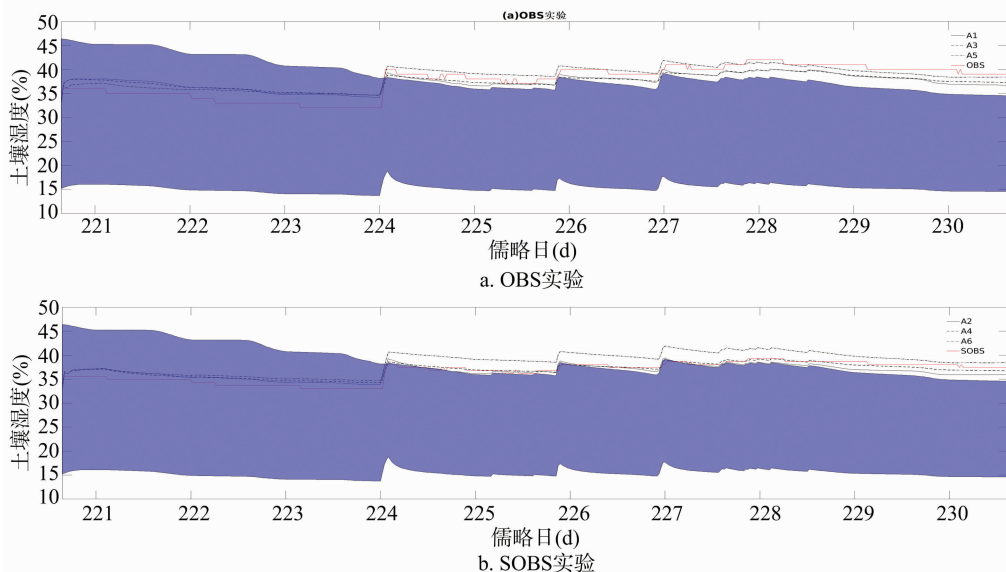


图5 不同同化方案模拟的表层土壤湿度与观测(红实线)、集合预报(蓝色阴影)比较

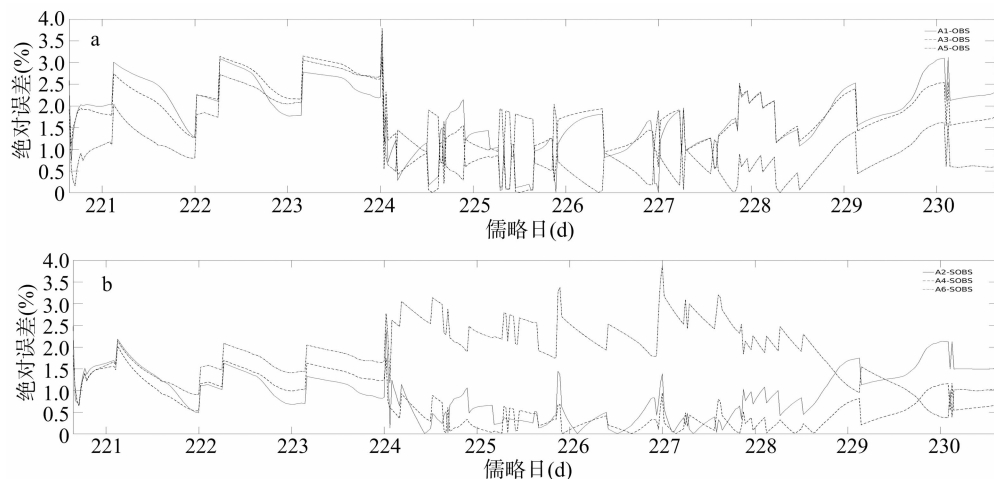


图6 表层土壤湿度同化后模拟与对应观测的绝对误差比较

A4 与 SOBS 之间的误差要明显小于 A6; A6 与 SOBS 之间的最大误差在降水间隔期,如第 227 天左右达到 3.9%;而在降水结束之后(第 229 天左右),A6 与 SOBS 之间的误差减小,而 A2 和 A4 与 SOBS 之间的误差增大,呈相反的变化。在整个降水时间段内,A2 与 A4 优于 A6,这与之前提到模式订正的选择性有关。而 A4 在绝大部分时间段内要优于 A2,这验证了模式订正的有效性。

对比 OBS 和 SOBS 系列同化方案可以发现,SOBS 同化方案(A2、A4、A6)在降水时段之前误差相对明显且很小,这说明观测订正对于同化方案有正的贡献。而在降水之后的时间段内,A4 与 SOBS 之间的误差相较于其他所有同化方案几乎始终都是最小的,这说明了 SOBS 和 OPT2 的结合相较于其他所有订正方案的组合对同化效果的改进贡献最大,即观测和模式订正信息相结合能明显降低同化方案偏差。

另外,在 OBS 同化试验中,A1 与 A3 同化结果相似,说明 OPT2 提供给 A3 的订正信息是无效的;在 SOBS 同化试验中,A6 与 A4、A2 同化结果有较大误差,说明 OPT1 提供给 A6 的订正信息也是无效的。在之前试验设计中,OPT1 和 OPT2 分

别针对 OBS 与 SOBS 进行模式校准,这些模式订正信息有效性跟对应同化方案观测有较强的对应关系;另外,A6 与 SOBS 之间的误差在降水时段结束后较 A2 与 SOBS 之间的误差明显降低,说明订正观测与模式优化有一定的互补性。

### 3.3 综合比较

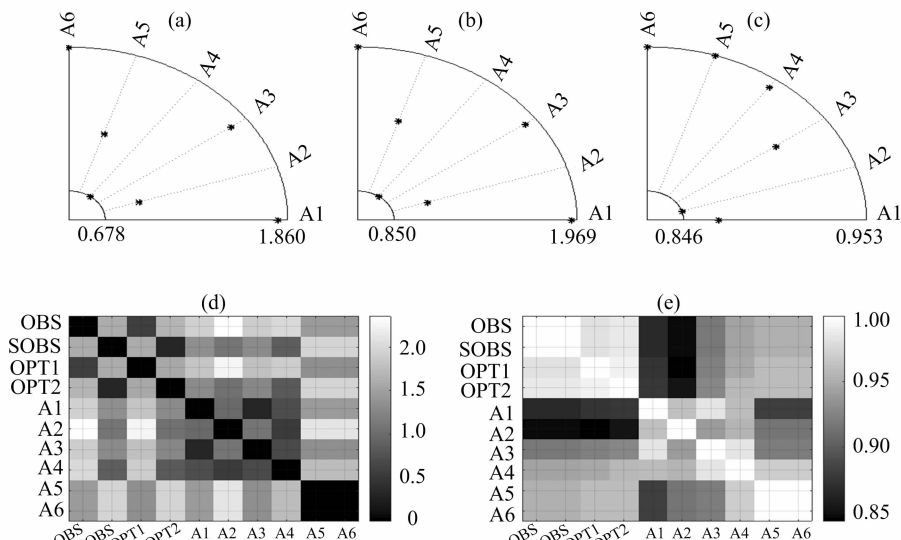
图 7 展示了 OBS(A1、A3 和 A5)和 SOBS(A2、A4 和 A6)同化方案的平均绝对误差(图 7-a)、均方根误差(图 7-b)和相关系数(图 7-c)。在平均绝对误差图中,A6 与 SOBS 之间的平均绝对误差最大为 1.86%,A1 与 OBS 之间的平均绝对误差次之,A3 与 OBS 之间的平均绝对误差更次;A5 与 OBS 之间的平均绝对误差、A2 与 SOBS 之间的均方根误差明显小于前三者;A4 与 SOBS 之间的均方根误差最小,为 0.678%(图 7-a)。均方根误差与平均绝对误差分布一致,A6 与 SOBS 之间的均方根误差最大,为 1.969%;A4 与 SOBS 之间的均方根误差最小,为 0.85%(图 7-b)。另外,由图 7-c 可以看到,A6 与 SOBS 和 A5 与 OBS 的相关系数最大,约为 0.953;A4 与 SOBS 的紧随其后,A3 与 OBS 的又次之且明显减小,A1 与 OBS 的再次之;A2 与 SOBS 的相关性最小,为



0.846。总之,与其他方案相比,A4 与 SOBS 之间的平均绝对误差、均方根误差最小,而且相关系数较高。

由于 OBS、SOBS、OPT1 和 OPT2 之间互相关联,将它们与各个同化方案两两配对,进一步比较均方根误差和相关系数(图 7)。在图 7-d 中,以 SOBS、OPT2、A1、A3、A4 为边长的矩形方框内聚集了较多的深色(均方根误差小于 1.5%),这

表明了这些方案相较于其他方案均方根误差整体偏小,具有一定的优越性;而 A2 与 OBS 匹配对、A2 和 OPT1 匹配对的均方根误差值最大。在图 7-e 中,颜色越深表示相关性越小,而 A1、A2 和 A3 试验中聚集了较多的深色(相关系数小于 0.9),这表明了这些方案相较于其他有较大的不一致性,很可能具有一定的缺陷。



\*表示误差或相关系数所处的位置; a、b、c 分别表示 A1、A3、A5 与 OBS 以及 A2、A4、A6 与 SOBS 之间的平均绝对误差(%),均方根误差(%),相关系数; d、e 分别为所有试验与不同观测和优化订正之间的均方根误差、相关系数

图7 同化方案综合比较

综上所述,SOBS、OPT2、A4 与其他所有匹配对都具有较好的相关性和较低的误差;A2 匹配效果最差,这说明对比传统的 A1 同化方案,单独使用观测订正并不能提供给 A2 最佳信息。总之,A4 方案在所有同化方案中表现最好,这是由于它有效结合了 SOBS 和 OPT2 的有效先验信息,使得同化效果在总体比较上优于其他方案。

#### 4 结论与讨论

基于 ENSRF 算法,利用 Noah 陆面模式(Version 3.4.1)和美国通量网 Bondville 站资料,研究观测订正和模式订正对土壤湿度同化的影响。首先,假定观测误差和模式参数误差同时存在,分别对二者进行校正。然后,将订正后结果作为同化方案的先验信息进行资料同化。最后,通过比较原始观测(OBS)、订正观测(SOBS)、模式订正(OPT)和同化结果之间的差异来验证这些信息对同化的影响。结果表明,订正后的观测(SOBS)采用标准正态离散的尺度化方案,包含了模式和观测季节尺度气候态信息,使其与 OL 偏差减小。模式订正(OPT)采用了粒子群优化(PSO)方案来确定恰当的模式参数,以修正模式与观测之间的偏差。基于 OBS 的模式订正(OPT1)和 OBS 之间误差明显减小;同样,基于 SOBS 的模式订正(OPT2)与 SOBS 之间的误差也明显减小。这说明 OPT 可有效减少模式与观测偏差。另外,OPT2 与 OBS 之间的误差也减小,这也从侧面说明了 OPT2 与 OBS 之间误差的减少有赖于 SOBS 提供的有效观测信息,因为它间接补偿了由 OPT 获得参数具有盲目性而可能引起的误差。

在 OBS 同化试验中(A1、A3、A5),3 个试验在降水之前

高估土壤湿度;而在之后降水期间,A1 与 A3 又低估土壤湿度,而 A5 则表现最好。在 SOBS 的同化试验中(ENSRF-SOBS 即 A2、ENSRF-SOBS-OPT2 即 A4、ENSRF-SOBS-OPT1 即 A6),除了 A6 在降水期间明显高估了土壤湿度,A2、A4 都与 SOBS 较一致。这说明 OPT1 模式参数在 SOBS 试验中是失效的。再者,对 OBS 和 SOBS 同化试验的绝对误差分析表明,这些误差都明显随着降水的变化而变化,A5 是 OBS 同化试验中误差最小的,而 A2 和 A4 在 SOBS 同化试验中绝对误差明显小于 A6。特别地,在降水时段 A4 与 SOBS 之间的误差在所有同化试验中最小。这说明 OPT2 与 SOBS 结合对于天气变化过程中的土壤湿度估计有显著改进。

由于 OBS、SOBS、OPT 之间互相关联,又进一步比较各个同化方案的误差和相关性。A4 与所有的表层土壤湿度误差最小且相关性最好,说明该方案具有较强的普遍适应性;A2 则与前三者之间相关性较差,说明该方案有一定的缺陷,单独使用观测订正并不能完全提供给同化方案足够有效的信息。同样地,OPT1 得到的参数在 A6 中有明显的负作用,OPT2 得到的参数在 A3 中的作用则不明显,这也说明了单独使用模式订正具有局限性。总体而言,综合 A4 方案较好的原因在于 SOBS 订正减少观测中存在的误差,且 OPT2 基于 SOBS 得到更加普遍性的模式参数。

总之,之前的研究验证观测订正方案能够有效减少观测与模式之间的季节性差异,从而对土壤湿度同化有所改进<sup>[25-26]</sup>,而模式参数订正在一定程度上提供模式校准信息,从而对于土壤湿度模拟有较大改进<sup>[31-33]</sup>,并且二者能给同化系统提供的信息量相当<sup>[39]</sup>;进一步验证表明,2 种订正方案

有效结合能为土壤湿度估计提供较为准确的先验信息,而模式订正与观测订正的单独使用则需要更多的资料和试验来改进其用法,增加其适用性。

致谢:感谢南京信息工程大学陈耀登教授对文章的修改。

## 参考文献:

- [1] Paul R. Remote-sensing soil moisture using four-dimensional data assimilation [D]. Arizona: The University of Arizona, 1996: 19-394.
- [2] Entekhabi D, Nakamura H, Njoku E G. Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multifrequency remotely sensed observations [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 1994, 32(2): 438-448.
- [3] Walker J P, Willgoose G R, Kalma J D. One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface measurements: a simplified soil moisture model and field application [J]. Journal of Hydrometeorology, 2001, 2(4): 356-373.
- [4] 张生雷, 谢正辉, 田向军, 等. 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, 2006, 21(12): 1350-1362.
- [5] Tian X J, Xie Z H, Dai A G. A land surface soil moisture data assimilation system based on the dual-UKF method and the community land model [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D14): 1-11.
- [6] 李昊睿. 陆面数据同化方法的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 1-141.
- [7] Tian X J, Xie Z H, Dai A G. An ensemble-based explicit four-dimensional variational assimilation method [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2008, 113(D21): 1-13.
- [8] Tian X J, Xie Z H. An ensemble-based three-dimensional variational assimilation method for land data assimilation [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2009, 2(3): 125-129.
- [9] 田向军, 谢正辉. 基于本征正交分解的显式四维变分同化方法: 理论与验证 [J]. 中国科学(地球科学), 2009, 39(4): 529-536.
- [10] Tian X J, Xie Z H, Dai A G, et al. A dual-pass variational data assimilation framework for estimating soil moisture profiles from AMSR-E microwave brightness temperature [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2009, 114(D16): 1-12.
- [11] 韩旭军, 李新. 非线性滤波方法与陆面数据同化 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(8): 813-820.
- [12] Reichle R H, Walker J P, Koster R D, et al. Extended versus ensemble kalman filtering for land data assimilation [J]. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3(6): 728-740.
- [13] Reichle R H, McLaughlin D B, Entekhabi D. Hydrologic data assimilation with the ensemble kalman filter [J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(1): 103-114.
- [14] Han X J, Li X. An evaluation of the nonlinear/non-gaussian filters for the sequential data assimilation [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1434-1449.
- [15] 张生雷, 谢正辉, 师春香, 等. 集合 Kalman 滤波在土壤湿度同化中的应用 [J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1419-1430.
- [16] Yilmaz M T, Delsole T, Houser P R. Improving land data assimilation performance with a water budget constraint [J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(5): 1040-1055.
- [17] Yilmaz M T, Delsole T, Houser P R. Reducing water imbalance in land data assimilation: ensemble filtering without perturbed observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(1): 413-420.
- [18] Yin J F, Zhan X W, Zheng Y F, et al. Enhancing model skill by assimilating SMOPS blended Soil moisture product into Noah land surface model [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(2): 917-931.
- [19] 田向军, 谢正辉. 考虑次网格变异性与土壤冻融过程的土壤湿度同化方案 [J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(6): 741-749.
- [20] 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 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), 2011, 41(3): 375-385.
- [21] 米素娟, 唐家奎, 张显峰, 等. 基于 VIC 模型与集合卡尔曼滤波的土壤水分同化研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(1): 91-95.
- [22] 黄春林, 李新. 陆面数据同化系统的研究综述 [J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 424-430.
- [23] 李新, 黄春林, 车涛, 等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻 [J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 163-173.
- [24] 摆玉龙, 李新, 韩旭军. 陆面数据同化系统误差问题研究综述 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 795-804.
- [25] Reichle R H, Koster R D, Dong J R, et al. Global soil moisture from satellite observations, land surface models, and ground data: implications for data assimilation [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 430-442.
- [26] Crow W T, Koster R D, Reichle R H, et al. Relevance of time-varying and time-invariant retrieval error sources on the utility of spaceborne soil moisture products [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(24): 1064-1067.
- [27] de Lannoy G J M, Houser P R, Pauwels V R N, et al. State and bias estimation for soil moisture profiles by an ensemble kalman filter: effect of assimilation depth and frequency [J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): 813-816.
- [28] de Lannoy G J M, Reichle R H, Houser P R, et al. Correcting for forecast bias in soil moisture assimilation with the ensemble kalman filter [J]. Water Resources Research, 2007, 43(9): 2363-2367.
- [29] Reichle R H, Koster R D, Liu P, et al. Comparison and assimilation of global soil moisture retrievals from the advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system (amsr-e) and the scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2007, 112(D9): 139-155.
- [30] Crow W T, Wood E F, Pan M. Multiobjective calibration of land surface model evapotranspiration predictions using streamflow observations and spaceborne surface radiometric temperature retrievals [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2003, 108(D23): 2173-2181.
- [31] Yapo P. A multiobjective global optimization algorithm with application to calibration of hydrologic models [D]. Arizona: The University of Arizona, 1996: 1-220.
- [32] Liu Y. Parameter estimations for locally coupled land surface-atmosphere models [D]. Arizona: The University of Arizona, 2003: 1-240.
- [33] Hogue T S, Bastidas L, Gupta H, et al. Evaluation and transferability of the Noah land surface model in semiarid environments [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(1): 68-84.



李梦娜,刘琳,张永芳,等. 区域土地整理项目时空配置[J]. 江苏农业科学,2018,46(12):218-222.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.053

# 区域土地整理项目时空配置

李梦娜<sup>1</sup>, 刘琳<sup>2</sup>, 张永芳<sup>3</sup>, 刘蕾<sup>3</sup>, 武彦斌<sup>1</sup>

(1. 河北经贸大学管理科学与工程学院, 河北石家庄 050061; 2. 河北工程技术学校, 河北石家庄 050061;

3. 河北经贸大学公共管理学院, 河北石家庄 050061)

**摘要:**为确定区域土地整理项目的时空配置模式,以河北省武强县为研究区域,基于景观格局视角,应用系统动力学原理,分析土地整理工程对景观格局及生态学过程的影响,构建结构与功能、时间与空间耦合的区域土地整理项目时空配置模型。该模型包括社会、经济与景观生态 3 个子系统,按照变量性质的不同,确定状态变量、速率变量、辅助变量和常量等系统变量,进而采用系统动力学语言分析各个子系统内部的主、次反馈环,并构建各个反馈环的状态方程、速率方程和辅助方程,借助 Vensim 平台得到系统模型。采用 2002—2007 年的研究区数据作为样本数据,以 2007 年作为模拟基年,2008—2015 年数据作为检验数据,结果发现,模拟数据的相对误差大多在 2% 以内,说明模型预测的系统行为与实际情况一致,验证了模型的适用性与准确性。

**关键词:**景观格局;土地整理项目;系统动力学;时空配置

**中图分类号:** F323.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)12-0218-05

土地整理是以耕地占补平衡为主要目标,旨在解决我国经济发展过程中出现的人地矛盾,确保耕地生产力、粮食安全以及景观生态建设的重要工程措施,相关研究受到土地研究工作者的极大关注。长期以来,我国土地整理项目的目标偏

重增加耕地数量,完成占补平衡和总量平衡,且项目的立项依据多以完成新增耕地指标为主,其具体的工程生物措施往往忽视与研究区生态系统结构和功能的协调度,高标准基本农田的建设标准轻视物质循环与共生,缺乏关于土地整理工程对景观格局及生态学过程影响的分析。

德国、法国等西欧国家关于土地整理的研究主要集中在工程措施、规划方案、相关制度、权属调整、效益评价等方面<sup>[1-2]</sup>。从发展阶段上看,先后经历了如何运用土地整理来改善农业生产条件的阶段和 21 世纪后以景观设计和生态环境保护为代表的绿色基调占据主导地位的阶段<sup>[3-4]</sup>。国内学

收稿日期:2017-10-28

基金项目:河北省社会科学基金(编号:HB14GL052)。

作者简介:李梦娜(1991—),女,河北涿鹿人,硕士,主要从事项目评价研究。E-mail:18731139120@163.com。

通信作者:武彦斌,博士,教授,主要从事土地利用、项目管理研究。E-mail:wuyanbin080@126.com。

[34] Rosero E, Yang Z L, Gulden L E, et al. Evaluating enhanced hydrological representations in Noah LSM over transition zones: implications for model development [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(3): 600-622.

[35] Yang K, Watanabe T, Koike T, et al. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85A(2): 229-242.

[36] Yang K, Zhu L, Chen Y Y, et al. Land surface model calibration through microwave data assimilation for improving soil moisture simulations[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 266-276.

[37] 贾炳浩, 谢正辉, 田向军, 等. 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(地球科学), 2010, 40(2): 239-251.

[38] Liu Y Q, Gupta H V. Uncertainty in hydrologic modeling: toward an integrated data assimilation framework [J]. Water Resources Research, 2007, 43(7): 126.

[39] Kumar S V, Reichle R H, Harrison K W, et al. A comparison of methods for a priori bias correction in soil moisture data assimilation [J]. Water Resources Research, 2012, 48(3): 1346-1346.

[40] Whitaker J S, Hamill T M. Ensemble data assimilation without

perturbed observations [J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(7): 1913-1924.

[41] Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization: development, applications and resources [C]// Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, South Korea: Seoul, 2001.

[42] Zhang S W, Liu Y H, Zhang W D. Ensemble square root filter assimilation of near-surface soil moisture and reference-level observations into a coupled land surface-boundary layer model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(4): 541-555.

[43] Chen F, Duhia J. Coupling and advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system part I: model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.

[44] Schaake J C, Koren V I, Duan Q Y, et al. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D3): 7461-7475.

[45] Janjić Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 927-945.