

陆面模型的网格尺度在春季土壤墒情数值模拟中的优化选择

刘鑫 任理*

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘要 陆面模型为区域农田土壤墒情监测提供了很好的途径,优化选择模型的网格尺度可以最有效地利用空间输入信息,提高计算效率。本研究以海河平原内的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ($115.5\sim 116.5^{\circ}$ (E), $38\sim 39^{\circ}$ (N))为研究区,运用陆面模型 CLM3.0 分别在 $(1/120)\sim 1^{\circ}$ 的 14 种不同网格尺度上对 2003 年 3—5 月的土壤墒情进行了独立模拟,分析在一定精度的空间输入数据条件下,陆面模型的网格尺度在该区域春季土壤墒情模拟中的优化取值。研究表明,结合模型输入数据的空间分辨率选择合适的网格尺度,可有效地减少计算机浮点计算取舍引起的误差;网格的无限精细并不能提高模拟效果,需要依据土壤砂粒百分含量数据的精度、变程及模拟目的优化选择陆面模型的网格尺度。当仅需要获得区域的土壤墒情平均值时,网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 1.4 倍附近;当需要获得区域的土壤墒情空间变异特征时,网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 28% 附近;当需要获得区域的土壤墒情空间变异特征及极大值时,网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 19% 附近;当需要获得区域的土壤墒情的所有空间统计特征时,网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据的空间最小尺度附近。

关键词 土壤墒情; 陆面模型; 网格尺度; 春季; 优化选择

中图分类号 Q938.1+3

文章编号 1007-4333(2012)05-0168-07

文献标志码 A

Optimal selection of grid-scale for land surface model in the numerical simulation of spring soil moisture

LIU Xin, REN Li*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Land surface model provides a suitable way for regional farmland soil moisture monitoring. Optimizing the grid scale of land surface model can improve computational efficiency by making the most effective use of spatial input information. In this study, we used the $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ region ($115.5 - 116.5^{\circ}$ (E), $38 - 39^{\circ}$ (N)) in Haihe River Plain as the study area. The community land model (CLM3.0) was used to simulate soil moisture during the spring (March- May) of 2003 over 14 grid scales ($(1/120) - 1^{\circ}$). With input data of a certain spatial precision, the optimized values of grid scale for land surface model were surveyed. The results showed that combination with spatial resolution of model input data, rounding errors in computer's floating-point calculations could be effectively reduced by an appropriate selection of grid scales. Unlimited fine grid scale did not improve modeling accuracy. An optimum grid scale for land surface model could be chosen based on the precision and range of soil sand percentage data, and the purpose of the simulation. The optimal grid scale was about 1.4-times the range of soil sand percentage data for average soil moisture in the region, around 28% of the range of soil sand percentage data for the regional spatial variability of soil moisture, around 19% of the range of soil sand percentage data for the regional spatial variability of soil moisture and the

收稿日期: 2012-03-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951102); 公益性行业(农业)科研专项(201203031)

第一作者: 刘鑫, 博士研究生, E-mail: queerjisheng@163.com

通讯作者: 任理, 教授, 主要从事土壤物理学和农业水文学研究, E-mail: renl@mx.cei.gov.cn

maximum value, and around the minimum spatial scale of soil sand percentage data for all spatial statistical features of soil moisture is required.

Key words soil moisture; land surface model; grid scale; optimal selection

农田土壤墒情是旱地农作物生长的重要控制因子,是开展农事服务、农业干旱监测预警、农业遥感及产量预测的重要指标^[1-3]。因此,土壤墒情的监测对于生态建设和农业生产具有重要的意义,然而,由于土壤墒情具有非常大的时间和空间变异性,取得大范围的区域观测资料非常困难。近年来应用遥感技术反演土壤墒情资料取得了一定的进展,但其局限性使得这项技术在研究中未得到广泛应用^[4]。陆面模型为区域土壤墒情的监测提供了很好的途径,目前国内外有不少应用陆面模型模拟区域土壤墒情的研究^[5-10]。CLM3.0是NCAR/CCSM(Community Climate System Model)的陆面模式部分,它综合了之前的陆面模式BATS、LSM等的优点,是目前世界上发展最为完善而且最具潜力的陆面过程模式之一^[4,11]。本研究运用其模拟区域的土壤墒情。

然而,由于模型输入数据的空间精度各异,不同的模型网格尺度会对模拟的土壤墒情空间分布产生影响。目前国内外都有网格尺度对模型模拟结果影响的研究,Vazquez等^[12]在一小流域应用MIKE-SHE模型,研究网格尺度对模拟的河道排水量及水位的影响;Mo等^[13]应用VIP模型于中国的黄土高原流域,分析网格尺度对模拟的作物蒸散及初级生产总值影响;叶许春等^[14]应用大尺度水文模型WATLAC于鄱阳湖信江流域,认为在流域水文模型的具体应用中应考虑流域本身的尺度以及模拟的目的和精度要求来选择合适的网格尺度;Kuo等^[15]应用水文模型于纽约中部的一个流域,用信息理论研究14个网格尺度对模拟的土壤湿度及径流的影响,研究表明,网格尺度越大,区域的平均土壤湿度模拟值越大,在湿润年份,土壤湿度的信息含量与网格尺度存在确定的函数关系,但是在干旱年份,这种函数关系不存在。

综上所述,目前的研究多是关于网格尺度对流域水文过程及初级生产总量的影响,关于网格尺度对春季土壤墒情影响的研究较少,结合一定精度的空间输入数据与模拟目的,具体优化选择陆面模型网格尺度的研究还未见报道。本研究以海河平原内的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 区域为研究区,运用陆面模型CLM3.0模拟多种网格尺度下的春季土壤墒情,旨在研究分析

一定精度的空间数据输入条件下,陆面模型的网格尺度在该区域春季土壤墒情模拟中的优化取值,以期最有效地的利用空间输入信息,提高计算效率。

1 材料与方 法

1.1 模型简介

CLM3.0是第3代陆面模型。该模型包括植被冠层的物理过程、植物气孔生理及光合作用过程、土壤水热传递过程、太阳辐射传递过程等模块,它既可以提供大气模式运行所需要的地表变量,也可以模拟土壤湿度、地表径流、基流、植被冠层蒸发、土壤蒸发及植被蒸腾等水文变量。模型的输入数据包括两类,分别是气象数据与地表特征数据。其中地表特征参数有三类,土壤颜色、土壤质地及地表覆盖类型。土壤颜色与BATS相同(由深到浅分为8类),土壤质地具体是指土壤层的砂粒及粘粒百分含量,模型中默认的植被覆盖类型采用NCAR植被功能型分类系统(共分17类,其中2类为作物,且两者的植物生理学参数完全一样)^[16]。

模型中的土壤水力学参数由对应土壤层的砂粒、粘粒百分含量公式换算得到,土壤含水率由Richard方程求解得到,具体的计算过程参见Oleson等^[16]的文献。

1.2 研究区概况

本研究区为海河平原中部的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ($115.5\sim 116.5^{\circ}$ (E), $38\sim 39^{\circ}$ (N))区域,属于温带东亚季风气候区,半干旱半湿润区,多年平均降水量为539mm,降水量年际变化大,年内分布极不均匀,多集中在6—9月,春季降水较少,如2003年研究区春季降水量仅82.8mm。

该区域面积约为海河平原的1/10,其中90%的面积为旱地农田(冬小麦-夏玉米轮作体系为其主要种植模式),8%的面积为湿地,另外2%的面积为树、草及灌木,与海河平原土地利用类型类似,同时两者的降水特征类似,故该研究区在海河平原有很强的代表性,其研究结论适用于整个海河平原。

1.3 数据说明

CLM3.0陆面模型需要的输入数据分别是气象数据、土壤砂粒、黏粒百分含量数据(质量分数)、土

壤颜色数据、叶面积指数(LAI)数据、茎面积指数(SAI)数据及土地利用数据。气象数据来源于文献^[17],包括的气象要素有气温、气压、降水、比湿、风速及太阳辐射,时间范围为2003年01—12月,时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $1.92^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。土壤砂粒、粘粒百分含量数据、土壤颜色数据、叶面积指数(LAI)数据、茎面积指数(SAI)数据及土地利用相关数据用模型附带的数据库,其中土壤砂粒、粘粒百分含量数据的空间分辨率 $(1/12)^{\circ} \times (1/12)^{\circ}$,土壤颜色数据的空间分辨率 $(2.8)^{\circ} \times (2.8)^{\circ}$,水陆分布数据的空间分辨率 $(1/2)^{\circ} \times (1/2)^{\circ}$,土地利用数据的空间分辨率 $(1/3)^{\circ} \times (1/3)^{\circ}$,植物功能类型分布数据的空间分辨率 $(1/2)^{\circ} \times (1/2)^{\circ}$,叶面积指数数据及茎面积指数数据的空间分辨率 $(1/2)^{\circ} \times (1/2)^{\circ}$ 。

1.4 研究方法

由于模型使用的是无闰年的时间日历,考虑到实际农业生产中常用罗马日历,故需要修改模型源代码,具体修改3个程序的相关代码,即time_manager.F90、atmdrvMod.F90和STATIC-cosysDynMod.F90;陆面模型在14种网格尺度上运行所需的地表数据文件由CLM3.0模型内部程序插值得到,插值原理是面积加权平均,其中14种网格尺度具体指 $(1/n)^{\circ}$ ($n=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,18,120$)。

由于没有初始状态的数据,陆面模型需要spin-up调整达到平衡状态,一般推荐转5次,第6次的模拟结果才能作为最后的分析结果^[20-21]。本研究将2003年01—12月来回运行5次,以第6次运行得到的2003年3—5月土壤墒情作为分析对象,这里分析10和20 cm的土壤湿度及2 m土体储水量。

网格尺度对土壤墒情空间统计特征影响的研究中,降水、土壤质地及土壤墒情空间统计特征分析使用数学软件Matlab7.0及地统计学软件GS+9.0完成。该研究的具体技术路线如图1所示。

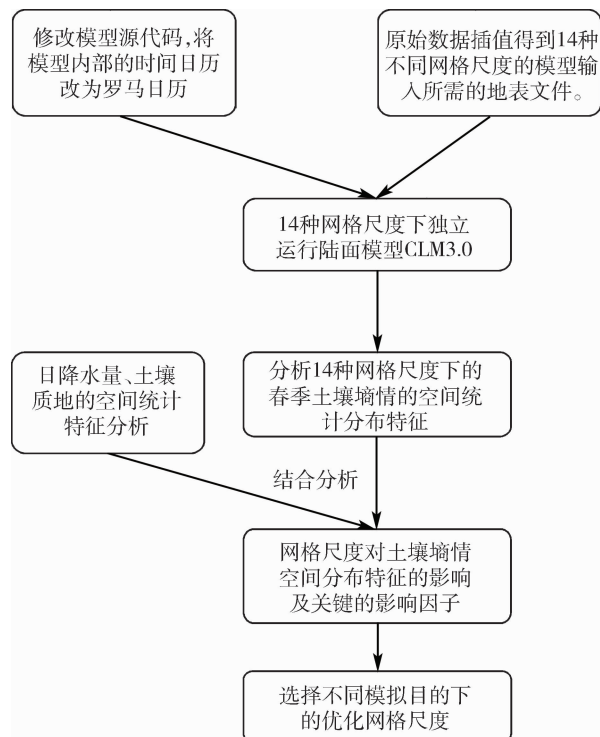


图1 模拟及研究的技术框架

Fig. 1 Technical framework of the simulation and research

2 结果与分析

2.1 土壤墒情空间分布的关键影响因子

土壤墒情的空间分布与模型输入数据有密切联系。由于本研究区的土地利用类型单一,约90%的面积为旱作农田,且种植制体系主要为冬小麦-夏玉米轮作,故忽略土地利用类型因素,主要分析降水量、土壤砂粒、粘粒百分含量对土壤墒情空间分布的影响。

表1为春季平均降水量、土壤墒情及土壤质地数据的区域平均值及变异系数。10及20 cm土壤湿度、2 m土体储水量的变异系数差别不大,而降水量、土壤砂粒、粘粒百分含量的变异系数远远小于土

表1 春季平均的降水量、土壤湿度(10 cm)、土壤湿度(20 cm)、土体储水量(2 m)及土壤砂粒、粘粒百分含量的空间统计特征

Table 1 Spatial statistical features of spring averaged precipitation, soil moisture at 10 and 20 cm depth, water storage in top 2 m soil layer, sand percent and clay percent in top 2 m soil layer

统计特征	降水量/ (cm/d)	2 m 土体土壤 砂粒百分含量/%	2 m 土体土壤 粘粒百分含量/%	10 cm 土壤湿度/ (cm^3/cm^3)	20 cm 土壤湿度/ (cm^3/cm^3)	2 m 土体储水量/ (cm/d)
平均值	0.09	38.69	29.13	0.30	0.31	58.40
变异系数/%	8.84	4.18	13.33	21.78	21.50	22.69

壤墒情的变异系数,由此可见,土壤墒情的空间变异性是多元数据空间变异综合叠加的结果。

表 2 为春季平均的降水量、土壤砂粒、粘粒百分含量及土壤墒情的地质统计特征。地质统计学分析的核心原理是半方差函数,设 $Z(x_i)$ ($i=1,2,\dots,n$) 是区域化变量 $Z(x)$ 在 n 个点上的测定值,数据对 $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$ [$i=1,2,\dots,N(h)$] 为在同一方向相隔为 $|h|$ 的一对点 (x_i, x_i+h) 上测定的值,则

半方差函数的具体计算公式见如下公式(2)。

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

公式(2)里的 Z 函数代表分析的变量,如这里的降水量、土壤砂粒、粘粒百分含量数据、土壤墒情。 $\hat{\gamma}(h)$ 是滞后步长(lag)为 h 的半方差函数, $N(h)$ 是数据对 $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$ 的对数^[13]。

表 2 春季平均的降水量、土壤(10 cm)湿度、土壤(20 cm)湿度、土体(2 m)储水量及土壤砂粒、粘粒百分含量的地质统计特征

Table 2 Geostatistical features of spring averaged precipitation, soil moisture at 10 and 20 cm depth, water storage in top 2 m soil layer, sand percent and clay percent in top 2 m soil layer

变 量	地质统计				
	块金值	基台值	变程/°	决定系数的平方	残方差
降水量/mm	1.23E-05	9.52E-03	1.31	0.90	2.60E-10
土体土壤(2 m)砂粒百分含量/%	4.90E-04	1.84E-03	0.88	0.92	0.14
土体土壤(2 m)粘粒百分含量/%	6.16E-03	2.55E-02	1.07	0.98	2.57
土壤(10 cm)湿度	1.44E-03	7.80E-02	0.85	0.99	3.90E-07
土壤(20 cm)湿度	1.35E-03	7.52E-02	0.85	0.99	4.15E-07
土体土壤(2 m)水深	1.61E-03	8.37E-02	0.86	0.99	619.00

对于半方差函数,有 3 个重要的特征可以帮助解释分析变量的空间特征。第一个特征是变程,反映区域化变量的影响范围,即在变程范围内,变量数值之间是空间相关的,在变程范围之外,变量的数值不相关;第 2 个特征变量是块金值,反映取样误差及取样点内部本身的变异;最后一个特征是基台值,反映区域化变量的总方差。为了便于比较,本研究将块金值与基台值进行了去量纲化处理,即分别除了对应变量区域平均值的平方。

由表 2 可见,数据的地质统计学分析的可信度高,决定系数都在 0.9 以上;6 个变量的块金值都较小,即取样误差与本身的差异性都较小;10 和 20 cm 土壤湿度及 2 m 土体储水量的基台值很接近,且数值最大,其次是土壤粘粒百分含量,降水量与土壤砂粒百分含量的基台值都较小,即土壤墒情的空间变异性最大,其次是土壤粘粒百分含量,降水量与土壤砂粒百分含量的空间变异性都较小,与表 1 分析结果一致;降水量、2 m 土体土壤粘粒百分含量的变程大于 1°,2 m 土体土壤砂粒百分含量、土壤墒情的变程小于 1°,且其变程大小很接近。

由此可见,研究区的气象条件空间分布较均一,土壤砂粒百分含量是土壤墒情空间分布最重要的影响因子。参看模型内部相关公式可知,土壤水力学参数主要是由土壤砂粒百分含量计算得到,土壤砂粒百分含量是模型中土壤水力学参数的重要决定因素,故其也决定着 2 m 土体内土壤水的运移过程,从而影响土壤墒情的空间分布。

综上所述,土壤墒情的区域变异性较大,是模型输入数据的多元空间变异综合的结果,但其关键的影响因子是土壤砂粒百分含量,土壤砂粒百分含量与土壤墒情的变程很接近。

2.2 网格尺度对土壤墒情的空间统计特征的影响

本部分研究分析网格尺度对春季 10 和 20 cm 土壤湿度及 2 m 土体储水量的空间统计特征的影响,空间统计指标分别是平均值、最大值、最小值、变化区间、标准差及变异系数。由于 10 和 20 cm 土壤湿度及 2 m 土体储水量的空间统计特征随网格尺度变化的规律一致,故这里只给出春季平均的 10 cm 土壤湿度空间统计特征随网格尺度变化图,如图 2。

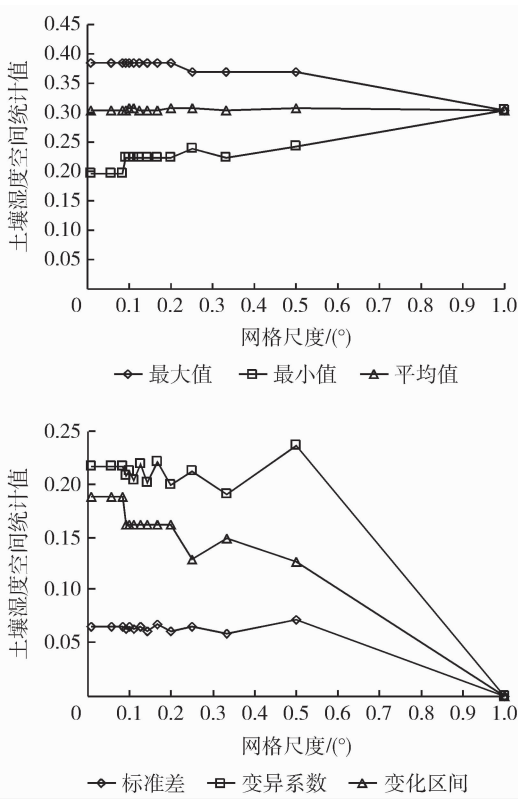


图2 研究区春季平均的土壤(10 cm)湿度的空间统计值随网格尺度的变化

Fig. 2 Spatial statistics of spring averaged soil moisture at 10 cm depth changes with the grid scale in the study area

由图可见,就研究的14个网格尺度而言,网格尺度对土壤墒情的区域平均值几乎没有影响,对区域最大值有一定的影响,但当网格尺度小于或等于(1/5)°时,影响几乎消失;网格尺度对区域最小值、变化区间、标准差及变异系数的影响明显,只有当网格尺度小于或等于(1/12)°时,影响才消失。结合模型输入的气象数据及地表数据的空间分辨率分析可知,(1/12)°是输入数据的最小空间尺度,且其对应的是土壤砂粒百分含量数据的空间尺度,当网格尺度小于(1/12)°时,由于不能获得更多的模型输入信息,模型输出信息不变,故土壤墒情的所有空间统计特征不变。

2.3 网格尺度的优化取值

基于2.2的结论,本研究将(1/12)°、(1/18)°及(1/120)°3种网格尺度下的土壤墒情空间统计特征值的平均作为研究区的空间统计特征值,然后将(1/11)~1°11个网格尺度的空间统计特征值与其对比,求相对误差。由于分析结果类似,只列出春季平均的2 m 土体储水量的结果,具体见表3。

由表3可见,当网格尺度的分母为偶数时,即将研究区分为偶数块网格时,区域变异系数的相对误差较小,当网格尺度的分母为奇数时,区域变异系数的相对误差较大,这应该是当网格划分为奇数块时,增多计算机浮点计算取舍所带来的误差,从而造成模拟的误差增大。故网格尺度的选取应该结合模型

表3 春季平均的2 m 土体储水量的空间统计特征的相对误差

Table 3 Relative error in spatial statistical features of spring averaged water storage in top 2 m soil layer %

网格尺度/°	最大值 相对误差	最小值 相对误差	平均值 相对误差	标准差 相对误差	变异系数 相对误差	变化区间 相对误差
1	24.08	53.02	0.19	100.00	100.00	100.00
1/2	6.75	21.08	1.04	9.23	8.11	34.16
1/3	6.65	12.05	0.09	12.96	12.88	25.07
1/4	6.67	17.85	0.76	1.01	1.76	30.82
1/5	0.00	10.89	0.92	7.00	7.85	10.73
1/6	0.00	10.89	0.10	1.87	1.76	10.73
1/7	0.00	10.90	0.19	6.22	6.40	10.73
1/8	0.00	10.89	0.00	0.85	0.86	10.73
1/9	0.00	10.89	0.40	5.33	5.71	10.73
1/10	0.00	10.89	0.47	0.55	1.02	10.72
1/11	0.00	10.89	0.16	3.81	3.96	10.72

输入数据的空间精度来选择, 尽量减少浮点计算取舍误差, 提高土壤墒情的模拟效果。

与 2.2 的分析结果一致, 11 个网格尺度都能很好的抓住区域的土壤墒情平均值, 相对误差几乎都在 1% 以下。这应该是与土壤墒情的地质统计学特征密切相关的, 由于土壤墒情的变程为 0.86° , 在 0.86° 为半径的圆的范围内, 土壤墒情是空间相关的。将网格中心的点作为区域代表点, 当网格尺度为变程的 $\sqrt{2}$ 倍 (即 $(1.2)^\circ$) 时, 网格尺度内土壤墒情都空间相关, 就可以抓住空间平均值了。本研究的网格尺度都小于变程的 $\sqrt{2}$ 倍, 故都能抓住土壤墒情的区域平均值。以 2.5% 相对误差为临界值, 当网格尺度为 $(1/4)^\circ$ 时, 平均值、标准差及变异系数的相对误差就已小于 2.5%, 当网格尺度为 $(1/6)^\circ$ 时, 平均值、标准差、变异系数及最大值的相对误差就已小于 2.5%, 但 11 种网格尺度下的区域最小值的相对误差都大于 10%。 $(1/4)^\circ$ 和 $(1/6)^\circ$ 与土壤墒情的变程比值分别约为 28% 和 19%。

另外, 由表可见, 细网格尺度并不一定好于粗网格尺度的模拟结果, 针对一定的模拟目的, 可以选择最优的网格尺度。由于土壤砂粒百分含量数据是土壤墒情的关键影响因子, 且两者的变程很接近, 可以通过土壤砂粒百分含量的地质统计学分析, 预先得到土壤墒情的变程。故可以依据土壤砂粒百分含量数据的精度、变程及模拟的目的来优化选择陆面模型的网格尺度。当网格尺度优化取值在土壤砂粒百分含量数据的空间最小尺度附近时, 可获得所有的空间统计特征; 当网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的约 1.4 倍附近时, 可获得区域的土壤墒情平均值; 当网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 28% 附近时, 可获得区域的土壤墒情空间变异特征; 当网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 19% 附近时, 可获得区域的土壤墒情空间变异特征及极大值。

3 结论与讨论

1) 陆面模型模拟的春季土壤墒情的空间变异性较大, 是输入数据的多元空间变异综合的结果, 但其关键影响因子是土壤砂粒百分含量。土壤砂粒百分含量与土壤墒情的变程很接近, 通过土壤砂粒百分含量的地质统计学分析可预先得到土壤墒情的变程。这与国内外的研究结果一致, Choi 等^[6] 运用陆

面模型 CLM 研究了不同农作物覆盖的旱作农田情形下, 土壤湿度对土壤质地的敏感性分析实验, 结果表明, 土壤湿度对土壤砂粒百分含量参数很敏感, 对土壤粘粒百分含量参数不敏感; 其他一些国内外陆面模型相关研究也表明, 在气象条件相同的情况下, 土壤湿度只对土壤质地敏感^[18-19]。

2) 网格尺度的选取应该结合模型输入数据的空间精度来选择, 尽量减少浮点计算取舍误差。

3) 网格的无限精细并不能提高模拟效果, 需要根据土壤砂粒百分含量数据的精度、变程及模拟的目的来优化选择陆面模型的网格尺度。当仅需要获得区域的土壤墒情平均值时, 网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的约 1.4 倍附近; 当需要获得区域的土壤墒情空间变异特征时, 网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 28% 附近; 当需要获得区域的土壤墒情空间变异特征及极大值时, 网格尺度的优化取值在土壤砂粒百分含量数据变程的 19% 附近; 当需要获得区域的土壤墒情的所有空间统计特征时, 网格尺度优化取值在土壤砂粒百分含量数据的空间最小尺度附近。

由于目前大部分先进的陆面模型的地表水运动过程参数化方案类似, 本研究对于陆面模型在海河流域平原区, 或者类似区域的应用有借鉴意义。但是由于气象数据、地表类型数据、植被类型 (PFT) 等的空间分辨率较粗, 该研究结论只适用于气象条件空间分布较均一、土地利用类型单一的地区。同时, 模型的参数化方案修改及模型的率定与验证, 是今后进一步的工作。

参 考 文 献

- [1] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 灌溉农田土壤湿度的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 423-426
- [2] 韩俊杰, 高永刚, 南瑞, 等. 1984—2005 年黑龙江省主要农区土壤湿度的变化特征[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 41-44
- [3] 李玉环, 王静, 曹银贵. 土壤墒情遥感反演与旱情诊断[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 123-130
- [4] 杜川利, 刘晓东. CLM3 模拟的 1979—2003 年中国土壤湿度及其对全球变暖的可能响应[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 463-473
- [5] Zou L J, Gao W, Wu T W, et al. Numerical simulation by the Common Land Model (CLM) of the soil moisture over China during the summer of 2006[J]. SPIE, 2008, 7083: 8314
- [6] Choi M, Lee S O, Kwon H. Understanding of the common land model performance for water and energy fluxes in a farmland during the growing season in Korea[J]. Hydrol Process, 2010,

- 24(8):1063-1071
- [7] Li M X, Ma Z G. Comparisons of simulations of soil moisture variations in the yellow river basin driven by various atmospheric forcing data sets[J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(6): 1289-1302
- [8] Meng L, Quiring S M. Examining the influence of spring soil moisture anomalies on summer precipitation in the u. s. Great plains using the community atmosphere model version 3[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(D21118)
- [9] Liu Y Y, Evans J P, McCabe M F, et al. Influence of cracking clays on satellite estimated and model simulated soil moisture [J]. *Hydrol Earth Syst Sc*, 2010, 14(6): 979-990
- [10] Song Y M, Guo W D, Zhang Y C. Numerical study of impacts of soil moisture on the diurnal and seasonal cycles of sensible/latent heat fluxes over semi-arid region[J]. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(2): 319-326
- [11] Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. The community land model and its climate statistics as a component of the community climate system model[J]. *J Climate*, 2006, 19(11): 2302-2324
- [12] Vazquez R F, Feyen L, Feyen J, et al. Effect of grid size on effective parameters and model performance of the mike-she code[J]. *Hydrol Process*, 2002, 16(2): 355-372
- [13] Mo X G, Liu S X, Chen D, et al. Grid-size effects on estimation of evapotranspiration and gross primary production over a large loess plateau basin[J]. *China Hydrolog Sci J*, 2009, 54(1): 160-173
- [14] 叶许春, 张奇. 网格大小选择对大尺度分布式水文模型水文过程模拟的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 112-116
- [15] Kuo W L, Steenhuis T S, McCulloch C E, et al. Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model[J]. *Water Resour Res*, 1999, 35(11): 3419-3428
- [16] Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. Technical description of the Community Land Model (CLM) [M]. NCAR/TN-461 + STR, 174, 2004
- [17] Qian T T, Dai A, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part i: forcing data and evaluations[J]. *J Hydrometeorol*, 2006, 7(5): 953-975
- [18] Mohr K I, Famiglietti J S, Boone A, et al. Modeling soil moisture and surface flux variability with an untuned land surface scheme: a case study from the southern great plains 1997 hydrology experiment[J]. *J Hydrometeorol*, 2000, 1(2): 154-169
- [19] 梁晓, 戴永久. 通用陆面模式对土壤质地和亮度的敏感性分析 [J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(5): 585-597
- [20] Chen T H, Henderson-Sellers A, Milly P, et al. Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes[J]. *J Climate*, 1997, 10(6): 1194-1215
- [21] Yang Z L, Dickinson R E, Henderson-Sellers A, et al. Preliminary-study of spin-up processes in land-surface models with the first stage data of project for intercomparison of land-surface parameterization schemes phase 1(a) [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(D8): 16553-16578

责任编辑: 王燕华