

基于 MODIS 的土壤含水量模拟及其影响因素分析

张 静^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要: 以陕西省关中地区为研究区域, 基于 2009 年春季三期 Terra MODIS1B 数据, 获取昼夜地表温差和反照率参数; 结合同期气象站点实测的土壤墒情数据, 采用热惯量法建立热惯量-土壤含水量(ATF SWC)经验模型。模拟结果表明: 3月8日模型模拟精度最高, 4月28日模型模拟精度最低。进一步分析发现, 植被指数对模型的影响较大, 因此热惯量法对裸地土壤含水量监测精度较高。最后, 结合研究区 DEM 数据, 综合分析了地质地貌、地下水和植被指数等对关中地区土壤含水量的影响。研究结果对关中地区的旱情监测具有一定的参考价值。

关键词: 土壤含水量; 热惯量; MODIS; 植被指数; DEM

中图分类号: P426.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2014)03-0033-05

Simulation of Soil Moisture and Analysis of Influence Factors Based on MODIS Data

ZHANG Jing^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The day- and night ground surface temperature difference and reflectivity values were obtained in Guanzhong area of Shanxi Province based on the three phase Terra MODIS1B data in spring of 2009. In combination with the measured soil moisture data in the meteorological stations at the same time, the thermal inertia method was used to develop the ATF SWC experience model. The results showed that the model of March 3 has the highest precision while the model of April 28 has lowest precision. Further studies suggested that NDVI has significant effects on model precision, thus the thermal inertia method had higher precision on monitoring soil moisture of bare land. Based on the DEM data, the impacts of geology and geomorphology, groundwater, and NDVI on soil moisture in Guanzhong area were analyzed. The research results can provide reference on drought monitoring in Guanzhong area.

Key words: soil moisture; thermal inertia; MODIS; NDVI; DEM

土壤水分是一个重要的环境因子, 也是在陆地表面参数化过程中的一个关键变量, 能反映在气候、气象和水文等因素共同作用下的当前地表状况, 对气候、气象及水文等研究具有重要的意义^[1]。另一方面, 土壤水分含量的时空分布和变化对地-气间的热量平衡、土壤温度和农业墒情等都会产生显著的影响。传统的土壤水分含量主要通过地面观测站进行监测, 精度较高, 但这种方法对于大范围、连续性、实时性的土壤水分含量数据的获取则比较困难, 而遥感技术的发展为这一需求提供了有效途径。目前, 已有众多学者运用遥感技术进行了土壤含水量反演研究, 李慧等^[2]针对 Terra MODIS 和 NOAA-AVHRR 数据进行对比研究, 发现 MODIS 数据用于遥感干旱监测是可行的; 张树誉等^[3]进行了基

于 MODIS 数据的热惯量和植被供水指数模型的区域性遥感干旱监测方法研究; 李琴等^[4]基于 MODIS 遥感影像和表观热惯量法, 建立了以土壤质地分类为基础的、适用于干旱半干旱区 1 m 土体的土壤含水量的遥感反演模型; 魏伟等^[5]基于 MODIS 数据反演了石羊河流域土壤含水量, 并结合 DEM 数据分析了石羊河流域土壤含水量的空间分异规律。已有研究表明, 基于 MODIS 数据和热惯量法进行土壤含水量的监测是可行的。但是以往研究在土壤水分影响因素方面考虑的不够全面, 部分研究虽然对地表土质、DEM 等因素的影响做了分析, 但综合性分析略显不足。基于前人的研究, 本文以陕西省关中地区为研究区域, 基于热惯量法和 MODIS 数据建立关中地区热惯量-土壤含水量模型, 并

收稿日期: 2013-10-22 修回日期: 2014-04-03 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.007.html>

基金项目: 西安科技大学培育基金(2009014)

作者简介: 张 静(1982-), 女, 辽宁阜新人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水资源的合理开发应用与生态环境保护研究。E-mail: 147166433@qq.com

结合归一化植被指数 $NDVI$ 、 DEM 数据以及地表土质、水文等因素, 综合分析其对模型精度及土壤含水量的影响。

1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部, 地处东经 $106^{\circ}24' - 110^{\circ}36'$, 北纬 $33^{\circ}34' - 35^{\circ}49'$, 介于陕北高原与秦岭山地之间, 地势西高东低, 渭河自西向东横贯全区。关中平原是一个三面环山、东西敞开的盆地: 西北是以陇山为主体的高原山地地形, 北部是渭北台原, 南部是渭河冲积平原, 渭河南侧的黄土台塬断续分布, 紧靠秦岭。本地区属半干旱、半湿润的大陆性季风气候, 多年平均降雨量在 530~1 000 mm 之间, 年内分配极不均匀, 地区分布也不均匀, 易发生干旱, 连续百日以上的干旱记录大多发生在 3 月~ 8 月。本文选择关中地区具有代表性的 3 月、4 月土壤含水量作为研究时期。

2 数据资料

地面实测数据是由陕西省气象局提供的 10 cm 深度的土壤相对含水量数据。选择的土壤墒情站点覆盖了关中大部分地区(图 1), 以保证其对关中地区整体土壤含水量的代表性。

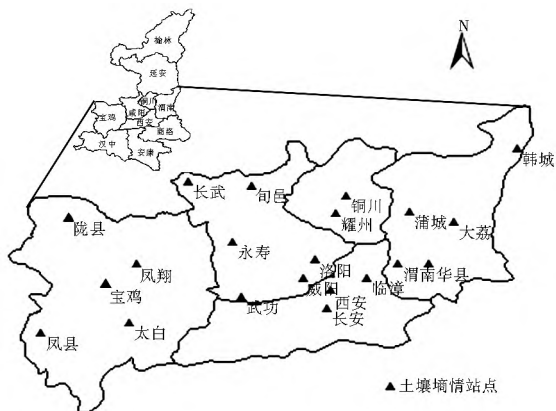


图 1 研究区地理位置及土壤墒情站点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of soil moisture monitoring stations

地表高程数据(DEM)来自 NASA 网站, 分辨率为 30 m。遥感数据为来自国家卫星气象中心(网址: <http://satellite.cma.gov.cn>)的 MODIS L1B 数据, 时间与地面实测数据同步。综合考虑云的影响程度, 最终选取受云影响最小的 2009 年 3 月 18 日、4 月 08 日和 4 月 28 日的影像, 影像完全覆盖整个研究区域, 影像数据基本信息见表 1。

表 1 遥感数据基本信息

Table 1 Basic information of remote sensing data

卫星	过境时间(国际标准时)	昼夜	数据级别	分辨率
TERRA	2009-03-18 03-30	昼	Level1	1 km
TERRA	2009-03-18 14-35	夜	Level1	1 km
TERRA	2009-04-08 03-49	昼	Level1	1 km
TERRA	2009-04-08 14-49	夜	Level1	1 km
TERRA	2009-04-28 03-24	昼	Level1	1 km
TERRA	2009-04-28 14-29	夜	Level1	1 km

3 研究方法

3.1 热惯量法

热惯量是土壤的一种热特性, 也是引起土壤表层温度变化的内在因素之一, 它与土壤含水量密切相关, 同时又影响着土壤温度日较差。土壤温度受水分的影响, 水分充足, 热惯量高, 温度变化小, 地表温度低; 水分亏缺, 热惯量低, 温度变化大, 地表温度高。热惯量随着土壤含水量的增加而增大。利用热红外遥感可以观测地表温度, 获得热惯量, 进而估测土壤湿度。热惯量可以表示为:

$$P = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{1}$$

式中: P 为热惯量($J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)$); λ 为导热率($J/(m \cdot s \cdot K)$); ρ 为土壤密度(kg/m^3), c 为比热($J/(kg \cdot K)$)^[6]。

Price 通过对热惯量遥感成像机理的研究, 在地表能量平衡的基础上, 简化了潜热蒸散模式, 引入地表综合参数, 提出表观热惯量(ATI)的概念, 用卫星提供的反照率和热红外辐射温差计算表观热惯量, 发现表观热惯量(ATI)与真实热惯量呈线性关系, 可使用表观热惯量 ATI 来代替真实热惯量 P 进行土壤含水量的反演。表观热惯量可以表示为:

$$ATI = \frac{1-A}{\Delta T} \tag{2}$$

式中: ΔT 为昼夜地表温差, $\Delta T = T_d - T_n$, T_d 与 T_n 分别为一天中最高、最低温度, 即昼、夜地表温度; A 为土壤反照率, 参数 T_d 、 T_n 和 A 均可以通过遥感反演获得^[7]。

利用遥感反演得到的表观热惯量 ATI, 建立表观热惯量与土壤含水量的关系模型, 进而估算土壤水分。

3.2 技术路线

对 MODIS1B 数据进行预处理, 基于 ENVI4.7 遥感图像处理平台, 利用 MODIS 数据自带的经纬度信息对各期数据进行几何校正; 利用关中地区边界矢量图对校正结果进行裁剪, 得到研究区各期影像。基于预处理影像, 计算昼夜地表温差和反照率等参数, 进而计算表观热惯量, 将表观热惯量与实地站点的土壤墒情数据进行回归建模分析, 得到热惯量土壤含水量(ATI-SWC)经验模型。最后, 结合植被指数对模型精度进行分析, 并依据数字高程模型(DEM)数据和研究区地质水文等情况, 对关中地区土壤含水量的影响因素进行分析。具体技术路线见图 2。

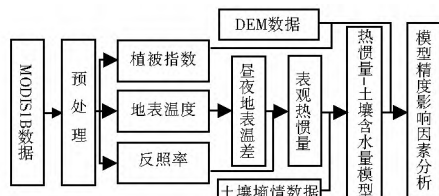


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

3.3 参数计算

3.3.1 昼夜地表温差 ΔT

卫星传感器直接获取的地表温度是亮度温度, 由于地物的昼夜亮度温差与其实际的地表温度的昼夜温差之间

误差很小,因而可以用亮度温差来代替地表温差。考虑到 MODIS 影像的第 31 通道比辐射率相对稳定,故采用第 31 通道的亮度温度来代替地表温度。MODIS1B 数据 31 通道的 Data 值已经是将 DN 值转化成辐射亮度后的结果,因此可通过 Planck 函数计算得出白天及夜晚亮度温度,计算公式如下:

$$T_i = \frac{K_{i,2}}{\ln(1 + \frac{K_{i,1}}{I_i})} \quad (3)$$

$$K_{i,1} = \frac{C_1}{\lambda_i}, K_{i,2} = \frac{C_2}{\lambda_i}$$

式中: I_i 为第 i 波段的辐射亮度值; $K_{i,1}$ 和 $K_{i,2}$ 为常量; λ_i 为第 i 波段的中心波长,由于第 31 波段的波长区间为 10.78~11.28 μm ,所以 λ 取其中间值 $\lambda_{31} = 11.03 \mu\text{m}$; C_1 和 C_2 分别为第 1 和第 2 光谱常量,取 $C_1 = 1.19104356 \times 10^{-16} \text{ W m}^{-2}$, $C_2 = 1.4387685 \times 10^4 \mu\text{m}$; K 对于第 31 波段分别为: $K_{31,1} = 729.541636 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_{31,2} = 1304.413871 \text{ K}$ 。以 2009 年 4 月 28 日数据为例,具体昼夜亮度温度和昼夜温差如图 3(a) [8]。

3.3.2 反照率 A

陆地表面反照率是描述地球辐射季节性变化特征及其对生物圈和气候过程产生影响的一个重要参数。反照率是陆地表面反射率在各个方向的积分。假设地球具有朗伯体特征,反照率表示为:

$$A = \frac{\int_0^\infty \rho(\lambda) Q_{se}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty Q_{se}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中: $\rho(\lambda)$ 是地物分光反射比; $Q_{se}(\lambda)$ 是太阳分光辐照度。地表反照率应该是全波段、半球视场的反射比,而遥感所得到的是非连续、多波段、窄视场各波段的反射系数。全波段指波长 $0 \rightarrow \infty$ (主要指 0.15~4 μm)。但由于太阳能量主要集中在 0.31~1.5 μm 很窄的波段。因而,可通过可见光与近红外波段的反射率来近似代替全波段反照率。对于分波段的情况,则有:

$$A = \frac{Q_{se}(\lambda) \sum \rho(\lambda)}{\sum Q_{se,n}(\lambda)} \quad (5)$$

式中: n 为波段序号; $Q_{se,n}(\lambda)$ 为各个波段上地表太阳分光辐照度; $\rho(\lambda)$ 为地物各个波段分光反射比。若令加权系数 $W_n = \frac{Q_{se,n}}{\sum Q_{se,n}}$, 于是有 $A = \sum W_n \rho(\lambda)$, 分波段的情况可看作是各个波段的分光反射比的加权平均,权重代表入射到地表的第 n 波段的太阳能量与所有波段的太阳总能量之比,MODIS 的权重表达如下 [9-10]:

$$A = 0.29CH1 + 0.14CH2 + 0.29CH3 + 0.28CH4 \quad (6)$$

式中: $CH1$ 、 $CH2$ 、 $CH3$ 、 $CH4$ 为 MODIS 第 1 至 4 通道的地表反射率。2009 年 4 月 28 日的地表反射率如图 3(b)。

3.3.3 表观热惯量 ATI

依据式(4) 计算表观热惯量,将昼夜地表温差 ΔT 和地表反照率 A 对应影像通过波段运算,可获得各期表观热惯量,如图 3(c) 为 2009 年 4 月 28 日的表观热惯量。利用表观热惯量数据和地面实测土壤含水量数据即可建立热惯量-土壤含水量(ATFSWC)模型。

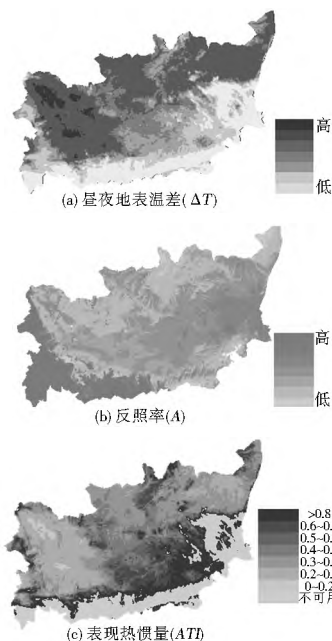


图 3 2009 年 04 月 28 日参数计算结果
Fig. 3 Parameter of April 28, 2009

4 结果与讨论

4.1 热惯量-土壤含水量(ATFSWC)模型

提取不受云影响的地面站点对应的表观热惯量数据作为样本,绘制表观热惯量数据(ATI)与地面实测土壤含水量数据(SWC)关系散点图(如图 4),并对二者进行相关分析,进而建立 ATFSWC 线性回归模型。由图 4 可见三期数据的

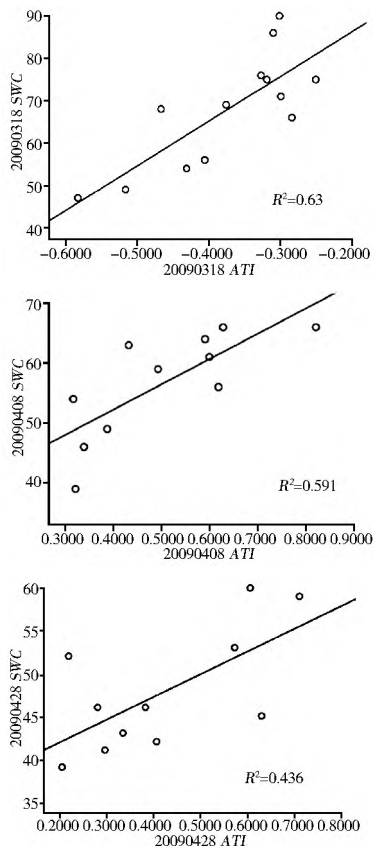


图 4 ATFSWC 散点图
Fig. 4 Scatter plot of ATFSWC

决定系数 R^2 值为 0.436~0.630, 换算成相关系数均超过了 0.66, 为中等以上程度的相关关系; 直线的斜率表明了土壤含水量对表观热惯量的响应程度, 斜率越大, 土壤含水量对表观热惯量的变化越敏感^[11]。由决定系数 R^2 可见: 2009 年 3 月 18 日的模型拟合程度最好, 2009 年 4 月 28 日的模型拟合程度相对最差。

为了判断研究区各时期的表观热惯量和土壤含水量之间是否存在真正的相互影响, 本文对回归方程进行拟合优度检验和显著性水平为 0.01 的 F 检验, 三个时期的 ATFSWC 模型及其检验结果见表 2。由表 2 中的显著性水平 (*sig*) 和 *F* 值可见: 2009 年 3 月 18 日和 2009 年 4 月 8 日的模型 *F* 值较大, 显著性水平均小于 0.01, 通过了 0.01 水平的 *F* 检验, 而 2009 年 4 月 28 日的模型 *F* 值最小, 显著性水平值为 0.027, 未通过 0.01 水平的 *F* 检验, 即 2009 年 4 月 28 日的 ATFSWC 模型不显著。因此, 利用热惯量法建立的表观热惯量-土壤含水量模型进行土壤含水量的评估, 对于 2009 年 3 月 18 日和 2009 年 4 月 8 日 10 cm 深度的土壤含水量是可行的, 而对于 2009 年 4 月 28 日是不可行的。

表 2 ATFSWC 回归模型

Table 2 Regression models of ATFSWC

日期	回归模型	R^2	<i>Sig</i>	<i>F</i>
2009-03-18	$SWC = 107.39 + 105.63ATI$	0.6303	0.001	18.754
2009-04-08	$SWC = 35.367 + 42.195ATI$	0.5914	0.006	13.029
2009-04-28	$SWC = 36.579 + 26.609ATI$	0.4364	0.027	6.969

4.2 模型精度影响因素分析

4.2.1 植被因素

土壤水分直接决定土壤的热特性(温度、昼夜温差和热惯量), 同时影响植被的生长状况, 因此, 地表植被情况和地表热特性是影响光学遥感反演土壤水分最重要的两个因素。为此引入归一化植被指数 (*NDVI*), 分析植被因素对模型精度的影响。*NDVI* 是反映绿色植物生长状况和分布的特征指数, 利用 MODIS 数据红色可见光通道和近红外通道的组合可获取 *NDVI*, 表达式为:

$$NDVI = (CH_2 - CH_1) / (CH_2 + CH_1) \quad (7)$$

式中, CH_1 、 CH_2 分别是红外波段和近红外波段的反射率。红外波段反射率采用波长为 0.62~0.67 μm 的 MODIS 第 1 通道数据, 近红外波段反射率采用波长为 0.84~0.87 μm 的第 2 通道数据^[12]。

对研究区各期植被指数按式(7)进行波段运算, 得到各期 *NDVI* 结果, 见图 5。吴黎等^[13]研究表明 *NDVI* 小于等于 0.35 的情况下表观热惯量与土壤含水量之间有明显的正相关关系。本文以 0.35 为界限进行分析, 结果表明: 随时间推移, 各期归一化植被指数大于 0.35 的面积呈递增趋势, 从关中盆地中心向四周扩展, 以 2009 年 4 月 28 日面积最大。为了对比同一位置植被指数对模拟结果的影响, 选取南北贯穿研究区中部、经度为 107°59' 的一条剖面线, 比较剖面线上各期植被指数变化(如图 6), 发现: 剖面线上同一位置各期 *NDVI* 随时间推移数值增大, 其中 2009 年 4 月 28 日剖面线 *NDVI* 值小于 0.35 的部分仅占 17.7%, 这与关中地区冬小麦及地表植被的生长状况相适应。以上分析表明: 表观热惯量-土壤含水量模型对植被覆盖度较低的裸地土壤含水量模

拟效果较好。

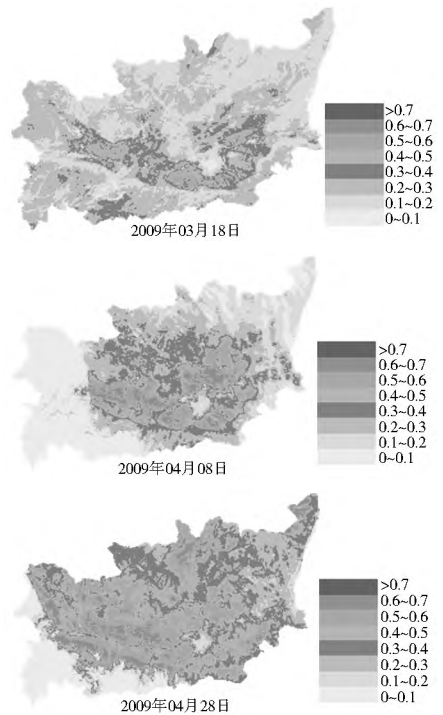


图 5 研究区各期植被指数分布

Fig. 5 *NDVI* distribution of each stage in the study area

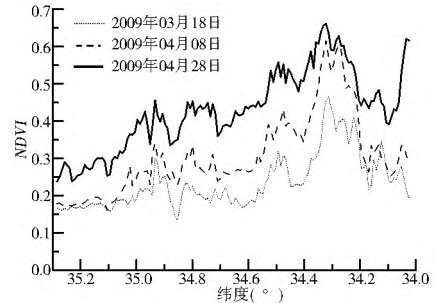


图 6 各期数据同一剖面线 *NDVI* 值

Fig. 6 *NDVI* value at the same section of each stage

4.2.2 地质地貌因素

关中盆地沿山前向盆地中心的剖面线上, 依次分布着山前冲洪积扇-黄土台塬-河流阶地等地貌类型。秦岭山前冲洪积扇主要堆积粗粒物质, 厚度较大; 北山山前洪积扇颗粒较细, 大部分被黄土覆盖, 黄土台塬具阶梯状台面, 微向河谷方向倾斜, 塬面上为微丘地貌^[14]。提取前述剖面线的高程和 2009 年 4 月 8 日土壤含水量数据, 分析关中地区土壤含水量的空间格局分布(如图 7), 发现如下情况。

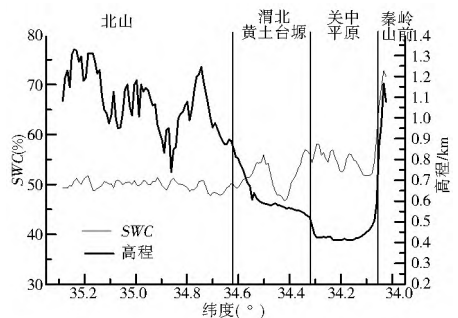


图 7 土壤含水量空间格局

Fig. 7 Spatial pattern of soil moisture

(1) 关中平原区土壤平均含水量较大。虽然 2009 年春季降水较少,但因渭河自西向东贯穿关中盆地,地下水埋深浅,所以土壤含水量大。(2) 秦岭山前和北山地区平均海拔为 1 100 m 左右,但含水量却相差很大。主要原因是:北山地区以基岩为主,地下水埋深较深,加之 2009 年春旱严重,地表植被较少(由图 6 可见其 $NDVI$ 值在 0.35 左右),所以土壤含水量低;秦岭山前冲洪积扇虽然地下水位埋深大,土质为堆积粗粒物质,但厚度较大,而且地表植被覆盖度较大(由图 6 可见其 $NDVI$ 值大于 0.4),所以土壤含水量高。(3) 渭北黄土台塬区平均高程约 700 m,地下水位埋深较关中平原稍大,土质为黄土覆盖, $NDVI$ 值介于平原与山地之间,土壤平均含水量居中,但因河流局部影响地下水埋深,所以土壤含水量变化较大。

由此可见,土壤含水量受地表土质、地貌的影响较大,在模型模拟过程中应综合考虑上述因素。

5 结论

(1) 本文基于 MODIS 数据提取昼夜地表温差和反照率,采用热惯量法对关中地区 2009 年春季三期数据建立了热惯量土壤含水量模型,其相关系数均超过了 0.66,其中 2009 年 3 月 18 日的模型拟合成度最好,2009 年 4 月 28 日的模型拟合程度相对最差,且模型未通过 0.01 水平的显著性检验。因此,在研究区建立的表观热惯量土壤含水量模型不能应用于 2009 年 4 月 28 日。

(2) 2009 年 4 月 28 日植被指数大于 0.3 的面积最大,小于 0.3 的部分仅占 17.7%。这与关中地区冬小麦及地表植被的生长状况相适应,而表观热惯量-土壤含水量模型对植被覆盖度较低($NDVI < 0.3$)的裸地土壤含水量模拟效果比较好。

(3) 受地下水埋深、植被覆盖程度、地表土质、地貌条件等因素影响,关中平原区土壤平均含水量较大,其中秦岭山前冲洪积扇的土壤含水量高,而北山地区含水量低,渭北黄土台塬区土壤含水量变化较大。因此,在模型模拟过程中应综合考虑上述因素。

参考文献(References):

- [1] Gert A S, Edwin T E (韩敏译). 水文与水管理中的遥感技术 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2006: 187-188. (Gert A S, Edwin T E. Remote Sensing in Hydrology and Water Management [M]. HAN Min, Translation. Beijing: China Water Power Press, 2006: 187-188. (in Chinese))
- [2] 李慧, 王鹏新. 基于 Terra MODIS 和 NOAA-AVHRR 数据的条件植被温度指数干旱监测及其对比分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 61-66. ((LI Hui, WANG Pengxin. Comparison Study on VTCI Drought Monitoring Results Using Terra MODIS and NOAA-AVHRR Data [J]. Journal of Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 61-66. (in Chinese))
- [3] 张树誉, 杜继稳, 景毅刚, 等. 基于 MODIS 资料的遥感干旱监测业务化方法研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 1-6. ((ZHANG Shuyu, DU Jiwen, JING Yigang, et al. A Study on Routine Operation Remote Sensing Drought Monitoring Model Using MODIS Data [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 1-6. (in Chinese))
- [4] 李琴, 陈曦, Frank Veroustraete, 等. 干旱半干旱区土壤含水量反演与验证 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 201-207. ((LI Qin, CHEN Xi, Frank Veroustraete, et al. Validation of Soil Moisture Retrieval in Arid and Semiarid Areas [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 201-207. (in Chinese))
- [5] 魏伟, 任皓晨, 赵军, 等. 基于 MODIS 的 ATI 和 TVI 组合法反演石羊河流域土壤含水量 [J]. 国土资源遥感, 2011, (2): 104-109. ((WEI Wei, REN Haoshen, ZHAO Jun, et al. Retrieving Soil Moisture of Shiyang River Basin by ATI and TVI Based on EOS/MODIS Data [J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2011, (2): 104-109. (in Chinese))
- [6] 邓辉. 基于 MODIS 数据的大区域土壤水分遥感监测研究 [D]. 中国农业科学研究院, 2004. ((DENG Hui. Study on Monitoring Soil Moisture of Large Region with MODIS Data [D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2004. (in Chinese))
- [7] Price J C. Thermal Inertia Mapping: A New View of the Earth [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82: 2582-2590.
- [8] 覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法—以 MODIS 数据为例 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 64-71. ((QIN Zhihao, GAO Maofang, QIN Xiaomin, et al. Methodology to Retrieve Land Surface Temperature from MODIS Data for Agricultural Drought Monitoring in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(4): 64-71. (in Chinese))
- [9] 王利民, 刘佳, 邓辉, 等. 黄淮海地区旱情遥感监测实践 [J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(4): 73-78. ((WANG Limin, LIU Jia, DENG Hui, et al. Practice of Regional Drought Inspection by Remote Sensing System in Huang-Huai-Hai Region [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(4): 73-78. (in Chinese))
- [10] 陈瑜. 将 MODIS 遥感数据应用于墒情信息提取的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006. (CHEN Yu. Study on the MODIS Remote Sensing Data Applied to the Soil Moisture Extraction [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese))
- [11] 李培月, 吴健华, 钱会. 样本统计量对水质评价中熵权计算的影响 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 68-74. ((LI Peiyue, WU Jianhua, QIAN Hui. Impacts of Sampling Statistics on Entropy Weight in Water Quality Assessment [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 68-74. (in Chinese))
- [12] 张树誉, 李登科, 颜胜安, 等. MODIS 植被指数在关中农作物长势监测评估中的应用 [J]. 陕西农业科学, 2006, (4): 71-83. ((ZHANG Shuyu, LI Dengke, YAN Sheng'an, et al. Effect of MODIS Vegetation Index in Detection and Evaluation of Crops in Guanzhong Shaanxi [J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2006, (4): 71-83. (in Chinese))
- [13] 吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 改进的表观热惯量法反演土壤含水量 [J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 44-49. ((WU Li, ZHANG Youzhi, XIE Weihuan, et al. The Inversion of Soil Water Content by the Improved Apparent Thermal Inertia [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 44-49. (in Chinese))
- [14] 段磊, 王文科, 王雁林, 等. 关中盆地地下水资源评价与解析 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 172-181. ((DUAN Lei, WANG Wenke, WANG Yailin, et al. Evaluation and Analysis of Groundwater Resources in Guanzhong Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(5): 172-181. (in Chinese))