

基于混合象元分解的Landsat8与MODIS数据 融合反演土壤墒情方法研究

巩文军¹, 郭乙霏², 王文婷³, 恒卫东^{4*}

(1.焦作市广利灌区管理局, 河南 焦作 454550; 2.东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
3.焦作市水利勘测设计院, 河南 焦作 454003; 4.郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要:【目的】及时准确地获取灌区土壤墒情信息。【方法】以河南省焦作市广利灌区为研究对象, 利用Landsat8及MODIS遥感数据分别以表观热惯量及植被供水指数法反演土壤墒情, 以混合象元分解的植被和土壤的丰度作为权重因子, 对2种方法反演的土壤墒情进行了融合计算。【结果】利用植被供水指数法和表观热惯量反演的土壤含水率与实测含水率相关系数分别为0.47和0.51, 同时将2种方法相结合得到的反演结果精度更高, 实测含水率与计算的土壤含水率相关系数达到0.73。【结论】融合方法可以更好地计算灌区非均匀覆盖区的土壤墒情。

关键词:遥感数据; 表观热惯量; 植被供水指数; 混合像元分解; 土壤墒情反演

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20190010

巩文军, 郭乙霏, 王文婷, 等. 基于混合象元分解的Landsat8与MODIS数据融合反演土壤墒情方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 123-128.

0 引言

土壤墒情是灌区农情监测的重要指标, 及时准确地获取土壤墒情空间分布信息, 对于实现因地制宜、适量适时的灌溉, 提高灌区的用水效率具有重要现实意义。传统的灌区土壤墒情监测方法是建立监测站点, 对土壤墒情进行测量, 并以测点的监测数据代表区域的土壤墒情信息, 但由于测点稀少, 并且测量数据的时间较长, 费时费力, 不能反映土壤水分在空间的分布状况, 因此, 无法满足快速、大面积的土壤墒情监测要求。遥感技术具有实时、大范围、成本低等优点, 可以快速对大范围土壤墒情进行监测, 有效克服传统监测方法费时、费力且不能反映土壤墒情在时间和空间变化的不足, 是目前土壤墒情监测的新途径^[1-3]。

应用可见光-热红外遥感技术对土壤墒情进行监测, 国内外已有许多方法, 大都是利用各种墒情指示参数建立反演模型, 通过反演结果与实测数据建立拟合方程来定量的进行预测, 目前常用的方法有3种。一种方法是利用土壤的热特性^[4], 如利用地表温度对土壤墒情进行反演, 该方法对于裸土区域反演的土壤墒情精度较高, 随着植被覆盖度的增加, 该法的计算精度随之降低。Carlson等^[5]较早利用遥感资料, 采用热惯量法对大面积作物土壤水分状况的监测进行了尝试。张仁华等^[6]在热惯量模式基础上, 提出了一个适用于裸地的、克服显热的、潜热输送干扰的热惯量改进模式, 提高了表观热惯量估算土壤墒情的精度。覃志豪等^[7]利用辐射传导方程式, 推导出适合TM数据反演地表温度法的单窗算法, 得到广泛使用。吴黎等^[8]提出了一种改良的表观热惯量模型, 并将其与MODIS数据结合, 用来验证大范围监测土壤墒情的实用性和可行性。另一种方法是利用植被指数与土壤墒情建立关系模型, 该方法对于植被覆盖区域反演的土壤墒情精度较高, 随着植被覆盖的减少, 方法的计算结果随之降低。于君名等^[9]通过分析短波角斜率指数与土壤湿度之间关系, 考虑特征空间的斜率和截距提出了一种修正的短波角度斜率指数(MSASI), 构建了MSASI与土壤湿度之

收稿日期: 2018-11-12

基金项目: 河南省科技攻关项目(182102210017); 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金项目(AMF201807);
河南省高等学校重点科研项目(16A420005)

作者简介: 巩文军(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事灌区建设与管理。E-mail: 13598520765@163.com

通信作者: 恒卫东(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感技术应用。E-mail: 2627399727@qq.com

间的关系模型。刘小磊等^[10]利用MODIS数据分析比较了NDWI与NDVI距平值在较短时间内对旱情监测的准确性,结果表明,NDWI比NDVI对植被冠层水分的反映更灵敏,归一化植被水分指数能较准确地表现旱情在时间和空间上的变化。第三种方法是地表温度与植被指数结合反演土壤墒情方法^[11]。Carlson等^[12]根据干旱时作物生长受到土壤水分的影响,NDVI降低,植被冠层温度则会升高的现象,利用其比值提出了植被供水指数来反映干旱与土壤墒情状况。武晋雯等^[13]则基于不同的植被覆盖类型分别采用热惯量遥感干旱监测模型、能量指数模型、植被供水指数模型进行土壤水分的反演。

兹采用Landsat8和MODIS数据,分别利用表观热惯量法和植被供水指数法进行土壤墒情反演,表观热惯量法能够较好地反演裸土或低植被覆盖区土壤墒情,植被供水指数法能够较好的反演高覆盖作物的土壤墒情,因此将二者有效融合能够更加准确地反演不同生长期作物的土壤墒情。研究基于完全约束的最小二乘法模型进行混合象元的分解,计算农作物及裸土丰度信息,然后将丰度结果作为权重,融合2种土壤墒情反演方法,从而弥补单一遥感数据源和单一模型在土壤墒情监测中的不足,提高灌区农作物非均匀覆盖情况下的土壤墒情反演精度。

1 研究区概况及数据预处理

1.1 广利灌区概况

焦作市广利灌区位于北纬34°55′—35°11′与东经112°37′—113°13′之间,范围涉及济源、沁县、武涉、温县四县,属于温带大陆性气候,多年平均气温14.5℃,年平均降水593.5mm,灌区设计灌溉面积34000hm²。灌区气候温和,盛产玉米、小麦及怀山药等经济作物。研究区概况图如图1所示。

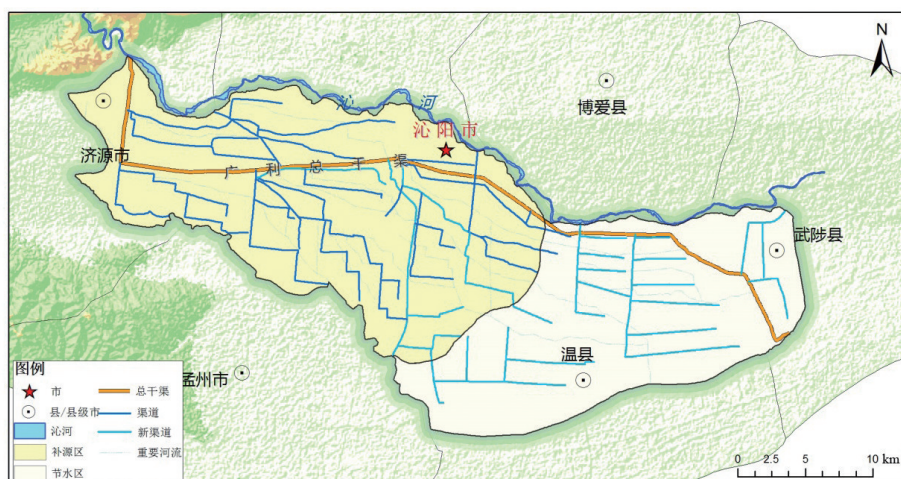


图1 焦作市广利灌区概况图

1.2 数据介绍与预处理

MODIS是搭载在2个卫星上的主要探测仪器,包括36个光谱波段,选用2017年7月15日的MODISL1B数据,预处理包括MODISL1B数据的辐射校正、bow-tie去除、几何校正,Landsat8多光谱辐射定标和大气校正,热红外10波段的辐射定标等。Landsat-8卫星数据是目前陆地资源卫星中应用最广的数据之一,相对于其他Landsat系列,增加了2个短波红外波段,可用于热强度测定分析,探测地表物质自身热辐射。2个波段配合能够对大气削弱进行纠正,将地表温度从大气温度中分离出来。Landsat8遥感数据共有12个波段,其中可见光和近红外波段的分辨率为30m,2个短波红外波段分辨率为100m。

2 基于混合像元分解的土壤墒情反演方法

2.1 植被供水指数法

在植被生长旺盛区域,遥感影像主要反映植被信息,该方法通过植被的遥感信息间接反映土壤墒情。植被供水指数法既考虑了土壤水分的多少对作物生长状态的影响,又考虑了土壤水分对植被冠层温度的影响,从植被指数与植被冠层温度2个因素来反映土壤墒情,计算式为:

$$VSWI = T_s / NDVI, \quad (1)$$

式中: T_s 为地表温度; $NDVI$ 为归一化植被指数。 $NDVI$ 由Landsat8数据的近红外波段与红光波段计算得到,

NDVI的范围在(-1,1)之间,计算式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R), \quad (2)$$

式中: ρ_R 为红波段反射率; ρ_{NIR} 为近红波段的反射率。

胡德勇等^[14]提出了 TIRS10_SC 算法,该算法将辐射方程式与覃志豪等^[7]提出的适合于 TM 数据的单窗算法相结合,利用 Landsat8 数据第 10 波段反演温度,计算式为:

$$T_s = [K_2(\sigma_1 + \sigma_2)T_{10} + (1 - \sigma_1 - \sigma_2)T_{10}^2 - K_2\sigma_2T_a] / (K_2\sigma_1), \quad (3)$$

式中: T_{10} 为第 10 波段的亮温; $K_2 = 1\,321.082\,1\,K$; $K_1 = 774.89\,W/(m^2 \cdot m \cdot sr)$, T_a 为大气平均作用温度(K),根据影像的获取时间和研究区经纬度,采用中纬度夏季的大气平均作用温度估算方程进行 T_a 的计算,估算方程计算式为:

$$T_a = 16.010 + 0.926\,21T_0, \quad (4)$$

式中: T_0 为地面 2 m 左右的气温($^{\circ}C$),根据实测数据反演得到地表温度,如图 2 所示。

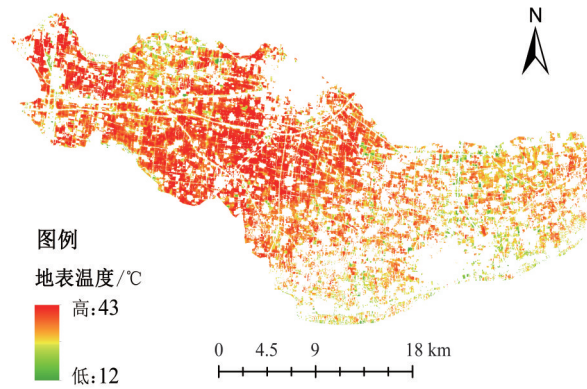


图2 Landsat8 数据反演地表温度图

2.2 表观热惯量法

在裸土和低植被覆盖区表观热惯量法是反演土壤墒情的主要方法,表观热惯量^[4]计算式为:

$$ATI = (1 - A) / (T_d - T_n), \quad (5)$$

式中: A 为全波段反照率数据; T_d 为反演的白天最高温度; T_n 为晚上最低温度。

全波段反照率数据是表观热惯量模型的一个基本参数,表示地面总反射率的物理量,计算式^[15]为:

$$A = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_6 - 0.0015, \quad (6)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_7$ 表示 MODIS 中 1-7 波段的反射率。地表温度的计算采用 Sobrino 等^[16]提出的方法,计算式为:

$$T = T_{31} + a_1 + a_2(T_{31} - T_{32}) + a_3(T_{31} - T_{32})^2 + (a_4 + a_5W)(1 - \varepsilon) + (a_6 + a_7W)\Delta\varepsilon, \quad (7)$$

式中: T_{31} 、 T_{32} 为 MODIS 数据 31、32 波段的亮温; $a_1 \sim a_7$ 为常数分别取值为 1.02、1.79、1.20、34.83、-0.68、-73.27、-5.19。 W 为大气含水率。 ε 为 31 和 32 波段的有效比辐射率, $\Delta\varepsilon$ 为 31、32 波段的地表比辐射率的差值。根据式(7)反演得到白天和晚上地表温度分布如图 3、图 4 所示。

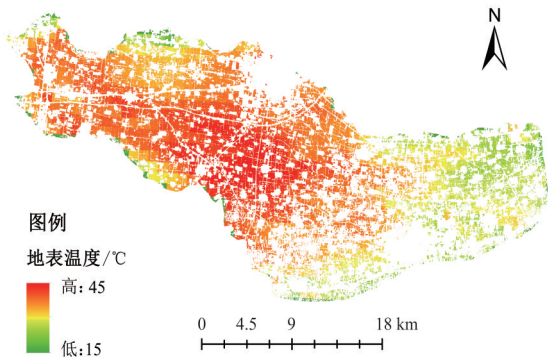


图3 MODIS 数据反演白天温度

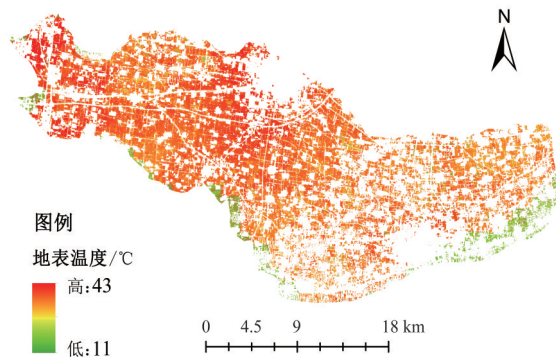


图4 MODIS 数据反演夜晚温度

2.3 基于混合象元分解的土壤墒情反演

在线性光谱模型中,假设光线在像元端元间是独立的,像元光谱被看成像元内不同端元的光谱值(波段反射率或辐射值)与其面积比的线性组合,其计算式^[17]为:

$$L_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} R_{k\lambda} + \varepsilon_{ki}, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad f_{ki} \geq 0, \quad (9)$$

式中: $L_{i\lambda}$ 为像元 i 在波段 λ 的反射率; f_{ki} 为像元 i 端元 k 的面积百分比; $R_{k\lambda}$ 为端元 k 在波段 λ 处的反射率,采用纯净像元指数法进行计算; ε_{ki} 为波段 λ 中像元 i 对应的残差; n 为影像中的端元数。

由于表观热惯量法和植被供水指数法有各自适用的范围,单个方法的使用不能计算不同地表覆盖情况下的土壤墒情。兹利用混合象元分解的土壤和作物丰度信息作为权重,融合2种方法反演土壤墒情,计算式为:

$$S = f_{\text{soil}} S_{\text{ati}} + f_{\text{veg}} S_{\text{vswi}}, \quad (10)$$

式中: S_{ati} 为表观热惯量反演得到的土壤墒情(土壤质量含水率,%), S_{vswi} 为植被供水指数反演的土壤墒情(土壤质量含水率,%), f_{soil} 及 f_{veg} 分别表示裸土和作物覆盖度,由式(8)和式(9)采用完全约束最小二乘法求解得到。

3 结果与分析

根据式(1)一式(7)计算植被供水指数及表观热惯量,利用2017年7月15日的灌区实测土壤墒情数据(土壤质量含水率),分别采用直线、对数、指数3种模型与实测土壤墒情建立二维空间关系,选择最优的模型,图5为植被供水指数最适宜的拟合模型,图6为表观热惯量最适宜的拟合模型,计算结果如表1所示。从表1得出,植被供水指数法采用线性拟合相关系数最高,表观热惯量法采用对数拟合相关系数最高。利用最佳拟合关系计算研究区土壤墒情,计算结果如图7(a)和7(b)所示。由图7可知,植被供水指数法反演的土壤墒情在0.20~0.40之间,主要集中在0.24~0.36之间;表观热惯量法计算的土壤墒情,主要集中在0.24~0.32之间。

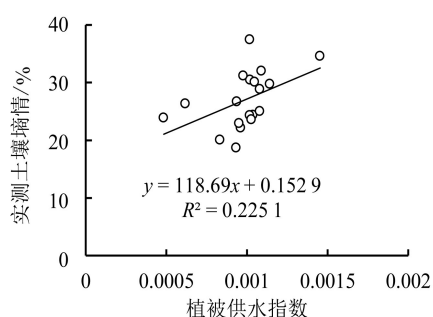


图5 植被供水指数最适宜的拟合模型

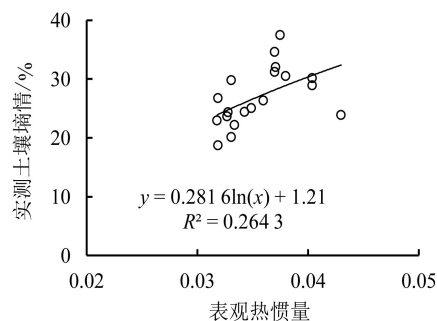


图6 表观热惯量最适宜的拟合模型

表1 植被供水指数模型对土壤墒情的拟合结果

方法	拟合模型	拟合方程	R^2
植被供水指数法	线性拟合	$y = 118.69x + 0.1529$	0.23
	对数拟合	$y = 0.0886 \ln(x) + 0.8852$	0.17
	指数拟合	$y = 0.1742e^{428.06x}$	0.21
表观热惯量法	线性拟合	$y = 7.3733x + 0.0072$	0.24
	对数拟合	$y = 0.2816 \ln(x) + 1.21$	0.26
	指数拟合	$y = 0.0975e^{28.128x}$	0.25
混合像元分解融合	线性拟合	$y = 0.237x + 0.2062$	0.54
	对数拟合	$y = 0.0641 \ln(x) + 0.3551$	0.52
	指数拟合	$y = 0.2133e^{0.8691x}$	0.52

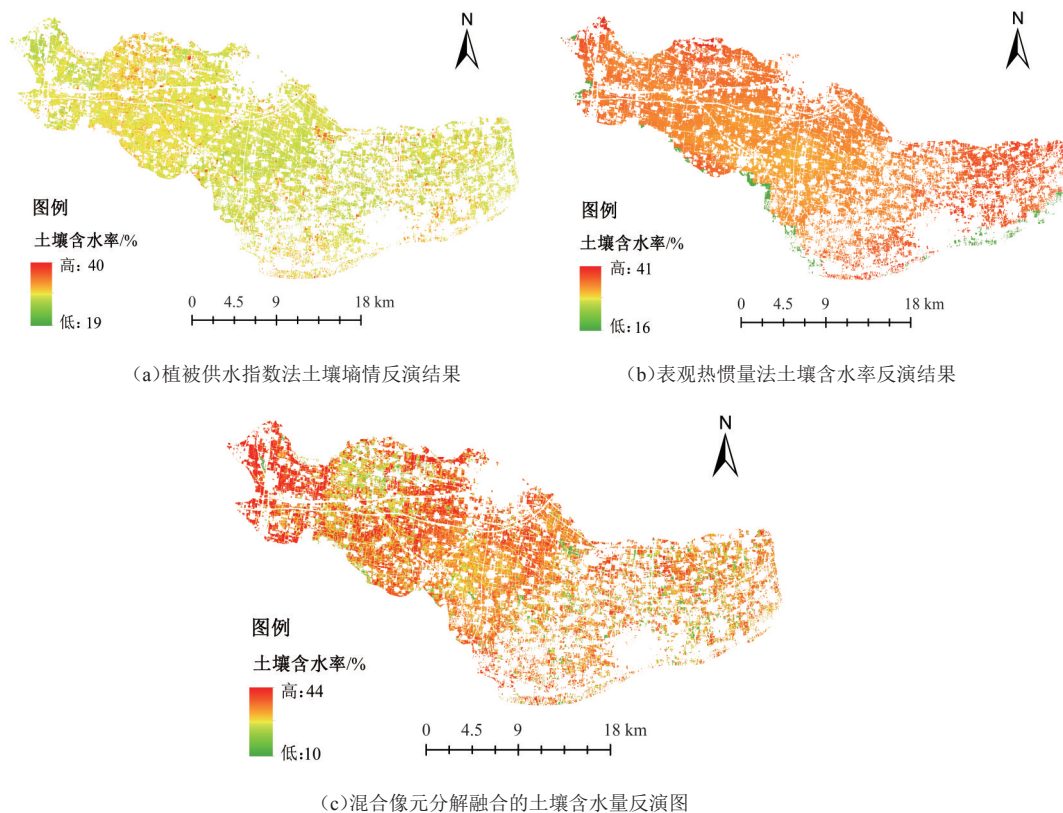


图7 不同方法反演土壤墒情对比结果

由上述分析可知,表观热惯量法适合裸土和低植被覆盖区域的土壤墒情反演,植被供水指数法适合植被覆盖度较高的地区,单个方法的应用反演土壤墒情的精度较低,利用式(10)将表观热惯量与植被供水指数反演的土壤墒情进行融合,计算研究区土壤墒情分布图,结果如图7(c)所示。由拟合结果图8可知,基于混合象元分解得到的土壤墒情反演结果,拟合度相关系数(R)达到0.73,与图5和图6相比较,计算精度明显提高。

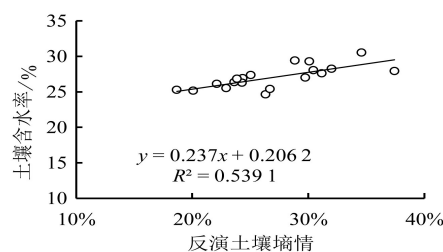


图8 反演结果精度检验图

4 讨论

广利灌区气候温和,盛产玉米、小麦等作物,是集灌溉,补源、排涝三位一体的大型灌区,也是河南灌区的典型代表。以广利灌区为例,利用植被供水指数法和表观热惯量法对灌区的土壤墒情进行了研究,并利用2017年7月1日的Landsat8数据采用植被供水指数法进行土壤墒情反演,同时期的MODIS数据采用表观热惯量方法进行反演。以混合象元分解的植被和土壤的丰度作为权重,将2种方法的计算结果相结合,对反演的精度进行提高。与单个方法的反演结果进行对比分析,利用植被供水指数法和表观热惯量反演的土壤含水率与实测含水率相关系数分别为0.47和0.51,同时将2种方法相结合得到的反演结果精度更高,实测含水率与计算的土壤含水率决定系数达到0.5391,可以更好地反映土壤的水分信息。土壤墒情反演一直是遥感技术研究的重点,现如今已经有了很多的理论和方法,前人分别从地表类型、数据源等进行分类,研究出很多方法,也尝试将不同方法结合在一起进行分析,但是如何提高土壤反演的精度仍是主要的问题,为了提高精度,更好地监测土壤墒情,仍然需要进行深入探索,建议从以下2个方面进行研究:一是利用多种遥感数据,并采取多种方法的结合进行反演研究;二是更多的结合实测气象资料和地表数据,并对多种数据进行拟合分析,以削弱遥感反演过程中的仪器误差、模型误差等。

5 结论

1)利用MODIS数据对表观热惯量法进行研究,用劈窗算法计算地表温度,得到昼夜温差,根据前7波段的反射率信息计算反照度,然后利用这2个参数进行土壤墒情反演,并对反演结果进行分析,发现其在NDVI

较低地区的反演效果较好,在 $NDVI$ 较高的地区反演效果不理想。2)对 Landsat8 数据采用植被供水指数法进行土壤墒情的反演,主要包括归一化植被指数的计算和基于单窗算法的地表温度反演,以及大气水分含量和大气透射率的计算。该方法在 $NDVI$ 较高的地区反演效果较好,在 $NDVI$ 较低的地方结果不理想。3)植被供水指数法适合高植被覆盖区域,表观热惯量法适合裸土区域,采用混合象元分解的方法,获得植被和土壤的丰度信息,2种方法分别与适合的地表类型丰度信息融合,对土壤墒情进行计算,明显提高了土壤墒情反演的精度。

参考文献:

- [1] MA C, LI X, NOTARNICOLA C, et al. Uncertainty Quantification of Soil Moisture Estimations Based on a Bayesian Probabilistic Inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2017(99):1-14.
- [2] MCCOLL K A, ALEMOHAMMAD S H, AKBAR R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(2):100-104.
- [3] 唐海弢, 陈天华, 郑文刚. 土壤墒情监测预报技术研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2):140-142.
- [4] 杨王永, 徐秀杰, 杨丽萍. 墒情遥感监测中热惯量模型的修正[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6):54-59.
- [5] CARLSON N. Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements[J]. Remote Sensing Reviews, 1986, 1(2): 197-247.
- [6] 张仁华. 对于定量热红外遥感的一些思考[J]. 国土资源遥感, 1999(1):1-6.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 于君明, 周艺, 王世新, 等. 基于修正角度斜率指数的土壤水分遥感监测方法[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 43-47.
- [10] 刘小磊, 覃志豪. NDWI 与 NDVI 指数在区域干旱监测中的比较分析:以 2003 年江西夏季干旱为例[J]. 遥感技术与应用, 2007(5): 608-612.
- [11] 马春芽, 王景雷, 陈震, 等. 基于温度植被干旱指数的土壤水分空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3):28-34.
- [12] CARLSON N, ROBERT R. GILLIES, EILEEN M. PERRY. A method to make use of thermal infrared temperature and ndvi measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [13] 武晋雯, 孙龙戔, 张玉书, 等. 不同植被覆盖下土壤水分遥感监测方法的比较研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(23):303-307.
- [14] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6):964-976.
- [15] 赵立军. 基于 MODIS 数据的北京地区土壤含水量遥感信息模型研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
- [16] SOBRINO J, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to morocco[J]. International Journal Remote Sensing, 2000, 21(2): 353-366.
- [17] 李华丽. 高光谱遥感影像自动混合像元分解研究[D]. 武汉:武汉大学, 2012.

Retrieving Soil Moisture Using Spectral Mixture Analysis of Landsat8 and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

GONG Wenjun¹, GUO Yifei², WANG Wenting³, HENG Weidong^{4*}

(1. Guangli Irrigation District Administration Bureau of Jiaozuo, Henan Province, Jiaozuo 454550, China;

2. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. Jiaozuo Water Conservancy Survey and Design Institute, Jiaozuo 454003, China;

4. School of Water Conservancy & Environmental, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 Soil moisture plays a critical role in many hydrological and ecological processes and understanding its spatiotemporal changes is imperative to ecosystem management and irrigation design. This paper presents and tests a method to estimate soil moisture distribution using satellite technologies. 【Method】 We took Guangli Irrigation District at Jiaozuo in Henan Province as our study area. The Landsat-8 and MODIS imageries from the area were used to retrieve soil moisture with the apparent thermal inertia and vegetation water supply index, respectively. Using the abundance of vegetation and soil moisture decomposed by the spectral mixture analysis as weighting factors, we retrieved the soil moisture distribution in the area using the two methods. 【Result】 The correlation coefficient between the measured soil moisture and the retrieved using the vegetation water supply index method and the apparent thermal inertia method was 0.47 and 0.51 respectively. We found that combining the two methods could improve the correlation coefficient between the measured and retrieved soil moisture to 0.73. 【Conclusion】 Our results showed that the proposed method is reliable and can adequately estimate soil moisture in irrigation district grown with a diverse of crops.

Key words: remote sensing; apparent thermal inertia; vegetation water supply index; mixed pixel decomposition; soil moisture

责任编辑:陆红飞