

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.041

基于CERES - Wheat 和遥感数据的土壤水分供给量反演*

王 维^{1,2} 王鹏新^{1,2} 解 毅^{1,2} 李 俐^{1,2} 刘峻明^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以关中平原为研究区域, 以冬小麦为研究对象, 基于2007—2008年TM遥感数据反演的和CERES - Wheat模型模拟的生物量和叶面积指数, 将由离散积分思想计算的日均分摊系数和由冬小麦各生育阶段生长特点划分的分段蒸腾系数引入土壤水分平衡方程, 建立土壤水分供给量反演模型。利用该模型进行研究区域2007—2008年冬小麦全生育期的蒸散量和土壤水分供给量的单点和区域尺度的定量反演。选取拥有多时相遥感数据的2000—2001年进行模型验证, 结果表明, 在充分获取降水、灌溉信息和多时相遥感数据的条件下, 土壤水分供给量的反演结果准确度较高。区域尺度的土壤水分供给量呈现出西高东低和北高南低的分布特征, 自西北部向东南部逐渐递减, 与关中平原冬小麦受水分胁迫程度的区域性变化趋势基本一致, 表明应用模型反演冬小麦全生育期的土壤水分供给量是可行的。

关键词: 冬小麦 CERES - Wheat 模型 遥感数据 土壤水分供给量 生物量 叶面积指数

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0282-07

Retrieval of Soil Moisture Supplement Based on CERES - Wheat Model and Remote Sensing Data

Wang Wei^{1,2} Wang Pengxin^{1,2} Xie Yi^{1,2} Li Li^{1,2} Liu Junming^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: The objective of this study is to build soil water supplement model. The characteristic of the model is the couple of the daily average transpiration coefficient and the subsection ratio of leaf transpiration and soil evaporation, while the coefficient and the ratio are often assigned to constant values during crop growth and development period in past studies. The model is used to quantitatively calculate the amount of evapotranspiration and soil water supplement during the whole growth period of winter wheat of Guanzhong Plain during 2007—2008 by using the remotely sensed and dynamically simulated LAI and biomass. The point-based verification show that the results are accuracy when fully access to the information of rainfall and irrigation conditions. According to the spatial distribution of the soil water supplement, the soil water supplement in the whole growth period of winter wheat gradually decrease from the northwest to the southeast in Guanzhong Plain, which is roughly consistent with the variation trend of the water stress level in study area. In addition, the soil water supplement calculated by model in 2000—2001 reveal the possibility to obtain a more accurate result if we can get more high quality remotely sensed data, especially which are during the main growth period of winter wheat. All the results confirm that the feasibility of using this model to retrieve the soil water supplement throughout the growth period of winter wheat.

Key words: Winter wheat CERES - Wheat model Remote sensing data Soil water supplement Biomass Leaf area index

收稿日期: 2015-03-12 修回日期: 2015-04-16

* 国家自然科学基金资助项目(41371390, 41071235)

作者简介: 王维, 博士生, 主要从事作物水分胁迫因子同化方法研究, E-mail: wangwei1987wwf@163.com

通讯作者: 王鹏新, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

引言

作物在整个生长周期中始终存在着与其生长环境之间的物质和能量交换,这种交换主要通过光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等过程实现。土壤水分是土壤-作物-大气连续体的一个重要因子^[1],也是实现作物一系列生理过程的主要媒介,它的变化影响着作物蒸腾、光合作用和生物量的累积^[2-5]。由于作物对水分胁迫的生态反应具有整体性,在水分胁迫下,作物各器官的生长发育都受到限制,各器官的生物量随土壤水分胁迫的加重而降低^[6-8]。以往研究土壤水分如何胁迫作物生长时,常利用土壤水分与作物生物量、叶面积指数(Leaf area index, LAI)和植被指数的紧密联系,建立半经验半理论、半宏观半微观的土壤水分动力模型来解释有关现象。根据模型包括的因变量的数量,可以分为单变量模型^[9]、两变量模型^[10-11]、三变量模型^[12]和五变量模型^[13],包含降水量、土壤蒸发量和作物蒸腾量等直接变量。少数模型将作物生物量、LAI 和植被指数等当作间接变量,但由于这些参数较难通过野外试验直接测定和获取,因此鲜见将其直接代入向前模式的运算中。

定量遥感具有反演植被指数、生物量、LAI 等参数的优势^[14-16], CERES - Wheat 模型对生物量和 LAI 的动态变化的模拟加强了反演过程的机理性^[17-18],因此,充分利用遥感定量反演和 CERES - Wheat 模型模拟的参数进行土壤水分的反演具有重要的研究意义^[19-20],可进一步为作物全生育期的干旱监测提供决策依据。

本文在研究土壤水分与冬小麦生物量、LAI 的相关关系的基础上,建立包含降水量、蒸散量和生物量等直接变量的土壤水分供给量反演模型,并通过引入日均分摊系数和分段蒸腾系数反演关中平原 2007—2008 年各试验样点和区域尺度面上的全生育期的土壤水分供给量。

1 模型与方法

1.1 冬小麦的生物量和 LAI

冬小麦生育期内某一生长阶段冬小麦地上部分生物量的日均增长率可表示为

$$r = \frac{b_s - b_{s-1}}{t_e - t_{s-1}} \quad (1)$$

式中 r ——冬小麦地上部分单位面积生物量的日均增长率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

b_s 、 b_e ——相应时间的地上部分单位面积生物量, kg

t_s 、 t_e ——生长阶段的起始、截止时间, d

此外,若无特殊说明,本文中其他各处生物量指标均指单位面积(1 m^2)的生物量。

1.2 蒸腾系数

由于冬小麦的蒸腾量可以通过蒸腾系数与生物量相关联,因此,冬小麦的日蒸腾量可通过生物量的日增长率和蒸腾系数计算得到

$$W_c = \gamma_c r \rho^{-1} \quad (2)$$

式中 W_c ——冬小麦生育期内单位面积的日蒸腾量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

ρ ——水密度, kg/m^3

γ_c ——冬小麦的蒸腾系数,即每生成 1 g 干物质所蒸腾消耗的水分克数,无量纲

1.3 日均分摊系数

冬小麦全生育期的蒸散量由冬小麦自身的蒸腾耗水和棵间浅层土壤的蒸发耗水组成,即

$$ET = E_{act} + W_c \quad (3)$$

式中 ET ——单位面积上冬小麦全生育期内的日蒸散量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

E_{act} ——单位面积上的土壤水分日蒸发量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

分摊系数 α 被定义为作物蒸腾量与棵间蒸发量之比,即

$$\alpha = \frac{W_c}{E_{act}} \quad (4)$$

康绍忠等^[21]提出的分摊系数计算方法为

$$\alpha = \frac{W_c}{E_{act}} = e^{K(1.0 + A) \sin \frac{t_d - 13}{12} \pi} V_{LAI} - 1 \quad (5)$$

($t_d = 7, 8, \dots, 19$)

式中 K 、 A ——与作物类型相关的经验系数,分别取 0.397 3、0.103 64

t_d ——1 d 中用于计算分摊系数的时间, h

V_{LAI} ——冬小麦叶面积指数,无量纲

由式(5)计算得到的分摊系数在一天中的正午时刻相对最小,而在早晚时刻相对较大,若将某一时刻的分摊系数直接代入土壤水分动力模型进行计算则会产生一定误差,并且随着模型向前运行而不断累积。因此,本文应用以小时为步长的离散积分方法计算每日 07:00—19:00 的日均分摊系数,再代入模型进行计算。

1.4 土壤水分动力模型

关中平原作物种植结构较为单一,在冬小麦生育期地表覆盖以冬小麦为主,加之冬小麦生育期的降水量和降水强度均较小,且麦田地势平坦,大部分地区很难形成径流排水。因此,可以认为单位面积上浅层土壤的日径流量和除冬小麦外的其他植物的

日耗水量均为零。而由于本次研究所考虑的土壤深度为2 m,这一深度的土壤下垫面的水分交换极不活跃,因此忽略土壤水分渗漏等因素。由此得到的土壤水分平衡方程为

$$\frac{dy}{dt} = p + W_{irr} - W_c - E_{act} \quad (6)$$

式中 y ——单位面积浅层(一般认为是为冬小麦生长供水的土壤深度,2 m)土壤含水量, m^3/m^2

$\frac{dy}{dt}$ ——单位面积土壤水分日变化量, $m^3/(m^2 \cdot d)$

t ——时间, d

p ——单位面积日降水量, $m^3/(m^2 \cdot d)$

W_{irr} ——单位面积日灌溉量, $m^3/(m^2 \cdot d)$

当 $\frac{dy}{dt} \geq 0$ 时,表明外部水分供给量大于冬小麦生长过程中的耗水总量 ($W_c + E_{act}$),即外部对土壤水分的补充较为及时,土壤水分存储较为充足,冬小麦生长过程中受水分胁迫的程度较轻甚至不会受到胁迫。但当 $\frac{dy}{dt} < 0$ 时,表明冬小麦生长过程中的耗水总量大于这一时间段内的外部水分供给量,即理论上土壤水分存储量存在下降的趋势,冬小麦生长过程中受水分胁迫的程度可能加重;如果 $\frac{dy}{dt}$ 出现较大负值,则预示将可能出现严重缺水 and 干旱。

将式(2)、(4)代入式(6)得到

$$\frac{dy}{dt} = p + W_{irr} - \gamma_c \frac{1 + \alpha_r}{\alpha} \quad (7)$$

对土壤水分日变化量 $\frac{dy}{dt}$ 进行积分获取冬小麦全生育期的土壤水分变化量,即单位面积土壤向冬小麦直接供给的水分总量。

2 生物量与 LAI 的动态模拟与遥感反演

2.1 试验样点及数据预处理

2.1.1 试验样点与实测数据

采用2007—2011年关中平原冬小麦种植区内拥有野外实测数据的14个典型试验样点的土地利用、田间管理、冬小麦种类、施肥和灌溉等数据标定 CERES—Wheat 作物生长模型。并选取其中6个多年常设观测样点(扶风县城北、眉县常兴镇、临渭区蔺店镇、三原县新兴镇、蒲城县孙镇、蒲城县城北)实地测量的2007—2008年冬小麦生育期起止时刻的土壤剖面水分含量数据进行土壤水分反演结果验证。

2.1.2 遥感数据预处理

选用2000—2001年、2007—2008年 TM、ETM +

数据(128/036轨道下2008年2月27日、3月14日、4月15日、5月1日,127/036轨道下2008年3月23日、4月24日,126/036轨道下2008年2月29日、4月17日、5月19日)进行辐射定标、大气校正和几何精校正,并根据几何精校正后的反射率影像计算研究区域的 NDVI。

2.1.3 冬小麦种植区域提取

为了消除研究区域内非冬小麦像元对反演结果的影响,利用监督分类中的最大似然法对遥感影像进行分类(设定为小麦地、林地、园地、建设用地、水体和裸地6个大类),提取冬小麦种植区域。分类后根据测试样本采用混淆矩阵法估算分类精度,结果表明, TM 影像的分类精度较高, Kappa 系数达到0.9。

2.2 作物生长模型

2.2.1 模型标定

通过野外试验获取的关中平原不同区域内的各个样点的土壤、气象和作物管理数据、CERES—Wheat 模型缺省值和少数已知基因参数运行 CERES—Wheat 模型,基于对模型结果的敏感性分析逐一确定未知参数,完成作物模型标定。其中,参数的调整与确定需要满足以下条件:①通过调整参数使模型模拟的冬小麦的开花期、成熟期和收获期与实际情况相符。②使模型模拟的冬小麦全生育期的 LAI 最大值和实际情况相符。③使模型模拟的特定日期的生物量、LAI 和实测的生物量、LAI 相符。④使模型模拟的冬小麦最终产量和实测数据相符。

2.2.2 生物量和 LAI 的动态模拟

关中平原的冬小麦通常于每年10月上中旬播种而于次年的5月下旬—6月上旬收获,全生育期约为230 d。由图1a所示,CERES—Wheat 模型模拟的关中平原各试验样点的冬小麦全生育期的生物量干物质拟合曲线与实测数据在趋势和具体数值上基本相符。而根据模拟的 LAI 变化特征(图1b)可知,自冬小麦播种至越冬期前, LAI 增长缓慢;越冬期内, LAI 基本保持不变;返青期后冬小麦叶片数量和质量迅速增加, LAI 呈现快速增长趋势;拔节期和抽穗期内,叶片数量和单叶面积分别增长到最大, LAI 也达到最大;随着冬小麦进入灌浆期和乳熟期,叶片开始逐渐变黄和枯萎, LAI 呈现下降趋势。

2.2.3 生物量和 LAI 的遥感反演

基于 CERES—Wheat 模型模拟的各个试验样点的冬小麦全生育期的生物量、LAI 以及遥感影像对应的 NDVI 值 V_{NDVI} , 分别建立像素尺度生物量 b 和 V_{NDVI} 的线性回归模型以及 LAI 和 V_{NDVI} 的对数回归模型,即

$$b = 0.9620V_{NDVI} - 0.1820 \quad (8)$$

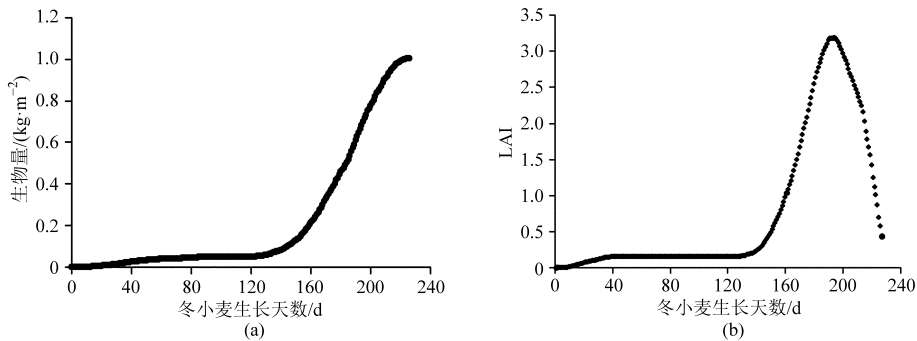


图1 关中平原2007—2008年冬小麦全生育期的生物量和LAI变化曲线

Fig.1 Biomass and LAI of whole growth period of winter wheat in Guanzhong Plain during 2007—2008

(a) 生物量 (b) LAI

$$V_{LAI} = -\frac{1}{0.4451} \ln \frac{0.91 - V_{NDVI}}{1.1562} \quad (9)$$

基于式(8)、(9)可定量反演研究区域的2007—2008年生物量和LAI。

3 结果与分析

3.1 分段蒸腾系数的获取

由于蒸腾系数随作物种类和生长特征的变化而变化,对于以籽实为主要收获对象的冬小麦而言,不同阶段的生长特点和蒸腾耗水特性有所不同。因此本文提出分段蒸腾系数,即按照冬小麦由播种—越冬期至灌浆—乳熟期5个不同生育期的 CERES - Wheat 模型水分平衡模拟结果及实测数值分别计算各生育期的蒸腾系数(表1)。

表1 冬小麦不同生长生育期(自播种之日起)的蒸腾系数
Tab.1 Transpiration coefficient at different growth stages of winter wheat

生长阶段	蒸腾系数
播种—越冬期(0~128 d)	177
返青期(129~161 d)	110
拔节期(162~182 d)	156
抽穗期(183~209 d)	186
灌浆—乳熟期(210~226 d)	290

3.2 分摊系数的变化特征

根据 CERES - Wheat 模型模拟的 LAI 变化曲线(图1b),可获得冬小麦全生育期内日均分摊系数的变化特征,并由此将分摊系数的变化曲线大致划分为由线性回归方程表示的4个区间,其分界点和坐标分别为A(0, 0)、B(128, 0.069 9)、C(161, 0.595 9)、D(193, 2.928 7)和E(226, 0.205 2)(图2)。

由于覆盖研究区域的126/036、127/036和128/036轨道下的TM影像获取时间不同,因此,分别计算3个轨道下图像各像素分摊系数的分区间方程,以127/036轨道下分摊系数的逐像素计算方程的获取过程为例:

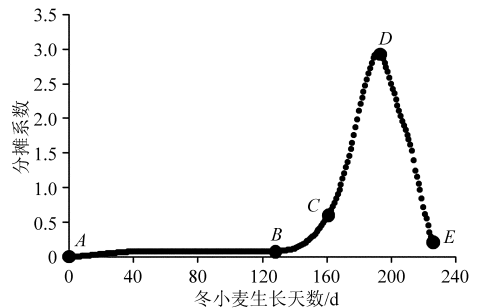


图2 关中平原2007—2008年冬小麦全生育期分摊系数的变化曲线

Fig.2 Variation of ratio of leaf transpiration and soil evaporation of whole growth period of winter wheat in Guanzhong Plain during 2007—2008

(1) C - D 区间分摊系数的线性回归方程可以通过 C 和 D 两点在分摊系数变化曲线上的坐标得到

$$\alpha = 0.0729t - 11.1412 \quad (t \in (161, 193]) \quad (10)$$

2008年3月23日位于C - D区间,该天分摊系数记为 $\alpha_{t=164}$,与对应点(164, 0.724 1)的差值记为 $\Delta\alpha_{t=164} = \alpha_{t=164} - 0.7241$ 。则C - D区间像素的方程为

$$\alpha = 0.0729t - 11.8653 + \alpha_{t=164} \quad (t \in (161, 193]) \quad (11)$$

(2) D - E 区间线性回归方程为

$$\alpha = -0.0825t + 18.8570 \quad (t \in (193, 226]) \quad (12)$$

2008年4月24日位于D - E区间,该天分摊系数记为 $\alpha_{t=196}$,与对应点(196, 2.804 0)的差值记为 $\Delta\alpha_{t=196} = \alpha_{t=196} - 2.8040$ 。则D - E区间像素的方程为

$$\alpha = -0.0825t + 16.0530 + \alpha_{t=196} \quad (t \in (193, 226]) \quad (13)$$

(3) B - C 区间的像素方程

$$\alpha = 0.0159t - 2.6943 + \alpha_{t=164} \quad (t \in (128, 161]) \quad (14)$$

(4) $A-B$ 区间的像素方程

$$\alpha = 0.0006t - 0.7239 + \alpha_{t=164} \quad (15)$$

$$(t \in [0, 128])$$

3.3 蒸散量的反演与分析

基于遥感反演的生物量和分摊系数,可以通过式(8)计算得到关中平原 2007—2008 年冬小麦全生育期的蒸散量(图 3)。将 6 个多年常设试验样点(3 个灌溉样点和 3 个旱作样点)的蒸散量的反演值和作物模型模拟值(假设为真实值)进行了比较(表 2),两者之间的误差绝对值最大为 84 mm,相对误差不超过 18.50%,最小仅为 1.45%,总体误差较小。此外,根据其他研究结果表明,渭北东塬旱地小麦全生育期耗水量为 292~366 mm,与试验获取的关中平原的蒸散量反演结果的分布区间一致,验证了冬小麦全生育期蒸散量反演结果的准确性。

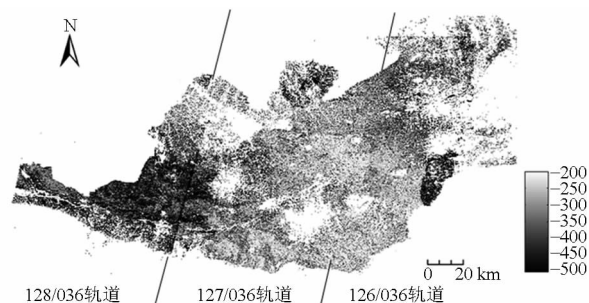


图 3 关中平原 2007—2008 年冬小麦全生育期的蒸散量

Fig. 3 Evapotranspiration of whole growth period of winter wheat in Guanzhong Plain during 2007—2008

表 2 试验样点的反演和模拟蒸散量

Tab. 2 Retrieved and simulated evapotranspiration of sampling sites

试验样点	模拟值/	反演值/	绝对误差/mm	相对误差/%
	mm	mm		
扶风县城北(灌)	424	452	-28	6.60
眉县常兴镇(灌)	454	384	70	15.42
临渭区蔺店镇(灌)	454	370	84	18.50
三原县新兴镇(旱)	341	359	-18	5.28
蒲城县孙镇(旱)	415	409	6	1.45
蒲城县城北(旱)	401	357	44	10.97

3.4 土壤水分供给量的反演与分析

关中平原不同区域之间的总降水量差异较大,同一区域内的降水分布也不均匀,因此,依靠单一气象站点的降水数据难以准确表征区域总降水量与特点。为此必须充分考虑降水量对土壤水分供给量反演结果的影响,根据研究区域内所有气象站点获取的冬小麦全生育期内的降水量和气象站点的位置,按照反距离权重插值的方法来计算整个研究区域的降水量。由于关中平原冬小麦各种植区内的施灌次数和总灌溉量均有所不同,本研究土壤水分供给量

的反演结果中尚未去除灌溉量。

根据冬小麦全生育期的区域尺度的土壤水分供给量反演结果(含灌溉量,如图 4 所示),除渭北旱塬因作物覆盖度较低导致的高蒸发致使总体土壤水分供给量较大外,关中平原土壤水分供给量分布整体呈现出西高东低和北高南低的趋势,反映了冬小麦整个生育期内水分的需求、消耗与生长状况之间的紧密联系,与其他关于冬小麦耗水量(包括降水量、灌溉量、土壤水分供给量)的研究成果基本相符。此外,基于 2007—2008 年部分试验样点的土壤剖面水分实测结果,可以获知冬小麦全生育期内土壤向冬小麦直接供给的水分总量(不含灌溉量)主要分布在 100~250 mm 的区间内。根据实地调查的临渭区蔺店镇样点冬小麦种植管理信息,在 2007—2008 年冬小麦生长期,该样点进行了 1 次灌溉,灌溉量约为 75 mm,考虑灌溉的影响,则土壤水分供给量的反演结果为 120 mm,与实测 110 mm 的绝对误差为 10 mm,相对误差为 9.09%;扶风县城北样点进行了 1 次灌溉,灌溉量约为 75 mm,同样考虑灌溉的影响,该样点的土壤水分供给量的反演结果为 229 mm,与实测结果 256 mm 的绝对误差仅为 27 mm,相对误差为 10.55%。

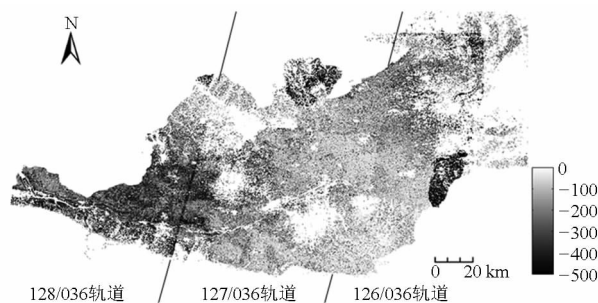


图 4 关中平原 2007—2008 年冬小麦全生育期土壤水分供给量(含灌溉量)

Fig. 4 Soil water supplement (including irrigation) of whole growth period of winter wheat in Guanzhong Plain during 2007—2008

为了进一步分析和验证土壤水分供给量遥感反演模型的有效性和可行性,应用 2000—2001 年冬小麦生长期获取的 8 景 TM 和 14 景 ETM+ 数据进行冬小麦全生育期土壤水分供给量的反演。选取 2000—2001 年的主要原因为 2003 年之前的 ETM+ 数据不存在“掉行”现象,可以有效地对 TM 数据进行最大程度的补充,以获得更多时相的卫星遥感数据,有利于对土壤水分供给量遥感反演模型进行进一步的分析 and 验证。

2000—2001 年关中平原冬小麦全生育期的土壤水分供给量的反演结果(包括灌溉量,如图 5 所示),对比图 4 和图 5,可以看出在两轨 TM 影像的重

叠部分及其周围区域,2000—2001年反演结果的纹理接合程度要明显好于2007—2008年,且不存在陡升或陡降的变化趋势,说明在土壤水供给量反演模型中如果能够获取多时相遥感数据,尤其是主要生育时期的遥感数据,可以获得更为准确的反演结果。

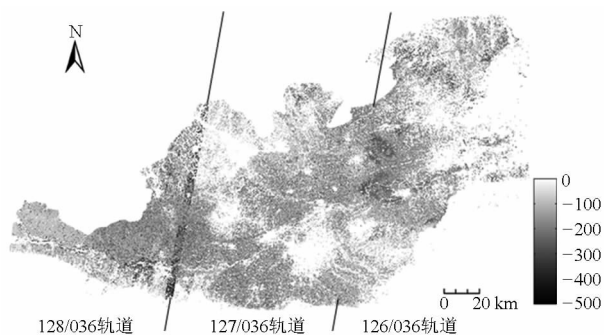


图5 关中平原2000—2001年冬小麦全生育期土壤水分供给量(含灌溉量)

Fig. 5 Soil water supplement (including irrigation) of whole growth period of winter wheat in Guanzhong Plain during 2000—2001

4 结论

(1) 采用分段蒸腾系数可以最大程度地体现冬小麦在不同生长阶段的生长特点和水分消耗特征,日均分摊系数则能有效地消除土壤水分动力模型在向前运行中的累积误差,保证反演结果的准确性。

(2) 关中平原的蒸散量总量和空间分布与这一

区域内前人研究成果相一致。各试验样点的冬小麦全生育期的反演蒸散量普遍小于作物生长模型的模拟值,两者之间的绝对误差和相对误差总体上较小。

(3) 土壤水分供给量的验证结果表明,在充分获取降水、灌溉信息和多时相遥感数据的条件下,反演结果准确度较高。关中平原的土壤水分供给量呈现出西高东低和北高南低的分布特征,即自西北部向东南部逐渐递减。东南部和西北部相比,冬小麦在全生育期内需要从土壤直接汲取的水分相对较少,这与关中平原冬小麦受水分胁迫程度的区域性变化趋势基本一致,因此,获取的区域尺度的土壤水分供给量结果是可信的。

(4) 根据蒸散量反演值与模型模拟值的对比,灌溉样点较早作样点的相对误差更大,这可能是由于每次灌溉后冬小麦蒸腾和地面蒸发耗水有所增强,但在机理模型的向前运行中这一过程未能被充分体现而造成的。土壤水分供给量的单点验证结果也表明在试验中获取准确的灌溉信息(包括灌溉时间、灌溉次数和灌溉量)对模型的最终反演结果至关重要。此外,低植被覆盖期土壤水分供给量的反演一直是土壤水分反演领域的难题之一,本文虽然通过将 CERES - Wheat 模型模拟的参数引入土壤水分平衡方程用以加强整体反演过程的机理性,取得了较好的反演结果,但尚未能完全解决这一难题,需要在以后的研究中进一步探究更好的解决方法以完善这一模型。

参 考 文 献

- 1 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(5):73-78.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Water balance simulation in SPAC systems of slope lands covered with typical vegetations on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 73-78. (in Chinese)
- 2 姚立民,李伏生,佟玲,等. 土壤水分有效性对梭梭苗根系导水率的动态影响[J]. 农业机械学报,2011,42(5):69-72.
Yao Limin, Li Fusheng, Tong Ling, et al. Dynamic influence of soil water effectiveness on root hydraulic conductivity of haloxylon ammodendron sapling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 69-72. (in Chinese)
- 3 Holzman M E, Rivas R, Piccolo M C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28: 181-192.
- 4 郑成岩,于振文,马兴华,等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J]. 作物学报,2008,34(8):1450-1458.
Zheng Chengyan, Yu Zhenwen, Ma Xinghua, et al. Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1450-1458. (in Chinese)
- 5 Khalil S E, Yousef R M M. Interaction effects of different soil moisture levels, arbuscular mycorrhizal fungi and three phosphate levels on: I-growth, yield and photosynthetic activity of garden cress (*lepidium sativum* L.) plant [J]. International Journal of Advanced Research, 2014, 2(6): 723-737.
- 6 黄明丽,邓西平,周生路,等. 二倍体、四倍体和六倍体小麦产量及水分利用效率[J]. 生态学报,2007,27(3):1113-1121.
Huang Mingli, Deng Xiping, Zhou Shenglu, et al. Grain yield and water use efficiency of diploid, tetraploid and hexaploid wheats [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1113-1121. (in Chinese)
- 7 Chang J, Clay D E, Hansen S A, et al. Water stress impacts on transgenic drought-tolerant corn in the Northern Great Plains [J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 125-130.
- 8 尉秋实,赵明,李昌,等. 不同土壤水分胁迫下沙漠薹的生长及生物量的分配特征[J]. 生态学报,2006,25(1):7-12.
Yu Qiushi, Zhao Ming, Li Chang, et al. Growth and biomass allocation of *chilopsis linearis* under different soil water stresses [J].

- Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(1): 7-12. (in Chinese)
- 9 Manabe S. Climate and the ocean circulation, I: the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface [J]. Monthly Weather Review, 1969, 97(11): 739-774.
 - 10 Klausmeier. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation [J]. Science, 1999, 284(5421): 1826-1828.
 - 11 曾庆存, 卢佩生, 曾晓东. 最简化的两变量草原生态动力学模式[J]. 中国科学: B 辑, 1994, 24(1): 106-112.
Zeng Qingcun, Lu Peisheng, Zeng Xiaodong. Maximum simplified dynamic model of grass field ecosystem with two variables [J]. Science in China: Series B, 1994, 24(1): 106-112. (in Chinese)
 - 12 曾晓东, 王爱慧, 赵刚, 等. 草原生态动力学模式及其实际检验[J]. 中国科学: C 辑, 2004, 34(5): 481-486.
Zeng Xiaodong, Wang Aihui, Zhao Gang, et al. Ecological dynamic model of grassland and its practical verification [J]. Science in China: Series C, 2004, 34(5): 481-486. (in Chinese)
 - 13 曾庆存, 曾晓东, 王爱慧, 等. 大气和植被生态及土壤系统水文过程相互作用的一些研究[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 7-19.
Zeng Qingcun, Zeng Xiaodong, Wang Aihui, et al. Some studies of the hydrological interactions in the atmosphere-ecosystem-soil system [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 2005, 29(1): 7-19. (in Chinese)
 - 14 周鹏, 丁建丽, 王飞, 等. 植被覆盖地表土壤水分遥感反演[J]. 遥感学报, 2010, 14(5): 959-973.
Zhou Peng, Ding Jianli, Wang Fei, et al. Retrieval methods of soil water content in vegetation covering areas based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 959-973. (in Chinese)
 - 15 Chen M, Willgoose G R, Saco P M. Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data [J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 274-284.
 - 16 Sun Wei, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. Using vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17-18): 5133-5144.
 - 17 Wu J, Liu M, Lü A, et al. The variation of the water deficit during the winter wheat growing season and its impact on crop yield in the North China Plain [J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(9): 1951-1960.
 - 18 Anil Kumar Singh, Rojalini Tripathy, Usha Kiran Chopra. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 776-786.
 - 19 Ma Yuping, Wang Shili, Zhang Li, et al. Monitoring winter wheat growth in North China by combining a crop model and remote sensing data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 426-437.
 - 20 Christopher M U, Hatim M E, William P K, et al. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach [J]. Advances in Water Resources, 2012, 50: 152-161.
 - 21 康绍忠, 张富仓, 刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 285-289.
Kang Shaozhong, Zhang Fucang, Liu Xiaoming. Calculation method of the ratio between crop leaf transpiration and soil evaporation from farmland [J]. Advances in Water Science, 1995, 6(4): 285-289. (in Chinese)