doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.018

基于动态模拟的作物系数优化蒸散量估算研究*

王　维[1,2]　王鹏新[1,2]　解　毅[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: 通过作物生长模型动态模拟的冬小麦全生育期潜在蒸散量和实际蒸散量计算冬小麦各生育时期的模拟作物系数,并与 FAO 提供的冬小麦各个生长阶段的标准作物系数对比,验证了其数值和变化趋势的准确性。基于地面实测和遥感反演的叶面积指数,建立了作物系数与叶面积指数的经验对数模型,根据遥感反演的叶面积指数获取冬小麦全生育期以天为步长的区域尺度的作物系数。利用冬小麦各生育时期模拟作物系数与以天为步长的区域尺度作物系数的比值优化蒸散量模型,获取关中平原 2013—2014 年冬小麦全生育期优化前后的蒸散量反演结果。通过与实测数据对比,发现优化前最大相对误差为 14.36%,优化后最大相对误差为 9.89%,优化后的蒸散量反演模型比未优化的蒸散量反演模型能够更加准确地反演冬小麦全生育期的蒸散量,特别是在低植被覆盖条件下的反演精度有明显的提升。

关键词: 作物系数　动态模拟　作物生长模型　叶面积指数　蒸散量　反演模型

中图分类号: TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)11-0129-08

Estimation of Evapotranspiration Optimized by Crop Coefficient Based on Dynamic Simulation

Wang Wei[1,2]　Wang Pengxin[1,2]　Xie Yi[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 simulative crop coefficients in each growth period of winter wheat were calculated by the potential and actual evapotranspiration of winter wheat during the whole growth period that both simulated with crop growth model. These simulative crop coefficients were compared with the standard crop confidents at different growth stages provided by FAO and the comparison results verified the accuracy of their values and trends. The experience logarithmic model was built based on the leaf area index obtained by both point-based measurement and remote sensing inversion method. The continuous daily regional crop coefficient could be calculated by remotely sensed leaf area index. The ratio of simulated crop coefficient and daily regional crop coefficient could be used as an optimization factor for evapotranspiration model and the evapotranspiration results of simulative crop coefficient before and after optimization in the whole growth period during 2013—2014 in Guanzhong Plain were obtained. Compared with the point-based measured data, it was found that the maximum relative error was reduced to 9.89% from 14.36% after optimization. So the optimized evapotranspiration reversion model was more accurate than the model without optimization, especially under the condition of low plant coverage. The accuracy showed a significant improvement.

Key words: Crop coefficient　Dynamic simulation　Crop growth model　Leaf area index　Evapotranspiration　Reversion model

收稿日期: 2015-04-27　修回日期: 2015-05-18

*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

由于作物生长过程的复杂性,作物的生物量和叶面积指数(Leaf area index, LAI)在全生育期的变化趋势会有多次转变,土壤蒸发耗水与植株蒸腾耗水会交替变换在作物蒸散耗水中的主导地位,两者之间的比例也在不断变化。在作物的整个生育期有相当长的一个阶段的地表覆盖率较低,而此时要准确估算作物的蒸散耗水就需要同时综合考虑土壤蒸发和作物蒸腾在这一过程中扮演的角色以及实际蒸散耗水和参考蒸散量的关系。现有的蒸散量反演模型已经能够较好地处理土壤蒸发耗水与作物蒸腾耗水之间的关系,但在植被覆盖度较低和生物量增长率较低的条件下,反演结果不尽如人意,因此处理好作物生长过程中各个生育阶段实际蒸散量和参考蒸散量的差异是解决这一问题的突破口[1-2]。

作物系数是作物实际蒸散量与参考蒸散量之比[3],常用于估算区域作物实际蒸散量,其对区域尺度农田水分平衡和水资源合理配置与利用也具有重要意义[4-5]。随着作物本身与外界条件的变化,作物系数也在不断的变化,但整体变化规律在作物全生育期具有稳定性。作物系数除与具体作物种类有关外,同种作物的作物系数还具有明显的地域性差别[6-7],其综合反映了作物种类[8-10]、土壤水肥条件和田间管理水平对作物蒸散量的影响[11-13]。

作物生长模型的水分模块可以有效地模拟单个试验样点的全生育期以天为步长的实际蒸散量和潜在蒸散量,因此可以不受时间尺度的制约,进行单个样点的作物系数的计算与模拟[14]。鉴于作物系数和冠层光谱植被指数均受地表覆盖比例、作物生物量和 LAI 等因素影响的共性[15],目前已有学者基于遥感数据或模型模拟结果对不同土地覆盖类型下的作物系数与植被指数的关系进行了研究[16-18],通过遥感数据反演作物系数成为获取大空间尺度作物系数的重要途径。

本文旨在通过作物生长模型动态模拟和遥感反演的作物系数,优化区域尺度的作物全生育期的蒸散量反演结果,并为作物系数在更长时间尺度和更大空间尺度上的应用提供借鉴。

1 试验数据与蒸散量模型优化原理

1.1 试验数据

本次研究选取的地面实测数据来源于关中平原冬小麦种植区内的 14 个典型试验样点,包括土地利用、作物(冬小麦)田间管理、作物种类、施肥和灌溉等一系列数据,并实地测量了部分试验样点的土壤剖面水分数据。

选用的遥感数据包括 126/036、127/036 和 128/036 轨道下的 2013 年 10 月—2014 年 5 月的 19 景 Landsat8 - OLI 影像数据(表 1),数据预处理内容包括辐射定标和大气校正,并通过预处理后的遥感影像计算区域尺度 LAI,与关中平原冬小麦分类图相叠加获取冬小麦种植区域内空间分辨率为 30 m 的 LAI。

表 1 Landsat8 - OLI 数据

Tab. 1 Landsat8 - OLI data

轨道号	126/036	127/036	128/036
获取日期	2013 - 10 - 24	2013 - 11 - 16	2013 - 10 - 22
	2013 - 11 - 25	2013 - 12 - 02	2013 - 12 - 09
	2013 - 12 - 11	2014 - 01 - 03	2014 - 03 - 15
	2013 - 12 - 27	2014 - 02 - 20	2014 - 05 - 18
	2014 - 01 - 12	2014 - 03 - 24	
	2014 - 01 - 28	2014 - 04 - 09	
	2014 - 03 - 17	2014 - 05 - 11	
	2014 - 05 - 04		

1.2 CERES - Wheat 模型标定

通过在 2007—2012 年关中平原 14 个试验样点实测获取的数据标定 CERES - Wheat 模型的参数并验证模型可靠性。验证指标主要包括冬小麦主要生育期的起止日期,LAI 的变化趋势和最大 LAI 的出现日期,生物量干物质积累量(包括最终产量)和土壤水分平衡模拟结果等。

由于很多内部参数和外部变量对模型模拟结果影响十分显著,通过固定模型的一些参数和变量而对另一些参数和变量进行微调,并对产生的不同结果进行系统分析,能够定量化地描述各个参数和变量在模型模拟过程中对相关过程产生的影响和作用,并有益于最终确定模型初始的内部参数和变量。例如,对作物生长模型的遗传参数模块进行敏感性调试的过程和部分结论如下:P1V 和作物生长过程、冬小麦全生育期 LAI 的变化具有密切关联;P1D 和作物生长过程、越冬期 LAI 的变化以及生物量干物质的累积具有内在联系;G1、G2 和 G3 主要影响冬小麦最终产量和生物量干物质的累积,尤其是 G3 直接影响冬小麦最终籽粒质量;PHINT 对冬小麦生长趋势和 LAI 的变化趋势具有很强的影响力,且和生物量的累积具有一定关联。

选取 1 个旱作样点(陈仓区北)和 1 个灌溉样点(扶风县城北),应用标定后的 CERES - Wheat 模型模拟这 2 个样点 2007—2012 年冬小麦生育期以天为步长的 LAI(图 1),并分析 LAI 的变化特征。

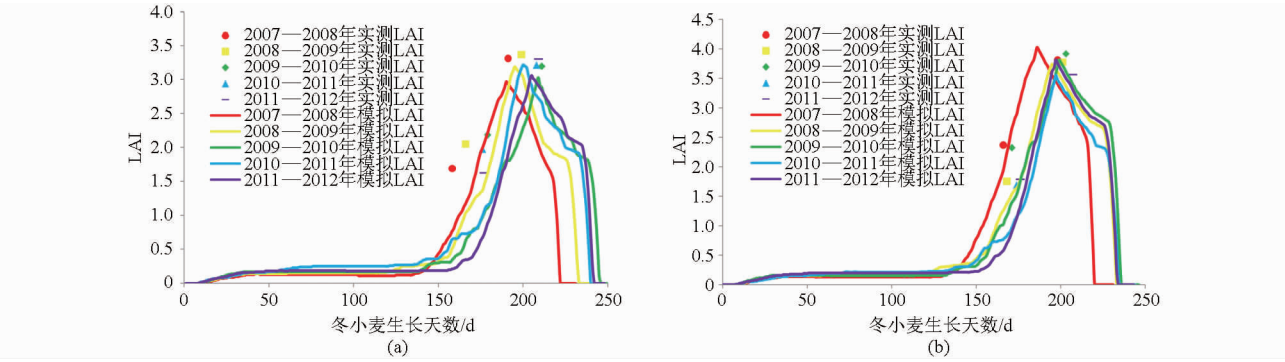

图 1　CERES－Wheat 模型模拟的冬小麦整个生育期 LAI 的变化特征

Fig. 1　Variation of LAI in whole growth period of winter wheat

（a）陈仓区北　（b）扶风县城北

模拟结果表明，陈仓区北冬小麦的整个生育期为 230～245 d，扶风县城北冬小麦的整个生育期为 230～240 d；陈仓区北冬小麦在播种后的第 190～205 天LAI 达到最大值，扶风县城北冬小麦在播种后第 185～195 天 LAI 达到最大值，这些均与实地调查结果相符合。

以蒲城县孙镇模拟得到的冬小麦全生育期分层土壤体积含水量以及日蒸散量为例（图 2），在冬小麦全生育期内，随着时间推移，从土壤表层至 60 cm 的深度，土壤体积含水量变化明显，然而在 120 cm 以下的深层土壤这种变化非常细微，这和野外试验实地获取的测量结果在变化趋势和具体数值上基本相符，而作物全生育期以天为单位的蒸散量则表现为先减小后增大的变化趋势，特别是准确模拟出了冬小麦越冬期内的连续谷值和冬小麦生长旺盛期内的快速增加的趋势，这些都证明了作物生长模型对土壤水分变化和冬小麦全生育期内蒸发蒸腾模拟结果的有效性和准确性。

结合冬小麦全生育期 LAI 和土壤水分的模拟结果，标定后的 CERES－Wheat 模型能够较准确地模拟冬小麦整个生育期的生长和发育状况和浅层土壤水分变化情况。

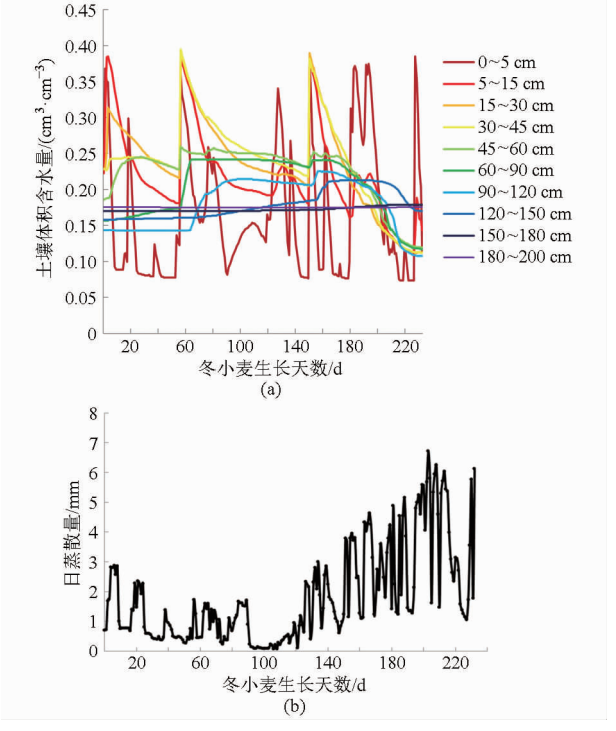

图 2　蒲城县孙镇冬小麦全生育期土壤体积含水量和日蒸散量模拟结果

Fig. 2　Simulation of soil moisture and evapotranspiration in Pucheng County

（a）土壤体积含水量　（b）土壤日蒸散量

1.3　蒸散量反演模型

作物蒸散量由作物自身的蒸腾耗水和棵间浅层土壤的蒸发耗水组成[19]，即

$$ET_c = E_{act} + W_c \tag{1}$$

式中　ET_c——单位面积上作物日蒸散量，m

E_{act}——单位面积上土壤水分日蒸发量，m

W_c——单位面积上作物日蒸腾量，m

分摊系数 α 可以表征作物蒸腾量与棵间土壤蒸发量的比例[20]，即

$$\alpha = \frac{W_c}{E_{act}} = \mathrm{e}^{K\left(1.0 + A\left|\sin\frac{t_d - 13}{12}\pi\right|\right)V_{LAI}} - 1$$
$$(t_d = 7, 8, \cdots, 19) \tag{2}$$

式中　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

K、A——与作物类型相关的经验系数，以冬小麦为研究对象时，分别取 0.397 3、0.103 64

每日的分摊系数由计算日间多时刻平均分摊系数的方法来获取。

作物整个生长过程中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，即

$$W_c = \gamma_c r \rho^{-1} \tag{3}$$

式中　γ_c——作物蒸腾系数，反映作物对水分的整体利用效率

r——作物地上部分生物量的日均增长率，kg/(m²·d)

ρ——水密度，kg/m³

作物日蒸散量模型为

$$ET_c = \gamma_c \frac{1+\alpha}{\alpha} r\rho^{-1} \tag{4}$$

通过对研究区域的单日蒸散量进行积分可以获取作物全生育期的蒸散量。

1.4 基于作物系数的蒸散量模型优化

在原有的蒸散量模型中，作物在全生育期的蒸散量反演值的变化趋势和数值范围皆受生物量日增长率的影响。以冬小麦为例，自播种至返青期之前的低植被覆盖期，生物量的增速缓慢甚至停止增加，但实际这一时间段内土壤蒸发量依然存在甚至很大，导致这一时期蒸散量反演值均低于实际值。由于作物生长模型可以同时模拟作物全生育期以天为步长的自身蒸腾和棵间蒸发耗水情况，且其本身具有的动态机理性可以最大程度地弥补原有蒸散量模型的不足，因此选取作物生长模型模拟的作物系数对蒸散量模型进行优化。

由作物系数 K_c 的定义可知

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \tag{5}$$

式中 ET_0——单位面积上作物日参考蒸散量，m

研究区域固定时，每一类作物的参考蒸散量 ET_0 为固定值，因而可以得到

$$\frac{ET_c'}{K_c'} = \frac{ET_c}{K_c} \tag{6}$$

式中 K_c'——作物生长模型获取的冬小麦各生育时期的模拟作物系数

ET_c'——优化后的单位面积上作物日蒸散量，m

优化后的日蒸散量模型可以表示为

$$ET_c' = \frac{K_c'}{K_c}\gamma_c \frac{1+\alpha}{\alpha} r \tag{7}$$

将作物各生育时期的模拟作物系数和未优化蒸散量模型所对应的区域尺度作物系数的比值$\frac{K_c'}{K_c}$引入蒸散量模型可以有效地提升低植被覆盖期因生物量日增长率过低造成的偏小的反演结果，从而获取更为准确的冬小麦全生育期的蒸散量。

1.5 模拟和反演作物系数的获取方法

1.5.1 模拟作物系数的获取方法

通过将 CERES-Wheat 模型模拟的各个试验样点的冬小麦全生育期以天为步长的潜在蒸散量与实际蒸散量分别进行平均，作为关中平原以天为步长的参考蒸散量与实际蒸散量，对冬小麦各个生育时期（播种-分蘖、越冬、返青、拔节、抽穗、灌浆、乳熟）每日的实际蒸散量与参考蒸散量分别累加，按照作物系数的定义，计算得到各个生育时期的由作物生长模型模拟的作物系数 K_c'。按照生育期计算模拟作物系数的目的在于综合考虑每个生育时期作物系数的变化特点及数值范围，排除因气候和环境因素导致不准确的单日作物系数参与计算所造成的误差。

1.5.2 区域尺度作物系数的反演方法

LAI 间接反映了作物生长和耗水状况，与作物系数有着紧密的联系。研究表明，在冬小麦不同生育期，作物系数与 LAI 关系不断变化[21]，播种-分蘖期 LAI 较小，这一时期作物系数也较低，两者均缓慢增大；越冬期 LAI 几乎停止增加，作物系数则先减小再稳定在较低数值；自返青期开始，随着 LAI 的增大，冬小麦自身生长与维持正常生理活动所需要的水分增多，导致蒸散量逐渐增高，作物系数也逐渐增大；在拔节-抽穗期，冬小麦茎节的伸长与幼穗分化同时进行，是作物生长发育最旺盛的时期，LAI 增加速度也比较快，当 LAI 达到最大值时，作物系数也同时达到最大值；但在作物生长的后期，作物茎叶逐渐变黄、干枯，蒸腾量大幅减少，此时由较高气温造成的土壤蒸发依然较大，LAI 对作物系数变化的影响变弱。因此不能用线性关系来简单的描述两者在作物整个生育期的联系。

由优化前的蒸散量模型获取 2013—2014 年冬小麦全生育期以天为步长的蒸散量反演结果，并将反演结果与各试验样点由作物生长模型模拟的潜在蒸散量相除，计算得到优化前各试验样点以天为步长的作物系数 K_c，再与各试验样点 2013—2014 年的遥感反演和地面实测的 LAI 进行回归分析（图 3），作物系数 K_c 和 LAI 之间的决定系数为 0.628 4。最终获取的优化前作物系数 K_c 与 LAI 的经验对数模型为

$$K_c = 0.216\,0\ln V_{LAI} + 0.716\,7 \tag{8}$$

基于关中平原作物全生育期 LAI 变化曲线，通过式（8）可获得冬小麦全生育期区域尺度作物系数的变化特征（图 4）。可以看出，作物系数的变化曲线根据冬小麦不同生育期（播种-分蘖、越冬-返青、拔节-抽穗、灌浆-乳熟）起止时间可以被大致划分为 4 个不同区间，其区间分界点及其坐标分别为 $A(0,0)$、$B(49,0.320\,8)$、$C(128,0.320\,9)$、$D(193,0.932\,8)$ 和 $E(226,0.836\,3)$。对于每一区

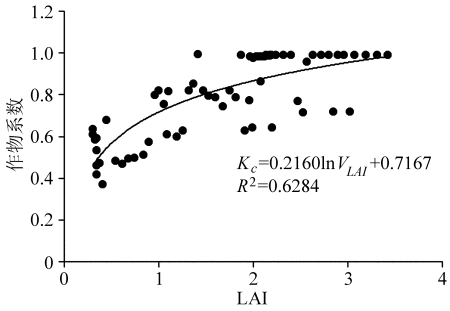

图 3　作物系数与 LAI 回归分析

Fig. 3　Relationship between crop coefficient and LAI

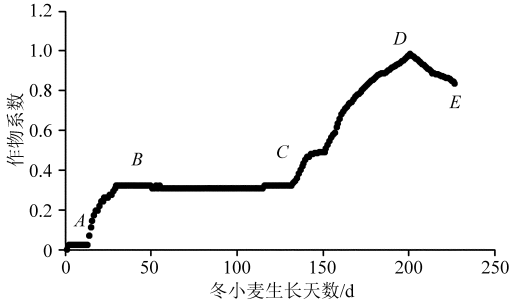

图 4　冬小麦全生育期区域尺度作物系数

Fig. 4　Regional crop coefficient in whole growth period of winter wheat

间内的作物系数可建立相应的区间方程。

由于覆盖研究区域的 126/036、127/036 和 128/036 轨道下的遥感影像的获取时间不同，因此，需要分别计算 3 个轨道下作物系数分区间的区域尺度方程，以 127/036 轨道下的获取过程为例：关中平原 2013—2014 年冬小麦普遍播种于 2013 年 10 月 12 日前后，因此以这一天作为播种日（第 1 天）对区域尺度方程进行推导。127/036 轨道下的遥感影像的获取时间分别为 2013 年 11 月 16 日、12 月 2 日和 2014 年 1 月 3 日、2 月 20 日、3 月 24 日、4 月 9 日、5 月 11 日。获取日期在作物系数变化曲线上的坐标分别为（36，0.320 7）、（52，0.320 8）、（84，0.306 9）、（132，0.334 0）、（164，0.729 3）、（180，0.865 3）和（212，0.894 7）。借由作物系数区间分界点与影像获取时间相应的作物系数变化曲线的坐标，可以获取 127/036 轨道下作物系数分区间的区域尺度方程为

$$K_c = \begin{cases} 0.006\,5t - 0.320\,7 + K_{ct=36} & (t \in [0,49]) \\ 0.000\,008t^2 - 0.001\,2t + 0.033\,5 + K_{ct=52} & (t \in (50,128]) \\ 0.000\,008t^2 - 0.001\,2t + 0.047\,4 + K_{ct=84} & (t \in (50,128]) \\ 0.009\,4t - 1.218\,1 + K_{ct=132} & (t \in (128,193]) \\ 0.009\,4t - 1.613\,4 + K_{ct=164} & (t \in (128,193]) \\ 0.009\,4t - 1.749\,4 + K_{ct=180} & (t \in (128,193]) \\ -0.002\,9t + 0.602\,5 + K_{ct=212} & (t \in (193,226]) \end{cases} \quad (9)$$

式中　K_{ct}——基于各区间内遥感反演的 LAI 计算得到的单日区域尺度的作物系数

t——冬小麦自播种之后的生长天数，d

例如 2013 年 11 月 16 日为冬小麦自播种日之后的第 36 天，$K_{ct=36}$ 即为遥感反演的 2013 年 11 月 16 日的区域尺度的作物系数。

2　试验与结果分析

2.1　作物系数的计算与分析

2.1.1　模拟作物系数的计算

基于 CERES－Wheat 模型水分模块对关中平原 2013—2014 年度冬小麦全生育期的蒸散量模拟结果，可以计算出各个生育时期的模拟作物系数 K_c'（表 2）。

表 2　冬小麦各生育时期模拟作物系数

Tab. 2　Simulative crop coefficients of winter wheat at various growth stages

指标	播种-分蘖	越冬	返青	拔节	抽穗	灌浆	乳熟	全生育期
实际蒸散量/mm	40.03	17.00	50.05	69.24	114.79	46.04	47.23	384.38
参考蒸散量/mm	57.11	37.64	91.55	68.06	106.24	49.53	83.85	493.98
模拟作物系数	0.70	0.45	0.55	1.02	1.08	0.93	0.56	0.78

通过分析模拟作物系数在冬小麦的整个生育期的变化趋势可以发现，在播种-分蘖期，基本达到全生育期的平均水平；越冬期降至最低；自返青期，经拔节期直至抽穗期结束前一直增加，并达到最大；灌浆期和乳熟期则逐渐降低。将模拟得到的作物系数与联合国粮食及农业组织（FAO）提供的冬小麦全生育期各个生长阶段的标准作物系数（表 3）进行对比[22]，可以发现，不论是在变化趋势还是基本数值方面两者都大致相同，从而验证了 CERES－Wheat 模拟的各生育时期作物系数的准确性。

表 3　FAO 提供的冬小麦各生长阶段标准作物系数

Tab. 3　Standard crop coefficient of winter wheat at various growth stages from FAO

生长阶段	初始生长期	越冬期	生长旺盛期	生长末期
标准作物系数	0.70	0.40	1.15	0.40

2.1.2　区域尺度作物系数的反演与分析

基于遥感反演的单日区域尺度的 LAI 及式（1）可以计算相应日期单日的区域尺度的作物系数。以

127/036 轨道下 2013 年 11 月 16 日(冬小麦分蘖期)和 2014 年 1 月 3 日(冬小麦越冬期)的作物系数计算结果为例(图 5),2 个单日的区域尺度作物系数的空间分布特征基本相同,而在具体数值上,2013 年 11 月 16 日的作物系数主要集中在 0.5 ~ 0.7 之间,2014 年 1 月 3 日的作物系数主要集中在 0.3 ~ 0.5 之间,即反演的冬小麦分蘖期的作物系数大于越冬期,这与作物系数在冬小麦全生育期的变化趋势相符合,且反演得到的分蘖期和越冬期区域尺度的作物系数总体略小于这一时间段内由作物生长模型模拟得到的作物系数,因此将模拟作物系数和反演的以天为步长区域尺度作物系数的比值代入蒸散量模型可以有效地增大这一时间段内蒸散量的反演结果。

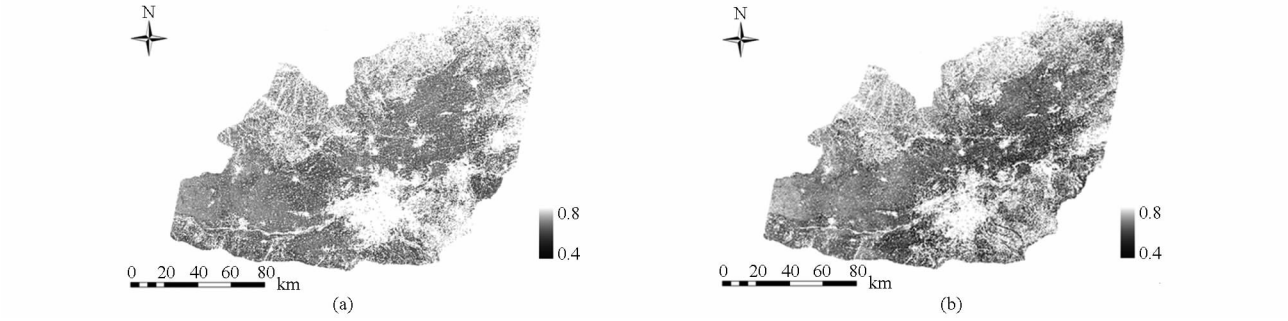

图 5 127/036 轨道下区域尺度的作物系数

Fig. 5 Regional crop coefficient in November 16, 2013 and January 3, 2014

(a) 2013 年 11 月 16 日 (b) 2014 年 1 月 3 日

2.2 优化前后的蒸散量反演结果与对比

对优化后蒸散量反演结果与优化前反演结果的差值(图 6)进行分析,可以发现关中平原冬小麦全生育期优化后的反演结果普遍高于优化前,提升的数值范围大致为 10 ~ 30 mm,且东部提升的数值普遍大于西部,这与东部地区蒸散量总值较高有关。

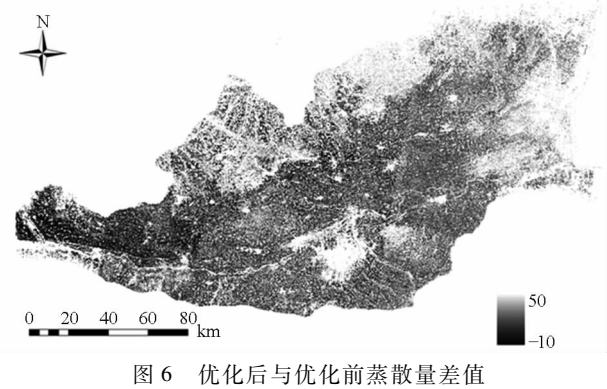

图 6 优化后与优化前蒸散量差值

Fig. 6 Difference between optimized and unoptimized evapotranspiration

选取具有代表性的、广泛分布于关中平原区域内的、拥有土壤剖面水分实测数据的 7 个典型试验样点(扶风县杏林镇、扶风县段家镇、三原县鲁桥镇、永寿县城西、乾县石牛乡、淳化县车乌镇、岐山县蒲村镇)进行蒸散量反演结果的验证,将这些样点的土壤水分变化量与生育期各试验样点的有效降水量以及灌溉量之和作为全生育期蒸散量实测值,并将实测值与优化前后的各个试验样点的蒸散量反演值进行对比分析(表 4)。优化前各试验样点的蒸散量反演值与实测值最大绝对误差为 -53 mm,最小为 -13 mm,优化后最大绝对误差为 -36 mm,最小为 2 mm;优化前最大相对误差为 14.36%,优化后最大相对误差仅为 9.89%。对比单点结果,所有试验样点优化后的绝对误差和相对误差均小于优化前,由此可以证明优化后的冬小麦全生育期蒸散量反演结果与优化前相比在反演精度上有明显提升。

此外,由未优化的单日冬小麦蒸散量模型积分计算出的自冬小麦播种期至返青期的区域尺度的蒸

表 4 试验样点的优化前后的反演蒸散量与实测值

Tab. 4 Measured evapotranspiration of samples and retrieval results before and after optimization

试验样点	实测值/mm	优化后			优化前		
		蒸散量/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	蒸散量/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
扶风县杏林镇	446	424	-22	4.93	412	-34	7.62
扶风县段家镇	425	411	-14	3.29	399	-26	6.12
三原县鲁桥镇	408	383	-25	6.13	370	-38	9.31
永寿县城西	354	319	-35	9.89	304	-50	14.12
乾县石牛乡	369	333	-36	9.76	316	-53	14.36
淳化县车乌镇	342	320	-22	6.43	301	-41	11.99
岐山县蒲村镇	367	369	2	0.54	354	-13	3.54

散量数值范围为 30 ~ 50 mm，经过优化后的反演结果为 45 ~ 65 mm，而这一时期实测的蒸散量约为 55 ~ 70 mm[23]，说明优化后的蒸散量模型在低植被覆盖期的反演精度有明显提升。

3　结论

（1）依据作物生长模型模拟的关中平原冬小麦全生育期实际蒸散量和潜在蒸散量来计算冬小麦各生育期的模拟作物系数，与 FAO 提供的各生长阶段的标准作物系数进行对比，两者的变化趋势和基本数值均大致相同，验证了各生育期模拟的作物系数的准确性。

（2）基于冬小麦全生育期作物系数与 LAI 的紧密联系，借由地面实测和遥感反演的 LAI，建立作物系数与 LAI 的对数经验模型，反演关中平原以天为步长的区域尺度的作物系数。由不同生育期作物系数的变化趋势和空间分布特征，证明通过遥感方法反演区域尺度作物系数的可行性和准确性。

（3）根据优化前后蒸散量与实测值的对比结果，优化后的蒸散量模型能够更加准确地反演冬小麦全生育期的蒸散量，且在低植被覆盖条件下的反演精度有明显提升。因此，将本文提出的优化系数应用于蒸散量反演模型能够有效地拓展蒸散量模型的适用范围并提升模型的反演精度。

参　考　文　献

1　樊引琴，蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报，2002，33(3)：50 - 54.
Fan Yinqin，Cai Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2002，33(3)：50 - 54. (in Chinese)

2　曹红霞，粟晓玲，康绍忠，等. 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因[J]. 农业工程学报，2008，23(11)：8 - 16.
Cao Hongxia，Su Xiaoling，Kang Shaozhong，et al. Changes of reference crop evapotranspiration and causes in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. Transactions of the CSAE，2008，23(11)：8 - 16. (in Chinese)

3　刘钰. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报，2000，16(5)：26 - 30.
Liu Yu. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients [J]. Transactions of the CSAE，2000，16(5)：26 - 30. (in Chinese)

4　黄梦琪. 关中西部冬小麦作物系数的试验研究[J]. 上海交通大学学报：农业科学版，2009，28(6)：635 - 638.
Huang Mengqi. Research of crop coeffiecent for winter wheat with Western Guanzhong [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University：Agricultural Science，2009，28(6)：635 - 638. (in Chinese)

5　孙宏勇，刘昌明，张喜英，等. 华北平原冬小麦田间蒸散与棵间蒸发的变化规律研究[J]. 中国生态农业学报，2004，12(3)：62 - 64.
Sun Hongyong，Liu Changming，Zhang Xiying，et al. The changing laws of the diurnal evapotranspiration and soil evaporation between plants in the winter wheat field of the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2004，12(3)：62 - 64. (in Chinese)

6　赵世昌，徐冰，魏占民，等. 西藏高寒牧区燕麦作物系数的推求及验证[J]. 灌溉排水学报，2015，34(2)：56 - 60.
Zhao Shichang，Xu Bing，Wei Zhanmin，et al. Ascertainment and verification of crop coefficient for oat in alpine pasture of Tibet [J]. Journal of Irrigation and Drainage，2015，34(2)：56 - 60. (in Chinese)

7　侯琼，王英舜，师桂花，等. 内蒙古典型草原作物系数的试验研究[J]. 草业学报，2011，20(4)：34 - 41.
Hou Qiong，Wang Yingshun，Shi Guihua，et al. Studies on crop coefficients of typical steppe in Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica，2011，20(4)：34 - 41. (in Chinese)

8　陈凤，蔡焕杰，王健，等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报，2006，22(5)：191 - 193.
Chen Feng，Cai Huanjie，Wang Jian，et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling Zone[J]. Transactions of the CSAE，2006，22(5)：191 - 193. (in Chinese)

9　Alberto M C R，Quilty J R，Buresh R J，et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management，2014，136：1 - 12.

10　Anda A，da Silva J A T，Soos G. Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton，Hungary[J]. Aquatic Botany，2014，116：53 - 59.

11　Jiang X，Kang S，Tong L，et al. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management，2014，142：135 - 143.

12　王洪源，李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报，2010，41(5)：47 - 51.
Wang Hongyuan，Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(5)：47 - 51. (in Chinese)

13　汪顺生，费良军，高传昌，等. 不同沟灌方式下夏玉米单作物系数试验研究[J]. 农业机械学报，2013，44(11)：105 - 111.
Wang Shunsheng，Fei Liangjun，Gao Chuanchang，et al. Experiment on single crop coefficient of summer maize under different furrow irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(11)：105 - 111. (in Chinese)

14　Mearns L O，Mavromatis T，Tsvetsinskaya E，et al. Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low

spatial resolution climate change scenarios[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D6): 6623 - 6646.
15 Marsal J, Johnson S, Casadesus J, et al. Fraction of canopy intercepted radiation relates differently with crop coefficient depending on the season and the fruit tree species [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 1 - 11.
16 Heilman J L, Heilman W E, Moore D G. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(6): 967 - 971.
17 李贺丽, 罗毅, 赵春江, 等. 基于冠层光谱植被指数的冬小麦作物系数估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 118 - 127.
Li Heli, Luo Yi, Zhao Chunjiang, et al. Estimating crop coefficients of winter wheat based on canopy spectral vegetation indices [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 118 - 127. (in Chinese)
18 宋戈, 曾季才, 王燕, 等. 基于 NDVI 估算华北平原冬小麦需水量[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 1 - 5.
Song Ge, Zeng Jicai, Wang Yan, et al. Estimation of winter wheat water requirement based on NDVI in the North China Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(6): 1 - 5. (in Chinese)
19 苏涛, 王鹏新, 杨博,等. 基于生物量的区域土壤水分供给量的反演方法研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 52 - 58.
Su Tao, Wang Pengxin, Yang Bo, et al. Retrieval of regional soil water changes based on remote sensing biomass products[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 52 - 58. (in Chinese)
20 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)
21 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 52 - 56.
Liu Haijun, Kang Yuehu. Calculation of crop coefficient of winter wheat at elongation-heading stages [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 52 - 56. (in Chinese)
22 Kang S, Gu B, Du T, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 239 - 254.
23 梁文清, 蔡焕杰, 王健. 冬小麦田间蒸发蒸腾与棵间蒸发规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 30(6): 93 - 96.
Liang Wenqing, Cai Huanjie, Wang Jian. Research of evapotranspiration and evaporation for winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 30(6): 93 - 96. (in Chinese)

(上接第 150 页)

9 邓鸿模,虞锦岚,周艾民. 高压静电场促进植物生长技术的研究[J]. 物理,2000(9): 550 - 552.
Deng Hongmo, Yu Jinlan, Zhou Aimin. The promotion of plant growth by a high-voltage electrostatic field [J]. Physics, 2000(9): 550 - 552. (in Chinese)
10 温尚斌,马福荣,许守民,等. 高压静电场促进植物吸收离子机理的初步探讨[J]. 生物化学与生物物理进展,1995, 22(4): 377 - 379.
Wen Shangbin, Ma Furong, Xu Shoumin, et al. The mechanism of ion absorption stimulated by the high voltage electrostatic field [J]. Prog. Biochem. Biophys, 1995, 22(4): 377 - 379. (in Chinese)
11 高伟娜,顾小清. 高压静电场对植物生物学效应的研究进展[J]. 现代生物医学进展,2006, 6(7): 60 - 62.
Gao Weina, Gu Xiaoqing. The biological effects of high voltage electrostatic field on plants[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2006, 6(7): 60 - 62. (in Chinese)
12 那日, 冯璐. 我国静电生物学效应机理研究新进展[J]. 物理, 2003,32(2): 87 - 93.
Na Ri, Feng Lu. Mechanism of the biological effects of electrostatics[J]. Physics, 2003,32(2): 87 - 93. (in Chinese)
13 Michealis L, Menten M L. The kinetics of inverting action[J]. Biochemistry, 1913, 49: 333 - 369.
14 蒋耀庭,赵云,赵航. 高压静电场诱导植物生长的机理研究[J]. 天津农业科学,2014, 20(3): 100 - 104.
Jiang Yaoting, Zhao Yun, Zhao Hang. Research on the mechanism of high-voltage static electricity field inducing vegetative growth[J]. Tianjin Agriculture Sciences, 2014, 20(3): 100 - 104. (in Chinese)
15 孙一源, 余登苑. 农业生物力学与农业生物电磁学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.