doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.026

基于RS数据和GIS方法的冬小麦水分生产函数估算*

彭致功　刘　钰　许　迪　王　蕾　雷　波　杜丽娟

（中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038）

摘要：以冬小麦遥感监测耗水与产量为数据支持，开展了多种水分生产函数模型的对比研究，探求与研究区相适宜的水分生产函数模型及其参数，其中全生育期水分生产函数模型分别选择直线模型、抛物线模型、D－K模型及指数模型；而分生育阶段水分生产函数模型分别选择Jensen、Minhas、Blank、Stewart及Singh模型。研究结果表明，冬小麦全生育水分生产函数模型推荐采用抛物线模型；而分生育阶段水分生产函数模型推荐采用Stewart模型；冬小麦对水分最敏感的阶段是抽穗期，其次为扬花-成熟期，而出苗-拔节期最小。为此，在北京市大兴区的冬小麦灌溉应优先满足抽穗灌浆期的需水，而在出苗-拔节期适度减少灌溉量，可达到节水增效目的。

关键词：冬小麦　产量　水分生产函数　遥感数据

中图分类号：S274.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2014)08-0167-05

引言

冬小麦播种面积占华北地区耕地面积的40%左右[1]。由于受季风的影响，华北地区降水的时间分布与冬小麦需水的耦合性较差，70%的降水发生在6—8月份，而在冬小麦生育期内的降水仅100～150 mm，占需水量的25%～30%，所以冬小麦缺水严重，由此造成旱灾频发，且持续时间长、波及范围大，对区域粮食安全及国民经济持续发展造成严重影响[2-3]。为保证华北地区冬小麦稳产高产，必须依靠超采地下水灌溉补充冬小麦生育期内需水，其灌溉用水量占区域农业用水量的70%，由此也加大区域水资源紧缺压力。地下水的过量超采导致华北地区地下水位以每年1.1 m左右速度下降，并引发了一系列环境问题。可见，华北地区冬小麦灌溉用水最大，也是华北地区节水潜力最大的农作物。鉴于此，要改变华北地区水资源短缺问题，必须加强该区域冬小麦产量与水分响应关系研究力度，以寻求小麦节水、高产、高效的统一。

华北冬小麦需耗水规律研究一直是北方地区农业节水研究的热点和重点，与其他农作物的水分生产函数模型研究类似，冬小麦水分生产函数模型研究也主要集中在2类模型：一是全生育期水分生产函数模型（属于静态模型），以全生育期总耗水为自变量，反映全生育期总耗水量与产量之间的函数关系，适用于全生育总水量亏缺的宏观规划预测[4]；二是分生育阶段水分生产函数模型（属于动态模型），以全生育期各生育阶段耗水为自变量，反映各生育阶段耗水与产量之间的函数关系，适用于缺水条件下的灌溉制度优化。在全生育期水分生产函数模型研究中，主要采用二次抛物线模型来模拟冬小麦生育期内总耗水量与产量之间的函数关系[5-6]；在分生育阶段水分生产函数模型研究中，除冯绍元等依据灌溉试验站点多年资料，采用综合调参法，推求了Jensen、Minhas、Blank、Stewart及Singh模型的参数外[7-8]，多数研究者选择Jensen模型对冬小麦分生育阶段耗水与产量之间的关系进行拟合，并以此为基础分析冬小麦各生育时段对耗水的敏感性。上述研究都是以试验站点耗水监测数据为模拟基础，在站点上应用具有一定精度，但在大面积推广应用时因未充分考虑下垫面几何机构和物理性质的时空异质性，存在区域代表性不足的问题；同时大部分研究都是局限于一种水分生产函数模型进行模拟，开展模型对比研究比较少，而通过模型对比研究选取适宜的模型，利于对区域有限水资源进行最优配置，为缺水区域灌溉制度决策和节水管理提供依据。与试验站点耗水监测不同，遥感法克服了传统点源地表观测的局限性，可获得不同区域尺度腾发量，并能

收稿日期：2014－03－10　修回日期：2014－03－28

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目（2012BAD08B02）、中国水利水电科学研究院院专项资助项目（节集1305、节集1356）、世界银行贷款项目（PMO1C3）和水利部公益性行业科研专项资助项目（201001068－2）

作者简介：彭致功，高级工程师，博士，主要从事农业水管理研究，E-mail：pengzhg@iwhr.com

通讯作者：刘钰，教授级高级工程师，博士，主要从事节水灌溉理论与技术研究，E-mail：liuyu@iwhr.com

提供作物分布图及其产量,所以采用遥感监测的新方法可对区域农业用水进行有效的宏观管理[9-10]。

本文基于 RS(遥感)数据和 GIS(地理信息系统)方法,依据北京市大兴区冬小麦遥感监测资料,通过开展多种模型对比研究,探求适宜的全生育期与分生育阶段的水分生产函数模型及其参数。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

北京市大兴区全境为平原,在气候气象、土地利用、土壤、耕作习惯、管理措施等方面与华北地区绝大多数区域相近或一致,并且在井灌区农业节水方面具有一定代表性。北京市大兴区的基本情况详见文献[11-12],该区域在 1980—1994 年、1999—2005 年为连续枯水年,降水对地下水补给能力下降;同时因社会发展工业及居民生活用水持续增加,造成自 20 世纪 80 年代以来该区域地下水位总体呈下降趋势,区域用水矛盾非常突出。

1.2 遥感蒸散发模型

ETWatch 蒸散模型采用余项法与 P-M 公式相结合的方法计算蒸散量[13]。本研究是在高分辨率、空间变异小、地物类别可分的情况下选择 SEBAL 模型,采用 Landsat TM 多波段数据反演晴好日蒸散,后引入 P-M 公式,将晴好日的蒸散量作为"关键帧",利用逐日的气象数据,重建蒸散量的时间序列数据,最终反演获得 30 m 分辨率蒸散量数据。本文利用 ETWatch 模型估算的蒸散量进行冬小麦水分生产函数模型的估算研究。根据大兴、禹城的涡度相关仪、LAS 和蒸渗仪等地面观测通量数据对比验证,在农田区利用 ETWatch 模型反演耗水量的平均偏差约 10%[14]。

1.3 冬小麦产量遥感估算

利用 Carnegie-Ames-Stanford-Approach (CASA)模型模拟冬小麦生育期内累积的干物质量,即净初级生产力;该模型是由遥感、气象、植被以及土壤类型数据共同驱动的光能利用率模型,具体的计算方法与原理见文献[15]。收获指数是指作物收获时经济产量(籽粒、果实等)与地上部干物质量的比值,无量纲,反映了作物同化产物在籽粒和营养器官中的分配比例。通过收获指数将利用 CASA 模型计算得到的冬小麦干物质累积量转化为其籽粒产量[16]。

1.4 水分生产函数模型选取

1.4.1 全生育期水分生产函数模型

选取 4 种全生育期模型对全生育期耗水与产量响应关系进行分析,各模型计算公式如下:

直线模型 $$Y = a + bE_T \tag{1}$$

抛物线模型 $$Y = b_0 + b_1E_T + b_2E_T^2 \tag{2}$$

D-K 模型 $$1 - \frac{Y}{Y_m} = K\left(1 - \frac{E_T}{E_{T_m}}\right) \tag{3}$$

指数模型 $$Y = b_0 e^{b_1E_T} \tag{4}$$

式中 Y——各处理产量

Y_m——最大产量

E_T——全生育期小麦耗水量

E_{T_m}——全生育期最大理论耗水量

a、b、b_0、b_1、b_2及 K 为经验系数。

1.4.2 分生育阶段水分生产函数模型

分别考虑加法模型和乘法模型,选取了 5 种典型的模型对分生育阶段耗水与产量的响应关系进行分析,主要包括相乘模型如 Jensen 模型、Minhas 模型,和相加模型如 Blank 模型、Stewart 模型及 Singh 模型。5 种模型的具体形式如下:

Jensen 模型 $$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n}\left(\frac{E_{T_i}}{E_{T_{mi}}}\right)^{\lambda_i} \tag{5}$$

Minhas 模型 $$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n}\left[1 - \left(1 - \frac{E_{T_i}}{E_{T_{mi}}}\right)^d\right]^{\lambda_i} \tag{6}$$

Blank 模型 $$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left(\frac{E_{T_i}}{E_{T_{mi}}}\right) \tag{7}$$

Stewart 模型 $$1 - \frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left(1 - \frac{E_{T_i}}{E_{T_{mi}}}\right) \tag{8}$$

Singh 模型 $$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left[1 - \left(1 - \frac{E_{T_i}}{E_{T_{mi}}}\right)^d\right] \tag{9}$$

式中 E_{T_i}——各阶段作物耗水量

$E_{T_{mi}}$——最大产量处理时的作物阶段耗水量

λ_i——该生育阶段敏感指数或敏感系数

d——经验值,通常取经验值为 2

i——生育阶段序号

1.4.3 模型参数检验

将采用回归分析方法获得的经验系数及敏感性指数或敏感系数代入各水分生产函数模型,以该模型估算不同耗水水平下各年产量,并与相应耗水水平下遥感反演的冬小麦产量进行对比。本研究采用 F 检验法及复相关系数检验法对各模型的模拟效果进行检验,并考虑在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平与 $\alpha = 0.01$ 的极显著水平。当 $F \geqslant F_{0.05}(n, m-n-1)$ 及 $F \geqslant F_{0.01}(n, m-n-1)$ 时,拟合效果分别为显著与极显著;反之说明二者线性相关不密切。方程拟合精度由剩余标准差 S 检验,S 越小,则该模型模拟作物产量越精确。复相关系数检验法,r 值越接近 1,证明模型拟合效果越好。所用统计指标计算及全生育期各水分生产函数的拟合都是在 SPSS 软件中完成。

对 F 值、剩余标准差 S 及复相关系数 r 等统计指标的计算过程说明参照文献[7]。

1.5　研究数据及预处理

本研究采用的数据包括：①2011 年 10 月—2012 年 6 月的遥感耗水量数据，是基于 ETWatch 系统生产的 30 m 分辨率蒸散量数据，时间尺度为月。②冬小麦作物分布图，空间分辨率为 30 m，统一为 Albers 投影，Arcshape 格式存储。③遥感作物产量数据，这里指经济产量，即作物单位面积上所收获的有经济价值的主产品质量，是作物总干物质量的一部分，两者之间的比例直接影响着经济价值。当干物质达到最大值的 8% 左右，收获指数保持不变[17]，表明作物的收获指数在干物质变化区间内很快就达到稳定。很多研究将收获指数设定为常数，中国粮食作物的收获指数在 0.35 ~ 0.45 之间，大兴区冬小麦全年的收获指数采用 0.4。小麦干物质量数据采用 CASA 模型计算，该方法已在山东禹城和河南封丘等地方进行了验证，并对水分胁迫因子进行了改进[18]。④因遥感数据时间分辨率为月，并结合大兴区冬小麦生长发育情况，对冬小麦的生育阶段进行划分，即出苗期为 10 月、越冬期为 11 月—翌年 2 月、拔节期为翌年 3 月、抽穗期为翌年 4 月、扬花期为翌年 5 月、黄熟期为翌年 6 月。根据各年的冬小麦年均耗水量分布情况，以 10 mm 为分组间隔，将耗水量相近的像元进行组合，把冬小麦年均耗水量分成 180 ~ 190 mm、…、250 ~ 260 mm、…、320 ~ 330 mm、…、410 ~ 420 mm、…，然后以分类获得的不同水分处理下冬小麦年耗水量为 mask，对冬小麦各生育阶段耗水量、生育期内耗水总量、遥感产量进行相应分类均值计算，各生育阶段耗水量、生育期内耗水总量及遥感产量的最大值取自不同组合下的分类均值计算结果，以此为基础构造分生育阶段水分生产函数中的相对产量（Y/Y_m）及对应的相对耗水量（$E_{T_i}/E_{T_{mi}}$）。

2　结果与分析

2.1　全生育期水分生产函数模型

利用分类均值获得产量及其相应的耗水量值，分别采用直线模型、抛物线模型、D－K 模型及指数模型进行模拟，并获得冬小麦对应的各全生育期模型的经验系数，具体如下：

直线模型　$Y = 5\,629.015 + 5.051E_T$　（10）

抛物线模型

$$Y = -2\,639.048 + 54.855E_T - 0.073E_T^2 \quad (11)$$

D－K 模型　$1 - \frac{Y}{Y_m} = 0.3087\left(1 - \frac{E_T}{E_{T_m}}\right)$　（12）

指数模型　$Y = 5\,777.116e^{0.001E_T}$　（13）

冬小麦各全生育期模型检验参数见表 1，各模型都能通过 F 检验，且模拟效果达极显著水平。与其它模型相比，采用抛物线模型模拟的 r 值最大达 0.95，而剩余标准差 S 最小仅为 122.11 kg/hm^2，所以采用抛物线模型模拟效果最好；并且模拟获得抛物线模型能较好反映冬小麦耗水与产量的响应关系，即在一定阈值范围内 Y 随耗水量线性增加，当耗水量超过该阈值时冬小麦产量增加趋势减缓，甚至出现下降趋势。为此，模拟冬小麦全生育期内区域耗水总量与产量关系，推荐采用抛物线模型。

表 1　全生育期水分生产函数模型及其检验参数

Tab.1　Crop water product function models for the whole growth period and its validation parameters

模型类型	r	F	S/(kg·hm^{-2})	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
直线模型	0.74	18.63	256.11	4.49	8.53
抛物线模型	0.95	66.96	122.11		
D－K 模型	0.74	18.63	256.11		
指数模型	0.73	16.88	263.05		

2.2　分生育阶段水分生产函数模型

冬小麦分生育阶段水分生产函数模型的敏感性指标与检验参数见表 2。通过比较模型校验参数发现，Stewart 模型的 F 值与复相关系数最大，且剩余标准差 S 最小，所以在大兴区推荐采用 Stewart 模型作为冬小麦分生育阶段水分生产函数模型较为合理。依据 Stewart 模型模拟获得的敏感性系数表明，冬小麦在抽穗期敏感系数最大达 0.499 1，说明在该阶段对缺水最敏感，其次扬花-成熟期，而在出苗-拔节期敏感性系数很小或为负值。在出苗-拔节期，冬小麦植株长势弱，适度缺水利于促进根系生长发育，具有增产效应；抽穗灌浆期是冬小麦穗数与籽粒产量形成的关键期，且该生育阶段群体叶面积与光合速率都较大，冬小麦耗水急剧增加，该阶段缺水不利于光合作用与籽粒产量形成；扬花-成熟期是冬小麦籽粒单重形成的重要阶段，该阶段气候炎热，冬小麦需耗水量大，对缺水较敏感。所以，在与北京市大兴区类似的华北资源性缺水地区，冬小麦灌溉应优先满足抽穗灌浆期的需水，而在出苗-拔节期适度减少灌溉量，可达到节水增效目的。

3　讨论

以往作物水分生产函数的研究主要以试验站点监测数据为模拟基础，在站点上应用具有一定精度，但在大面积推广应用时因未充分考虑下垫面的时空异质性，存在区域代表性不足问题，使其在大范围应用受到限制；同时大部分研究都是局限于一种水分

表 2 分生育阶段水分生产函数模型的敏感指标与检验参数

Tab. 2 For different growing stage, crop water product function models' sensitive indexes and validation parameters

模型类型	出苗	越冬	拔节	抽穗	扬花	成熟	r	F	S/(kg·hm^{-2})
Jensen	0.072 6	-0.355 7	-0.271 9	0.460 7	0.237	0.155 2	0.98	401.43	72.78
Minhas	-0.153 9	0.060 6	-0.144 2	0.410 5	0.437 3	0.168 5	0.97	209.60	99.10
Blank	-0.240 7	-0.019 2	-0.332 6	0.526 4	0.293 5	1.931 5	0.97	236.81	93.58
Stewart	0.054 3	-0.325 4	-0.517 1	0.499 1	0.303 9	0.380 1	0.99	516.20	64.44
Singh	-0.239 2	0.127 8	-0.172 4	0.470 7	0.440 8	0.509 1	0.97	264.30	88.86

注：$F_{0.05}=4.49$；$F_{0.01}=8.53$。

生产函数模型进行模拟，开展模型对比研究比较少。采用遥感法获得的水分生产函数模型，不仅能节省田间试验费用与大量劳力，还可排除田间试验干扰因素，解决了采用传统方法获得的水分生产函数模型区域代表性差问题，研究获得的水分生产函数模型可用于更大空间尺度上作物耗水与产量的模拟，对于作物宏观估产及其区域农业用水的有效管理具有指导意义。

4 结论

（1）与直线模型、D－K 模型及指数模型相比，采用抛物线模型模拟冬小麦全生育期耗水量与产量的关系，其相关系数最大达 0.95，剩余标准差 S 最小仅为 122.11 kg/hm^2；且模拟结果能通过 F 检验，模拟效果达极显著水平。所以，冬小麦全生育期水分生产函数模型推荐采用抛物线模型。

（2）通过比较模型校验参数表明，在大兴区宜选用 Stewart 模型作为冬小麦分生育阶段的水分生产函数模型；华北冬小麦对水分最敏感的阶段是抽穗期，依次为扬花-成熟期，而出苗-拔节期最小。所以，在与北京市大兴区类似的华北资源性缺水地区，冬小麦灌溉应优先满足抽穗灌浆期的需水，而在出苗-拔节期适度减少灌溉量，可达到节水增效目的。

参 考 文 献

1 孙宏勇，刘昌明，张永强，等. 不同时期干旱对冬小麦产量效应和耗水特性研究[J]. 灌溉排水学报，2003，22(2)：13－16.
Sun Hongyong, Liu Changming, Zhang Yongqiang, et al. Effects of water stress in different growth stage on water consumption and yield in winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 13－16. (in Chinese)

2 Zhang H, Wang X, You M, et al. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 1999, 19(1): 37－45.

3 王淑芬，张喜英，裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报，2006，22(2)：27－32.
Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 27－32. (in Chinese)

4 刘坤. 作物水分生产函数常用模型及灌溉制度优化概述[J]. 安徽农业科学，2010，38(11)：5521－5522，5555.
Liu Kun. Introduction of common models of crop water production function and optimization of irrigation system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(11): 5521－5522, 5555. (in Chinese)

5 刘昌明，周长青，张士峰，等. 小麦水分生产函数及其效益的研究[J]. 地理研究，2005，24(1)：1－10.
Liu Changming, Zhou Changqing, Zhang Shifeng, et al. Study on water production function and efficiency of wheat[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 1－10. (in Chinese)

6 刘增进，李宝萍，李远华，等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报，2004，20(4)：58－63.
Liu Zengjin, Li Baoping, Li Yuanhua, et al. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 58－63. (in Chinese)

7 冯绍元，罗遵兰，左海萍. 河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J]. 灌溉排水学报，2005，24(4)：58－61.
Feng Shaoyuan, Luo Zunlan, Zuo Haiping. The study of water product function of winter wheat in Hebei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 58－61. (in Chinese)

8 罗遵兰，冯绍元，左海萍. 山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J]. 灌溉排水学报，2005，24(1)：16－19，27.
Luo Zunlan, Feng Shaoyuan, Zuo Haiping. The study of water product function of winter wheat in Shanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(1): 16－19, 27. (in Chinese)

9 刘英，马保东，吴立新，等. 基于 NDVI－ST 双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J]. 农业机械学报，2012，43(5)：55－63.
Liu Ying, Ma Baodong, Wu Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI－ST space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 55－63. (in Chinese)

10 何亚娟，潘学标，裴志远，等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J]. 农业机械学报，2013，44

(5):226 – 231.
He Yajuan, Pan Xuebiao, Pei Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT Remote Sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):226 – 231. (in Chinese)

11 彭致功,刘钰,许迪, 等. 基于 RS 数据和 GIS 方法估算区域作物节水潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):8 – 12.
Peng Zhigong, Liu Yu, Xu Di, et al. Application of RS and GIS technique for water-saving potential estimation of regional crops [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):8 – 12. (in Chinese)

12 彭致功,刘钰,许迪,等.农业节水措施对地下水涵养的作用及其敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7):36 – 41.
Peng Zhigong, Liu Yu, Xu Di, et al. Effect of agricultural water-saving measures on the quantity of groundwater extraction and recharge and its sensitivity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):36 – 41. (in Chinese)

13 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜. ETWatch 的模型与方法[J]. 遥感学报, 2011, 15(2):224 – 239.
Wu Binfang, Xiong Jun, Yan Nana. ETWatch : models and methods[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2):224 – 239. (in Chinese)

14 Wu Binfang, Yan Nana, Xiong Jun, et al. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: a case study in Hai Basin of China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436 – 437: 67 – 80.

15 Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1):74 – 88.

16 李贺丽, 罗毅. 作物光能利用效率和收获指数时空变化研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12):3093 – 3100.
Li Heli, Luo Yi. Spatiotemporal variations of crop radiation use efficiency and harvest index research progress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009, 20(12):3093 – 3100. (in Chinese)

17 Howell T A. Relationship between crop production and transpiration, evapotranspiration and irrigation[M] // Irrigation of Agriculture Crop Agronomy Monograph, No 30, 2009: 292 – 427.

18 闫娜娜, 吴炳方, 杜鑫. 农田水分生产率估算方法及应用[J]. 遥感学报, 2011, 15(2):298 – 312.
Yan Nana, Wu Bingfang, Du Xin. Estimation of agricultural water productivity and application[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2):298 – 312. (in Chinese)

Estimation of Regional Water Product Function for Winter Wheat Using Remote Sensing and GIS

Peng Zhigong　Liu Yu　Xu Di　Wang Lei　Lei Bo　Du Lijuan
(*State Key Laboratory of Simulation of Water Cycle in River Basin*,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The model of crop water product function can be used as the foundation in rational allocation of agricultural water resources, optimal irrigation schedule and quota management of agricultural irrigation water. In order to get the reasonable model and parameters of crop water product function for study area, the comparison was made among several models of the crop water product functions based on the data of remote sensing ET and yield for winter wheat. Here, four models of the crop water product functions for the whole growth period were selected such as linear model, parabola model, D – K model, and exponential model. At the same time, five models of the crop water product functions for different growing stage were selected such as Jensen, Minhas, Blank, Stewart, and Singh model. The results showed that the parabola model was recommended for the model of the crop water product functions for the whole growth period. The Stewart model was recommended for the model of the crop water product functions for different growth stages. The most sensitive stage to water-stress was heading stage, followed by flowering to mature stage, and the least by the seeding emergence to jointing stage. Therefore, in order to save water and increase water use efficiency, water demand in heading stage should be top-priority, while water demand in the seeding emergence to jointing stage should be decreased.

Key words: Winter wheat　Yield　Crop water product function　Remote sensing