

基于 CWSI 和土壤水分修正系数的冬小麦田 土壤含水量估算*

张振华^{1,2} 蔡焕杰¹ 杨润亚²

(1 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 烟台师范学院地理与资源管理学院, 山东烟台 264025)

摘要 2000 年 10 月~ 2001 年 7 月在西北农林科技大学灌溉实验站冬小麦田内, 进行了利用作物冠层温度定量估算冬小麦田土壤含水量的试验研究。根据水分亏缺条件下作物蒸发蒸腾量计算公式及作物水分胁迫指标(CWSI)的定义, 得到了基于 CWSI 和土壤水分修正系数 K_s 的不同生育阶段冬小麦田土壤含水量估算公式, 其中 K_s 采用了康绍忠的幂函数形式(K-M)及 Dooreboos 的线性公式(D-M)。用该公式对冬小麦田土壤含水量在 4 个生育阶段进行了估算, 并对估算值和实测值进行对比和误差分析。分析结果表明: 在出苗越冬期和越冬-返青期 K-M 和 D-M 模型对土壤水分的估算偏高, 其原因是由于麦田土地裸露导致 CWSI 观测中出现了较大误差; 在返青-抽穗开花期和灌浆-成熟期 K-M 模型估算冬小麦根层土壤含水量较适宜, 误差在 15% 以内, D-M 模型误差较大达到 30%。

关键词 作物水分胁迫指标(CWSI); 土壤水分修正系数; 冬小麦田; 土壤含水量

中图分类号 S275.6

文献标识码 A

土壤水分的监测与估算对于研究土壤水分运动、作物水分状况以及灌溉制度都具有重要意义, 是农业水管理的重要研究领域^[1, 2]。对田间土壤水分监测方法的研究已经进行了一个多世纪, 出现了多种测定方法, 包括张力计法、中子仪法、取土烘干法、热脉冲法以及土壤电阻法等^[3, 4]。以上方法均是对土壤的单点测量或估算, 而不是对某一区域土壤水分状况的整体反映。张力计和电阻法并没有直接测定土壤水分, 而是通过测量土壤基质势或土壤电阻的方式经过换算间接得到土壤水分状况, 因此利用张力计测量含水率时土壤水分特征曲线是必须事先已知的。中子水分仪体积较大, 并要预先将中子管埋入土中, 此外对质地不同的土壤还要进行田间标定。取土烘干法是传统的测量方法, 其优点是具有较高的精确度, 但同时存在费时费力、破坏土壤结构、不能够连续定位观测的缺点。遥感技术是一种可用于土壤水分监测的方法, 该方法包括辐射通量法、微波法、雷达成像以及红外测温法^[5, 6]。本研究目的在于探索利用作物水分胁迫指标(Crop Water Stress Index, CWSI)定量估算作物根层土壤水分状况

的适用性及其最佳观测时间, 建立 CWSI 与土壤含水量之间的定量关系, 从而克服了利用 CWSI 进行灌溉决策时存在的只能确定灌溉时间, 而不能确定灌水量问题^[7, 8], 为利用红外测温法对作物的田间水分管理提供更为全面的依据。

1 理论分析

胁迫条件下作物的实际蒸发蒸腾量 ET_a 是充分供水条件下的作物蒸发蒸腾量 ET_p 乘以土壤水分修正系数 K_s , 即

$$ET_a = K_s ET_p \quad (1)$$

K_s 有不同的算法, 主要有以下几种

Dooreboos 提出的线性公式^[9]:

$$K_s = (\theta - \theta_{wp}) / (\theta_j - \theta_{wp}) \quad (2)$$

上式中 θ 为土层的平均含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{wp} 为凋萎含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_j 为毛管断裂含水量 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)。康绍忠等曾认为土壤水分修正系数是相对有效含水量的幂函数^[10]:

* 国家高技术研究发展计划项目(2002AA2Z4031)及旱区农业水土工程教育部重点实验室访问学者基金项目资助

作者简介: 张振华(1971~), 男, 河北藁城人, 博士, 教授, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: zhangzh71@163.com

收稿日期: 2004-06-04; 收到修改稿日期: 2004-12-02

$$K_s = c((\theta - \theta_{wp}) / (\theta - \theta_{wp}))^d \quad (3)$$

式中: θ 、 θ_{wp} 和 θ_j 的含义同(2); c 、 d 为经验常数, 随作物生育阶段和土壤条件而异。理论上说, 当 $(\theta - \theta_{wp}) / (\theta - \theta_{wp}) = 1.0$ 时, $K_s = 1.0$, 亦即系数 c 应等于 1.0。

Jackson 等人在能量平衡原理的基础上导出了一个以冠层温度为基础的作物水分胁迫指标 CWSI 的计算模式^[11]:

$$CWSI = 1 - ET_a / ET_p \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可得:

$$K_s = ET_a / ET_p = 1 - CWSI \quad (5)$$

式(2)、式(3)代入式(5), 并记 $\theta_j - \theta_{wp} = \Delta\theta$, 分别得到了线性形式(记为 D-M)和幂函数形式(记为 K-M)土壤水分修正系数对应的土壤含水量 θ 和 CWSI 的关系:

$$\text{K-M:} \quad \theta = (1 - CWSI)^{1/d} \Delta\theta + \theta_{wp} \quad (6)$$

$$\text{D-M:} \quad \theta = (1 - CWSI) \Delta\theta + \theta_{wp} \quad (7)$$

2 材料与方法

2.1 试验区概况

试验于 2000 年 10 月~ 2001 年 7 月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉实验站内进行。试验田土壤质地为中壤土, 1 m 土层的田间持水量为 24%, 凋萎含水量为 6.85%, 以上均为重量含水量。1 m 土层平均干容重为 1.44 g cm^{-3} 。该站属渭河三道台塬地区, 地下水埋藏较深, 向上补给量可忽略不计。实验站内设县级气象站, 对气温、湿度、降水、日照、水面蒸发、风速、气压和地温等气象资料进行常规观测。

2.2 试验处理设计及观测项目

本研究设 3 个水分处理, 处理 1、2、3 的 0~ 100 cm 土壤层含水率下限分别设定为 75%、65% 和 55% 田间持水量。用取土烘干法和中子仪在灌前及灌后分层测定 0~ 100 cm 土壤含水量。用美国产便携式红外测温仪测定作物冠层温度 (T_c), 空气温度 (T_a), 为了消除太阳方位角及作物种植方向对观测值的影响, 每个处理在 4 个不同方向与地面成 45° 进行观测, 每次取 4 个测定值的平均值代表该处理的实际情况。每天对各处理在 12:00~ 16:00 进行观测, 并在不同的生育阶段内, 选取一晴朗的无风天气测取上述各参数的日变化过程, 从 8:00 开始到 20:00 结束, 每 2 h 测定 1 次。空气湿度采用阿兹曼

通风干湿表在地面以上 1.5 m 处测定。

3 结果与分析

3.1 CWSI 的计算方法

Jackson 在能量平衡的基础上推导出的以冠层温度为基础的作物水分胁迫指标 CWSI 的计算模式为式(4)。利用 Jackson 模式计算作物水分胁迫指标需要测量大量的参数, 其中作物最小冠层阻力的取值确定相当困难, 而且几乎是不可能的。因此, 本研究将利用参数少而计算较为简易的 Idso 作物水分胁迫指标模式对 CWSI 进行计算。Ehreler 在 1973 年就发现充分湿润条件下作物的冠层温度 T_c 和气温 T_a 之差 ($T_c - T_a$) 和水汽饱和差 VPD 之间存在线性关系, Idso 在多种作物和非常大的 VPD 变化条件之下进一步验证了这一结论。Idso 等将充分供水时 ($T_c - T_a$) 与 VPD 之间的这一关系定义为下基线 (Lower Baseline)。随着水分胁迫的加剧, ($T_c - T_a$) 值变大且位于下基线之上, 当蒸腾完全停止时, ($T_c - T_a$) 将达到一个极限值, 他将这一极限值定义为上基线 (Up Baseline)。利用 Idso 作物胁迫指标定量诊断作物的水分状况关键在于确定充分供水条件下的下基线。根据对冬小麦不同生育阶段内高水处理的 (0~ 100 cm 土壤层含水率下限为 75% 田间持水量) 冠-气温差 ($T_c - T_a$) 及水汽饱和差 VPD 实测数据回归分析, 建立了冬小麦 CWSI 下基线 T_L 在各生育阶段的特定表达式:

$$T_L: T_c - T_a = 0.4355 - 2.6132 \text{ VPD} \quad (R = 0.932, n = 35) \quad (8)$$

根据实际观测结果, 本研究将冬小麦的 CWSI 上基线 T_u 取为 4.8°C 。根据实测的 VPD 值利用(8)可计算出 T_L , 把 $T_c - T_a$ 、 T_L 及 T_u 代入下式即可计算出 CWSI, 为方便起见记 ($T_c - T_a$) 为 ΔT :

$$CWSI = (\Delta T - T_L) / (T_u - T_L) \quad (9)$$

当土壤充分供水时作物没有发生水分胁迫, ΔT 位于下基线上即 $\Delta T = T_L$, 此时 CWSI 等于 0。随着土壤含水量因作物蒸发蒸腾消耗而减少时, 作物蒸腾所需水分受到限制导致蒸腾强度降低, 从而引起 T_c 的升高, ΔT 将会位于下基线之上, 此时 CWSI 大于 0。当土壤严重缺水导致作物蒸腾完全停止时, ΔT 将会位于上基线之上即冠-气温差 $\Delta T = T_u$, 此时 CWSI 等于 1。从以上分析可以知道 CWSI 值在 0~ 1 之间变化, 其值越大表示作物缺水越严重, 因此

CWSI 是可定量诊断作物水分的有效指标。

3.2 利用 CWSI 估算土壤含水率最佳时间的确定

表 1 CWSI 及土壤含水率计算值日变化动态

Table 1 Diurnal variation of crop water stress index (CWSI) and calculated soil water content

时间 Time	CWSI	土壤含水率计算值 (%) Calculated soil water content
08:00	0.12	34.19
10:00	0.21	29.81
12:00	0.32	25.21
14:00	0.35	24.08
16:00	0.30	25.99
18:00	0.24	28.48
20:00	0.10	35.25

在一天中, 作物缺水指标 CWSI 受太阳辐射、水汽饱和差及相对湿度的影响, 而有一个规律性的日变化过程(表 1)。以抽穗-灌浆期(2004-05-06)的观测结果为例说明作物胁迫指标的日变化规律: 在早晨 8:00 时 CWSI 值较低为 0.12, 随太阳辐射加强, 气温增高, CWSI 逐渐增加, 在下午 14:00 最大值 0.35, 此后又逐渐变小, 到 20:00 CWSI 又降低为 0.1。根据式(6)或式(7)来计算土壤含水量, 势必导致计算结果在一天内有一个周期性的变化, 下面以式(6)的计算结果(表 1)为例进行分析: 8:00 和 20:00 的 CWSI 值较低, 对应的含水量计算值(K-M)较高分别为 34.19% 和 35.25%; 12:00、14:00 和 16:00 的 CWSI 值较高, 对应的含水量计算值(K-M)相应较低分别为 25.21%、24.08% 和 25.99%, 利用不同时刻的 CWSI 计算出的土壤含水量差别较大, 变化幅度最大达 26%; 而土壤水分日变化幅度相对很小(图 1), 对该日相应地块 0~100 cm 土层土壤含水率利用中子水分仪进行了动态测定, 0~100 cm 土层平均含水率 8:00 为 25.51%, 到 20:00 降低为 25.05%, 该阶段内土壤含水率的变化幅度不到 2%。根据以上结果可以知道, 利用 12:00~16:00 阶段的 CWSI 计算土壤含水量较适宜, 该阶段内太阳辐射最强烈, 作物蒸腾强度最大, 作物与土壤水分的供需矛盾最突出, 此时影响 CWSI 的主导因素才是根层土壤含水率, 所以用该时段的 CWSI 来估算土壤含水量最合适。

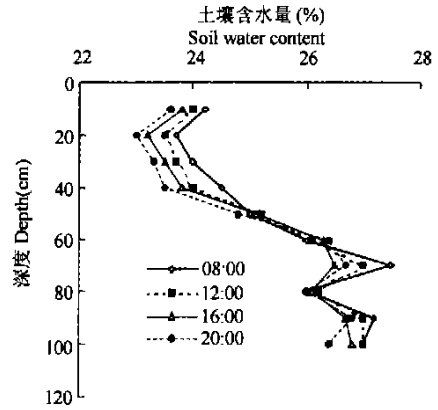


图 1 冬小麦田土壤含水量剖面分布动态(2004-05-06)

Fig. 1 Diurnal variations of soil water content in 0~100 cm soil layer in winter wheat field

3.3 利用 CWSI 估算土壤含水率精度分析

根据冬小麦的生长发育过程将其划分为 4 个生长阶段, 即出苗-越冬期、越冬-返青期、返青-抽穗开花期和灌浆-成熟期。根据康绍忠对该试验田冬小麦研究结果^[10], 临界土壤含水量在冬小麦 4 个生长阶段分别为 29.97%、29.78%、24.96% 和 27.93%, 凋萎含水量为 9.24% (以上均为容积含水量)。土壤水分修正函数式(3)中的参数在冬小麦 4 个生长阶段分别为 0.781、1.513、0.351 和 0.958。根据以上数据可以得到利用式(6)和式(7)计算冬小麦根层土壤含水量的具体表达式。

$$K-M: \text{出苗-越冬期 } \theta = 0.21(1 - CWSI)^{1.28041} + 0.0924$$

$$\text{越冬-返青期 } \theta = 0.21(1 - CWSI)^{0.6609} + 0.0924$$

$$\text{返青-抽穗开花期 } \theta = 0.16(1 - CWSI)^{2.849} + 0.0924$$

$$\text{灌浆-成熟期 } \theta = 0.19(1 - CWSI)^{1.044} + 0.0924$$

$$D-M: \text{出苗-越冬期 } \theta = 0.21(1 - CWSI) + 0.0924$$

$$\text{越冬-返青期 } \theta = 0.21(1 - CWSI) + 0.0924$$

$$\text{返青-抽穗开花期 } \theta = 0.16(1 - CWSI) + 0.0924$$

$$\text{灌浆-成熟期 } \theta = 0.19(1 - CWSI) + 0.0924$$

根据冬小麦的生长发育情况,考虑到作物覆盖率对作物冠层温度观测的影响,将冬小麦的生育期分为两个大的生育阶段即出苗-返青期(包括出苗-越冬期和越冬-返青期)和返青-成熟期(包括返青-抽穗开花期和灌浆-成熟期)。

根据K-M和D-M土壤水分修正函数模型利用实测的CWSI数据分别计算了出苗返青期冬小麦根层水分含量,并同实测的0~100cm土层土壤含水率结果进行了比较(图2),从图可以看出数据点较为分散,K-M和D-M计算值和实测值之间线性关系不显著,相关系数较低。误差分析表明(图2),K-M和

D-M模型对土壤水分的估算倾向于偏高,其中K-M的最大误差率可达到50%以上,而D-M的最大误差率接近70%。造成出现上述结果的原因推测有以下两种可能:临界土壤含水量取值是否合适,CWSI数据观测中是否出现了较大误差。经分析后认为第二种可能性较大,因为在出苗-越冬期冬小麦生长较缓慢,叶面积指数较低而导致地面裸露,利用红外测温仪测量冬小麦冠层温度时不可避免的照射到地面,相对于冠层而言地面温度的变化更剧烈,因此导致利用冠层温度资料计算的CWSI值偏离实际的数值。

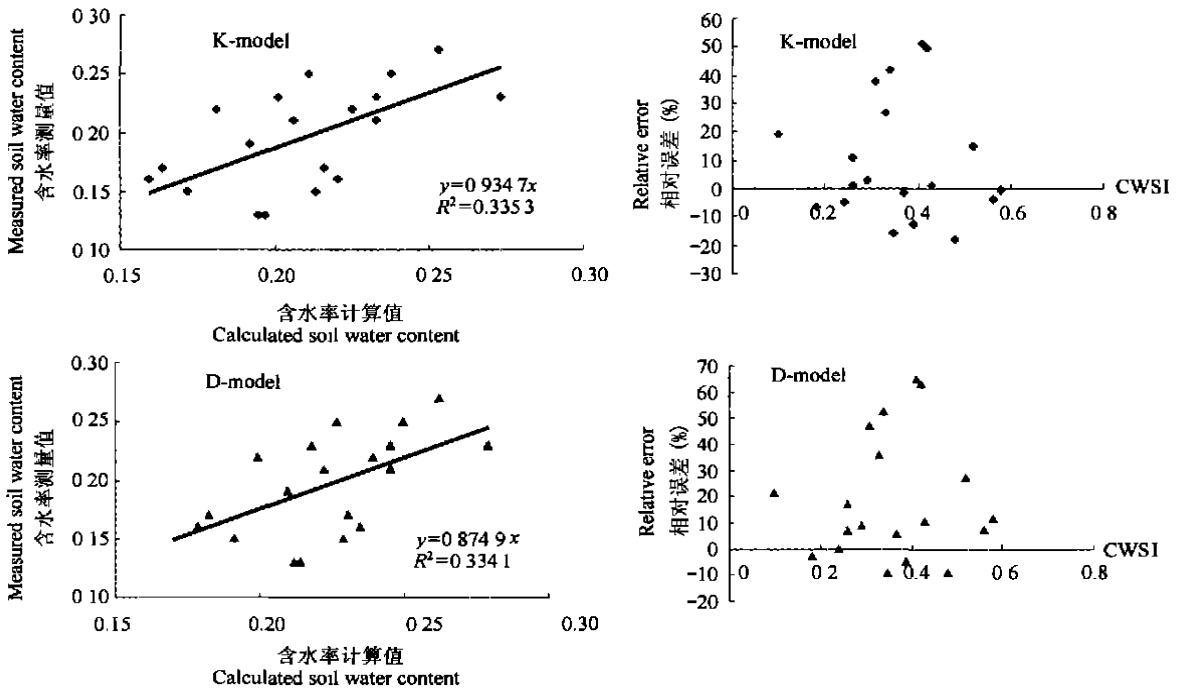


图2 出苗-返青期冬小麦田土壤水分估算不同模型结果与误差分析

Fig.2 Estimated soil water contents of winter wheat field and error analysis using K-model and D-model in the seedling-regreening stages

根据K-M和D-M土壤水分修正函数模型利用实测的CWSI分别计算了返青-成熟期冬小麦根层水分含量,并同实测的0~100cm土层土壤含水率结果进行了比较(图3),从图可以看出数据点较为集中,K-M和D-M计算值和实测值之间线性关系显著,相关系数较高。误差分析表明,K-M模型对土壤水分的估算倾向于偏高,最大误差率在15%以下,

而K-M模型对土壤水分的估算倾向于偏低,特别是在CWSI数值较小阶段,跟实测值相比该模型的估计值普遍偏低,最大误差率大于30%。上述结果表明,在返青-成熟期利用康绍忠的幂函数土壤水分修正模型估算冬小麦根层土壤含水量较适宜,精度保持在15%以内。

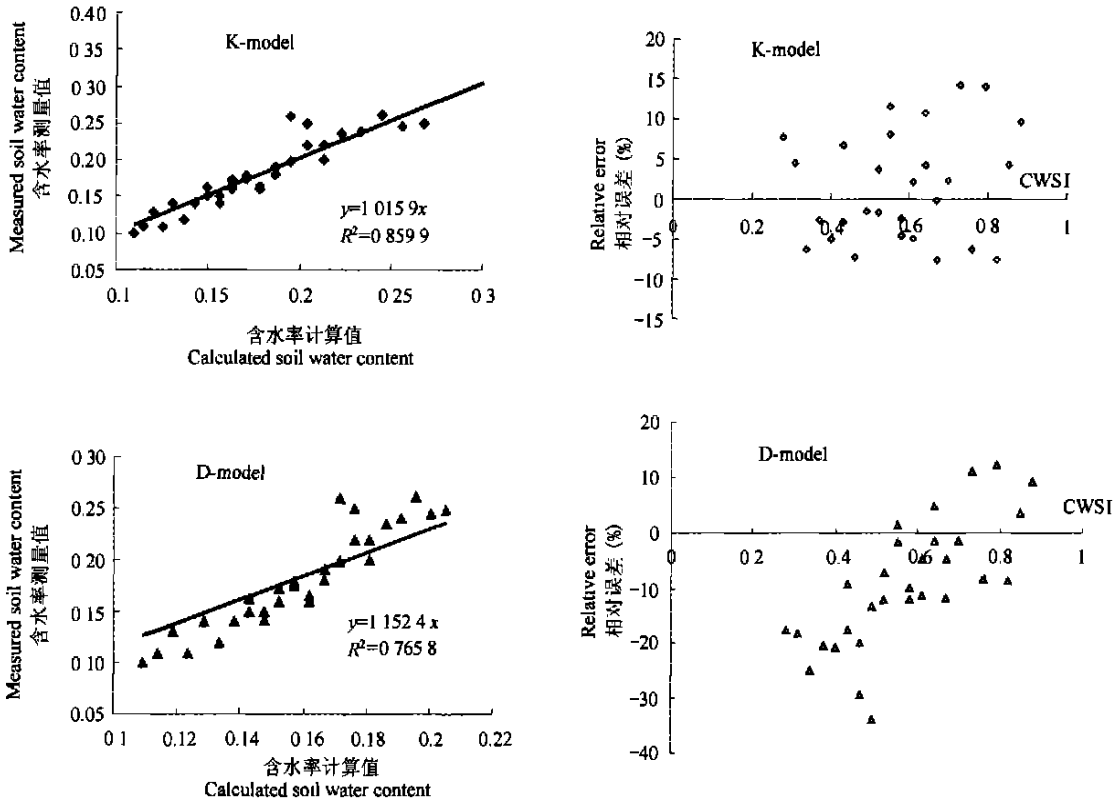


图3 返青-成熟期冬小麦田土壤水分估算不同模型结果与误差分析

Fig. 3 Estimated soil water contents of winter wheat field and error analysis using K-model and D-model in the regreening-maturing stages

4 结论

1) 在一天中作物缺水指标 CWSI 受太阳辐射、水汽饱和差及相对湿度的影响, 而有一个规律性的日变化过程, 而土壤水分日变化幅度相对很小。利用 12:00~16:00 阶段的 CWSI 值计算土壤含水量较适宜, 该阶段内太阳辐射最强烈, 作物蒸腾强度最大, 作物与土壤水分的供需矛盾最突出, 此时影响 CWSI 的主导因素才是根层土壤含水率。

2) 出苗返青期 K-M 和 D-M 计算值和实测值之间线性关系不显著, 相关系数较低。K-M 和 D-M 模型对土壤水分的估算倾向于偏高, 其中 K-M 的最大误差率可达到 50% 以上, 而 D-M 的最大误差率接近 70%。

3) 返青-成熟期 K-M 和 D-M 计算值和实测值之间线性关系显著, 相关系数高。K-M 模型对土壤水分的估算最大误差率在 15% 以下, 而 D-M 模型最大误差率大于 30%。在返青-抽穗开花期利用康绍忠的幂函数土壤水分修正模型估算冬小麦根层土壤含

水量较适宜。

参考文献

- [1] Kosmas C, Marathianou M, Gerontidis S, *et al.* Parameters affecting water vapor adsorption by the soil under semi-arid climatic conditions. *Agric. Water Manage.*, 2001, 48: 61~78
- [2] Li F S, Kang S Z. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, applied nitrogen and soil moisture on dry matter accumulation and nitrogen uptake in spring wheat. *Pedosphere*, 2002, 12(3): 207~218
- [3] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agric. Water Manage.*, 2001, 47: 69~75
- [4] Zhang H, Oweis T. Managing water productivity in semi-arid areas. *Agric. Water Manage.*, 1999, 38: 195~211
- [5] Bindlish R, Borros A P. Multi-frequency soil moisture inversion from SAR measurements with the use of IEM. *Remote Sensing Environ.*, 2000, 71: 67~88
- [6] Ben-Asher J, Phene C J, Kinari A. Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agric. Water Manage.*, 1992, 22: 379~390
- [7] 李韵珠, 陆锦文, 吕梅, 等. 作物干旱指数(CWSI)和土壤干旱指数(SWSI). *土壤学报*, 1995, 32(2): 202~209. Li Y Z, Lu J W, Lu M, *et al.*. Crop water stress index(CWSI) and soil water

- stress index (SWSI) (In Chinese). *Acta Pedologica sinica*, 1995, 32(2): 202~ 209
- [8] 张振华, 蔡焕杰, 柴红敏. 不同生育时期对作物缺水指标的影响. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(1): 77~ 80. Zhang ZH, Cai H J, Cai H M. The influence of growth stages on CWSI (In Chinese). *Agricultural Research in Arid Areas*, 2002, 20(1): 77~ 80
- [9] Doorebos J, Pruitt W O. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev.)*, FAO, Rome, Italy, 1977. 144
- [10] 康绍忠, 熊运章. 干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法. *地理学报*, 1990, 45(4): 475~ 483. Kang S Z, Xiong Y Z. The calculation method of wheat ET under water deficit (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(4): 475~ 483
- [11] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 1981, 17: 1 133~ 1 138

ESTIMATION OF SOIL MOISTURE OF WINTER WHEAT FIELD BASED ON CWSI AND SOIL WATER CORRECTION COEFFICIENT

Zhang Zhenhua^{1,2} Cai Huanjie¹ Yang Runya²

(1 *The Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering, Northwestern Science and Technical University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(2 *The Geography and Resource Management College of Yantai Normal University, Yantai, Shandong 264025, China*)

Abstract Relationship between crop water stress index (CWSI) and soil water content in irrigated winter wheat field was investigated at the Irrigation Experiment Station of the Northwestern Science and Technical University of Agriculture and Forestry during the cropping season from October 2000 to July 2001. Based on the formula for calculation of evapotranspiration of a crop under water stress and the definition of CWSI, a CWSI and SWCC-based equation for estimation of soil water content in the winter wheat field at different vegetative stages was worked out using the Doorebos model (D-M) and Kang Shaozhong model (K-M). The experiment results show: the D-M and K-M both overestimated soil moisture during the seedling-regreening stages and the error ratio reached 70% and 50%, respectively; and the K-M was inclined to overestimate while D-M was inclined to downestimate soil moisture during the regreening-maturing stage and the error ratio could reach 15% and 30%, respectively.

Key words CWSI (Crop water stress index); SWCC (Soil water correction coefficient); Winter wheat field; Soil moisture