

对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证³

刘 钰

(中国水利水电科学研究院水利所)

L. S. Pereira

(葡萄牙里斯本技术大学农学院农业工程系)

摘 要: 作物系数是计算作物需水量必不可少的参数。该文介绍了 FAO 近期推荐的确定作物系数的 2 种计算方法, 一种是比较简单实用的分段单值平均法, 另一种是比较复杂但相对准确的双值作物系数法。用河北省雄县灌溉试验站的冬小麦、夏玉米田间土壤水分观测资料计算作物实际腾发量, 对上述 2 种确定作物系数的方法进行了检验。计算的作物系数与雄县试验站的实测结果基本接近, 从而初步证明了在缺少实测资料的情况下可以采用 FAO 推荐的方法确定华北地区主要作物的作物系数。

关键词: 作物系数; 计算方法; 水量平衡; 冬小麦; 夏玉米

计算作物需水量最经典也是最常用方法是作物系数法, 即

$$ET_c = K_{c1} ET_0 \quad (1)$$

式中 ET_c ——作物潜在腾发量; ET_0 ——参照腾发量; K_c ——作物系数。 ET_0 反映了气象条件对作物需水量的影响, K_c 则反映了不同作物的差别。为规范作物需水量的计算方法, 联合国粮农组织 (FAO) 在新近出版的《作物腾发量—作物需水量计算指南》(FAO 灌溉与排水手册—56 1998) 一书中, 不仅重新提出了计算 ET_0 的标准方法彭曼蒙特斯方法, 同时也推荐了计算作物系数的标准方法。本文用河北省雄县灌溉试验站的土壤水分观测资料计算作物实际腾发量, 对 FAO 推荐的计算作物系数的 2 种方法进行了检验。

1 作物系数

作物需水量包括土面蒸发和作物蒸腾 2 部分, 因此作物系数通常由 2 部分组成, 包含 3 项系数

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (2)$$

式中 K_{cb} ——基本作物系数, 是表土干燥而根区土壤平均含水率满足作物蒸腾时 ET_c/ET_0 的比值; K_s ——水分胁迫系数, 反映根区土壤含水率不足时对作物蒸腾的影响; K_e ——土面蒸发系数, 反映灌溉或降雨后因表土湿润致使土面蒸发强度短期内增加而对 ET_c 产生的影响。

FAO 推荐标准状态下(无水分胁迫)作物系数的计算方法有 2 种: 一是分段单值平均法, 这是一种比较简单实用的计算方法, 可用于灌溉系统的规划设计和灌溉管理; 二是双值作物系数法, 该方法需进行逐日水量平衡计算, 计算复杂, 需要的数据量大, 一般只用于灌溉制度的研究和田间水量平衡分析。

2 分段单值平均作物系数法

把作物系数的变化过程概化为几个阶段, 根据各阶段叶面蒸腾和土面蒸发的变化规律, 用一个时段平均值表示该阶段的作物系数

$$K_c = \overline{K_{cb}} + K_e \quad (3)$$

对大多数一年生作物, 作物系数的变化过程可概化为在 4 个阶段的 3 个值(见图 1)。4 个阶段的划分为: 初始生长期, 从播种到作物覆盖率接近 10%。此阶段内作物系数为 $K_{c_{ini}}$ 。快速发育期, 从覆盖率 10% 到充分覆盖(大田作物覆盖率达到 70% ~ 80%); 此阶段内作物系数从 $K_{c_{ini}}$ 提高到 $K_{c_{mid}}$ 。生育中期, 从充分覆盖到成熟期开始, 叶片开始变黄。此阶段内作物系数为 $K_{c_{mid}}$ 。成熟期, 从叶片开始变黄到生理成熟或收获。此阶段内作物系数从 $K_{c_{mid}}$ 下降到 $K_{c_{end}}$ 。

用分段单值平均法计算作物系数步骤如下:

第一步: 从“作物需水量计算指南”(FAO 256)的表中查出某种作物在特定标准条件下的作物系数。所谓特定标准条件是指在半湿润气候区(空气湿度 45%; 风速 2 m/s), 供水充足, 管理良好, 生长正常, 大面积高产的作物条件。表中给出了 84 种作物

收稿日期: 2000-03-29 修订日期: 2000-07-25

3 欧共体合作项目 ERB IC18CT970170 的部分研究内容

刘钰, 博士, 高级工程师, 北京市车公庄西路 20 号 中国水利水电科学院水利所, 100044

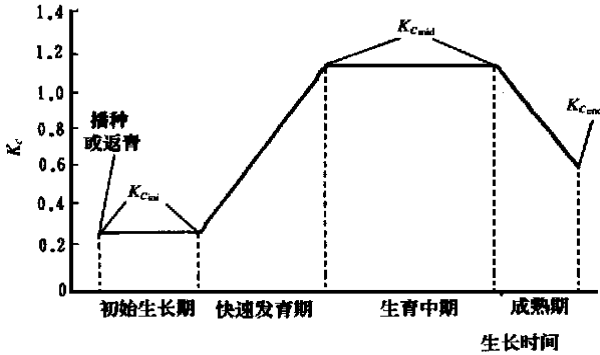


图 1 概化为时间平均值的作物系数变化过程线

Fig 1 Generalized time-average crop coefficient curve
的标准作物系数, 从表中查出冬小麦和夏玉米在不同阶段的作物系数值分别为

冬小麦: $K_{cini(Tab)} = 0.7$; $K_{cfro(Tab)} = 0.4$ (越冬期);
 $K_{cmid(Tab)} = 1.15$; $K_{cend(Tab)} = 0.4$

夏玉米: $K_{cini(Tab)} = 0.3$;
 $K_{cmid(Tab)} = 1.2$; $K_{cend(Tab)} = 0.6$

第二步: 按当地气候条件调节 K_{cmid} 和 K_{cend} 计算公式为^[5]

$$K_{cmid} = K_{cmid(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3} \quad (3)$$

$$K_{cend} = K_{cend(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3} \quad \text{当 } K_{cend(Tab)} > 0.45 \text{ 时} \quad (4a)$$

$$K_{cend} = K_{cend(Tab)} \quad \text{当 } K_{cend(Tab)} < 0.45 \text{ 时} \quad (4b)$$

式中 U_2 ——该生育阶段内 2 m 高度处的日平均风速; RH_{min} ——该生育阶段内日最低相对湿度的平均值; h ——该生育阶段内作物的平均高度。如果没有最低相对湿度的实测资料, RH_{min} 可用日最高气温 T_{max} 和最低气温 T_{min} 计算^[5]

$$RH_{min} = 100 \frac{\exp\left[\frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right]}{\exp\left[\frac{17.27T_{max}}{T_{max} + 237.3}\right]} \quad (5)$$

第三步: 计算初始生长期的 K_{cini} 在作物初始生长期土面蒸发占总腾发量的比重较大, 因此计算 K_{cini} 时必须考虑土面蒸发的影响, K_{cini} 的计算公式如下

$$K_{cini} = \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 \frac{t_w}{t_1} \quad (6a)$$

$$K_{cini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp\left[\frac{2(t_w - t_1)E_{so}\left(1 + \frac{REW}{TEW - REW}\right)}{TEW}\right]}{t_w ET_0}$$

$$t_w > t_1 \quad (6b)$$

式中 REW ——在大气蒸发力控制阶段蒸发的水量, mm; TEW ——一次降雨或灌溉后总计蒸发的水量, mm; E_{so} ——潜在蒸发率, $mm \cdot d^{-1}$; t_w ——灌溉或降雨的平均间隔天数, d; t_1 ——大气蒸发力控制阶段的天数 ($t_1 = REW / \bar{E}_{so}$), d。

$$TEW = Z_e(H_c - 0.5H_p) \quad \text{当 } ET_0 > 5 \text{ mm} \cdot \text{d} \text{ 时} \quad (7a)$$

$$TEW = Z_e(H_c - 0.5H_p) \sqrt{\frac{ET_0}{5}} \quad \text{当 } ET_0 < 5 \text{ mm} \cdot \text{d} \text{ 时} \quad (7b)$$

$$REW = 20 - 0.15Sa \quad \text{对 } Sa > 80\% \text{ 的土壤} \quad (8a)$$

$$REW = 11 - 0.06Cl \quad \text{对 } Cl > 50\% \text{ 的土壤} \quad (8b)$$

$$REW = 8 + 0.08Cl \quad \text{对 } Sa < 80\% \text{ 并且 } Cl < 50\% \text{ 的土壤} \quad (8c)$$

式中 Z_e ——土壤蒸发层的深度, 通常为 100 ~ 150 mm; H_c 和 H_p 分别为蒸发层土壤的田间持水量和凋萎点含水率; Sa 和 Cl 分别为蒸发层土壤中的砂粒含量和粘粒含量。

3 双值作物系数法

双值作物系数法把作物系数分成两部分分别计算, 一部分是反映作物叶面蒸腾的基本作物系数 K_{cb} , 另一部分是反映土面蒸发的系数 K_e 。

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (9)$$

双值作物系数法与时段平均单值作物系数法一样只适用于标准条件下的作物, 没有考虑受旱或盐碱等恶劣环境对作物蒸腾的不利影响。

1) 基本作物系数 K_{cb}

根据前述基本作物系数的定义, $K_{cb} ET_0$ 主要代表了 ET_c 中的作物蒸腾部分, 也有少部分干土层以下土壤水分的残余蒸发, 但其值很小。在“作物需水量计算指南”(FAO 256) 中给出了 84 种作物在特定标准条件下的 K_{cb} 值, 实际条件下的 K_{cb} 按下式修正

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3} \quad (10)$$

从 FAO 给出的表中查出冬小麦和夏玉米在不同阶段的基本作物系数值, 按雄县的气象资料修正得到

冬小麦: $K_{cbini} = 0.15$; $K_{cbmid} = 1.10$; $K_{cbend} = 0.49$

夏玉米: $K_{cbini} = 0.15$; $K_{cbmid} = 1.03$; $K_{cbend} = 0.48$

2) 土面蒸发系数 K_e

土面蒸发系数反映灌溉或降雨后因表土湿润致使土面蒸发强度短期内增加而对 ET_c 产生的影响, $K_e ET_0$ 代表了 ET_c 中的土面蒸发部分。灌溉或降雨后土面蒸发强度达到峰值, 随着表土变干, 土面蒸发强度迅速下降, K_e 可用下式计算

$$K_e = K_r (K_{\max} - K_{ch}) f_{ev} K_{\max} \quad (11)$$

式中 K_{\max} ——由大气蒸发力决定的作物系数上限; K_r ——蒸发衰减系数; f_{ev} ——蒸发面积比, 即没有作物覆盖并在降雨或灌溉后被充分湿润的土面积占总面积的比例, K_{\max} 由下式计算

$$K_{\max} = \max \left\{ 1.2 + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3}, K_{cb} + 0.05 \right\} \quad (12)$$

K_r 随蒸发水量增加而下降, 在蒸发的第一阶段(大气蒸发力控制阶段), $K_r = 1$ 。在蒸发的第二阶段(土壤供水能力控制阶段), K_r 可用下式计算

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad (13)$$

式中 $D_{e,i-1}$ ——从降雨或灌溉日到上一个计算日累计蒸发的水量。

式(11)中的蒸发面积比用下式计算

$$f_{ev} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (14)$$

式中 $1 - f_c$ ——露光面积比, 即没有作物覆盖的地表面积比例; f_w ——降雨或灌溉后地表充分湿润面积比。各种灌溉方式 f_w 的取值参见表 1。

表 1 不同灌溉方式地表充分湿润面积比(f_w)参考值

Tab 1 Common values of fraction (f_w) of soil surface wetted with different methods of irrigation

湿润方式	f_w
降雨	1.0
喷灌	1.0
池田灌	1.0
畦灌	1.0
窄沟灌	0.6~1.0
宽沟灌	0.4~0.6
隔行沟灌	0.3~0.5
滴灌	0.3~0.4

作物覆盖率 f_c 随作物叶面积指数增加而上升, 应采用作物遮光率实测值, 在没有实测资料的地方可用下式估算

$$f_c = \left[\frac{K_{cb} - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} \right]^{(1+0.5h)} \quad (15)$$

式中 K_{cb} ——该生育阶段的基本作物系数; K_{\min} ——没有覆盖的干燥裸地上的最小作物系数, $K_{\min} = 0.15 \sim 0.20$, 作物不同生长阶段 f_c 和 $1 - f_c$ 的参考值见表 2。

表 2 不同生长阶段的作物覆盖率

(f_c) 和露光面积比($1 - f_c$)的参考值

Tab 2 Common values of fractions covered ratio by vegetation (f_c) and exposed to sunlight ($1 - f_c$)

作物生长阶段	f_c	$1 - f_c$
初始生长期	0.0~0.1	1.0~0.9
快速发育期	0.1~0.8	0.9~0.2
生育中期	0.8~1.0	0.2~0.0
成熟期	0.8~0.2	0.2~0.8

式(13)中的 $D_{e,i-1}$ 是从降雨或灌溉日到第 $i-1$ 天累计蒸发的水量, 需从蒸发土层的逐日水量平衡计算求得

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ev}} + T_{av,i} + DP_{e,i} \quad (16)$$

$$0 \quad D_{e,i} \quad TEW \quad (17)$$

式中 $D_{e,i}$ ——从降雨或灌溉日到第 i 天累计蒸发的量; P_i ——第 i 天的降雨量; RO_i ——第 i 天的降雨径流量; I_i ——第 i 天的灌溉水量; E_i ——第 i 天的蒸发量($E_i = K_e ET_0$); $T_{av,i}$ ——第 i 天从表层土壤蒸腾量; $DP_{e,i}$ ——第 i 天表层土壤的渗漏量。

式(11)至(16)为计算 K_e 的全过程, 从上述计算公式可以看出, K_e 的计算需要一个反复迭代的趋近过程, 这一过程由编制的计算机程序完成。图 2 为根据雄县试验站的实测资料计算的冬小麦和夏玉米的逐日作物系数, 该图显示了双值作物系数法计算的逐日作物系数受降雨和灌溉的影响。上述计算作物系数的方法不适用于冻土阶段, 故冬小麦越冬期的作物系数仍采用时段平均值。

4 用雄县实验资料计算作物腾发量并检验作物系数

雄县实验站位于河北省中部, 属半干旱季风气候区。该地区土层深厚, 上层土壤(0~70 cm)为粉质壤土, 70~100 cm 为粘土夹层, 100~220 cm 为砂壤土。主要作物为冬小麦和夏玉米连作。实验站总面积 40 m × 15 m, 内设农业气象站和两个实验小区, 气象站包括自动监测和数据采集系统及人工观测系统, 两套系统相互验证和补充, 提供计算参照腾发量

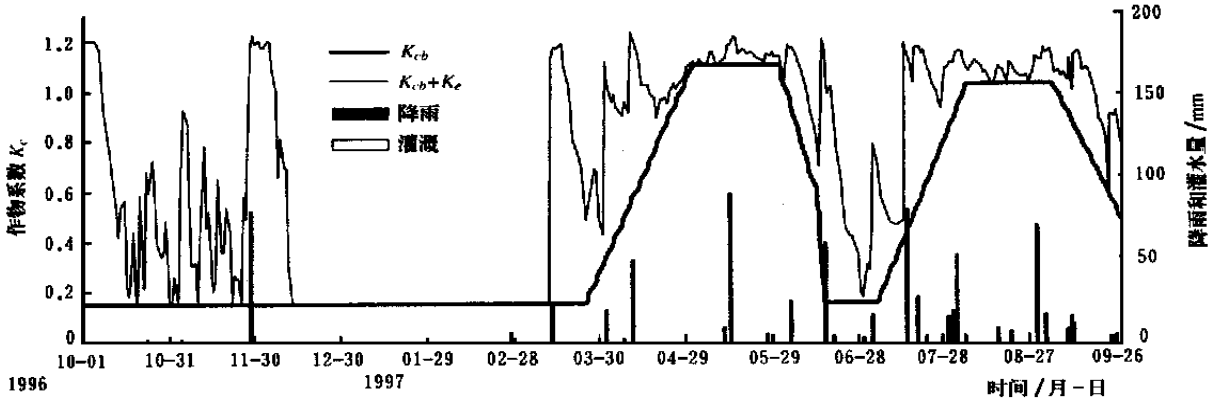


图 2 双值作物系数法计算的雄县冬小麦和夏玉米的作物系数

Fig 2 Calculated crop coefficients for winter wheat and summer maize by dual crop coefficient approach

所需要的所有气象数据和降雨数据。两个实验小区均设中心观测区 (12 m²) 及保护区 (30 m²), 中心观测区内埋设深达 710 cm 的负压计观测剖面及中子仪观测孔, 日常每 5 d 观测一次, 灌溉前后加测, 表层含水率用 TDR 观测。

根据雄县实验小区土壤含水率和压力观测剖面的资料, 采用水量平衡的方法计算某一时段内作物的实际蒸腾量。在不考虑侧向水流交换的条件下, \$t\$ 时段内作物的平均腾发量可用下式计算

$$ET_a = (P + I - Q - \Delta W) / \Delta t \quad (18)$$

式中 \$P\$ —— 时段内降雨量; \$I\$ —— 时段内灌水量; \$Q\$ —— 时段内渗漏量; \$\Delta W\$ —— 时段内根区土壤储水量的变化量。\$P\$ 和 \$I\$ 可由实测资料获得, \$\Delta W\$ 可从观测的土壤含水率剖面 \$H(Z, t)\$ 计算

$$\Delta W = \int_0^{z_r} H(Z, t_2) dZ - \int_0^{z_r} H(Z, t_1) dZ \quad (19)$$

式中 \$z_r\$ —— 作物根系吸水深度; \$t_1\$ 和 \$t_2\$ —— 观测土壤水分的时间, \$\Delta t = t_2 - t_1\$, 用差分法求解上式

$$\Delta W = \frac{1}{2} \int_{z_1}^{z_2} [H(Z, t_2) - H(Z, t_1)] dz + \int_{z_1}^{z_2} H(Z, t_2) dz - \int_{z_1}^{z_2} H(Z, t_1) dz \quad (20)$$

式(18) 中的 \$Q\$ 可根据达西定律, 利用根区底部实测的负压水头和非饱和导水率计算

$$Q = - K(H) \left[\frac{\partial H}{\partial Z} \right]_{z_r} \Delta t \quad (21)$$

计算中取 \$z_r = 130\$ cm, 土壤的非饱和导水率函数 \$K(H)\$ 用田间和实验室观测数据拟合 V G 模型确定。计算的时间步长为 \$\Delta t = 5\$ d, 距离步长为 \$\Delta Z = 10\$ cm。

用上述水量平衡法计算得到实验区冬小麦和夏玉米的 5 d 平均腾发量见图 3, 图中的 \$ET_0\$ 是采用实验站气象资料由彭曼 - 蒙特斯方法计算的同期参照腾发量。图 4 为由实测资料计算的 \$ET_a / ET_0\$ 比值与用 FAO 推荐的方法计算的作物系数对比。图中数据点为实测的 \$ET_a / ET_0\$ 比值, 粗实线为用分段单值平均法计算的 \$K_c\$ 变化过程, 细实线为用双值法计算的 \$K_c\$ 变化过程。从图中可以看出, 用 FAO 的分段单值平均法和双值法计算的作物系数与雄县试验站的实测结果接近, 从而验证了上述方法在我国华北地区的适用性。图中部分实测点偏高, 这是由于试验区面积小、中子仪的测量精度、土壤导水率函数的准确性等因素引起的误差。

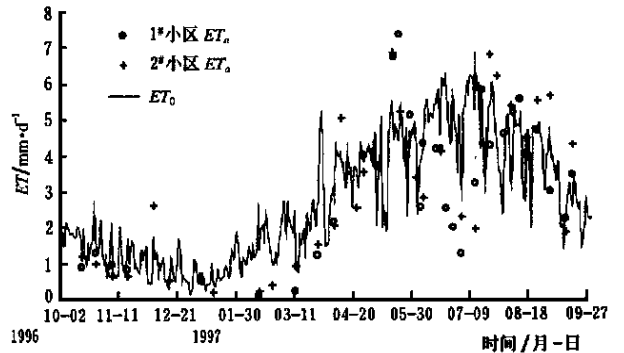


图 3 冬小麦和夏玉米实际腾发量 \$ET_a\$ 与 \$ET_0\$

Fig 3 The \$ET_a\$ and \$ET_0\$ of winter wheat and summer maize

4 结论与建议

为规范作物需水量的计算方法, FAO 在统一参照腾发量概念和计算公式的基础上, 又推荐了确定标准状态下(无水分胁迫)作物系数的 2 种方法。用

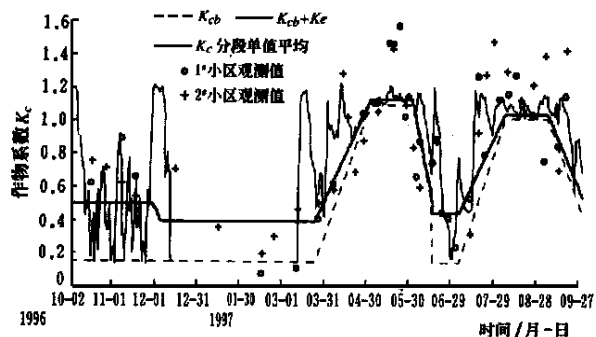


图4 3种方法计算的作物系数对比

Fig 4 Comparisons of crop coefficients calculated by three methods

河北省雄县灌溉试验站的土壤水分观测资料对其进行检验,结果显示用FAO的分段单值平均法和双值法计算的作物系数与实测的 ET_a/ET_0 比值基本接近,从而初步验证了上述方法在我国华北地区的适用性。

由于作物系数受土壤、气候、作物生长状况和管理方式等诸多因素影响,确定作物系数最合理的方法是采用当地的实验资料。在没有实测资料或实测数据可靠性差的情况下,可采用FAO的方法确定或校正作物系数,用以估算作物需水量。

[参考文献]

- [1] 刘钰,蔡林根等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比. 水利学报, 1997(6)
- [2] 许迪,刘钰. 测定和估算田间作物腾发量方法研究综述. 灌溉排水, 1997(4)
- [3] 刘昌明,龚清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算. 水科学进展, 1992(4)
- [4] R G Allen, M Smith, A Perrier, et al. An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration. IC D Bulletin 1994, 43(2)
- [5] R G Allen, L S Pereira, D Raes, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998
- [6] Allen R G, M Smith, W O Pruitt, et al. Modifications to the FAO crop coefficient approach. In: Camp C R, E J Sadler and R E Yoder (eds) Evapotranspiration and Irrigation Scheduling (Proceed Int Conf, San Antonio, Nov 1996), ASAE, St Joseph: 124~ 132
- [7] Wright J L. New evapotranspiration crop coefficient. J Irrig Drainage Div ASCE 108, 1982. 57~ 74

Validation of FAO Methods for Estimating Crop Coefficients

Liu Yu

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

L. S. Pereira

(Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Portugal)

Abstract: Crop coefficient is the basic parameter for determining crop water requirement. In this paper, two methods proposed by FAO are described. One is time-averaged crop coefficient (K_c) approach, which is a simple and useful method. The other is dual crop coefficient approach with more complicated computations but more accurate results. Both approaches were validated with experimental results at Xiongxian Experimental Station, Hebei Province. The results showed that the K_c values calculated by FAO methods are close to that as estimated from experiment data. Both methods are valid to use for determination of crop coefficients on the North China Plain if there are no on-site experiment data available.

Key words: crop coefficients; estimation methods; water balance; winter wheat; summer maize