doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.037

基于大型蒸渗仪和遗传算法的受旱玉米蒸发蒸腾量估算

袁宏伟[1,2]　崔　毅[3]　蒋尚明[1,2]　汤广民[1,2]　袁先江[1,2]

(1.安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院,合肥 233088;2.水利水资源安徽省重点实验室,合肥 233088;
3.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:受旱胁迫下作物蒸发蒸腾量估算重要且复杂,依托新马桥农水综合试验站 6 台大型称重式蒸渗仪开展玉米受旱胁迫专项试验,对不同受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量特征进行分析,在双作物系数法估算无受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量的基础上,采用遗传算法优化率定基础作物系数 K_{cbini}、K_{cbmid}、K_{cbend} 和作物系数上限 K_{cmax},同时基于试验站实测太阳辐射数据采用遗传算法优化率定了 Angstrom 公式经验参数 a、b,进而优化了参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)的计算结果,并以此基础运用双作物系数法估算受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量。结果表明:营养生长中前期轻微的水分亏缺可能会刺激玉米适应性机能,复水后各项生理功能恢复正常;水分亏缺加重时不仅会使玉米当期的蒸发蒸腾量减少,而且会产生累积效应,将这种胁迫影响传递到之后的生育阶段;相同受旱胁迫强度对玉米生殖生长阶段影响更为明显,且易造成永久胁迫;K_{cbini}、K_{cbmid}、K_{cbend}、K_{cmax} 的率定结果分别为 0.150、1.090、0.152 和 1.400,在此基础上运用双作物系数法估算无受旱胁迫下玉米全生育期蒸发蒸腾量的均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 分别为 1.39 mm 和 0.97 mm,比对应的 FAO-56 推荐值估算结果小 6.74% 和 8.23%,受旱胁迫下玉米计算的 2 个处理全生育期 RMSE、MAE 和 MRE 均值分别为 1.60 mm、1.18 mm 和 6.73%,整体估算效果虽然没有无受旱胁迫下的好,但仍优于 FAO-56 推荐值的估算结果。因此,基于双作物系数法和遗传算法的受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算合理可靠,该研究可为区域制定适宜灌溉制度和降低农业旱灾损失风险提供理论依据。

关键词:玉米;淮北平原;蒸发蒸腾量;受旱胁迫;双作物系数法;遗传算法

中图分类号:S274　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)10-0326-10

Estimation of Maize Evapotranspiration under Drought Stress Based on Large-scale Lysimeter and Genetic Algorithm

YUAN Hongwei[1,2]　CUI Yi[3]　JIANG Shangming[1,2]　TANG Guangmin[1,2]　YUAN Xianjiang[1,2]

(1. *Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei* 233088, *China*　2. *Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Hefei* 233088, *China*
3. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: Due to the importance and complexity of crop evapotranspiration estimation under drought stress, maize drought stress special experiment was conducted based on six large-scale weighing lysimeters at Xinmaqiao Irrigation Experimental Station, the empirical parameters a and b of the Angstrom formula were optimized based on the measured solar radiation data from the experimental station, and the calculation results of the reference crop evapotranspiration were optimized, and then the characteristics of maize evapotranspiration under different drought stress scenarios were analyzed, moreover the maize evapotranspiration under drought stress was estimated by using basic crop coefficients, including K_{cbini}, K_{cbmid}, and K_{cbend} and upper limit of crop coefficient K_{cmax}, which were calibrated by genetic algorithm in the process of estimating maize evapotranspiration under no drought stress based on dual crop coefficient approach. The results showed that early mild water deficit may stimulate the adaptability function of maize, and normal physiological function of that would return after re-watering; water deficit would not only decrease current evapotranspiration of maize, but also generate the cumulative effect, which transferred stress influence to later growth stages; the same drought stress intensity had a more obvious effect on the reproductive growth stage of maize, and it may cause permanent stress; the calibration

收稿日期:2018-05-25　修回日期:2018-06-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301301)和国家自然科学基金项目(51409002、71273081)

作者简介:袁宏伟(1984—),男,工程师,主要从事农田灌溉排水理论研究,E-mail:yuanhw_1984@163.com

results of K_{cbini}, K_{cbmid}, K_{cbend} and K_{cmax} were 0.150, 1.090, 0.152 and 1.400, respectively, and the root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) of estimated evapotranspiration results under no drought stress in whole growth period using these crop coefficients were 1.39 mm and 0.97 mm, respectively, which were 6.74% and 8.23% less than those of estimated results based on FAO-56 recommended approach, the means of RMSE, MAE and MRE of estimated evapotranspiration results under two different drought stress scenarios were 1.60 mm, 1.18 mm and 6.73%, respectively. Therefore, the estimation of maize evapotranspiration under drought stress based on dual crop coefficient approach and genetic algorithm were reasonable and reliable, and this research would provide theoretical foundation for formulating suitable irrigation system and reducing risk of agricultural drought loss.

Key words: maize; Huaibei Plain; evapotranspiration; drought stress; dual crop coefficient approach; genetic algorithm

0　引言

夏玉米是淮河流域主要的粮食作物之一，也是最重要的饲料作物。其生育期主要集中在6—9月，期间平均气温较高，作物蒸发蒸腾量大，如遭遇干旱年份，土壤极易出现水分胁迫。淮河流域由于地处南北气候、高低纬度和海陆相3种过渡带的交叉重叠地区，受季风及地形地貌的影响，降水时空分布极不均衡。特定的气候条件、地理环境和流域特征，以及人类活动的影响，造成淮河流域历史上干旱灾害频繁，严重威胁着流域粮食生产安全与社会稳定[1-2]。尤其是20世纪90年代以来，干旱的发生越来越频繁，并随着经济社会的发展，干旱所造成损失越来越严重。1949—2010年的62年间，全流域累计受旱面积1.67亿 hm^2，成灾面积8 730万 hm^2，损失粮食13.96亿 kg，平均每年有269.8万 hm^2 农作物受旱，140.8万 hm^2 农作物成灾，造成大面积农业减产、歉收，甚至绝收[3-7]。旱灾已成为制约流域农业经济持续发展的瓶颈。因此，掌握玉米在受旱胁迫下的蒸发蒸腾规律，准确估算受旱胁迫下的蒸发蒸腾量，对制定合理灌溉制度，提高水分利用效率，保证淮北平原玉米的高产稳产具有重要意义[8-10]。

受旱胁迫下作物蒸发蒸腾量的估算一直是农田灌溉学科的研究热点，得到国内外学者的广泛关注[9,11-13]。有关作物蒸发蒸腾量的计算方法主要有空气动力学法、波文比-能量平衡法、遥感法等，而采用联合国粮农组织(FAO)推荐的作物系数法具有更广泛的适用性[14-19]。双作物系数法作为其推荐的一种估算作物蒸发蒸腾量的经验模型，因其易于操作、精度可靠、实用性强，同时可将作物蒸腾量和土壤蒸发量分离开来，已在世界范围内被普遍采用[20-23]。然而，目前双作物系数法多用于无水分胁迫下作物蒸发蒸腾量的估算，对于受旱胁迫下粮食作物蒸发蒸腾量的估算研究较少[24-25]。虽然双作物系数法会根据当地环境气候条件调整FAO-56的推荐值，但蒸发蒸腾量估算值与实测值仍有一定偏差[26-27]。参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)的计算方法一般均采用彭曼公式，公式中涉及到太阳辐射的计算，其参数 a、b 一般也采用FAO-56推荐值，但是其推荐值并不一定适用于所有地区，因此也需要根据实测太阳辐射数据进行优化率定[28-29]。而遗传算法(Genetic algorithm，GA)只要求优化问题是可计算的，便可在搜索空间中进行自适应全局搜索，且优化过程简单，结果丰富，特别适合于处理复杂函数优化、组合优化等问题，具有适应性强、精度高等特点[30]。

基于此，本研究依托新马桥农水综合试验站6台大型称重式蒸渗仪，设置不同组合受旱试验方案，开展玉米受旱胁迫专项灌溉试验，对不同受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾规律进行分析，在双作物系数法估算无受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量的基础上，采用遗传算法对相关作物系数进行率定，并以受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量的估算结果进行验证，旨在探讨连续、组合受旱情况下玉米蒸发蒸腾量的响应及复水后的适应补偿机制，构建基于双作物系数和遗传算法的受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算方法，以期为区域制定合理灌溉制度以及降低农业旱灾损失风险提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2017年6—10月在安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院新马桥农水综合试验站进行，该站位于淮北平原中南部，海拔19.7 m(33°09′N，117°22′E)，属半干旱半湿润季风气候区，多年平均降雨量917 mm，6—9月的降雨量约占全年总雨量的60%～70%，蒸发量916 mm，地下水埋深在1.0～3.0 m范围内变动，多年平均气温15.0℃。试验区土壤为淮北平原区典型的砂姜黑土，其表层0～20 cm土壤中砂粒占3.12%、粉粒占68.8%、粘粒占28%(体积百分比)，土壤容重

1.36 g/cm^3,田间持水率 38.1%(体积含水率),凋萎点含水率 16.6%(体积含水率),该土质地粘重,结构不良,土体坚实,裂隙发育,土壤保水性能差,易干旱。

1.2 试验设计

玉米受旱胁迫下蒸发蒸腾试验依托新马桥农水灌溉试验站内 6 台大型称重式蒸渗仪开展,规格为 2 m×2 m×2.3 m,每台蒸渗仪均布设有防雨棚完全隔绝降雨,试验过程中土壤水分完全受人工灌水控制。试验玉米品种为隆平 206,于 2017 年 6 月 16 日播种,当年 10 月 8 日收获,全生育期 115 d,结合试验玉米实际生长记录,将全生育期划分为苗期(6 月 16 日—7 月 18 日,共 33 d)、拔节期(7 月 19 日—8 月 3 日,共 16 d)、抽雄吐丝期(8 月 4—21 日,共 18 d)和灌浆成熟期(8 月 22 日—10 月 8 日,共 48 d)4 个生育阶段。试验控制因素为生育阶段的土壤含水率,设置不同的土壤含水率下限,根据试验站多年受旱胁迫灌溉试验确定不旱、轻旱和中旱 3 个水平土壤含水率下限,分别为 70%、55% 和 45%(指土壤含水率占田间持水率的百分比),具体试验实施情况见表 1。每个蒸渗仪小区内施复合肥 300 g、尿素 120 g,玉米种植密度为 20 株/坑,每个测坑分 4 行。为更加符合实际灌溉情况,当试验小区土壤含水率达到相应控制下限时定量灌水至田间持水率。此外,各处理除水分管理外,其他管理方式完全一致,保证玉米正常生长发育,没有病虫害影响。

表 1 试验实施情况

Tab.1 Experiment implementation situation

处理编号	各生育阶段土壤含水率下限/%				备注
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆成熟期	
T1	55	45	45	60	苗期轻旱,拔节期、抽雄吐丝期中旱,灌浆成熟期不旱
T2	55	55	55	45	苗期、拔节期、抽雄吐丝期轻旱,灌浆成熟期中旱
CK	65	65	70	60	对照组,全生育期不受旱

1.3 试验数据采集

(1)气象资料

采用位于试验站距离地面 2 m 高度的自动气象站(WS-STD1 型,英国 DELT-T 公司),测定 2 m 高处的平均风速(u_2,m/s)、平均气温(T,℃)、相对湿度(R_h,%)、太阳总辐射(R_s,MJ/(m^2·d))等气象数据,数据每 5 s 采集一次,每 1 h 记录在数据采集器中。

(2)土壤含水率

0~40 cm 土层土壤含水率由人工取土测定,40、60、80 cm 土层土壤含水率由蒸渗仪内埋设的土壤水分传感器测定,最终取 0~60 cm 土层土壤含水率的平均值。土壤含水率平均 5~7 d 测定一次,土壤水分消耗较大的生育阶段加测。

(3)蒸发蒸腾量

玉米实际蒸发蒸腾量由试验站内大型称重式蒸渗仪测定,型号为 QYZS-201,共 6 台,每台面积 2 m×2 m=4 m^2,深 2.3 m,质量约 15 t,测定精度为 0.02 mm,用采集系统自动收集和记录数据,时间间隔为 1 h,日蒸发蒸腾量由 24 h 数据累计得到。

(4)灌水量

不同处理下的灌水量 I(mm)为

$$I = 1\,000(\theta_{FC} - \theta_i)Z_r \tag{1}$$

式中 θ_{FC}——蒸发层土壤田间持水率,m^3/m^3

θ_i——灌水前测定的土壤含水率,m^3/m^3

Z_r——计划湿润层深度,取 0.6 m

灌水量通过管道首部的水表控制。

1.4 基于遗传算法的 Angstrom 公式参数率定

1.4.1 Angstrom 公式及参考作物蒸发蒸腾量计算方法

Angstrom 公式最早是由埃斯川姆于 1922 年提出的,后由左大康等将此公式引入我国[28-29]。公式为

$$R_s = (a + bS)R_a \tag{2}$$

式中 S——日照百分率,即实际和理论日照时数之比

R_a——大气边缘太阳辐射,MJ/(m^2·d)

a、b——经验系数,反映外空辐射通过大气层过程中的衰减特征

大气边缘太阳辐射是指到达大气上界的太阳辐射,其分布和变化不受大气影响,主要受日地距离、太阳高度角和白昼长度的影响,本文采用日天文辐射总量代表。

参考作物蒸发蒸腾量采用 Penman-Montieth 公式计算,即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{3}$$

其中

$$R_n = (1-\alpha)R_s - R_{n1} \tag{4}$$

式中 ET_0——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d

R_n——作物表面的净辐射量，MJ/(m²·d)

G——土壤热通量，MJ/(m²·d)

e_s——饱和水气压，kPa

e_a——实际水气压，kPa

Δ——饱和水压与温度曲线的斜率，kPa/℃

γ——干湿表常数

α——参照作物反射率，取 0.23

R_{nl}——净长波辐射，MJ/(m²·d)

式(3)、(4)中其他变量的计算公式可参见 SL 13—2015《灌溉试验规范》。

1.4.2 参数率定方法

本文参数率定方法选用最小二乘法与遗传算法。最小二乘法为相关研究中比较通用的系数率定方法，本文根据大气边缘太阳辐射 R_a 和实测 R_s、S，通过最小二乘回归拟合式(2)，即得到 a、b 的率定值。

以经验系数 a、b 为优化变量，以新马桥试验站实测 R_s/R_a 和日照百分率 S 为目标函数，采用遗传算法进行优化求解，最终得到基本适用于淮北平原的 a、b 值，具体过程为

$$\min f(a,b) = \sum_{i=1}^{n} |X_i(a,b) - Y_i| \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} 0 \leqslant a \leqslant 1 \\ 0 \leqslant b \leqslant 1 \end{cases} \tag{6}$$

式中　X_i——第 i 日日照百分率 S

Y_i——第 i 日实测太阳总辐射与大气边缘太阳辐射比值(R_s/R_a)

n——日太阳总辐射数据个数

1.5 基于双作物系数和遗传算法的玉米蒸发蒸腾量估算方法

采用双作物系数法计算玉米蒸发蒸腾量，其表达式为[31]

$$ET_c = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \tag{7}$$

式中　ET_c——作物蒸发蒸腾量，mm/d

K_s——土壤水分胁迫系数，反映根区土壤含水率对作物蒸腾的影响，$0 < K_s \leqslant 1$，当土壤含水率对作物生长不构成影响时 $K_s = 1$

K_{cb}——基础作物系数，是表土干燥而根区土壤平均含水率满足蒸腾要求时 ET_c 与 ET_0 的比值

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对 ET_c 产生的影响

1.5.1 基础作物系数确定

FAO 建议先将玉米整个生育期划分为初始生长期、快速发育期、生育中期和成熟期 4 个生育阶段，再分别计算初始生长期、生长中期和成熟期 3 个阶段的 K_{cb} 单点值，即 K_{cbini}、K_{cbmid} 和 K_{cbend}，中间值采用线性插值得到[31]。根据相关研究并结合本试验玉米实际生长状况，确定各生育阶段长度见表 2，FAO－56 推荐的标准状况下玉米各生育阶段的基础作物系数分别为 $K_{cbini} = 0.15$，$K_{cbmid} = 1.15$，$K_{cbend} = 0.50$。当 R_{hmin} 不是 45% 或风速不是 2 m/s 时，大于 0.45 的 K_{cbmid} 和 K_{cbend} 需进行修正，即

$$K_{cb(Adj)} = K_{cb(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(R_{hmin} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{8}$$

式中　$K_{cb(Tab)}$、$K_{cb(Adj)}$——FAO－56 推荐和根据试验站气候条件调整后的作物生育期基础作物系数

h——玉米生育期的平均株高，m

表 2　FAO 生育阶段划分及各阶段 u_2、R_{hmin} 和 h 的平均值

Tab. 2　Growth stages divided by FAO method and means of u_2, R_{hmin} and h at each stage

生育阶段	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期
阶段时间/d	18	32	37	28
2 m 高处的平均风速 u_2/(m·s⁻¹)	1.07	0.91	0.70	0.82
最低相对湿度 R_{hmin}/%	62.71	64.08	57.76	57.02
玉米平均株高 h/m	0.365	1.059	2.082	2.219

1.5.2 土面蒸发系数计算

棵间及冠层内土壤的蒸发量受土壤表层可接受能量和大气蒸发力的控制。降雨或灌溉后，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 表示为[31]

$$K_e = \min(K_r(K_{cmax} - K_{cb}), f_{ew} K_{cmax}) \tag{9}$$

$$\text{其中} \quad K_r = \begin{cases} 1 & (D_{e,i-1} \leqslant R_{ew}) \\ \dfrac{T_{ew} - D_{e,i-1}}{T_{ew} - R_{ew}} & (D_{e,i-1} > R_{ew}) \end{cases} \tag{10}$$

$$T_{ew} = 1\,000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP}) Z_e \tag{11}$$

$$R_{ew} = 8 + 0.08 C_l \tag{12}$$

$$K_{cmax} = \max\left(\left\{1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}\right\}, (K_{cb} + 0.05)\right) \tag{13}$$

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \tag{14}$$

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}}\right)^{1+0.5h} \tag{15}$$

式中 K_r——土壤蒸发衰减系数[20]

K_{cmax}——灌溉或降雨后作物系数上限

f_{ew}——没有被作物冠层覆盖并在降雨或灌溉后被充分湿润的土壤面积占总面积的比例

$D_{e,i-1}$——降雨或灌溉日到上一个计算日的累计土壤蒸发量,mm

R_{ew}——大气蒸发力控制阶段土壤蒸发量,mm

T_{ew}——在一个干旱周期内土壤中可通过表层蒸发的最大水量,mm

Z_e——土壤蒸发层深度,结合 FAO 推荐值和试验土壤实际情况,取 0.1 m

θ_{WP}——蒸发层土壤凋萎点含水率,m^3/m^3

C_l——蒸发层土壤中的粘粒体积分数,本地砂姜黑土 0 ~ 10 cm 土层的粘粒体积分数取值为 25.42%

f_c——玉米冠层的有效覆盖系数[21]

f_w——降雨或灌溉后地表充分湿润面积比,本试验灌水方式为漫灌,$f_w = 1.0$[31]

K_{cmin}——干燥裸土条件下作物系数下限,本文取 0.15[31]

K_e计算过程中,需要根据蒸发土层逐日水量平衡方程计算 $D_{e,i}$[20],即

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - R_{oi}) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + D_{pe,i} \tag{16}$$

其中

$$E_i = K_e ET_0 \tag{17}$$

式中 P_i——第 i 日的降雨量,mm

R_{oi}——第 i 日降雨径流量,mm

I_i——第 i 日灌水量,mm

E_i——第 i 日土壤平均蒸发量,mm

$T_{ew,i}$——第 i 日植株从无作物覆盖且充分湿润地表获得的蒸腾量,mm

$D_{pe,i}$——第 i 日表层土壤渗漏量,mm

$T_{ew,i}$可忽略不计[31],由于试验条件控制,P_i、R_{oi}、$D_{pe,i}$均为 0。

1.5.3 土壤水分胁迫系数计算

土壤水分胁迫系数计算公式为[31]

$$K_s = \begin{cases} 1 & (D_r \leqslant R_{aw}) \\ \dfrac{T_{aw} - D_r}{T_{aw} - R_{aw}} & (D_r > R_{aw}) \end{cases} \tag{18}$$

其中

$$R_{aw} = pT_{aw} \tag{19}$$

$$T_{aw} = 1\,000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \tag{20}$$

式中 D_r——玉米根系层中消耗的水量,mm

T_{aw}——根系中的总有效水量[31],mm

R_{aw}——根系中易被吸收利用的水量,mm

p——在发生水分胁迫之前能从根系层中消耗的水量与土壤总有效水量的比值,取 0.55[31]

K_s计算过程中,需要根据土壤逐日水量平衡方程计算 $D_{r,i}$[31],即

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - R_{oi}) - I_i - C_{ri} + ET_{c,i} + D_{pi} \tag{21}$$

式中 C_{ri}——第 i 日土壤毛管上升水量,mm

D_{pi}——第 i 日深层土壤渗漏量,mm

本试验无地下水补给,$C_r = 0$,深层渗漏量 D_p由蒸渗仪地下室输水管道实测。

1.5.4 基于遗传算法的作物系数率定

在双作物系数法估算无受旱胁迫下(CK)玉米蒸发蒸腾量的基础上,以基础作物系数 K_{cbini}、K_{cbmid}、K_{cbend}和作物系数上限 K_{cmax}为优化变量,以 CK 处理玉米全生育期内逐日蒸发蒸腾量估算值与实测值的绝对误差和最小为目标函数,采用遗传算法[30]进行优化求解,最终得到符合试验站当地玉米实际生长的作物系数,为

$$\min f(K_{cbini}, K_{cbmid}, K_{cbend}, K_{cmax}) = \sum_j^m |X_j(K_{cbini}, K_{cbmid}, K_{cbend}, K_{cmax}) - Y_j| \tag{22}$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} 0 < K_{cbini} < 0.5 \\ 1 < K_{cbmid} < 2 \\ 0 < K_{cbend} < 0.5 \\ 1 < K_{cmax} < 2 \end{cases}$$

式中 X_j——无受旱胁迫下(CK 处理)双作物系数法估算的第 j 日玉米蒸发蒸腾量,mm

Y_j——对应 CK 处理蒸渗仪实测的第 j 日玉米蒸发蒸腾量,mm

m——全生育期时间,共 115 d

2 结果与分析

2.1 受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量特征分析

依据不同受旱处理下蒸渗仪实测的玉米蒸发蒸腾数据,分析各生育阶段不同受旱胁迫下蒸发蒸腾量变化,如图 1 和图 2 所示。由图 1、2 可知,玉米各生育阶段蒸发蒸腾量在不同受旱胁迫下变化趋势基本相同,苗期蒸发蒸腾量较小,拔节期呈上升趋势,抽雄吐丝期处于较高水平,灌浆成熟期开始下降。

由于不同处理当期或前期受旱胁迫不同，使得各阶段蒸发蒸腾量出现差异。

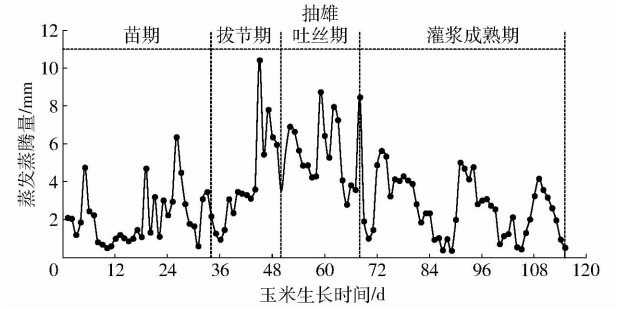

图 1　无受旱胁迫下玉米各生育阶段实测蒸发蒸腾量

Fig. 1　Measured maize evapotranspiration in whole growth period under no drought stress

图 2a 中，苗期 CK、T2 和 T1 分别为不旱、轻旱、轻旱，3 种处理下玉米苗期蒸发蒸腾量变化趋势基本相同，但 CK 的蒸发蒸腾量略高于 T1 和 T2，CK、T2 和 T1 的日均蒸发蒸腾量分别为 2.361、2.130、2.128 mm，相同处理间基本无差别，轻旱比对照减少了 9.83%；同样，图 2b 中，拔节期 T2、T1 分别为轻旱和中旱，拔节期前期各处理间基本无差别，拔节期中后期中旱处理与对照间差别出现扩大且较为明显，拔节期全期轻旱和对照间差别不明显，T1 的蒸发蒸腾量比不旱处理 CK 少 14.35%，T2 少 3.87%。以上分析表明，苗期轻旱对玉米生长当期和后期生长均不造成明显影响，苗期和拔节期连续轻旱对玉米生长的影响亦不明显，受旱处理下的玉米蒸发蒸腾量相对不旱会有所减少，且中旱处理的减少程度比较显著，说明水分亏缺会减小玉米蒸发蒸腾量，缺水越多减小越严重。

图 2c 中，苗期、拔节期和抽雄吐丝期轻旱的处理 T2，整个抽雄吐丝期的蒸发蒸腾量比 CK 少 10.63%，苗期轻旱、拔节期和抽雄吐丝期中旱的处理 T1，其抽雄吐丝期的蒸发蒸腾量则比对照减少了 32.65%。图 2d 中，苗期、拔节期和抽雄吐丝期轻旱，灌浆成熟期中旱的处理 T2，其整个灌浆成熟期的蒸发蒸腾量比对照少 11.90%；苗期轻旱、拔节期和抽雄吐丝期中旱，灌浆成熟期不旱的处理 T1，其整个灌浆成熟期的蒸发蒸腾量比对照少 14.16%。以上分析表明，拔节期和抽雄吐丝期连续受旱较重时会严重减少玉米的蒸发蒸腾量，且其对玉米生长的抑制作用不止影响其处理当期，后期恢复正常灌溉后抑制作用依然存在，说明拔节期和抽雄吐丝期连续中度受旱已对玉米生长造成永久胁迫。

2.2　Angstrom 公式参数率定及优选

基于新马桥试验站内自动气象站 2011—2016 年的实测逐日太阳总辐射和日照百分数，分别利用最小二乘法和遗传算法率定得到 Angstrom 公式中的经验系数 a、b。为更好评价上述两组率定参数及 FAO 推荐参数的适宜性，完成参数优选，采用平均误差、平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）以及相关系数 4 个统计指标进行评价[17]。率定的参数及 3 组不同经验系数的 R_s 计算值与实测值的对比分析如表 3 所示。

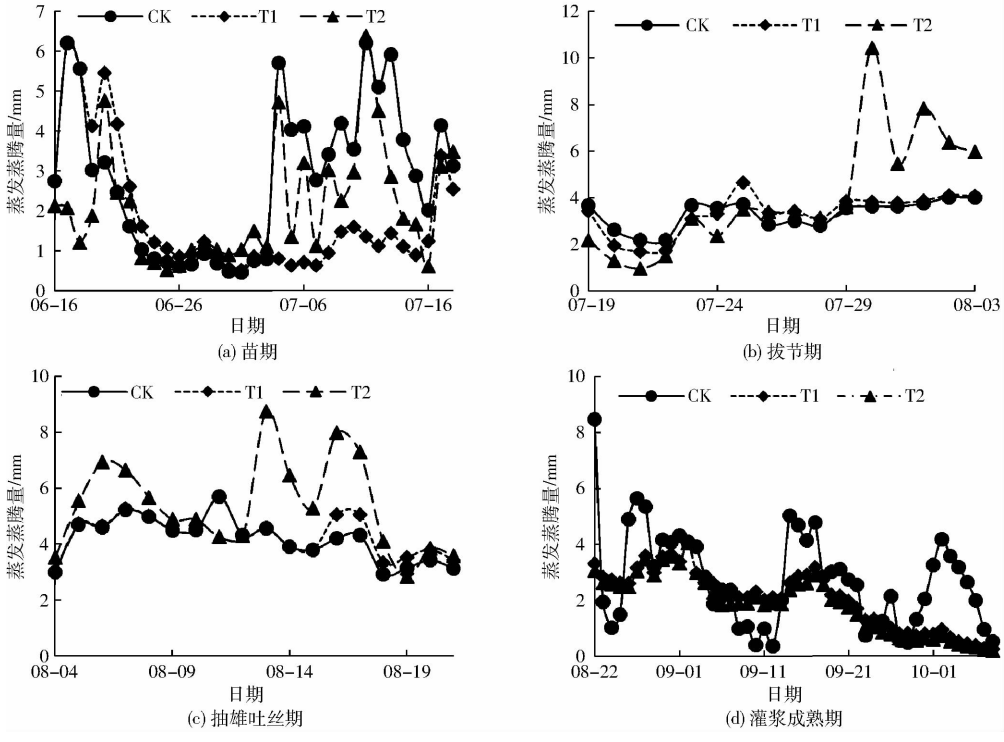

图 2　受旱胁迫下玉米各生育阶段实测蒸发蒸腾量

Fig. 2　Measured maize evapotranspiration at each growth stage under drought stress

表 3 不同经验系数 a 和 b 下的 R_s 计算值与实测值的对比分析

Tab. 3 Comparison analysis between calculated and observed R_s values based on different a and b

系数来源	经验系数	平均误差 σ	平均绝对误差 MAE/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	均方根误差 RMSE/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	R_s 计算值与实测值比	相关系数 R
FAO 建议值	$a=0.250$、$b=0.500$	2.52	5.13	6.68	1.233 8	0.865 8
最小二乘法率定值	$a=0.261$、$b=0.305$	0.71	3.52	4.40	1.066 1	0.869 4
遗传算法率定值	$a=0.253$、$b=0.320$	0.66	2.29	4.49	1.061 2	0.870 6

由表 3 可以看出,采用 FAO 推荐的经验系数 a、b 得到的 R_s 计算值的平均误差、平均绝对误差、均方根误差均显著大于基于最小二乘法和遗传算法率定 a、b 参数计算得到的 R_s。当经验系数 a、b 取 0.253、0.320 时,太阳日总辐射计算值和实测值的相关系数最大且平均误差和平均绝对误差均最小,表明采用遗传算法拟合的经验系数 $a=0.253$、$b=0.320$ 可以比较有效地估算淮北平原的太阳辐射,且优于最小二乘法的率定结果。另外表 3 中数据也表明,利用 FAO 建议值计算淮北平原的太阳辐射,要明显偏高于真实值,平均可高出实测值的 23.38%。

Penman - Montieth 公式计算 ET_0 时也会受到经验系数 a、b 的影响,利用新马桥试验站 2011—2016 年的逐日气象数据,分别采用 FAO 建议值的经验系数 $a=0.25$、$b=0.5$ 以及优选的经验系数 $a=0.253$、$b=0.320$ 计算 ET_0。选取 FAO 建议值时,2011—2016 年内日均 ET_0 为 2.48 mm,选取优选参数时,日均 ET_0 为 2.07 mm。可以看出,FAO 建议值计算的 ET_0 明显高于优选参数计算的 ET_0,前者可比后者增大 19.8%。

综上可知,FAO 建议的经验参数 a、b 值并不适用于淮北平原太阳总辐射 R_s 和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 的计算,计算值较实测值偏大,会过大估计参考作物蒸发蒸腾量,不利于节水,而利用遗传算法率定得到的经验系数 a、b 值更适用于淮北地区。

2.3 基于双作物系数和遗传算法的玉米蒸发蒸腾量估算结果与分析

2.3.1 无受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算结果

由图 3 可看出,玉米苗期前半段的蒸发蒸腾量较小,苗期后半段开始显著增加,拔节期和抽雄吐丝期均保持在一个较高的水平,灌浆成熟期逐渐降低,日蒸发蒸腾量峰值出现在拔节期后期和抽雄吐丝期。苗期、拔节期、抽雄吐丝期、灌浆成熟期日平均蒸发蒸腾量分别为 2.130、4.024、5.373、2.726 mm。蒸发蒸腾变化过程符合玉米实际生长过程,苗期后期、拔节期、抽雄吐丝期和灌浆成熟期前期是玉米营养生长和生殖生长最旺盛的时期,对水分需求量大,灌浆成熟期后期玉米的叶开始萎蔫变黄,蒸腾强度显著降低,日蒸发蒸腾量不断减小。

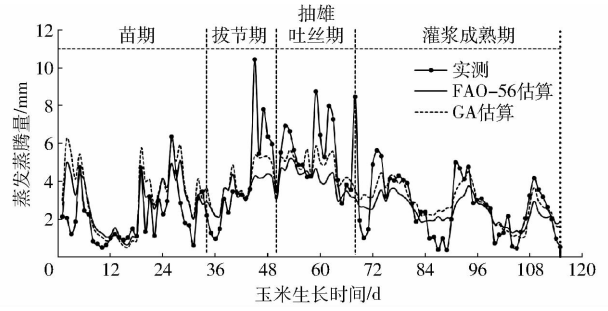

图 3 无受旱胁迫下玉米全生育期实测和估算蒸发蒸腾量

Fig. 3 Measured and estimatedmaize evapotranspiration in whole growth period under no drought stress

由图 3 可看出,两种方法估算的玉米全生育期内蒸发蒸腾量变化趋势与实测结果基本一致,但 GA 估算的蒸发蒸腾量明显大于 FAO - 56。结合表 4 中无受旱胁迫下玉米各生育阶段及全生育期蒸发蒸腾量实测与估算结果,FAO - 56 各生育阶段蒸发蒸腾量的估算误差,除苗期外其他生育阶段 RMSE、MAE 均大于 GA,GA 全生育期 RMSE 和 MAE 分别为 1.39 mm 和 0.97 mm,比对应的 FAO - 56 小 6.74% 和 8.23%,说明 GA 的估算结果比 FAO - 56 更接近实测值,以 GA 优化得到的作物系数进行双作物系数法估算与实际情况的拟合效果更好。

表 4 无受旱胁迫下双作物系数法估算玉米蒸发蒸腾量拟合误差

Tab. 4 Fitting error of estimated maize evapotranspiration under no drought stress based on dual crop coefficient approach

mm

生育阶段	实测值	估算值		RMSE		MAE	
		FAO - 56	GA	FAO - 56	GA	FAO - 56	GA
苗期	70.29	92.42	102.41	1.24	1.57	0.92	1.11
拔节期	64.38	56.06	63.01	2.03	1.66	1.35	1.09
抽雄吐丝期	96.72	74.63	86.92	1.77	1.27	1.31	0.91
灌浆成熟期	130.84	117.43	134.31	1.30	1.18	0.97	0.81
全生育期	362.23	340.54	386.64	1.49	1.39	1.06	0.97

对比 FAO－56 推荐并经试验站气候条件调整和 GA 优化后的 K_{cbini}、K_{cbmid}、K_{cbend}、K_{cmax} 作物系数值（详细计算过程见 1.5 节），FAO－56 为 0.150、1.058、0.413 和 1.119，GA 为 0.150、1.090、0.152 和 1.400。可看出，按照式(8)调整后的基础作物系数 K_{cb} 与 FAO－56 推荐值(0.150、1.150、0.500)相比变化很小。与 FAO－56 相比，GA 得到的 K_{cbmid} 和 K_{cmax} 值均明显增大，K_{cbend} 则有明显减小，K_{cbini} 无变化，但 GA 的双作物系数法 K_c 明显较大，这与图 4 中无受旱胁迫下实测和估算的双作物系数法变化一致，故根据式(7)计算得到的蒸发蒸腾量大。说明 FAO－56 推荐的作物系数比当地玉米实际情况小。综上，GA 优化得到的作物系数更加符合当地玉米的实际生长情况，在此基础上采用双作物系数法可更精确地估算玉米蒸发蒸腾量。

2.3.2　受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算结果

以 GA 率定的 4 个作物系数运用双作物系数法估算 2 种受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量，并与 FAO－56 推荐值的估算结果进行对比，见表 5。由表 5 可看出，2 种受旱处理全生育期蒸发蒸腾估算量均低于实测值，其中 T2 更为明显，除苗期外其余各阶段均低于实测值，全生育期比实测少 8.46%，说明本文估算方法总体低估了玉米蒸发蒸腾量。用于验证的 2 个处理全生育期 RMSE、MAE 均值分别为 1.60、1.18 mm，但是全生育期 MRE 分别为 4.99% 和 8.46%，均值为 6.73%，整体估算效果虽然没有无受旱胁迫下的好，但仍优于 FAO－56 推荐值的估算结果。但是遗传算法能否提升受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算精度，尚需长序列的试验数据进行验证。

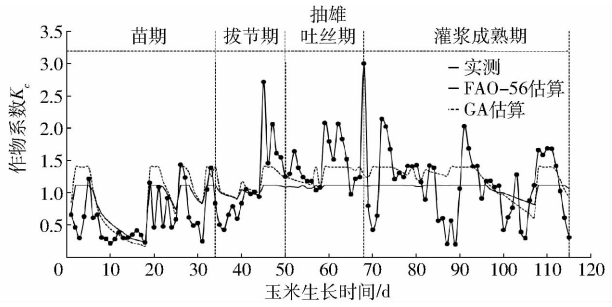

图 4　无受旱胁迫下玉米全生育期实测和估算作物系数

Fig. 4　Measured and estimatedmaize crop coefficient in whole growth period under no drought stress

表 5　受旱胁迫下双作物系数法估算玉米蒸发蒸腾量验证误差

Tab. 5　Validation error of estimated maize evapotranspiration under drought stress based on dual crop coefficient approach

处理编号	生育阶段	实测值/mm	估算值/mm	RMSE/mm	MAE/mm	MRE/%
T1	苗期	70.22	61.47	1.960	1.370	12.458
	拔节期	55.14	53.31	1.291	0.989	3.314
	抽雄吐丝期	72.89	78.21	1.062	0.904	7.302
	灌浆成熟期	105.04	95.17	1.119	0.890	9.392
	全生育期	303.29	288.17	1.358	1.039	4.985
T2	苗期	70.29	93.78	1.395	1.055	33.414
	拔节期	61.89	52.93	2.176	1.387	14.472
	抽雄吐丝期	96.72	74.96	2.407	1.888	22.500
	灌浆成熟期	107.82	86.58	1.373	0.981	19.701
	全生育期	336.72	308.25	1.838	1.328	8.456

3　结论

(1)玉米营养生长期内连续的轻微受旱胁迫可能会刺激玉米适应性机能，复水后各项生理功能恢复正常，但较为严重的水分亏缺会明显减弱适应能力，合理的水分亏缺范围是保证玉米适应能力得以充分发挥的重要因素。

(2)较重的受旱胁迫不仅会使玉米当期的蒸发蒸腾量减少，而且会产生累积效应，将这种胁迫影响传递到之后的生育阶段，相同受旱程度对玉米生殖生长阶段影响更为明显，且随着胁迫程度的加重更易造成永久胁迫。

(3)通过遗传算法率定得出的 a、b 值可有效提高 ET_0 计算的准确性；但由于新马桥试验站位于淮北平原南部，因而单以此数据率定所得 a、b 值并不能做到精确覆盖整个淮北平原，后期还需在平原北部和中部地区的灌溉试验站增设自动气象站，以此增加淮北平原太阳总辐射数据的观测范围和率定精度。

(4)以双作物系数估算无受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量为基础，采用遗传算法率定得到基础作物系数 K_{cbini}、K_{cbmid}、K_{cbend} 以及作物系数上限 K_{cmax} 分别为 0.150、1.090、0.152 和 1.400，以此作物系数运用双作物系数法估算无受旱胁迫下全生育期蒸发蒸腾量的均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 分别为 1.39 mm 和 0.97 mm，比对应的 FAO－56 小 6.74% 和 8.23%，说明 GA 的估算结果比 FAO－56 更接近实测值，以 GA 优化得到的作物系数进行双作物系

数法估算与实际情况的拟合效果更优;受旱胁迫下全生育期蒸发蒸腾量估算精度要差于未受旱的估算结果,遗传算法能否提升受旱胁迫下玉米蒸发蒸腾量估算精度,尚需长序列的试验数据做进一步的验证。

参 考 文 献

1 赵文双,商彦蕊,黄定华,等. 农业旱灾风险分析研究进展[J]. 水科学与工程技术, 2007(6):1 - 5.
ZHAO Wenshuang, SHANG Yanrui, HUANG Dinghua, et al. Progression of agricultural drought disaster risk analysis[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007(6):1 - 5. (in Chinese)

2 段红东. 21 世纪淮河治理规划应重点思考的几个问题[J]. 水利规划与设计, 2001(2):24 - 27.

3 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
DU Yun. Study on risk assessment of agricultural drought disaster in Huaihe River Basin[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)

4 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院. 安徽省抗旱规划[R]. 2010.

5 李德, 景元书, 祁宦. 1980—2012 年安徽淮北平原玉米灌浆期连阴雨灾害风险分析[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 700 - 709.
LI De, JING Yuanshu, QI Huan. An analysis of disaster risk for continuous cloudy-rainy weather during the filling stage of maize on the Huaibei Plain, Anhui[J]. Resources Science, 2015, 37(4): 700 - 709. (in Chinese)

6 祁宦,朱延文,王德育,等. 淮北地区农业干旱预警模型与灌溉决策服务系统[J]. 中国农业气象,2009,30(4): 596 - 600.
QI Huan, ZHU Yanwen, WANG Deyu, et al. Studies on drought forecast model and irrigation service systems in Huaibei areas [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 596 - 600. (in Chinese)

7 鲍艳松, 严婧, 闵锦忠, 等. 基于温度植被干旱指数的江苏淮北地区农业旱情监测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 163 - 172.
BAO Yansong, YAN Jing, MIN Jinzhong, et al. Agricultural drought monitoring in north Jiangsu by using temperature vegetation dryness index[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 163 - 172. (in Chinese)

8 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 等. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 90 - 98.
FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 90 - 98. (in Chinese)

9 石小虎, 蔡焕杰, 赵丽丽, 等. 基于 SIMDualKc 模型估算非充分灌水条件下温室番茄蒸发蒸腾量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 131 - 138.
SHI Xiaohu, CAI Huanjie, ZHAO Lili, et al. Estimation of greenhouse tomato evapotranspiration under deficit irrigation based on SIMDualKc model[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 131 - 138. (in Chinese)

10 王维, 王鹏新, 解毅. 基于动态模拟的作物系数优化蒸散量估算研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 129 - 136. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20151118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.018.
WANG Wei, WANG Pengxin, XIE Yi. Estimation of evapotranspiration optimized by crop coefficient based on dynamic simulation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 129 - 136. (in Chinese)

11 郑珍, 蔡焕杰, 虞连玉, 等. CERES - Wheat 模型中两种蒸发蒸腾量估算方法比较研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 179 - 191. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160823&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.023.
ZHENG Zhen, CAI Huanjie, YU Lianyu, et al. Comparison of two crop evapotranspiration calculating approaches in CSM - CERES - Wheat model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 179 - 191. (in Chinese)

12 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 等. 用 FAO - 56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 30 - 34.
PENG Shizhang, DING Jiali, MAO Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO - 56 method[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 30 - 34. (in Chinese)

13 MARTINS J D, RODRIGUES G C, PAREDES P, et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(3): 291 - 310.

14 王笑影. 农田蒸散估算方法研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究,2003,19(2):81 - 84.
WANG Xiaoying. Study of the estimating methods for evapotranspiration in farmland[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003, 19(2):81 - 84. (in Chinese)

15 GIRONA J, MATA M, FERERES E, et al. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(2): 107 - 122.

16 孙景生, 熊运章, 康绍忠. 农田蒸发蒸腾的研究方法与进展[J]. 灌溉排水, 1993, 13(4): 36 - 38.

17 RICHARD W T, STEVEN R E, TERRY A H. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in semi-arid, advective environment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(4): 335 - 348.

18 MANUEL W T, FRANCESC I C. Simplifying diurnal evapotranspiration estimates over short full-canopy crops[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4): 628 - 632.

19 裴浩，范一大，乌日娜. 利用卫星遥感监测土壤含水量[J]. 干旱区资源与环境，1999，13(1)：73－76.
PEI Hao，FAN Yida，WU Rina. Sense remotely soil moisture through meteorological satellite[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，1999，13(1)：73－76.（in Chinese）

20 刘钰，PEREIRA L S. 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，PEREIRA L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the CSAE，2000，16(5)：26－30.（in Chinese）

21 DUCHEMIN B，HADRIA R，ERRAKI S，et al. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco：on the use of relationships between evapotranspiration，crops coefficients，leaf area index and remotely-sensed vegetation indices[J]. Agricultural Water Management，2006，79(1)：1－27.

22 DEJONGE K C，ASCOUGH J C，ANDALES A A，et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation[J]. Agricultural Water Management，2012，115(12)：92－103.

23 RAY S S，DADHWAL V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. Agricultural Water Management，2001，49(3)：239－249.

24 赵娜娜，刘钰，蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报，2010，41(8)：953－959.
ZHAO Nana，LIU Yu，CAI Jiabing. Calculation of crop coefficient and water consumption of summer maize[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2010，41(8)：953－959.（in Chinese）

25 赵丽雯，吉喜斌. 基于 FAO－56 双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例[J]. 中国农业科学，2010，43(19)：4016－4026.
ZHAO Liwen，JI Xibin. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO－56 dual rrop coefficient approach—a case study of the maize field in an oasis in the middlestream of the Heihe river basin in Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2010，43(19)：4016－4026.（in Chinese）

26 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）

27 宿梅双，李久生，饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下玉米和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报，2005，21(8)：25－29.
SU Meishuang，LI Jiusheng，RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated maize and sweet corn using a weighing lysimeter[J]. Transactions of the CSAE，2005，21(8)：25－29.（in Chinese）

28 胡庆芳，杨大文，王银堂，等. Angstrom 公式参数对 ET_0 的影响及 FAO 建议值适用性评价[J]. 水科学进展，2010，21(5)：644－652.
HU Qingfang，YANG Dawen，WANG Yintang，et al. Effects of Angstrom coefficients on ET_0 estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China[J]. Advances in Water Science，2010，21(5)：644－652.（in Chinese）

29 袁宏伟，袁先江，汤广民，等. 淮北平原 Angstrom 公式参数校正及太阳总辐射时空特征分析[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(5)：426－432.
YUAN Hongwei，YUAN Xianjiang，TANG Guangmin，et al. Correction of parameters in Angstrom formula and analysis of total solar radiation characteristics in Huaibei plain[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engin，2018，36(5)：426－432.（in Chinese）

30 金菊良，杨晓华，丁晶. 标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践，2001，21(4)：8－13.
JIN Juliang，YANG Xiaohua，DING Jing. An improved simple genetic algorithm—accelerating genetic algorithm[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2001，21(4)：8－13.（in Chinese）

31 ALLEN R G，PEREIRA L S，RAES D，et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome：Fao Irrigation and Drainage Paper No. 56，1998.