

作物需水量模拟计算结果有效性检验

于 婵^{1,2}, 朝伦巴根^{1*}, 高瑞忠¹, 朱仲元¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水文总局, 呼和浩特 010010)

摘 要: 作物需水量是确定节水高效灌溉制度、制定灌溉排水规划和水资源合理配置必不可少的重要参数。当前模拟计算作物需水量的主要方法有 FAO-56 双作物系数法、双涌源能量守恒模型、根系层水量平衡模型和 SWAP 模型, 而各种方法均有利弊和使用条件。不论采用哪种方法模拟计算作物需水量, 其结果必须进行有效性检验, 否则不能用于上述工程项目。该文用 FAO-56 双作物系数法基于灌溉试验数据模拟计算了人工牧草——老芒麦、冰草的需水量, 并对模拟计算的需水量采用拟合相关图法、回归分析法和残差估计误差指示法进行了有效性检验。拟合相关图法定性检验, 给出了统计相关趋势; 回归分析法和残差估计误差指示法为定量检验, 给出了模拟计算值与实测值间的拟合优度和残差估计误差的范围。这种定性定量相结合的方法有效地检验了需水量模拟值与其实测值间的一致性, 其结果可用于工程项目中。

关键词: 作物, 灌溉, 水资源, 双作物系数法, 需水量, 有效性检验

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.003

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0013-09

于 婵, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 作物需水量模拟计算结果有效性检验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 13—21.

Yu Chan, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. Validity examination of simulated results of crop water requirements[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 13—21. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

制定高效用水灌溉制度对水资源短缺的地区获取农业发展和生态建设双赢目标具有重要的意义。刘钰、张汉君等制定了望都地区小麦、玉米和棉花的灌溉制度^[1], 孙景生、肖俊夫等制定了河南新乡地区夏玉米的高效用水灌溉制度^[2], 孙景生、康绍忠等制定了山西省霍泉地区冬小麦、夏玉米的高效用水灌溉制度^[3]。上述学者在制定灌溉制度时基于灌溉试验数据采用不同方法模拟计算了人工作物需水量(冠层蒸腾和株间蒸发), 并采用了拟合相关图法对模拟计算的需水量与其实际观测值进行了有效性检验。然而拟合相关图法检验只能给出模拟值与实测值间拟合的统计趋势, 并不能定量地给出它们之间的拟合优度和残差估计误差的范围。E. D. Holpankulov、O. P. Inchenkova、P. Paredes、L.S. Pereira 在制定中亚地区棉花的灌溉制度^[4]中强调了对作物需水量模拟值有效性检验的重要性, 并给出检验方法。本文以 2004、2005 年在浑善达克沙地东南缘正蓝旗恒洲域进行的人工牧草(老芒麦、冰草)灌溉试验数据为基础, 应用 FAO-56 双作物系数法模拟计算了人工牧草的需水量。对模拟计算

的人工牧草需水量分别采用拟合相关图法、回归分析法和残差估计误差指示法定性定量的分析需水量模拟值与实测值之间的一致性, 其结果表明这种定性定量相结合的检验方法不仅给出了模拟值与实测值之间拟合的统计趋势, 而且能给出模拟值与实测值间的拟合优度和残差估计误差的范围, 从而客观地检验出需水量模拟值的有效性。经有效性检验后的作物需水量模拟值可用于制定节水高效的灌溉制度、灌溉排水规划, 也可用作水资源合理配置的一种参数。

1 人工牧草灌溉试验

1.1 试验区概况

人工牧草(老芒麦、冰草)灌溉试验场选择在浑善达克沙地东南缘——内蒙古正蓝旗恒洲域国家自然科学基金项目灌溉试验场(北纬 42°16'、高程 1 319 m)。2004、2005 年试验场气象要素及其变化范围见表 1。试验场根系层(1.6 m)土壤质地为壤土和细砂壤土。根系层剖面土壤水参数见表 2。

1.2 灌溉试验

由于老芒麦、冰草具有高产、省水及适口性好等特点, 在内蒙古自治区广泛种植。本文以老芒麦、冰草为试验牧草进行了灌溉试验。灌溉试验共设不同灌溉方式的 6 个处理, 每个处理设 3 个重复。2004 年第 6 处理设置了遮雨棚。多年生人工牧草一般第 1~3 年产量高, 第 4 年开始产量下降, 因此灌溉试验时间选在高产的 2004 和 2005 两年。表 3 给出老芒麦、冰草的灌溉试验数据。

收稿日期: 2008-01-18 修订日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50139040)

作者简介: 于 婵(1980—), 女, 内蒙古锡林浩特市人, 博士生, 研究方向为水资源优化配置。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: yuchan00_00@163.com

*通信作者: 朝伦巴根(1940—), 男, 内蒙古乌兰浩特市人, 教授, 博士生导师, 从事水文水资源的教学与研究工作。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018。Email: Chaolunbagen@cast.org.cn

表 1 试验场降雨、气温、风速、净辐射月平均值及其变化范围

Table 1 Monthly averages and variation ranges of rainfall, temperature, wind speed and net radiation in experimental site

年份	月份	降雨/mm	平均			变化范围		
			温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	净辐射/(MJ·m ⁻²)	温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	净辐射/(MJ·m ⁻²)
2004	4	20.4	6.9	3.2	10.8	-6.8~17.1	0.9~5.3	5.7~15.1
	5	44.6	11.1	3.5	13.0	3.0~20.7	1.7~6.1	3.4~16.1
	6	97.0	17.1	1.7	12.6	13.3~21.7	0.3~3.6	2.9~17.0
	7	107.6	18.2	1.4	13.9	13.9~22.2	0.1~3.5	3.1~18.4
	8	68.6	16.0	1.0	11.6	10.9~21.3	0.2~2.9	2.8~17.1
	9	4.6	14.0	1.8	10.6	11.6~16.4	0.8~2.7	6.6~11.8
2005	4	0	4.5	4.1	11.6	-3.2~14.3	1.4~7.1	5.7~20.7
	5	25.7	10.6	3.3	14.1	2.5~18.8	1.1~5.7	6.6~23.2
	6	46.1	17.1	2.3	17.5	10.3~24.2	0.8~4.1	6.3~26.5
	7	67.5	19.9	1.3	15.3	15.6~25.5	0.2~3.2	6.2~26.1
	8	57.4	18.3	0.7	12.0	13.4~25.7	0.1~3.0	5.9~19.3
	9	1.2	9.9	1.5	10.8	8.4~12.4	1.3~1.9	8.0~12.3

表 2 根系层剖面土壤质地及田间持水率、凋萎系数和饱和含水率

Table 2 Soil texture, field capacity, wilting point and saturation of root layer profile

深度/cm	粒径分析数据				田间持水率 $\theta_{FC}/\%$	凋萎系数 $\theta_{WP}/\%$	饱和含水率 $\theta_s/\%$
	砂粒质量分数/%	粉细砂质量分数/%	黏粒质量分数/%	美国土壤系统分类			
0~20	87.142	7.971	4.810	壤土	26.2	8.5	34.5
20~40	90.844	4.533	3.834	壤土	25.8	6.6	34.3
40~60	89.643	6.606	4.072	壤土	26.6	8.5	35.7
60~80	91.590	2.540	4.441	砂壤土	25.3	7.1	34.6
80~100	87.232	6.057	4.992	壤土	25.9	8.2	34.5
100~120	90.473	4.578	4.429	砂壤土	24.2	7.0	32.4
120~140	89.248	6.156	4.176	壤土	27.8	8.2	37.6
140~160	84.293	7.800	6.659	壤土	26.5	9.9	35.6
平均					26.0	8.0	34.9

表 3 灌溉试验的试验设置、灌溉水量、生育期内降雨量

Table 3 Design of irrigation experiment, irrigation depth and precipitation during crop growing period

牧草	年份	试验处理	每个处理重复数	灌溉水量/mm	降雨量/mm	年份	试验处理	每个处理重复数	灌溉水量/mm	降雨量/mm
老芒麦	2004	1	3	0	327.4	2005	1	3	0	199.1
		2	3	222.7	327.4		2	3	183.5	199.1
		3	3	136.5	327.4		3	3	158.9	199.1
		4	3	107.3	327.4		4	3	92.4	199.1
		5	3	101.6	327.4		5	3	73.5	199.1
		6	3	196.4	0		6	3	9.3	199.1
冰草	2004	1	3	0	338.2	2005	1	3	0	168.5
		2	3	245.9	338.2		2	3	194.8	168.5
		3	3	181.8	338.2		3	3	146.5	168.5
		4	3	124.0	338.2		4	3	100.7	168.5
		5	3	116.4	338.2		5	3	74.2	168.5
		6	3	227.1	0		6	3	12.1	168.5

1.3 试验观测

1) 用安设在试验场 2 m 高处的 AZW-001 自动气象站观测降水量、蒸发量、大气压强、空气相对湿度、太阳总辐射、光合有效辐射、大气温度、风速、风向、地表温度及土壤热通量等参数。这些观测数据用来计算参考作物蒸散量。

2) 对试验牧草, 用 CI-110 型叶面指数仪每 5 d 观测

1 次叶面指数 (LAI)。

3) 从每个处理的 3 个重复中分别选出高、中、低的牧草各 1 株, 每 5~10 d (不同牧草不同灌溉处理的观测周期不等) 中的晴天从 6:00—19:00 用光合作用仪 (TPS-1 型) 按 Δt_i (一般等于 1 h) 时间间隔观测叶片蒸腾速率 ($\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。取该 3 株牧草叶片蒸腾速率第 i 个 Δt_i 间隔观测值的均值为牧草叶片蒸腾速率的第 i 个观测值,

记作 $TR_{leaf,i}$ 。人工牧草生育期任意观测日冠层尺度蒸腾量 (TR_{cn} , mm/d) 由这一天 Δt_i 间隔所观测的叶片蒸腾速率 $TR_{leaf,i}$ 按下式转换计算得到^[5-7]

$$TR_{cn} = 2.24 \times 10^{-2} \times \left(\sum_{i=1}^n TR_{leaf,i} \times \Delta t_i \right) \times 2 \times LAI \quad (1)$$

式中: n ——观测日的观测次数; 2.24×10^{-2} ——单位间的转换系数。

4) 每 5 d 测量试验牧草冠层高度、叶宽和根系层深度, 根系层深度通过采样确定。它用来以 FAO-56 双作物系数法模拟计算人工牧草蒸腾量。

5) 用 TDR 每 3 d 测量 1 次根系层的土壤含水率, 降雨、灌溉后加测, 观测深度为 0~1.6 m。

6) 试验牧草行间安设微型蒸发器测量株间土壤蒸发量。微型蒸发器用 PVC 管做成, 内径 10 cm, 壁厚 5 mm, 高 30 cm, 3~5 d 换土, 当有湿润过程发生, 过程后立刻换土。每次取土, 将其垂直压入土壤, 取出后用刀抹平, 用纱布封底, 称质量, 每天早晨用精度为 0.1 g 的电子天平称质量, 2 d 内质量的差值为其蒸发量。设 2 个重复, 取这 2 个重复平均值为当天土壤蒸发量的实测值。为保证操作时不破坏附近土体结构, 用内径为 12 cm 的 PVC 管做成外套, 固定于土壤中, 使其表面与附近土壤持平。

2 模拟计算人工牧草需水量的 FAO-56 双作物系数法

人工牧草需水量是补偿牧草蒸腾蒸发 (蒸散) 过程损耗的根系层水分所需的水量, 它在数量上与牧草蒸腾蒸发量相等。采用 FAO-56 双作物系数法^[8]逐日模拟计算牧草蒸腾蒸发量需要有日基本作物系数, FAO-56 双作物系数法中所需基本作物系数按 4 个生长阶段逐日计算。本文的人工牧草各生长阶段长度按叶面积指数 (地表被作物覆盖程度) 确定, 见表 4。

表 4 2004、2005 年人工牧草生长阶段时间表

Table 4 Growth stages of the fodder crops in 2004 and 2005

年份	人工牧草	生长初期/ 月-日	生长发育期/ 月-日	生长中期/ 月-日	生长后期/ 月-日
2004	老芒麦	04-08—05-27	05-28—06-25	06-26—07-21	07-22—08-16
	冰草	04-08—05-24	05-25—06-29	06-30—08-11	08-12—09-03
2005	老芒麦	04-12—05-19	05-20—06-24	06-25—08-03	08-04—08-15
	冰草	04-12—05-19	05-20—06-17	06-18—07-20	07-21—08-09

FAO-56 双作物系数法

$$\begin{aligned} ET_{c,i} &= K_{c,act,i} ET_o \\ &= (K_{s,i} K_{cb,i} + K_{e,i}) ET_{o,i} \\ &= E_{c,i} + E_{s,i} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $K_{c,act,i}$ 、 $K_{cb,i}$ 、 $K_{e,i}$ ——分别为第 i 天的实际作物系数、基本作物系数和土壤蒸发系数; $ET_{o,i}$ 、 $ET_{c,i}$ ——分别为第 i 天的参考作物蒸散量、作物需水量, mm/d; $E_{c,i}$ 、 $E_{s,i}$ ——分别为第 i 天的人工牧草冠层蒸腾、土壤蒸发速率, mm/d。 $K_{s,i}$ ($0 \leq K_{s,i} \leq 1$) 是反映第 i 天水分胁迫影响程度的水分胁迫系数, 有水分胁迫时 $K_{s,i} < 1$, 无水分胁迫时 $K_{s,i} = 1$ 。

2.1 水分胁迫系数 $K_{s,i}$

当 $D_{r,i} > RAW$, $K_{s,i}$ 计算式为

$$K_{s,i} = \frac{TAW_i - D_{r,i}}{TAW_i - (1 - p_i) TAW_i} \quad (3)$$

$$TAW_i = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_{r,i} \quad (4)$$

$$p_i = p_s + 0.04(5 - ET_{o,i}) \quad (5)$$

式中: TAW_i ——第 i 天根系层中的总有效水量, mm; p_i ——第 i 天不遭受水分胁迫时, 作物从根系层中吸收的有效水量与 TAW_i 之比; p_s ——推荐值; $Z_{r,i}$ ——第 i 天根系长度, m; $D_{r,i}$ ——第 i 天根系层中的释水量, mm。 $D_{r,i}$ 通过以日为时段的根系层水均衡计算得出^[8-9]。

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (6)$$

式中: P_i ——第 i 天的降雨量, mm; RO_i ——第 i 天降雨形成的地表径流量, mm; I_i ——第 i 天渗入土壤的灌溉深度, mm; CR_i ——第 i 天的地下水毛管上升水量, mm; DP_i ——第 i 天根系层深层渗漏损失水量, mm。

2.2 日参考作物蒸散量 ($ET_{o,i}$) 的计算

$ET_{o,i}$ 采用 FAO Penman-Monteith^[8-12] 公式计算

$$ET_{o,i} = \frac{0.408 \Delta_i (R_{n,i} - G_i) + \gamma \frac{C_n}{T_i + 273} u_{2,i} (e_{s,i} - e_{a,i})}{\Delta_i + \gamma(1 + C_d u_{2,i})} \quad (7)$$

式中: $R_{n,i}$ ——第 i 天的太阳净辐射, MJ/(m²·d); G_i ——第 i 天的太阳热通量, MJ/(m²·d); T_i ——第 i 天 2 m 高度处平均气温, °C; $u_{2,i}$ ——第 i 天 2 m 高度处平均风速, m/s; $e_{s,i}$ ——第 i 天饱和水汽压, kPa; $e_{a,i}$ ——第 i 天实际水汽压, kPa; $e_{s,i} - e_{a,i}$ ——第 i 天饱和水汽压差, kPa; Δ_i ——第 i 天饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C; γ ——湿度常数, kPa/°C; C_n 、 C_d ——与计算时段、白昼影响有关的参数, 以天为时段的计算中 $C_n=900$ 、 $C_d=0.34$ 。

Δ_i 计算公式如下

$$\Delta_i = \frac{4098[0.6108 \exp(\frac{17.27 T_i}{T_i + 237.3})]}{(T_i + 237.3)^2} \quad (8)$$

2.3 不同灌溉试验年各生长阶段基本作物系数 K_{cb}

由于双作物系数法逐日模拟计算蒸散速率, 因此 K_{cb} 要按天计算, 下面给出按天计算 K_{cb} 的公式。

2.3.1 初始生长阶段基本作物系数 $K_{cb,ini}$

由于初始生长阶段的地表被作物覆盖程度不足 10%, Allen 等^[8]令 $K_{cb,ini}=0.15$ 。本文认为多年生人工牧草 $K_{cb,ini}$ 在 $K_{cb,ini}^{start}$ (2004 年出苗那一天、2005 年返青那一天的 $K_{cb,ini}$, 令 $K_{cb,ini}^{start}=0$) 和初始生长阶段结束那一天基本作物系数 $K_{cb,ini}^{end}$ 间线性变化。 $K_{cb,ini}^{end}$ 的计算式为

$$K_{cb,ini}^{end} = TR_{cn,ini}^{end} / ET_{o,ini}^{end} \quad (9)$$

式中: $TR_{cn,ini}^{end}$ ——初始生长阶段结束那一天的蒸腾量, mm/d, 其值取阶段结束前 3 天的牧草蒸腾速率平均值, 每 1 d 的蒸腾速率由式 (1) 计算得出; $ET_{o,ini}^{end}$ ——与计算平均蒸腾量所对应的那 3 d 的参考作物蒸散量均值, mm/d。

2.3.2 生长中期基本作物系数 $K_{cb,mid}$

根据 FAO 56 假定, 牧草生长中期阶段基本作物系数 $K_{cb,mid}$ 是常数。 $K_{cb,mid}$ 先用基于加密观测的蒸腾速率按式 (1) 转换计算出的冠层尺度蒸腾量的遗传算法模型 (GAM) 计算, 然后进行地区气候条件修正。

遗传算法模型目标函数

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (K_{s,i} K_{cb(GAM)} ET_{o,mid,i} - TR_{cn,mid,i})^2 \quad (10)$$

决策变量 $K_{cb(GAM)}$ 的约束为

$$0.7 \leq K_{cb} \leq 1.3 \quad (11)$$

式中: $TR_{cn,mid,i}$ ——生长中期阶段第 i 天用式 (1) 式转换计算出的冠层尺度的蒸腾量。 $K_{cb(GAM)}$ 的下、上界值 0.7 和 1.3 取自 FAO-56 中 K_{cb} 参考值的上下界。这个下、上界值对应亚气候条件 ($RH_{min}=45\%$, $u_2=2 \text{ mm/s}$), 因此对遗传算法模型寻优计算出的 $K_{cb(GAM)}$ 要用式 (12) 进行地区实际湿度、2 m 高度处的风速校正后得到 $K_{cb,mid}$

$$K_{cb,mid} = K_{cb(GAM)} + \{0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)\} \{h/3\}^{0.3} \quad (12)$$

式中: RH_{min} ——生长中期的日最小相对湿度, %; h ——生长中期的平均作物高度, m。

2.3.3 生长发育、生长后期阶段基本作物系数 $K_{cb,dev}$ 、 $K_{cb,late}$

FAO-56 假定生长发育阶段、生长后期阶段的基本作物系数分别在生长初期基本作物系数和生长中期阶段初基本作物系数、生长中期阶段末基本作物系数和生长中后期阶段末基本作物系数间线性变化。生长后期阶段末的基本作物系数 $K_{cb,late}^{end}$ 的确定与 $K_{cb,ini}^{end}$ 相同。

$$K_{cb,late}^{end} = TR_{cn,late}^{end} / ET_{o,late}^{end} \quad (13)$$

表 5 老芒麦、冰草各生长阶段基本作物系数表

Table 5 Basal crop coefficients in different growing periods of Elymus and Agropyron

人工牧草	年份	$K_{cb,ini}^{end}$	$K_{cb,mid}$ (GAM)	$K_{cb,late}^{end}$
老芒麦	2004	0.287	0.828	0.655
	2005	0.225	0.837	0.680
冰草	2004	0.227	0.813	0.678
	2005	0.243	0.827	0.693

2.4 不同灌溉试验年各生长阶段蒸发系数 $K_{e,ini}$

和 K_{cb} 一样, $K_{e,ini}$ 也按天计算出。下面给出各生长阶段按天计算 $K_{e,ini}$ 的公式。

2.4.1 初始生长阶段蒸发系数 $K_{e,ini}$

初始生长阶段地表基本处于裸露状态, 因此蒸发按 2 个阶段进行。第一阶段是能量受限阶段, 蒸发以潜在速率进行, FAO-56 给出

$$K_{e,ini} = K_{cmax} - K_{cb,ini} \quad (14)$$

式中: K_{cmax} ——作物系数的最大值, Allen 等给出 $K_{cmax}=1.15^{[8]}$ 。由于能量受限阶段 $K_{cb,ini} \approx 0$, 所以 $K_{e,ini} = K_{cmax}=1.15$ 。完成能量受限阶段蒸发过程的时间 t_1 由下式计算

$$t_1 = \frac{REW}{1.15 ET_0} \quad (15)$$

蒸发的第二阶段为增发递减阶段。这时 $K_{e,ini}$ 的计算由 Allen 等给出

$$K_{e,ini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left[\frac{-(t_w - t_1) E_{so} (1 + \frac{TEW}{TEW - REW})}{TEW} \right]}{t_w ET_{o,i}} \quad (16)$$

式中: t_w ——湿润过程的平均时间间隔, d, REW ——土壤表层的易蒸发水量, mm; TEW ——当土壤表层已经完全湿润时从土壤表层蒸发水分的累计深度, mm。

$$t_w = \frac{L_{ini}}{n_w + 0.5} \quad (17)$$

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP}) Z_e \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} REW &= 8 + 0.08 (Clay) \\ REW &= 20 - 0.15 (Sand) \quad (Sand) > 80\% \\ REW &= 11 - 0.06 (Clay) \quad (Clay) > 50\% \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: L_{ini} ——生长初期阶段长度, d; n_w ——生长初期阶段湿润过程次数; Z_e ——通过蒸发存留在土壤表层水分到 $0.5\theta_{WP}$ 时的表层土壤有效深度, m。FAO-56 推荐黏土层的 $Z_e=0.15$, 沙土层的 $Z_e=0.1$, Clay、Sand 分别为黏土、砂土粒含量。当 $t_w < t_1$ 时, $K_{e,ini}=1.15$, 否则 $K_{e,ini}$ 用式 (16) 计算。

2.4.2 生长发育、中期和后期蒸发系数 $K_{e,dev}$ 、 $K_{e,mid}$ 、 $K_{e,late}$

在这 3 个生长阶段, 当降雨或灌溉后土壤表层水分多, 蒸发系数大; 当土壤表层很干时蒸发系数变得很小; 当土壤表层没有存留水分时蒸发系数为 0。3 个生长阶段按天计算的 K_e 用相同一组公式。

$$K_e = \min \{ K_r (K_{cmax} - K_{cb}), f_{ew} K_{cmax} \} \quad (20)$$

$$K_{cmax} = \max \left\{ \left\{ 1.2 + \left[0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45) \right] (h/3)^{0.3} \right\}, \{ K_{cb} + 0.05 \} \right\} \quad (21)$$

式中: K_{cmax} ——降雨或灌溉后的最大作物系数; f_{ew} ——裸露和湿润地表的面积比值。对我们设置的灌溉试验, 只有部分地表 (f_w) 被湿润, 因此, f_{ew} 用近似的代表有效暴露在蒸发能量下的部分地表面 ($1-f_c$) 和 f_w 约束

$$f_{ew} = \min[(1-f_c), f_w] \quad (22)$$

对于 $D_{e,i-1} > REW$, 第 i 天蒸发衰减系数 $K_{r,i}$ 用下式计算

$$K_{r,i} = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad (23)$$

计算 $K_{r,i}$ 所需要的 $D_{e,i-1}$ 要通过土壤表层以日为时段水均衡计算得到。

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_{s,i}}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (24)$$

式中: $D_{e,i-1}$ ——第 $i-1$ 天末裸露和湿润土壤完全湿润后的

土壤蒸发累积深度, mm; $D_{e,i}$ ——第 i 天末土壤完全湿润后的蒸发累积深度, mm; $E_{s,i}$ ——第 i 天的蒸发量, mm; $T_{ew,i}$ ——第 i 天土壤表层裸露和湿润部分的蒸腾量, mm; $DP_{e,i}$ ——第 i 天当土壤含水率超过田间持水率时产生的深层渗漏损失量, mm。

2.5 逐日模拟计算有效根系层土壤含水率模拟计算式

$$\theta_{root,i} = \theta_{FC} - (D_{r,i} / 1000Z_{r,i}) \quad (25)$$

式中: $\theta_{root,i}$ ——第 i 天根系层的土壤含水率, %。

将式 (1) ~ (25) 在 EXCEL 上编程, 并用它模拟计算了老芒麦和冰草 2004、2005 年的不同灌溉处理的生育期需水量。图 1 给出 2004 年生育期内老芒麦、冰草各

试验处理的需水量模拟值 (ET_c) 的日变化过程。表 6 给出 2004、2005 年生育期各灌溉处理的老芒麦、冰草模拟计算的需水量。

表 6 老芒麦、冰草需水量模拟计算结果

Table 6 Simulated water requirements of Elymus and Agropyron mm

人工牧草	年份	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6
老芒麦	2004	317.59	448.75	387.31	375.98	369.53	210.00
	2005	277.84	452.23	378.69	342.85	333.62	259.65
冰草	2004	340.04	507.79	430.34	394.00	358.35	219.41
	2005	259.23	434.42	383.51	344.22	325.88	256.36

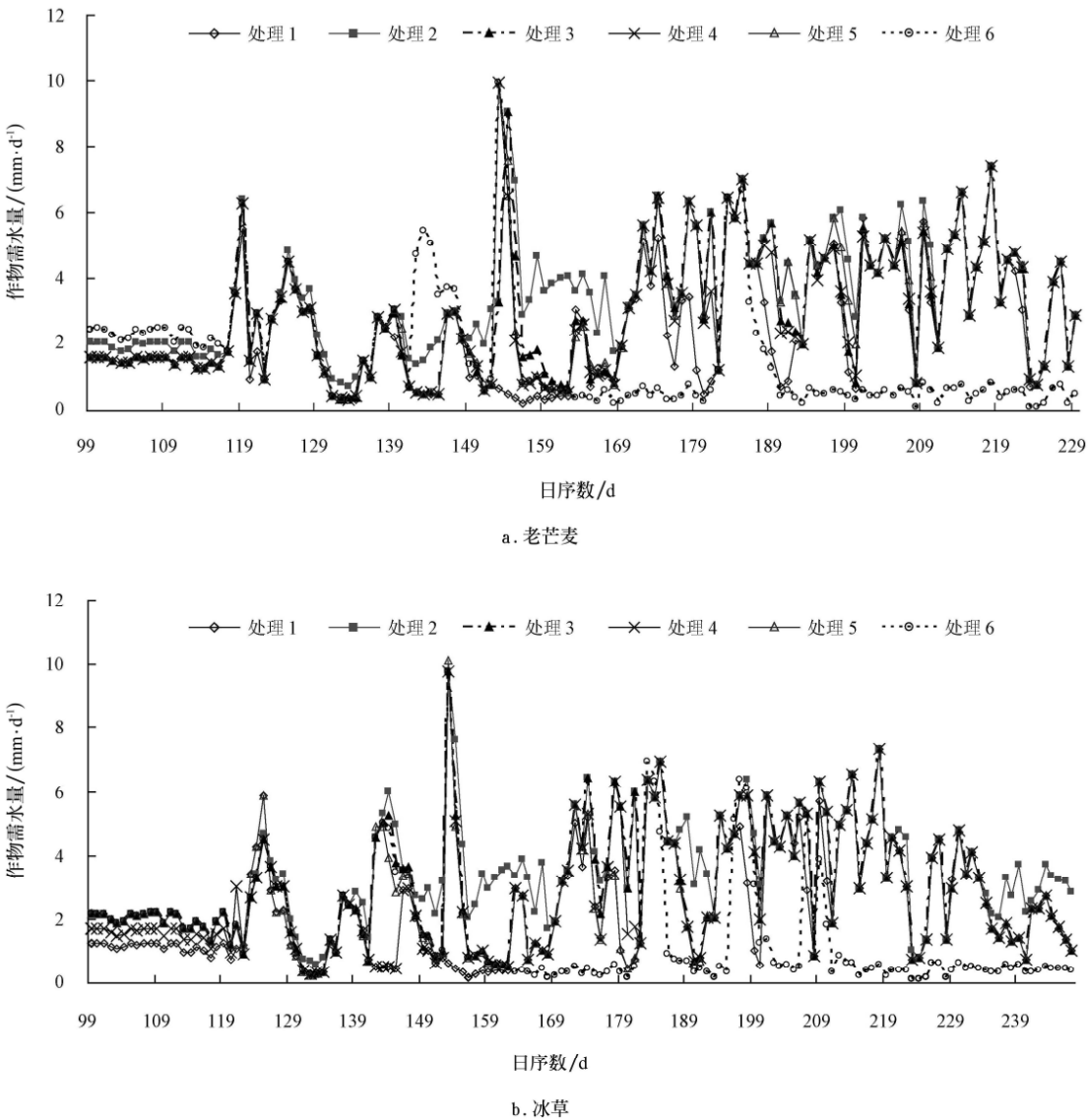


图 1 2004 年生育期内老芒麦、冰草各试验处理的需水量模拟值 (ET_c) 的日变化过程
Fig.1 Simulated daily ET_c under different experiment treatments of Elymus and Agropyron in growing period of 2004

3 人工牧草模拟计算需水量有效性检验

3.1 拟合相关图法

式 (1) ~ (25) 模拟计算了需水量 (牧草蒸腾、株间土壤蒸发) 和有效根系层土壤含水率。灌溉试验对这 3

种模拟值均有实际观测。图 2~4 给出 6 个处理下蒸腾量、株间土壤蒸发量和有效根系层土壤含水率的模拟值与实际观测值的拟合相关图。3 种模拟值与实测值基本落在 1:1 线周围。

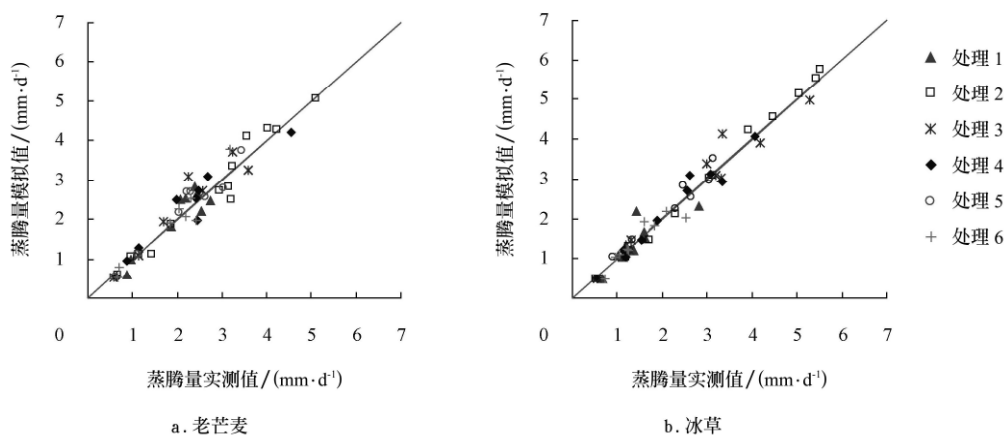


图 2 2005 年老芒麦、冰草蒸腾量实测值与模拟值的拟合相关图

Fig.2 Fitting correlation diagrams of observed and simulated transpiration for Elymus and Agropyron in 2005

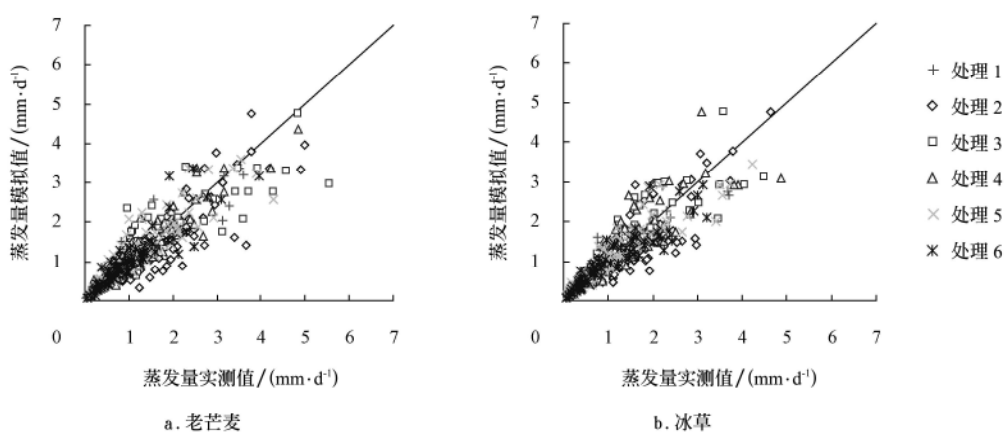


图 3 2005 年老芒麦、冰草株间土壤蒸发量实测值与模拟值的拟合相关图

Fig.3 Fitting correlation diagrams of observed and simulated soil evaporation for Elymus and Agropyron in 2005

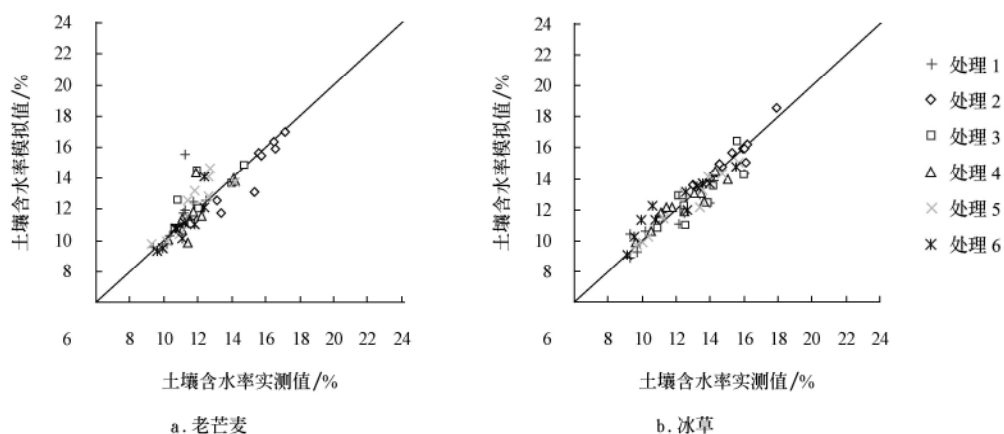


图 4 2005 年老芒麦、冰草有效根系层土壤含水率实测值与模拟值的拟合相关图

Fig.4 Fitting correlation diagrams of observed and simulated root layer soil water content for Elymus and Agropyron in 2005

3.2 相关分析法

1) 回归系数 b

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (26)$$

式中: O_i ——第 i 个实际观测值; \bar{O} ——实测值的平均

值; S_i ——第 i 个模拟计算值; \bar{S} ——模拟值的平均值。
 b 值越接近于 1, 表明模拟值统计的接近于观测值。

2) 决定系数 R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]^{0.5}} \quad (27)$$

R^2 值越接近于 1, 表明观测值的变异性可由模拟模型解得。

3.3 残差估计误差指示法

残差估计误差指示法所用参数有:

1) 残差的方差 $Var(ER)$

$$Var(ER) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \right)^2 \quad (28)$$

式中: n ——模拟计算、观测之总数; $Var(ER)$ ——观测值与模拟计算值间残差的方差。方差越小, 残差估计误差越小。

2) 平均绝对误差 AAE

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (29)$$

AAE 给出残差估计误差的范围, 它越小, 估计误差的范围越小。

3) 平均相对误差 ARE

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (30)$$

ARE 给出相对于实际观测值的残差估计误差范围, 它越小, 相对于实际观测值的估计误差范围越小。

4) 一致性参数 d_{LA}

$$d_{LA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (31)$$

式中: $\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2$ ——潜在误差; $\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2$ ——平均平方误差; d_{LA} ——平均平方误差与潜在误差比而言的参数, d_{LA} 最大极限值为 1。 d_{LA} 值越大, 一致性越好。

老芒麦、冰草相关分析法和残差估计误差指示法估计参数的范围见表 7。

表 7 老芒麦、冰草回归分析法和残差估计误差指示法估计参数的平均值和变化范围

Table 7 Averages and variation ranges of estimated parameters by regression analysis and indicating residual estimation errors for Elymus and Agropyron

项目		Var(ER)		AAE		ARE/%		d _{LA}		b		R ²	
		均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围
老芒麦	蒸腾量	0.055	0.004~0.117	0.22	0.10~0.32	12.18	8.40~15.83	0.95	0.72~0.99	1.08	0.93~1.26	0.91	0.67~1.00
	蒸发量	0.086	0.016~0.193	0.20	0.06~0.34	23.38	21.05~25.59	0.95	0.89~1.00	0.86	0.68~1.08	0.84	0.70~0.99
	土壤含水率	0.0003	0.0001~0.0007	0.01	0.00~0.02	8.02	2.86~12.58	0.89	0.59~0.98	1.05	0.81~1.23	0.8	0.71~0.96
冰草	蒸腾量	0.046	0.008~0.106	0.19	0.13~0.26	10.76	5.49~16.16	0.97	0.80~1.00	1.03	0.88~1.14	0.93	0.61~1.00
	蒸发量	0.141	0.068~0.262	0.21	0.11~0.34	23.65	20.90~25.32	0.95	0.88~0.98	0.83	0.73~0.94	0.83	0.64~0.97
	土壤含水率	0.0001	0~0.0002	0.01	0.01~0.01	4.55	2.99~6.85	0.93	0.86~0.97	0.78	0.68~0.98	0.80	0.60~0.91

4 结论与讨论

1) 蒸腾量、株间土壤蒸发量和有效根系层土壤含水率模拟值与实测值在拟合相关图上基本落在 1:1 线周围。这从统计相关趋势上定性地表明模拟值与实测值之间有较好的一致性, 即表明了模拟值的有效性。

2) 回归分析法得到的老芒麦、冰草蒸腾、蒸发的模拟值与实测值间的回归系数 b 、确定系数 R^2 大部分趋近于 1, 在 0.75~1.25 之间的 b 和 R^2 分别占总量的 91.7% 和 89.6%。

老芒麦、冰草土壤含水率的模拟值与实测值间的回归系数 b 、确定系数 R^2 也基本趋近于 1, 在 0.75~1.25 之间的 b 和 R^2 均占总量的 83.3%。

3) 残差估计误差指示法给出的老芒麦和冰草蒸腾量的残差估计误差的方差 $Var(ER)$ 、平均绝对误差 AAE 大部分均接近于 0, 误差方差大于 0.1 的有 2 个处理, 占总处理的 8.3%; 平均绝对误差 AAE 超过 0.25 的有 6 个处理, 占总处理的 25%; 平均相对误差 ARE 无大于 25% 的处理, 大于 15% 的有 3 个处理, 占总处理的 12.5%。

蒸发量的残差估计误差的方差 $Var(ER)$ 变化范围大, 而且超过 0.1 的共有 9 个处理, 占总处理的 37.5%; 平均绝对误差 AAE 超过 0.25 的有 10 个处理, 占总处理的 42%; 平均相对误差 ARE 超过 25% 的仅有 1 个处理, 占总处理

的 4.2%。

土壤含水率的残差估计误差的方差 $Var(ER)$ 、平均绝对误差 AAE 均非常接近于 0, 均小于 0.02; 平均相对误差 ARE 无超过 15% 的处理, 大于 10% 的有 3 个处理, 占总处理的 12.5%。

回归分析法和残差估计误差指示法定量的表明蒸腾、蒸发、土壤含水率模拟值与实测值的拟合优度较好, 其中蒸腾量模拟值与其实测值间的拟合优度比株间土壤蒸发和有效根系层土壤含水率的拟合优度更好。经这种有效性检验的作物需水量可以用于确定人工牧草的节水高效灌溉制度^[13-14], 同样可用于级别高的工程项目的规划设计。

总之, 只要有翔实的试验观测数据, 就可以将拟合相关图法、回归分析法和残差估计误差指示法相结合, 定性、定量分析研究作物需水量模拟值的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] 刘钰, Teixeira J L, Pereira L S, 等. 作物需水量与灌溉制度模拟[J]. 水利水电技术, 1997, 28(4): 38—43.
Liu Yu, Teixeira J L, Pereira L S, et al. Simulation on crop water requirements and irrigation scheduling[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 1997, 28(4): 38—43. (in Chinese with English abstract)

- [2] 孙景生, 肖俊夫, 张寄阳, 等. 夏玉米产量与水分关系及其高效用水灌溉制度[J]. 灌溉排水, 1998, 17(3): 17—21. Sun Jingsheng, Xiao Junfu, Zhang Jiyang, et al. Yield water relation and irrigation schedule of high efficient water use for summer maize[J]. Irrigation and Drainage, 1998, 17(3): 17—21. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孙景生, 康绍忠, 张寄阳, 等. 霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2002, 16(4): 50—53. Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Zhang Jiyang, et al. Schedules of irrigation for the high yield and water saving cultivation of winter wheat and summer maize in huoquan irrigation district of Shanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 16(4): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [4] Holpankulov E D, Inchenkova O P, Paredes P, et al. Cotton irrigation scheduling in central asia: model calibration and validation with consideration of groundwater contribution (manuscript)[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 57(5): 516—532.
- [5] Dong Xuejun, Zhang Xinshi, Yang Baozhen. A preliminary study on the water balance for some sand land shrubs based on transpiration measurements in field condition[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(3): 208—225.
- [6] 任传友, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 冠层尺度的生态系统光合-蒸腾耦合模型研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(2): 141—151. Ren Chuanyou, Yu Guirui, Wang Qiufeng, et al. A study on synthetic model of photosynthesis-transpiration for ecological system on canopy scale[J]. China Science D: Earth Science, 2004, 34(2): 141—151. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wallace J S, Roberts J M, Sivakumar M V K. The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices[J]. Agricultural forest meteorology, 1990, 51: 25—49.
- [8] Allen R G, Pereira L S, Dirck R, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [9] Allen R G, William O. Pruitt, James L. Wright, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 penman-monteith method[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81: 1—22.
- [10] 于婵, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 无水分胁迫下行作物蒸发与双涌源能量分配和交换关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 83—84. Yu Chan, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. Relationships between row crop evapotranspiration and two sources-energy partition and exchange under non-water stress condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 83—84. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高瑞忠, 朝伦巴根, 于婵, 等. 基于随机样本的神经网络模型估算参考作物腾发量[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 42—45. Gao Ruizhong, Chaolunbagen, Yu Chan, et al. Estimating reference crop evapotranspiration using artificial neural network based on random samples[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王志强, 朝伦巴根, 柴建华. 用多变量灰色预测模型模拟预测参考作物蒸散量的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 584—587. Wang Zhiqiang, Chaolunbagen, Chai Jianhua, et al. Simulation and prediction of reference crop evapotranspiration with grey multi-variable model[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 584—587. (in Chinese with English abstract)
- [13] 于婵, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 人工草地青贮玉米高效用水灌溉制度研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(5): 118—122. Yu Chan, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. The study of high efficient irrigation schedule of millet harvested fresh growing at planted grassland[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(5): 118—122. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王志强, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (12): 49—55. Wang Zhiqiang, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. High efficient irrigation scheduling of the perennial cultivated forage grasses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (12): 49—55. (in Chinese with English abstract)

Validity examination of simulated results of crop water requirements

Yu Chan^{1,2}, Chaolunbagen¹, Gao Ruizhong¹, Zhu Zhongyuan¹

(1. College of Hydraulics and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. General hydrology Bureau of Inner Mongolia, Huhhot 010010, China)

Abstract: Crop water requirement is very important parameter for making high efficient irrigation schedule, irrigation

and drainage planning and scientific allocation of water resources. At present, the main approaches used for simulating crop water requirements include FAO-56 dual crop coefficient method, two source model of conservation of energy, water balance model of root zone and SWAP model. Each approach had its own advantages, disadvantages and applying conditions. No matter which approach is used for simulating crop water requirement, the validity of modeling results should be examined. Otherwise, the simulated crop water requirement could not be used for the engineering projects mentioned above. In the paper, based on irrigation experiments data, the crop water requirements of planted Elymus and Agropyron were simulated by the dual crop coefficient approach. Fitting correlation diagram method, regression analysis and indicating residual estimation errors were also used to examine the validity of simulated results. The first approach was a qualitative test method, and gave statistical correlation trend. Second and third approaches were quantitative test methods, and indicated the goodness of fitting and the ranges of the residual estimation errors. By integrating qualitative approach with the quantitative ones, the consistency between the simulated values and the observed values of crop water requirements was effectively examined, which the simulated results can be applied in the engineering projects.

Key words: crops, irrigation, water resources, dual crop coefficient approach, water requirements, validity examination