

云文丽. 河套灌区向日葵节水灌溉预报模型研究[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 187–191.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.033

河套灌区向日葵节水灌溉预报模型研究

云文丽

(内蒙古自治区气象干部培训学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要:以内蒙古西部主要经济作物向日葵为例, 基于农田水分平衡原理, 利用田间水分控制试验得出了向日葵不同生长发育阶段的需水规律、适宜土壤水分含量及作物系数动态计算式, 确定了向日葵灌溉指标, 建立了适合河套灌区的向日葵动态灌溉预报模型, 实现了向日葵灌溉日期和灌溉量的滚动预报。通过内蒙古巴彦淖尔市 2005—2018 年向日葵农业气象常规观测的历史资料和相应气象资料对系列方程式, 对动态灌溉预报模型的准确性和适用性进行验证。结果表明, 预报灌溉日期与实际灌溉日期相差在 2 d 及以下的占 71%, 实际灌溉经验基本符合向日葵的需水要求, 表明灌溉模型的准确性和适用性较强, 但仍有部分特殊年份依靠传统经验确定灌溉日期, 出现多次灌溉现象, 导致水资源的浪费。向日葵基本以每年灌溉 2 次就能满足生长需要, 而且通过计算得到的灌溉量也较传统的估算更为精确。

关键词:河套灌区; 向日葵; 节水灌溉; 灌溉日期; 灌溉量; 灌溉预报模型

中图分类号: S565.507; S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)03-0187-05

随着现代农业发展的需求, 发展节水农业是缓解我国水资源日趋紧张、促进国民经济稳定发展的重大战略措施之一, 也是未来农业发展的方向^[1]。节水农业的发展主体是节水灌溉, 节水灌溉的关键是提高水分利用率, 即包括什么时间灌溉和灌多少的问题^[2-4]。向日葵是内蒙古西部地区的重要经济作物之一, 对该区域的经济发展有着重要的促进作用^[5-6]。内蒙古向日葵种植面积占全国向日葵种植面积的 70%~80%, 是我国向日葵的主产区。向日葵以其耐盐碱的特性, 主要种植在内蒙古河套灌区, 近年来, 面对黄河水资源日趋紧缺, 引黄河水量指令性缩减的严峻形势, 迫切须要大力推进节水灌溉工程发展, 提高灌溉技术水平和灌溉用水管理, 才能确保科学、高效地利用水资源。此外, 当地主要采取漫灌方式进行灌溉, 导致农业用水浪费和土壤盐碱化现象非常严重。因此, 构建和优化向日葵节水灌溉动态预报模型, 可为河套灌区水资源管理和高效利用提供科学依据和可行性方案。

节水灌溉正在从注重工程建设向水资源优化配置转变, 以满足现代农业可持续发展的全面要求^[7]。国内很多学者围绕农田灌溉指标的确定、农

田灌溉管理模型等水资源优化配置方面做了大量的研究工作^[8-11]。侯琼等通过产量、水分利用效率和经济效益三者的有效统一, 建立了内蒙古主要灌区春小麦、春玉米农田优化灌溉指标^[12-13]。肖晶晶等基于农田水分平衡原理、非充分灌溉理论和调亏灌溉理论, 构建了棉花和冬小麦不同发育期和全生育期节水灌溉气象等级指标, 但由于缺乏灌溉量数据, 最终采用灌水次数来反映水分亏缺等级^[14-15]。何胜以冬小麦适应性非充分实时灌溉理论为基础, 建立了冬小麦水资源实时优化配置模型^[16]。武荣盛等依据农田土壤水分平衡理论, 建立了适合内蒙古东北部旱作农区的大豆灌溉动态预报模型^[17]。国外对于节水灌溉预报的研究, 除了传统的农田灌溉指标研究外, 更侧重于智能灌溉应用研究^[18-20]。大量的研究结果都为水资源优化配置提供了很好的技术支撑。然而, 现有的节水灌溉指标由于受作物种类和地域性的差异限制, 局地适用性虽然较好, 但仍有许多成果不能直接搬用到其他地区^[21-22]。因此, 针对当地主要作物必须建立符合区域特点的灌溉管理体系。本研究依据农田土壤水分平衡理论, 按照节水灌溉基本原则, 结合向日葵田间水分控制试验, 以期得出不同生长发育阶段的需水规律、适宜土壤水分含量及作物系数动态计算式, 基于地面气象观测、农业气象观测、土壤水分等数据, 结合未来 5 d 的降水定量预报, 建立适合河套灌区的向日葵动态灌溉预报模型, 进行区域灌溉日

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(编号: 201802108)。

作者简介: 云文丽(1979—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象研究。E-mail: 564838918@qq.com。

期和灌溉量的动态预报,旨在为河套灌区优化水资源配置和发展节水农业提供科学依据。

1 数据来源

灌溉日期和灌溉量预报方程中的参数,主要来源于 2012—2014 年在内蒙古巴彦淖尔市农业气象试验站开展的田间水分控制试验,试验数据包括向日葵整个生育期内的适宜水分指标、作物系数(K_e)动态计算式和土壤特征参数(土壤容重、田间持水量、凋萎湿度)等。灌溉预报模型适用性检验数据来源于巴彦淖尔市 2005—2018 年向日葵农业气象常规观测的历史资料,包括土壤水分、灌溉量和发育期等。气象资料采用同期气象站常规观测逐日数据。

2 向日葵灌溉日期和灌溉量预报模型的建立

2.1 向日葵灌溉日期预报方程

作物生长期耗水量主要根据农田土壤水分平衡方程进行计算^[23],计算公式如下:

$$W_e - W_s = R + Q + W_m - T_{EC} - L。$$
 (1)

式中: W_s 为某一生长期起始日计算的土壤含水量,mm; W_e 为某一生长期结束日计算的土壤贮水量,mm; R 为生长期内有有效降水量,mm; Q 为生长期内灌水量,mm; W_m 为生长期内根层土壤水分通量,正值表示地下水补给量,负值表示根层水渗漏量,mm; T_{EC} 为生长期内农田蒸散量,mm; L 为生长期内地表径流量,mm。由于河套灌区地处干旱区,地下水位一般大于 5 m,降水量少,降水强度比较小,且灌溉农田地势平坦,产生渗漏、地表径流和地下水上升补给的水量均比较少;因此为了方便实际应用, W_m 和 L 在研究中可忽略不计,而 Q 在预报灌溉前也为 0。综上所述,公式(1)可简化为

$$W_s - W_e + R - T_{EC} = 0。$$
 (2)

当公式(2)达到平衡时,即生长期内允许消耗的水分含量为 0 时,所对应的日期将被视为可能灌溉日期。在已知 W_s 和 W_e 后,可利用逐日实时气象资料滚动计算 R 和 T_{EC} 的累计值。在实际灌溉服务中,以候(5 d)为时间步长,提前 5 d 做出灌溉预报。设未来 5 d 的农田蒸散量为 T_{EC} ,未来 5 d 的降水量根据 1981—2010 年 30 年的平均值和天气预报结果计算调整。因此,公式(2)可改写成

$$W_i = \sum_{n=1}^i R + \sum_{n=i+1}^{i+5} R' + W_s - W_e - \sum_{n=1}^i T_{EC} - \sum_{n=i+1}^{i+5} T_{EC}'。$$
 (3)

式中: W_i 为生长期内允许水分散失量,mm; $\sum_{n=1}^i R$ 和 $\sum_{n=1}^i T_{EC}$ 分别为实际降水量、蒸散量的累计值,mm; $\sum_{n=i+1}^{i+5} R'$ 和 $\sum_{n=i+1}^{i+5} T_{EC}'$ 分别为未来 5 d 的降水量、水分蒸散量的累计值,mm。当 W_i 等于或接近 0 时所对应的日期,即为可能灌溉日期。根据天气预报内容不断修正预报结果,形成滚动灌溉预报模型。

2.1.1 灌溉日期预报方程中参数的确定

2.1.1.1 初始土壤水分贮量 W_s 以向日葵播种后第 1 次观测到的 0 ~ 50 cm 土壤含水量作为初始土壤有效含水量,之后 W_s 为灌水后的初始值,即灌水后的含水量上限值, W_s 取田间持水量的 90%。

2.1.1.2 $\sum_{n=1}^i R$ 和 $\sum_{n=i+1}^{i+5} R'$ 为测定 W_s 或灌水期内每日的实测有效降水量的累计值; $\sum_{n=i+1}^{i+5} R'$ 为第 i 天后,即第 $i+1$ 至 $i+5$ 天的预测有效降水量之和,根据天气预报不断修正降水量预报。

有效降水量(P)的常用求法^[24-25]如下:

$$P = \sum_{i=1}^n \sigma_i P_i。$$
 (4)

式中: P_i 为测定的 W_s 或灌水期内第 i 日的日降水量,mm; σ_i 第 i 日日降水量的有效利用系数; i 为测定的 W_s 或灌水期内的日数序号, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 σ 取值参照表 1。

表 1 σ 取值建议

日降水量范围 (mm)	σ 取值	备注
$P < 5$	1.0	花序形成前
	0.5	花序形成后
$5 \leq P \leq 50$	1.0	
$P > 50$	0.7 ~ 0.8	

2.1.1.3 生长期末的 W_e (设定灌溉指标时的土壤有效水分贮量) 通过不同的土壤含水量对不同生长期向日葵的生长状况和光合生理的影响分析,得出向日葵生长期适宜土壤含水量如下:2 对真叶到花序形成期土壤含水量以 55% ~ 70% 为宜;花序形成到开花后 1 周是向日葵的需水关键期,土壤含水量保持在 70% ~ 90% 为宜;开花后 1 周到成熟期土壤水分以 55% ~ 70% 为宜,依据以上结论确定生长期末的 W_e ^[26]。

2.1.1.4 $\sum_{n=1}^i T_{EC}$ 和 $\sum_{n=i+1}^{i+5} T_{EC}'$ $\sum T_{EC}$ 和 $\sum T_{EC}'$ 分别为实际水分蒸散量和预测实际蒸散量的累计值。河

套灌区水分的可能蒸发量和实际量蒸散有明显的差异,须要通过作物系数进行订正,实际蒸散量的计算公式如下:

$$T_{EC} = K_c \times T_{E_0} \quad (5)$$

式中: T_{EC} 为实际蒸散量,mm/d; T_{E_0} 为参考作物蒸散量,mm,采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的 Penman – Montith 公式计算,该公式广泛用于农田参考作物潜在蒸散量的计算^[27-28]; K_c 为作物系数,

计算公式如下^[29]:

$$K_{cx} = K_c \times K_{ci} \quad (6)$$

式中: K_{cx} 为受水分胁迫影响下的作物系数; K_c 为由热量变量方程计算的标准作物系数(表 2); K_{ci} 为由叶面积指数(LAI)进行修正的作物系数,计算式如下:

$$K_{ci} = 0.056 \, 9e^{2.73LAI/LAI_D} \quad (7)$$

式中: LAI_D 为水分适宜条件下期望的叶面积指数。

表 2 河套灌区水分适宜条件下的标准作物系数、叶面积指数的动态模拟方程

项目	模拟方程式	r^2	样本数 (个)
标准作物系数	$K_c = -2 \times 10^{-10} T_j^3 + 8 \times 10^{-7} T_j^2 - 0.000 \, 5 T_j + 0.263 \, 8$	0.926 6	26
叶面积指数	$LAI_D = -3 \times 10^{-9} T_j^3 + 2 \times 10^{-5} T_j^2 - 0.027 \, 6 T_j + 14.236 \, 0$	0.965 2	24

注: T_j 表示气温大于 0 ℃时的积温,850 ℃ < T_j < 3 600 ℃。

2.2 向日葵灌溉量的预报

灌溉量通过适宜土壤含水量方法确定,计算公式^[30]如下:

$$Q_{计} = 10^4 h \times \gamma (W_{上} - W_{下}) / \eta_{田} \quad (8)$$

式中: $Q_{计}$ 为灌溉量,m³/hm²; h 为计划湿润层深度,根据不同生长期向日葵根系的伸展深度确定(表 3),m; γ 为土层平均质量,t/m³; $W_{上}$ 为适宜土壤含水量上限,取田间持水量的 90%; $W_{下}$ 为土壤含水量下限,本研究根据作物不同生长期通过“2. 1. 1. 3”节中提出的灌溉指标 W_e 确定; $\eta_{田}$ 为田间水有效利用系数,本研究取 0.95。

表 3 向日葵计划湿润层深度

生长期	实际根深 (m)	计划湿润层深度 (修正根深,m)
出苗至 2 对真叶	0.2	0.20
2 对真叶至 7 对真叶	0.4	0.30
7 对真叶至花序形成	0.5	0.35
花序形成至开花期	0.6	0.40
开花期至成熟期	0.6	0.30

在计算出灌溉量($Q_{计}$)以后,再根据未来 5 d 降水量预报进行修正:

$$Q_{实} = Q_{计} - \sum_{n=i+1}^{i+5} R_n \quad (9)$$

式中: $Q_{实}$ 为预报灌溉量,当 $Q_{计} < \sum_{n=i+1}^{i+5} R_n$ 时,则推迟灌溉。

3 灌溉预报模型的检验

为了验证河套灌区向日葵灌溉预报模式及相关公式的准确性和适用性,本研究利用内蒙古巴彦

淖尔市 2005—2018 年向日葵农业气象常规观测的历史资料和相应气象资料对系列方程式进行验证。其中,第 1 次灌溉以播种日测定的土壤相对含水量作为 W_s ,第 2 次及第 3 次灌溉 W_s 取田间持水量的 90%。 W_e 取发生干旱时土壤的相对含水量或者生长期灌溉量最小值。标准作物系数由热量变量方程和叶面积指数方程进行修正计算,得到作物系数的动态计算式。按照公式(3)、公式(9)计算灌溉日期和灌溉量,并将其与 W_e 出现日期或实际灌溉日期进行比较(表 4)。通过预报灌溉日期与实际日期对比发现,二者相差在 0 ~ 19 d,其中相差时间为 2 d 及以下的占 71%,说明灌溉日期预报方程的准确性较高。结果相差较大的是 2007 年和 2010 年的第 1 次灌溉,通过近灌溉日期逢 8 的土壤含水量观测数据可以看到,这 2 年第 1 次灌溉前的土壤相对湿度都在 70% 以上,土壤含水量完全能够满足作物当时的需水要求;但田间管理更多的是按照发育期或者当地灌溉习惯进行,如果按照土壤实际情况,灌溉日期可以往后推几天,可实现节水灌溉。第 1 次灌溉的误差直接影响了第 2 次灌溉的日期预测,去掉这 2 年的第 1 次灌溉预报日期,预报灌溉日期与实际日期相差时间在 0 ~ 7 d 内。通过预报灌溉日期的计算也发现,向日葵整个生育阶段基本以 2 次灌溉为主,第 1 次灌溉在花序形成前期进行,第 2 次灌溉基本在花序形成到开花期进行,实际灌溉经验基本符合向日葵生长的需水要求,但应以实际土壤水分情况而定,例如 2010 年 6 月 24 日可不进行灌溉,而在 7 月 28 日要进行灌溉,以实现节水优化灌溉。2007 年进行了 3 次灌溉,第 3 次灌溉日期处于向日

葵开花后 1 周到成熟期,当时灌溉土壤相对湿度为 71.87%,土壤湿度完全能够满足作物需水要求,且向日葵逐渐进入成熟阶段,此时作物的需水量逐渐降低,此时段的灌溉可以取消,以实行节水优化灌溉。

在农业气象观测记录中,传统的灌溉量基本为 1 050 m³/hm²;但在实际灌溉中,灌溉量应根据作物

不同生长期的土壤含水量和根系的伸展深度等因素确定。本研究计算的灌溉量在 820 ~ 1 450 m³/hm² 之间,且第 1 次灌溉量基本高于第 2 次灌溉量,这主要由于第 1 次灌溉日期距播种日期远长于距第 2 次灌溉日期,同时当地降雨集中在 7 月下旬到 8 月上旬,生长期降雨对实际灌溉用水补充作用明显。

表 4 河套灌区 2005—2018 年向日葵灌溉日期和灌溉量预报结果

年份	灌溉次数	生长期初期土壤含水量(W_s)	生长期末期土壤含水量(W_e)	W_e 出现日期或 实际灌溉日期(月-日)	预报灌溉日期 (月-日)	相差时间 (d)	灌溉量 (m ³ /hm ²)
2005	第 1 次	80.3	55.0	06-18	06-19	1	1 044.6
	第 2 次	90.0	63.5	07-23	07-24	1	965.3
2006	第 1 次	80.8	55.0	07-05	07-03	-2	1 158.3
	第 2 次	90.0	52.7	07-30	08-01	2	992.8
2007	第 1 次	83.9	55.0	07-28	07-23	-15	1 074.9
	第 2 次	90.0	70.0	08-05	08-04	-1	1 020.4
	第 3 次	90.0	70.0	08-24	08-26	2	965.3
2008	第 1 次	86.3	55.0	07-08	07-08	0	1 123.3
	第 2 次	90.0	70.0	07-15	07-17	2	965.3
2009	第 1 次	83.9	55.0	06-19	06-19	0	1 036.1
	第 2 次	90.0	70.0	07-09	07-11	2	992.8
2010	第 1 次	85.2	55.0	06-24	07-13	19	1 023.5
	第 2 次	90.0	70.0	07-15	07-15	0	1 041.2
	第 3 次	90.0	70.0	07-28	07-29	1	827.4
2011	第 1 次	85.8	55.0	07-05	07-03	-2	1 061.1
	第 2 次	90.0	70.0	07-18	07-19	1	992.8
2012	第 1 次	87.1	55.0	07-26	07-30	4	1 108.0
	第 2 次	90.0	70.0	08-28	08-31	3	827.4
2013	第 1 次	85.6	55.0	07-14	07-21	7	1 056.0
	第 2 次	90.0	70.0	08-09	08-11	2	965.3
2014	第 1 次	81.5	55.0	06-26	06-26	0	914.9
	第 2 次	90.0	70.0	07-28	07-27	-1	992.8
2015	第 1 次	92.5	55.0	07-01	06-30	-2	1 292.8
	第 2 次	90.0	70.0	07-30	07-27	-3	965.3
2016	第 1 次	77.0	55.0	06-16	06-19	3	1 034.2
	第 2 次	90.0	70.0	07-31	07-28	-3	827.4
2017	第 1 次	90.0	55.0	06-25	06-25	0	1 241.1
	第 2 次	90.0	70.0	07-11	07-14	3	1 103.2
	第 3 次	90.0	70.0	07-31	08-01	1	827.3
2018	第 1 次	95.0	55.0	06-29	06-29	0	1 447.9
	第 2 次	90.0	70.0	07-15	07-14	-1	1 103.2

注:相差时间为负值表示预报灌溉日期提前,为正值表示推迟。

4 结果与讨论

灌溉是预防或减轻旱灾的有效手段,节水灌溉已成为农业可持续发展的重要手段之一,是我国农业现代化的必然选择,适时适量灌溉是节约日益匮乏的有限水资源的主要途径之一^[31]。本研究以内

蒙古西部河套灌区主要经济作物向日葵为例,根据农田土壤水分平衡原理,利用地面气象观测站 2005—2018 年逐日气象资料、巴彦淖尔市农业气象试验站 2005—2018 年逐旬土壤含水量数据,以及实际灌溉量、发育期等资料,结合向日葵田间水分控制试验得出的向日葵不同生长期的需水规律、适宜

最低土壤含水量下限及作物系数动态计算式,确定了向日葵灌溉指标,建立了适合河套灌区的向日葵灌溉预报模型,并在实际灌溉服务中进行了验证。通过热量变量方程计算标准作物系数,结合作物系数的动态计算式和其他参数计算式,得到灌溉日期和灌溉量预报结果,并将其与 W_e 出现日期或实际灌溉日期进行比较。结果表明,预报灌溉日期与实际日期相差 2 d 及以下的占 71%。同时通过灌溉预报日期的计算发现,向日葵基本每年灌溉 2 次,实际灌溉经验基本符合向日葵的需水要求,但应以实际土壤水分情况而定。在农业气象观测记录中,传统的灌溉量是 $1\ 050\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,本研究得出的灌溉量较传统灌溉量的估算更为精确。河套灌区的向日葵灌溉预报模型的建立综合考虑了土壤、作物和大气连续系统中的水分传输进程,使用的大多数资料是已知的气象资料和田间试验结果,保证了模型精度,因而预报结果比较可靠,为开展实时、有针对性的向日葵节水灌溉气象服务提供科学依据。但由于本研究中的预报模式是在一定的地区和作物条件下建立的,其参数能否在相似地区直接套用,还有待于进一步验证。

参考文献:

- [1] 霍治国,姜 艳. 基于灌溉的北方冬小麦水分供需风险研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):79–84.
- [2] 马建琴,陈 哲,刘 蕾. 农业多水源灌溉实时优化配置[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):211–214.
- [3] 蒯 智,李远华. 实时灌溉预报[J]. 中国工程科学,2002,4(5):24–33.
- [4] 李德旺,许春雨,宋建成. 现代农业智能灌溉技术的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):27–31.
- [5] 单玉芬,王立坤,马永胜,等. 不同水分亏缺对向日葵产量、水分利用效率及经济效益的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(7):70–73.
- [6] 云文丽,侯 琼,王海梅,等. 不同土壤水分对向日葵光合光响应的研究[J]. 应用气象学报,2014,25(4):476–482.
- [7] 黄修桥,高峰,王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J]. 灌溉排水学报,2001,20(3):1–5.
- [8] 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.
- [9] 成 林,刘荣花. 黄淮地区冬小麦最佳灌水日期模拟研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(6):54–59.
- [10] 庞秀明,康绍忠,王密侠. 作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(6):141–146.
- [11] Zhang S, Wang M, Shi W, et al. Construction of intelligent water saving irrigation control system based on water balance[J]. IFAC
- [12] 侯 琼,沈建国. 内蒙古主要灌区春小麦、春玉米农田优化灌溉指标研究[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(1):33–39.
- [13] 侯 琼,乌兰巴特尔. 内蒙古主要作物农田优化灌溉动态预报方法[J]. 自然灾害学报,2003,12(4):126–130.
- [14] 肖晶晶,霍治国,金志凤,等. 冬小麦节水灌溉气象等级指标[J]. 生态学杂志,2012,31(10):2521–2528.
- [15] 肖晶晶,霍治国,姚益平,等. 棉花节水灌溉气象等级指标[J]. 生态学报,2013,33(22):7288–7299.
- [16] 何 胜. 冬小麦适应性节水灌溉预报与实时配水技术研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016:268–375.
- [17] 武荣盛,吴瑞芬,孙小龙,等. 内蒙古东北部大豆动态灌溉预报模型[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):35–39.
- [18] English M, Raja S N. Perspectives on deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management,1996,32(1):1–14.
- [19] Kendy E, Gérard – Marchant P, Walter M T. A soil – water balance approach to quantify ground – water drainage from irrigated cropland in the North China Plain[J]. Hydrological Processes,2003,17(10):2011–2031.
- [20] Mason B, Ruff – Safs M, Parada F, et al. Intelligent urban irrigation systems; saving water and maintaining crop yields[J]. Agricultural Water Management,2019,226:26–63.
- [21] 蔡焕杰,康绍忠,张振华,等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):24–27.
- [22] 黄 鑫,杨 健,罗新宁. 调亏灌溉对棉花生长及渗透调节物质的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(7):96–101.
- [23] 裴步祥,毛 飞,吕厚荃. 我国北方春季土壤水分动态模拟预报模式的试验研究[J]. 北京农业大学学报,1990,16(增刊):116–122.
- [24] 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报,2007,26(3):24–34.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 作物节水灌溉气象等级 棉花:GB/T 34812—2017[S]北京:中国标准出版社,2017.
- [26] 云文丽,李建军,侯 琼. 土壤水分对向日葵生长状况的影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(2):186–190.
- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 – Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)[Z]. Food and Agricultural Organization of the United Nations,1998.
- [28] Chiew F H S, Kamadalasa N N, Malano H M, et al. Penman – Monteith, FAO – 24 reference crop evapotranspiration and class—A pan data in Australia[J]. Agricultural Water Management,1995,28(1):9–21.
- [29] 云文丽,侯 琼,李建军. 基于作物系数与水分生产函数的向日葵产量预测研究[J]. 应用气象学报,2015,25(6):705–713.
- [30] 胡毓琪,李英能. 华北地区节水型农业技术[M]. 北京:中国农业科技出版社,1995:115.
- [31] 山 仑. 节水农业与作物高效用水[J]. 河南大学学报(自然科学版),2003,33(1):1–5.