

基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型 冬小麦灌溉制度研究

王文佳^{1,2,3}, 冯浩^{3,4,5}, 宋献方¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049;
3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
5.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基于 DSSAT 作物模型模拟了不同降水年型水分胁迫条件下的冬小麦生产潜力, 对比分析不同生育期灌水对产量、WUE 以及土壤蒸发量等的影响, 从而确定关键灌水期; 并在综合考虑产量、WUE、总灌水量、灌水次数等因素的基础上确定了不同降水年型下的最优灌溉制度。结果表明: (1) 冬小麦越冬水、返青水、拔节水、灌浆水四水中以返青水最为关键, 其次为拔节水, 最后为越冬水和灌浆水; 当不灌返青水时, 冬小麦产量和蒸腾量显著降低, 土壤蒸发量显著升高; (2) 不同降水年型之间也存在显著差异, 产量、WUE、作物蒸腾量等表现为丰水年略大于平水年, 二者显著大于枯水年; 而灌水边际效益表现为平水年 > 枯水年 > 丰水年; (3) 枯水年、平水年、丰水年的冬小麦最优灌溉制度分别为枯水年返青期和拔节期各灌水 75 mm 和 50 mm, 平水年返青期灌水 75 mm, 丰水年返青期和拔节期各灌水 25 mm。

关键词: DSSAT 模型; 节水灌溉; 冬小麦; 关中地区
中图分类号: S274.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)04-0001-10

Determination of irrigation schedule of winter wheat in different hydrological years in Yangling, Shaanxi Province based on DSSAT model

WANG Wen-jia^{1,2,3}, FENG Hao^{3,4,5}, SONG Xian-fang¹

(1. Key Laboratory for Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, BeiJing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of soil and water conservation, CAS & MWR, Yangling Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Water Conservation in Dryland, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the arid and semiarid areas of northwest China, the land, light and heat resources are relatively rich but water resource is much short. Water is the main limiting factor in exploring the productive potential of light and temperature in these areas. In order to realize highly efficient agricultural production and sustainable development, it is essential to raise the use efficiency of water resource according to the water requirement and water-stress response of crops in different growing stages. By using DSSAT model, the productive potential of winter wheat in different hydrological years in Yangling, Shaanxi Province was simulated, the effects of irrigation in different stages on yield, WUE and soil evaporation were analyzed, and the key irrigation periods were determined. Furthermore, the optimal irrigation schedule of winter wheat in different hydrological years was made by considering yield, WUE, total irrigation amount and irrigation times comprehensively. The results showed: (1) Among the four times of irrigation during the growing period of winter wheat, revival water was most critical, next was jointing water, and winter water and grain filling water were the last. When there was no revival water, the yield and transpiration of winter wheat were decreased significantly, and the soil e-

收稿日期: 2012-03-28
基金项目: 国家 863 计划课题(2013AA102904, 2011AA100503); 高等学校学科创新引智计划资助(B12007)
作者简介: 王文佳(1987—), 女, 山西长治人, 硕士, 主要从事雨水资源高效利用及作物模型方面的研究。E-mail: wenjia166@163.com。
通信作者: 冯浩(1970—), 男, 陕西延安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用方面的研究。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

vaporation was increased significantly. (2) There were also remarkable differences among different hydrological years. The yield, WUE and crop transpiration in wet years were slightly higher than those in normal years, and both of them were significantly higher than those in dry years. As for the marginal benefit of irrigation, different hydrological years were ranked as: normal years > dry years > wet years. (3) The optimal irrigation schedule of winter wheat in different hydrological years was: 75 mm of revival water and 50 mm of jointing water in dry years, 75 mm of revival water in normal years, and 25 mm of revival water and 25 mm of jointing water in wet years.

Keywords: DSSAT model; water-saving irrigation; winter wheat; Central Shaanxi

20 世纪 60 年代以前,农业研究几乎完全依赖于试验研究。随着研究的进一步深入以及各学科的日渐完善和发展,这种研究方法逐渐显现出其局限性,由于气候条件和土壤环境的变异性,使得基于特定环境条件的试验研究成果往往不具备普遍适用性,难以推广应用^[1]。作物模型综合了作物生理、生态、气象、土壤、水肥、农学等学科的研究成果,采用系统分析方法和计算机模拟技术,再现农作物生长发育及产量形成过程,不仅克服了传统的农业研究方法的缺陷,也为相关研究人员提供一种新的试验途径——在计算机上布设数值试验。90 年代后,作物模型在世界各地得到了广泛应用^[2],并随着模型发展并结合各学科研究成果,陆续将水分平衡、养分平衡以及病虫害对作物生长的影响逐步引入其中,使作物模型得到逐步完善。DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)^[3]是目前使用最广泛的模型系统之一,是在 IBSNAT 的赞助和指导下,在 30 多个国家和地区的科研工作者共同协作下,由美国国际开发署授权夏威夷大学于 1989 年研制的综合计算机系统,它囊括了美国众多的著名作物模型,如 CERES 和 CROPGRO 系列模型等,DSSAT 经过 20 年的发展,已在全世界范围内得到验证^[4-8],目前已于 2011 年发布 DSSAT4.5 版本。

目前,DSSAT 在我国多用于模拟研究不同地区的光温生产潜力^[9-11]。在西北干旱半干旱区,光热资源丰富,但水资源却极度匮乏,水分的限制成为发挥该区光温潜力,提高土地生产力的瓶颈。因此光温生产潜力模拟结果远高于实际可收获产量,无法直接指导当地农业生产实践。因此如何合理利用有限的水资源,充分发挥西北地区的光热资源优势,对于西北地区乃至我国粮食安全有着重要意义^[12-13]。关中地区位于陕西中部,冬小麦是该地区的主要粮食作物,生长季为每年 10 月中旬至次年 6 月中旬,而关中地区秋雨多,冬春干旱,加剧了冬小麦生长季的干旱程度。因此,研究冬小麦需水规律及节水灌溉对粮食增产、合理利用水资源、提高水

资源利用率、搞好灌区水资源规划都有重要意义。本研究在模拟潜在产量的基础上加入水分限制因子,模拟在越冬期、返青期、拔节期和灌浆期不同灌水条件下作物产量和耗水量的响应以及水分利用效率(WUE)和灌水边际效益的变化趋势,以期找到适合关中地区的灌溉方案。

由于我国大气降水不仅年内分布不均,年际变化也较大,南方大气降水量的年际丰枯比为 1.5 ~ 3,北方为 3 ~ 6。2006 年,汤广民和王有贞^[14]采用动态规划方法对安徽淮北平原主要农作物在不同水文年型($P = 50\%$, $P = 75\%$, $P = 95\%$)下的灌溉制度和经济灌溉定额进行了优化;张喜英和裴冬^[15]等根据在太行山前平原 4 年的连续试验,从中选出干旱年份、偏旱年份以及湿润年份,从而确定了在不同水平年下的优化灌溉制度。本研究在此基础上基于 DSSAT 研究关中地区不同水平年($P = 25\%$, $P = 50\%$, $P = 75\%$)下的最优灌溉制度,从而指导当地农民根据当年降水情况适时调整灌溉方案,能够在保证粮食产量的同时,减少冬小麦灌水次数和灌水定额,为本区农业可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 DSSAT 模型

DSSAT^[16-18]是一个包含多种作物的特大决策支持系列软件包,应用该系统,用户可以借助作物生长模型,设计和进行品种、播期、密度、施肥量、灌水量等多因素、多水平、长时期的模拟试验,借助系统模块在短时间内完成作物栽培方案的优化选择,为田间栽培试验提供初步方案,或直接指导大田作物生产的管理决策。DSSAT 由 3 部分组成:(1) 数据库管理系统,用于数据组的输入、存储和调用;(2) 作物模型,调试并验证了的用来模拟环境因子相互作用下某一遗传型作物的生长发育过程以及产量的程序集;(3) 应用程序群,用以分析和显示长期的农学模型试验。

1.2 模型数据库组建

1.2.1 气象数据 本研究气象数据来自中国气象

科学数据共享服务网提供的 1980—2009 年的 30 年逐日气象数据。模型运行所需的最小数据集包括 SRAD(逐日太阳辐射量)、TMAX(逐日最高气温)、TMIN(逐日最低气温)以及 RAIN(逐日降水量)。前三者可经过简单处理直接使用该数据,逐日太阳辐射量根据国际上公认的“Angstrom(埃斯屈朗)经验公式”计算而得。

本研究使用由 FAO 于 1992 年建立的用于灌溉计划和管理 CROPWAT 模型计算 1989—2010 年期间 30 个冬小麦生长季的有效降水量,然后通过 P-III 型曲线频率分析软件选出典型年作为本文研究对象,并通过对典型年作物需水量及有效降水量的分析,确定本次模拟试验的灌溉方案。选取的典型年分别为丰水年($P = 25\%$)2009—2010 年,平水年($P = 50\%$)1980—1981 年以及枯水年($P = 75\%$)2000—2001 年。

1.2.2 土壤数据 土壤数据主要来自《陕西土壤》^[19]及田间试验的实测数据。模型需要输入的土壤数据主要包括土壤名称、土壤质地、农田坡度、土壤颜色、渗透性、排水性、土壤剖面土层的数目、厚度以及各层中粘粒、粉砂粒和砂粒含量(%)、 $> 2\text{ mm}$ 石砾含量等,各层土壤有机碳含量(%)、各土层养分含量、各土层阳离子交换量 CMC($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)以及各土层 pH 值等。本研究收集了占关中地区面积比重较大的塿土剖面数据。

1.2.3 作物管理数据 作物管理数据主要包括作物播种日期、播种密度、播种深度、耕作方式、灌溉量及灌溉日期、施肥量及施肥日期等田间管理措施的实施方案^[18,20-22]。本研究主要是通过对其中的灌溉数据进行不同输入后得到产量结果,包括不同的灌溉日期、灌溉量、灌水组合等。由于本文主要是研究水分限制条件下的作物潜在生产力,因此作物管理数据中的施肥量及施肥日期等相关输入均未进行设定。

1.2.4 田间试验数据 试验田位于陕西杨凌,西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田($\text{E}108.05^\circ$, $\text{N}34.24^\circ$),海拔 521 m,年平均气温 13°C ,日照时数 2 196 h,年平均降水量 660 mm 左右,降水年内分布不均,为关中灌溉类型区,是半湿润易旱区。土壤质地为重壤土,地下水埋藏较深,其向上补给量可以忽略不计。试验地 0~200 cm 土层田间持水量共计 500 mm 左右,有机质含量 $15.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3 - \text{N}$ 含量 $22.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $73.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $7.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含

量 $114.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 $1.295\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,团聚体含量 8.43%。

试验定位监测了 2008—2010 年冬小麦—夏玉米(两年三熟制)模式下农田土壤水分动态以及作物生长动态。试验田等分成 6 个小区,每个小区设一个取土点,即共有 6 个代表点,每次随机从其中取 3 个点进行取土及其他指标测量。试验测定了 0~200 cm 的土壤含水率,每 20 cm 一层,共计 10 层,取样时间从苗期、分蘖、越冬、返青、拔节、孕穗、开花、灌浆到最后冬小麦成熟共 9 个阶段,并在冬小麦收获后测定了千粒重、穗粒数以及经济产量。两年试验的冬小麦品种均为“小偃 22”。

2008—2009 年冬小麦大田试验在上茬玉米收获后,于 2008 年 10 月 15 日播种,并在当年 12 月 25 日进行了一次冬灌(按 $50\text{ m}^3/667\text{ m}^2$),次年 6 月 7 日成熟收获;试验田施尿素($\text{N} \geq 46\%$) $25\text{ kg}\cdot667\text{ m}^{-2}$,磷酸二铵(P_2O_5 44%、含 N 16%) $25\text{ kg}\cdot667\text{ m}^{-2}$ 。2009—2010 年试验于上茬玉米收获后,翻耕试验地施尿素($\text{N} \geq 46\%$) $30\text{ kg}\cdot667\text{ m}^{-2}$,磷酸二铵(P_2O_5 44%、含 N 16%) $30\text{ kg}\cdot667\text{ m}^{-2}$ 。小麦播种日期为 2009 年 10 月 17 日,收获日期为 2010 年 6 月 14 日。其他田间管理措施如除草、病虫害防治等按正常田间管理进行。

1.3 模型参数的调试与验证

本研究采用 DSSAT4.5 自带的 GLUE 参数调试程序对关中地区冬小麦作物品种“小偃 22”进行参数率定^[20]。以 2008—2009 年试验数据为据进行参数调试,然后利用 2009—2010 年的试验数据对参数进行验证。本研究是基于冬小麦物候期,包括苗期、开花期、生理成熟期以及最终作物产量进行参数调试和验证。首先在原程序给定参数范围内进行参数率定,根据其提供的最佳参数组合缩小参数范围,再继续进行参数率定,一次率定最高可进行 5 000 次随机搜索,通过不断缩小参数范围即可得到最满意的参数组合。经调试后,本研究参数调试结果见表 1。

表 2 主要对比了冬小麦开花期、成熟期及最终产量的模拟值与实测值之间的差异。将率定后的参数输入模型中运行后,两年冬小麦物候期的模拟值与实测值误差不超过 2 天。2008—2009 年产量模拟值比实际冬小麦产量低 -3.91%,2009—2010 年模拟产量比实测产量高 1.44%,模拟产量和实测产量差异均保持在 5%之内。

表 1 冬小麦“小偃 22”的作物品种遗传参数
Table 1 Genetic parameters of winter wheat “Xiaoyan 22”

参数 Parameter	PIV/d	PID/(%·h ⁻¹)	P5/(℃·d)	G1/(#·g ⁻¹)	G2/mg	G3/g	PHINT/(℃·d)
调试后参数 Parameters after calibration	34.73	109.2	591.4	17.79	52.81	1.924	94.6
范围 Range	0~90	0~300	300~800	10~35	30~70	1~3	70~95

注：PIV：春化敏感系数；PID：光周期敏感系数；P5：灌浆期特性系数；G1：籽粒数特性系数；G2：标准籽粒重系数；G3：成熟期单株茎穗重系数；PHINT：出叶间隔特性参数。

Note: PIV: Vernalization sensitivity coefficient; PID: Photoperiod sensitivity coefficient; P5: Thermal time from filling to maturity; G1: Kernel number per unit canopy weight at anthesis; G2: Standard kernel weight under optimum conditions; G3: Standard, non – stressed dry weight (total, including grain) of a single tiller at maturity; PHINT: Thermal time between the appearance of leaf tips.

表 2 关中地区 2008—2010 年冬小麦生育期模拟值与实测值对比
Table 2 Comparison between simulated and observed growing stage of winter wheat in Central Shaanxi

项目 Items	2008—2009			2009—2010		
	实测值 Observed value	模拟值 Simulated value	误差 Error	实测值 Observed value	模拟值 Simulated value	误差 Error
开花期 Anthesis/d	195	194	– 1	197	197	0
成熟期 Maturity/d	232	232	0	237	236	– 1
产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	5652	5617	35(– 1%)	6194	5944	– 250(– 4%)

本研究主要是基于 DSSAT 模拟不同灌溉方案对作物产量及蒸散量的影响,因此该模型对土壤水分模拟精度直接影响研究结果的可靠性及实用性,因此,本文采用国际上检验模型通用的均方根误差方法,即 RMSE(the normalized Root Mean Square Error)归一化均方根差来度量土壤含水量模拟值与实测值的相对差异程度,以检验该模型对土壤水分的模拟精度。用下式表示:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n - 1}}$$

式中, P_i 为模拟值; O_i 为观测值; n 为样本数。

一般认为, RMSE 的值越小,表明模拟值与实测

值的差异越小,即模型的模拟结果越准确、可靠。当 $RMSE < 0.1$ 为极好, $0.1 < RMSE < 0.2$ 为好, $0.2 < RMSE < 0.3$ 为中等, $RMSE > 0.3$ 为差。2008—2009 年和 2009—2010 年土壤含水量的模拟值与实测值差异总体表现为:以 60 cm 为分界线,60 cm 以上土层含水量模拟值略小于实测值,而 60 cm 以下土层土壤含水量的模拟值大于实测值。按土层划分,2008—2009 年各土层含水量的模拟误差 RMSE 值均小于 0.1,模拟结果极好。2009—2010 年除 40~60 cm 土层 RMSE 值为 0.119 外,其余各土层模拟结果也均小于 0.1,模拟结果极好(表 3)。

表 3 不同土层土壤含水量模拟值与实测值对比/(cm³·cm⁻³)
Table 3 Comparison between simulated and observed soil water content by layers

土层/cm Layer	2008—2009			2009—2010		
	观测值 Observed value	模拟值 Simulated value	RMSE	观测值 Observed value	模拟值 Simulated value	RMSE
0~20	0.196	0.193	0.019	0.194	0.176	0.075
20~40	0.204	0.193	0.038	0.189	0.184	0.062
40~60	0.205	0.191	0.032	0.184	0.177	0.119
60~80	0.201	0.235	0.041	0.184	0.194	0.092
80~200	0.211	0.282	0.081	0.209	0.209	0.039

注：表中观测值和模拟值均为同一土层不同生育期土壤含水量均值。

Note: Both the observed and simulated values are mean values of soil water content at the same layers during different growth stages.

表 3 中列出了各土层含水量随深度变化的情况,而土壤含水量除了随深度变化外,还随冬小麦生

长发育而变化,见图 1。因此,本研究按田间试验取样时段为准,将冬小麦生育期划分为苗期、分蘖、越

冬、返青、拔节、孕穗、开花、灌浆到最后冬小麦成熟共 9 个阶段,逐时段对比了模拟值与实测值的差异程度,结果为:两年模拟的土壤含水量和实测土壤含水量的 RMSE 值均小于 0.1,模拟结果为极好。

由于冬小麦根系主要分布在 0~60 cm 土层,因

此该土层土壤水分含量的变化对最终产量的形成有着极其重要的作用。因此,本研究对 0~60 cm 土层土壤含水量的模拟值和实测值进行了配对 T 检验,检验结果为 $P>0.05$,模拟值和实测值不存在显著差异。

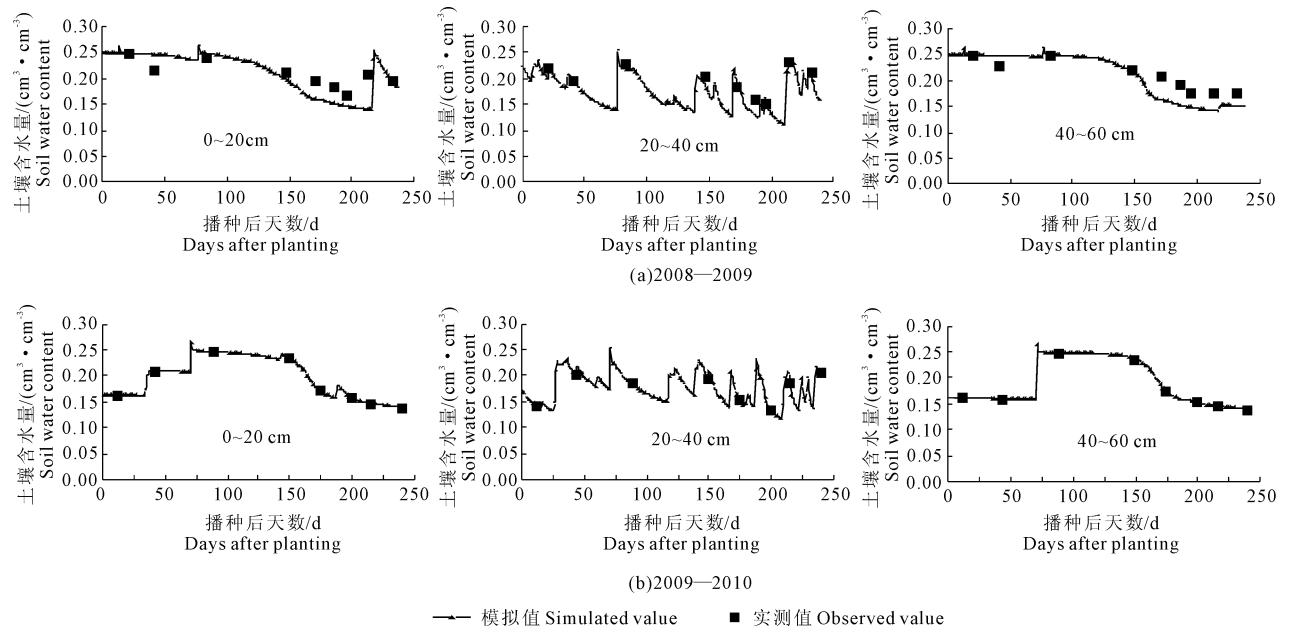


图 1 不同土层含水量模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparison between simulated and observed soil water content at different layers

因此可见土壤含水量无论是从空间上还是时间上模拟结果均极好,因此认为 DSSAT 模拟土壤水分变化较为精确,而土壤水分变化是基于水量平衡公式计算得出,因此认为该模型可用于研究水分限制条件下作物潜在生产力。

2 模拟试验设计

本研究的灌溉方案为:越冬水 + 返青水 + 拔节

水 + 灌浆水,每个灌溉时期下设置 4 个不同水平的灌水定额,分别为 0, 25, 50 mm 和 75 mm,进行完全组合后,形成灌溉定额分别为 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 mm 共计 13 个不同灌溉水平 $4^4=256$ 个不同灌溉方案。如下表所示。本研究将不灌水即 0mm + 0mm + 0mm + 0mm 作为空白对照试验,将 75mm + 75mm + 75mm + 75mm 作为充分灌溉对照,其余 254 个为非充分灌溉方案。

表 4 模拟灌溉试验方案设计

Table 4 Irrigation scheme of simulation experiment

灌水时期 Irrigation date (M - d)	越冬水 Winter water 12 - 15	返青水 Revival water 03 - 15	拔节水 Jointing water 04 - 15	灌浆水 Grain filling water 05 - 15
灌水定额 Irrigation quota/mm	0/25/50/75	0/25/50/75	0/25/50/75	0/25/50/75

3 结果与分析

3.1 各灌水时期灌水定额的确定

3.1.1 灌水定额对产量的影响 由于冬小麦不同生育期对水分的需求量不同以及降水量年内分布不均,因此在不同生育期灌水对作物最终产量的影响存在差异。本研究根据近 30 年冬小麦生长季内的

有效降水量划分出不同降水年型,并在此基础上分析了在枯水年(2000—2001 年)、平水年(1980—1981 年)及丰水年(2009—2010 年)条件下不同时期灌水对作物最终产量的影响,如图 2 所示。

由图 2 可见,无论在何种降水年型下,均表现为:(1) 灌水定额为 0 mm 时,与其它各阶段相比,返青水为 0 mm 所对应的产量最低,灌水定额为 75

mm,返青水所对应的产量最高,说明是否灌返青水对最终产量的影响最大;(2) 无论灌浆期灌水 0 mm 还是 75 mm,其所对应的产量均无显著性差异,说明灌浆水对产量无显著影响,因此,建议可适当取消灌

浆水;(3) 在拔节期,灌水 0 mm 与 25 mm 存在显著差异,而 25 mm 以上灌水量对产量影响差异不显著,说明在拔节期有效灌水 25mm 左右较为合适。

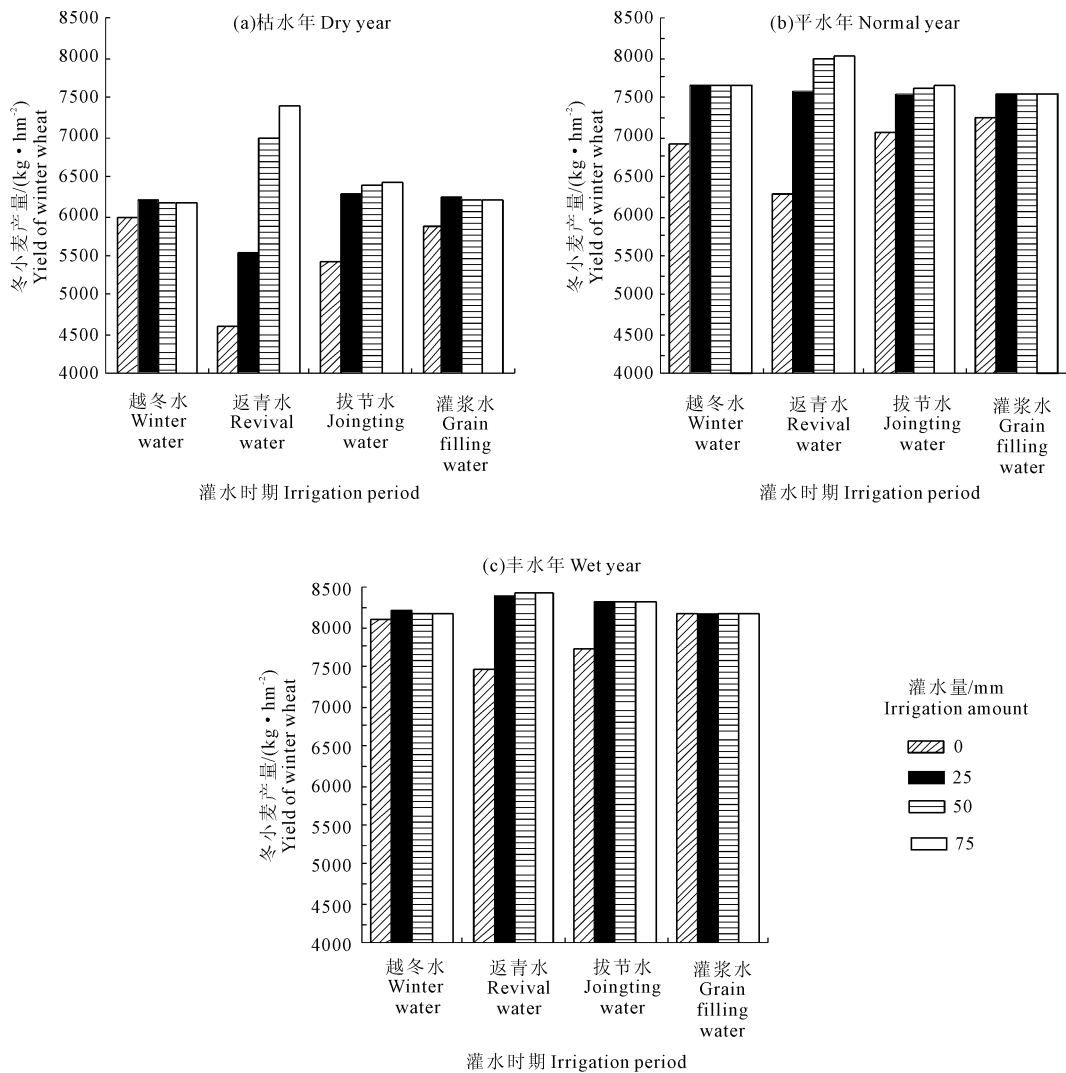


图 2 不同降水年型不同生育期灌水定额对产量的影响

Fig.2 Effect of irrigation at different growth stages on yield in different hydrological years

不同年份的降水量不仅年内分布不均,年际间也存在显著差异。因此研究灌水定额在不同水平年条件下对产量影响,有助于指导当地农民在不同年份因时制宜,选择适合当年的灌溉制度。由图 2a 可见,枯水年产量水平整体明显低于平水年和丰水年,因此,应尤其重视枯水年灌溉制度的研究,以保障粮食安全,充分利用当地光热资源,挖掘粮食生产潜力。与平水年和丰水年不同的是,在枯水年,返青期灌溉 0、25、50、75 mm 所对应的产量分别为 4 597.8、5 540.9、6 990.5 kg · hm⁻² 及 7 378.8 kg · hm⁻²,不同灌水定额之间均有显著差异,而在平水年,灌溉 50 mm 和 75 mm 对产量影响无显著差异,在丰水年,灌

溉 25 mm 与 75 mm 对产量的影响也无显著性差异。这就说明,在枯水年、平水年以及丰水年条件下,返青水应分别有效灌溉 75、50 mm 及 25 mm 左右为宜,枯水年尤其应该灌足返青水,并适当补充拔节水。由图 2b 可看出,与枯水年和丰水年越冬水对产量影响无显著差异有所不同的是,在平水年越冬期灌水 25 mm 显著高于不灌水的产量,说明应该在重视返青水、拔节水的同时,对越冬水也加以关注,应根据当年降水条件适当予以补充。由图 2c 可以看出,丰水年时,越冬水和灌浆水对产量均无显著影响,返青水和拔节水 25 mm 与 0 mm 所对应的产量有显著差异,25 mm 以上灌水无明显增产效果。可见在丰水

年,可适当取消越冬水和灌浆水,在返青期和拔节期灌水 25 mm 即可。

综上所述,四水中,以返青水对冬小麦产量影响最为显著,其次为拔节水,对产量影响最小的为灌浆水。因此,为提高作物产量必须重视返青水,同时适当减少灌溉越冬水和灌浆水,充分利用土壤水以节约水资源。

3.1.2 灌水定额对土壤蒸发及作物蒸腾量的影响

土壤蒸发和作物蒸腾之和为作物耗水量,亦称为作物蒸发蒸腾量,常用 ET 表示。它是确定作物灌溉制度以及地区灌溉用水量的基础,是流域规划、水资源区划、开发、利用与管理,农作物种植区划与布局等工作的重要资料。土壤蒸发在农田水量平衡和能量平衡计算中占有重要地位,农田灌溉管理、作物产量估计及土壤水分预报等许多问题都与其蒸发量紧密相关^[21]。从图 3 可以看出,土壤蒸发量总体表现为:丰水年>平水年>枯水年,说明降水量越多土壤蒸发量越大。冬小麦越冬期、拔节期以及灌浆期的土壤蒸发量随灌溉量的增加而增加,其中尤以越冬时期灌溉量对土壤蒸发影响最明显,拔节期是否灌水对土壤蒸发量影响最小。这是由于叶面积指数是影响土壤蒸发的重要作物生育指标,相对土面

蒸发强度随叶面积指数的增加而降低,呈指数递减规律,而冬小麦叶面积指数随生育期的变化是一个连续过程,但有明显的阶段点和转折点。在生长前期叶面积指数增长缓慢,基本呈线性增长;越冬期受冻害植株基本停止生长,许多绿叶出现枯死,此时叶面积指数最小,因此越冬期灌水显著增加土壤蒸发量。

与越冬期、拔节期和灌浆期灌水越少土壤蒸发量越小不同的是,返青期灌水对土壤蒸发的影响则相对较为复杂,枯水年、平水年和丰水年分别在返青时期灌溉 75 mm、50 mm 以及 25 mm 时土壤蒸发量最小。这是返青后,冬小麦开始由冬前的营养生长转化为营养生长和生殖生长并行的阶段,叶面积指数增长迅速,土壤蒸发量总体降低,但与其他时期不同的是,返青时期灌水量越少,土壤蒸发量反而越大。这是由于返青时期,正是冬小麦叶片迅速生长阶段,也是冬小麦需水量较大的时期,此时若不进行及时灌溉或者灌水量较少,直接影响作物叶片生长,导致叶面积指数降低,从而使得土壤蒸发面积及蒸发强度加大。因此,可以得出若要降低土壤无效蒸发,节约水资源,必须在冬小麦拔节时期进行及时灌水。

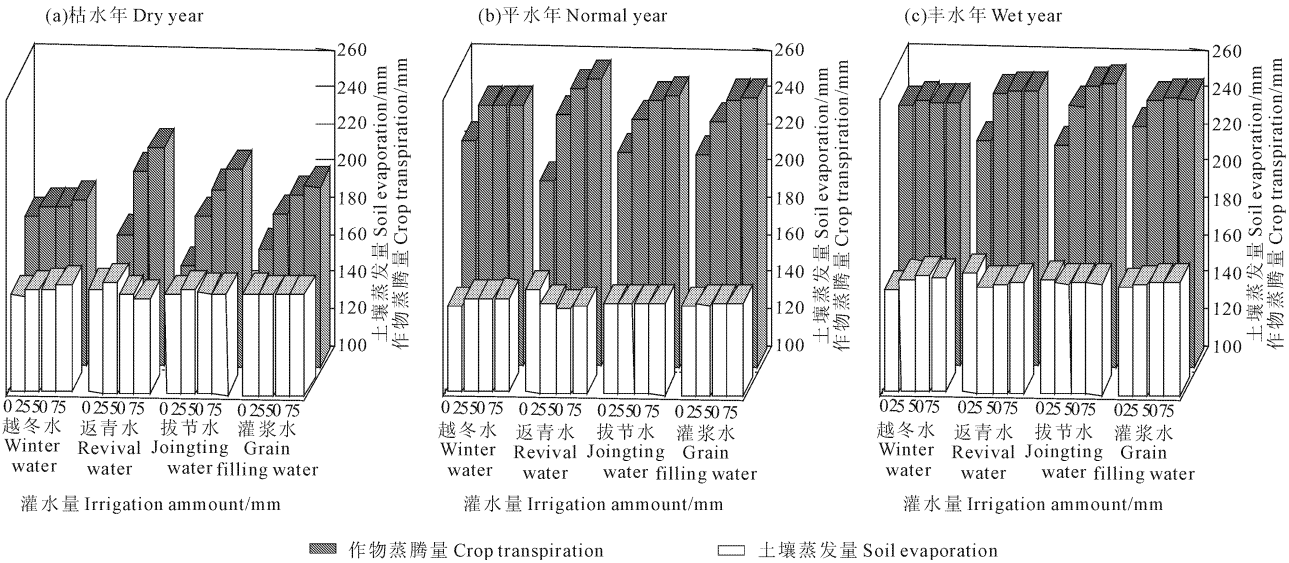


图 3 不同时期不同灌水量对作物蒸腾及土壤蒸发的影响

Fig.3 Effect of irrigation at different growth stages on crop transpiration and soil evaporation in different hydrological years

由于蒸散作用散失的水分和光合作用同化的CO₂均通过叶片的气孔通道进出,使蒸腾作用与光合作用相耦联,从而使作物蒸腾水分的散失联系着作物干物质生产,其变化决定着作物水分利用效率,因此研究不同灌水定额下作物蒸散量的变化对保证作物产量、提高作物水分利用效率具有重要意义。

从图 3 可以看出:(1) 枯水年、平水年、丰水年不同灌水处理下的平均作物蒸腾量分别为 184.9、235.3 mm 及 241.6 mm,表现为丰水年略大于平水年,二者均显著大于枯水年;(2) 作物蒸腾量随灌水量的增加而增加,枯水年和平水年下灌水对作物蒸腾量的影响均表现为:返青期>拔节期>灌浆期>越冬期,

而丰水年条件下表现为:拔节期 > 返青期 > 灌浆期 > 越冬期。这说明无论何种年型,返青水和拔节水都对作物蒸腾量有比较重要的影响,灌浆水次之,越冬水对其影响最小。

3.1.3 灌水定额对 WUE 及边际效益的影响 面对水资源日益紧张的严峻形势,如何用好有限的水资源,已经成为节水农业共同关注的焦点问题。水分利用效率(Water use efficiency, WUE)即水资源的平均生产能力,表示一单位水资源生产的作物产量,它是节水农业研究的最终目标,高水平的 WUE 是缺水条件下农业得以持续稳定发展的关键所在。水分利用效率可以分为单叶、群体和产量三个不同的层次,本文是研究产量水平的水分利用效率^[22-23]。

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

式中, Y 为产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为蒸散量(mm)。

从图 4a 可以看出,不同水平年的水分利用效率

总体表现为:丰水年 > 平水年 > 枯水年,其 WUE 均值分别为:20.324、19.384、17.934 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。即消耗相同水资源条件下,丰水年产量最高,枯水年产量最低,因此在水分短缺的枯水年若要保障粮食产量,需要加大投入水资源。这可能是由于在枯水年水分短缺,导致土壤和大气中含水量均处于较低水平,故灌水会补充大气和土壤中缺失的部分,从而导致水分利用率较低。(1) 枯水年下,越冬、返青、拔节和灌浆期分别灌溉 25、75、25、25 mm 时 WUE 最大;平水年下,四水分别灌溉 25、50、25、0 mm 时 WUE 最大;而丰水年下,四水分别灌溉 0、25、25、0 mm 时 WUE 最大。即在平水年和丰水年时,灌浆期灌水量越小水分利用效率越大,说明在冬小麦越冬期及灌浆期灌水会降低作物对水分的利用效率。返青期不灌水时水分利用效率最低,说明在返青期灌溉不仅会及时补充水分,而且还会提高作物对原有水分的吸收利用效率,达到“以水调水”的效果。

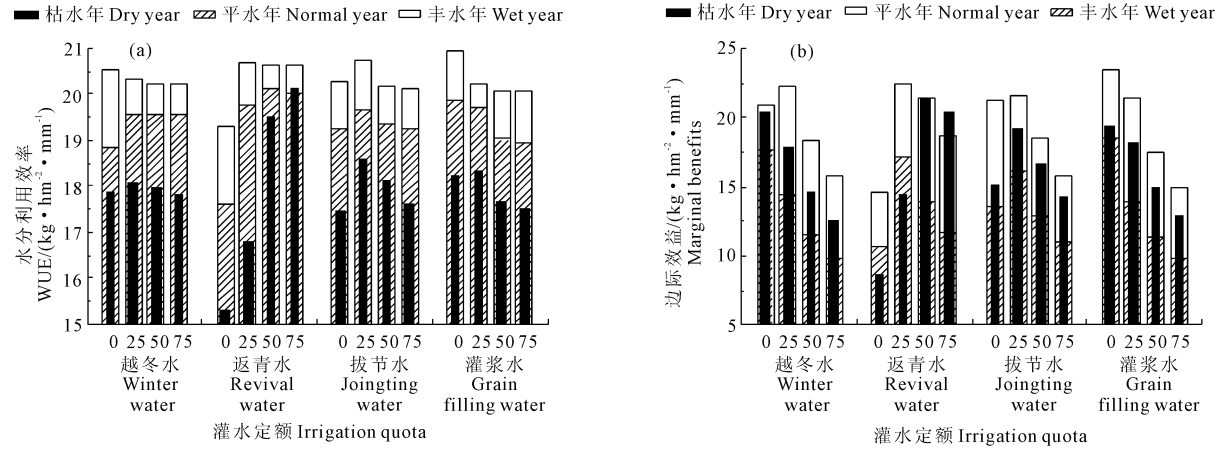


图 4 不同水平年不同灌水定额对 WUE(a)及边际效益(b)的影响

Fig.4 Effect of irrigation at different growth stages on WUE(a) and marginal benefits(b) in different hydrological years

边际效益是经济决策中十分有用和重要的概念。灌水边际效益是指在其他生产投入要素保持不变的情况下,每增加 1 mm 灌水所增加的产量。经济学原理表明,在技术水平不变的条件下,如果其他投入不变而某一投入要素不断增加,那么边际产量最终会递减,即边际报酬递减规律^[24-25]。从图 4b 可看出,在枯水年,越冬水、返青水、拔节水、灌浆水分别在 0、50、25 mm 以及 0 mm 时边际效益达到最大,继续增加灌水则出现报酬递减现象。而在平水年出现这一现象的灌水量分别是越冬水 0 mm、返青水 25 mm、拔节水 25 mm 以及灌浆水 0 mm,即平水年除返青水相比枯水年较少之外,其他时期灌水和枯水年相对一致。至于丰水年,除了整体边际效益低于平水年,并且高于枯水年之外,边际效益最大时

的灌水定额均与平水年一致。

3.2 不同降水年型灌溉定额的确定

在实际农业生产中,若单纯追求 WUE,无异于以水资源投入的低效益换取较高的资源利用效率,必然造成水资源的隐性浪费和经济不合理,并且无法保障粮食安全。而如果单纯追求产量而忽视 WUE,同样会造成资源浪费和利用不经济。如果以获得单产最高为灌溉供水准则,应按 $Y = f(ET)$ 曲线确定灌溉供水量。小麦产量 Y 与全生育期总耗水量 ET 的函数关系有线性和二次抛物线等形式,其中线性函数关系一般只适用于灌溉水源不足,管理水平不高、农业资源未能充分发挥的中低产地区^[26]。关中地区号称“八百里秦川”,农业发达,而且由于二次抛物线模型能够较好地反映小麦的连续

性及其生长规律,拟合精度高并且易于推广应用,因此本文采用了通用的 $Y = a + bET + cET^2$ 模型。

丰水年冬小麦产量和蒸散量之间的关系符合二次方程式 $Y = -0.2624ET^2 + 228.23ET - 41078$ ($R^2 = 0.6624, n = 256$),对该方程式求导,可得当蒸散量 $ET = 435\text{ mm}$ 时,产量 Y 获得最大值 $8\,541\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。平水年的水分生产函数为 $Y = 0.1178ET^2$ ($R^2 = 0.7851, n = 256$),对该方程式求导,可得当蒸散量 $ET = 488\text{ mm}$ 时,产量 Y 获得最大值 $8\,828\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。枯水年的水分生产函数为 $Y = -0.0733ET^2 + 79.026ET - 12136$ ($R^2 = 0.6624, n = 256$),对该方程式求导,可得当蒸散量 $ET = 539\text{ mm}$ 时,产量 Y 获得最大值 $9\,160\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见,当丰水年、平水年和枯水年的蒸散量分别达到 $435, 488\text{ mm}$ 以及 539 mm 时可获得最大产量。而对冬小麦 WUE 和蒸散量之间的关系进行求导后得出,在枯水年、平水年和丰水

年的蒸散量分别达到 $476, 403\text{ mm}$ 以及 397 mm 时其所对应的水分利用率最高。以上计算结果表明(1)在枯水年、平水年、丰水年下,当作物蒸散量分别小于 $476, 403\text{ mm}$ 以及 397 mm 时,为亏缺供水阶段,作物产量和水分利用效率均随着作物蒸散量的增大而增大,此阶段应充分供水保证作物的蒸散量,当超过这个界限时,水资源利用率开始下降,从提高水资源利用率的角度,冬小麦总耗水量以达到此界限为宜;(2)当蒸散量分别处于 $476 \sim 539, 403 \sim 488, 397 \sim 435\text{ mm}$ 阶段时,水分利用效率开始下降,但作物产量仍在增加,说明进入灌水投入的高产区间,灌水得到充分发挥;(3)当蒸散量分别大于 $539, 488\text{ mm}$ 以及 435 mm 时,这一阶段随着蒸散量的增加,水分利用效率继续降低,产量也开始下降。可见在这一阶段,蒸散量越大,产量越低,为不合理的生产阶段。

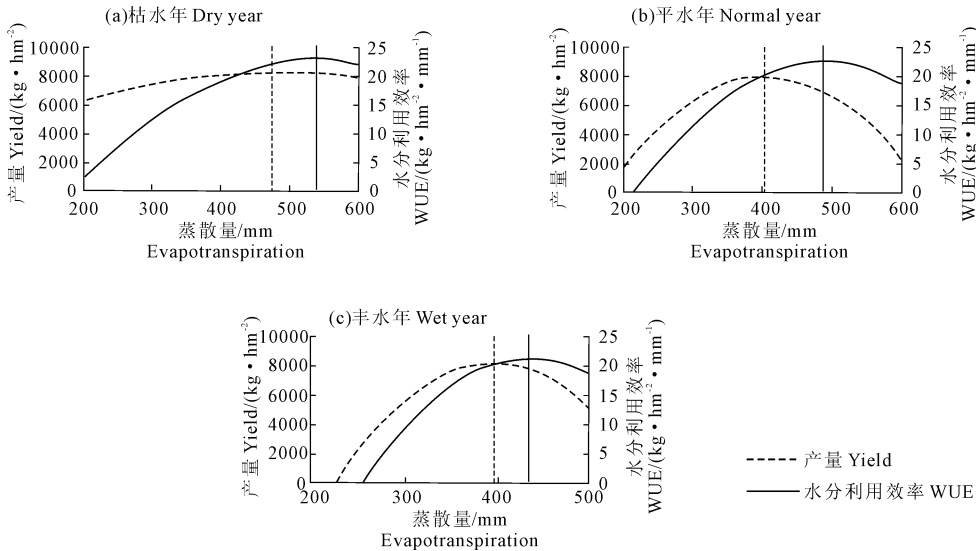


图 5 不同降水年型冬小麦产量、水分利用效率和蒸散量的对比关系

Fig.5 Relation among yield, WUE and evapotranspiration of winter wheat in different hydrological years

枯水年、平水年和丰水年 WUE 最高时对应的产量分别占其最高产量 $Y_{\max}$ 的 96.84% 、 90.44% 以及 95.54% ;而产量最高时所对应的 WUE 分别占其 WUE 最大值 $WUE_{\max}$ 的 98.80% 、 85.59% 以及 95.00% 。即枯水年、平水年、丰水年的高产区间分别为 $(96.84\% Y_{\max}, Y_{\max})$ 、 $(90.44\% Y_{\max}, Y_{\max})$ 以及 $(95.54\% Y_{\max}, Y_{\max})$, $Y_{\max}$ 为不同水平年充分灌溉时作物产量,其水分高效区间分别为 $(98.80\% WUE_{\max}, WUE_{\max})$ 、 $(85.59\% WUE_{\max}, WUE_{\max})$ 、 $(95.00\% WUE_{\max}, WUE_{\max})$, $WUE_{\max}$ 为不同水平年模拟结果中的最高 WUE。

3.3 不同降水年型最优灌溉制度的确定

3.3.1 构建筛选条件 模拟试验共设计了 256 个

不同的灌溉方案,因此,如何从中筛选适合于不同水平年的最优灌溉制度显得尤为重要。

(1) 作物高产。粮食产量是第一位的,关系到粮食安全问题,因此灌溉制度的选择以粮食产量为筛选首要条件。根据水分生产函数确定的高产区间,丰水年、平水年、枯水年作物高产的筛选条件为: $Y_1 \geq 95.54\% Y_{1\max}$, $Y_2 \geq 90.44\% Y_{2\max}$, $Y_3 \geq 96.84\% Y_{3\max}$ ($Y_{1\max}, Y_{2\max}, Y_{3\max}$ 分别代表丰水年、平水年和枯水年充分灌溉时作物产量)。

(2) 资源高效利用。提高水分利用效率是非充分灌溉的主要目标,根据水分生产函数确定的高产区间,丰水年、平水年、枯水年资源高效利用的筛选

条件为: $WUE_1 \geq 98.80\% WUE_{1max}$, $WUE_2 \geq 85.59\% WUE_{2max}$, $WUE_3 \geq 95.00\% WUE_{3max}$ (WUE_{1max} , WUE_{2max} , WUE_{3max} 分别代表丰水年、平水年和枯水年的最高水分利用效率)。

(3) 节约水资源。水资源是关中地区限制粮食生产的主要障碍因素,灌溉制度的选择采取总灌水量 I_t 越少越好的原则, $0 \leq I_t \leq 300$ 。

(4) 操作简单方便。考虑农民实际田间操作问题,灌溉制度的选择采取灌水次数 I_f 越少越好的原则, $0 \leq I_f \leq 4$ 。

筛选条件优先等级:产量 > 水分利用效率 > 总灌水量 > 灌水次数。

3.3.2 筛选结果 根据上述筛选条件,得出不同水平年的最优灌溉方案。枯水年为 $0mm + 75mm + 50mm + 0mm$,灌两水,分别在返青期和拔节期灌水 $75mm$ 和 $50mm$;平水年最优灌溉方案为 $0mm + 75mm + 0mm + 0mm$,于冬小麦返青期灌水 $75mm$ 即可;丰水年最优灌溉方案为 $0mm + 25mm + 25mm + 0mm$,灌两水,分别在返青期和拔节期灌水 $25mm$ 即可。可见枯水年、平水年、丰水年的灌溉定额分别为 125 、 $75mm$ 和 $50mm$ 。

4 结论与讨论

本研究利用 DSSAT 作物模型模拟分析了关中地区不同降水年型不同生育期灌水对冬小麦产量、水分利用效率、土壤蒸发量以及作物蒸腾量的影响,得出不同水平年下的最优灌溉制度。并通过对不同生育期不同灌水定额对上述指标的影响确定了不同生育期对水分的需求量以及关键灌溉期,从而为水资源短缺的关中地区乃至整个西北地区水资源在时间上的配置提供了一定理论依据。最后,通过分析不同水平年冬小麦产量、水分利用效率与作物蒸散量的对比关系得出不同水平年的作物高产水分高效区间,并根据此区间范围确定了最终灌溉制度。

研究表明,DSSAT 模型对土壤水分变化模拟和冬小麦生育期模拟较为精确,故可以用来模拟水分限制条件下的作物潜在生产力。经过对不同生育期灌水对作物产量、土壤蒸发量、作物蒸腾量和 WUE 等进行模拟分析后发现,在不同降水年型条件下,返青水对上述指标的影响最为显著,其次为拔节水,越冬水和灌浆水影响相对较小,说明返青期为关键灌水期,若水资源不足时应首先保障返青水,并且在土壤墒情较好的情况下可考虑适当取消灌浆水和越冬水。这是由于返青时期正是冬小麦迅速生长阶段,

也是冬小麦需水量较大的时期,此时若不进行及时灌溉或者灌水量较少,直接影响作物叶片生长,从而影响冬小麦光合作用最终导致产量下降;冬小麦拔节到开花期为需水量最大的时期,但由于此阶段关中地区降水量也逐步增多,因此相比较而言,返青期灌水更为关键。

同时,为对比不同降水条件下的最优灌溉制度,本文通过 P-III 型曲线从近 30 年中选出 2000—2001 年、1980—1981 年和 2009—2010 年分别作为枯水年、平水年和丰水年的典型年进行分析对比,研究表明:冬小麦产量、土壤蒸发量和作物蒸腾量以及 WUE 均表现为丰水年略大于平水年,二者均显著大于枯水年,但边际效益表现为平水年 > 枯水年 > 丰水年,并经过对不同水平年分别模拟得出针对不同水平年的最优灌溉制度。枯水年、平水年和丰水年最优灌溉定额分别为: 125 、 $75mm$ 和 $50mm$ 左右。由于每年降水时空分布的不均匀性以及各地区灌溉水利用系数不尽相同,应在此优化灌溉制度的基础上进行适当调整。

本文的模拟没有考虑土壤中养分(设定养分充足)以及病虫害的影响(设定无病虫害)的影响,但是很多以往的研究表明农田水分和养分存在明显的交互作用。高灌溉量会增加农田中氮素的流失,从而造成养分胁迫影响产量,并且引起环境污染;而灌溉量过低时影响养分向根系的移动速率和根系的扩展速率,阻碍了作物对养分的吸收,从而造成减产;因此在此基础上继续进行水肥耦合效应的研究,将是灌溉制度研究的重要方向。

参考文献:

- [1] M.K. Van Ittersum, P.A. Leffelaar, H. Van Keulen, et al. Development in modeling crop growth, cropping systems and production systems in the Wageningen School[J]. NJAS, 2002, 50(2): 239-247.
- [2] Gerrit Hoogenboom. The State of the art in Crop Modeling[C]// Sivakumar M V K. Climate Prediction and Agriculture. Processing of the START/WMO International Workshop. Washington, D. C., USA: International START Secretariat, 2000: 69-75.
- [3] J W Jones, G Hoogenboom, C H Porter, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European journal of agronomy, 2003, 18: 235-265.
- [4] Anil Kumar Singh, Rojalin Tripathy, Usha Kiran Chopra. Evaluation of CERES - wheat and cropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop[J]. Agricultural water management, 2008, 95: 776-786.
- [5] Marco Dettori, Carla Cesaraccio, Andrea Motroni, et al. Using CERES - wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy[J]. Field crops research, 2011, 120: 179-188.

(下转第 37 页)

[4] 马娟娟,孙西欢,郭向红,等.蓄水多坑入渗条件下土壤水分运动建模与试验[J].农业机械学报,2010,41(3):46-51.

[5] 张治伟,朱章雄,王 燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.

[6] Duan R, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soils[J]. Irrig Sci, 2011,29(5):379-389.

[7] 张新燕,蔡焕杰,朱德兰.沟灌条件下灌水沟入渗特性研究[J].中国农村水利水电,2012,(3):7-11.

[8] Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability[J]. Irrig Sci, 2009,19(4):155-164.

[9] Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. II. Impact on soil water and corn yield[J]. Irrig Sci, 2009,19(4):165-173.

[10] 白美健.微地形和入渗时空变异及其对畦灌系统影响的二维模拟评价[D].北京:中国水利水电科学研究院,2007.

[11] 屈金娜,马孝义,张建兴.区域尺度土壤入渗特征参数的变异性研究[J].灌溉排水学报,2009,28(1):71-73,89.

[12] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.田间土壤水分运动参数的标定[J].水利学报,1986,17(12):1-10.

[13] Machiwal D, Madan K J, Mal B C. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India[J]. Biosystems Engineering, 2006,95(4):568-582.

[14] 康绍忠,张书函,聂光镛,等.内蒙古敖包小流域土壤入渗分布规律的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):38-46.

[15] 李亚娟.甘肃西峰南小河流域土壤水分运动参数空间分布的试验研究[D].西安:西安理工大学,2007.

[16] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[17] 杨清云,曾 锋.森林土壤空间变异性及其样本容量的确定[J].水土保持研究,2004,11(3):54-56.

[18] 徐海芳.农田土壤入渗参数的空间统计特征[D].西安:长安大学,2005.

[19] 白美健,许 迪,李益农,等.地面灌溉土壤入渗参数时空变异性试验研究[J].水土保持学报,2005,19(5):120-121.

[20] 陈亚新,史海滨,魏占民,等.土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟[M].北京:科学出版社,2005.

[21] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(5):1501-1511.

(上接第 10 页)

[6] Hartkamp A D, White J W, Rossing W A H, et al. Regional application of a cropping systems simulation model: crop residue retention in maize production systems of Jalisco, Mexico[J]. Agricultural systems, 2004,82:117-138.

[7] Dzotsi K A, Jondes J W, Adiku S G K, et al. Modeling soil and plant phosphorus within DSSAT[J]. Ecological modeling, 2010,221:2839-2849.

[8] Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during season under different soil conditions[J]. Ecological modeling, 2004,171:223-246.

[9] 李 军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J].作物学报,2002,28(4):555-560.

[10] 姜志伟,武雪萍,华 璐,等.洛阳旱地冬小麦生产潜力长周期定量模拟与评价[J].中国生态农业学报,2009,17(5):984-991.

[11] 鲁向晖,穆兴民, Vinay Nangia, et al. DSSAT 模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):64-70.

[12] 鞠正山,张凤荣,刘晓霞.西北特干旱区农业水资源利用潜力与粮食增产的关系[J].农业工程学报,2002,18(1):177-180.

[13] 上官周平,邵明安.西北地区粮食生产潜力与开发策略[J].科技导报,1999,9:54-55.

[14] 汤广民,王有贞.安徽淮北平原主要农作物的优化灌溉制度与经济灌溉定额[J].灌溉排水学报,2006,25(2):24-29.

[15] 张喜英,裴 冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].水利学报,2001,(1):90-95.

[16] Tsuji G Y. DSSAT4.0 User's Guide. Vol.1-4[Z]. Hawaii State: The university of Hawaii, 2003.

[17] Godwin D. A user's guide to CERES-Wheat V210[M]. State of New York: International Fertilizer Development Center, 1990.

[18] Trimsina J, Godwin D, Humphreys E, et al. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT - CSM - CERES - Wheat model[J]. Agricultural water management, 2008,95:1099-1110.

[19] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.

[20] Jianqiang He, James W Jones, Wendy D Graham, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method[J]. Agricultural Systems, 2010,103:256-264.

[21] 刘 浩,段爱旺,高 阳.间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究[J].农业工程学报,2006,22(12):34-38.

[22] 刘昌明,周长青,张士锋,等.小麦水分生产函数及其效益的研究[J].地理研究,2005,24(1):1-10.

[23] 王会肖,刘昌明.作物水分利用效率内涵及研究进展[J].水科学进展,2000,11(1):99-104.

[24] 龙爱华,徐中民,张志强,等.基于边际效益的水资源空间动态优化配置研究[J].冰川冻土,2002,24(4):407-413.

[25] 程智强,邱化蛟,程 序.资源边际效益与种植业结构调整目标规划[J].农业工程学报,2005,21(12):16-19.

[26] 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.