

基于 DSSAT 模型的京津冀地区 主要农作物用水分析

郎婷婷¹, 郝蒙蒙^{2,3}, 吴风华¹, 阎晓曦^{2,3}, 付晶莹^{2,3}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:以京津冀为研究区, 将 GIS(Geographic Information System) 技术与 DSSAT(Decision Support for Agrotechnology Transfer) 模型相结合, 对 2016—2017 年冬小麦和夏玉米的生长需水情况进行模拟, 并分析了雨养条件及灌溉条件对冬小麦和夏玉米生物量的影响。结果表明: 京津冀地区冬小麦的需水量在 323.72~419.58 mm 之间, 夏玉米的需水量在 333.47~438.51 mm 之间; 2 种作物需水量较多的地区主要集中在种植区的东南部及北部, 需水量相对较少的地区主要分布在种植区的西部。冬小麦从播种开始的第 160 天左右, 耗水量显著增加, 夏玉米对水分需求一直增加, 30 d 前后, 夏玉米地上生物量显著增加, 因此, 在冬小麦播种的前 160 d、夏玉米播种的前 30 d 内应适度灌溉, 避免过度灌溉造成水资源浪费。

关键词: 需水规律; 冬小麦; 夏玉米; DSSAT 模型; 京津冀地区

中图分类号: S161.6; S274.4 **文献标志码:** A

Study on water requirements of major crops in Beijing–Tianjin–Hebei region using DSSAT model

LANG Ting-ting¹, HAO Meng-meng^{2,3}, WU Feng-hua¹, YAN Xiao-xi^{2,3}, FU Jing-ying^{2,3}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Beijing–Tianjin–Hebei is located in the Haihe River Basin, where faces severe water shortages and ecological imbalance, especially the agricultural water supply. Therefore, research on crop water requirements is of great significance to achieve inter-regional coordinated development and effective utilization of water resources. Taking Beijing–Tianjin–Hebei region as the research area, by combining GIS (Geographic Information System) technology with DSSAT model (Decision Support for Agrotechnology Transfer), the spatial distribution of water requirements of winter wheat and summer maize during 2016 to 2017 was modeled, and the effects of rainfall conditions and irrigation conditions on biomass was evaluated. The results showed that, The water requirement of winter wheat in Beijing–Tianjin–Hebei region ranged from 323.72 to 419.58 mm, and that of summer maize from 333.47 to 438.51 mm; the southeast and north of the planting area needed more water while the west needed less. The requirements for water increased significantly from day 160 after sowing of winter wheat but since sowing of summer maize. Around day 30 after sowing, the aboveground biomass of summer maize increased significantly. So, appropriate irrigation should be carried out before and after the date in order to reduce the waste of water resources.

Keywords: water requirement; winter wheat; summer maize; DSSAT model; Beijing–Tianjin–Hebei region

收稿日期: 2018-09-13

修回日期: 2019-07-31

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503507); 西藏重大科技专项(Z2016C01G01)

作者简介: 郎婷婷(1992–), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感应用。E-mail: langtt_1111@163.com

郝蒙蒙(1990–), 女, 安徽宿州人, 博士研究生, 研究方向为资源环境遥感应用。E-mail: haomm.16b@igsrr.ac.cn.

通信作者: 付晶莹(1986–), 女, 吉林省吉林市人, 博士, 副研究员, 主要从事资源环境遥感应用研究。E-mail: fujiy@igsrr.ac.cn

水资源时空分布不均是水资源分布的突出特点,由于地理气候等因素,中国北方存在干旱少雨、水资源短缺等现象^[1]。据《2016 年中国水资源公报》显示^[2],京津冀地区水资源总量为 $262.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅占全国水资源总量的 0.8%,并且京津冀地区农业用水量高达 60% 以上^[3]。京津冀地区是我国重要的农业生产基地之一^[4],冬小麦和夏玉米是京津冀地区的主要粮食作物,也是京津冀农作物的主要轮作模式^[5],其灌溉用水和蒸散发量都相对较大,主要靠提取地下水或黄河灌溉来保证高产,长期的灌溉造成华北平原地下水位快速下降,形成了世界上最大的复合型地下水位降落漏斗区,并引起诸多的生态和环境问题。对京津冀地区冬小麦和夏玉米需水量进行精准的估算和预测,是京津冀地区冬小麦、夏玉米高产和水资源有效利用的保证,也为实现“精准农业”^[6]、保障粮食安全和维护生态可持续发展提供理论基础^[7]。

为了探究农作物的生长规律,克服传统田间试验法受时间限制、研究区域及环境条件不具备普遍适用性等缺点^[8],现代作物模型得到研发及完善,美国的 DSSAT 模型是目前使用最为广泛的模型之一^[9-10]。陈丹丹等^[11]使用 DSSAT 模型模拟了充分灌溉和雨养不灌溉条件下河南省冬小麦的生长情况,并定量评估了冬小麦需水量的变化特征,为河南省冬小麦水分定量化管理提供了参考; Araya 等^[12]基于 DSSAT-CSM 模块评估了美国堪萨斯州西部地区的农作物产量与水分限制条件下的农作物水分生产率,结果表明,不充分的灌溉条件和轮作条件下玉米的产量比充分灌溉条件和连作条件下的要高。贺鹏等^[13]对 DSSAT 中的 CERES-Wheat 模型进行标定,模拟了关中平原地区冬小麦在不同生育期对水分胁迫的敏感性,结果表明冬小麦在旱作区和灌溉区对水分胁迫的敏感性相同。为了探究京津冀区域内农作物需水时空分布规律,合理规划并分配农业用水量,本研究基于 DSSAT 模型,结合 GIS 技术,构建了京津冀区域内冬小麦、夏玉米需水估算模型,对京津冀地区冬小麦和夏玉米进行需水量预测,为精准灌溉提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀位于我国华北平原中部,地理位置为东经 $113^{\circ}27'$ — $119^{\circ}50'$,北纬 $36^{\circ}05'$ — $42^{\circ}40'$,区域气候属于温带湿润半干旱大陆性季风气候,四季气候分明,常年降水量在 540 mm 左右。京津冀地区水

资源总量为 262.3 亿立方米,仅占全国水资源总量的 0.8%,有效灌溉面积约 489.3 万公顷,约占全国的 7.3%。京津冀地区冬小麦-夏玉米为一年两熟制作物^[14],在种植空间分布上被识别为一年两季的作物种植模式^[15],使用 MODIS 遥感影像,根据 NDVI(归一化植被指数),并结合物候信息,得到了京津冀地区冬小麦-夏玉米种植区,见图 1。

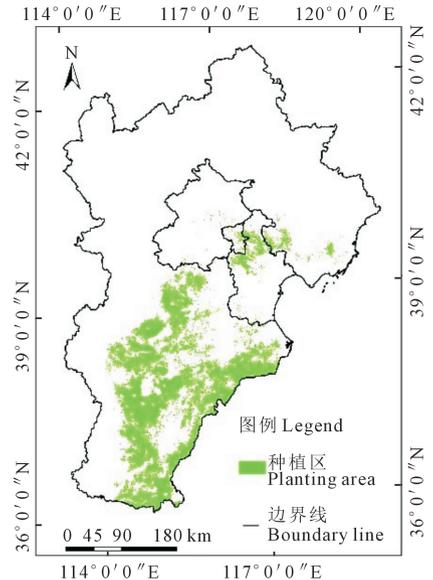


图 1 京津冀地区冬小麦—夏玉米种植区分布图

Fig.1 Distribution of winter wheat-summer maize planting area in Beijing-Tianjin-Hebei region

1.2 总体技术路线

在京津冀地区冬小麦和夏玉米农业需水量预测模型构建的过程中,基于 GIS 技术,完成 DSSAT 模型空间扩展模块的数据收集整理,包括土地利用数据、土壤数据以及气象数据,同时,对冬小麦和夏玉米的作物品种参数数据库进行优化,实现基于空间的冬小麦和夏玉米农业需水量预测和分析,总体技术路线如图 2 所示。

1.3 DSSAT 模型

DSSAT 模型产生于农业技术转移国际基准网 IBSNAT(Inter-national benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer)的项目,能够对作物生长发育过程所需的环境及能源等数据进行整合与分析^[16-19],通过计算机技术建立相关的数学模型,来监测作物的生长过程,同时为农业研究提供技术支持与决策^[20-21]。水分平衡模拟模块是 DSSAT 模型中一个重要的组成模块^[22],在农田生态系统的水分循环过程中,作物生长过程需水主要来自降水、地表水、土壤水和地下水^[23],农作物在 DSSAT 模型中

的土壤水平衡表示如下^[21]:

$$\Delta S = RF + I - E - T - R - D$$

其中, ΔS 表示土壤含水量的变化, RF 表示降水量, I 表示灌溉量, E 表示作物蒸腾量, T 表示土壤蒸发量, R 表示地表径流量, D 表示深层渗漏或排水量, 单位均为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

DSSAT 模型是基于单点的作物生长模拟模型, 空间模块发展滞后, 限制了对空间范围内农作物生长过程模拟的研究。通过将 GIS 技术和 DSSAT 模型相结合, 可以实现农作物空间分析, 充分发挥 GIS 技术的空间数据管理能力和 DSSAT 模型的作物生长过程模拟优势^[24-26], 为农业预测提供数据支持。

图 3 为本研究中 DSSAT 模型和 GIS 技术耦合的流程图: 首先, 对单个土地单元试验田进行本地化模拟; 其次, 利用 Arcgis 10.1 的空间分析功能, 对 DSSAT 模型所需的土壤剖面数据和气象数据进行处理, 再将数据批量读入土壤和气象模块, 从而获得覆盖种植区所有农作物种植点的土壤和气象文件; 再次, 利用 DSSAT 模型进行冬小麦和夏玉米的生长过程模拟, 得到冬小麦和夏玉米的蒸腾量, 再计算作物系数与蒸腾量的乘积得到农作物需水量, 最后, 将农作物需水量读入 Arcgis 10.1 中, 制作农作物需水空间分布图, 从而进一步分析京津冀地区农作物的用水情况。

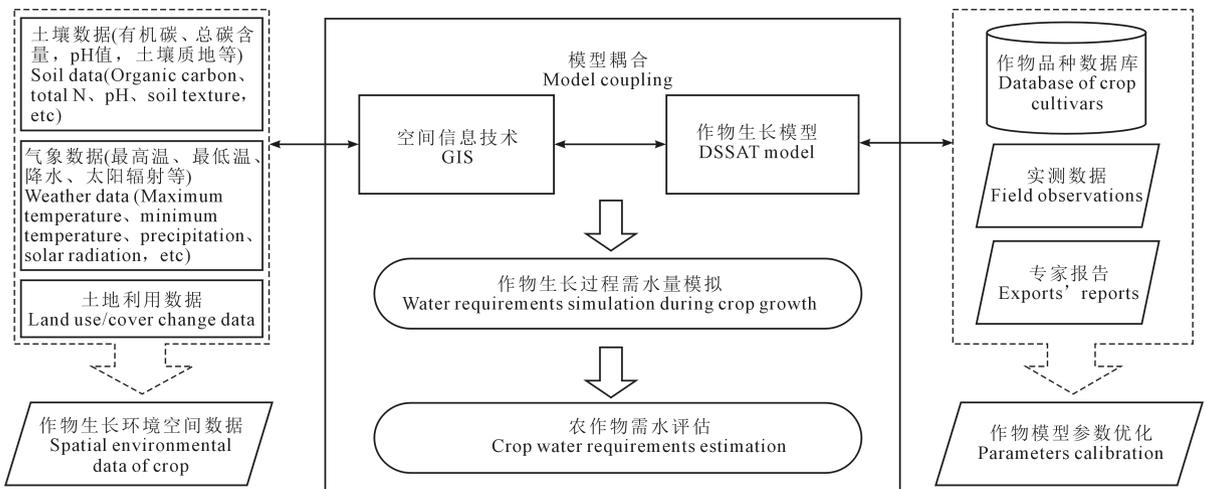


图 2 模型构建技术流程图

Fig.2 Model building technique flow chart

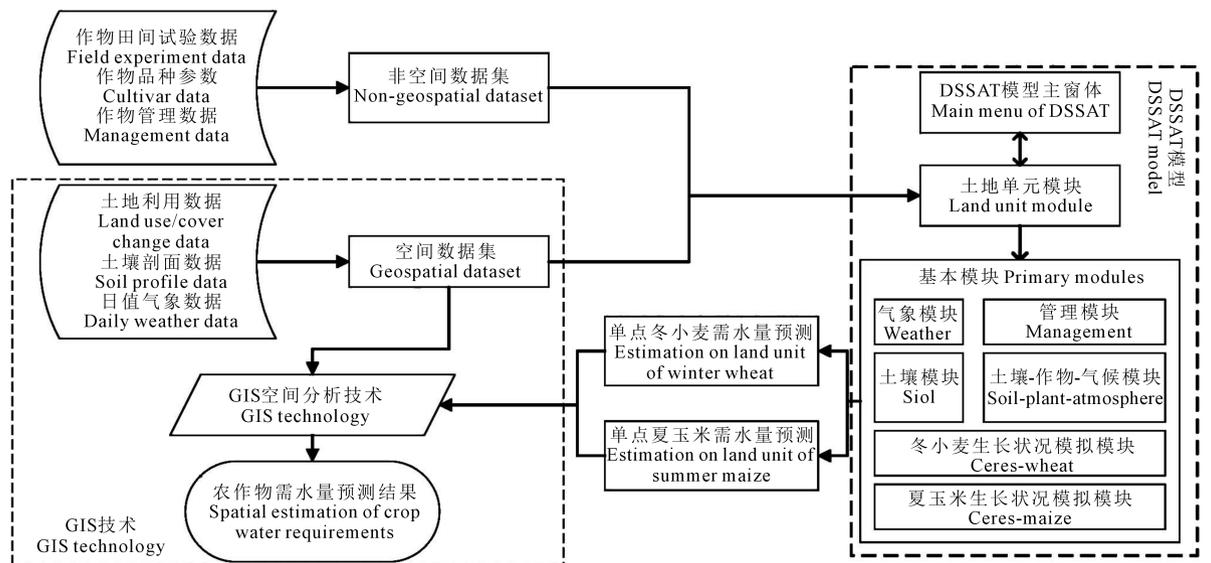


图 3 耦合 GIS 技术与 DSSAT 模型技术流程图

Fig.3 Technique flow chart of coupling GIS and DSSAT model

1.4 农业需水模型数据

1.4.1 气象数据 DSSAT 模型输入需要日值气象数据,每个站点气象数据的时间需要覆盖作物的整个生长季,一般从作物播种前 1 周开始到作物收割后 1 周结束,站点的气象数据来自国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>) 提供的 2016—2017 年的日值气象数据。其中,日值太阳辐射、最高温度、最低温度和降水数据为站点数据通过 ANUSPLIN Vrsn 4.3 软件模拟插值获得 1KM 空间分辨率的气象数据。

1.4.2 土壤剖面数据 模型采用的土壤剖面数据来源于寒区旱区科学数据中心提供的 GSDE (Global Soil Data Set for Earth System Modeling) 数据库,该数据以 HWSO (Harmonized World Soil Database) 土壤数据库为基础发展而来,提供了包含土壤质地、有机碳、氮含量、PH 值等在内的 11 项土壤概况数据和 34 项土壤属性数据。

1.4.3 作物品种参数数据 气象和土壤剖面表征了京津冀地区农作物农业需水模拟的环境状况,而除此以外,还需要选择正确的农作物品种以实现准确的农业需水模拟,通过文献调研手段获取了京津冀地区经“本地化”处理后的冬小麦和夏玉米品种参数,表 1 是冬小麦和夏玉米两种主要农作物敏感性较高的作物品种参数列表。

2 结果与分析

2.1 冬小麦需水时空分析

2.1.1 冬小麦需水量空间分布 使用 DSSAT 模型,并结合 GIS 技术,对冬小麦生长期农业需水量进行预测。京津冀地区冬小麦一般在 10 月上中旬播种,次年 6 月收获,由于冬小麦 6 月份已进入成熟期不再进行灌溉,故未对 6 月份冬小麦的需水情况做预测。冬小麦整个生长季需水量的空间分布预测如图 4 所示。

表 1 作物品种参数列表

Table 1 The list of crop cultivar parameter

作物 Crop	参数名称 Parameter	定义 Definition	参数调试值 Value of parameter ^[27-28]
夏玉米 Summer maize	P1	出苗期到穗分化时期的积温 Stage of phase end juvenile to terminal spikelet	260.0
	P2	穗分化时期到旗叶完全抽出时期 Stage of phase terminal spikelet to end leaf growth	0.65
	P5	籽粒灌浆期积温 Accumulated temperature during grain filling (excluding lag)	670.0
	G2	最佳条件下标准籽粒质量 Standard kernel size under optimum conditions	850.0
	G3	成熟期无胁迫条件标准单穗质量 Standard, non-stressed mature tiller weight (incl grain)	7.5
	PHINT	连续两片叶之间生长所需要的积温 Accumulated temperature required for continuous growth between two leaves	5533
冬小麦 Winter wheat	P1V	最适温度条件下通过春化阶段所需天数 Days, at the optimum temperature, required for vernalization	37.6
	P1D	光周期参数 Photoperiod parameters	54.6
	P5	籽粒灌浆期积温 Accumulated temperature during grain filling (excluding lag)	605
	G1	开花期单位植株的籽粒数 Kernel number per unit canopy weight at anthesis	23
	G2	最佳条件下标准籽粒质量 Standard kernel quality under optimum conditions	30
	G3	成熟期无胁迫条件标准单穗质量 Standard, non-stressed mature tiller weight (incl grain)	1.3
	GN%N	标准籽粒氮含量 Standard grain N	2.8
	PHINT	连续两片叶之间生长所需要的积温 Accumulated temperature required for continuous growth between two leaves	103
	LA1S	第一片叶的标准面积 Area of standard first leaf	3.05
	PARUE	叶片结束生长前光合有效辐射转化成干物质质量的比率 PAR conversion to dm ratio, before last leaf stage	2.03
PARU2	叶片结束生长后光合有效辐射转化成干物质质量的比率 PAR conversion to dm ratio, after last leaf	3.23	
SLPF	土壤光合系数 Photosynthesis factor of soil	0.82	

根据图4可知,在冬小麦的整个生长期,京津冀地区冬小麦的农业需水量在323.72~419.58 mm之间,空间分布差异较大,其中冬小麦种植区的东南部及北部需水量较大;冬小麦生长期内的降水量在172.31~305.76 mm之间,降水量在冬小麦种植区以东南-西北方向呈逐渐减少的趋势;对比冬小麦生长期内需水量与降水量发现,京津冀地区所有冬小麦种植区内均需提供灌溉用水来保证冬小麦的正常生长发育过程,灌溉需水量在55.95~212.55 mm之间,中部偏北地区的灌溉需水量相对较大。

2.1.2 冬小麦月尺度灌溉需水空间分布 对冬小麦生长期各月灌溉需水量预测如下图5所示。由于冬小麦在12月份进入越冬期,气温较低,基本不实施灌溉,因此未对12月份至2月份的冬小麦灌溉需水量分布情况做统计。

10月为冬小麦播种和出苗的主要时期,基于冬小麦的生长特性,需要在播种时给予1次灌溉。11月属于冬小麦的分蘖期,需水量较少,无需灌溉。3月是冬小麦的返青期和起身期,从这一阶段开始冬小麦的需水量开始逐渐增加,灌溉需水量为10.74~28.57 mm,种植区的中南部所需的灌溉水较多。4月是冬小麦的拔节期和挑旗期,所有种植区仍需进行灌溉,灌溉需水量为27.55~49.47 mm。5月是冬小麦的灌浆期,这一时期冬小麦农业需水量较大,且该时期是影响冬小麦产量的重要阶段,因此需要给予良好的灌溉条件,以保证冬小麦的产量,灌溉需水量在47.07~77.18 mm之间,灌溉需水量较多的地区集中在冬小麦种植区的中南部地区。

2.1.3 冬小麦地上生物量和需水规律分析 基于DSSAT作物生长模型,对雨养条件和灌溉条件下冬小麦生长过程中的地上生物量变化和需水量变化进行了模拟,分析冬小麦的需水规律,变化曲线见图6。

根据图中冬小麦地上生物量变化曲线可知,在冬小麦前200 d的生长过程中,雨养和灌溉条件下的曲线变化一致,但在播种200 d之后,灌溉条件下的冬小麦生长曲线逐渐高于雨养条件下的冬小麦生长曲线。由此可知,冬小麦播种的前200 d内,灌溉和雨养条件对冬小麦的地上生物量的作用相同,在200 d之后,对水分的需求大幅增加,两种条件下的地上生物量表现出差异性;从第240天开始,冬小麦逐渐成熟,地上生物量不再发生显著变化。

根据图中冬小麦农业耗水量变化曲线可知:在冬小麦播种的第160天前,冬小麦的耗水量显著

增加,地上生物量也逐渐增加,需要提供充足的灌溉条件;在冬小麦播种开始计算的前180 d内,雨养和灌溉条件下冬小麦耗水量基本一致,在180 d之后,冬小麦耗水量才出现差异,即在灌溉条件下,冬小麦的耗水量比雨养条件下高,产生的原因可能是灌溉使得冬小麦生长更加健壮,从而产生更高的蒸散发量,最终导致耗水量的增加;在第240天前,冬小麦趋于成熟,且地上生物量不发生变化,可减少灌溉。

2.2 夏玉米需水时空分析

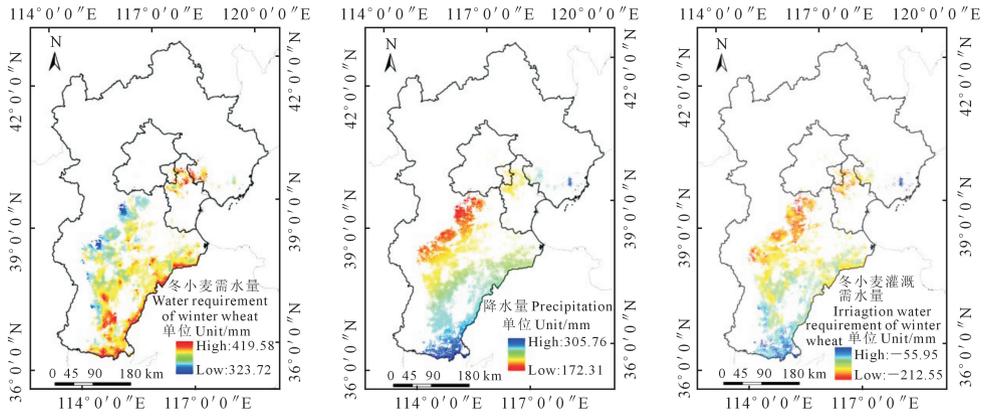
2.2.1 夏玉米需水空间分布 结合GIS技术和DSSAT模型对京津冀地区夏玉米整个生长期的需水量预测如图7所示。

京津冀地区夏玉米一般在6月中下旬播种,9月底收获。根据图7可知:在夏玉米的整个生长期,京津冀地区夏玉米的农业需水量在333.47~438.51 mm之间,空间分布差异较大,其中需水量较大的地区主要集中在种植区的东南部及北部,西部地区夏玉米农业需水量相对较少;夏玉米生长期内的降水量在271.52~453.42 mm之间,其中西南部地区降水较少,东北部地区降水相对充沛;对比京津冀地区夏玉米生长期内需水量与降水量发现,种植区的部分地区需提供灌溉用水来保证玉米的正常发育过程,京津冀地区夏玉米灌溉需水量为0~141.22 mm,其中南部地区对灌溉用水的需求量最大。

2.2.2 夏玉米月尺度灌溉需水空间分布 京津冀地区夏玉米的生长周期主要为6—9月,对京津冀地区夏玉米生长期各月农业需水量预测如下图所示。

根据图8可知,6月是京津冀地区夏玉米的播种季节,所需灌溉用水范围广但灌溉量较少,最大灌溉量为27.6 mm,灌溉需水量较大的地区主要集中在种植区的中部;7—8月是夏玉米的主要生长季节,需要提供的灌溉用水也相对较高,7月需要提供灌溉水的地区主要分布在种植区的南部,灌溉需水量高达106.61 mm,8月需要提供灌溉水的地区主要分布在种植区的北部和西部,灌溉需水量可达59.3 mm。9月是夏玉米的灌浆期和收获期,夏玉米灌溉需水量减少,仅在西南部地区需要提供43.58 mm左右的灌溉水。

2.2.3 夏玉米地上生物量和需水规律分析 基于DSSAT作物生长模型,对雨养条件和灌溉条件下夏玉米生长过程中的生物量变化和需水量变化进行了模拟,分析了夏玉米的需水规律,变化曲线见图9。



注:正值表示降水总量可以满足农业需水量要求,负值表示降水总量无法满足农业需水量要求,下同。

Note: The positive value indicates that the total precipitation can meet the agricultural water requirements, while the negative value indicates that the total precipitation can not meet the agricultural water requirements, the same below.

图 4 冬小麦生长期需水量、降水量及灌溉需水量空间分布图(2016-10—2017-05)

Fig.4 The spatial distribution of water requirement, precipitation and irrigation water requirement of winter wheat (2016-10-2017-05)

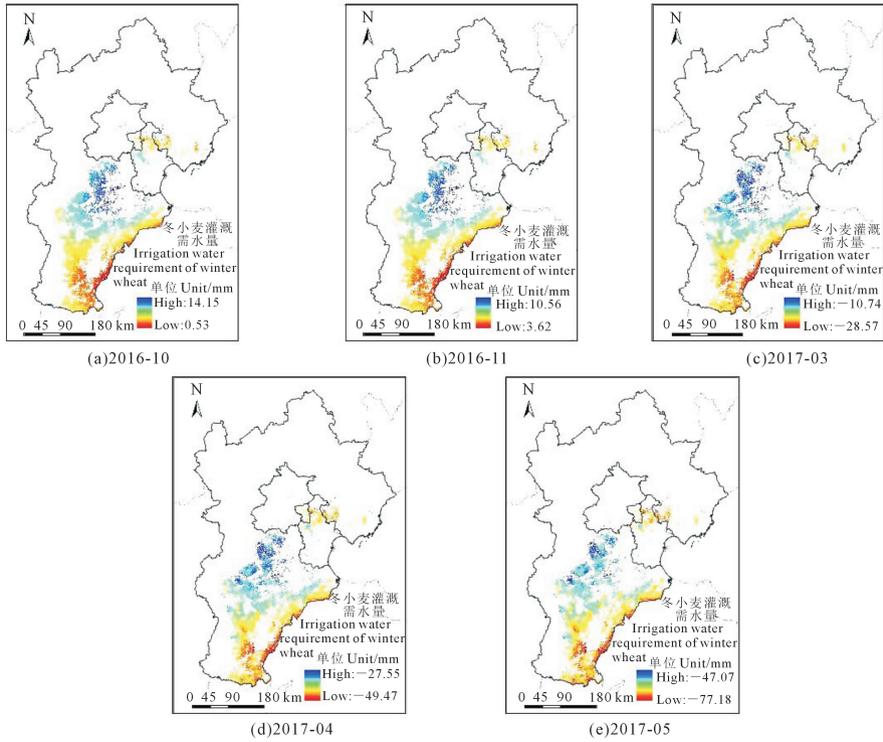


图 5 冬小麦生长期灌溉需水量月尺度空间分布图(2016-10—2017-05)

Fig.5 The monthly spatial distribution of irrigation water requirement of winter wheat (2016-10-2017-05)

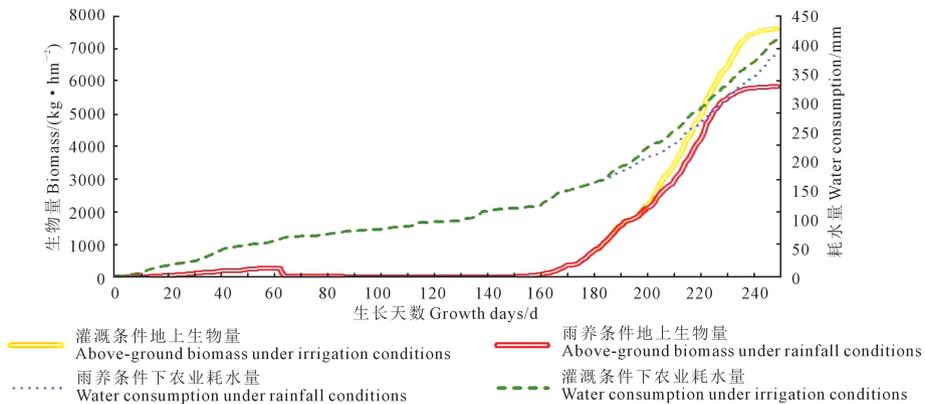


图 6 雨养条件和灌溉条件下的冬小麦生物量和耗水量变化曲线图

Fig.6 Curves of biomass and water consumption of winter wheat in rainfed and irrigated conditions

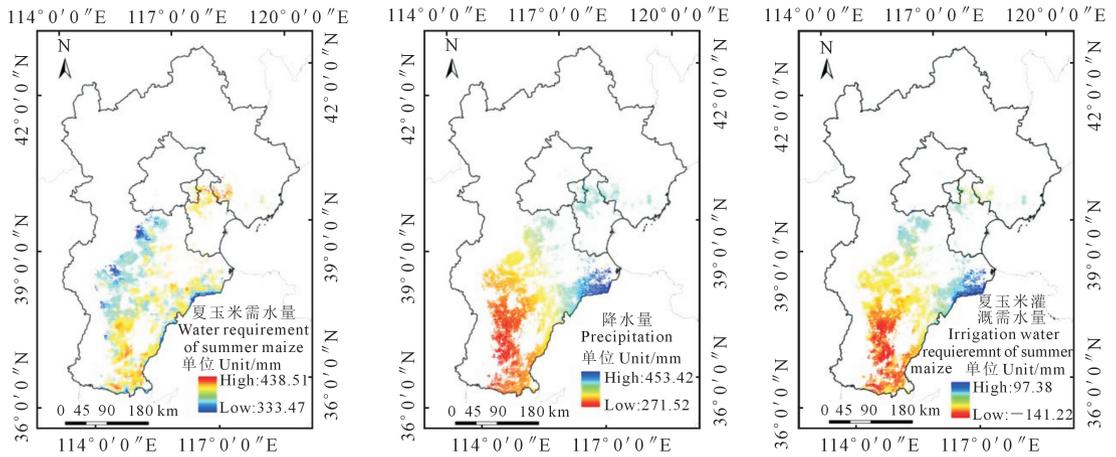


图 7 夏玉米生长期需水量、降水量及灌溉需水量空间分布图(2017-06—2017-09)

Fig.7 The spatial distribution of water requirement, precipitation and irrigation water requirement of summer maize(2017-06-2017-09)

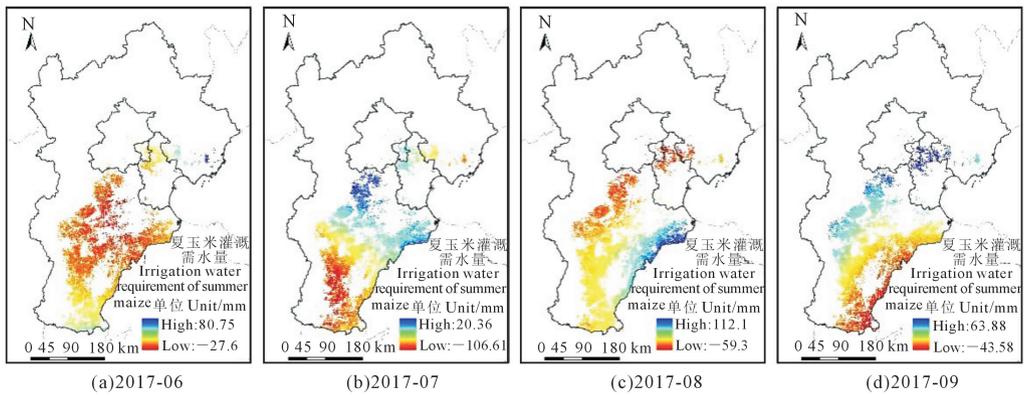


图 8 夏玉米生长期灌溉需水量月尺度空间分布图(2017-06—2017-09)

Fig.8 The monthly spatial distribution of irrigation water requirement of summer maize (2017-06-2017-09)

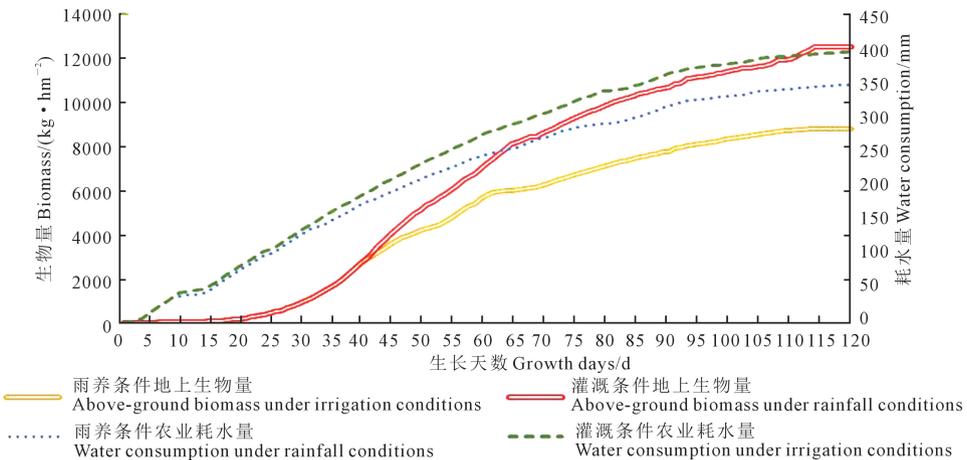


图 9 雨养条件和灌溉条件下的夏玉米生物量和耗水量变化曲线图

Fig.9 Curves of biomass and water consumption of summer maize in rainfed and irrigated conditions

根据图中夏玉米地上生物量变化曲线可知,夏玉米开始生长的前 40 d 内,雨养条件和灌溉条件下夏玉米地上生物量基本一致,40 d 之后,雨养条件下夏玉米地上生物量变化曲线开始逐渐低于灌溉条件下的夏玉米地上生物量变化曲线,由此可知,

夏玉米从播种的 40 d 后,水分不足会影响夏玉米地上生物量的累积。

根据图中夏玉米农业耗水量变化曲线可知,在夏玉米播种开始计算的前 30 d 内,雨养和灌溉条件下夏玉米耗水量基本一致,在 30 d 之后,灌溉条件

下夏玉米耗水量大于雨养条件下的耗水量,产生的原因可能是灌溉使得玉米生长得更加高大、茂盛,从而产生更高的蒸散发量,最终导致耗水量的增加。

3 讨论

本研究基于 DSSAT 模型中的土壤水平衡模块模拟了农作物总需水量,通过搜集降水量资料来计算灌溉需水量,在空间分布上展现了京津冀主要农作物种植区农业用水资源供需平衡状态,为京津冀地区的整体资源调配和水资源可持续利用提供了参考。在前人的研究中,胡玮等^[29]通过使用彭曼公式法得出了京津冀地区冬小麦全生育期的需水量在 291~381 mm 之间,曹永强等^[30]也使用彭曼公式法得出了河北省夏玉米在全生育期的需水量为 264.67~375.01mm 的结论,而本研究的结论为冬小麦需水量在 323.72~419.58 mm 之间、夏玉米需水量在 333.47~438.51 mm 之间。本研究使用的 DSSAT 作物生长模型是以光、温、水等作为环境条件,在经验公式的基础上加入了田间土壤情况(土壤渗透)和田间管理技术(灌溉、施肥)等信息,模拟结果较彭曼公式法偏高。作物灌溉需水量是由作物需水量和降水量的差值获得,未将地表径流量和地表渗透量等水分流失考虑进去,使得作物灌溉需水量低于田间实际灌溉水平,因此结果为田间灌溉的最低水平。

本研究仅收集了单个试验田的作物品种参数数据,模型参数存在局限性,为了对大范围研究区的农作物需水情况进行更精准地研究与分析,下一步应收集和积累更多地区的田间试验数据,使品种参数在研究区范围更具有针对性和适用性。

4 结论

1) 在冬小麦的整个生长期,京津冀地区冬小麦的农业需水量在 323.72~419.58 mm 之间,所需的灌溉需水量在 55.95~212.55 mm 之间,所有种植区均需提供自然降水以外的灌溉水,中部偏北地区的灌溉需水量相对较大,中南部和东北部地区的灌溉需水量较少。在冬小麦播种的第 160 天前,冬小麦的耗水量显著增加,地上生物量也逐渐增加,需要提供充足的灌溉条件,而在第 240 天前,冬小麦趋于成熟,且地上生物量不发生变化,可减少灌溉。

2) 在夏玉米的整个生长期,京津冀地区夏玉米的农业需水量在 333.47~438.51 mm 之间,夏玉米种植所需的灌溉需水量在 0~141.22 mm 之间,中南部地区对灌溉用水的需求量最大。在夏玉米播种后,

耗水量一直增加,且在第 30 天前,地上生物量显著增加,需要提供充足的灌溉条件,水分不足将影响夏玉米的生长发育。

3) 对冬小麦和夏玉米地上生物量和需水规律分析的结果显示:在保证冬小麦和夏玉米的生物量条件下,冬小麦播种的前 160 d 内和夏玉米播种的前 30 d 内,只需对其进行适度灌溉,在明显需水时期再提供充足的灌溉条件,避免过度灌溉造成水资源的浪费。

参考文献:

- [1] 庄立,王红瑞,张文新.采用因素分解模型研究京津冀地区用水变化的驱动效应[J].环境科学研究,2016,29(2):290-298.
- [2] 水利部.中国水资源公报[M].北京:中国水利水电出版社,2016:7-8.
- [3] 赵姜,孟鹤,龚晶.京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J].中国农业大学学报,2017,22(3):76-84.
- [4] 石建省,郭娇,孙彦敏,等.京津冀德平原区深层水开采与地面沉降关系空间分析[J].地质论评,2006,52(6):804-809.
- [5] 周小萍.中国农业资源可持续利用模式[M].北京:中国经济出版社,2007:130-132.
- [6] Zude-Sasse M, Fountas S, Gemtos T A, et al. Applications of precision agriculture in horticultural crops[J]. European Journal of Horticultural Science, 2016, 81(2):78-90.
- [7] 操信春,邵光成,王小军,等.中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J].水科学进展,2017,28(1):14-21.
- [8] Xu X P, He P, Qiu S J, et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China[J]. Field Crops Research, 2014, 163:10-17.
- [9] 王文佳,冯浩.基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J].中国生态农业学报,2012,20(6):795-802.
- [10] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3):235-265.
- [11] 陈丹丹,李国强,张杰,等.基于 DSSAT 模型的河南省冬小麦需水量分析[J].河南农业科学,2017,46(2):153-160.
- [12] Araya A, Kisekka I, Gowda P H, et al. Evaluation of water-limited cropping systems in a semi-arid climate using DSSAT-C5M[J]. Agricultural Systems, 2017, 150:86-98.
- [13] 贺鹏,王鹏新,解毅,等.基于动态模拟的冬小麦水分胁迫敏感性研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):213-219.
- [14] 陈卓,谢苗苗,范玲玲,等.SPAM 模型和遥感结合提取华北地区春夏玉米种植面积[J].中国农业资源与区划,2018,39(8):124-134.
- [15] 陈晓苗.基于 MODIS-NDVI 的河北省主要农作物空间分布研究[D].石家庄:河北师范大学,2010.
- [16] Attia A, Rajan N, Xue Q, et al. Application of DSSAT-CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165:50-60.