

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.06.006

张阳,王连喜,李琪,等.基于 WOFOST 模型的吉林省中西部春玉米灌溉模拟[J].中国农业气象,2018,39(6):411-420

基于 WOFOST 模型的吉林省中西部春玉米灌溉模拟*

张 阳^{1,2}, 王连喜^{1,2**}, 李 琪^{1,2}, 胡正华^{1,2}, 郭春明³, 任景全³

(1. 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 吉林省气象科学研究所, 长春 130062)

摘要: 利用 1961–2015 年吉林省中、西部气象站资料, 采用 Peman-Monteith 公式计算主要种植区春玉米生长季蒸散量, 并确认生育期内有效降水量, 得到研究区域春玉米净灌溉量和各生育期灌溉需求指数, 据此确定关键灌溉期; 再利用 WOFOST 作物模型模拟代表站点在不同降水年型下各灌溉方案的产量情况, 通过模拟产量的结果选取春玉米较优灌溉方案。结果表明: 吉林省中西部有效降水量占春玉米需水量的 69% 左右, 乳熟–成熟期、播种–出苗期和出苗–拔节期的灌溉需求指数较高, 这 3 个生育期为春玉米灌溉关键期; 吉林省中西部春玉米乳熟–成熟期灌溉效率最高, 其次为播种–出苗期, 可根据条件加强关键生育期灌溉。

关键词: WOFOST; 关键生育期; 灌溉; 水分胁迫产量; 产量差; 春玉米

Irrigation Simulation of Spring Maize in Central and Western of Jilin Province Based on WOFOST Model

ZHANG Yang^{1,2}, WANG Lian-xi^{1,2}, LI Qi^{1,2}, HU Zheng-hua^{1,2}, GUO Chun-ming³, REN Jing-quan³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044; 3. Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062)

Abstract: Based on meteorological data from 1961 to 2015 of midwestern stations in Jilin Province, the Peman-Monteith formula was utilized to calculate the evapotranspiration of spring maize's growing season in the main growing areas and confirm the effective precipitation in the growing periods. The net irrigation amount of maize and the irrigation requirement index determined the critical irrigation periods; then the WOFOST crop model was used to simulate the yield of irrigation schemes for different precipitation years of the site, and the critical irrigation periods which were verified through the simulation yielded results to get a better irrigation plan. The results showed that the effective precipitation in the midwest of Jilin Province accounted for about 69% of the water demand, and the irrigation requirement index was higher in the sowing–seedling stage, seedling–jointing stage and milk–maturing stage. The three growth periods were the critical periods of spring maize to irrigate. When the spring maize was irrigated, the most efficient irrigation stage was the milking–maturing stage, followed by the sowing–emergence stage, multiply the irrigation time during the critical growth periods.

Key words: WOFOST; Critical growth period; Irrigation; Water-limited yield; Yield difference; Spring maize

气候变化背景下, 干旱的频繁发生给许多国家的粮食安全带来严重影响, IPCC 第五次评估报告^[1]指出, 温度若继续升高 2℃ 或更多, 将导致热带和温

带地区的主要作物 (小麦、水稻和玉米) 产量每年减少 0~2%。作为中国最重要的商品粮基地之一, 吉林省拥有著名的“黄金玉米带”, 其玉米产量占全

* 收稿日期: 2017-10-27 ** 通讯作者。E-mail: wlx4533@sina.com

基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506001); 吉林省气象局青年基金项目 (2014006); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201206018); 中国气象局气象探测中心农业气象观测技术创新团队资助

作者简介: 张阳 (1993–), 硕士生, 主要研究方向为农业气象与生态气象。E-mail: 763728185@qq.com

省粮食作物总产量的 70% 左右^[2]。中、西部为该省春玉米主要种植区, 但该区域气候干旱, 水资源是制约当地作物生长的主要因素^[3], 因此, 玉米的需水规律和灌溉研究对当地粮食的稳产高产具有重要意义。为了提高田间试验研究价值和灌溉方案的适用性, 以作物需水规律为基础, 优化当前灌溉方案为手段, 实现提高作物产量和水分利用效率的目的。众多学者对作物需水量、最佳灌溉量、生育期水分管理等进行研究^[4], 但各地气候与土壤条件的差异使田间试验研究成果扩展的不确定性增加。利用作物模型定量描述作物与环境间关系并动态模拟作物生长发育过程, 不仅是田间试验方法的重要补充, 还能节约一定的人力物力, 为干旱和半干旱区域制定合理灌溉制度提供参考。

作为广泛使用的模型之一^[5], WOFOST 模型在中国的适用性已被多次证实^[6]。该模型基于“积温法”^[7]以逐日气象数据为驱动因子, 利用土壤和作物参数限制并调整作物生长来模拟作物根、茎、穗等生物量和土壤水分动态, 将作物整个发育期分为出苗—开花、开花—成熟两大阶段, 通过改变作物的干物质分配和植物结构相关参数以实现不同作物的区分和模拟。目前, WOFOST 模型在中国已广泛用于产量预测^[8]、区域生产潜力评价^[9]等, 同时在极端气象条件对作物长势影响^[10]及遥感数据同化^[11]等方面也十分常见。但国内利用 WOFOST 模型研究作物灌溉节水的实例较少, 李良涛等^[12]利用作物模型初步探讨了冬小麦的灌溉, 发现低于 4 次的灌溉方案因灌溉时间和灌溉量的不同存在显著差异, 5 次以上灌溉方案的高产稳产性较好; 朱津辉等^[13]利用 WOFOST 模型对保定地区不同年型的冬小麦灌溉方案进行模拟, 得到最优灌溉方案, 为当地灌溉提供参考。此外, 有学者利用其它作物模型^[14]进行了灌溉模拟研究。

相比设定灌溉量等级进行灌溉模拟, 本研究确定关键灌溉期并计算生育期的灌溉量以设定灌溉模拟方案。通过计算春玉米各生育期的需水量和有效降水量, 得到净灌溉量和各生育期灌溉需求指数 (Irrigation Requirement Index, IDI), 确定关键灌溉生育期, 设定不同降水年型下的灌溉方案, 并利用 WOFOST 模型进行代表站点的灌溉模拟, 以期对春玉米科学灌溉提供参考和指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林省 (121°38′–131°19′E, 40°50′–46°19′N) 地

处中国东北部, 为温带大陆性季风气候, 区域农耕条件优越, 根据当地气候及生态因子将种植区分为西部半干旱区、中部半湿润雨养区、东部湿润冷凉区 (图 1)。年均日照时数 2259~3016h, 全年平均降水量 400~600mm, 随季节和地区呈现出显著不同, 降水量的 80% 集中在夏季, 东部降水量充沛。

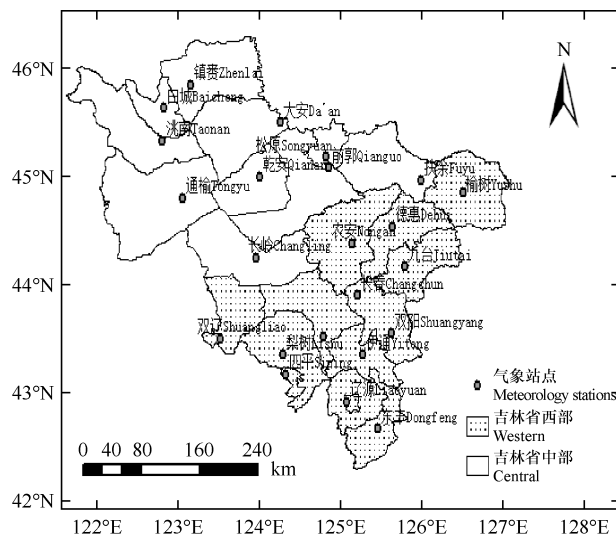


图 1 吉林省中、西部分区及气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations and study subareas in Jilin province

1.2 数据及其来源

作物模型输入数据包括气象、作物及土壤数据。气象数据为吉林省中西部春玉米种植区 23 个气象站点 1961–2015 年逐日气象数据, 包括最高气温、最低气温、降水量、水汽压、风速等, 逐日太阳辐射量由 Angstron 经验公式^[15]计算; 土壤数据来自农业实验站土壤观测资料、相关文献等; 作物数据来自吉林省中部榆树气象站 2012–2013 年和西部白城站 2011–2012 年春玉米生育期生长数据和产量数据等, 用于作物模型参数验证。

1.3 研究方法

1.3.1 春玉米需水量与有效降水量

根据各地生育期观测资料, 吉林省中、西部地区春玉米生育期 (播种—出苗、出苗—拔节、拔节—抽雄、抽雄—乳熟、乳熟—成熟期) 平均日期见表 1, 由表可见, 两个地区玉米生育期具有明显差异, 西部比中部迟 2~5d。

春玉米生育期逐日需水量 ET_c 用作物系数法^[16]计算, 即

$$ET_c = k_c ET_0 \quad (1)$$

表 1 吉林省中、西部地区春玉米生育期与相应的作物系数（ k_c ）

Table 1 Growth period and k_c value of spring maize of central and western Jilin province

	播种-出苗	出苗-拔节	拔节-抽雄	抽雄-乳熟	乳熟-成熟
	Sowing-seedling	Seedling-jointing	Jointing-tasseling	Tasseling-milking	Milking-maturing
中部 Central 日期(月.日)Date(mm.dd)	04.26-05.16	05.17-07.02	07.03-07.22	07.23-08.22	08.23-09.20
k_c	0.38	0.74	1.15	1.06	0.85
西部 Western 日期(月.日)Date(mm.dd)	05.01-05.18	05.19-07.05	07.06-07.23	07.24-08.22	08.23-09.21
k_c	0.4	0.82	1.26	1.26	0.99

式中， ET_c 为日作物需水量（ $mm \cdot d^{-1}$ ）； k_c 为作物系数，表示作物本身生理形状和栽培条件对需水量的影响，参考文献[17]确定； ET_0 为日参考作物蒸散量（ $mm \cdot d^{-1}$ ），由 FAO 推荐的 Peman-Monteith 公式^[18]计算。在不考虑玉米品种变化的条件下，计算各站点 1961–2015 年春玉米生育期逐日需水量，累计生育期起止日期得到各生育期及整个生长季的需水量。

玉米生育期降水量指播种-成熟期的降水总量，并将播种日期前 10d 的降水量作为前期雨量^[19]，使计算更符合实际。有效降水量指留存于作物根系中用于作物蒸散发的降水量^[20]，吉林省春玉米大部分为雨养，田间降水会因植物截留、地表径流和深层渗漏等因素损失；中西部地势平坦，当日降水量不大时，大部分储存于田间，产生地表径流的可能性较小。将小于 2mm 的当日降水量去除，不计入有效降水量；2~50mm 的当日降水量视为有效降水量；大于 50mm 的当日降水量，其超出部分以日降水量的 0.8 倍作为有效降水量^[21]。

1.3.2 春玉米净灌溉需水量和需求指数

考虑到土壤水和地下水对大气降水存在较大的调蓄作用，定义玉米净灌溉需水量为玉米生育期的作物需水量与有效降水量的差值。

灌溉需水量与作物需水量的比值为灌溉需求指数（IDI），能够直观表现出作物生长对灌溉的依赖程度^[22]，其值越小依赖程度越小，计算式为

$$IDI=IR/ET_c=(ET_c-P_e)/ET_c \tag{2}$$

式中，IR 为灌溉需水量（mm）； ET_c 为作物需水量（mm）； P_e 为有效降水量（mm）；IDI 为灌溉需求指数。

1.3.3 模拟设定

根据吉林省农业气候特点，选择中部的榆树站

和西部的白城站作为代表站点^[23]，进行灌溉模拟。根据 Pearson-III法得到两站点的湿润年、正常年、干旱年 3 种降水年型，生育期内降水保证率小于 25% 的年份为湿润年份，25%~75%的年份为正常年份，大于 75%的年份为干旱年份。由各生育期的灌溉需求指数确认代表站在 3 种年型下的灌溉关键生育期，根据关键生育期设计各年型下的灌溉方案，利用 WOFOST 模型模拟代表站点的结果进一步分析灌溉对作物产量的影响。

1.3.4 水分胁迫产量差

为了判断灌溉方案效果的优劣，选取水分胁迫产量差作为判定指标^[13]。水分胁迫产量差定义为潜在产量与水分胁迫模式下产量的差值，即

$$\text{水分胁迫产量差} = PTWSO - WTWSO \tag{3}$$

式中，PTWSO 为模型在水分、肥力及其它田间管理等条件处于最适状态时得到的产量模拟值；WTWSO 是水分胁迫模式下，不同灌溉时间和灌溉量下得到的产量。

根据水分胁迫产量差百分比确定灌溉方案的有效性，当 $(PTWSO - WTWSO) / PTWSO < 10\%$ ，视为有效方案； $(PTWSO - WTWSO) > 10\%$ ，认为灌溉效率较低，其值越小，有效性越高。

2 结果与分析

2.1 春玉米不同生育期灌溉需求量分析

由表 2 可知，玉米全生育期内，中、西部地区需水量、有效降水量以及灌溉量均存在差异。总体上看，西部 10 站点的年均有效降水量为 318.6mm，明显低于中部；而西部地区年均需水量为 598.0mm，显著高于中部地区的 492.5mm。西部地区玉米生育期年均灌溉需水量较高，全生育期灌溉需水量为 279.4mm，中部地区玉米全生育期灌溉需水量仅 74.9mm。

表 2 春玉米生育期蒸散量 (ET_c)、有效降水量 (P_e) 以及灌溉量 (IR) 的多年平均统计结果 (mm)Table 2 Annual average evapotranspiration(ET_c), effective precipitation(P_e) and irrigation amount(IR) in spring maize growing periods(mm)

分区 Region	站点 Station	I		II		III		IV		V		全生育期 Whole period		
		ET_c	P_e	ET_c	P_e	ET_c	P_e	ET_c	P_e	ET_c	P_e	ET_c	P_e	IR
西部 Western	白城 Baicheng	36.6	12.9	208.7	98.9	103.4	73.4	156.5	81.7	105.9	31.0	611.1	297.9	313.2
	大安 Da'an	35.7	14.0	198.7	98.5	106.3	72.1	157.1	96.1	104.0	36.9	601.7	317.7	284
	扶余 Fuyu	33.5	22.3	196.6	112.4	94.0	80.0	140.4	108.6	94.7	44.8	559.3	368.1	191.2
	前郭 Qianguo	32.5	17.8	194.1	99.6	99.0	75.7	150.0	85.8	98.0	38.8	573.7	317.8	255.9
	乾安 Qianan	35.3	15.4	207.6	102.4	101.7	79.0	153.5	128.1	103.8	46.5	601.9	371.4	230.5
	松原 Songyuan	32.8	17.4	192.8	96.3	97.8	72.2	148.4	90.4	96.9	38.3	568.7	314.6	254.1
	洮南 Taonan	37.1	13.1	217.7	94.5	111.1	70.8	165.3	84.6	110.0	29.1	641.1	292.2	348.9
	通榆 Tongyu	37.6	16.8	218.5	99.9	109.1	64.0	162.5	86.0	110.3	29.5	638.0	296.1	341.9
	长岭 Changling	34.3	19.2	199.7	98.3	98.3	72.0	148.3	94.5	100.9	32.6	581.6	316.5	265.1
	镇赉 Zhenlai	35.4	12.7	205.0	93.0	104.2	73.6	154.8	85.9	103.8	28.9	603.1	294.1	309
中部 Central	平均值 Average	35.1	16.2	203.9	99.4	102.5	73.3	153.7	94.2	102.8	35.6	598.0	318.6	279.4
	德惠 Dehui	37.0	22.5	172.5	112.0	95.2	88.7	123.5	119.0	77.4	42.5	501.0	389.2	111.8
	东丰 Dongfeng	29.9	30.4	148.3	124.7	101.0	90.8	155.5	102.8	70.6	56.2	467.9	442.4	25.6
	公主岭 Gongzhuling	38.6	26.9	175.8	115.7	98.6	91.7	133.1	124.4	82.4	44.7	519.8	412.0	107.8
	九台 Jiutai	35.1	25.4	163.8	124.4	94.3	90.6	129.7	117.0	75.2	46.4	485.5	416.6	68.9
	梨树 Lishu	38.2	27.8	176.4	114.3	96.9	87.9	132.7	120.6	80.0	47.3	512.2	410.0	102.2
	辽源 Liaoyuan	33.6	30.7	152.5	121.2	90.5	99.0	149.5	114.1	55.2	54.3	454.8	445.9	8.9
	农安 Nongan	37.1	23.1	174.3	107.3	96.9	88.0	122.4	110.4	80.2	40.8	511.0	369.6	141.4
	双辽 Shuangliao	38.6	20.4	178.6	92.4	101.5	85.7	129.4	108.2	82.9	35.9	530.9	342.7	188.2
	双阳 Shuangyang	34.6	28.9	160.5	124.2	91.5	105.4	143.4	114.1	74.9	48.5	475.7	450.4	25.3
	四平 Siping	36.2	29.8	165.6	120.6	93.8	93.0	145.0	120.8	79.1	50.2	495.5	438.6	56.9
	伊通 Yitong	33.6	27.2	154.6	121.8	90.4	101.3	147.8	113.1	73.6	53.8	465.3	452.0	13.3
	榆树 Yushu	35.9	26.1	170.2	116.6	96.9	90.2	128.5	118.3	76.1	45.2	497.5	406.6	90.9
	长春 Changchun	38.2	26.5	176.6	118.4	97.5	97.0	124.6	129.4	82.3	47.1	519.2	418.3	100.9
	平均值 Average	35.9	26.6	166.9	116.4	95.0	93.8	135.8	116.3	76.1	47.1	492.5	417.6	74.9

注: I、II、III、IV、V 为春玉米播种—出苗、出苗—拔节、拔节—抽雄、抽雄—乳熟、乳熟—成熟期。下同。

Note: I, II, III, IV, V mean sowing—seedling, seedling—jointing, jointing—tasseling, tasseling—milking, milking—maturing of spring maize. The same as below.

春玉米各生育期的天数不同,需水强度也存在差异。表 2 中,中西部的生育期需水量百分比表现出一致的趋势:出苗—拔节期的年均需水量最大,中西部分别是 203.9mm 和 166.9mm,其次是抽雄—乳熟期,分别为 153.7mm 和 118.5mm,两者之和占生育期需水总量的 50%以上。西部地区最大年均有效降水量出现在出苗—拔节期,为 99.4mm,而中部地区有效降水量最大值出现在抽雄—乳熟期,随后是出苗—拔节期,分别为 133.6mm 和 116.4mm。各生育期降水量与需水量的分配特点基本一致,只是数值上有一定差异,研究区域有效降水量占需水量的 69%左右,因此,有必要在充分利用当地降水资源的条件下进行灌溉。

2.2 春玉米不同生育期灌溉需求指数分析

由式(2)计算各站点的生育期灌溉需求指数,结果见图 2。从图中看出,吉林省中、西部春玉米生育期灌溉需求指数变化趋势相似,播种—出苗期、出苗—拔节期和乳熟—成熟期的灌溉需求指数明显高于其它生育期,中部 3 个生育期 IDI 值分别为 0.42、0.41、0.33,西部 IDI 值依次为 0.65、0.62 和 0.51,可见春玉米在这些时期的生长对灌溉的依赖程度较高,为玉米的关键灌溉期。代表站点白城和榆树具有一致的规律,因此,对代表站点设计灌溉模拟方案时,选取的灌溉生育期为播种—出苗期、出苗—拔节期和乳熟—成熟期。

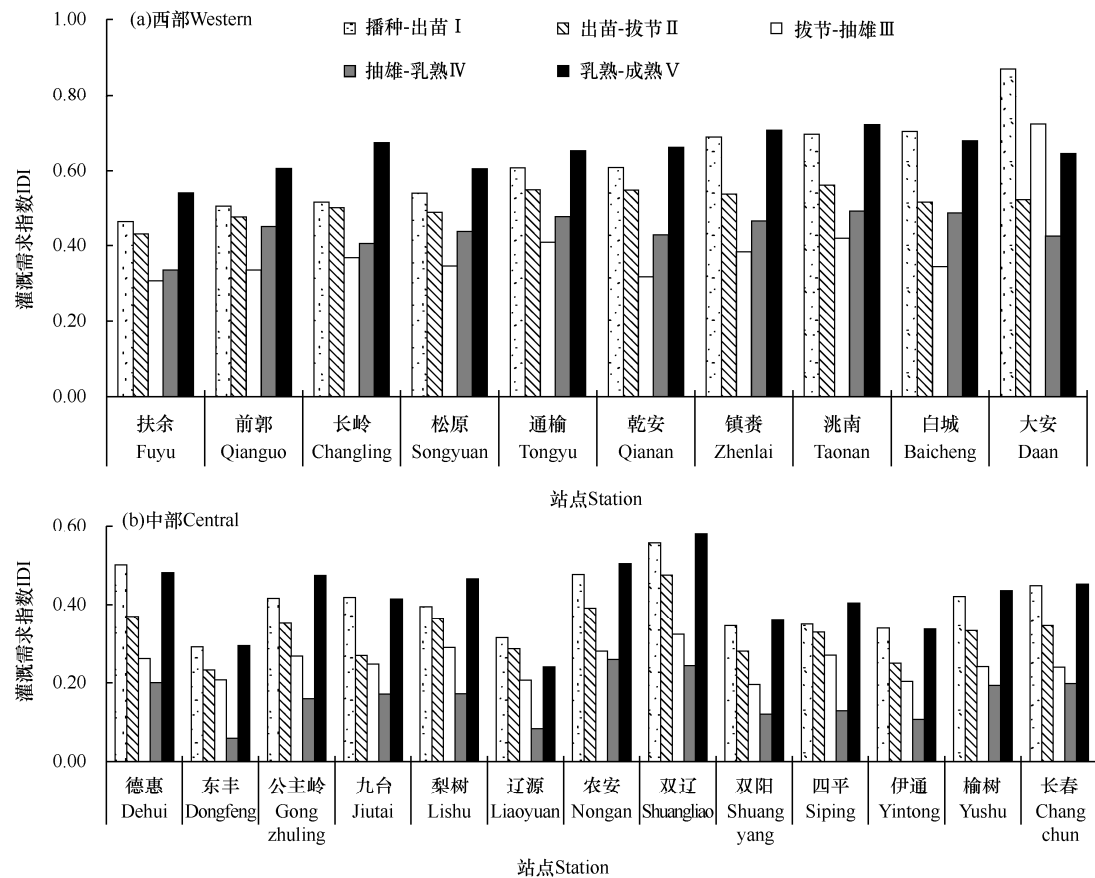


图 2 吉林省西部、中部各站点春玉米不同生育期灌溉需求指数

Fig. 2 Irrigation requirement index of spring maize during different growing stage in central and western Jilin province

2.3 代表站不同年型春玉米灌溉方案拟定

2.3.1 WOFOST 模型验证

根据文献[11]确定模型参数,利用吉林省榆树站和白城站的春玉米大田生长发育资料和产量数据对 WOFOST 模型进行验证,根据平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMES)和相对均方根误差(RRMES)评价校正后模型的模拟效果,MAE、MRE 依次代表模拟值与观测值的符合程度,RMSE、RRMES 为模拟值与观测值拟合精度,数值越小精度越高。

(1) 生育期。与对应大田实验数据相比,榆树站模拟值与观测值在出苗期平均相差 1.4d,开花期平均相差 4.1d,成熟期平均相差 4.5d;白城站模拟值与观测值在 3 个时期平均相差 3d、4.3d 和 4.8d。表明两站点 3 个生育期总体模拟效果基本符合实测值,且误差可接受。

(2) 叶面积指数。榆树站 2012 年和 2013 年 LAI 实测值与模拟值平均误差为 4.9%和 10.9%,白城站 2011 年和 2012 年 LAI 平均误差为 3.3%和 11%,由

图 3 可见,实测值与模拟值总体较相符。

(3) 产量。WOFOST 模型在水分胁迫条件下,榆树和白城站产量的平均相对误差分别为 10.21%、13.08%,相对均方根误差分别为 11.56%、13.9%,均 <15%,模拟效果可接受。

2.3.2 降水年型及灌溉方案的确定

将榆树站和白城站多年生育期有效降水量利用皮尔逊Ⅲ型分布曲线进行降水频率分析,结果如表 3。选取播种-出苗期、出苗-拔节期、乳熟-成熟期 3 个关键灌溉期,根据当地水资源条件,设定灌溉 1 个、2 个和 3 个生育期的方案,并在选取的关键生育期内分别灌溉一次和灌溉两次。根据式(2)计算代表站点各降水年型下 3 个关键期的净灌溉量,结果如表 4 所示。WOFOST 模型灌溉模拟过程为,由生育期对应当年日序,在进入生育期的第一天进行灌溉处理,若当天有降水则选取最近的无降水日为灌溉日期,每 10 天执行一次灌溉,在模拟时将不同灌溉量添加至 WOFOST 模型降水文件中。

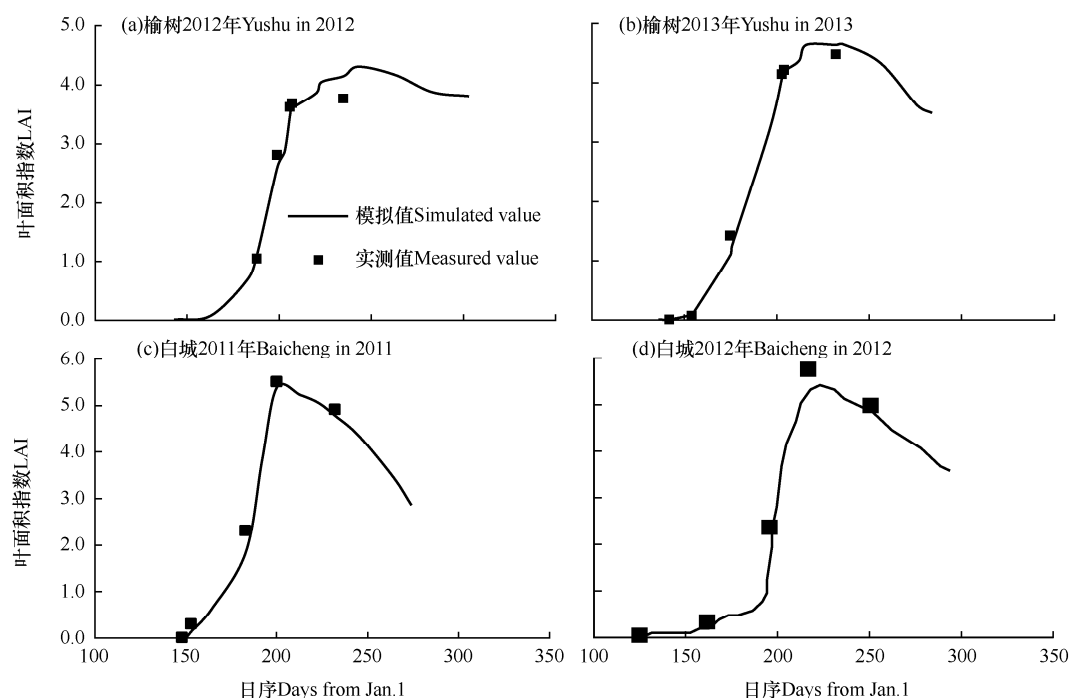


图 3 榆树站和白城站叶面积指数实测值与模拟值的比较

Fig. 3 Comparison of LAI between measured value and simulated value in Yushu station and Baicheng station

表 3 代表站点不同降水年型及相应降水量

Table 3 Different hydrological years and precipitation in typical sites

站点 Station		均值 Mean	丰水年 Wet year(P=25%)	平水年 Median year(P=50%)	缺水年 Dry year(P=75%)
榆树 Yushu	降水量 Precipitation(mm)	406.6	479.3	405.9	324.5
	年份 Year		1986	1987	1972
白城 Baicheng	降水量 Precipitation(mm)	297.6	364	296.7	208.8
	年份 Year		1983	1976	1989

表 4 各降水年型关键生育期的总灌溉量

Table 4 Total irrigation amount in critical growth periods in different hydrological years

生育期 Growth period	站点 Station	灌溉总量 Amount of irrigation (mm)		
		丰水年	平水年	缺水年
		Wet year	Median year	Dry year
播种-出苗 Sowing-seedling (I)	榆树 Yushu	8	15	25
	白城 Baicheng	20	35	35
出苗-拔节 Seedling-jointing (II)	榆树 Yushu	40	60	50
	白城 Baicheng	70	110	130
乳熟-成熟期 Milking-maturing (V)	榆树 Yushu	20	20	60
	白城 Baicheng	60	90	90

2.4 不同灌溉方案的模拟结果比较

2.4.1 潜在产量的模拟结果

由模型模拟得到 3 种年型下代表站点的潜在产量, 以计算各站水分胁迫产量差。榆树和白城站丰

水年 1986、1983 年的产量模拟值 PTWSO 分别为 13206 和 $12594\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 平水年 1987、1976 年分别为 10650 和 $9698\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 缺水年 1972、1989 年分别为 9656 和 $8828\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由模拟结果可知, 榆树

站不同降水年型下潜在产量均高于白城站。

2.4.2 一个关键生育期灌溉的模拟

在 3 个关键生育期中选取一个生育期利用模型进行灌溉模拟，设定每个生育期内灌溉 1 次和 2 次两种方案，3 种年型下每个站点在 3 个灌溉关键期共有 $3 \times 3 \times 2 = 18$ 种方案，如表 5 所示。由表可见，3 种年型下，乳熟—成熟期的水分胁迫产量差百分比相对较小，

水分胁迫下的产量最高，播种—出苗期与出苗—拔节期结果接近，丰水年榆树站出苗—拔节期两种灌溉方案下的水分胁迫产量差百分比均超过 10%，灌溉效率不明显；不同灌溉次数在缺水年的结果相差明显，丰水年结果相近。可见，仅灌溉一个生育期时，乳熟—成熟期的灌溉收益最大，出苗—拔节期在正常年份的灌溉收益较小，生育期内灌溉两次的效果优于灌溉一次。

表 5 一个关键期灌溉的水分胁迫产量差百分比

Table 5 The percentage of simulated yield difference of one critical irrigation period in different hydrological years

生育期 Growth period	站点 Station	灌溉次数 Irrigation times	百分比 Percentage (%)		
			缺水年	平水年	丰水年
			Wet year	Median year	Dry year
I	榆树 Yushu	1	8.98	9.67	9.87
		2	8.71	9.47	9.84
	白城 Baicheng	1	5.55	8.02	9.74
		2	5.26	7.61	9.68
II	榆树 Yushu	1	9.0	9.72	10.30
		2	8.77	9.55	10.27
	白城 Baicheng	1	5.57	7.99	9.89
		2	5.28	7.64	9.86
V	榆树 Yushu	1	6.58	9.37	9.76
		2	6.19	9.15	9.70
	白城 Baicheng	1	5.11	7.27	9.58
		2	4.62	6.67	9.11

2.4.3 两个关键生育期灌溉的模拟

选取两个关键生育期灌溉模拟，设定每个生育期内灌溉 1 次和 2 次，1 个站点在每种年型下有 12 种方案，2 个站点共有 $3 \times 12 \times 2 = 72$ 种方案，如表 6 所示，其中方案 1—4 为播种—出苗期和出苗—拔节期灌溉，方案 5—8 为播种—出苗期和乳熟—成熟期灌溉，方案 9—12 为出苗—拔节和乳熟—成熟期灌溉。由表可见，3 种年型下，两个关键生育期进行灌溉的春玉米水分胁迫产量整体高于一个关键期进行灌溉的结果，其水分胁迫产量差百分比低于一个生育期进行灌溉的结果。方案 5—8 的水分胁迫产量差百分比普遍小于其它方案，方案 8 在 12 种方案中在 3 种年型下均最小，说明其灌溉效果最好；方案 1—4 的灌溉效率较低，其中方案 1 最低。说明生育期内两次灌溉效果优于一次灌溉，缺水年的灌溉增产效果最显著，两个关键期灌溉模拟方案中选择播种—出苗和乳

熟—成熟期进行灌溉效果较好。

2.4.4 三个关键生育期灌溉的模拟

选取 3 个关键生育期，灌溉设计同上。一个站点每种年型下有 8 种方案，共 48 种方案，具体如表 7。由表可见，3 种年型下，方案 8 的水分胁迫产量差百分比最小，产量最高，灌溉效果最好；方案 1 水分胁迫产量差百分比最大，灌溉效果较差，缺水年的水分胁迫产量差百分比显著低于平水年和丰水年。生育期内灌溉两次时，方案 2、3、5 相比，在缺水年下方案 2 的水分胁迫产量差较小，即乳熟—成熟期的增产效果最好，其次是播种—出苗期；而在其它年型中方案 2、3、5 差异并不显著。增加灌溉次数和生育期数量时，方案 4、6、8 与方案 2、3、5 的灌溉效果在缺水年差异显著，而在平水年和丰水年差距较小，因此，正常年份可适当减少生育期内灌溉次数。

表 6 两个关键期 1~2 次灌溉方案及模拟水分胁迫产量差百分比 (%)

Table 6 Irrigation plans and percentage of simulated yield difference under two critical periods in different hydrological years (%)

灌溉方案 Irrigation plans													
站点 Station	编号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	关键期 Critical periods	I / II	I / II	I / II	I / II	I / V	I / V	I / V	I / V	II / V	II / V	II / V	II / V
	灌溉次数 Times	1/1	1/2	2/1	2/2	1/1	1/2	2/1	2/2	1/1	1/2	2/1	2/2
榆树 Yushu	缺水年 Dry year	5.55	5.29	5.16	4.90	3.84	3.29	3.62	3.12	5.08	4.57	4.84	4.40
	平水年 Median year	9.11	9.00	8.89	8.78	8.69	8.28	8.46	8.12	8.94	8.86	8.91	8.85
	丰水年 Wet year	9.56	9.53	9.51	9.49	9.46	9.42	9.44	9.32	9.55	9.49	9.53	9.47
白城 Baicheng	缺水年 Dry year	5.29	5.19	5.02	4.94	4.62	4.13	4.45	3.85	5.07	4.83	4.96	4.68
	平水年 Median year	7.15	7.08	7.01	6.95	6.61	6.50	6.58	6.42	6.91	6.70	6.89	6.62
	丰水年 Wet year	9.72	9.70	9.68	9.67	9.62	9.57	9.59	9.54	9.68	9.65	9.66	9.59

表 7 三个关键期 1~2 次灌溉方案与水分胁迫产量差百分比 (%)

Table 7 Irrigation plans and percentage of simulated yield difference under three critical periods in different hydrological years (%)

		灌溉方案 Irrigation plans							
站点 Station	编号 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
	关键期 Critical periods	I / II / V	I / II / V	I / II / V	I / II / V	I / II / V	I / II / V	I / II / V	I / II / V
	灌溉次数 Times	1/1/1	1/1/2	1/2/1	1/2/2	2/1/1	2/1/2	2/2/1	2/2/2
榆树 Yushu	缺水年 Dry year	3.74	3.30	3.48	3.21	3.43	2.93	3.27	2.81
	平水年 Median year	8.38	7.94	7.99	7.74	8.25	7.66	7.81	7.55
	丰水年 Wet year	9.42	9.36	9.40	9.35	9.37	9.33	9.36	9.24
白城 Baicheng	缺水年 Dry year	3.93	2.96	3.83	3.40	3.70	2.76	2.95	2.56
	平水年 Median year	6.35	6.21	6.33	6.15	6.23	5.93	5.28	4.92
	丰水年 Wet year	9.47	9.38	9.44	9.36	9.41	9.30	9.40	9.26

3 结论与讨论

(1) 吉林省中、西部春玉米生育期年均需水量分别为 496.3mm、598.0mm，有效降水量分别为 417.6mm、318.6mm。中部站点有效降水量占需水量的 80%左右，西部为 55%，西部地区较中部更干旱。虽然抽雄-开花期前后是玉米需水量最大时期^[24]，但是吉林省春玉米抽雄-乳熟期间的降水量较大，播种-出苗和乳熟-成熟期两个阶段灌溉需求指数更高。榆树站丰水年、平水年和枯水年生育期有效降水量分别为 479.3、405.9、324.5mm，白城站分别为 397.4、280.5、207.7mm。因春玉米出苗-拔节期历时最长，总需水量高于其它生育期；播种-出苗期以生根为主，叶面蒸腾较弱，抽雄-乳熟期是玉米生殖生长最旺盛阶段，日均需水量最高；乳熟-成熟期叶面积系数仍处于较高水平，需水量也较大。

(2) 灌溉模拟结果表明，播种-出苗期、出苗-拔节期和乳熟-成熟期是吉林省春玉米灌溉关键期。李莹莹^[25]研究结果，吉林省中西部春玉米在播种-出苗期干旱较严重且干旱频率最高，吉林西部在乳熟-

成熟期发生特旱。春玉米拔节-抽雄-乳熟阶段需水量较大，但此时恰好在吉林省雨季，降水较其它生育期多；乳熟-成熟期的干旱影响粒重，灌溉模拟时粒重增加明显。因此，应在播种-出苗期、乳熟-成熟期灌溉，可根据条件增加生育期内灌溉次数。

本研究利用作物模型模拟灌溉，忽略了田间管理、病虫害、土壤养分等情况及其差异性的影响，作物品种变化、生育期内的最佳灌溉时间和灌溉次数等需进一步探讨。研究区域内土壤类型地域差异明显，吉林省西部土壤保水能力不及中部，因此，在需水量和水分利用效率上有较大差异，将影响灌溉量和灌溉效果，同时土壤水分和养分之间具有直接作用，高灌溉量会加速土壤中氮素的流失；土壤中水分较低时，作物根系吸收和扩散养分的速率将降低，均会影响产量。这种土壤数据的动态过程在作物模型中较难实现，因此，应考虑用其它手段研究水肥耦合效应。另外，目前的灌溉技术可能无法实现此方案下的地块均匀灌溉，同时吉林省西部地区的水资源条件存在限制，需提高当地灌溉技术水平，如选

取措施更合理的规划沟畦、在有条件的地区推广滴灌和喷灌等, 以实现真正的水资源高效利用。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2014: impact, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 吉林省统计局. 吉林统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016: 216-217.
Statistics Bureau of Jilin Province. Jilin statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistic Press, 2016: 216-217. (in Chinese)
- [3] 陈霞燕, 王连喜, 任景全, 等. 吉林省春玉米生产潜力及其敏感性分析[J]. 作物杂志, 2016, (6): 91-98.
Chen X Y, Wang L X, Ren J Q, et al. Analysis on potential productivity and climatic influence factors of spring maize in Jilin[J]. Crop, 2016, (6): 91-98. (in Chinese)
- [4] 庞艳梅, 陈超, 潘学标. 1961-2010 年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 133-141.
Pang Y M, Chen C, Pan X B. Variation characteristics of maize effective precipitation and water requirement in Sichuan basin during 1961-2010[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Sup.1): 133-141. (in Chinese)
- [5] De Wit C T. Photosynthesis of leaf canopies[M]. Wageningen, the Netherlands: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1965.
- [6] 郭定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, (5): 594-602.
Wu D R, Ouyang Z, Zhao X M, et al. The applicability research of WOFOST model in North China plain[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, (5): 594-602. (in Chinese)
- [7] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1762-1769.
Zhang J P, Zhao Y X, Wang C Y, et al. Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1762-1769. (in Chinese)
- [8] 孙琳丽, 侯琼, 马玉平, 等. WOFOST 模型在内蒙古河套灌区模拟玉米生长全程的适应性[J]. 生态学杂志, 2016, (3): 800-807.
Sun L L, Hou Q, Ma Y P, et al. Adaptability of WOFOST model to simulate the whole growth period of maize in Hetao irrigation region of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, (3): 800-807. (in Chinese)
- [9] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, (3): 475-487.
Wang T, Lv C H, Yu B H, et al. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, (3): 475-487. (in Chinese)
- [10] 李秀芬, 马树庆, 赵慧颖, 等. 基于 WOFOST 模型的内蒙古河套灌区玉米低温冷害评价[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 352-360.
Li X F, Ma S Q, Zhao H Y, et al. Evaluation on maize chilling injury based on WOFOST model in Hetao irrigation region in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(3): 352-360. (in Chinese)
- [11] 陈思宁, 赵艳霞, 申双和. 基于集合卡尔曼滤波的 PyWOFOST 模型在东北玉米估产中的适用性验证[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 245-253.
Chen S N, Zhao Y X, Shen S H, et al. Study on maize yield estimation and accuracy assessment based on PyWOFOST crop model in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 245-253. (in Chinese)
- [12] 李良涛, 毛振强, 牛灵安. 基于作物生长模型的冬小麦灌溉方案研究[J]. 灌溉给排水学报, 2010, 29(2): 22-27.
Li L T, Mao Z Q, Niu L A, et al. Irrigation scenarios of winter wheat production aided by crop growth simulation model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 22-27. (in Chinese)
- [13] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J]. 气象, 2014, 40 (11): 1398-1407.
Zhu J H, Guo J M, Mao L X. Study on the optimum irrigation program of winter wheat in Baoding based on WOFOST Model[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(11): 1398-1407. (in Chinese)
- [14] Ji J, Cai H, He J, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144: 1-10.
- [15] 栾庆祖, 叶彩华, 莫志鸿, 等. 基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估: 以北京为例[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 311-316.
Luan Q Z, Ye C H, Mo Z H, et al. Study on maize yield loss assessment for drought based on WOFOST mode: a case study in Beijing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(3): 311-316. (in Chinese)
- [16] 左余宝, 田昌玉, 唐继伟, 等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. 中国农业气象, 2009,

- 30(1):70-73.
- Zuo Y B, Tian C Y, Tang J W, et al. Studies of ET_c and K_c of main crops in Northern Shandong province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1):70-73. (in Chinese)
- [17] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):157-164.
- Dong C Y, Liu Z J, Yang X G. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11):157-164. (in Chinese)
- [18] Allen R G, Pereira L S, Rase D, et al. Crop evapotranspiration[J]. Rome:FAO, 1998.
- [19] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (19):98-104.
- Liu Y C, Jiang H A, Li C D, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 98-104. (in Chinese)
- [20] 黄志刚, 肖烨, 张国, 等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 1-15.
- Huang Z G, Xiao Y, Zhang G, et al. Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7):1-15. (in Chinese)
- [21] 刘钰, 谭军利, 李王成, 等. 吉林四平地区玉米和大豆灌溉需水量分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13 (6):1225-1228.
- Liu Y, Tan J L, Li W C, et al. Analysis of irrigation water requirement for maize and soybean in Siping region of Jilin province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6):1225-1228. (in Chinese)
- [22] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):6-12.
- Liu Y, Wang L, Ni G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):6-12. (in Chinese)
- [23] 王冬妮, 马玉平, 王石立, 等. 东北玉米生长模型中土壤水分参数的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2):219-224.
- Wang D N, Ma Y P, Wang S L, et al. Sensitivity analysis on the soil water parameters in maize growth model in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 219-224. (in Chinese)
- [24] 张祖光, 郝卫平, 李昊儒, 等. 山西省春玉米生育期干旱特征分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6):754-761.
- Zhang Z G, Hao W P, Li H R, et al. Analysis on the drought characteristics in different growth stages of spring maize in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(6):754-761. (in Chinese)
- [25] 李莹莹. 不同水分条件及复水对吉林省春玉米生长发育影响的模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017.
- Li Y Y. The influence of simulating different water conditions and recovery of water supply to growth of spring maize in Jilin province[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology, 2017. (in Chinese)