

DOI: 10.5846/stxb201808101706

刘影, 关小康, 杨明达, 丁超明, 崔静宇, 黄洁, 梅福建, 王怀革, 王同朝. 基于 DSSAT 模型对豫北地区夏玉米灌溉制度的优化模拟. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Liu Y, Guan X K, Yang M D, Ding C M, Cui J Y, Huang J, Mei F J, Wang H P, Wang T C. Optimizing the summer maize irrigation schedule in North Henan Province based on the DSSAT model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

## 基于 DSSAT 模型对豫北地区夏玉米灌溉制度的优化模拟

刘影<sup>1</sup>, 关小康<sup>1</sup>, 杨明达<sup>1</sup>, 丁超明<sup>1</sup>, 崔静宇<sup>1</sup>, 黄洁<sup>3</sup>, 梅福建<sup>1</sup>, 王怀革<sup>2</sup>, 王同朝<sup>1,\*</sup>

1 河南农业大学农学院, 河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002

2 浚县丰黎种业有限公司, 鹤壁 456250

3 南阳市宛城区种子管理站, 南阳 473000

**摘要:**合理的灌溉制度是提高农业水资源利用效率、保证夏玉米高产稳产的前提。为此,本研究采用农业技术转化决策系统(DSSAT, Decision Support System for Agrotechnology Transfer)探究了河南省北部地区夏玉米不同降水年型下的最优灌溉制度。经过参数的校正和验证,归一化均方根误差(nRMSE)、均方根误差(RMSE)和一致性指数( $d$ )均表现出模拟值与实测值的吻合度很好,DSSAT-maize 模型可以准确模拟夏玉米物候期、地上部分生物量、产量和土壤水分状况。然后基于模型模拟了不同灌溉处理下的夏玉米生产潜力,从而评估夏玉米缺水量,并对分析不同生育时期灌水对产量的影响确定最优灌溉时期,综合考虑产量和水分利用效率确定最优灌溉制度。结果表明:夏玉米生长季的缺水量年际间差异显著,多年平均值为 38.91 mm,波动范围为 0—193.03 mm。在丰水年,不需要灌溉;在平水年,开花期灌水 30 mm;在枯水年,开花期和灌浆期灌水 50 mm;在特别干旱年,苗期、拔节期和开花期至少灌水 180 mm。优化的灌溉制度下丰水年、平水年和枯水年的 WUE 达到最高且产量分别占其最高产量的 100%、99.72% 和 97.89%,实现了作物高产节水协同提高的目标。

**关键词:**DSSAT 模型;夏玉米;降水年型;灌溉制度

## Optimizing the summer maize irrigation schedule in North Henan Province based on the DSSAT model

LIU Ying<sup>1</sup>, GUAN Xiaokang<sup>1</sup>, YANG Mingda<sup>1</sup>, DING Chaoming<sup>1</sup>, CUI Jingyu<sup>1</sup>, HUANG Jie<sup>3</sup>, MEI Fujina<sup>1</sup>, WANG Huaiping<sup>2</sup>, WANG Tongchao<sup>1,\*</sup>

1 Agricultural College, Henan Agricultural University, Collaboration Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450002, China

2 Xunxian Fengli Seed Industry Co. Ltd, Hebi 456250, China

3 Seed Management of Wancheng District, Nanyang 453000, China

**Abstract:** Henan Province is the main summer maize production area in China; however, the yield of maize in this region has been seriously threatened by water scarcity. It is important to improve maize yield and stability by appropriate irrigation allied to high water-use efficiency (WUE). In this study, we applied the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) to determine the optimal irrigation schedules for summer maize in different hydrological years in the northern region of Henan Province. The GLUE procedure together with normalized root mean square errors (nRMSE), root

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301106);国家自然科学基金项目(31471452, 31601258)

收稿日期:2018-08-10; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wtcwrn@126.com

mean square errors (RMSE), and index of agreement ( $d$ ) showed that DSSAT-maize can be used to correctly predict maize yield, phenology, aboveground biomass, and soil water content. A calibrated model was used to simulate the effects of different irrigation treatments on the yield potential of summer maize in different hydrological years, and to evaluate the water shortages during the summer maize growing season. The optimal irrigation period was determined by comparing yield responses with different irrigation amounts and times, thereby enabling optimization of the irrigation schedule with yield and WUE. The results showed that water shortage in the summer maize growing season has varied significantly for the period of 1988—2017, averaging 38.91 mm, with a variation of 0 to 193.03 mm. In wet years, irrigation was unnecessary. Irrigation of 30 mm at the flowering stage should be applied in normal years and 50 mm at the flowering and grain-filling stages in dry years. In extraordinary dry years, irrigation of at least 180 mm should be applied at the emergence, jointing, and flowering stages of summer maize. Under the optimized irrigation schedule, when WUE reached the highest level in wet, normal, and dry years, the yield obtained accounted for 100%, 99.72%, and 97.89% of the maximum yield, respectively. The optimized irrigation schedule would produce a higher summer maize yield with the highest WUE.

**Key Words:** DSSAT model; summer maize; hydrological year; irrigation schedule

河南省是我国夏玉米的主要产区,夏玉米播种面积和产量占全国的 10%左右;同时也是水资源严重短缺地区,水分是影响夏玉米产量形成的主要限制因子<sup>[1-2]</sup>。在夏玉米生育期内(6—9月),降雨量分布不均,各年际间降雨量也不相同,夏玉米生长的某些关键时期极易遭受干旱,直接影响夏玉米的生长发育和产量<sup>[3]</sup>。自然降雨不能满足夏玉米的正常水分需求,为保证夏玉米高产稳产必须进行补充灌溉。然而,河南省农业用水存在巨大的缺口,平水年缺水量近  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,中早年缺水量近  $51 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>,使得作物各生育阶段所需水分很难都得到充分的供应<sup>[5]</sup>。此外,为获得高产,生产上多实行过量灌溉,水资源浪费严重<sup>[6]</sup>。因此,优化灌溉水资源管理,提高灌溉水利用效率,以最适宜的水量投入获得最高的经济产出对缓解河南省农业用水危机和保障夏玉米生产具有重要意义。

传统上灌溉制度的制定是经大量的田间试验来确定灌水定额、灌溉时间和灌溉定额<sup>[7]</sup>。这种制定方式虽然富有成效,但是周期长、耗时耗力,且因气候条件和土壤环境的变异性而缺乏普适性<sup>[8-9]</sup>。随着信息技术的快速发展,作物模型应运而生。DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer)是目前应用最为广泛的作物模型系统之一<sup>[10]</sup>,综合气象、土壤、田间管理和作物品种特性,可以模拟多年的作物生长发育和产量,克服了田间试验存在的诸多缺点。其中,DSSAT专门用于玉米的 CERES-maize 模型正被广泛应用于玉米水分管理研究,包括不同生育期受旱情况下夏玉米的模拟精度<sup>[11]</sup>,夏玉米光温水生产潜力的评价<sup>[12]</sup>,夏玉米灌溉需水量的估算<sup>[13]</sup>,不同播期和不同水分管理对夏玉米产量的影响<sup>[14]</sup>,甜玉米最优水肥管理的确定<sup>[9]</sup>和春玉米节水灌溉管理的模拟<sup>[15]</sup>等方面。但是,河南省夏玉米农田水分管理,尤其是不同降水年型下的夏玉米灌溉方案需要进一步的研究。

本研究基于 1988—2017 年 30 年的夏玉米生育期内气象数据,首先利用 2016—2017 年的物候期、地上部分生物量、产量和土壤含水量等大田实测值对 DSSAT-maize 模型进行校正和验证,然后通过设立不同灌溉模式、生长关键期灌溉组合和灌溉量梯度,探究不同降水年型下的夏玉米生长季缺水情况,进一步确定夏玉米最适合的灌溉时期和灌溉量,为豫北地区乃至河南省夏玉米的灌溉制度制定提供决策支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究的田间试验在河南省浚县丰黎种业有限公司科研基地进行( $35^{\circ}28'N$ , $114^{\circ}23'N$ ),海拔 63 m,面积  $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。浚县位于河南省北部,拥有耕地面积  $7.2 \text{ 万} / \text{hm}^2$ ,夏玉米平均亩产 597 公斤、总产 49 万吨,是河南省典型的夏玉米产区;该区域属于暖温带半湿润性季风气候,年均气温  $13.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $647.8 \text{ mm}$ ,7、

8 月降雨量占全年降水量的 51%, 年均日照时数 2331.8 h<sup>[16]</sup>。

## 1.2 模型数据库建立

### 1.2.1 气象数据

模型所需的气象参数包括逐日太阳辐射量 ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ), 最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 最低温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 和降雨量 ( $\text{mm}$ )。依据 1988—2017 年 30 个夏玉米生长季的气象数据建立气象数据库, 通过 P-III 型频率曲线分析软件划分不同降水年型: 将降水保证率 ( $P$ ) 大于等于 25% 的年份划分为丰水年 (wet year), 25%—75% 之间的年份为平水年 (normal year), 小于等于 75% 的年份为干旱年 (dry year), 接近 100% 的年份为特别干旱年 (extraordinary year)<sup>[17]</sup>。1988—2017 年玉米生育期降雨分布如 (图 1) 所示:  $P = 25\%$  对应降雨量为 467.32 mm,  $P = 50\%$  对应降雨量为 344.67 mm,  $P = 75\%$  对应降雨量为 262.54 mm, 1997 年降雨量 111.10 mm 的保证率接近 100% 为特别干旱年。

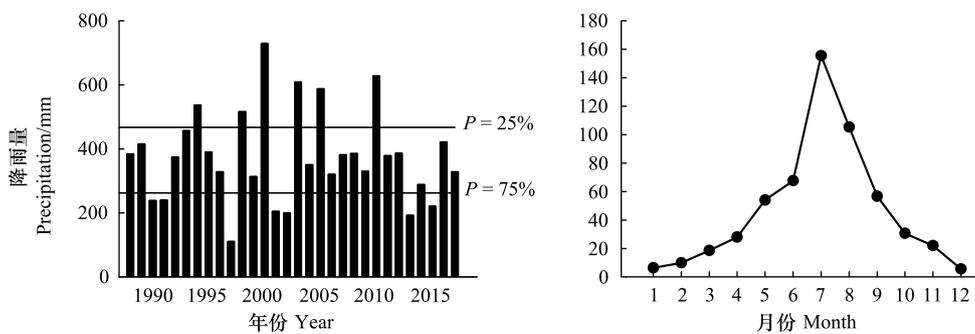


图 1 1988—2017 年玉米生育期年降雨分布 (A), 1988—2017 年月均降雨分布 (B)

Fig.1 Precipitation distribution during maize growth period from 1988 to 2017 (A), Monthly average rainfall distribution from 1988 to 2017 (B)

### 1.2.2 土壤数据

模型所需的土壤数据包括土壤剖面物理化学性状和土壤初始条件。2017 年夏玉米播种前在试验田随机选取 5 个取样点, 采用分层 (每层 20 cm) 取样法测定 0—100 cm 土壤剖面。各层土壤质地 (砂粒、粉粒、粘粒百分比)、土壤容重、凋萎点、饱和含水量、田间持水量、有机质、全氮、pH、土壤含水量、硝态氮和铵态氮如表 1 所示, 各指标测定参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[18]</sup>。

表 1 土壤剖面理化性状

Table 1 Profile soil physical and chemical properties

项目 Item	土壤层次 Soil layer/cm				
	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
砂粒 Sand/%	40	37	35	29	30
粉粒 Silt/%	36	38	35	38	36
粘粒 Clay/%	24	25	30	33	34
容重 Bulk density/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.33	1.43	1.37	1.38	1.47
凋萎点 Lower limit/ $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.18	0.17	0.19	0.21	0.21
田间持水量 Drained upper limit/ $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.33	0.32	0.36	0.36	0.32
饱和含水量 Saturated water content/ $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.48	0.46	0.47	0.47	0.44
有机碳 Organic carbon/%	1.21	0.82	0.62	0.61	0.50
全氮 Total nitrogen/%	0.14	0.09	0.07	0.08	0.07
pH	8.1	8.2	8.2	8.1	8.1
土壤含水量 Volumetric water/ $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27
铵态氮 Ammonium/ $(\text{mg}/\text{g})$	2.0	1.5	1.5	1.6	1.7
硝态氮 Nitrate/ $(\text{mg}/\text{g})$	21.6	16.1	7.7	10.7	11.0

### 1.2.3 田间管理数据

模型所需的田间管理数据包括品种、播种、施肥和灌溉。供试夏玉米品种为黎乐 66。其中 2016 年玉米播期为 6 月 14 日,种植密度 60600 株/hm<sup>2</sup>,播深 3 cm,行距 60 cm,同时施用复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=28-12-10) 750 kg/hm<sup>2</sup>,并在 7 月 16 日追施尿素(N=46%) 187.5 kg/hm<sup>2</sup>,期间无灌溉。2017 年玉米播期为 6 月 19 日,种植密度 61100 株/hm<sup>2</sup>,播深 3 cm,行距 60 cm,同时施用复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=28-12-10) 750 kg/hm<sup>2</sup>,并在 7 月 23 日追施尿素(N=46%) 330 kg/hm<sup>2</sup>,期间在 8 月 19 日进行一次喷灌,灌溉量 60 mm。其它管理均与大田管理相同。

### 1.2.4 作物品种参数

DSSAT-maize 模型共包含 6 个品种参数,分别是 P1:从出苗至幼年阶段结束所需的积温(°C/d),P2:光周期敏感参数,P5:从吐丝至生理成熟所需的积温(°C/d),G2:单株潜在穗粒数,G3:潜在籽粒生长速率(mg/d),PHINT:出叶间隔特性参数(°C/d)。采用 DSSAT-GLUE 模型参数估计工具<sup>[19]</sup>,每次至少 6000 次运行,不断缩小参数范围,并结合“试错法”获得最优的玉米品种参数组合(表 3)。

### 1.3 DSSAT 模型校正和验证

模型的校正和验证是通过调整作物品种参数使模拟值和实测值互相吻合。本研究通过夏玉米物候期、产量、地上部分生物量和土壤含水量来评估作物模型在当地的适用性。玉米物候期可以通过田间观察获得。产量取样在玉米生理成熟期进行,随机选择 5 个样点,每个样点双行连续收获 20 穗,脱粒烘干,经谷物水分测定仪测定籽粒含水量后,折算为公顷产量。地上部分生物量取样分别在玉米拔节期、开花期、乳熟期和成熟期进行,随机选择 5 个样点,每个样点选取 2 株田间长势中等的完整单株,放置烘箱 105 °C 杀青后 75 °C 烘至恒重。土壤取样分别在播种期、拔节期、开花期、乳熟期和成熟期进行,随机选择 5 个样点,每个点在 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 进行分层取样,采用烘干法测定土壤含水量。为了量化模型拟合优度,使用归一化均方根误差(nRMSE),均方根误差(RMSE)和一致性指数(*d*)衡量模型模拟结果。计算如下:

$$\text{nRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{M}} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 / n}}{\bar{M}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i| + |M_i|)^2} \quad (3)$$

在公式中 *n* 代表样本总数,*S* 和 *M* 分别代表模拟值和实测值, $\bar{M}$  代表实测值的平均数。

当 nRMSE ≤ 10%,模拟结果非常好;当 10% ≤ nRMSE ≤ 20%,模拟结果良好;当 20% ≤ nRMSE ≤ 30%,模拟结果一般。当 30% ≤ nRMSE,模拟结果较差<sup>[15]</sup>。

当 RMSE ≤ 0.1,模拟结果非常好;当 0.1 ≤ RMSE ≤ 0.2,模拟结果良好;当 0.2 ≤ RMSE ≤ 0.3,模拟结果一般;当 0.3 ≤ RMSE,模拟结果较差<sup>[15]</sup>。

当 *d* = 0,模拟值和实测值之间不一致;当 *d* = 1,模拟值和实测值之间非常一致。一般认为:当 *d* ≤ 0.6,一致性较差;0.6 ≤ *d* ≤ 0.8,一致性一般;当 0.8 ≤ *d*,一致性很好<sup>[20]</sup>。

## 1.4 情景分析

### 1.4.1 夏玉米缺水模拟

充分灌溉条件下田间蒸散量与不灌溉条件下田间蒸散量的差值是为缺水量<sup>[21]</sup>。在作物管理模块的灌溉和水分管理选项分别设置自动灌溉模式和不灌溉模式,自动灌溉模式被设定为当土壤剖面 0—60 cm 的土壤

含水量小于土壤有效水含量的 50% 时自动补充灌溉至土壤有效水含量的 90%。

### 1.4.2 灌溉时期模拟

基于 4 个关键生育时期(苗期(E),拔节期(J),开花期(F)和灌浆期(G))共设置了 6 种灌溉模式:不灌溉、一次灌溉、两次灌溉、三次灌溉、四次灌溉和自动灌溉,灌水定额为 60 mm,共计书版无字符: $0 \times 2201_4^0 +$  书版无字符: $0 \times 2201_4^1 +$  书版无字符: $0 \times 2201_4^2 +$  书版无字符: $0 \times 2201_4^3 +$  书版无字符: $0 \times 2201_4^4 + 1 = 17$  个灌溉组合(表 2)。这些模拟基于无营养胁迫的假设,灌溉方式为喷灌。

表 2 模拟灌溉试验方案设计

Table 2 Irrigation scheme of simulation experiment

灌溉频次 Irrigation frequency	灌水定额 Irrigation amount/mm	灌溉定额 Total amount/mm	灌溉时期 Irrigation at phenological phase
0	0	0	None <sup>1</sup>
1	60	60	E <sup>2</sup> , J <sup>3</sup> , F <sup>4</sup> , G <sup>5</sup>
2	60	120	EJ <sup>6</sup> , EF <sup>7</sup> , EG <sup>8</sup> , JF <sup>9</sup> , JG <sup>10</sup> , FG <sup>11</sup>
3	60	180	EJF <sup>12</sup> , EJG <sup>13</sup> , EFG <sup>14</sup> , JFG <sup>15</sup>
4	60	240	EJFG <sup>16</sup>
Automatic irrigation	When required	When required	When required <sup>17</sup>

E—苗期 represents emergence stage, J—拔节期 represents jointing stage, F—开花期 represents flowering stage, G—灌浆期 represents Grain filling stage

### 1.4.3 灌溉量模拟

通常选取 P = 25% 代表丰水年; P = 50% 代表平水年; P = 75% 代表枯水年。1998 年降雨量 516.1 mm 为典型丰水年; 2017 年降雨量 329.0 mm 为典型平水年; 1991 年降雨量 240.1 mm 为典型枯水年。为了得到不同典型年的最佳灌水定额, 基于灌溉时期的模拟结果, 在最佳灌溉时期进行灌溉 0、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、120、140、160 和 180 mm, 共计 16 个不同灌溉量的模拟情景。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的校正和验证

选择 2016 年夏玉米实测试验数据校正模型, 2017 年玉米试验数据验证模型。经过 GLUE 率定, 表 3 为模型模拟值与实测数值相吻合的 6 个玉米遗传参数。

表 3 夏玉米作物品种遗传参数

Table 3 Genetic parameters of summer maize

参数 Parameter	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
取值范围 Range	100—400	0—4	600—900	500—1000	5—12	40—55
最优值 Optimal value	219.4	0.506	814.5	704.1	8.787	51.29

表 4 为 2016 和 2017 年玉米物候期、地上部分生物量和产量的模拟值与实测值的差异比较。2016 年校正结果表明, 玉米指标的模拟值与实测值相近, 开花期、成熟期、成熟期地上部分生物量和产量的 nRMSE 分别为 1.89%、0.98%、2.91% 和 5.43%, 均小于 10%, 校正结果非常好; 开花期地上部分生物量的 nRMSE 介于 10% 和 20% 之间, 校正结果良好。2017 年验证结果表明, 玉米指标的模拟值与实测值相近, 开花期、成熟期、开花期地上部分生物量、成熟期生物量和产量的 nRMSE 分别为 1.92%、0.98%、5.50%、6.34% 和 6.79%, 均小于 10%, 验证结果非常好。

图 2 为 2016—2017 年该田块 0—100cm 分层土壤含水量模拟值与实测值的差异比较。2016 和 2017 年分层土壤含水量的 RMSE 值分别为 0.016、0.009、0.023、0.015、0.023 和 0.01、0.022、0.013、0.01、0.07, 均小于 0.1, 模拟结果非常好。其 *d* 值分别为 0.977、0.992、0.953、0.968、0.902 和 0.966、0.826、0.975、0.984、0.976, 均大于

0.8, 模拟一致性很好。

表 4 2016—2017 年玉米地上部生物量, 物候期和产量模拟值和实测值的对比

Table 4 Comparison of the simulated and measured above-ground biomass, phenology and yield in 2016—2017

年份 Year 项目 Item	2016				2017			
	模拟值 Simulated	实测值 Measured	nRMSE/%	误差 Error	模拟值 Simulated	实测值 Measured	nRMSE/%	误差 Error
开花期 Flowering /DAP	54	53	1.89	1	53	52	1.92	1
成熟期 Maturity /DAP	101	102	0.98	-1	103	102	0.98	1
开花期生物量 Biomass at Flowering/ (kg/hm <sup>2</sup> )	6993	6078	15.05	915	6457	6833	5.50	376
成熟期生物量 Biomass at Maturity/ (kg/hm <sup>2</sup> )	15208	14777	2.91	431	16946	18020	6.34	-1074
产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> )	6826	7218	5.43	-392	8594	8001	6.79	543

综上所述, DSSAT-maize 模型对该区域物候期、地上部分生物量、产量和土壤含水量的模拟无论从空间上还是时间上均为有效模拟, 特别是对土壤水分变化的模拟较为精确, 可为本地区夏玉米水分管理和产量研究提供可靠的理论依据。

## 2.2 夏玉米缺水量模拟分析

1988—2017 年 30 年夏玉米生长季的缺水量分布如表 5 所示: 在丰水年, 1998、2000、2003、2005 和 2010 年的缺水量介于 0—6.88 mm 之间, 平均值为 2.69 mm, 灌溉需水量较小, 而 1994 年的缺水量达到 66.45 mm, 其原因是 1994 年播种后 22 天内累计降雨量达 418 mm 且播种后第 21 天降雨量达 239.10 mm, 虽为丰水年, 但前期降雨量较大, 后期雨水较少, 导致玉米生育后期缺水量较大, 因此, 把 1994 作为平水年处理; 在平水年, 缺水量介于 3.15—66.45 mm 之间, 平均值为 25.30 mm, 缺水量波动较大; 在枯水年, 1990、1991、2001、2002、2013 和 2015 年的缺水量介于 57.25—122.27 mm 之间, 平均值为 84.26 mm, 灌溉需水量较大; 在特别干旱年, 1997 年的缺水量 193.03 mm, 具有很大的灌溉需求。夏玉米生长季多年的缺水量介于 0 mm 和 193.03 mm 之间, 平均值为 38.91 mm, 不同降水年型的夏玉米缺水量差异显著。

表 5 1988—2017 年 30 年夏玉米作物蒸腾量和土壤蒸发量的模拟结果

Table 5 Crop transpiration and soil evaporation of summer maize in 30 years from 1988 to 2017

降水年型 Rainfall year	年份 Year	充分灌溉 Automatic when required			不灌溉 Not irrigated			缺水量 Water shortage/ mm
		蒸腾量 Transpiration/ mm	蒸发量 Evaporation/ mm	蒸散量 ET/mm	蒸腾量 Transpiration/ mm	蒸发量 Evaporation/ mm	蒸散量 ET/mm	
丰水年 Wet year	1998	262.94	69.78	332.72	262.70	63.14	325.84	6.88
	2000	260.99	93.68	354.67	260.87	91.41	352.28	2.39
	2003	263.21	88.14	351.35	263.21	88.14	351.35	0.00
	2005	275.78	91.73	367.51	275.67	88.61	364.28	3.23
	2010	257.50	58.55	316.05	257.47	57.64	315.11	0.94
平水年 Normal year	1988	260.77	68.97	329.74	251.46	62.98	314.44	15.3
	1989	267.85	76.83	344.68	240.04	65.41	305.45	39.23
	1992	301.47	70.54	372.01	301.29	66.91	368.20	3.81
	1993	269.79	97.34	367.13	241.92	88.93	330.85	36.28
	1994	286.78	89.52	376.30	230.29	79.56	309.85	66.45
	1995	266.04	68.79	334.83	265.79	63.16	328.95	5.88
	1996	246.23	77.55	323.78	245.35	70.51	315.86	7.92

续表

降水年型 Rainfall year	年份 Year	充分灌溉 Automatic when required			不灌溉 Not irrigated			缺水 Water shortage/ mm	
		蒸腾量 Transpiration/ mm	蒸发量 Evaporation/ mm	蒸散量 ET/mm	蒸腾量 Transpiration/ mm	蒸发量 Evaporation/ mm	蒸散量 ET/mm		
丰水年 Wet year	1999	286.80	68.79	355.59	245.33	59.54	304.87	50.72	
	2004	263.95	99.7	363.65	263.71	93.86	357.57	6.08	
	2006	249.13	77.86	326.99	248.95	74.89	323.84	3.15	
	2007	287.97	77.04	365.01	283.66	69.61	353.27	11.74	
	2008	262.48	92.43	354.91	253.75	85.76	339.51	15.40	
	2009	289.17	55.26	344.43	273.17	50.55	323.72	20.71	
	2011	296.18	68.02	364.20	287.26	62.71	349.97	14.23	
	2012	307.61	66.86	374.47	305.73	61.79	367.52	6.95	
	2014	276.18	58.82	335.00	222.10	56.6	278.7	56.30	
	2016	284.97	70.98	355.95	227.57	62.75	290.32	65.63	
平水年 Normal year	2017	269.31	81.96	351.27	247.16	74.55	321.71	29.56	
	1990	288.47	60.81	349.28	238.24	53.79	292.03	57.25	
	枯水年 Dry year	1991	297.45	58.01	355.46	238.23	48.79	287.02	68.44
		2001	285.64	72.61	358.25	201.54	61.88	263.42	94.83
		2002	304.75	62.85	367.60	215.57	53.32	268.89	98.71
		2013	311.66	69.94	381.60	199.63	59.7	259.33	122.27
2015		280.41	58.24	338.65	224.28	50.34	274.62	64.03	
特别干旱年 Extraordinary dry year	1997	320.65	41.58	362.23	135.77	33.43	169.20	193.03	

### 2.3 灌溉时期模拟分析

在不同降水年型,不同灌溉频次和不同生育时期的灌溉对夏玉米产量的影响差异显著。从图 3 可知:在丰水年,夏玉米多年平均产量随着灌溉次数和灌溉量的增加并没有显著波动,因此不需要补充灌溉;在平水年,平均产量在处理 4 处首先到达最高点,灌溉组合是开花期,此后随着灌溉次数和灌溉量的增加,产量增幅相对较小,因此平水年在开花期进行一次灌溉为最优灌溉模式;在枯水年,平均产量在处理 11 处首先到达最高点,灌溉组合是开花期和灌浆期,此后随着灌溉次数和灌溉量的增加,产量增幅相对较小,因此枯水年在开花期和灌浆期进行两次灌溉为最优灌溉模式;在特别干旱年,产量随着灌溉次数和灌溉量的增加而增加,平均产量在处理 12 处首先达到最高点,灌溉组合是苗期、拔节期和开花期,此后随着灌溉次数和灌溉量的增加,产量增幅相对较小,但相对于自动灌溉产量增幅较大,因此特别干旱年需要在苗期、拔节期和开花期进行 3 次灌溉,同时增加灌水定额。

### 2.4 灌溉量模拟分析

在不同典型降水年,不同灌溉量对夏玉米产量和水分利用效率的影响差异显著。水分利用效率(Water use efficiency, WUE)表示每单位水资源生产的作物产量,较高的 WUE 是有限水资源条件下夏玉米稳定生产的关键,本研究中采用夏玉米产量与蒸散量的比值来说明其水分利用效率水平。从表 6 可知:在丰水年 1998 年,产量不随灌溉量的增加而增加,且在 0 mm 灌溉时水分利用效率为 26.25 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)达到最高,同时产量 8554 kg/hm<sup>2</sup>为最大值,因此典型丰水年的最佳灌溉量为 0 mm,即不需要灌溉;在平水年 2017 年,产量首先随灌溉量的增加而增加,在灌溉 30 mm 时产量 8799 kg/hm<sup>2</sup>达到最大,并且不再灌溉量的增加发生变化,水分利用效率也先具有相同趋势,在灌溉 30 mm 时为 25.43 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)达到最高,因此典型平水年的最佳灌溉量为 30 mm;在枯水年 1991 年,产量首先随灌溉量的增加而增加,在灌溉 70 mm 条件下的产量 9653 kg/hm<sup>2</sup>达到最大并且不再随灌溉量的增加发生变化,但是水分利用效率在灌溉 50 mm 时为 28.44 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。

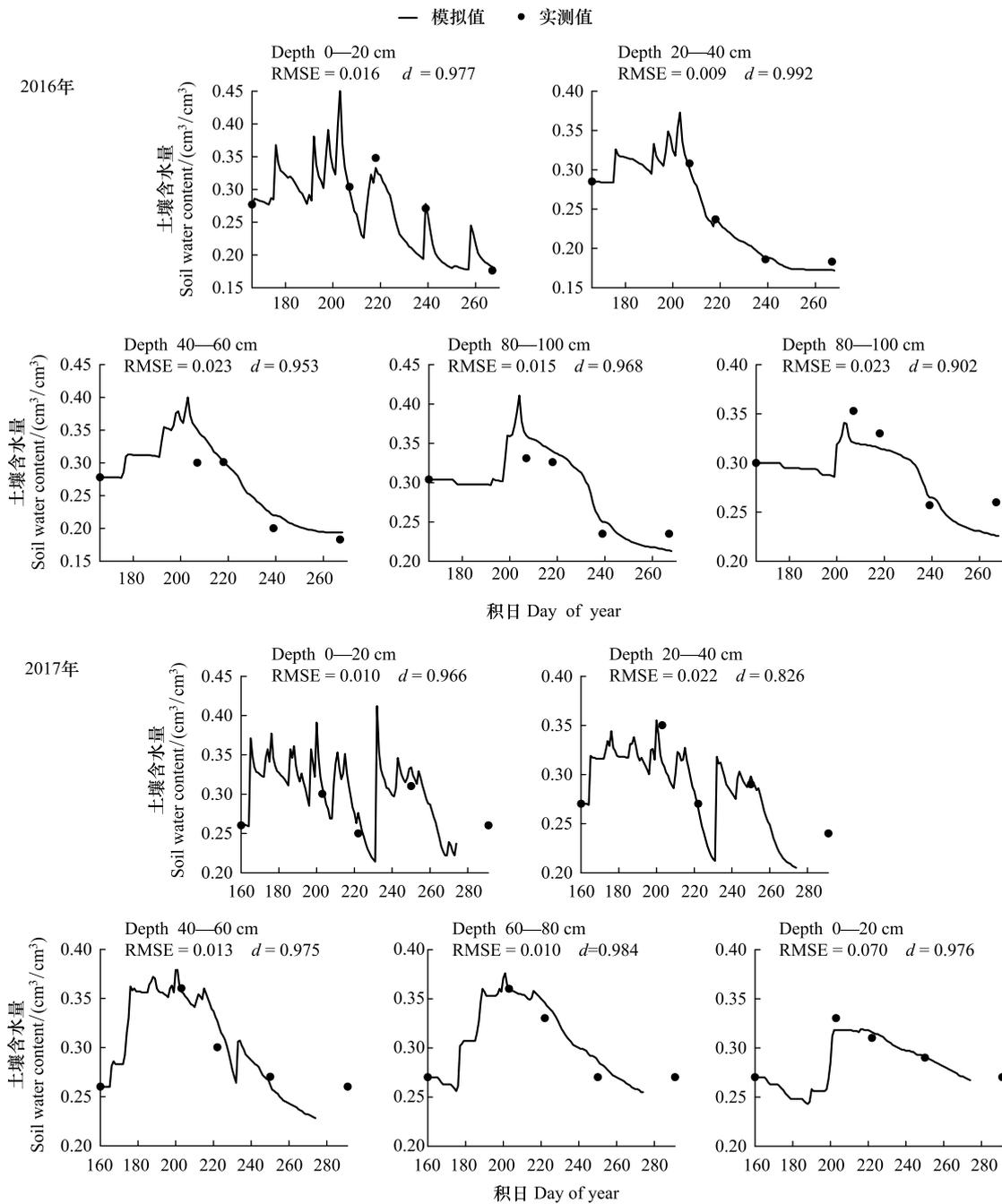


图2 分层土壤含水量模拟值与实测值的对比

Fig.2 Comparisons between the simulated and measured soil content at different depths in 2016 and 2017

mm) 达到最高,因此典型枯水年的最佳灌溉量为 50 mm。

### 3 讨论

DSSAT 模型的作物品种参数决定着玉米的生育周期、营养生长和生殖生长阶段,其正确与否直接影响到模型模拟结果的精度<sup>[10]</sup>。本研究除了 2016 年夏玉米开花期地上部分生物量的 nRMSE 为 15.05% 外,其它产量、物候期、地上部分生物量和土壤含水量的模拟值与实测值之间的归一化均方根误差 (nRMSE) 均小于 10%,同时土壤含水量的一致性指数 ( $d$ ) 均大于 0.8,整体的模拟结果非常好,表明了该模型在豫北地区具有较好的适用性。

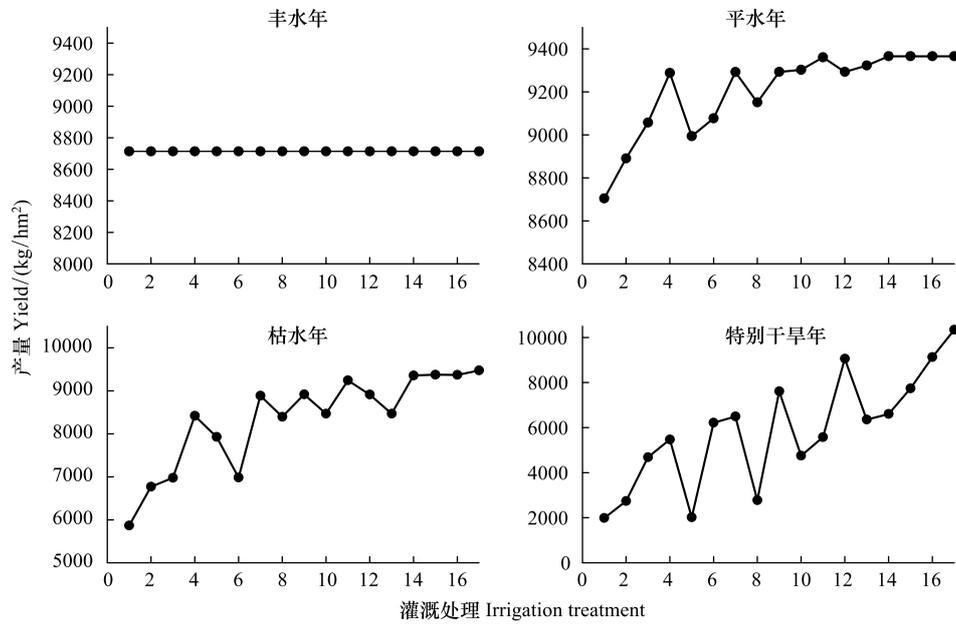


图 3 1988—2017 年不同降水年型夏玉米平均产量的模拟

Fig.3 Simulated summer maize average yield at different irrigation treatments under different hydrological years from 1988 to 2017

表 6 不同灌溉量水平下不同典型降水年夏玉米产量和蒸散量的模拟

Table 6 Simulated summer maize yield and evapotranspiration for different typical hydrological years under different irrigation conditions

灌溉量 Irrigation level/mm	丰水年			平水年			干旱年		
	产量 Yield/ (kg/hm <sup>2</sup> )	蒸散量 ET/ mm	水分利用效率 WUE/ (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg/hm <sup>2</sup> )	蒸散量 ET/ mm	水分利用效率 WUE/ (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg/hm <sup>2</sup> )	蒸散量 ET/ mm	水分利用效率 WUE/ (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )
0	8554	325.84	26.25	7678	321.71	23.87	6986	287.02	24.34
5	8554	326.07	26.23	7976	326.00	24.47	7249	291.83	24.84
10	8554	326.28	26.22	8190	330.09	24.81	7532	296.66	25.39
20	8554	326.39	26.21	8536	338.14	25.24	8160	305.76	26.69
30	8554	326.56	26.19	8775	345.04	25.43	8588	314.59	27.30
40	8554	326.4	26.21	8799	346.38	25.40	9194	323.57	28.41
50	8554	326.4	26.21	8799	346.85	25.37	9454	332.38	28.44
60	8554	326.57	26.19	8799	347.05	25.35	9629	340.54	28.28
70	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	347.73	27.77
80	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	351.95	27.44
90	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	352.75	27.38
100	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	353.28	27.34
120	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	354.03	27.28
140	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	354.6	27.24
160	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	354.63	27.23
180	8554	326.57	26.19	8799	347.12	25.35	9658	354.63	27.23

优化节水灌溉制度的关键是提高自然降水和灌溉水的利用效率,土壤贮水消耗量与灌水量呈负相关<sup>[22]</sup>。黄仲冬<sup>[23]</sup>利用数学模型计算的河南省新乡地区夏玉米多年缺水波动于 8.1—381.8 mm,本研究的多年缺水介于 0—193.03 mm 之间,这与土壤贮水情况密切相关。1988—2017 年 6 月月均降雨量 63.69 mm,2016 和 2017 年夏玉米播期为 6 月中下旬,播前初始的分层土壤含水量分别是 0.27—0.30 和 0.26—0.32 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,土壤贮水处于较高水平,底墒水充足,缺水相应减少。不同降水年型下的夏玉米最佳灌溉时期和灌溉量差异

显著,降雨是影响作物灌溉需水的首要因素<sup>[23]</sup>。从图 1A 可知:1988—2017 年夏玉米生长季的年降水分布不均。丰水年(516.1—721.1 mm)>平水年(288.5—457.1 mm)>枯水年(192.7—240.1 mm)>特别干旱年(111.1 mm),不同降水年型夏玉米遭受水分胁迫的程度不同;从图 1B 可知:夏玉米生长季的月均降雨分布不均,7 月份降雨最多,9 月份降雨最少,相对降水充沛的生育前期,夏玉米生育后期更容易遭受水分胁迫。当遭受水分胁迫时,开花期水分胁迫减产最重,其次是灌浆期<sup>[24]</sup>。开花期是玉米最为关键的生育时期,决定着最终产量,期间需要大量的水分、养分、光照和温度<sup>[15]</sup>。灌浆期是玉米需水的第 2 个关键期,期间茎叶光合产物和积累的营养物质大量向籽粒输送时期,需水量也比较多<sup>[25]</sup>。特别干旱年在苗期、拔节期和开花期灌水,这主要是因为 1997 年的 7—8 月,河南省全省性的干旱造成一半播种面积以上的秋收作物受旱,灌水集中于夏玉米生育前期。

灌溉制度的优化不是以充分供水条件下的产量最高为目标,而是要以产量和水分利用效率的有效统一为目标。研究表明产量和 WUE 与灌水量呈非线性关系,当灌水量达到一定程度后,产量增加缓慢甚至降低<sup>[26-27]</sup>。本研究的 WUE 模拟值随灌溉量的增加呈现先增后降低的二次曲线趋势,当遭受水分胁迫时,WUE 随着灌水量的增加而增加,灌溉到一定量时,ET 不再变化,多余的灌溉水会形成地表径流或深层渗漏。但是,不同降水年型下的产量模拟值均增加到最大值后就不再变化,特别是丰水年的产量模拟值随灌水量的增加没有显著波动,表现为模型在过量灌溉情景下对产量模拟的敏感性较差。产量和 WUE 两者最高点并不重合,WUE 先于产量达到最大值<sup>[6,28]</sup>,本研究典型平水年和枯水年的模拟结果同样得到相似结论,但典型丰水年两者最高点吻合,这是降水已经满足玉米生育需水的原因,此外,丰水年、平水年和枯水年 WUE 达到最高值对应的产量分别占其最高产量的 100%、99.72%和 97.89%,实现了提高水分利用效率的同时保持较高的产量。

优化的灌溉制度虽然基于不同降水年确定了最佳灌溉时间和灌溉量,但是也不能完全适应气象条件、作物状况和土壤水分情况等影响因子造成的时空变异。因此,利用 DSSAT 为农田灌溉管理实践提供决策支持时,应该充分发挥模型可以模拟土壤-植物-大气动态变化的优势,对农田用水实施时空动态管理。首先基于气象数据的时间序列特征,在多年历史情境中找到与目标年份气象要素相似的年型<sup>[29-30]</sup>,然后综合已有的土壤和作物参数运行模型,对夏玉米生长发育和土壤水分的情况进行全生育期预测。之后,随着逐日实测气象数据的动态输入,不断校正土壤水分的预测值,一旦土壤水分小于适宜下限值,就可对未来时段的夏玉米蒸散量预测值与降水量预报值作比较,确定是否灌水及灌水多少,从而对预先制定的灌溉制度做出适当调整。

#### 4 结论

本研究基于 DSSAT-maize 模型评估了豫北地区夏玉米生长季的缺水情况,确定了不同降水年的最佳灌溉制度。利用 2016 和 2017 两年田间试验数据对 DSSAT 模型进行校正和验证时,均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(nRMSE)、一致性指数(*d*)均表明模拟效果非常好,模型能够准确模拟豫北地区夏玉米生长发育、产量形成和土壤水分状况。通过分析 30 年气象数据和不同灌溉情景模拟结果得出,夏玉米年际间的缺水差异显著,丰水年、平水年、干旱年和特别干旱年的夏玉米缺水分别是 0—6.88 mm,3.15—66.45 mm,57.25—122.27 mm 和 193.03 mm,应该根据不同降水年选择最适合的灌溉制度。在丰水年,降水可以满足夏玉米水分需求,不需要灌溉;平水年,需要开花期进行一次灌溉,灌溉量 30 mm;枯水年,需要开花期和灌浆期进行两次灌溉,灌溉量为 50 mm;特别干旱年,在苗期、拔节期和开花期进行 3 次灌溉,灌溉量至少为 180 mm。优化的灌溉制度在保持最高的水分利用效率同时获得较高的夏玉米产量,实现了夏玉米高产和水分利用高效同步化。

#### 参考文献(References):

- [1] 周苏攻,李潮海,刘奎,连东军. 夏玉米超高产栽培的资源特征及关键技术. 河南农业科学, 2000, 29(5): 3-4.
- [2] 李树岩,陈怀亮. 河南省夏玉米气候适宜度评价. 干旱气象, 2014, 32(5): 751-759.
- [3] 付祥建,刘伟昌,刘忠阳,马振生. 河南省气候概况及农业气象灾害. 气象与环境科学, 2006, (3): 65-66.

- [ 4 ] 刘戈, 葛树春, 慕兰. 河南省节水农业发展现状. 水资源与水工程学报, 2010, 21(2): 163-166.
- [ 5 ] 山仑, 康绍忠, 吴普特. 中国节水农业. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [ 6 ] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 于舜章, 罗毅, 于强, 欧阳竹. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- [ 7 ] 裴冬, 陈素英, 张喜英, 高延军, 王玉坤. 太行山山前平原夏玉米优化灌溉制度研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 144-147.
- [ 8 ] Fang Q, Ma L, Yu Q, Ahuja L R., Malone R W, Hoogenboom G. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat - maize double cropping systems in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1165-1174.
- [ 9 ] He J Q, Dukes M D, Hochmuth, G J, Jones J W, Graham W D. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES-Maize model. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 61-70.
- [ 10 ] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [ 11 ] 宋利兵, 陈上, 姚宁, 冯浩, 张体彬, 何建强. 基于 GLUE 和 PEST 的 CERES-Maize 模型调参与验证研究. 农业机械学报, 2015, 46(11): 95-111.
- [ 12 ] 姜志伟, 武雪萍, 华璐, 蔡典雄, 逢焕成, 吴会军, 姜涛, 郑妍, 李银坤. 洛阳旱地夏玉米生产潜力长周期定量模拟与评价. 生态学报, 2009, 29(1): 315-324.
- [ 13 ] Yang Y M, Yang Y H, Moiwo J P, Hu Y K. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1711-1721.
- [ 14 ] 戴明宏, 赵久然, Claupein W, 王璞. 基于 CERES-Maize 模型春玉米水分优化管理决策. 水土保持学报, 2009, 23(1): 187-192.
- [ 15 ] Jiang Y W, Zhang L H, Zhang B Q, He C S, Jin X, Bai X. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 37-45.
- [ 16 ] 郑辉. 浚县现代农业发展研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [ 17 ] 杜汛雨. 基于 DSSAT 模型的华北地区冬小麦最优灌溉方案研究——以栾城为例[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016.
- [ 18 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [ 19 ] He J, Dukes M D, Jones J W, Graham W D, Judge J. Applying glue for estimating CERES-Maize genetic and soil parameters for sweet corn production. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(6): 1907-1921.
- [ 20 ] Liu S, Yang J Y, Drury C F, Liu H L, Reynolds W D. Simulating maize (*Zea mays* L.) growth and yield, soil nitrogen concentration, and soil water content for a long-term cropping experiment in Ontario, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(3): 435-452.
- [ 21 ] 陈丹丹, 李国强, 张杰, 臧贺藏, 胡峰, 郑国清. 基于 DSSAT 模型的河南省冬小麦需水量分析. 河南农业科学, 2017, 46(2): 153-160.
- [ 22 ] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1965-1970.
- [ 23 ] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 乔冬梅, 李中阳, 梁志杰. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响. 农业工程学报, 2015, 31(5): 85-92.
- [ 24 ] 徐世昌, 戴俊英, 沈秀瑛, 王莲芝, 崔钦, 朱玉伦. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响. 作物学报, 1995, 21(3): 356-363.
- [ 25 ] 曹云者, 宇振荣, 赵同科. 夏玉米需水及耗水规律的研究. 华北农学报, 2003, 18(2): 47-50.
- [ 26 ] 刘存寿, 谷洁. 灌溉对渭北塬区冬小麦水分利用效率与增产潜力的影响. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 90-93.
- [ 27 ] 邓西平. 渭北地区冬小麦的有限灌溉与水分利用研究. 水土保持研究, 1999, 6(1): 41-46.
- [ 28 ] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
- [ 29 ] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.
- [ 30 ] 陈上, 窦子荷, 蒋腾聪, 李华龙, 马海蛟, 冯浩, 于强, 何建强. 基于聚类法筛选历史相似气象数据的玉米产量 DSSAT-CERES-Maize 预测. 农业工程学报, 2017, 33(19): 147-155.