

# 邢台夏玉米需水量时空分布特征 及气象影响因子

贾秋兰<sup>1</sup>, 王小娟<sup>1</sup>, 赵玉兵<sup>1</sup>, 徐文斌<sup>2</sup>, 高 祺<sup>3</sup>, 刘胜尧<sup>4</sup>

(1. 邢台市气象局, 河北 邢台 054000; 2. 柏乡县气象局, 河北 邢台 055450;

3. 石家庄市气象局, 河北 石家庄 050081; 4. 河北省农林科学院农业信息与经济研究所, 河北 石家庄 050051)

**摘 要:**选取邢台地区 17 个国家气象观测站 1972—2014 年的逐日气象资料, 采用联合国粮食与农业组织 (FAO) 推荐的 Penmen-Monteith 公式及作物系数法, 计算了夏玉米全生育期和各生育阶段的需水量; 运用线性趋势分析、相关系数、Morlet 小波、空间插值等方法分析了需水量的时空分布特征及气象影响因子。结果表明: 1972—2014 年, 夏玉米需水量呈下降趋势, 年趋势减少量为 1.01 mm; 夏玉米需水量存在 23~32, 12~15, 3~6 a 的周期变化规律, 其中 23~32 a 的周期最稳定; 夏玉米需水量在空间上呈现出东部最大, 西部次之, 中部最少的分布特征; 夏玉米需水量和气象因子的关系密切, 其中日照时数和需水量呈最大正相关, 水汽压呈最大负相关。

**关键词:**夏玉米; 需水量; 时空分布; 气象影响因子; FAO-PM 公式; 邢台

中图分类号: S161 文献标志码: A

## Spatial and temporal distribution of water requirement of summer corn in Xingtai and the meteorological impact factors

JIA Qiu-lan<sup>1</sup>, WANG Xiao-juan<sup>1</sup>, ZHAO Yu-bing<sup>1</sup>, XU Wen-bin<sup>2</sup>, Gao Qi<sup>3</sup>, Liu Sheng-yao<sup>4</sup>

(1. Xingtai Meteorological Bureau, Xingtai, Hebei 054000, China;

2. Baixiang Meteorological Bureau, Xingtai, Hebei 055450, China;

3. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang, Hebei 050081, China;

4. Agricultural Information and Economic Research Institute, Hebei Academy of Agriculture  
and Forestry Sciences, Hebei, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data collected at 17 meteorological stations from 1972 to 2014 in Xingtai, the water requirements of summer corn during the whole growing season and at different growth stages were calculated based on the FAO-PM model. In addition, we used the methods of linear trend, correlation coefficient, Morlet wave and inverse distance weighting to analysis spatio-temporal changes of summer corn in Xingtai in the last 43 years and the influence factors. The results showed that the water requirement trends at various stages generally declined obviously and the rate of annual average decline trend was at 1.01 mm during the whole growing season. The water requirements of summer corn had a 23~32 years cycle, 12~15 years cycle, and 3~6 years cycle, of which the 23~32 years cycle was the most stable. In terms of geographical space, the distribution of water requirement from big to small was in the eastern, western and central regions. The relationship between the water demand and the meteorological factors was closely related, among them that the sunshine was positively correlated and the vapor pressure was negatively correlated significantly with water demand.

**Keywords:** summer corn; water requirement; spatial and temporal distribution; meteorological impact factors; FAO-PM formula; Xingtai

作物需水量是指作物生长发育所需要消耗的水量,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、地区水利规划、灌溉工程规划设计和管理的依据<sup>[1]</sup>。全面了解作物需水耗水规律,对于节水农业的发展、水资源的节约管理,水分利用效率的提高以及作物产量的模拟预测,均具有重要意义。随着对气候变化和水资源短缺的高度关注,作物需水量计算以及对气候变化响应的研究增多<sup>[2-5]</sup>。在关于作物需水量的研究中,李春强等<sup>[6]</sup>对近 35a 来河北主要农作物需水量的变化趋势进行研究,认为河北省主要农作物冬小麦和玉米的需水量近 35 a 呈现减少趋势。刘晓英等<sup>[7-8]</sup>利用 6 个城市站分析了华北平原冬小麦和夏玉米近 50 a 作物需水量的变化趋势和原因,以及未来气候变化对该地作物需水量的影响。曹红霞等<sup>[9]</sup>利用 FAO-PM 公式计算了关中地区主要作物的需水量,结果关中地区冬小麦需水量无一致变化趋势,夏玉米需水量呈不显著减少趋势。

邢台位于河北省中南部,太行山脉南段东麓,华北平原中部,晋冀鲁三省之中。年平均气温在 12℃~14℃,是华北平原典型的一年两熟制农业主产区。农业作物主要以小麦、玉米、谷子、花生、棉花为主,是全国优质粮和棉花生产基地。本文研究的夏玉米是邢台市主要粮食作物,种植广泛,常年种植面积 3×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup> 左右,在全年粮食生产中占有重要位置<sup>[10]</sup>。近年来邢台地区玉米产业化经营发展迅速,玉米加工业已由原来的粗加工向精深加工方向发展,由产业化带动的玉米种植面积有了进一步的扩大。目前针对邢台地区农作物需水量的研究尚不多见,了解邢台地区农作物需水量的变化特征以及与气候之间的关系,可以为邢台地区水资源合理配置及作物结构布局提供科学参考,同时也可以为制定适应气候变化的农作物栽培及水资源利用政策提供理论依据。

## 1 资料来源与方法

### 1.1 资料来源

本文所采用的数据来源于河北省气象信息中心,以邢台地区 17 个国家气象站为研究对象。选取了这些站点 1972—2014 年的地面气象日观测数据,包括气温(含平均气温,最高气温,最低气温等),水汽压,日照,风速等数据。夏玉米生育期资料来自邢台内丘农气站人工观测数据。

### 1.2 需水量的计算

作物需水量大多利用作物系数和参考作物蒸

散量计算。最早的参考作物蒸散量的计算由英国科学家 Penmen 提出<sup>[11]</sup>,该方法经过了多次修正。1998 年世界粮农组织(FAO)将 Penmen-Monteith 方法作为计算参考作物蒸散量的方法向全球推广<sup>[12]</sup>。计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, $ET_0$  是潜在蒸散量(mm), $R_n$  是冠层表面净辐射(MJ·m<sup>-2</sup>);冠层反射系数 $\alpha$ 取 0.23; $G$  是土壤热通量(MJ·m<sup>-2</sup>); $T$  是日平均气温(℃); $e_s$  是饱和水汽压(kPa); $e_a$  是实际水汽压(kPa); $\Delta$  是饱和水汽压-气温关系曲线在  $T$  处的切线斜率; $\gamma$  是湿度计常数; $U_2$  是 2 m 高处的日平均风速(m·s<sup>-1</sup>)。作物需水量可根据参考作物蒸散量计算得到,公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中, $ET_c$  是作物需水量(mm), $K_c$  是作物系数, $ET_0$  是参照蒸散量(mm)。作物系数和作物的生育阶段有关,将夏玉米的生育阶段划分为 3 个时段,即生长初期,生长中期,生长末期,各个阶段的作物系数分别为 0.3,0.15,0.6。

### 1.3 分析方法

运用趋势分析,相关系数, Morlet 小波分析,空间插值等方法对邢台地区夏玉米时空分布特征进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏玉米需水量年际变化趋势分析

使用上述公式,计算得到邢台地区 17 个站点夏玉米全生育期和各生育阶段需水量区域平均值的时间变化序列,结果表明:邢台地区夏玉米全生育期年均需水量为 426 mm,最大值为 516 mm,出现在 1972 年,最小值为 368 mm,出现在 1993 年。在夏玉米各生育时段,生长中期需水量最大,历年平均为 334 mm,占全生育期的比重为 78.4%;生长末期需水量历年平均为 69 mm,占全生育期需水量比重为 16.1%;生长初期需水量最小,历年平均为 23 mm,占全生育期需水量比重为 5.4%。

对邢台地区 17 个站点 1972—2014 年夏玉米全生育期和各生育阶段需水量的平均值进行趋势分析,由图 1 可以看出夏玉米全生育期和各生育阶段的需水量均呈下降趋势。由表 1 可知,全生育期年需水量的趋势变化为 -1.01 mm,各生育阶段中,生长中期趋势变化最大,年变化量为 -0.65 mm,生长

初期的趋势变化最小,年变化量为 $-0.13\text{ mm}$ ;在近 43 a 的时间序列中,邢台地区夏玉米全生育期、生长初期、生长末期的需水量下降趋势变化均通过了信度 0.01 的显著性检验,生长中期趋势变化通过了信度 0.05 的显著性检验,表明了下降趋势明显,该结果也与李春强等<sup>[6]</sup>、刘晓英等<sup>[7-8]</sup>、曹红霞等<sup>[9]</sup>学者对夏玉米需水量的研究结果一致。

### 2.2 夏玉米需水量周期变化分析

在实际变化过程中,气象要素并非单调递增或者单调递减,常常在波动增减的基础上叠加了不同的变化周期。Morlet 小波方法在时域和频域上具有良好的局部性质,能更清楚地看出各周期随时间的变化特征。小波系数的模值是不同时间尺度变化周期所对应的能量密度在时间域中分布的反映。模值越大,代表所对应时段或尺度的周期性越强。

表 1 夏玉米全生育期和各生育阶段需水量变化统计表

Table 1 Statistical table of water requirement change of summer corn in growing season

生长期 Growth period	年均趋势系数/mm Annual trend coefficient	平均值/mm Average	相关系数 Correlation coefficient
生长初期 Initial season	-0.13	23	0.43 **
生长中期 Mid-season	-0.65	334	0.30 *
生长末期 Late season	-0.22	69	0.40 **
全生育期 Whole growth period	-1.01	426	0.39 **

注:“\*”、“\*\*”分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关。下同。

Note: “\*” and “\*\*” indicate significantly correlated at the levels of  $P<0.05$  and  $P<0.01$ , respectively. The same below.

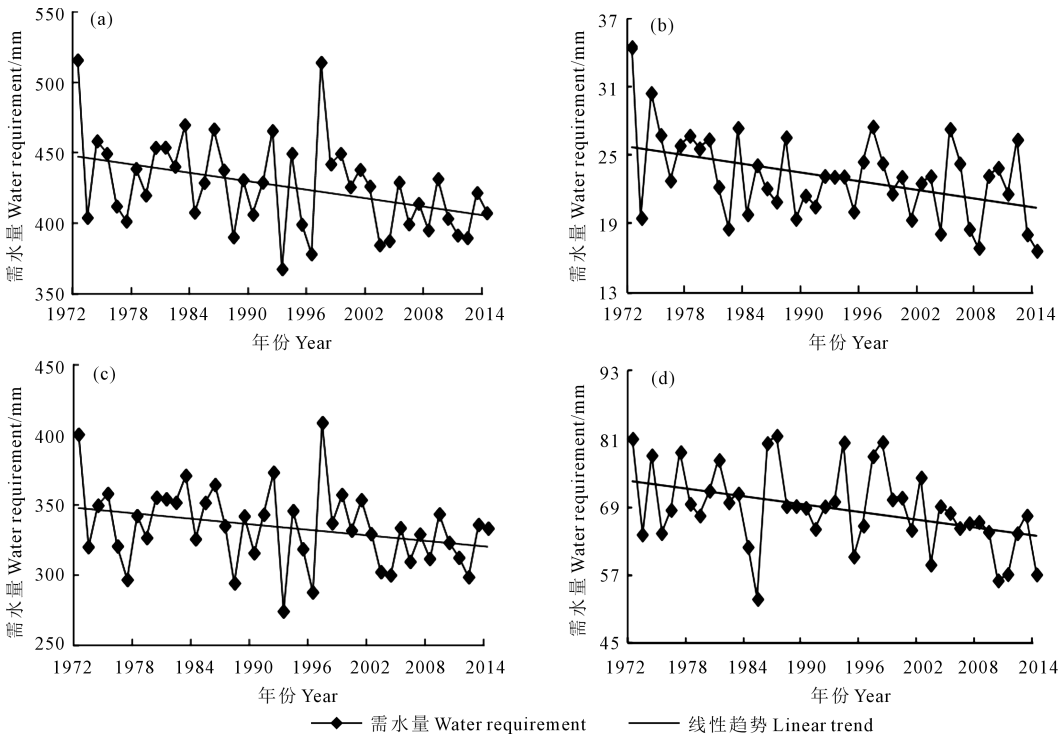


图 1 1972—2014 年邢台夏玉米全生育期 (a), 生长初期 (b), 生长中期 (c), 生长末期 (d) 需水量变化趋势  
Fig.1 Variation trends of water requirement of summer corn in the whole growth period (a), initial period (b), medium period (c) and end period (d) in Xingtai from 1972 to 2014

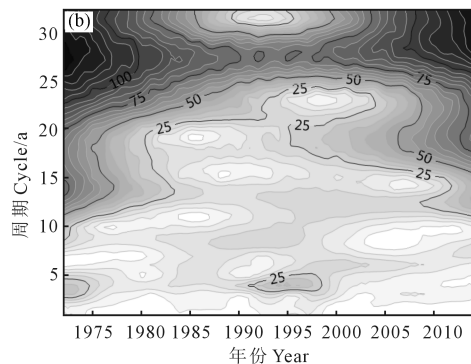
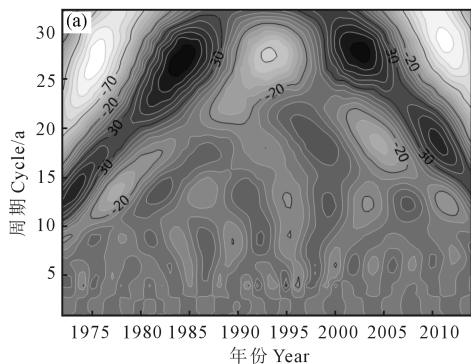
图 2(a) 是小波系数实部等值线图, 图中等值曲线为小波系数实部值, 颜色深代表偏多期, 颜色浅代表偏少期。小波系数实部等值线图能反映需水量序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布, 进而能判断在不同时间尺度上, 需水量的未来变化趋势。从该图中可以看出需水量从 1972 至 2014 年变化过程中存在着 23~32, 12~15, 3~6 a 的周期变化规律。

份, 纵坐标为时间周期, 图中颜色深代表模值大, 颜色浅代表模值小, 可以看出, 23~32 a 的模值最大, 说明该周期最明显。12~15, 3~6 a 的时间周期次之。

图 2(b) 是小波系数模等值线图, 横坐标为年  
小波方差图能反映需水量时间序列的波动能量随时间周期的分布情况 (图 3)。图 3 存在着 3 个明显的峰值, 它们依次对应着 4, 13 a 和 27 a 的时间周期。其中最大峰值对应着 27 a 的时间周期, 说明 27 a 左右的周期震荡最强, 为需水量变化的第一主

周期;13 a 左右的周期为第二主周期;4 a 左右的周期为第三主周期。以上 3 个周期的波动控制着需水量在整个时间域内的变化特征。

结合图 2、图 3 我们可以发现,邢台地区夏玉米需水量存在由偏多和偏少组成的周期性变化规律,



注:图(a)深颜色代表偏多期,浅颜色代表偏少期;图(b)深颜色代表模值大,浅颜色代表模值小。

Note: The darker color in (a) represents positive effect, and the lighter color represents negative effect; the darker color in (b) represents a larger value of modulus, and the lighter color represents a smaller value of modulus.

图 2 1972—2014 年邢台夏玉米需水量系数实部 (a),小波模(b)等值线

Fig.2 The contour map of wavelet coefficient real part (a) and modulus (b) of summer maize in Xingtai from 1972 to 2014

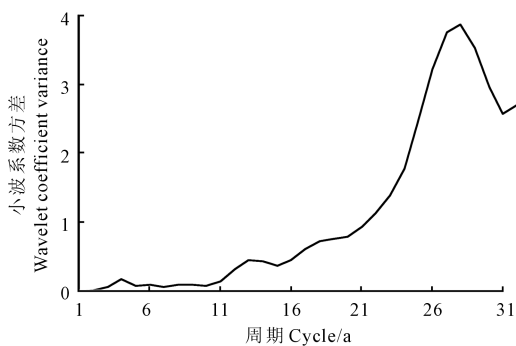


图 3 1972—2014 年邢台夏玉米需水量小波系数方差

Fig.3 The wavelet coefficient variance of water requirement of summer corn in Xingtai from 1972 to 2014

### 2.3 夏玉米需水量空间分布特征

1972—2014 年,邢台地区 17 个气象站夏玉米全生育期平均需水量为 426 mm,变化范围为 403~445 mm。使用克里格插值法对各气象站全生育期年均需水量进行空间插值,得到近 43a 邢台地区平均需水量空间分布,如图 4 所示;其中清河、巨鹿、平乡、南宫、新河需水量为 430 mm 以上;宁晋、广宗、沙河、临城、威县、隆尧、任县、临西需水量为 420~430 mm;内丘、柏乡、南和、邢台需水量为 420 mm 以下。从蓄水量的空间分布上来看,可以看出其空间分布整体呈现出东部最大,西部次之,中部最少的分布特征。

### 2.4 夏玉米需水量与气象因子的关系

作物需水量的影响因素包括内部因子和外部因子。其中内部因子是指对需水规律有影响的生

其中 23~32 a 的周期非常稳定,因此可以判断出在经历过 20 世纪初期的减少期后,该地区夏玉米需水量在 2014 年之后进入偏多期,这说明在未来的 11~16 a 内邢台地区的夏玉米需水量呈偏多状态,需要在农业生产过程中加以重视。

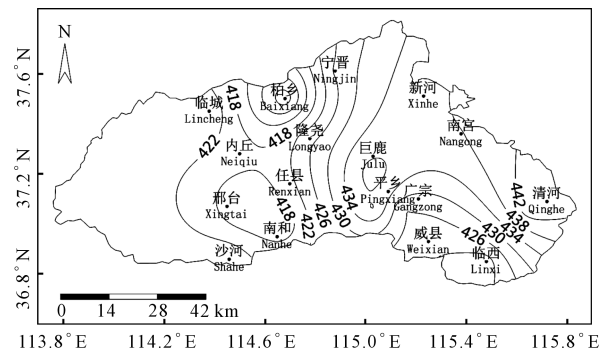


图 4 1972—2014 年邢台夏玉米需水量空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of water requirement of summer corn in Xingtai from 1972 to 2014

物学特征,与作物种类、品种以及生长阶段有关。气候条件属于外部因子,在土壤水分充足的条件下,气象因素是影响作物需水量的主要因素<sup>[13]</sup>。对需水量和各气象因子进行相关性计算,得到相关系数如表 2,夏玉米需水量和最高气温、平均气温、日照时数及风速呈正相关;与水汽压和最低气温呈负相关。按照相关系数绝对值排名分别为日照时数,风速,最高气温,水汽压,均通过了信度 0.01 的显著性检验。根据张耘铨<sup>[14]</sup>、郭艳岭<sup>[15]</sup>、张益焯<sup>[16]</sup>、张素云<sup>[17]</sup>等的相关研究,虽然高温对夏玉米需水量的增加有正向效应,但河北省夏玉米需水量减少的主要原因是日照时数的减少、太阳辐射的减少和风速的下降,这也与许多学者对夏玉米需水量研究的结果一致<sup>[18-19]</sup>。

表2 邢台夏玉米需水量和气象因子相关系数

Table 2 Correlation coefficients between water requirement of summer corn and meteorological factors

气象因子 Meteorological factor	最高气温 Maximum temperature	最低气温 Minimum temperature	平均气温 Average temperature	水汽压 Vapor pressure	日照时数 Sunshine hours	风速 Wind speed
相关系数 Correlation coefficient	0.44**	-0.19	0.17	-0.43**	0.79**	0.64**

### 3 讨论

本文所用的潜在蒸散量模型( $ET_0$ )以及作物系数模型( $ET_c$ )均为世界粮农组织所推荐,其中:潜在蒸散量模型( $ET_0$ )整合了湍流能量传输特征、能量平衡状况以及植被的生理特性等,充分分析了影响因素,是目前获得潜在蒸散量精度较高的一种方法<sup>[20]</sup>。该模型的模拟效果准确,在湿润或干旱半干旱地区都有很好的计算结果<sup>[21]</sup>。作物系数模型( $ET_c$ )采用了世界粮农组织所推荐的不同大洲不同区域的玉米作物系数( $K_c$ )值,同样具有代表性和较好的精度<sup>[6]</sup>。通过上述两个数学模型将邢台地区玉米需水量的研究转化为数学问题的研究,再经过本地化参数引入以及地区推荐数值的代入,精确地计算出了邢台地区17个县市夏玉米的需水量,结果表明:邢台夏玉米全生育期及各生长阶段需水量呈波动下降趋势,这与我国大部分地区参照蒸散量呈下降趋势相一致<sup>[22-23]</sup>。近年来河北省大部分地区气温明显升高<sup>[23]</sup>,但是邢台地区夏玉米需水量并未因此增加,其原因是气温变化的同时,其他气象要素如日照时数、太阳辐射、水汽压、风速等也发生了变化<sup>[15-17,24-25]</sup>,多气象要素的变化抵消了气温升高对需水量正向影响的增加。该数据的计算系统全面了解邢台地区夏玉米作物需水耗水规律,在气候变暖和水资源的大背景下,对于该地区节水农业的发展、水资源的节约管理,水分利用效率的提高以及作物产量的模拟预测,具有重要的现实意义和理论指导作用。

### 4 结论

本文利用邢台地区17个国家地面气象站1972—2014年的逐日气象资料,采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的Penmen-Monteith公式及作物系数法,计算了该地区夏玉米全生育期和各生育阶段的需水量,并进行了时间序列的统计分析,得出结论如下:

1)近43 a来,邢台夏玉米全生育期及各生长阶段需水量呈现波动下降趋势,下降趋势相关系数均通过了0.05以上的显著性检验,表明下降趋势

明显。

2)邢台夏玉米需水量随时间的变化存在大小不同的周期变化特征,经分析存在23~32,12~15,3~6 a的周期变化规律,其中23~32 a的周期非常稳定。

3)邢台夏玉米各站点年均需水量范围为403~445 mm。从空间分布来看,需水量呈现出东部最大,西部次之,中部最少的分布特征。

4)邢台夏玉米需水量和气象因子关系密切,与最高气温、平均气温、日照时数及风速呈正相关,与水汽压和最低气温呈负相关。其中影响需水量的主要气象因子是日照时数,风速和最高气温。

#### 参考文献:

- [1] 房军,方小宇,吕东玉,等. 丘陵半干旱区作物需水量规律的研究进展[J]. 安徽农业科学,2006,34(19):4847-4849.
- [2] 刘小刚,符娜,李闯,等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报,2015,46(9):188-197.
- [3] 侯晓丽,冯跃华,吴光辉,等. 大型灌区作物需水量计算与气象影响因素分析[J]. 节水灌溉,2016,(10):120-122.
- [4] 王宏,谭国明,孙庆川,等. 承德春玉米需水量变化特征及其与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报,2012,28(4):69-72.
- [5] 何平,毕伯钧,魏军. 本溪地区土壤水分盈亏与农业干旱关系的研究[J]. 气象与环境学报,2005,21(2):9-10.
- [6] 李春强,李保国,洪克勤. 河北省近35年农作物需水量变化趋势分析[J]. 中国生态农业学报,2009,17(2):359-363.
- [7] 刘晓英,李玉中,郝卫平. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报,2005,21(10):155-159.
- [8] 刘晓英,林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报,2004,35(2):77-82.
- [9] 曹红霞,粟晓玲,康少忠,等. 关中地区气候变化对主要农作物需水量影响的研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):6-9.
- [10] 杜运生. 邢台市夏玉米高产创建的途径及关键技术[J]. 现代农业科技,2010,(17):12.
- [11] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. proceedings of royal society, series A, 1948, 193(1032):120-145.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration and drainage paper No.56[M]. Food and agriculture organization of the united nations, Rome, Italy: Water Resources Development and Management Service FAO, 1998:15-27.
- [13] 宋迪,陈晓飞,胡宇祥,等. 彭曼模型在预测作物需水量中的应用[J]. 农机化研究,2009,31(8):163-165.
- [14] 张耘铨,刘继龙,聂堂哲. 基于CROPWAT模型的玉米需水量及灌

- 溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 67-75.
- [15] 郭艳岭, 邱新法, 张素云. 1965—2005 年河北日照时数时空分布特征及影响因子[J]. 干旱气象, 2010, 28(3): 297-303.
- [16] 张益炜, 袁淑杰, 高旭旭, 等. 1961—2010 年河北省太阳直接辐射时空分布特征研究[J]. 气象与环境学报, 2014, (1): 95-99.
- [17] 张素云. 近 47a 河北省风速演变特征[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [18] 曹永强, 李晓瑞. 河北省夏玉米主产区作物需水量和缺水研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, (10): 141-147.
- [19] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015 年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 217-227.
- [20] 王琼, 张明军, 潘淑坤, 等. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1292-1302.
- [21] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005, (3): 276-283.
- [22] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 137-143.
- [23] 龙幸幸, 杨路华, 夏辉, 等. 河北省参考作物蒸散量时空变异性分析[J]. 水电能源科学, 2016, (8): 40-44.
- [24] 李鹏飞, 刘文军, 赵昕奕. 京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 137-143.
- [25] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 1-11.

(上接第 242 页)

- [17] Li Z T, Yang J Y, Smith W N, et al. Simulation of long-term spring wheat yields, soil organic C, N and water dynamics using DSSAT-CSM in a semi-arid region of the Canadian prairies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(3): 401-419.
- [18] Fleisher D H, Cavazzoni J, Giacomelli G A, et al. Adaptation of SUBSTOR for controlled-environment potato production with elevated carbon dioxide[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 531-538.
- [19] Sau F, Boote K J, Bostick M N, et al. Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(5): 1243-1257.
- [20] 黄洁. 基于 DSSAT 模型豫北冬小麦-夏玉米保护性耕作下农田水、碳、氮含量变化模拟分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [21] Singh S, Boote K J, Angadi S V, et al. Estimating water balance, evapotranspiration and water use efficiency of spring safflower using the CROPGRO model[J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 137-144.
- [22] 史源, 李益农, 白美健, 等. DSSAT 作物模型进展以及在农田管理中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2015, (1): 15-19.
- [23] 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1004-1010.
- [24] Kadiyala M D, Nedumaran S, Singh P, et al. An integrated crop model and GIS decision support system for assisting agronomic decision making under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2015, 521-522(6): 123-134.
- [25] Heinemann A B, Hoogenboom G, Faria R T D. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS: an example for the State of Parana, Brazil[J]. Agricultural Water Management, 2012, 52(3): 177-196.
- [26] Hartkamp A D, White J W, Hoogenboom G. Interfacing geographic information systems with agronomic modeling[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(5): 761-772.
- [27] 丁妍. 应用 DSSAT 模型评价土壤硝态氮淋洗风险——以北京大兴区为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [28] 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [29] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 648-654.
- [30] 曹永强, 李晓瑞. 河北省夏玉米主产区作物需水量和缺水研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, (10): 141-147, 152.