

# 河北省冬小麦、棉花全生育期缺水量时空特征分析

曹永强, 李维佳, 朱明明

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:**基于河北省 13 个国家标准气象站点近 60 年(1955—2014 年)的逐日气象数据,利用联合国粮农组织(FAO)推荐的作物需水规律计算方法以及曼—肯德尔(M-K)法、Morlet 小波分析法和普通克里金插值法分别对河北省冬小麦、棉花的缺水量和水分盈亏指数的时空规律进行了分析。结果表明:(1)近 60 年,河北省全生育期冬小麦缺水量以  $-3.74 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10 \text{ a})$  的速率呈减少趋势,棉花以  $-22.88 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10 \text{ a})$  的速率呈显著性减少趋势,并且两种作物的缺水量变化均存在 40 年左右的主周期和 25 年左右的次周期。全生育期内冬小麦缺水量最大值出现在南宫,缺水量最小值出现在秦皇岛;棉花缺水量最大值均出现在黄骅,遵化缺水量最小。(2)两种作物的缺水量最大时期均为快速发育期,冬小麦在冻融期时缺水量最少,而棉花在初始生长期缺水量最少;冬小麦在初始生长期水分盈亏指数达到最大值,而棉花在生育中期达到最大值,并且地区差异较小。(3)河北省冬小麦、棉花的缺水量空间分布不均,两种作物水分盈亏指数恰与之相反,基本上呈由中心向四周逐渐增大的分布特征。研究结果对农业灌溉水资源优化配置、提高农业灌溉效率具有实际意义。

**关键词:** 缺水量; 水分盈亏指数; 冬小麦; 棉花; 河北省

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>1; S56; S274

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)06-0348-09

## Temporal and Spatial Characteristics of Water Deficit of Winter Wheat and Cotton in Hebei Province

CAO Yongqiang, LI Weijia, ZHU Mingming

(School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

**Abstract:** Based on the daily meteorological data of 13 national standard meteorological stations in Hebei Province in recent 60 years (1955—2014), the water deficit and moisture gain and loss index of winter wheat and cotton in Hebei Province were calculated respectively by using the calculation method of crop water requirement recommended by the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) and Man-Kendall (M-K) method, Morlet wavelet analysis method and ordinary Kriging interpolation method. The results showed that: (1) in the recent 60 years, the water deficit of winter wheat in the whole growth period in Hebei Province showed the decreasing trend with the rate of  $-3.74 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{decade})$ , and the water deficit of cotton showed the decreasing trend with the rate of  $-22.88 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{decade})$ . The changes of water deficit in both crops were about 40-year main period and 25-year sub-period. The maximum water deficit in winter wheat appeared in Nangong during the whole growth period, and the minimum value of water deficit appeared in Qinhuangdao. The maximum cotton water deficit occurred in Huanghua, had the least water deficit was found in Zunhua; (2) the water deficits of the two crops reached the maximum in the fast growing period. Winter wheat had the least water deficit during the freeze-thaw period, while cotton had the least water deficit during the initial growing season. The water deficit index of winter wheat reached the maximum value at the initial growth stage. Water deficit of cotton reached the maximum at the middle stage of growth, and the difference was little among different regions; (3) the spatial distribution of water shortage in winter wheat and cotton in Hebei Province is uneven. The water deficit indices of two crops were opposite, and the distribution characteristics gradually increase from center to periphery. The results of this study are of practical

significance to optimize irrigation water resource allocation and improve the irrigation efficiency of agricultural irrigation water resources.

**Keywords:** water shortage; moisture profit and loss index; winter wheat; cotton; Hebei Province

水资源作为不可替代和不可或缺的自然资源,为社会发展提供了极大的动力<sup>[1]</sup>。目前,在工业、农业、生活、生态用水结构中农业水资源利用量占比最大<sup>[2]</sup>,据2016年水资源公报显示<sup>[3]</sup>,农业用水为3 768.0亿m<sup>3</sup>,占用水总量的62.4%。河北省是我国农业大省,也是水资源严重短缺的地区之一,长期超采地下水进行农业灌溉,对区域水资源及水环境的安全造成了严重的破坏。冬小麦、棉花作为河北省的主要农作物,受当地旱涝灾害频繁影响,而缺水量(W)与水分盈亏指数(I)可以直接反映农作物的旱涝情况。因此科学合理地确定缺水量与水分盈亏指数变化是进行农业水资源优化管理、合理制定灌溉方案的重要依据。

缺水量研究概括起来主要有3类<sup>[4-5]</sup>,第1类是通过田间试验来直接计算作物缺水量与其影响因素之间的关系<sup>[6-7]</sup>,该方法计算简单直接,但易受观测值测量精度影响;第2类是基于参考作物蒸散量计算实际作物需水量以及缺水量<sup>[8]</sup>,只需利用常规气象资料便可较为准确地计算出参考作物的缺水量,此法的实际运用价值和计算精度都比较高,更为可靠;第3类是通过遥感技术计算作物缺水量<sup>[9-10]</sup>,遥感技术优势显著,但由于气象及观测角度等因素的影响,遥感数据有效与否质疑性较大。近年来,我国学者对农作物缺水量的问题也进行了大量研究,其研究方法同样可概括为3类,分别为土壤水量平衡法、微气象学法和能量平衡法,其中较为熟知的Penman综合法就属于能量平衡法的一种,该方法只需利用常规气象资料便可较为准确地计算出参考作物的缺水量,已成为计算参考作物缺水量的一种主要方法。姬兴杰等<sup>[11]</sup>采用美国土壤保持局推荐的方法计算出未来气候变化对河南省冬小麦缺水量的影响,并得出缺水量的距平百分率在空间分布上具有差异、未来河南省水资源可能更趋于短缺的结论;殷志强等<sup>[12]</sup>运用DNDC模型和GIS数据计算东北三省主要作物缺水量,发现辽宁省作物缺水量最为严重,为562.1亿m<sup>3</sup>,并且缺水情况将进一步加剧;邱兆美等<sup>[13]</sup>通过试验建立作物不同缺水量对作物叶面积和茎秆直径变化的影响,判断出不同作物缺水量所表现出来的生理指标变化,总结出作物缺水量是作物生长需求的重要指标之一。

目前,国内外对作物缺水量以及气候对其影响已成为人们关注水资源的一个重要方面。虽然有关作物耗水、需水量的文章逐渐增多,但相关研究大部分

以作物生态需水为依据建立作物需水模型,不能直接反映作物本身的生理需求,满足不了对作物适当的水分补给。鉴于此,本文以河北省为研究区域,试探究该地区种植面积较大且种植结构较为稳定的冬小麦、棉花两种作物全生育期内缺水量的时空规律特征。旨在为今后河北省农业水资源优化配置、农业种植结构调整以及农业灌排等方面的研究与决策提供理论依据。

## 1 研究区概况、数据与方法

### 1.1 研究区概况

河北省地处北纬36°05′—42°40′,东经113°27′—119°50′,占地总面积18.77万km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>,年均降水量503.5mm,主要集中在夏季,多年平均气温为11.8℃,属于温带半湿润半干旱大陆季风气候,四季分明,气候条件较好,适合多种农作物生长<sup>[15]</sup>。近年来,河北省农业经济持续保持快速发展的态势,粮食生产实现“十连增”<sup>[16]</sup>。其中,小麦播种面积234.27万hm<sup>2</sup>,产量为1 429.9万t;棉花播种面积41.09万hm<sup>2</sup>,产量43.1万t<sup>[17-21]</sup>,农业的发展为河北省的社会经济带来巨大效益,此外,主要农作物产量的增长也增加了河北省的农业用水量。

### 1.2 数据来源

由于河北省冬小麦和棉花的种植主要分布于省内的中部和南部地区,因此,本文选取了河北省13个气象站点的气象数据,时间范围为1955—2014年。具体气象站点分布及作物种植区分布情况如图1所示。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的逐日数据集,主要包括日照时数、平均相对湿度、平均风速、20时—20时降水量、最低气温、最高气温、平均气温、平均气压等。

作物系数的数据来源于FAO编写的《作物需水计算指南》<sup>[22]</sup>中查找标准条件下冬小麦和棉花的作物系数:

冬小麦:  $K_{\text{cni}}(\text{Tab}) = 0.7$  (初始生长期);  $K_{\text{cfro}}(\text{Tab}) = 0.4$  (越冬期);  $K_{\text{cmid}}(\text{Tab}) = 1.15$  (生育中期);  $K_{\text{cend}}(\text{Tab}) = 0.4$  (成熟期);  $h$  (冬小麦高度) = 1

棉花:  $K_{\text{cni}}(\text{Tab}) = 0.35$  (初始生长期);  $K_{\text{cmid}}(\text{Tab}) = 1.2$  (生育中期);  $K_{\text{cend}}(\text{Tab}) = 0.7$  (成熟期);  $h$  (棉花高度) = 1.5

作物生育期数据来源于当地农业气象试验站,对两种主要作物(冬小麦、棉花)发育期数据进行统计后取多

年平均值。其中,棉花的作物系数变化主要分为初始生长期、快速发育期、生育中期和成熟期 4 个阶段,由于冬小麦具越冬特性,因此共划分 6 个阶段:初始生长期、冻融期、越冬期、快速发育期、生育中期、成熟期,由于北方冬小麦在冬季  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  时麦苗基本停止生长,因此还具有融冻期和越冬期,并且冬小麦不同生育期对水分的需求量不同,另外,冬小麦的冻融期和棉花的快速发育期作物系数值参考文献[22-23], $h$  代表作物的生长高度。

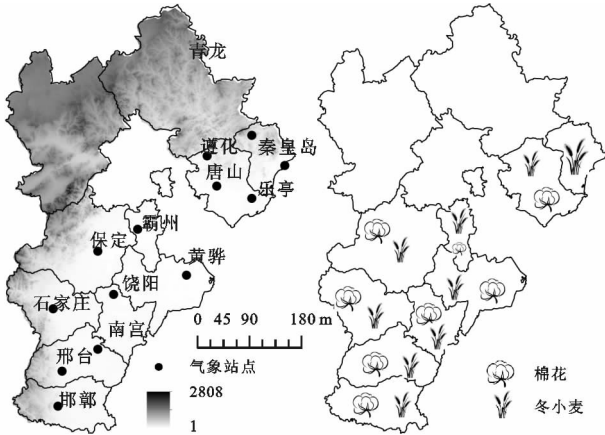


图 1 气象站点及作物种植区分布

### 1.3 研究方法

1.3.1 缺水(W)计算 作物缺水(W)又叫灌溉需水量,指在全生育期内各个生育阶段同期需水量和有效降雨量的差值。若  $W>0$ ,表示作物缺水,需补充灌溉;若  $W=0$ ,表示水分供需平衡;若  $W<0$ ,表示作物不缺水。公式为:

$$W = ET_c - P_e \quad (1)$$

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

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: $ET_c$ 为作物需水量(mm); $P_e$ 为作物生育期内的有效降雨量(mm); $K_c$ 为作物系数; $ET_0$ 为逐日作物蒸散量(mm),采用 Penman-Monteith 公式[24-25]计算; $\Delta$ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值(kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ); $R_n$ 为作物表面的净辐射量(MJ/ $\text{m}^2$ ); $\gamma$ 是湿度计常数(kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ); $T$ 为日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $u_2$ 为 2 m 高处风速(m/s); $G$ 为土壤热通量[MJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )]; $e_s$ 为空气饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa/ $^{\circ}\text{C}$ )。

$$P_{ei} = \begin{cases} P & P \leq ET_c \\ ET_c & P > ET_c \end{cases} \quad (4)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_{ei} \quad (5)$$

式中: $P_{ei}$ 为日有效降雨量(mm); $P$ 为日降雨量(mm); $P_e$ 为作物生育期内的有效降雨量(mm); $n$ 为生育期按旬分组的数量。

1.3.2 水分盈亏指数(I)计算 作物 I 是农业生产监测、管理等方面的重要指标,更能反映农作物水分盈亏和旱涝状况,通过计算可得作物水分供需关系,同时可以反映作物生长对水分的需求状况。 $I$  越小则说明干旱程度越严重, $W$  越大,因此  $I$  与  $W$  呈负相关。

$$I = \frac{P_e - ET_c}{ET_c} \quad (6)$$

式中: $I$  为水分盈亏指数。当  $I>0$  时,作物供水量>需水量;当  $I=0$  时,供水量=需水量;当  $I<0$  时,作物供水量<需水量。

1.3.3 分段单值平均系数法 分段单值平均作物系数法是一种无需大量数据下的一种较为简单的计算作物系数的方法,可广泛应用于作物生育期缺水量的计算、灌溉系统规划设计以及灌溉管理等方面。该方法是根据各阶段叶面蒸腾和土面蒸发的变化规律,用一个时段平均值表示该阶段的作物系数[26]。但该方法要求时段大,且未充分考虑土壤的影响。具体计算公式此处不再赘述,详见参考文献[26]。该方法结合作物全生育期内的 4 个阶段,作物系数根据 4 个阶段分为 3 个值进行计算,4 个阶段的划分为:(1) 初始生长期,从播种到作物覆盖率约达到 10%。此时期内作物系数为  $K_{cini}$ 。(2) 快速发育期,从覆盖率 10%到作物覆盖率约为 75%;此时期内作物系数从  $K_{cini}$  提高到  $K_{cmid}$ 。(3) 生育中期,从充分覆盖到成熟期开始,叶片逐渐变黄。此时期内作物系数为  $K_{cmid}$ 。(4) 成熟期,从叶片开始逐渐到生理成熟或收获。此时期内作物系数从  $K_{cmid}$  下降到  $K_{cend}$ 。

1.3.4 数据处理与图像分析方法 普通克里金是基于 GIS 平台的一种应用较广泛的克里金插值方法,该方法假设采样点值不存在潜在的全局趋势,只用局部因素就可以很好地预测未知值,相对于传统插值方法精度较高[27-28]。本文利用普通克里金插值来实现河北省冬小麦和棉花  $W$ ,  $I$  的空间变化。

曼-肯德尔法(Mann-Kendall)是一种非参数统计检验方法[29]。该方法借助 Matlab 软件的程序编写对序列数据进行计算,得到 UF 与 UB 两条曲线,并用于检验序列的变化趋势。若 UF 或 UB 的值大于 0,则表示序列呈上升趋势,小于 0 则表示序列呈下降趋势。当 UF 与 UB 两条曲线出现交点时,且交点在临界值之间则表示该时刻为突变开始时刻。本文运用曼-肯德尔法对河北省冬小麦和棉花的  $W$  及  $I$  的时间变化趋势进行分析,并得到了  $W$  和  $I$  在研究时段内的突变点时刻。

小波分析法能够同时从时域和频域两个方面揭示时间序列的局部特征,因此适合于研究具有多时间

尺度变化特征和非平稳特性的水文时间序列<sup>[30]</sup>,本文通过小波方差图和小波等值线图来判定河北省冬小麦和棉花全生育期内  $W$  及  $I$  的变化周期。

2 结果与分析

2.1 河北省冬小麦缺水量时空变化特征

2.1.1 时间规律特征分析 河北省冬小麦  $W$  年际趋势变化如图 2 所示。整体以  $-3.74\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{ a})$  的速率呈下降趋势,年际间差异较小,平均为  $594.26\text{ mm}$ 。图 2 绘出的 UF 曲线,若 UF 或者 UB 的值大于 0,则表明

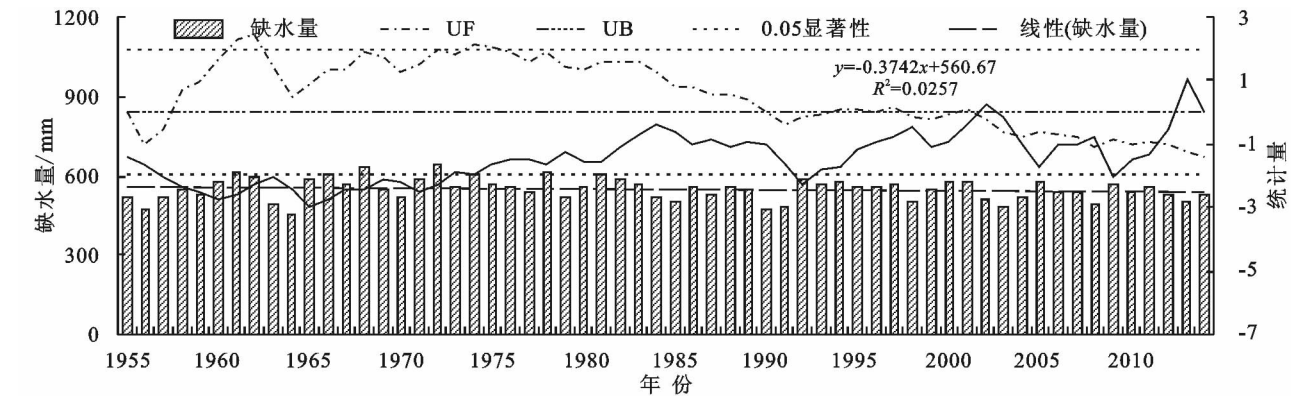
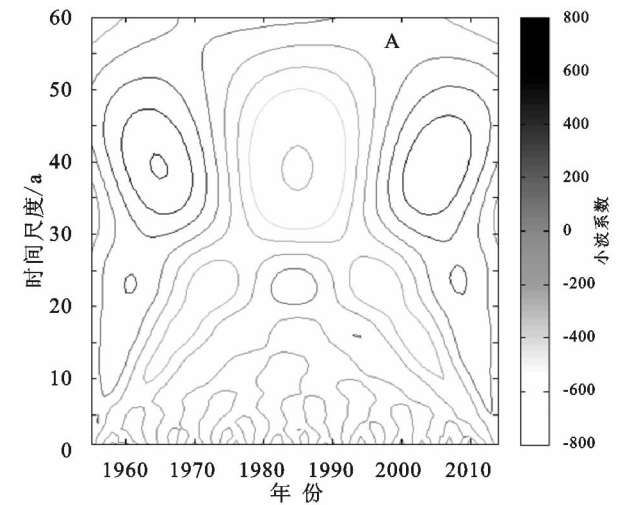


图 2 河北省冬小麦缺水量年际趋势变化

进一步分析其周期性问题,由小波变换等值线图(图 3A)可以明显发现,河北省冬小麦  $W$  在  $30\sim 50\text{ a}$  尺度上震荡周期较为显著,此外  $W$  在  $10\sim 28\text{ a}$  有小幅度的震荡,但没有明显波峰出现。结合小波方差图(图 3B), $40\text{ a}$  左右小波方差出现最大峰值,此外在  $25\text{ a}$  左右出现第 2 个峰值,故此可以判断,河北省冬小麦  $W$  存在  $40\text{ a}$  左右的震荡主周期和  $25\text{ a}$  左右的震荡次周期,并且呈现“大一小一大”的变化特征。

从时间序列上看,冬小麦年平均  $W$  整体呈下降趋势变化,气候因素是影响作物缺水量的主要因素,



近 60 年河北省冬小麦在不同生育期内缺水量的

缺水量整体呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势,根据图 2 中冬小麦  $W$  的升降趋势特征大致可分为 3 个阶段:1955—1976 年呈增减交替趋势变化,1964 年冬小麦的  $W$  最小,仅为  $450.84\text{ mm}$ ,1973 年冬小麦  $W$  最大,达到  $640.66\text{ mm}$ ;1977—1990 年,呈不显著增加趋势变化;1990 年以后,河北省冬小麦  $W$  呈显著性减少趋势变化,且年际间缺水量差异较小。突变检验发现,UF 曲线和 UB 曲线共出现 5 个交点,但由于 UF 统计量曲线基本都在 0.05 显著水平线之间,即年均缺水量的变化趋势不显著,没有发生明显的突变。

缺水量变化趋势很可能是气候自然波动影响的结果<sup>[11]</sup>,因此在农业灌溉时期需要加强对冬小麦  $W$  进行预测分析,提前做好抗旱准备。

2.1.2 空间分布特征分析 如附图 6 所示,河北省冬小麦的  $W$  空间分布不均,各个站点之间差距较大, $W$  变化范围为  $462\sim 662\text{ mm}$ ,平均为  $551.13\text{ mm}$ ;其中,全生育期  $W$  最大的为南宫,达到  $661.59\text{ mm}$ ;其次为黄骅,冬小麦的  $W$  为  $626.88\text{ mm}$ , $W$  最小的为秦皇岛和邢台,全生育期内的  $W$  分别为  $462.03\text{ mm}$  和  $467.34\text{ mm}$ 。

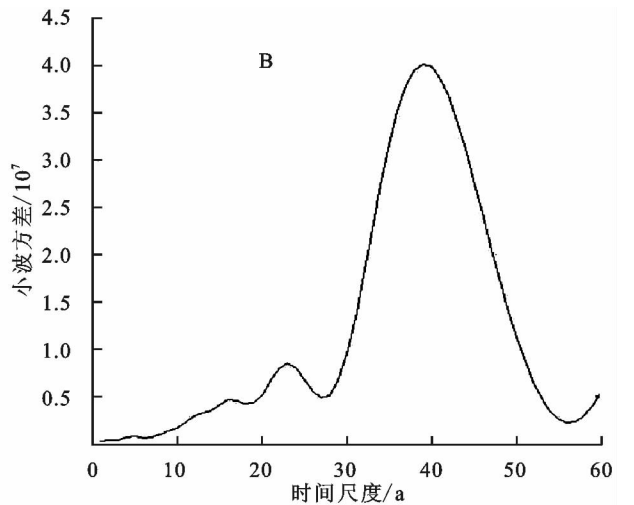


图 3 河北省冬小麦缺水量周期分析

空间分布情况如附图 7—8 所示。初始生长期冬小麦

W 平均值为 39.79 mm,不同站点多年平均有效降雨量变化为 27.78~50.41 mm,其中:冻融期冬小麦最小,平均值为 5.46 mm,空间分布差异较小,变化范围在 3.64~7.72 mm;越冬期冬小麦 W 的平均值为 54.58 mm,变化范围在 36.42~77.21 mm;快速发育期冬小麦 W 平均值为 195.22 mm,是冬小麦最为严重的时期,其中,秦皇岛最小,为 132.52 mm,南宫最大,是秦皇岛 W 的 198.06%;生育中期冬小麦 W 分布特征与河北省全生育期冬小麦 W 分布特征基本一致,平均值为 180.44 mm,黄骅 W 最大,为 214.66 mm,邢台 W 最小,为 150.83 mm;成熟期冬小麦的 W 平均值为 75.65 mm,变化范围在 62.39~86.55 mm,黄骅缺水最大,秦皇岛的缺水最小。

从上述分析可以看出,各个时期冬小麦 W 的分布特征各不相同,而且河北省中部地区的灌溉用水供需矛盾尖锐,在冬小麦生长过程中,不同生育阶段的 W 带来的影响完全不同,特别是在冬小麦的快速发育期和生育中期,冬小麦在这两个阶段水分亏损严重,若灌溉水量不充足冬小麦产量存在极大的风险;

初始生长期灌溉能显著提高冬小麦快速发育期和生长中期的株高增长速率,而快速生长期灌溉对株高的影响较成熟期小,成熟期灌溉对促进叶面积指数增长效果最为显著。因此,要在不同生长期给冬小麦补给适当的水分,才可达到节水、增产、高效的生产目标,与姬兴杰等<sup>[11]</sup>的研究结果相吻合。

## 2.2 河北省棉花缺水量(W)时空变化特征

2.2.1 时间规律特征分析 图4为河北省棉花缺水量近60年年际趋势变化图。河北省棉花的W整体呈显著性下降趋势,变化倾向率为 $-22.88 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10 \text{ a})$ ,年际间平均作物W为457.89 mm,年际间差异较大。近60年来棉花的增幅变化较大,根据图4中绘制的UF曲线,具体可分为2个阶段。1955—1988年,棉花W呈不显著下降趋势,且在1968年,棉花W达到最大,为602.48 mm;1988年以后,河北省棉花W显著性下降的趋势变化,且在1995年出现最小值,仅为339.43 mm,2014年棉花W为401.53 mm。近60年的变化过程中UF曲线和UB曲线共出现1个交点,不在临界线范围内,因此河北省棉花W无明显的突变点。

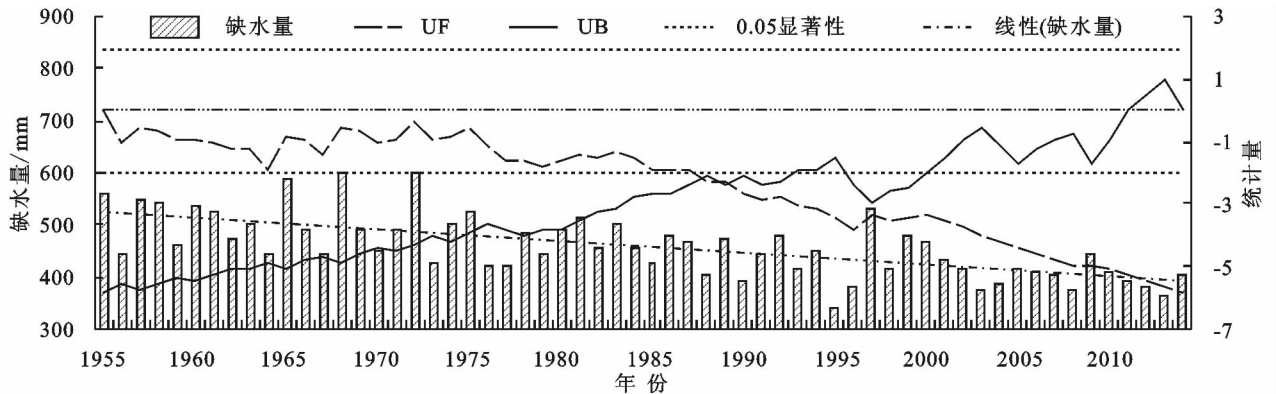


图4 河北省棉花缺水量年际趋势变化

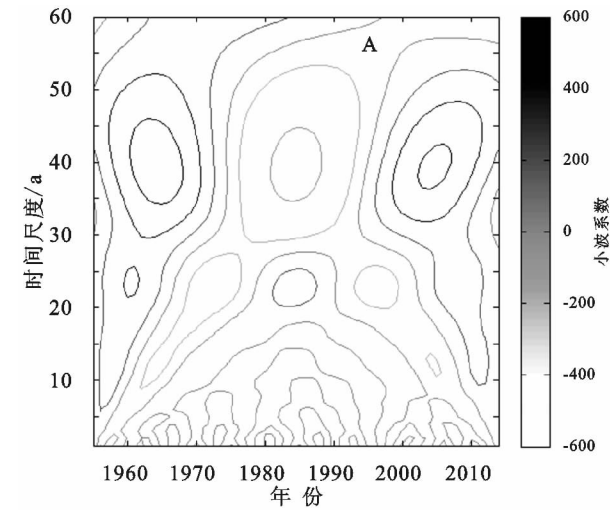
河北省棉花 W 周期变化如图 5 所示。总体来看,由小波变换等值线图(图 5A)可以明显看出,河北省棉花在 30~50 a 大时间尺度上周期性震荡显著,此外在 15~28 a 左右的小时间尺度上的周期性也很明显。结合小波方差图(图 5B),40 a 左右小波方差出现最大峰值,此外在 25 a 左右出现第 2 个峰值,可以判断,河北省棉花 W 存在 40 a 左右的震荡主周期和 25 a 左右的震荡次周期,因此要在干湿交替的过渡期做好对棉花的灌溉准备。

2.2.2 空间分布特征分析 河北省近 60 年棉花全生育期 W 的空间分布情况如附图 9 所示。河北省棉花 W 空间差异较明显,W 范围为 366~497 mm,平均为 434.57 mm;其中,全生育期 W 最大的站点为黄骅(496.57 mm);其次为霸州(469.713 mm),缺水最小的为遵化和邢台,全生育期内分别为 366.66 mm 和 374.03 mm。

如附图 10 所示,近 60 年棉花 W 在同一生育期内空间差异较小,各个站点不同生育期之间差异较大,并且棉花不同生育期对水分的需求量不同。初始生长期 W 平均值为 35.12 mm,W 分布在 31.61~43.22 mm;快速发育期棉花 W 平均值为 197.23 mm,相较于其他生育期空间差异较大,其中邯郸 W 最大,达到 224.04 mm,其次为黄骅、霸州和饶阳,W 均大于 210.00 mm,邢台 W 最小,为 163.67 mm;生育中期棉花 W 平均值为 159.86 mm,W 分布在 131.91~188.81 mm,最大值和最小值分别出现在黄骅和遵化;成熟期棉花 W 平均值为 42.36 mm,W 分布在 35.71~52.47 mm。

从上述分析可知,与冬小麦相似,由于地理环境的不同及气候条件的差异导致河北省中部地区棉花灌溉用水量较大,但从总体上看,在棉花快速发育期 W 较大,会使河北省在此时阶段的水资源趋于紧张,

应该加大对棉花需水量的灌溉补给。同时,在不同的生育期内要将土壤水分控制在合理范围内,不仅对棉花的光合作用有利,而且降低了植株的奢侈蒸腾,减少了土壤水分的无效消耗,提高叶片的水分利用效率。



棉花的快速发育期和生长中期是需水的关键时期,在灌溉上应优先满足其需水要求,否则会造成严重的减产<sup>[31]</sup>。在初始生长期控制灌水,不仅不影响产量,而且能提高水分利用效率。

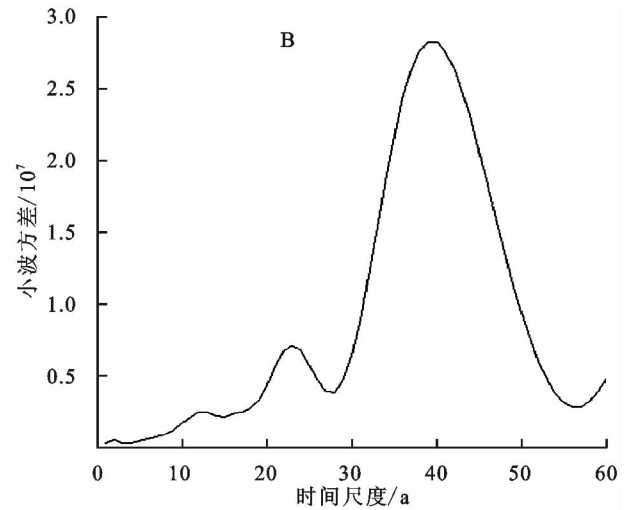


图 5 河北省棉花缺水量周期分析

2.3 河北省冬小麦水分盈亏指数(I)时空变化特征

2.3.1 时间分布特征分析 如图 6 所示,河北省冬小麦的  $I$  整体呈增减交替变化,变化倾向率几乎为 0,年际间  $I$  的平均值为  $-0.91$ ,且年际间差异较小。冬小麦  $I$  最大值出现在 1963 年, $I$  为  $-0.86$ ,1978 年冬小麦的  $I$  最小,仅为  $-0.94$  mm。近 60 a 来冬小麦的  $I$  变化较小,根据图 6 绘制的 UF 曲线,可判断冬小麦水分盈亏指数的增减趋势变化,具体可分为 3 个阶段,即 1955—1974 年冬小麦  $I$  呈增减交替趋势的趋势变化;1975—2008 年,冬小麦  $I$  呈不显著性减少趋势变化,2008 年以后, $I$  呈不显著性增减的趋势变化,2014 年冬小麦  $I$  为  $-0.90$ 。近 60 a 的变化过程中 UF 曲线和 UB 曲线共出现 9 个交点,均在临界线范围内,但仅 1960 年两曲线交点之后的曲线变化趋势呈相反变化趋势,因此河北省冬小麦  $I$  在 1960 年出现突变点。

河北省冬小麦  $I$  如图 7 所示,总体来看,由小波

变换等值线图(图 7A)可以明显看出,河北省冬小麦  $I$  在 34~55 a 尺度上震荡周期较为显著,此外  $I$  在 20~28 a 期间有小幅度的震荡周期,但没有明显波峰出现。结合小波方差图(图 7B),40 a 左右小波方差出现最大峰值,此外在 25 a 左右出现第 2 个峰值,可以判断,河北省冬小麦  $I$  存在 40 a 左右的震荡主周期和 25 a 左右的震荡次周期,次周期的周期性并不显著,周期整体并且呈现“大一小一大”的变化特征,与小波等值线的分析结果基本一致。将河北省冬小麦  $W$  与  $I$  的震荡周期结合来看,变化情况极为一致。

结合上文对冬小麦  $W$  的分析可知, $W$  偏多的年份, $I$  较低,不同年份  $W$  与  $I$  的变化有所差异,并且年际间变化较小。李瑜玲等<sup>[32]</sup>认为河北省作为种植冬小麦的大省,要结合冬小麦的缺水规律和盈亏指数的年际周期变化来制定灌溉次数及灌溉量,因此加强对灌溉用水的利用效率不仅可以满足小麦的生长需求,又能用较少的水资源生产出更多的粮食,稳定农业生产。

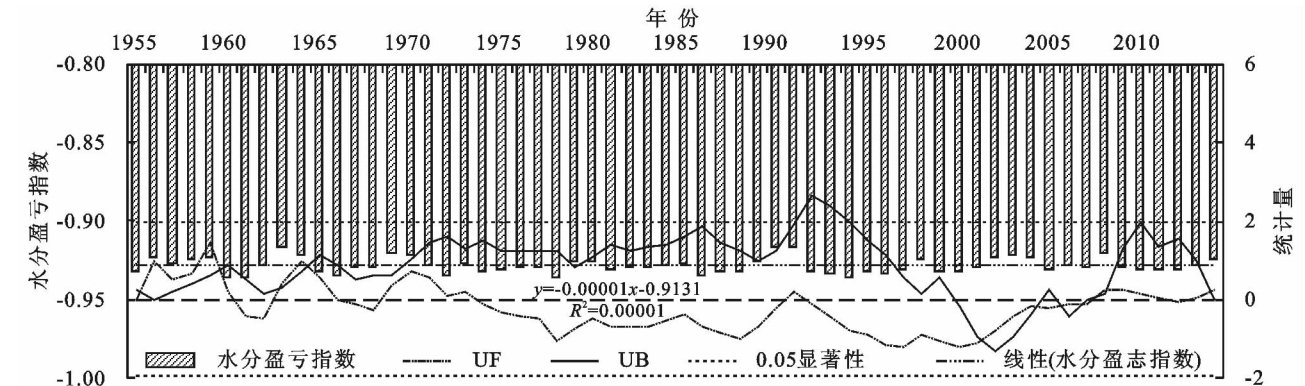


图 6 河北省冬小麦水分盈亏指数年际趋势变化

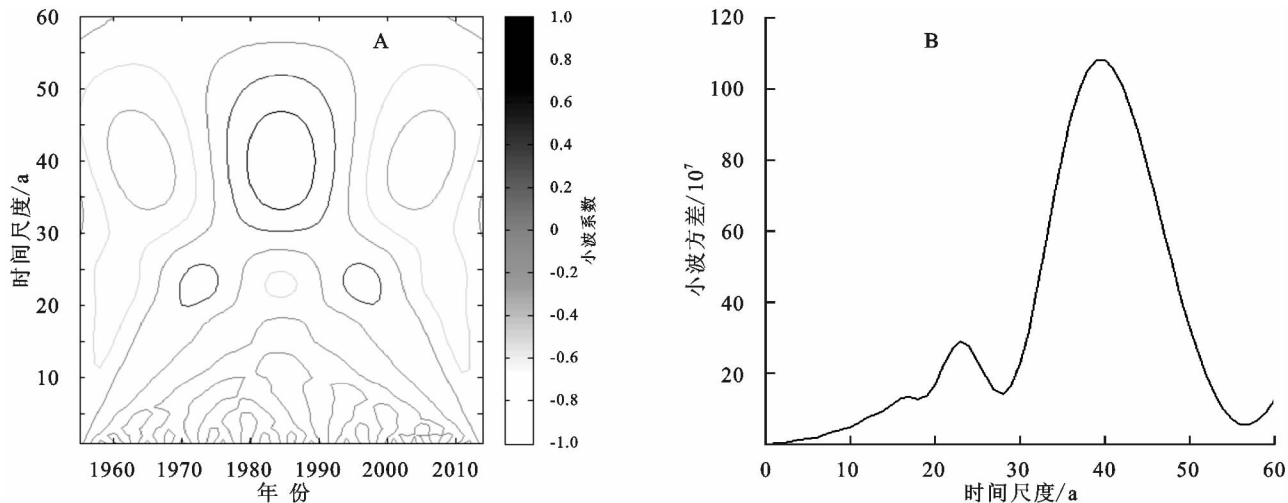


图 7 河北省冬小麦水分盈亏指数周期分析

2.3.2 空间分布特征分析 附图 11 为河北省近 60 年冬小麦全生育期  $I$  空间分布情况。河北省冬小麦  $I$  空间差异较小,基本上呈由中心向四周逐渐增大的分布特征。结合上文对  $W$  的计算,冬小麦的  $I$  与  $W$  呈现负相关分布规律, $I$  偏小的地区, $W$  偏大,干旱程度较强。冬小麦平均  $I$  为  $-0.91$ ;其中,全生育期  $I$  最大的为邯郸, $I$  为  $-0.88$ ;其次为邢台和秦皇岛, $I$  均约为  $-0.90$ ,其余站点  $I$  均为  $-0.91$ ;南宫  $I$  最小,为  $-0.92$ 。

近 60 年河北省冬小麦在不同生育期内  $I$  的空间分布情况如附图 12—13 所示,同一生育期内,各站点之间空间差距较小。初始生长期冬小麦  $I$  平均值为  $-0.86$ ,不同站点多年平均  $I$  变化为  $-0.88 \sim -0.80$ ,其中,邯郸  $I$  最大,黄骅和南宫  $I$  最小;冻融期冬小麦  $I$  平均值为  $-0.93$ ,空间分布差异较小,变化范围为  $-0.95 \sim -0.90$ ,最大值和最小值分别出现在邯郸和遵化;越冬期冬小麦  $I$  的平均值为  $-0.93$ ,变化范围为在  $-0.95 \sim -0.90$ ,邯郸的  $I$  最大,遵化的  $I$  最小;快速发育期冬小麦  $I$  平均值为  $-0.93$ ,其中,南宫  $I$  最小,为  $-0.95$ ,秦皇岛  $I$  最大,为  $-0.90$ ;生育中期冬小麦  $I$  空间差异较小,平均值为  $-0.91$ ,南宫、黄骅、饶阳和霸州  $I$  最小,

都为  $-0.92$ ,邯郸  $I$  最大,为  $-0.90$ ;成熟期冬小麦  $I$  平均值为  $-0.88$ ,变化范围为  $-0.86 \sim -0.92$ ,邯郸和秦皇岛  $I$  最大,为  $-0.86$ ,南宫  $I$  最小,为  $-0.92$ 。

综上所述,冬小麦在冻融和越冬期受到干旱危害, $I$  较低,不仅需要注意对这两个时期灌溉需水量进行适当的补给,而且还要结合不同地区的实际情况有计划的对冬小麦进行灌溉,这与李夕军等<sup>[33]</sup>的研究结果相吻合。

## 2.4 河北省棉花水分盈亏指数时空变化特征

2.4.1 时间分布特征分析 如图 8 所示,河北省棉花的  $I$  整体呈增减交替变化,变化倾向率几乎为 0,年际间  $I$  的平均值为  $-0.79$ ,且年际间差异较小。1995 年棉花  $I$  最大为  $-0.72$ ,最大值与最小值出现的年份较为接近。近 60 年来棉花的  $I$  变化较小,具体可分为 2 个阶段:1955—1980 年棉花  $I$  呈增减交替的趋势变化;1981 年以后,棉花的  $I$  呈不显著性下降趋势变化。近 60 年的变化过程中 UF 曲线和 UB 曲线共出现 10 个交点,均在临界线范围内,但仅 1970 年两曲线相交后呈相反变化趋势,因此 1970 年为河北省棉花  $I$  的突变点。

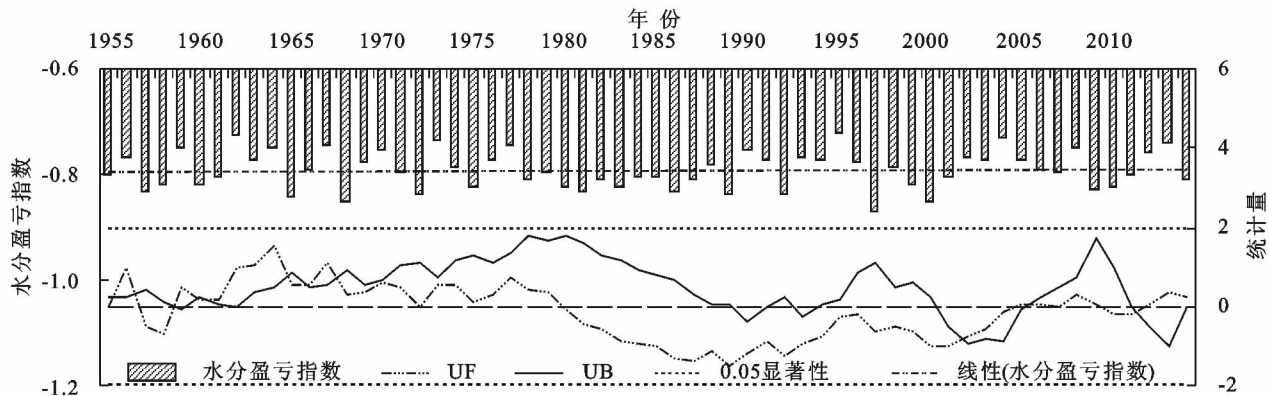


图 8 河北省棉花水分盈亏指数年际趋势变化



河北省棉花  $I$  震荡周期变化如图 9 所示,总体来看,由小波变换等值线图(图 9A)可以明显看出,河北省棉花  $I$  在 30~55 a 大时间尺度上周期性震荡显著,此外在 18~28 a 左右的小时间尺度上的周期性也很明显。结合小波方差图(图 9B),40 a 左右小波方差出现最大峰值,此外在 25 a 左右出现第 2 个峰

值,可以判断,河北省棉花  $W$  存在 40 a 左右的震荡主周期和 25 a 左右的震荡次周期。可以判定河北省棉花  $I$  存在 2 个次周期,周期性显著,并且呈现“大一小一大”的变化特征,年际间差异较大,与小波等值线的分析结果基本一致。将河北省棉花  $W$  与  $I$  的震荡周期结合来看,变化情况极为一致。

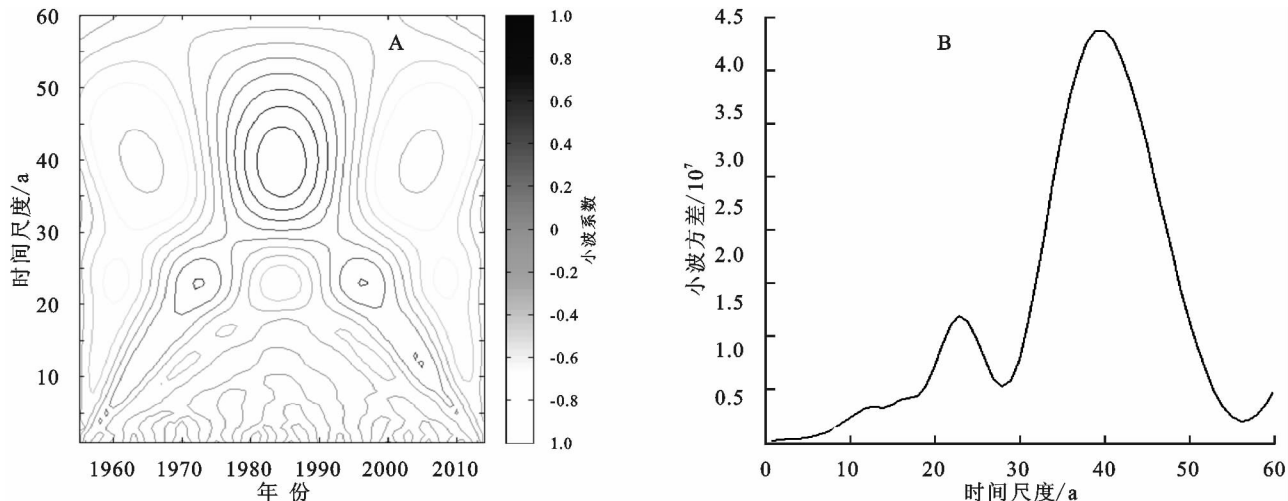


图9 河北省棉花水分盈亏指数周期分析

2.4.2 空间分布特征分析 附图 14 为近 60 年河北省棉花全生育期  $I$  的空间分布情况。结合上文对棉花  $W$  的计算可知,棉花的  $I$  与  $W$  呈现负相关分布规律,棉花  $I$  偏小的地区,  $W$  偏大,干旱程度较强。河北省各个站点间棉花  $I$  差距较小,平均  $I$  为 -0.81,其中,全生育期  $I$  最大的为邯郸,为 -0.79;其次为遵化、保定和邢台,  $I$  为 -0.80,  $I$  最小的为霸州,全生育期内  $I$  为 -0.82。

如附图 15 所示,河北省近 60 年不同生育期内棉花  $I$  空间分布差异较小,但各个站点生育期之间有所差异。初始生长期棉花  $I$  整平均值为 -0.86,其变化范围为 -0.87~-0.85,石家庄、邢台、保定和邯郸  $I$  最大,饶阳和黄骅  $I$  为 -0.86,其他站点  $I$  均为 -0.87;快速发育期棉花  $I$  平均值为 -0.86,其中,邢台  $I$  最大,为 -0.85,饶阳和霸州  $I$  最小,为 -0.88,其余站点均为 -0.8~-0.86;生育中期棉花  $I$  平均值为 -0.71,是棉花各生育期中  $I$  最大的时期,其变化范围为 -0.73~-0.70,邢台、遵化和霸州  $I$  最大,饶阳和黄骅  $I$  最小;成熟期棉花  $I$  平均值为 -0.78,  $I$  在 -0.80~-0.75 之间,唐山  $I$  最大,石家庄  $I$  最小。

## 2.5 缺水量和水分盈亏指数的联系与讨论

结合前文对冬小麦和棉花的时空分析结果,首先,由于青龙、遵化和石家庄部分地区为山地丘陵区,土地资源丰富,但是土地质量较差,加之石家庄为该省省会城市工农业与生活用水量,根据附图 6, 9, 11, 14 分析可知该区域缺水量较大,水分盈亏指数较小,因此,应以水土保持为重,营造农田防护体系,以

草、灌、林相结合进行植被建设,提高植被覆盖率,这样既有助于防风固沙、保持水土、保护农田,又有利于改善局部小气候,为旱地农业创造良好的生态环境。由于保定、饶阳、南宫和石家庄西部地区缺水量较小,水分盈亏指数较大,且地势平坦,分布有盐碱地,但是近几年盐化程度有所下降,因此适当建设蓄水工程,使发生旱情时能及时进行灌溉,灌溉应该采用喷灌进行大面积的灌溉,喷灌雾点小,均匀,土表不容易板结,既节水又节约劳动力<sup>[34]</sup>。

根据上述分析,并且结合河北省玉米和棉花的缺水量与水分盈亏指数特征来看,该区域主要农作物生长长期处于干旱状态。在干旱指标研究方面,由于不同的部门或学科对干旱的定义不同,所以出现了不同的干旱评判指标<sup>[35]</sup>。水分盈亏指数是评价干旱体系中的一个重要指标,并且也作为研究作物缺水量的重要指标,在一定程度上可以反映作物的干旱程度,是一种实时的干旱监测方法,能运用于河北省农业干旱监测业务,作物水分盈亏指数和缺水量作为精准灌溉决策的依据,缺水量指以维持作物正常生长发育所需的体外环境消耗的水<sup>[13]</sup>,当缺水量增大时,水分盈亏指数减小,呈现负相关关系,也可以说,可将水分盈亏指数的结果作为缺水量研究结果的真实验证。

随着全球气候变暖,河北省农业干旱呈加重趋势,以往河北省干旱监测主要采用降水距平百分率法,近几年通过建立土壤水分平衡方程和利用遥感的方法尝试进行农业干旱监测,但由于建立土壤水分平



衡方程需要实测土壤水分资料,而河北省全年固定地段土壤水分观测站较少,给监测带来较大误差,因此迫切需要开展农业干旱监测技术研究及应用服务。本文对作物水分盈亏指数和缺水量的计算是土壤墒情监测的目的和科学灌溉的工作基础,可为各级政府宏观决策、防灾抗旱提供科学依据,对农业抗旱减灾,合理利用水资源,指导农业节水灌溉等都具有十分重要的意义。因此,要将缺水量与水分盈亏指数结合起来研究对主要农作物生产合理用水和防灾减灾提供依据。

### 3 结论

(1) 近 60 年,河北省冬小麦和棉花  $W$  均呈下降的趋势变化,年均  $W$  分别为 594.26 mm 和 457.89 mm,冬小麦在 2012 年出现一个突变点,而河北省棉花  $W$  无明显的突变点,两种作物均存在 40 a 左右的主周期和 25 a 左右的次周期。

(2) 空间上,河北省冬小麦、棉花的  $W$  空间分布不均,各个站点间  $W$  差距较大;全生育期内棉花  $W$  最大值均出现在黄骅,为 496.57 mm,遵化  $W$  最小,为 366.66 mm,冬小麦  $W$  最大值出现在南宫,为 661.59 mm, $W$  最小值均出现在秦皇岛,为 462.03 mm;从不同生育期来看,冬小麦和棉花平均  $W$  均在快速发育期达到最大值。

(3) 时间上看, $I$  整体均呈增减交替变化;两种作物均存在 40 a 左右的主周期和 25 a 左右的次周期;空间分布上,冬小麦、棉花  $I$  各个站点空间差异较小,但冬小麦空间分布变化差异要大于棉花,基本上呈由中心向四周逐渐增大的分布特征。

(4) 整体来看,近 60 年两种作物的  $W$  及  $I$  均呈下降变化趋势,下降程度有所不同。空间上,冬小麦、棉花的  $W$  最大值分别出现在南宫和黄骅,所以应当在  $W$  较大的地区改善灌溉方式、提高灌溉用水效率,根据当地  $W$  以及  $I$  的实际情况做到科学灌溉,保证作物正常生长。近年来随着地下水严重超采现象,国家相关部门和地方政府已经采取相应的调控措施,地下水超采已严重影响到作物生长和水资源保护的协调发展,故此如何在水资源得以保护的前提下,解决作物生长灌溉用水问题,提高粮食生产安全将是未来研究的主要方向。

#### 参考文献:

[1] 王淑芬,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].农业工程学报,2006,22(2):27-32.

- [2] 宋常吉.北疆滴灌复播作物需水规律及灌溉制度研究[D].新疆石河子:石河子大学,2013.
- [3] 中国水利部.2016 年中国水资源公报[EB/OL].(2016-01-01)[2017-11-12].<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>.
- [4] Tabari H, Kisi O, Ezani A, et al. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444/445(10):78-89.
- [5] Nkomozepe T, Chung S O. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe[J]. Agricultural Water Management, 2012,111:60-67.
- [6] 陈吉.夏热冬冷地区模块式立体绿化节能节水绩效研究[D].南京:南京工业大学,2012.
- [7] 邱小琮,赵红雪,尹娟.爱伊河生态环境需水量研究[J].节水灌溉,2015(8):63-66.
- [8] 高飞,李新虎.塔里木盆地绿洲参考作物蒸散量计算方法比较[J].干旱区地理:汉文版,2016,39(1):130-135.
- [9] 李硕.气候变化对西北干旱区农业灌溉需水的影响研究[D].石家庄:河北师范大学,2013.
- [10] 黄静.山东省主要作物灌溉定额研究[D].山东泰安:山东农业大学,2011.
- [11] 姬兴杰,成林,方文松.未来气候变化对河南省冬小麦需水量和缺水量的影响预估[J].应用生态学报,2015,26(9):2689-2699.
- [12] 殷志强,秦小光,李长生.东北三省主要农作物耗水量与缺水量研究[J].科技导报,2009,27(13):42-49.
- [13] 邱兆美,赵龙,毛鹏军,等.不同缺水量对作物生理指标的影响研究[J].中国农机化学报,2016,37(4):260-263.
- [14] 魏静,冯忠江,郑小刚,等.1995—2004 年河北省生态足迹分析与评价[J].干旱区资源与环境,2008,22(6):175-180.
- [15] 郝立生,闵锦忠,刘克岩.气候变化对河北省水资源总量的影响[J].河北师范大学学报:自然科学版,2010,34(4):491-496.
- [16] 郭平.河北省农村循环经济发展问题研究[D].河北保定:河北农业大学,2009.
- [17] 刘江波.河北省土地利用变化与生态系统服务价值研究[D].石家庄:河北师范大学,2013.
- [18] 张永乐.河北农村金融支持农村经济增长问题实证研究[D].石家庄:河北经贸大学,2008.
- [19] 连欢欢.河北省流动人口社会保险制度完善研究[D].河北保定:河北大学,2012.
- [20] 马志峰.河北省农业经济资源开发与利用研究[J].中国农业资源与区划,2016,37(4):52-55.

- 学报, 2010, 30(1): 100-108.
- [23] 孙向伟, 高飞翔, 王文鑫, 等. 临河地区气候变化及对春小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 115-119.
- [24] 佚名. 天气气候异常的标准[J]. 青海气象, 2014(1): 49.
- [25] 国家气候中心. 气象干旱等级 GB/T2048—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 王翔翔. 渭北旱塬作物生长特征及其管理模式[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [27] 成林, 刘荣花, 马志红. 增温对河南省冬小麦产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 854-859.
- [28] Dueri S, Calanca P L, Fuhrer J. Climate change affects farm nitrogen loss: A Swiss case study with a dynamic farm model[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 93(1/3): 191-214.
- [29] 徐芸皎. CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高对冬小麦生长发育及需水量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [30] Peet M M, Huber S C, Patterson D T. Acclimation to high CO<sub>2</sub> in monoecious cucumbers: II. carbon exchange rates, enzyme activities, and starch and nutrient concentrations[J]. *Plant Physiology*, 1986, 80(1): 63-67.
- [31] Girardin M P, Bernier P Y, Raulier F, et al. Testing for a CO<sub>2</sub> fertilization effect on growth of Canadian boreal forests[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 116(G1): G01012.
- [32] 姜帅, 居辉, 吕小溪, 等. CO<sub>2</sub> 浓度升高与水分互作对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 403-409.
- [33] 李广, 李玥, 黄高宝. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088-1095.
- [34] Batts G R, Morison J I L, Ellis R H, et al. Effects of CO<sub>2</sub> and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons[J]. *Developments in Crop Science*, 1997, 25(1/3): 67-76.
- [35] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 75-80.



(上接第 356 页)

- [21] 贾士靖, 刘银仓, 王慧军. 基于指标体系的河北省农业循环经济发展评价[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1230-1233.
- [22] Richard G A, Luis S P, Dirk R, et al. Guide for calculation of water demand for crops[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- [23] 曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570.
- [24] Karl T R. Some spatial characteristics of drought duration in the United States[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(8): 1356-1366.
- [25] 张丹, 张广涛, 王丽学, 等. 彭曼—蒙特斯公式在参考作物需水量中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4513-4514.
- [26] 刘钰, L. S. Pereira. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [27] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 周体鹏. 基于克里金插值法的昆明市 PM<sub>2.5</sub> 预测[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [29] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [30] 尹海霞, 张勃, 王亚敏, 等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417.
- [31] 肖俊夫, 刘祖贵, 孙景生, 等. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 1999(1): 24-28.
- [32] 李瑜玲, 宋晓. 小麦节水栽培技术模式研究: 以河北省石家庄市为例[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(9): 35-36, 38.
- [33] 李夕军, 李瑜玲, 宋晓, 等. 冬小麦节水灌溉下的产量规律研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(32): 18, 52.
- [34] 周芬芬. 基于 MODIS 的邢台市旱情动态变化及其驱动力研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2010.
- [35] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.