

# 滁州市冬小麦生育期作物需水量和降水变化特征

金华星, 胡姗姗, 龚年祖, 张鑫童

(滁州市气象局, 安徽 滁州 239000)

**摘要:**基于1961—2013年滁州市气象数据,运用集合经验模态分解和交叉小波分析,探究了冬小麦生育期需水量和灌溉需水量的变化特征。结果表明:1961—2013年滁州市冬小麦生育期需水量和灌溉需水量均呈增加趋势(增势分别为:2.80,1.48 mm/a);年代变化上,冬小麦生育期需水量逐渐增大,灌溉需水量大致呈现先减少后增加的变化特征。冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量均呈现明显的多尺度变化特征,表现为多尺度的周期变化特征和趋势变化特征。作物需水量存在2.65,6.63,13.25,26.50 a的周期,灌溉需水量存在3.11,5.89,10.60,26.5 a的周期。研究时段,作物需水量和灌溉需水量与潜在蒸散量呈同相位分布,与降水量呈显著的反相位。

**关键词:**滁州市;作物需水量;灌溉蓄水量;冬小麦生育期;多尺度变化

中图分类号:S512.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0178-06

## Variation of Water Requirement and Precipitation in Wheat Growth Stages from 1961 to 2013

JIN Huaxing, HU Shanshan, GONG Nianzu, ZHANG Xintong

(Meteorological Bureau of Chuzhou City, Chuzhou, Anhui 239000, China)

**Abstract:**Based on the data from Meteorological Bureau of Chuzhou City and using ensemble empirical mode decomposition and cross wavelet analysis, the crop and irrigation water requirements during the wheat growth stages were analyzed. The results showed that the crop and irrigation water requirements experienced increasing trend with the rate of 2.80 mm/year and 1.48 mm/year from 1961 to 2013, respectively. For decadal change, the crop water requirement presented gradually increasing trend, while the irrigation water requirement exhibited decrease first and then increase. The crop water requirement has the periodicities of 2.65 years, 6.63 years, 13.25 years and 26.50 years, the irrigation water requirement has the periodicities of 3.11 years, 5.89 years, 10.60 years and 26.5 years. The crop and irrigation water requirements have the in-phase relationship with evapotranspiration and significant anti-phase relationship with precipitation.

**Keywords:**Chouzhou City; crop water requirement; irrigation water requirement; wheat growth stages; multiscale variation

作物需水量是作物全生育期消耗于自身蒸腾和棵间土壤蒸发的水量总和,它是灌溉决策和水资源规划的重要基础<sup>[1]</sup>。因此,国内外学者就作物需水量变化特征及其成因开展了一些研究,主要基于野外定位观测和气象数据,结合作物系数探究不同作物的需水量、灌溉需求量和灌溉需求指数的变化等。我国学者就此开展了深入研究。陈秋帆等<sup>[2]</sup>基于野外滴灌和观测试验探究了云南春作马铃薯作物系数及需水规律研究。宋妮<sup>[3]</sup>、杨晓琳<sup>[4]</sup>和吴燕锋<sup>[5]</sup>等分

别基于联合国粮农组织(FAO)推荐的参考作物蒸散计算方法和作物系数并结合气象数据探究了河南省、黄淮海农作区和石河子地区冬小麦作物需水量时空变化及其气候要素的影响。符娜等<sup>[6]</sup>、李摇勇<sup>[7]</sup>等分析了气候变化下我国西南地区 and 长江中下游地区水稻不同生育期灌溉需水量的变异性及灌溉需求指数分布。武勇利等<sup>[8]</sup>基于改进的SEBS模型对山西省进行作物需水量研究。牛纪苹等<sup>[9]</sup>利用大气环流模型Had CM3的输出和SDSM统计降尺度模型,探

究了两种情境下未来石羊河流域净灌溉需水量和耗水量。这些学者们大多采用传统的趋势分析法、相关分析法进行需水量的变化特征及其成因分析,为作物需水量研究提供了大量的理论基础。但是,气候要素具有非线性特征,气候因素驱动下的作物需水量也可能具有非线性和多尺度特征,而目前从多尺度角度探究需水量的演变特征的研究较少;其次,基于交叉小波分析探究作物需水量与气象因子相位关系的研究也鲜有报道。

滁州市位于安徽省东部,是全国重要的商品粮基地之一。流域内河流多且短,河道坡度较大,径流历时短,对径流量滞留极少。因此,农田主要靠塘、库、坝蓄水灌溉<sup>[10]</sup>。其次,降水的年际变化较大,旱灾频繁发生,防旱减灾的任务仍很艰巨<sup>[11]</sup>。前人就滁州市降水量、气温、日照时数等变化特征开展了研究,而对滁州市冬小麦不同生育期灌溉需水研究较少,且气候变化下农作物需水量和灌溉需水量对区域农业发展有重要意义。鉴于此,本研究基于滁州市 1961—2013 年的气象数据和前人有关冬小麦作物系数的研究,探究冬小麦生育期需水量和灌溉需水量的变化特征及其与降水量和潜在蒸散量的关系,从而为气候变化下冬小麦需水量和灌溉需水量以及灌溉排水决策提供理论基础。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本研究利用滁州市气象站(32.30N,118.30E),海拔:275 m,逐日气温、降水、日照时数、风速、相对湿度等资料实测资料。考虑到资料的完整性,选用 1961—2013 年的气象数据。

### 1.2 研究方法

1.2.1 冬小麦需水量与灌溉需水量 冬小麦需水量( $ET_c$ )计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

式中: $ET_0$ 为参考作物需水量(mm),采用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[12]</sup>计算; $K_c$ 为作物系数。滁州市冬小麦生育期为 10 月表示次年 6 月,因此本研究主要探究冬小麦生育期作物需水量的变化特征。参照 FAO-56 给出的标准条件下作物系数<sup>[13]</sup>及已有的相关研究<sup>[14]</sup>,最终确定冬小麦的作物系数为 1.35。

由于土壤水和地下水对大气降水具有巨大调蓄作用,作物需水量和有效降水量的差值定义为灌溉需

水量( $IR$ )。冬小麦灌溉需水量计算公式如下:

$$I_R = ET_c - P_e \quad (2)$$

式中: $IR$ 表示作物灌溉需水量(mm); $P_e$ 表示作物生育期有效降雨量(mm)。

1.2.2 集合经验模态分解 本研究采用对冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量序列进行多尺度分析。集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)是针对 EMD 方法的不足,提出的一种噪声辅助数据分析方法。该方法目前在水文学和气象学领域得到广泛应用<sup>[15]</sup>。吴燕锋等<sup>[16]</sup>提出利用白噪声在时间尺度均匀分布的统计特性,在原始信号中加入一定比例的白噪声,对原始信号和白噪声组成的总体进行 EMD 分解,经过多次计算,最后取平均使加入的白噪声相互抵消,加噪声的次数越多,平均后的结果所含的噪声越小,结果越接近真实值。因此, EEMD 不仅保留了原信号的信息,还可以克服模态混淆问题。其具体计算步骤为:首先将原始信号加上强度很低的白噪声,然后将附加噪声的信号进行 EMD 分解,得到一组 IMF 分量。重复执行以上两部过程,每次添加不同的白噪声序列,共重复  $N$  次;为了能够消除人工添加噪声的影响,将  $N$  次 EMD 分解得到的 IMF 分量相加,取其均值作为最终的 IMF 分量:

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (1)$$

式中: $c_j(t)$ 表示对原始信号进行 EEMD 分解后所得到的第  $j$  个 IMF 分量。本文在 EEMD 过程中,每次添加白噪声的振幅为合成序列标准差的 20%,集合平均次数为 200 次。采用镜像拓延的方法对数据进行处理,以减小边界效应的影响<sup>[17]</sup>。

1.2.3 交叉小波分析 利用小波变换探讨降水量与气温的多时间尺度的变化特征和相关性。小波变换是把称为基本小波的函数做位移后,再在不同的尺度域下对待分析信号做内积<sup>[18]</sup>。交叉小波谱是将小波变换与交叉谱分析相结合产生的一种信号分析技术,它能够揭示出两个时间序列在多时间尺度上的相互关系。与传统相关函数的只能从时域考察两个时间序列的相关关系,交叉谱能够在时频两域都具有表征气候信号局部化特征的作用<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量年代际变化特征

图 1 为滁州市 1961—2013 年冬小麦生育期需水量和灌溉需水量年代际变化曲线,可以看出,冬小麦

生育期需水量和灌溉需水量均呈增加趋势。其中,需水量增势较轻弱(2.80 mm/a),灌溉需水量略有增势(1.48 mm/a)。过去 53 a,滁州市冬小麦生育期需水量均值为 869.12 mm。年际变化上,冬小麦生育期需水量在 1964 年达到最小值,为 748.44 mm;2005 年达到最大值,为 1 015.21 mm;年代变化上,冬小麦生育期需水量自 1960s 至 2011—2014 年逐渐增大,

在 2011—2014 年得到年代最大值,为 947.19 mm。冬小麦生育期灌溉需水量均值为 267.54 mm,变幅较大,其值为 11.24~548.40 mm,最大值和最小值分别发生在 2006 年和 1994 年;年代变化上,灌溉需水量波动较大,大致呈现先减少后增加的变化特征,在 1970s 达到年代最小,为 195.92 mm,在 2011—2014 年达到最大,为 382.83 mm。

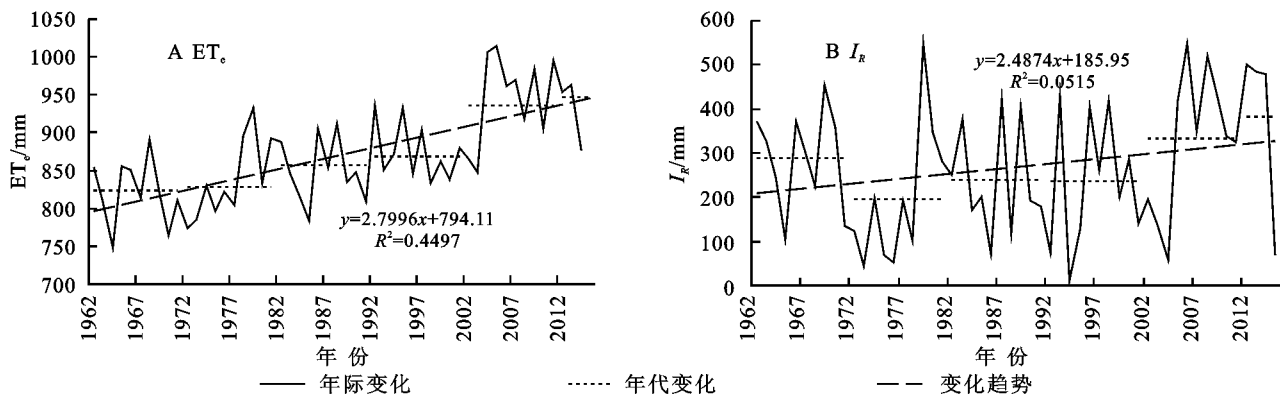


图 1 1961—2013 年冬小麦生育期需水量和灌溉需水量年代际变化特征

## 2.2 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量多尺度变化特征

图 2 为过去 53 a 年作物需水量距平序列 EEMD 分析结果,分解为 4 个 IMF 和 1 个残差(RES)序列。IMF1 和 IMF2 分量表征距平序列的年际变化特征,IMF3 和 IMF4 序列表征距平序列的年代变化特征,RES 表征距平序列的变化趋势特征。表 1 为冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量的 IMF 分量的周期特征。可以看出,过去 53 a 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量均呈现明显的多尺度变化特征,表现为多尺度的周期变化特征和趋势变化特征(RES)。作物需水量年际波动较大,存在 2.65 a 和 6.63 a 的周期特征;年代变化尺度上存在 13.25 a 和 26.50 a 的周其特征;趋势项表明冬小麦作物需水量呈明显的增加趋势。冬小麦灌溉需水量在年际和年代尺度变化上波动较大,年际尺度上存在 3.11 a 和 5.89 a 的周期,年代尺度上存在 10.60 a 和 26.5 a 的周期;趋势项可以看出,冬小麦灌溉需水量呈现先增加、后趋于稳定、最后大幅增加的变化特征。

表 1 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量的 IMF 分量的周期特征

IMF 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
$ET_c$	2.65	6.63	13.25	26.5
$I_r$	3.11	5.89	10.60	26.5

## 2.3 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量与降水和潜在蒸散量的关系

作物需水量和灌溉需水量与气象因子演变密切相

关<sup>[5,7]</sup>。由于降水量直接关乎区域干湿的演变和水分来源,多种气象因子通过潜在蒸散量的变化影响冬小麦需水量和土壤供水量,因此,本研究主要探究作物生育期作物需水量和灌溉需水量与降水和潜在蒸散量( $ET_0$ )的关系。图 3 是 1961—2013 年冬小麦生育期降水量和潜在蒸散量变化曲线,可以看出,过去 53 a,冬小麦生育期潜在蒸散量和降水量均呈增加趋势,其中,潜在蒸散量增势明显(气候倾向率为 2.07 mm/a),降水量增势较弱(气候倾向率为 0.22 mm/a)。

为进一步探究冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量与降水和潜在蒸散量的关系,基于交叉小波分析分别绘制了冬小麦生育期降水和潜在蒸散量与作物需水量和灌溉需水量的小波交叉能量时频分布图(图 4, 5)。图中黑色粗线的区域表示通过 95%红噪声检验的区域,箭头向左和向右分别表示反向位和同相位。作物需水量与潜在蒸散量呈同相位分布,即随着潜在蒸散量呈增加趋势,小麦需水量也呈增加趋势;但两者的关系未达到显著水平(图 4A)。作物需水量与降水量呈显著的反相位,显著时频分布主要表现在:1~2 a 周期尺度的 1980s 中后期,2~4 a 周期尺度的 2000s,5.5~12.5 a 的 1960s—1970s 前半期,6~12 a 的 1997—2014 年(图 4B)。冬小麦灌溉需水量与潜在蒸散量呈显著的同相位,即是随着潜在蒸散量的增加,冬小麦灌溉需水量也呈增加趋势(图 5A);两者显著的时频分布主要表现在:2~3.5 a 周期的 1980—2014 年、4~10 a 周期的 2000—2014 年、5~13 a 周期的

1961—1980 年和 16 a 周期的 1987—2010 年。冬小麦灌溉需水量与降水量呈显著的反相位,即是降水增

加引起灌溉需水量的减少;两者显著的时频分布主要表现在 3.8~8 a 周期的 1970—2010 年。

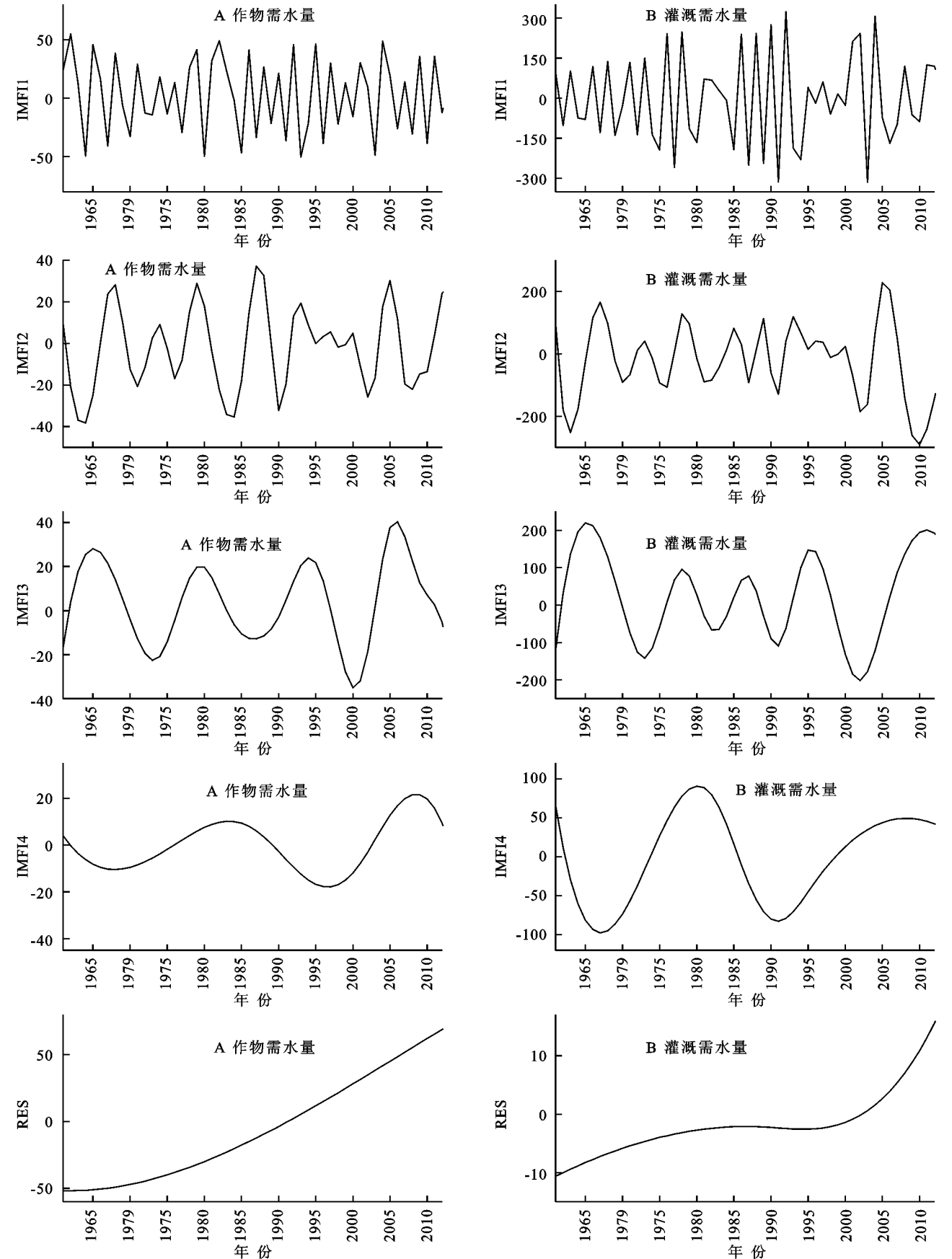


图 2 1961—2013 年冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量的多尺度演变特征

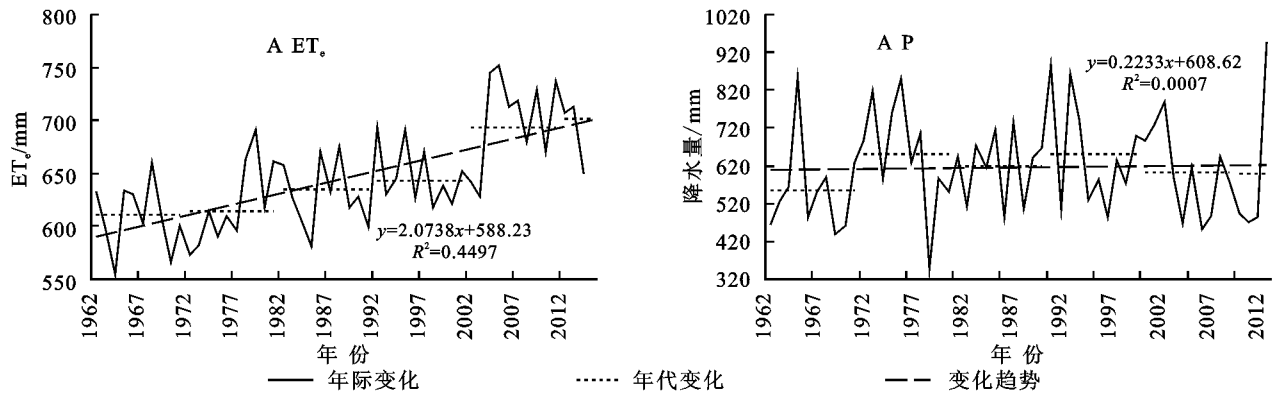


图 3 1961—2013 年冬小麦生育期降水和潜在蒸散量变化特征

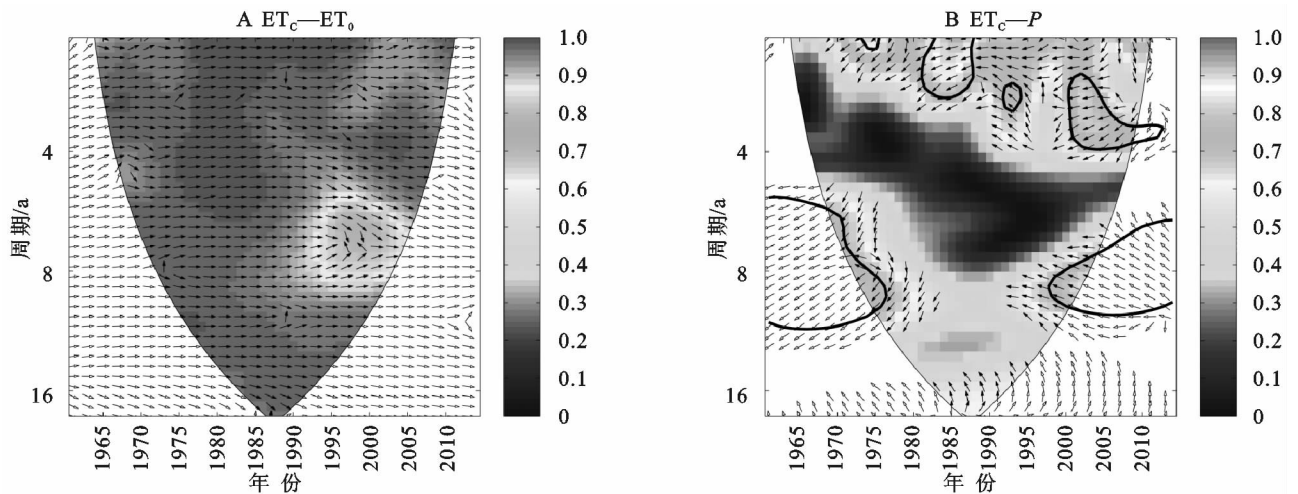


图 4 冬小麦生育期作物需水量与  $ET_0$  和降水量交叉小波分析

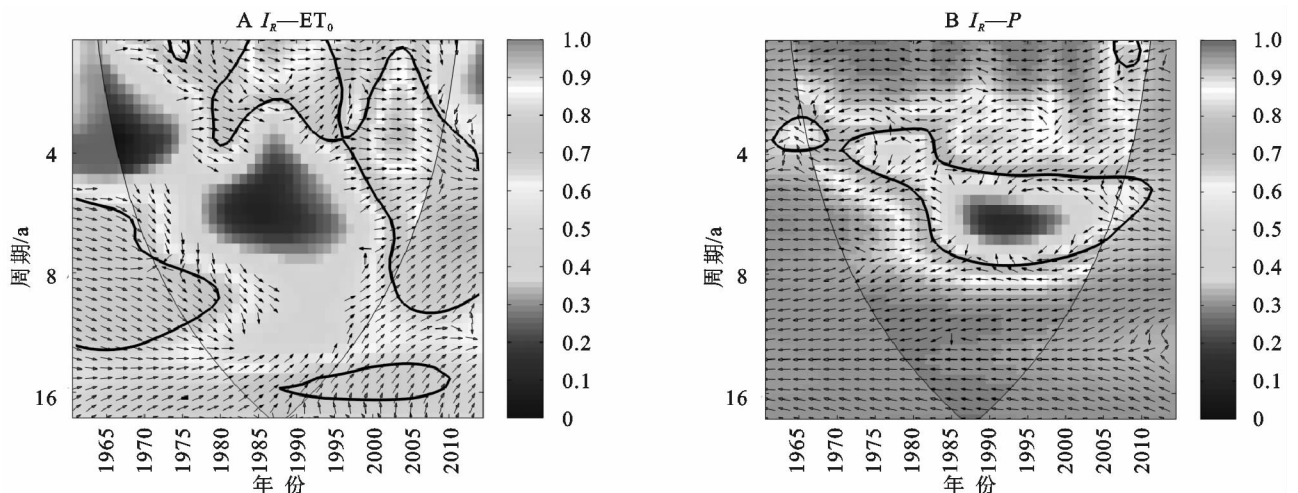


图 5 冬小麦生育期灌溉需水量与  $ET_0$  和降水量交叉小波分析

### 3 结论

(1) 1961—2013 年滁州市冬小麦生育期需水量和灌溉需水量均呈增加趋势,增势分别为:2.80 mm/a 和 1.48 mm/a;年代变化上,冬小麦生育期需水量逐渐增大,灌溉需水量大致呈现先减少后增加的变化特征。

(2) 冬小麦生育期作物需水量和灌溉需水量均呈现明显的多尺度变化特征,表现为多尺度的周期变

化特征和趋势变化特征。作物需水量存在 2.65, 6.63,13.25,26.50 a 的周期,灌溉需水量存在 3.11, 5.89,10.60,26.5 a 的周期。

(3) 研究时段,冬小麦生育期潜在蒸散量和降水量均呈增加趋势;作物需水量和灌溉需水量与潜在蒸散量呈同相位分布,与降水量呈显著的反相位。

作物需水量的和灌溉需水量的变化关乎作物水分亏缺,对建立合理的灌溉制度有重要的意义,这不仅需

要对作物全生育期水分亏缺进行探究,还需要进一步分析不同生育期作物水分需求和灌溉需求。本研究仅仅探究了冬小麦整个生育期的变化特征,未从各生育期分别做深入研究。其次,作物需水量的和灌溉需水量与气象因子关系复杂,两者关系有待进一步研究。

参考文献

[1] 闫映宇. 塔里木灌区膜下滴灌的棉花需水量及节水效益[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 123-127.

[2] 陈秋帆, 陈劲松, 代兴梅, 等. 云南春作马铃薯作物系数及需水规律研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 564-566.

[3] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1693-1700.

[4] 杨晓琳, 宋振伟, 王宏, 等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 356-362.

[5] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 石河子地区冬小麦生育期需水量变化特征及其气候成因[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 69-74.

[6] 符娜, 刘小刚, 张岩石, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1895-1901.

[7] 李摇勇, 杨晓光, 叶摇清, 等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 175-183.

[8] 武永利, 田国珍, 王云峰. 基于改进的 SEBS 模型的作物需水量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 113-118.

[9] 牛纪苹, 粟晓玲, 唐泽军. 气候变化条件下石羊河流域农业灌溉需水量的模拟与预测[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 206-212.

[10] 徐天勇. 滁州市清流河水环境容量研究[D]. 南京: 南京

大学, 2006.

[11] 徐志龙, 曹阳, 杨敏. 1951—2005 年海河流域汛期降水量的时空变化特征分析[J]. 水文, 2009, 29(1): 85-88.

[12] Karimov A K, Šimůnek J, Hanjra M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia) [J]. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 57-69.

[13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper56[M]. Rome: FAO, 1998.

[14] 何斌. 中国农业干旱风险定量评价与空间格局分析[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院地理科学与资源研究所), 2010.

[15] Yang Z, Yu Z, Xie C, et al. Application of Hilbert-Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process [J]. Measurement, 2014, 47: 14-21.

[16] 吴燕锋, 巴特尔, 巴克, 等. 基于 EEMD 的杜尚别市 1950—2013 年降水多尺度分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 152-157.

[17] 张余庆, 陈昌春, 姚鑫, 等. 江西省信江流域极端降水时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 189-194.

[18] Valdés-Galicia J F, Velasco V M. Variations of mid-term periodicities in solar activity physical phenomena [J]. Advances in Space Research, 2008, 41(2): 297-305.

[19] Wu Y, Bake B, Zhang J, et al. Spatio-temporal patterns of drought in North Xinjiang, China, 1961—2012 based on meteorological drought index[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 527-543.



(上接第 177 页)

[5] Holl K D. Long-term vegetation recovery on reclaimed coal surface mines in the eastern USA [J]. Journal of Applied Ecology, 2002, 39(6): 960-970.

[6] Chambers J C, Brown R W, Williams B D. An evaluation of reclamation success on Idaho's phosphate mines [J]. Restoration Ecology, 1994, 2(1): 4-16.

[7] 刘美英, 高永, 汪季, 等. 矿区复垦地土壤碳氮含量变化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 94-97, 101.

[8] 李晋川, 王翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 66-71, 79.

[9] 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 93-96.

[10] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦

土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 229-245.

[11] 张以刚, 李卉. 南京市幕府山地区矿区环境地质整治恢复建议[J]. 江苏地质, 2000, 24(4): 221-224.

[12] 刘国华, 舒洪岚, 张金池. 南京幕府山矿区废弃地植被恢复对土壤侵蚀与肥力的影响研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 234-235, 238.

[13] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[14] 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.

[15] 张志民. 紫金山栓皮栎林水源涵养功能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.

[16] 王辛芝. 南京市公园绿地土壤性质及其变化特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.