

# 基于水足迹的民勤县农作物耗水当量 与气候响应评估

韩 杰, 陈兴鹏

(兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 在阐述水足迹、水资源压力指数的基础上, 计算了 1991—2013 年民勤县 8 种主要农作物(玉米、小麦、棉花、葵花、苹果、瓜类、蔬菜)蓝水需水量、总耗水当量和单位作物耗水当量, 研究了这些作物在 23 年内总耗水当量和单位耗水当量的时间序列变化规律, 并对比三种经济技术耗水分离模型, 分离出 4 种典型作物(小麦、玉米、棉花、瓜类)单位气候耗水当量, 最后选择逐步回归分析法探讨了作物气候耗水当量与相关气候因子之间的关系。结果表明: (1) 民勤总耗水当量逐年增加, 粮食作物总耗水当量变化最大, 蔬菜、油料作物(葵花)次之, 单位作物耗水当量在震荡中逐年递减; (2) HP 滤波法为最优气候耗水当量分离模型, 单位作物气候耗水当量趋势性不明显, 序列期内震荡显著, 且不同作物差异较大; (3) 显著影响单位作物气候耗水当量的主要气候因子为 5、6 月份总降水量和 7 月份相对湿度, 与生长期内气温要素相关性不强。可见, 不同作物耗水变化的气候响应模式差异较大, 整体受降水和温度的影响显著, 但对全球气候变暖大趋势的响应机制尚不明确。

**关键词:** 水足迹; 水资源压力指数; 气候耗水当量; 民勤县

**中图分类号:** S162.5      **文献标志码:** A

## Climate response for equivalence of crop water consumption induced by climate in Minqin County based on water footprint

HAN Jie, CHEN Xing-peng

(Resources and Environment College of Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** On the basis of elaboration of the water footprint and the water resources stress indicators, we calculated the blue water demand, the total water consumption and the unit of crop water consumption of eight kinds of crops, (maize, wheat, cotton, sunflower, apple, melons and vegetables) in Minqin County from 1991 to 2013. And we studied the variation law of total water consumption and unit of water consumption with time of these crops in 23 years. We analyzed unit climate water consumption of four kinds of typical crops: wheat, maize, cotton and melons, using preferred HP filter method from three kinds of economic and technical analysis models of water consumption. Furthermore, we discussed the relationship between climate water consumption and the related climate factors of these crops using stepwise regression analysis method. The results were amazing. Firstly, water consumption of crops increased year by year, maximum total water consumption of food crops changed the most, followed by vegetables and sunflower. However, unit of crop water consumption diminished in the wave. Secondly, HP filter method is an optimal model for analyzing climate water consumption. The trend of unit of crop climate water consumption was inapparent, but the wave was prominent in this period, and the difference was significant between different crops. Thirdly, the main climate factors that influenced the unit of crop climate water consumption were total rainfall in May and June and relative humidity in July, and there was no significant correlation with temperature during the growth period. In conclusion, response mode to climate change of different crop's water consumption changes vary greatly. Crop's water consumption is affected by precipitation and humidity significantly and the response mode trend of global warming is not obvious.

收稿日期: 2016-07-02

修回日期: 2016-10-20

**基金项目:** 国家社会科学基金项目(11BSH059); 国家自然科学基金项目(40871061, 41471462); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(13LZUJBWZB003)

**作者简介:** 韩 杰(1988—), 女, 河南开封人, 博士研究生, 研究方向为资源与环境管理。E-mail: hanjie19880324@163.com。

**通信作者:** 陈兴鹏(1963—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态经济与区域可持续发展、循环经济与产业生态研究。

**Keywords:** water footprint, WSI, water consumption induced by climate; Minqin County

气候变化已经通过降水的重新分配、地表及地下水循环等要素影响水文循环<sup>[1-2]</sup>。不断加剧的水资源竞争伴随着气温、降水和蒸散量的变化已经严重影响了农业生产的水资源利用<sup>[3]</sup>。除了技术水平和作物种类的不断改进,天气和气候依然是影响农业生产的主要不可控因素<sup>[4]</sup>,尤其在干旱缺水的生态脆弱区,农业生产对气候变化更加敏感<sup>[5]</sup>。民勤作为以农业为主的绿洲,农业水消费占比达80%以上,农业开发是对绿洲生态系统影响最剧烈的人类活动,研究气候变化对绿洲农业耗水的影响尤为重要。佟玲等<sup>[6]</sup>通过对石羊河流域主要农作物蒸散量(ETC)的时空分析,得出近50年来民勤地区主要农作物的蒸散量呈下降趋势。孙世坤等<sup>[7]</sup>研究了基于CROPWAT模型的民勤棉花和春小麦非充分灌溉情景,从实测结果得出:棉花的需水高峰期在6—7月份,日蒸发蒸腾量的最大值约为4.8 mm。刘勤等<sup>[8]</sup>对西北旱区参考作物蒸散量对气候变化的敏感性进行了分析。但以上这些研究主要是针对作物蒸散量,缺乏对单位作物耗水当量影响的研究,同时关于气候变化与农业关系的研究也主要集中在气候对作物产量的影响。例如EI-Maayar, Lange<sup>[9]</sup>将气候变化对作物产量的影响因子分为气候性和非气候性(非气候性要素包括农业投入、作物化学处理和气候变化等)。Niu X K等<sup>[10]</sup>认为在目前的耕作水平下随着作物基因改善、农业管理水平的提高,我国东北地区的作物产量在过去60年有了很大提高,但作物产量的长期震动趋势却与气温、降水以及极端天气等气候要素息息相关。单位作物耗水当量与作物产量相似,可以理解为气象要素和技术条件的综合,所以本研究在水足迹的基础上主要参照作物产量与气候关系的系列研究,将单位作物耗水当量分为气候耗水当量和经济技术耗水当量,并通过构建统计模型研究气候耗水当量与气候因子之间的关系<sup>[11]</sup>。

以往基于虚拟水方法计算的产品水足迹仅仅报道水资源消耗和污染量,并不能直观地体现相应的环境影响<sup>[12-15]</sup>。而在水资源压力指数(WSI)<sup>[16-19]</sup>和生命影响周期理论框架下提出的相关方法<sup>[20-23]</sup>,则使全球水资源利用的影响评价更加客观精确。在民勤地区将水足迹(WF)和水资源压力指数(WSI)结合起来研究水足迹和水资源利用影响评估的方法尚处于初始阶段,综上所述本研究的主要目的是:(1)将WF和WSI结合起来评估民勤8种主要农作物的耗水当量。(2)通过方法对比择优

分离玉米、小麦、棉花和瓜类四种典型作物的气候耗水当量。(3)构建回归模型探讨单位作物气候耗水当量与气候因子的关系。

## 1 研究区概况

武威市民勤县位于东经101.49°至104.12°,北纬38.04°至39.27°,地处河西走廊东部,石羊河流域下游,东北和西北方向分别被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围,中部是因石羊河的冲击灌溉而形成的绿洲。当地气候干旱,风沙危害严重,年降水量110 mm,而潜在蒸发量约高出平均降水量23倍。依据民勤54年的气象资料,民勤气温变化趋势与全球气候变化一致<sup>[24]</sup>,总体呈现波动上涨的趋势,其中冬季平均气温上升速率最快,平均最高气温增幅较平均最低气温增幅稍慢,气温每升高1℃,相应的潜在蒸散量增加75 mm·a<sup>-1</sup><sup>[25]</sup>。历年平均降水变率较大,但整体也表现出微弱的增加趋势,夏季降水则表现出减少趋势,且年内分布不均,春季降水增幅大于秋冬两季。降水的季节分配不均和潜在蒸散量的增加导致农田耗水当量的增加,加剧水资源短缺程度。但民勤光热配合相对较好,昼夜温差大,适合作物生长,尤其适宜糖分的累积,是发展粮、棉、油及各类瓜果的理想之地<sup>[26]</sup>。这里主要选取玉米、棉花、小麦、马铃薯、葵花、苹果、蔬菜、瓜类8种主要作物进行研究,重点探讨了民勤4种典型作物耗水变化与气候之间的关系。

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

1991—2013民勤8种主要农作物种植面积及产量数据来自历年《民勤统计年鉴》,部分数据来自《民勤县生态环境治理汇编》和《民勤县志》。包括最低气温、最高气温、相对湿度、风速、降水量、日照时数在内的1991—2013年月度气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://www.gsei.com.cn>)。主要农作物调节系数 $K_c$ 及8种主要作物的生长期主要参考佟玲等<sup>[6]</sup>的研究成果。

### 2.2 研究方法

2.2.1 作物需水量的计算 水足迹的概念被用来评估民勤县8种主要农作物的需水量,农作物生长期水足迹( $WF_{crop}$ )的计算方法参照Hoekstra et al<sup>[14]</sup>:  $WF_{crop} = WF_{crop, green} + WF_{crop, blue}$  (m<sup>3</sup>·t<sup>-1</sup>)

月份 Month	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November
		玉米 Maize							
		小麦 Wheat							
		棉花 Cotton							
		瓜类 Melons							
		马铃薯 Potato							
		苹果 Apple							
			葵花 Sunflower						
			蔬菜 Vegetable						

图 1 种植日历

Fig.1 Farming almanac

$WF_{crop, green}$  指的是作物生长过程中绿水消耗量, 绿水其实就是作物生育期内雨水的总蒸发量,  $WF_{crop, blue}$  是蓝水资源的消耗量, 包括河水、湖水、地下水或总灌溉水蒸发量 ( $m^3 \cdot hm^{-2}$ )。灰水被 Mekonnen 和 Hoekstra 引入一般性水足迹计算公式<sup>[27]</sup>, 指的是作物管理过程中使用的化肥和农药等必然会对环境造成一定程度的污染, 需要一定量的水资源对污染物进行稀释使水质达到安全标准, 这部分水资源量就称为灰水。这里因为数据的局限性以及农作物的灰水消耗量并不是严格意义上的实体水消费, 而主要和水污染相关, 不属于直接的水资源消耗, 所以计算水足迹时灰水没有被考虑进去<sup>[28]</sup>。为了计算  $WF_{green}$  和  $WF_{blue}$ , 需要通过作物调节系数 ( $K_c$ ) 计算作物蒸散量 ( $ET$ ), 参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ) 的计算公式如下<sup>[29]</sup>:

$$ET_{crop} = K_c \times ET_0 (\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (1)$$

$$WF_{crop} = 10 \times \sum_{d=1}^{lg p} ET_{crop} (m^3 \cdot \text{hm}^{-2}) \quad (2)$$

作物蒸散量是两部分的水分流失, 分别为土壤表面的蒸发和作物蒸腾。 $ET_{crop}$  是作物蒸散量 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $K_c$  为作物调节系数 (无量纲),  $ET_0$  是参考作物蒸散量 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 参照联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman - Monteith 公式, 运用 Cropwat 作物需水软件进行计算。方程 (2) 是  $WF_{crop}$  的一般计算方法。因子 10 是将水深单位  $\text{mm}$  转化为水的体积单位  $m^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 求和是指作物生长期内的从播种日 (第一天) 到收获日总蒸散量,  $lg p$  表示生长期的天数。通过作物蒸散量  $ET_{crop}$  计算  $WF_{green}$  和  $WF_{blue}$  的具体步骤如下:

计算每种作物的蒸散量  $ET_{crop}$ ;

计算作物生长期内的有效降水量  $ER$ ;

$WF_{crop, green}$  通过比较作物生长期内的潜在蒸散

量与有效降水量 ( $ER$ ) 来确定, 当  $ET > ER$  时,  $WF_{crop, green}$  等于有效降水量; 然而, 当  $ET < ER$  时,  $WF_{crop, green}$  等于  $ET$ ;

$WF_{crop, blue}$  即是灌溉需水量, 如果  $ET > ER$ ,  $WF_{crop, green} = ET - ER$ ; 若  $ET < ER$ , 则  $WF_{crop, green} = 0$ 。

2.2.2 水资源压力指数和水资源消耗影响评价  
农作物单位水资源消费量对水资源匮乏区所造成的影响要大于水质资源富足区, 仅单纯考虑量的计算并不能深刻地反映区域的水资源状况, 为了有效地评估不同区域水资源短缺程度, 采用了水资源压力指数 ( $WSI$ ) 的概念。Pfister 等<sup>[19]</sup> 首先利用生命周期影响评价的方法, 全面考虑生态、水文、经济社会各方因子, 计算了全球  $0.5^\circ$  空间分辨率下的  $WSI$  值, 并评估了其对人类健康、生态系统质量、自然资源的危害性, 以便因地制宜的评价淡水资源消耗的影响。水资源压力指数的上下限值分别为 0.01 和 1, 水资源压力的程度分为五个等级, 包括极端型 ( $WSI > 0.9$ ), 严重型 ( $WSI \leq 0.9$ ), 压力型 ( $WSI = 0.5$ ), 一般型 ( $0.1 \leq WSI < 0.5$ ) 和低值型 ( $WSI < 0.1$ )。具体计算公式如下:

$$WSI = \frac{1}{1 + e^{-6.4WTA(\frac{1}{0.01} - 1)}} \quad (3)$$

$WTA$  指的是不同部门淡水资源取用量 (包括工业、农业和家庭用水量) 与淡水资源可用量的比值。民勤县  $WSI$  值直接采用 Pfister 等全球  $0.5^\circ$  空间分辨率的计算结果<sup>[19]</sup>, 通过其行政边界内各栅格的  $WSI$  均值得到。为了便于评估和比较不同区域农作物水资源使用量的影响, 将通过公式得到的民勤县  $WSI$  值作为权重, 计算不同农作物的水资源消费量, 即是

所谓的农作物耗水当量(water deprivation)。耗水当量通过不同作物的蓝水需水量乘以特定区域  $i$  的水资源压力指数(WSI)进行量化,单位作物耗水当量用产量数据进行计算,公式如下:

$$\text{Water deprivation}_{crop,i} = WF_{crop,blue,i} \times WSI_i \quad (4)$$

$$V_{crop,i} = \frac{WF_{crop,blue,i} \times WSI_i}{Y_{crop,i}} \quad (5)$$

耗水当量的单位是立方米水资源相当量( $m^3eq$ ),  $Y_{crop,i}$ 为区域  $i$  某作物的总产量,  $V_{crop,i}$ 表示单位耗水当量,单位  $m^3eq \cdot kg^{-1}$ 。计算耗水值的优势在于方便决策者将民勤县不同农作物水资源消耗的影响与其它水资源压力指数不同的区域进行对比,突出区域水资源特征。较低的农作物水耗意味着与其它水资源使用主体或上游区域存在相对较弱的竞争力,水资源的消费对环境和生态的影响较小。

其它非气候要素,它们主要由生产力发展水平所决定。气候产量又叫波动产量,反映的是气候变化导致的短期产量波动。农作物耗水当量主要受经济社会和气候要素的影响,随着经济发展、社会进步而缓慢变化,随着温度、湿度、降水等气候要素的变化上下波动,与农作物产量的变化相似。所以,本文引入作物产量的分解方法和理论,将农作物耗水当量分解为趋势项  $Y_t$ (经济社会耗水当量)、波动项  $Y_w$ (气候耗水当量)和随机项  $\Delta Y$ <sup>[30-31]</sup>。

$$Y = Y_t + Y_w + \Delta Y \quad (6)$$

如何准确分解作物气候耗水当量也是探讨气候变化和作物耗水变化之间关系的问题所在。目前,为了分解作物经济技术耗水当量,许多数学方法被用来模拟农作物因经济社会因子变化带来的趋势性耗水当量。一般而言,主要的分解方法有移动平均、罗杰斯蒂曲线、柯布道格拉斯生产函数、多项式法和高通滤波法。本文采用线性调和和滑动平均数法、滑动直线平均数法和 HP 滤波法对 8 种农作物进行分解,并用相关分析和逐步回归分析法研究气候耗水当量和相关气候因子之间的关系。

(1) 线性调合滑动平均数法

调和平均数(Harmonic Average)即所谓的倒数平均数,它是指所有变量倒数的算术平均数的倒数。特点是在滑动平均步长内,距离历史年份  $i$  越近的年份,对第  $i$  年的技术产量影响就越大。具体计算公式如下:

$$\bar{y}_j(t) = \frac{h}{\sum_{k=1}^h c_{j-k+1} y_{j-k+1}} \quad (7)$$

$\bar{y}_j(t)$  为第  $j$  年的调和移动平均值,即为由农业科学技术和管理水平提高导致的趋势耗水当量;  $c_{j-k+1}$  是调和移动平均系数;  $h$  为移动平均的时间步长;  $y_{j-k+1}$  为第  $j-k+1$  年的实际耗水当量。调和移动平均系数由下式计算得出:

$$c_{j-k+1} = \frac{h - k + 1}{\sum_{k=1}^h k} \quad (8)$$

$c_{j-k+1}$  是五年调和移动平均的系数。

(2) 滑动直线平均数法

直线滑动平均是一种线性回归和移动平均相结合的预测方法,它将时间序列滑动步长内的耗水趋势看作直线,用后延位置的改变反映时间序列的趋势性变化。特定阶段的线性回归方程的计算方法如下:

$$Y_i(i) = m(i) + n(i)t, t = 1, 2, 3 \dots, n - h + 1 \quad (9)$$

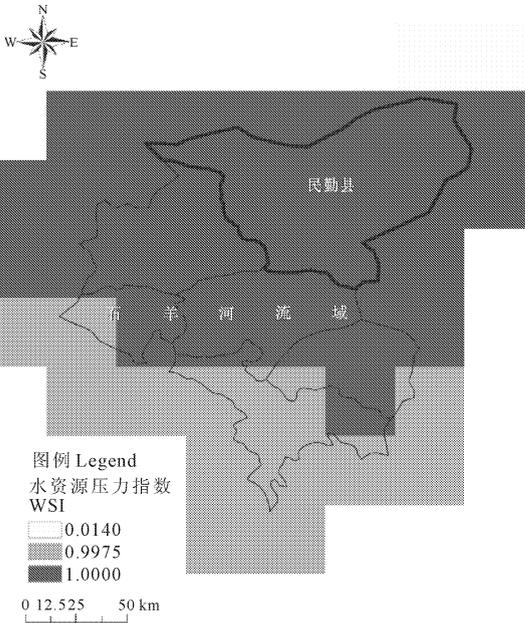


图 2 石羊河流域水资源压力指数

Fig.2 Water resources pressure index of Shiyang river basin

表 1 各尺度 WSI 对比

Table 1 WSI comparison of different scales

区域 Area	水资源压力指数 WSI	区域 Area	水资源压力指数 WSI
民勤县 Minqin County	1.000	北京 Beijing	1.000
石羊河流域 Shiyang River basin	0.999	全国 Nationwide	0.478
甘肃省 Gansu Province	0.891	全球 Global	0.602

2.2.3 气候耗水当量的分解 一般情况,在任何年份作物产量均可以表示为作物管理水平、气候要素贡献和误差的总和。作物管理水平包括科技变化和

式中,  $h$  为滑动时间步长,  $n$  为样本量,  $i \cdots n - h + 1$  是方程个数,  $t$  为时间序号 ( $t = T - 1990$ ,  $T$  为年份); 当  $i = 1, t = 1, 2, 3, \dots, k; i = n - h + 1$  时,  $t = n - h + 1, n - h + 2, n - h + 3, \dots, n$ 。

其次, 每个方程在  $t$  点函数值  $y_i(t)$  计算公式为:

$$y_i(t) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_i(t), (i = 1, 2, 3, \dots, p) \quad (10)$$

每个  $t$  点上分别有  $p$  个函数值, 其中  $p$  的多少与  $n, h$  有关。

### (3) HP 滤波法

HP 滤波法最早由 Hodrick 和 Prescott<sup>[32]</sup> 提出, 是经济学中用来消除时间序列趋势成分, 从中抽取一条平滑曲线的常用方法。对此目前主要有两种理解: (1) HP 滤波可以理解为一个特殊的射影, 可以从时间序列  $\{y_n\}$  分离出某个信号  $gt$ , 一般认为  $y_n$  是由  $gt$  和正交噪声两部分组成<sup>[32]</sup>。(2) HP 还可以理解为一个以时间序列谱分析为基础的高通滤波器 (high-pass filter), 在所有不同频率成分中将低频率成分滤除, 保留高频率成分, 也即是消除长期趋势, 仅对短期的随机波动项进行度量。这里采用第二种理解进行农作物气候耗水当量的分离。

#### 2.2.4 量化气候变量和气候耗水当量之间的关系

气候耗水当量受多种气候要素的综合影响, 在众多的影响因素中选择主要影响因子并进行量化最有效的方法就是逐步回归分析, 它是建立在多元线性回归基础上的一种方法。多元回归分析 (regression analysis) 主要是从统计学的角度, 研究两个以上变量

之间的相互关系及密切程度的一种分析方法<sup>[33]</sup>:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (11)$$

式中,  $Y$  指的是气候耗水当量,  $\beta_0$  是回归常数,  $\beta_n$  是回归系数,  $X$  是不同的气候要素。

## 3 结果与分析

### 3.1 总耗水当量与单位作物耗水时序分析

图 3 显示, 1991—2013 年农作物总耗水当量呈震荡递增的趋势, 1991—1994 年和 2010—2013 年为显著递减期, 1995—2001 年为震荡递增期, 2002—2010 年为稳定递增期。目前在总耗水构成中, 玉米、棉花、葵花、蔬菜为主要耗水作物, 其中小麦耗水当量所占比重近 22 年来逐年递减, 变化最为迅速, 已由 1991 年的 74.5% 递减为目前的 11.8%。1991—2013 年棉花、蔬菜和葵花耗水比重分别以 14.3%、10.5% 和 6.3% 的年均增长率变化, 尤其是 2000 年以后增长剧烈。玉米、瓜类、苹果和马铃薯耗水比重也有一定程度的增加, 但是速度缓慢, 波动性较强。总体而言, 粮食作物的总耗水当量减势明显, 经济作物耗水当量显著增加, 农作物耗水结构逐渐呈现先慢后快的多样化趋势, 2008 年之后作物多样化种植结构显著。

由图 4 可知, 受技术、气候等因子的影响, 不同年份作物单位耗水当量变化较大。1991 年, 单位作物耗水当量较大的是苹果  $6.79 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和棉花  $3.48 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较小的是瓜类  $0.11 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和蔬菜  $0.34 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2000 年, 单位作物耗水当量较大的是棉花  $2.22 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和葵花  $1.14 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较少的是

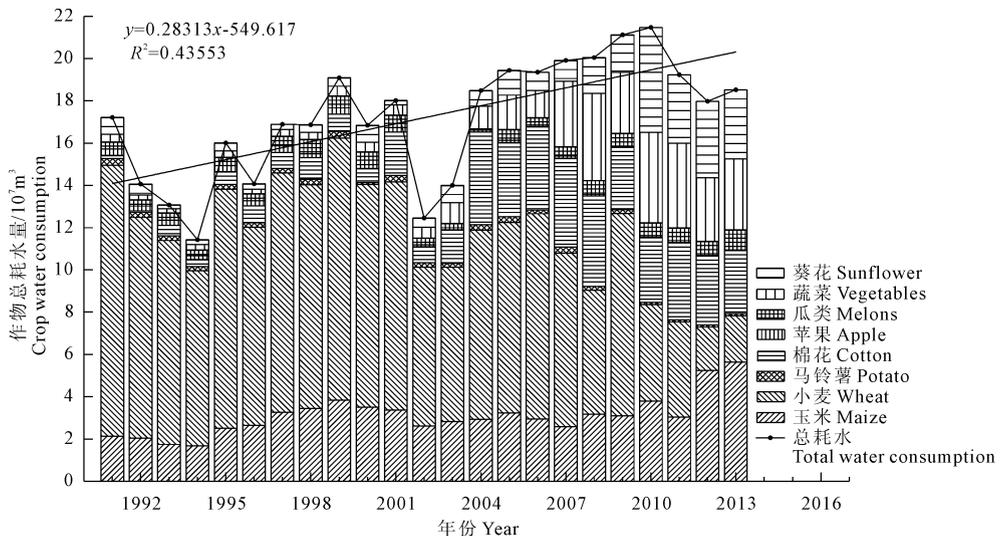


图 3 作物总耗水当量时序变化

Fig. 3 Time series change of crop water consumption

瓜类  $0.07 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和蔬菜  $0.14 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2010年,单位作物耗水当量较大的是棉花  $1.96 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和小麦  $0.93 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最小的是瓜类  $0.06 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2013年农作物单位耗水最多的是棉花  $1.82 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其次是葵花  $1.16 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和小麦  $0.89 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较少的是瓜类  $0.06 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和蔬菜  $0.09 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体上,8种农作物单位耗水当量时间序列都呈现下降趋势,但变化趋势差异较大。其中下降

趋势最显著的为苹果,1991—2004年,苹果单位耗水迅速下降,2013年比2004年降低88.9%,2004—2013年,保持相对稳定状态。其次是棉花,1991—2005年单位耗水当量下降速度较大,2006—2013年趋于稳定。小麦和玉米的下降趋势也较显著,且二者的时间趋势存在较大的相似性。瓜类、马铃薯和蔬菜的下降趋势不显著,时间序列较平稳,葵花单位作物耗水当量的时间序列则呈现很大的波动性。

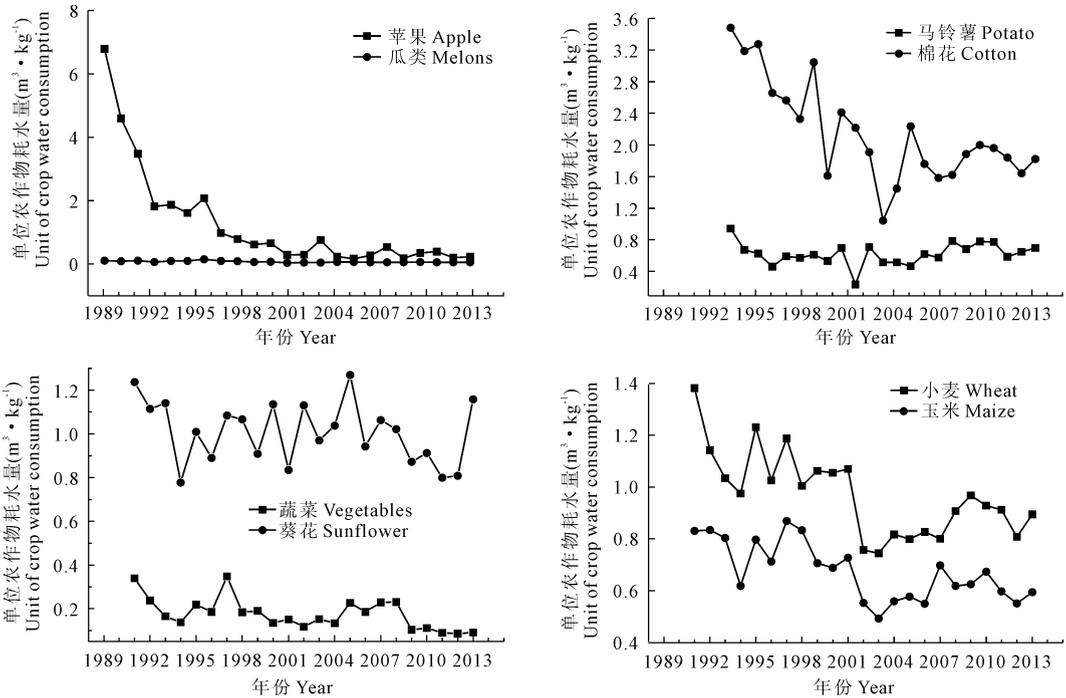


图4 单位作物耗水当量时序变化

Fig.4 Time series changes about unit of crop water consumption

### 3.2 气候耗水当量分离方法选择

一般来讲最优分解方法需要满足三个条件:(1) 经济技术耗水当量变化趋势应该符合经济社会发展规律;(2) 根据农业气候相似性理论,同一地区不同农作物气候耗水当量之间可能存在一定相关性;(3) 影响作物气候耗水当量的气候因子应该符合作物的生长特性。以下对这三原则进行逐一验证。选择民勤代表性的4种作物玉米、小麦、棉花和瓜类,用不同方法分离出的经济技术耗水当量和观测耗水当量(单位作物耗水当量)如图5所示,随着农业技术的进步,4种作物的单位耗水当量均显著减少。1991—2013年,玉米、小麦、棉花和瓜类单位耗水当量分别从  $0.83$ 、 $1.38$ 、 $3.48 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.11 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  震荡递减为  $0.59$ 、 $0.89$ 、 $1.82 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.06 \text{ m}^3 \text{ eq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。调合平均数分离的4种作物经济技术耗水变化趋势与实测曲线(单位作物耗水当量)最为

接近,但波动性也较大,明显与经济技术发展规律不符。滑动直线平均分离趋势是一条平滑的递减曲线,玉米和棉花的观测值大多位于趋势线的上方,气候变化对农作物节约用水是不利的。HP滤波法得到的趋势线呈“倒S”型,前期单位耗水变化率较快,随后逐渐减缓,最后趋于稳定,而且4种作物的变化趋势基本相似,其总体变化趋势符合经济社会发展规律。

根据农业气候相似性理论,位于同一区域的不同作物其观测耗水当量或者气候耗水当量应存在相关性。依据滑动直线平均法的作物气候耗水相关系数,如表2,除了棉花和玉米、瓜类之间相关性未通过检验,其它作物之间相关性均显著。HP滤波分离法得出的作物气候耗水相关系数,只有玉米和棉花之间未通过显著性检验,两作物的生物特性差异较大可能是原因之一。

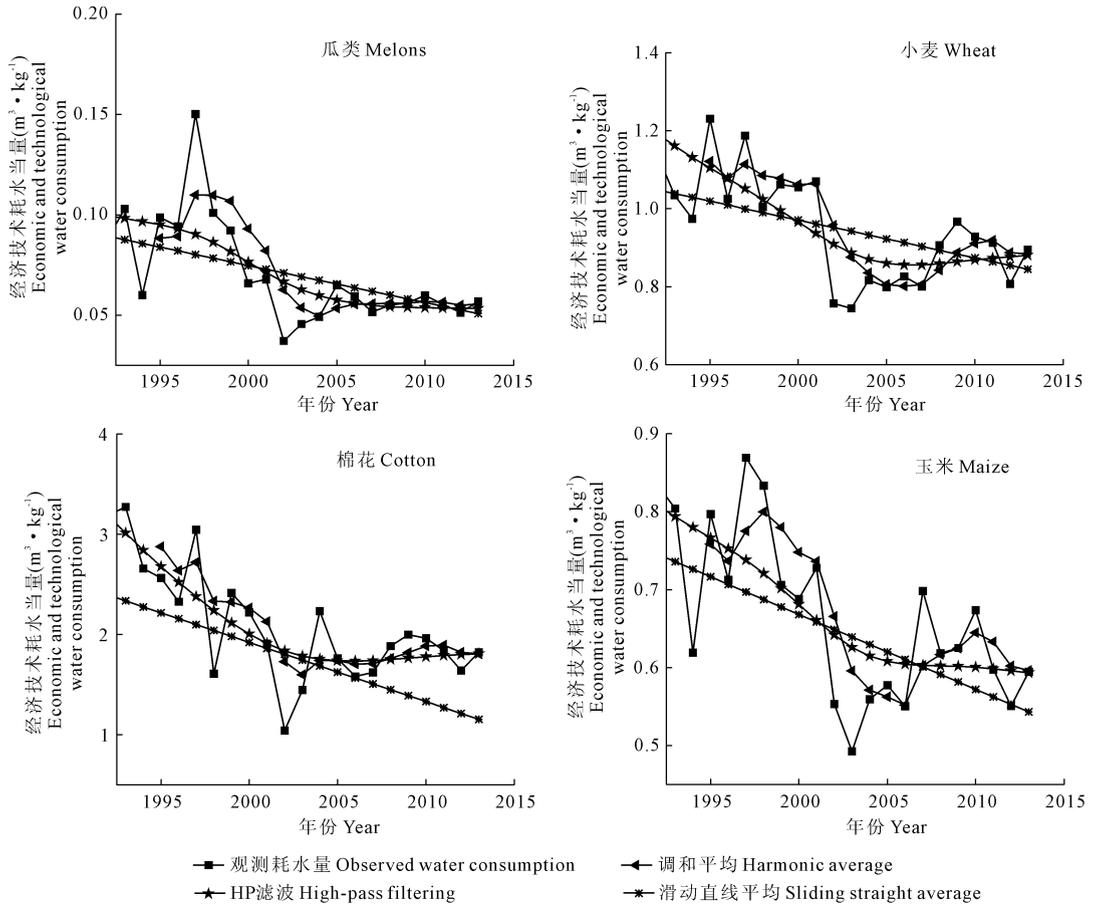


图 5 不同分离法下作物经济技术耗水当量和观测耗水当量时序变化

Fig.5 Time series changes of technology-induced crop water consumption and observed water consumption based on different separation processes

表 2 不同作物气候耗水当量相关系数表

Table 2 The correlation coefficient of climate – induced crop water consumption between different crops

方法 Method	相关系数 Correlation coefficient					
	玉米与小麦 Maize and wheat	玉米与棉花 Maize and cotton	玉米与瓜类 Maize and melons	小麦与棉花 Wheat and cotton	小麦与瓜类 Wheat and melons	棉花与瓜类 Cotton and melons
滑动直线平均 Sliding straight average	0.659**	0.258	0.681**	0.571*	0.562*	0.442
HP 滤波 High-pass filtering	0.643**	0.334	0.721**	0.516*	0.575**	0.521*

注：\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关，\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: \*\* indicates that the correlation coefficients pass significance tests with  $\alpha = 0.01$ , \* indicates that the correlation coefficients pass significance tests with  $\alpha = 0.05$ .

表 3 显示了通过不同分离方法得出的气候耗水当量与气候因子之间的相关系数。根据作物的生育期和生物特性，分别选择了 5—9 月份降水量 ( $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$ 、 $P_9$ )、5—9 月份风速 ( $W_5$ 、 $W_6$ 、 $W_7$ 、 $W_8$ 、 $W_9$ )、5—9 月份相对湿度 ( $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$ 、 $R_9$ )、5—9 月份最低气温 ( $T_{\min 5}$ 、 $T_{\min 6}$ 、 $T_{\min 7}$ 、 $T_{\min 8}$ 、 $T_{\min 9}$ )、5—9 月份最高气温 ( $T_{\max 5}$ 、 $T_{\max 6}$ 、 $T_{\max 7}$ 、 $T_{\max 8}$ 、 $T_{\max 9}$ )、5—9 月份平均气温 ( $T_{ave 5}$ 、 $T_{ave 6}$ 、 $T_{ave 7}$ 、 $T_{ave 8}$ 、 $T_{ave 9}$ ) 和 5—9

月份太阳辐射 ( $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $S_9$ ) 作为可能的气候影响因子。HP 滤波分离法得出的玉米单位气候耗水当量与 6 月份降水量显著负相关，与 9 月份风速显著正相关。小麦气候耗水当量和 6、7 月份总降水量、7 月份相对湿度、7 月份平均气温显著正相关。棉花单位气候耗水当量与 5 月份总降水量、5 月份相对湿度、6 月份降水量显著负相关，与 9 月份风速显著正相关。瓜类单位气候耗水当量与 6 月份降水

量、6 月份相对湿度显著负相关,与 8、9 月份风速显著正相关。滑动直线平均分离结果显示,玉米单位气候耗水当量与 5 月份平均气温、5 月份最低气温、

6 月份最低气温、6 月份最高气温、6 月份平均气温、7 月份最低气温显著负相关。小麦单位气候耗水当量与 6 月份风速、7 月份最高气温、7 月份相对湿度

表 3 作物气候耗水当量与气候变量相关系数表

Table 3 The correlation coefficient between climate - induced crop water consumption and climate variables

气候变量 Climatic variable	相关系数 Correlation coefficient							
	玉米 Maize		小麦 Wheat		棉花 Cotton		瓜类 Melons	
	HP 滤波 High-pass filtering	滑动直线平均 Sliding straight average						
$P_5$	0.099	-0.121	-0.272	-0.350	-0.641**	-0.627**	-0.134	-0.201
$W_5$	0.075	0.042	0.145	0.172	-0.025	0.068	0.132	0.147
$R_5$	-0.025	0.149	-0.354	-0.288	-0.545**	-0.502*	-0.069	-0.054
$T_{min5}$	0.147	-0.722**	0.046	-0.273	0.079	-0.101	0.124	-0.098
$T_{max5}$	0.142	-0.47*	0.286	0.024	0.411	0.190	0.213	0.080
$S_5$	-0.164	-0.366	0.108	-0.176	0.223	-0.092	0.154	0.019
$T_{ave5}$	0.102	-0.566**	0.224	-0.077	0.26	0.036	0.143	-0.017
$P_6$	-0.667**	0.160	-0.583**	-0.431	-0.499*	-0.414*	-0.675**	-0.546**
$W_6$	0.043	0.360	0.244	0.445*	0.081	0.267	0.022	0.189
$R_6$	-0.393	0.436*	-0.380	-0.142	-0.343	-0.255	-0.509*	-0.311
$T_{min6}$	0.063	-0.722**	0.066	-0.180	-0.065	-0.082	-0.034	-0.211
$T_{max6}$	0.429*	-0.549**	0.304	-0.033	0.055	-0.019	0.490*	0.275
$S_6$	0.236	-0.333	0.252	0.014	0.226	0.066	0.441*	0.251
$T_{ave6}$	0.325	-0.704**	0.271	-0.014	0.041	-0.041	0.343	0.113
$P_7$	-0.213	0.111	-0.429*	-0.226	0.094	0.190	-0.079	0.006
$W_7$	0.302	0.134	0.337	0.305	0.227	0.105	0.365	0.412*
$R_7$	-0.123	0.235	-0.554**	-0.417*	-0.304	-0.316	0.046	0.105
$T_{min7}$	0.044	-0.688**	0.203	-0.112	0.037	-0.116	0.055	-0.121
$T_{max7}$	0.247	-0.305	0.581	0.419*	0.302	0.284	0.096	0.029
$S_7$	0.031	0.169	0.236	0.191	0.218	0.093	-0.146	-0.129
$T_{ave7}$	0.099	-0.398	0.457*	0.241	0.156	0.086	0.007	-0.084
$P_8$	-0.305	-0.016	—	—	0.090	0.121	-0.081	-0.079
$W_8$	0.303	0.005	—	—	0.170	0.107	0.586**	0.563**
$R_8$	-0.312	0.307	—	—	-0.034	-0.062	-0.219	-0.176
$T_{min8}$	-0.138	-0.548	—	—	-0.237	-0.205	-0.02	-0.129
$T_{max8}$	0.060	-0.183	—	—	-0.195	-0.114	0.070	0.065
$S_8$	0.186	-0.020	—	—	0.131	-0.003	0.020	0.007
$T_{ave8}$	0.017	-0.326	—	—	-0.262	-0.210	0.006	-0.033
$P_9$	0.111	-0.405	—	—	-0.173	-0.306	-0.187	-0.284
$W_9$	0.428*	0.141	—	—	0.441*	0.284	0.753**	0.736**
$R_9$	0.176	-0.314	—	—	-0.146	-0.301	-0.176	-0.296
$T_{min9}$	-0.052	-0.101	—	—	-0.169	-0.234	-0.152	-0.161
$T_{max9}$	0.030	0.163	—	—	-0.001	0.010	0.268	0.308
$S_9$	-0.042	0.376	—	—	0.378	0.430	0.385	0.490**
$T_{ave9}$	-0.021	-0.116	—	—	-0.063	-0.139	0.020	-0.010

注: \*\* 表示相关系数通过显著性检验,  $\alpha = 0.01$ 。 \* 表示相关系数通过显著性检验,  $\alpha = 0.05$ 。

Note: \*\* indicates that the correlation coefficients pass significance tests with  $\alpha = 0.01$ , \* indicates that the correlation coefficients pass significance tests with  $\alpha = 0.05$ .

显著负相关。棉花单位气候耗水当量与 5 月份降水、5 月份相对湿度、6 月份降水显著负相关。单位瓜类气候耗水当量与 6 月份降水显著负相关,与 7、8、9 月份风速显著正相关,与 9 月份日照时数显著负相关。HP 滤波分离各作物单位气候耗水当量显示,气候影响要素主要集中在生育期内各月份的降水量和相对湿度,滑动直线平均分离法得出的主要相关性气候要素集中在生育期内各月份的气温变化。根据各作物气候耗水响应模式,最直观的气候要素应为降水的变化,所以 HP 滤波分离法更符合作物的耗水实际。

综上所述,HP 滤波法分离的经济技术耗水当量趋势符合社会发展规律,不同作物气候耗水当量相关性更显著,同时,耗水当量的气候响应模式也更能体现作物的生长实际,是较合理的分离方法。

### 3.3 单位作物耗水当量与主要气候要素之间关系的确立

根据前面提出的多元线性回归模型,探讨 4 种典型作物的单位气候耗水当量与主要气候因子之间的关系,在变量的选择上用了前向逐步回归法进行筛选,具体结果见表 4。

表 4 回归模型汇总

Table 4 The regression model summary

作物 Crop	回归模型 Regression model
玉米 Maize	$Y_w = 0.045 - 0.003 P_6,$ ( $n = 23, R^2 = 0.444, P < 0.01$ )
小麦 Wheat	$Y_w = 0.508 - 0.003 P_6 - 0.009 R_7,$ ( $n = 23, R^2 = 0.541, P < 0.01$ )
棉花 Cotton	$Y_w = 0.361 - 0.018 P_5 - 0.009 P_6,$ ( $n = 23, R^2 = 0.609, P < 0.01$ )
瓜类 Melons	$Y_w = 0.001 - 0.001 P_6 + 3.352 \times 10^{-5} W_9,$ ( $n = 23, R^2 = 0.863, P < 0.01$ )

玉米气候耗水当量的主要气候限制因素为 6 月份降水量,拟合优度  $R^2 = 0.44$ ,6 月份总降水量对玉米气候耗水当量的解释力度达到 44.4%。小麦单位气候耗水当量的主要限制因素为 7 月份相对湿度和 6 月份总降水量,回归系数分别为  $-0.009$ 、 $-0.003$ ,即 7 月份相对湿度和 6 月份降水量每增加 1%,对应小麦单位气候耗水当量减少 0.009 和 0.003,拟合优度  $R^2 = 0.541$ 。棉花单位气候耗水当量的主要限制因素为 5 月份和 6 月份降水量,回归系数分别为  $-0.018$ 、 $-0.009$ ,即两个月份的降水量每增加 1%,对应气候耗水当量分别降低 0.018 和 0.009,模型整体拟合优度  $R^2 = 0.609$ ,降水量对棉花单位气候耗水当量的解释力力度达 61.0%。6 月

份降水量和 9 月份风速是瓜类单位作物气候耗水当量的主要影响因素,6 月份总降水量和 9 月份风速增加 1%,分别对应单位气候耗水当量减少 0.001 和增加  $3.352 \times 10^{-5}$ ,拟合优度  $R^2 = 0.863$ ,两气候要素对瓜类单位气候耗水当量的解释力度达 86.3%。

HP 滤波法分离的 1991—2013 年玉米、小麦、棉花和瓜类 4 种典型作物的单位气候耗水当量及其主要气候影响因子被标准化,如图 6 所示。1991—2000 年 6 月份降水量偏少且变率较大,同时期的玉米单位气候耗水当量偏高,标准化值多位于零值以上。1994 年、2002—2003 年 6 月份降水量异常偏高,玉米气候耗水当量也明显低于正常值。2004—2013 年,6 月份降水变率相对减小,玉米气候耗水当量波动性减弱。同时受 6 月份降水量和 7 月份相对湿度的影响,1991—2002 年小麦气候耗水当量波动性较强,2003—2013 年波动性明显减弱,近几年有增加的趋势,其中 1991 年单位气候耗水当量异常偏高,1994 年出现最大减少值。棉花单位气候耗水当量受 5、6 月份降水的影响,1991—2003 年变率较大,2004—2013 年波动幅度明显减小,并逐渐趋于稳定,其中 1998 年、2002 年棉花单位气候耗水当量出现低值。1991—2013 年,虽然 6 月份总降水量波动性相对较小,但 9 月份风速相对稳定,瓜类历年单位作物气候耗水当量相比其它 3 种农作物变率较小,但于 1994 年出现极大值。总体而言,近 20 年来在降水、风速等因子的干预下,瓜类作物的气候耗水当量波动性最小,棉花的变率最大,对气候变化响应最为敏感,玉米次之。其中玉米气候耗水当量的变动幅度经历了由大变小的过程,并逐渐趋向稳定。小麦在 1992—2002 年间气候耗水当量波动性较强,后逐渐减弱。棉花的气候耗水当量变化率经历了由小变大,最后又逐渐减弱的过程。

## 4 结论与讨论

本文将水足迹和水资源压力指数结合起来,研究民勤 8 种农作物的耗水当量,民勤水资源压力指数已经达到极限值 1,远高于全国平均水平 0.478。2013 年单位作物耗水当量排序依次是:棉花 > 葵花 > 小麦 > 马铃薯 > 玉米 > 苹果 > 蔬菜 > 瓜类,整体上,随着经济技术水平的提高,8 种作物单位耗水当量逐年降低,各作物时间序列变化差异也较大,其中,棉花、玉米和小麦耕作技术发展较快,瓜类相对较慢。1991—2013 年农作物总耗水当量不断增加,

但不同农作物总耗水当量年际变化较大,其中变化最快的是小麦,1991—2009年,小麦总耗水当量一直占有主导地位,是主要耗水作物,2010—2013年小麦耗水当量迅速下降,玉米成为主要耗水作物。20年间葵花和蔬菜的总耗水当量增速显著,目前成为仅次于玉米的主要耗水作物。总体而言,民勤地区农

作物种植结构调整越来越合理,并初见成效,但总耗水当量还在逐年递增,应该进一步调整种植结构,缩减粮食作物的种植面积,发展特色林果业、大棚蔬菜等经济作物,提高用水效率,同时着重提高瓜类、蔬菜、马铃薯的耕作技术,提高作物的单产,逐步减少单位作物耗水当量。

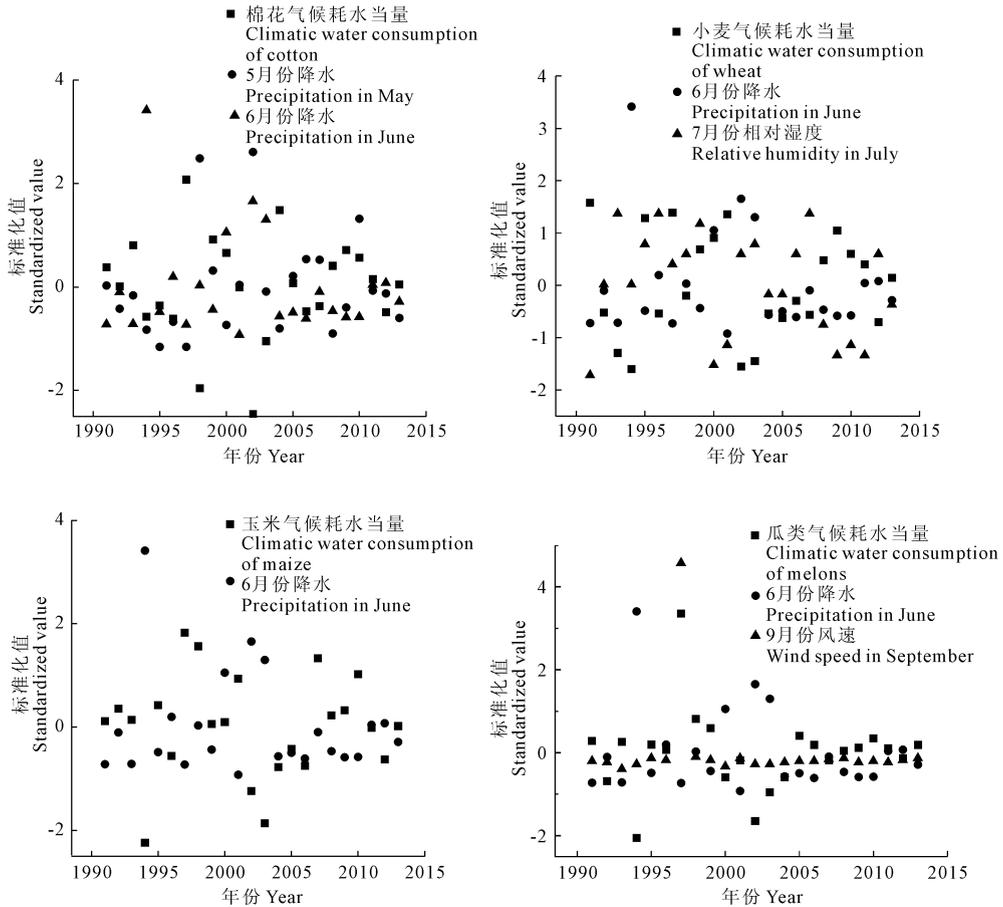


图6 作物气候耗水当量及相应的影响要素标准化变化趋势

Fig.6 Standardization trends of climate-induced crop water consumption and the main climate variables

三种气候耗水当量分离模型,HP滤波法更符合社会发展趋势和农作物生长特性,为最优模型。通过逐步回归分析法进行研究,民勤4种典型作物气候耗水当量的影响因素都表现为5月和6月份的降水总量,其次是7月份相对湿度和9月份风速,气温变化并未成为主要气候因子,所以全球气候变暖对民勤作物气候耗水当量的影响尚不明朗。1991—2013年5、6月份降水变量趋势性不显著,变动幅度逐年减小,趋向平缓,极端气候概率降低,相应的农作物单位气候耗水当量也趋于平缓,相同农业灌溉用水量的情况下,对农作物节水灌溉是有利的。9月份风速的变化较平稳,意味着瓜类单位作物气候耗水当量受异常气候变化的干扰相对较小,

在人为灌溉条件下,水资源利用效率最高,比较适宜在民勤地区推广种植。棉花和玉米单位气候耗水当量波动较大,在固定配水定额条件下,不利于水资源的合理利用,容易造成水资源的浪费或不足,应该进一步提高灌溉技术,逐步推广依据气候条件随时调节的智能灌溉系统,不但可以节省劳动力,更重要的是它能准确、定时、定量、高效地给作物自动补充水分,以提高产量、质量,节水、节能。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

- [2] IPCC. Climate Change: Synthesis Report[C]//IPCC. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007: 104.
- [3] Sun S K, Wu P T, Wang Y B, et al. Impacts of climate change on water footprint of spring wheat production: the case of an irrigation district in China[J]. *Span J Agric Res*, 2012, 10(4): 1176-1187.
- [4] Decker W L. Developments in agricultural meteorology as a guide to its potential for the twenty-first century[J]. *Agric For Meteorol*, 2010, 169: 9-25.
- [5] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G. Climate Change 2001: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] Tong Ling, Kang Shaozhong, Zhang Lu. Temporal and spatial variations of evapotranspiration for spring wheat in the Shiyang river basin in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 241-250.
- [7] 孙世坤, 蔡焕杰, 王健. 基于 CROPWAT 模型的非充分灌溉研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 28-30.
- [8] 刘勤, 严昌荣, 梅旭荣, 等. 西北旱区参考作物蒸散量空间格局演变特征分析[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(1): 49-51.
- [9] El-Maayar, M Lange, M A. A methodology to infer crop yield response to climate variability and change using long-term observations[J]. *Atmosphere*, 2013, 4(4): 365-382.
- [10] Niu X K, Xie R Z, Liu X, et al. Maize yield gains in Northeast China in the last six decades[J]. *J Integr Agric*, 2013, 12(4): 630-637.
- [11] Zhao J F, Guo J P, Mu J. Exploring the relationships between climatic variables and climate-induced yield of spring maize in Northeast China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, (207): 79-90.
- [12] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. Godalming, UK: Routledge, 2011: 20-60.
- [13] Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[C]//The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (UNESCO - IHE). Value of Water Research Report Series No. 12. Delft, the Netherlands, 2003.
- [14] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water Footprints of Nations[C]//UNESCO - IHE. Value of Water Research Report Series, No. 16. Delft, 2004: 1-80.
- [15] Wichelns D. Virtual water and water footprints offer limited insight regarding important policy questions[J]. *Int J Water Resour. Dev*, 2010, 26(4): 639-651.
- [16] Chapagain A K, Tickner D. Water Footprint: Help or Hindrance? [J]. *Water Alternatives*, 2012, 5(3): 563-581.
- [17] Brown A, Matlock M D. A review of water scarcity indices and methodologies[J]. *The Sustainability Consortium, technology*, 2011, 44(22): 8684-8691.
- [18] Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability[J]. *Plos One*, 2012, 7(2): 2-6.
- [19] Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of fresh water consumption in LCA[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(11): 4098-4104.
- [20] Bayart J B, Bulle C, Deschênes L, et al. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2010, 15(5): 429-453.
- [21] Berger M, Finkbeiner M. Water footprint: How to address water use in life cycle Assessment? [J]. *Sustainability*, 2010, 2(4): 919-944.
- [22] Canals L, Chenoweth J, Chapagain A Y. Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—Inventory modeling and characterization factors for the main impact pathways[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2009, 14: 28-42.
- [23] Fingerman K R, Berndes G, Orr S, et al. Impact assessment at the bioenergy-water nexus[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2011, 5(4): 375-386.
- [24] 王邵武. 近百年气候变化与变率的诊断研究[J]. *气象学报*, 1994, 52(3): 261-273.
- [25] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响[J]. *地学前缘*, 2009, 9(2): 284-297.
- [26] 何亚娟, 潘学标. 甘肃省民勤绿洲种植结构与水资源利用的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 122-124.
- [27] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [28] Gheewala S M, Silalertruksa T, Nilsalab T, et al. Water footprint and impact of water consumption for food, feed, fuel crops production in Thailand[J]. *Water*, 2014, 6(6): 1703.
- [29] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[C]//Food and Agriculture Organization. FAO Drainage and Irrigation Paper 56, Italy, 1988.
- [30] Fang S B. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. *J Nat Disasters*, 2011, (6): 13-18.
- [31] Guo J P, Zhao J F, Yuan B, et al. Evaluation of agricultural climatic resource utilization during spring maize cultivation in Northeast China under climate change[J]. *J Meteorol Res*, 2013, 27(5): 758-768.
- [32] 韩蓓. HP 滤波法及其在地区潜在经济增长率测算中的应用[J]. *经济师*, 2009, (1): 28-29.
- [33] 陈宝峰, 白人朴, 刘广利. 影响山西省农机化水平的多因素逐步回归分析[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(4): 115-118.