

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.025

基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究

魏新光¹ 王铁良¹ 刘春成² 聂真义³ 李波¹ 姚名泽¹
(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002;
3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 根据辽宁省 27 个气象站 1955—2014 年逐日气象数据与相关玉米生长资料,对辽宁省不同区域玉米生育期需水量、水分盈亏量的确定方法及其时空分布特征进行深入分析。结果表明,辽宁省玉米生育期需水量以辽西最高(大于 380 mm),辽南最低(小于 345 mm)。玉米的水分盈亏量从西北至东南依次增加,其中辽西地区亏水现象普遍存在。不同地区年际水分盈亏量均呈逐渐下降趋势,其中辽西、辽北地区下降趋势显著($U_F < U_{0.05/2} = 1.96$),辽中地区下降极其显著($U_F = -2.89 < U_{0.01/2} = -2.58$),下降速率达 19.465 mm/10 a。大部分研究站点(55.6% ~ 81.5%),典型年法计算的水分盈亏量要高于虚拟年法。不同水文年,2 种方法计算结果一致性由好到差依次为:丰水年、干旱年、特旱年和平水年,且对于大部分研究站点(48% ~ 74%),2 种方法计算结果的差异小于 30 mm。为了提高计算精度,采用组合模型对辽宁省玉米水分盈亏量进行计算,结果表明随着水文频率的增加(水文年型由丰水年变为特旱年),辽宁省出现水分亏缺的区域逐渐增大,在丰水年,仅辽西的朝阳地区出现水分亏缺,而在特旱年,除辽东的本溪、丹东一带,全省大部分区域均存在不同程度的水分亏缺。

关键词: 玉米; 水分盈亏量; 投影寻踪; 时空分布; 虚拟年法; 辽宁省

中图分类号: S274.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0193-10

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Maize Water Budget Based on Combined Model in Liaoning Province

WEI Xinguang¹ WANG Tieliang¹ LIU Chuncheng² NIE Zhenyi³ LI Bo¹ YAO Mingze¹
(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China
3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Water budget is an essential parameter for crop water management and optimal allocation of the regional agricultural water resources. Long-term observations of meteorological data were collected from 1955 to 2014 in 27 agricultural meteorological stations in Liaoning Province, and relevant physiological information of maize was also recorded. Through analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of evapotranspiration (ET) and water budget of maize, the results were got as follows: ET of maize reached the highest in west of Liaoning Province (greater than 380 mm), while the lowest was obtained in south of Liaoning Province (less than 345 mm). The trend of water budget was increased from northwest to southeast of Liaoning Province, and water deficit was quite common in western part. There was a decreasing trend of yearly water budget within the whole Liaoning Province, which significantly happened in west and north of Liaoning Province ($U_F < U_{0.05/2} = 1.96$), and very significantly happened in middle of Liaoning Province ($U_F = -2.89 < U_{0.01/2} = -2.58$), their decrease rate reached 19.465 mm/10 a. Water budget determined by the typical year method were higher than that determined by the virtual year method in most of the research sites (55.6% ~ 81.5%). Among different hydrological years, the consistence of the results from high to low showed as follows: wet year, dry year, drought year and normal year. Besides, their difference was found to be lower than 30 mm in most of the research sites (48% ~ 74%). In order to improve the accuracy of corn water budget in Liaoning

收稿日期: 2016-10-25 修回日期: 2017-02-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(31570706)、公益性行业(农业)科研专项(201303125)和辽宁省特聘教授专项
作者简介: 魏新光(1984—),男,讲师,博士,主要从事作物高效用水与蒸散发尺度效应研究,E-mail: weixg_wi@163.com
通信作者: 王铁良(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉研究,E-mail: tieliangwang@126.com

Province, a combination model was used. The results showed that with the increase of hydrological frequency (from wet to dry of hydrological year), regions showing water deficit were increased gradually. There was only water deficit in Chaoyang region in wet year, but in drought years it was widely expanded to the whole province except Benxi City and Dandong City in east of Liaoning Province.

Key words: maize; water budget; projection pursuit; spatial and temporal distribution; virtual year method; Liaoning Province

引言

辽宁省地处我国“东北大粮仓”的南部,是我国重要商品粮生产基地。玉米作为全省第一大粮食作物,在全省的13个市区均有分布^[1]。截止2015年,全省玉米种植面积 $3.297 \times 10^6 \text{ hm}^2$,产量 $2.2022 \times 10^7 \text{ t}$,分别占全国玉米种植面积和产量的8.6%和9.0%^[2]。由于全省地域类型复杂、不同区域水文气候条件各异,水量分布时空差异明显,因此准确掌握全省不同区域玉米生育期水量盈亏状况,并制定科学合理的灌排措施,对于提高玉米产量和促进区域水资源高效利用均具有重要意义^[3]。

玉米的水分盈亏量受到其种植模式、降水、地下水补给、气候等诸因子的综合影响,这些因素在年际之间变化剧烈,导致不同年份间水分盈亏量差异较大。为更加全面描述这种年际差异,必须划分不同水文年型,分别进行研究。常用的水文年划分方法有典型年法和虚拟年法。典型年法也称典型水文年法,主要基于降水频率分析进行年型划分,原理简单,运用非常广泛^[4-5]。但是该方法忽略了降水在生育期内的分配过程,假定相同水文年型下水分盈亏量相等,这往往与实际情况不符。虚拟年法(长系列法的一种形式),也是进行水分年型划分的重要方法,康绍忠等^[6]利用虚拟年法对陕西地区的玉米、小麦、玉米生育期进行年型划分,上官周平等^[7]利用虚拟年法对西北地区主要旱田作物进行年型划分,均收到了理想的效果。由于该方法是建立在较小时间尺度水量平衡基础上的频率分析,计算结果相对准确。但该方法忽略了长历时、较大降水时,降水有效利用系数的逐渐减少,因而在长历时降水时,会造成盈余水量的高估。前人利用单一方法进行频率分析的研究成果较为多见,但将2种方法进行统筹考虑、综合运用研究成果还较为少见,为此本文采用组合模型,并采用权重赋值法,对2种方法的权重进行赋值,进而对不同水文年型下的计算结果进行深入分析。常用的权重确定方法,可分为主观赋权法和客观赋权法两大类^[8]。主观赋值法主要依赖于专家经验和主观判断,虽然较为简单,但有一定的主观随意性^[9-10];客观赋值法主要有:熵值法、变异系数法、主成分分析法、投影寻踪法(Projection

pursuit,PP)等^[11-12]。这些方法在进行各类评价预测中均应用广泛^[13-15],其中PP法作为一种非线性、非正态高维的统计方法,能够通过客观投影诊断,自动找出反映高维空间规律的数据结构,降低了数据维数^[16],实现了低维数据研究高维数据的功能^[17],被广泛地运用于农田灌溉、水文水资源规划等领域^[18-19]。

前人在进行相关研究时,往往仅选取典型年法或虚拟年法中的一种,但是对两方法进行深入比较、分析,以及组合应用的研究并不多见。本文主要运用2种方法分别计算辽宁省玉米的水分盈亏量,对比其不同区域、不同站点、不同水文年型(计算结果)的差异性和合理性,并采用投影寻踪法(PP法)对组合模型各项进行权重赋值,最终采用组合模型确定辽宁省不同水文年的水分盈亏量空间分布,以期辽宁省灌溉决策和农业水资源规划提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究选取辽宁省13个市的27个农业气象观测站作为研究站点(图1),研究所用资料有:各站点经纬度、高程信息;1955—2014年逐日气象数据(最高温度、最低温度、平均温度、风速、降水量、日照时数、气压),主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);辽宁省玉米物候期、生长发育状况根据资料^[20]确定。

1.2 作物需水量

作物需水量(Evapotranspiration,ET)采用间接

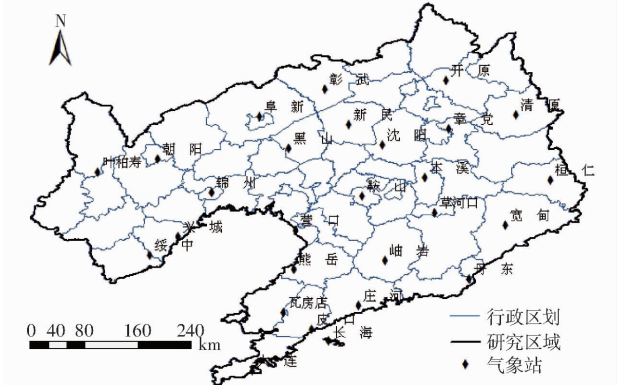


图1 研究区域与站点选取

Fig.1 Study area and site selection

法进行确定,即首先利用彭曼蒙特斯公式(Peman - Monteith,P - M)计算参考作物蒸发蒸腾量(ET_o),然后根据单作物系数法,确定玉米的需水量(ET)。P - M 公式的计算步骤参考文献[21],过程从略。单作物系数法作物需水量的计算方程为

$$ET = \sum_{i=1}^m K_{ci} ET_{oi} \tag{1}$$

式中 K_{ci} ——第 i 月的作物系数
 ET_{oi} ——第 i 月的参考作物蒸发蒸腾量,mm
 m ——生育期总月数

各站点玉米全生育期逐月作物系数的选取参照文献[20,22]确定。

1.3 作物水分盈亏量

玉米生育期水分盈亏量 M (mm)采用水量平衡方程^[23]确定,即

$$W_i - W_0 = W_i + P_0 + K - ET - M \tag{2}$$

其中 $P_0 = \alpha P \tag{3}$

式中 W_0 、 W_i ——时段初始、时间 i 时的土壤计划湿润层储水量,mm
 W_i ——由于土壤计划湿润层增加而增加的水量,mm
 P_0 ——有效降水量,mm P ——降水量,mm
 K ——地下水补给量,mm
 α ——降水有效利用系数

本研究的玉米种植区域基本为旱田,一般不考虑地下水补给,故 $K = 0$;玉米全生育期的计划湿润层深度固定不变,即 $W_i = 0$;同时由于本研究为 60 a 连续时间序列,对于较长的连续时间序列,可以忽略研究过程中的土壤水分变化,即 $W_i - W_0 = 0$ 。 α 受土壤性质、地面覆盖、地形、次降水量、降水强度及降水延续时间等因素影响,一次降水量小于 5 mm 时, α 为 0;一次降水量为 5 ~ 50 mm 时, α 约为 0.9;一次降水量大于 50 mm 时, α 为 0.8^[24]。

若 $M > 0$ mm,表明出现了水分盈余, M 值为农田净排水量;若 $M < 0$ mm,表明出现了水分亏缺, $|M|$ 为水分亏缺量,即净灌溉需水量。

1.4 不同水文年玉米水分盈亏量的确定

确定不同水文年型的玉米水分盈亏量,需要首先根据水文频率进行典型水文年型划分,然后依据划分的水文年型求得各水文年型对应的水分盈亏量。参照前人研究成果^[6],水文频率 p 为 25%、50%、75% 和 90% 时对应的水文年型分别为丰水年、平水年、干旱年和特旱年。

(1) 典型年法

典型年法直接对研究期内历年有效降水量进行频率分析,水文频率计算式为

$$p_i = \frac{m_{p_0}}{n + 1} \times 100\% \tag{4}$$

式中 n ——研究总年数
 m_{p_0} ——研究年份按照有效降水量 P_0 排序的序列号

p_i ——典型年法确定的水文频率

各水文年计算作物水分盈亏量步骤为:①根据式(1)计算历年玉米需水量 ET_i ,然后确定多年平均 ET 值。②利用式(4)对有效降水量进行水文频率分析,得到 25%、50%、75% 和 90% 4 种水文频率对应的有效降水量。③根据 m_{p_0} 得到其对应的具体年份与相应的 P_0 值。④将 ET 和利用步骤③得到的各水文年份对应的 P_0 代入式(2),得到相应的 M 值,即为这 4 种水文年对应的水分盈亏量。

(2) 虚拟年法

虚拟年法不直接对降水量进行频率分析,而是先求得历年水分盈亏量 M ,然后对 M 值进行频率分析,其频率分析公式为

$$p_v = \frac{m_M}{n + 1} \times 100\% \tag{5}$$

式中 m_M ——研究年份按照水分盈亏量 M 排序的序列号
 p_v ——虚拟年法确定的水文频率

各水文年玉米水分盈亏量计算步骤为:①先根据式(1)、(2)分别计算研究序列中历年的水分盈亏量 m_M 。②利用式(5)对 m_M 进行水文频率分析。③由频率分析得到 25%、50%、75% 和 90% 4 种水文频率对应的 M 值,即为这 4 种水文年型的水分盈亏量。

1.5 组合模型确定玉米水分盈亏量

组合模型的方程为

$$M = \alpha_t M_t + \alpha_v M_v \tag{6}$$

其中 $\alpha_t + \alpha_v = 1 \tag{7}$

式中 M_t ——典型年法确定的水分盈亏量,mm
 M_v ——虚拟年法确定的水分盈亏量,mm
 α_t 、 α_v ——采用投影寻踪模型确定的典型年、虚拟年法计算结果的权重

2 结果与分析

2.1 玉米全生育期需水量与水分盈亏量

2.1.1 玉米全生育期需水量空间分布

根据 P - M 公式和式(1)计算得到各代表站点历年 ET 值,然后计算各站点数据的多年平均值和变异(标准差),将计算结果采用反距离加权插值法^[25]进行空间插值,得到辽宁省平水年($p = 50\%$)玉米需水量空间分布结果如图 2 所示。

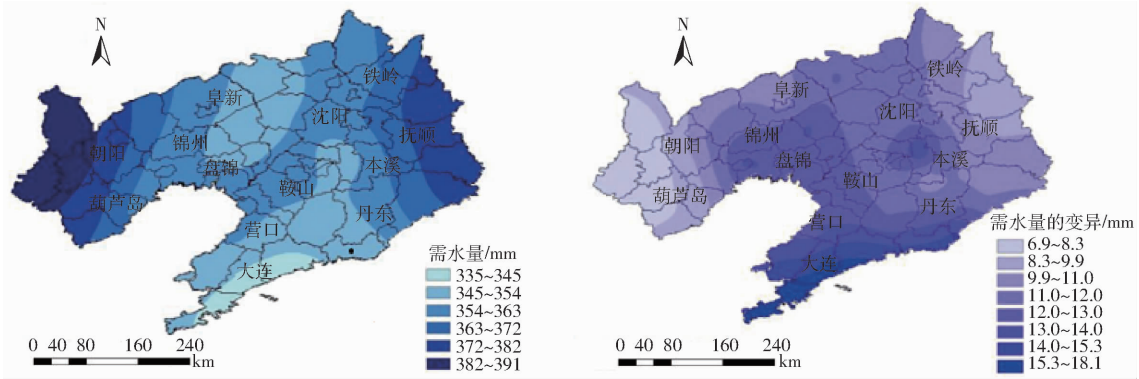


图 2 辽宁省玉米全生育期需水量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of ET during growth periods of maize in Liaoning Province

从图 2 可以看出,辽宁全省玉米生育期的需水量(ET)呈现东西高、中部低的特点。 ET 最高的地区出现在辽西的朝阳一带,多年平均 $ET \geq 380$ mm;其次是辽东东部,多年平均 $ET \geq 370$ mm;辽宁中部 ET 较低,主要在 335 ~ 370 mm 之间;辽南南部最低,特别是大连一带的 $ET \leq 345$ mm。全省玉米 ET 的年际波动在 6.9 ~ 18.1 mm 之间,其中辽西西部最小(年际变异小于 8 mm),辽南南部最大(年际变异

大于 15 mm)。
2.1.2 玉米全生育期水分盈亏量空间分布特征
玉米全生育期的水分盈亏量(M)是制定农田灌溉、排水制度的基础数据。根据搜集的气象、水文资料并结合图 2,利用水量平衡原理,求得各站点的 M 值及其变异(标准差),利用 Kriging 插值法得到平水年($p = 50\%$)辽宁省玉米 M 值及其变异的分布如图 3 所示。

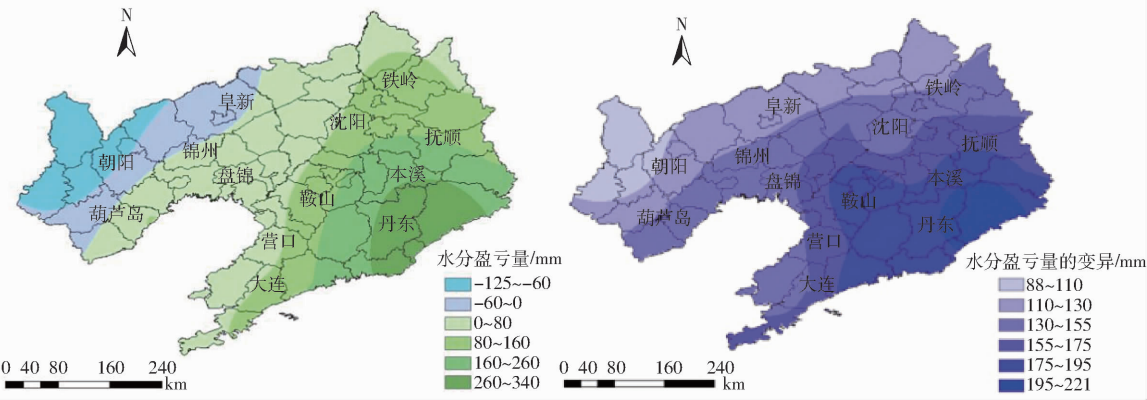


图 3 辽宁省玉米全生育期水分盈亏状况

Fig. 3 Spatial distributions of maize water budget in Liaoning Province

辽宁省玉米的水分盈亏量呈现从西北到东南依次增加的趋势:其中辽西大部地区 $M < 0$ mm,其中朝阳一带 $M \leq -60$ mm。由此可见,该地区干旱普遍存在;而在辽中、辽北大部和辽南的西部地区, M 平均值在 0 ~ 80 mm 之间,正常年份这些地区水量基本平衡,或略有盈余,但是由于 M 值年际变化剧烈(110 ~ 175 mm),个别年份仍然可能发生水分亏缺;辽东地区 M 普遍大于 160 mm,丹东一带甚至超过 260 mm。虽然其年际变化仍比较剧烈(170 ~ 220 mm),但总体上该地区水分盈余较多,需要采取适当排水措施,以防止渍涝发生。

2.1.3 玉米全生育期水分盈亏量年际变化

为进一步分析辽宁省 M 值的年际变化,在辽东、辽南、辽西、辽北和辽中分别选取丹东、大连、叶柏寿、开源和沈阳等 5 个典型站点,对辽宁省不同地

区 M 值的年际变化规律(图 4、表 1)及趋势(表 2)进行分析。

由图 4 和表 1 可知,辽宁省不同区域 M 值差异较大。除辽西(多年平均 $M = -124.83$ mm)外,其

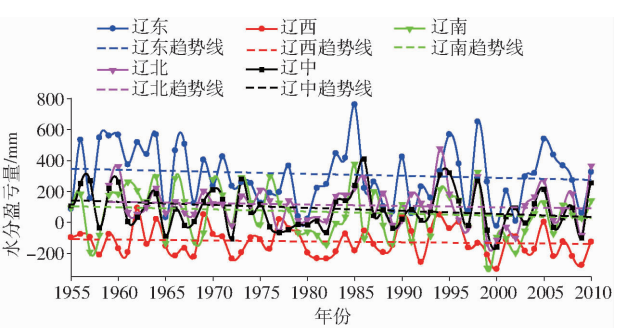


图 4 辽宁省不同区域玉米全生育期水分盈亏量年际变化

Fig. 4 Inter annual variation of maize water budget in different areas of Liaoning Province

表 1 辽宁省不同区域水分盈亏量年际变化回归方程

Tab.1 Rregression equation for inter annual variation tendency of water budget					
区域	回归方程	相关系数 r	平均值/mm	标准差/mm	变异系数
辽东	$Y = -1.664\ 3x + 3\ 605.99$	0.16	308.13	186.76	0.61
辽西	$Y = -0.556\ 4x + 979.13$	0.12	-124.83	88.73	0.71
辽南	$Y = -1.360\ 3x + 2\ 763.53$	0.15	67.38	161.99	2.40
辽北	$Y = -0.843\ 1x + 1\ 784.48$	0.11	109.63	126.71	1.16
辽中	$Y = -1.946\ 5x + 3\ 947.69$	0.26	88.76	138.56	1.56

注:Y 为水分盈亏量,mm;x 为年份。

他地区的 M 值普遍高于零。换言之,除辽西地区普遍存在水分亏缺以外,辽宁省其他区域的大部分年份均有水分盈余。通过对辽宁省的不同区域水分盈亏量的 $M-K$ 趋势检验发现(表 2),全省不同区域 M 值均呈现一定的下降趋势($U_F < 0$),其中辽中地区下降趋势极其显著($U_F = -2.89 < U_{0.01/2} = -2.58, p = 0.04 < 0.05$),下降速率达到 19.465 mm/10 a;辽西、辽北地区下降也较为显著($U_F < U_{0.05/2} = 1.96$),下降速率分别达到 5.564、8.431 mm/10 a。而辽东和辽南由

于 M 值波动剧烈(标准差分别达到 186.76 mm 和 161.99 mm),下降趋势并不显著。总体而言,在辽宁省的各个区域,均呈现水分盈余量逐年减少,水分亏缺量逐年增加的趋势,其中辽中、辽西、辽北地区的下降均较为显著,特别是辽中地区下降极其显著。

2.2 虚拟年法和典型年法确定的玉米水分盈亏量

2.2.1 不同地区水分盈亏量

利用典型年法和虚拟年法分别计算辽宁省不同地区 4 种水文年型下的 M 值,如表 3 所示。

表 2 辽宁省不同区域水分盈亏量 $M-K$ 趋势检验

Tab.2 M-K test of water budget in different regions of Liaoning Province					
区域	辽东	辽西	辽南	辽北	辽中
统计值 U_F	-1.38	-2.48	-1.95	-1.98	-2.89
检验判别	$U_{0.05/2} = \pm 1.96$	$U_{0.05/2} = \pm 1.96$	$U_{0.05/2} = \pm 1.96$	$U_{0.05/2} = \pm 1.96$	$U_{0.01/2} = \pm 2.58$
趋势性	减小趋势	显著减小	减小趋势	显著减小	极显著减小

表 3 辽宁省不同区域各水文年水分盈亏量

Tab.3 Water budget in each hydrological year in different areas of Liaoning Province										mm
水文年型	辽西		辽东		辽南		辽北		辽中	
	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法
丰水年($p=25\%$)	-68.39	-39.41	462.44	435.93	180.51	179.61	196.21	191.93	178.99	119.39
平水年($p=50\%$)	-113.75	-99.36	310.04	257.46	97.71	48.50	108.93	119.02	92.67	28.12
干旱年($p=75\%$)	-162.55	-173.28	204.36	157.37	-47.89	-64.88	35.97	15.38	-1.17	-16.98
特旱年($p=90\%$)	-215.83	-222.35	98.46	19.23	-165.01	-135.22	-22.25	-35.56	-70.11	-64.68

从表 3 可以看出,2 种方法确定的玉米 M 值均随着水文频率的增加(水文年型由丰水年变为特旱年)逐渐降低,甚至出现负值。但在辽宁省的不同区域 2 种方法的计算结果也存在一定差异:在辽东地区,各种水文年型下,2 种方法 M 值均大于零,且用典型年法计算的结果均高于虚拟年法,特别是干旱年时,2 种方法的计算结果差异最为显著。表明该地区 2 种方法的计算结果均不存在水分亏缺,但用典型年法计算的水分盈余量较大。

在辽西地区,各个水文年型下,2 种方法的计算结果均为负值,说明该地区各种水文年均会出现水分亏缺;在干旱年和特旱年,典型年法计算结果也高于虚拟年法的计算结果;而在丰水年和平水年,典型

年法的计算结果低于虚拟年法。换言之,在丰水年和平水年,典型年法计算结果较大,而在干旱年和特旱年,虚拟年法计算结果较大。

辽中、辽南和辽北地区的水分盈亏状况差异不显著,均是丰水年、平水年出现水分盈余,特旱年出现水分亏缺,干旱年则出现轻度的水分亏缺或盈余。辽中地区在丰水年和平水年,典型年法计算结果明显大于虚拟年法,其他地区 2 种方法的计算结果差别不明显。总体而言,在辽宁省的不同区域,2 种方法的计算结果存在一定差异,辽东地区典型年法的计算结果均大于虚拟年法。而在辽西、辽南、辽北和辽中地区,2 种方法的计算结果无明显规律。

2.2.2 站点选取对计算结果的影响

为进一步分析站点选取对 M 值(2 种方法计算结果)造成的差异,对各站点计算结果进行分析比较(图 5),并统计每种方法结果较大时的站点数和占总研究站点数的比例(表 4)。结果显示,不同站点 2 种方法计算结果差异明显。阜新、清原、宽甸、丹东等站点虚拟年法计算结果 M_v 较大,而绥中、叶柏寿等站点,典型年法的计算结果 M_t 较大,而且相同站点不同水文年 M_t 与 M_v 存在差异。通过对所有站点的计算结果进行统计分析(表 4),各水文年型下 $M_t - M_v$ 均大于零。换言之,就全省平均情况而言,各种水文年型下,典型年法的计算结果均要大于虚拟年法。其中,在平水年, M_t 平均偏大最多,达 29.99 mm,其次为干旱年和特旱年,丰水年最小,平均偏大值分别为 18.33、6.28、6.02 mm。但是,由于各站点的 $M_t - M_v$ 值在不同水文年型下波动剧烈,变异系数达 0.92 ~ 5.46。平均结果的稳定性不高,可靠性不强。通过站点统计(表 4),在不同水文年, M_t

较大的站点数与站点比例均高于 M_v 。特别在平水年,22 个站点(占总站点数的 81.5%) M_t 均较大,其次为干旱年,特旱年和丰水年较少,站点数分别达到 20、16 和 15 个,分别占总站点数的 74.1%、59.3% 和 55.6%。总体而言,各种水文年型下大部分站点(55.6% ~ 81.5%) 典型年法的计算结果要大于虚拟年法。

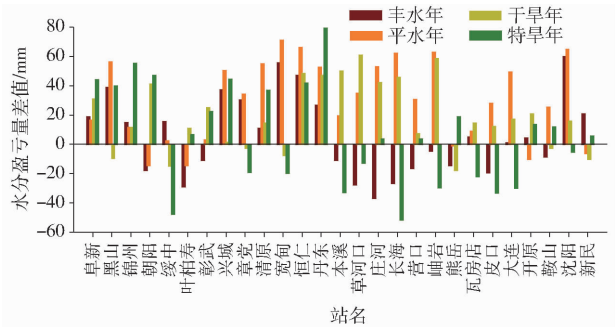


图 5 各研究站点 2 种方法结果差值变化分析
Fig.5 Water budget difference analysis of two methods in each site

表 4 各研究站点 2 种方法水分盈亏量计算结果差异
Tab.4 Result statistics of water budget for two methods in each site

水文年型	$M_t \geq M_v$		$M_v < M_t$		$M_t - M_v$	变异系数
	站点数	占比/%	站点数	占比/%		
丰水年($p=25\%$)	12	44.4	15	55.6	6.02 ± 26.98	4.48
平水年($p=50\%$)	5	18.5	22	81.5	29.99 ± 27.63	0.92
干旱年($p=75\%$)	7	25.9	20	74.1	18.83 ± 23.42	1.24
特旱年($p=90\%$)	11	40.7	16	59.3	6.28 ± 34.32	5.46

2.2.3 不同水文年型计算结果的差异

通过对不同水文年型下 2 组结果的相对差值 ($|M_t - M_v|$) 进行统计分析(图 6),发现各水文年型下 $|M_t - M_v|$ 的变化范围均在 0 ~ 80 mm 之间,其中差值在 10 ~ 20 mm 的站点数最多,而且随着差值的增大,站点出现的频率依次降低。不同水文年,大部分研究站点 $|M_t - M_v| \leq 30$ mm,其中丰水年 ($|M_t - M_v| \leq 30$ mm) 的研究站点出现最多,达 20 个,占总研究站点数的 74%。其次为干旱年、特旱年和平水年,出现站点数分别占总研究站点数的 67%、56% 和 48%。根据图 6 差值累计频率变化趋势可知,累计曲线的累计速率增加越快,2 种方法计算结果差值就越集中于小数值范围,即 2 种方法的差异性越小,一致性越高。根据累计曲线的变化趋势,得到 2 种方法计算结果一致性由好到差依次为:丰水年、干旱年、特旱年和平水年。

根据不同水文年型 2 种计算方法结果的方差分析(表 5)可知,不同水文年和所有的水文年,2 种方法的计算结果一致性良好($p < 0.01$),其结果的差异主要来自组内而非组间。换言之,造成水分盈亏

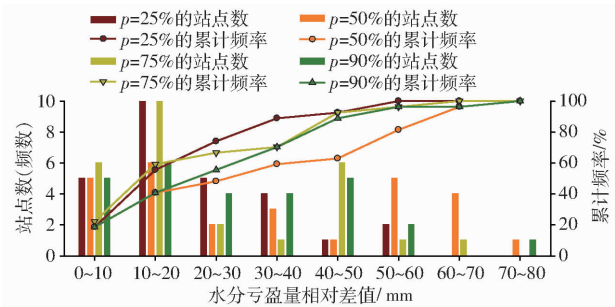


图 6 不同水文年 2 组结果相对差值的站点频率统计
Fig.6 Site frequency statistics of result between two methods in different hydrological years

量计算结果差异的主要来源是站点的选取,而非计算方法本身。典型年法和虚拟年法计算结果的差异并不显著。

2.3 组合法确定的玉米水分盈亏量

玉米水分盈亏量的确定对于制定合理的农田灌溉排水措施至关重要。不同水文年玉米的水分盈亏量计算结果是由当地固有的气候特征所决定的,既非越大越好,也非越小越好,且无参考值。由本文研究结果可知,部分研究站点(18.5% ~ 44.4%) 虚拟

表 5 不同水文年 2 种方法计算结果方差分析

Tab. 5 Variance analysis of result between two methods in different hydrological years						
水文年型	计算方法	所有站点平均值/	标准差/	样本数	F 检验	
		mm	mm		F_{α}	F
丰水年 ($p = 25\%$)	典型年法	-185.9	22.81	27	4.02	0.01
	虚拟年法	-179.88	22.07			
平水年 ($p = 50\%$)	典型年法	-94.67	19.94	27	4.02	0.37
	虚拟年法	-64.68	16.7			
干旱年 ($p = 75\%$)	典型年法	-1.54	17.27	27	4.02	0.23
	虚拟年法	17.29	15.88			
特旱年 ($p = 90\%$)	典型年法	86.79	14.22	27	4.02	0.09
	虚拟年法	93.07	13.44			
所有水文年	典型年法	-70.91	125.87	108	3.89	0.75
	虚拟年法	-52.49	122.17			

年法计算结果较大,而另一部分站点(55.6% ~ 81.5%)典型年法计算结果较大。为了克服单一选用典型年法或虚拟年法所造成的计算结果偏差,提高结果精度,综合考虑其变异程度、对结果的影响或贡献程度等建立组合模型,对玉米水分盈亏量的最终结果进行确定,并采用投影寻踪法(PP法)对组合模型各项进行权重赋值。采用投影寻踪法(PP法)对组合模型各项进行权重赋值。

PP法的显著特点是通过投影特征分析进行降

维运算^[18]。本研究中,2组结果均是由27个典型站点的数据综合决定的,要利用27个站点数据,给2组结果赋予权重,就必须进行降维运算。利用PP法得到的投影值即为2种数据所占的权重比例,其计算步骤参照文献[19],过程从略。根据式(6)将特征值换算为权重系数。同时,由于不同的水文年型下,2种方法的分布规律不统一(图5、6),为了使得到的结果更加准确,对不同的水分年型分别进行权重计算,结果如表6所示。

表 6 不同水文年 2 种方法计算结果的权重选取

Tab. 6 Weight coefficients of result between two methods in different hydrological years								
参数	丰水年 ($p = 25\%$)		平水年 ($p = 50\%$)		干旱年 ($p = 75\%$)		特旱年 ($p = 90\%$)	
	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法	虚拟年法	典型年法
投影特征值	0.82	0.57	0.80	0.60	0.78	0.62	0.75	0.67
权重系数	0.59	0.41	0.57	0.43	0.56	0.44	0.53	0.47

由表6可知,在不同水文年型下,2种方法计算结果的权重系数不同,但虚拟年法的权重系数均大于典型年法,即虚拟年法计算结果对最终结果的影响较大,但随着水文频率的增加(水文年型由丰水年向特旱年变化),虚拟年法的权重逐渐降低。根据上述研究成果,进行加权平均和插值运算,最终得到不同水文年玉米水分盈亏量的空间分布如图7所示。

根据图7可知,不同水文年辽宁省玉米水分盈亏量均呈现从西北到东南逐渐增加的趋势,其中辽西的朝阳地区最少,辽东南的本溪、丹东一带最大。在丰水年,仅辽西的西部(朝阳地区)存在水分亏缺($M < 0\text{ mm}$),亏缺量在0 ~ 50 mm之间,其他地区均有水分盈余,其中辽东的丹东一带水分盈余量最大,盈余量超过360 mm;在平水年,水分亏缺的地区扩大到辽西的阜新、锦州、葫芦岛一带,其中辽西的朝阳地区水分亏缺最为严重($50\text{ mm} \leq M \leq 105\text{ mm}$);在干旱年,出现水分亏缺的地区扩大到辽宁中部地

区,铁岭、沈阳、鞍山、大连以西的地区均存在不同程度的水分亏缺;而在特旱年,仅辽东的本溪、丹东地区存在水分盈余($0\text{ mm} \leq M \leq 90\text{ mm}$)。其他地区均有不同程度的水分亏缺,特别是辽西的朝阳一带,亏缺量超过150 mm。

3 讨论

典型年法是进行水文频率分析和水文年型划分最常用的方法,该方法的优点是简单、直观,易于在研究时间序列中找到具体代表年份,年份指代很明确,而且允许年份缺失^[26],但该方法忽略了降水在作物生育期内的分配所导致的作物需水量变化^[6]。康绍忠等^[6]对陕西省冬小麦和夏玉米的研究发现,降水量和玉米、小麦需水量的相关系数在-0.02 ~ 0.84、-0.09 ~ 0.84之间,其中相关系数大于0.5的占42%,这主要是因为虽然不同年份降水总量相同,但分配过程不同,造成作物需水量的较大差异。由此可见,典型年法计算结果并不理想。康绍忠

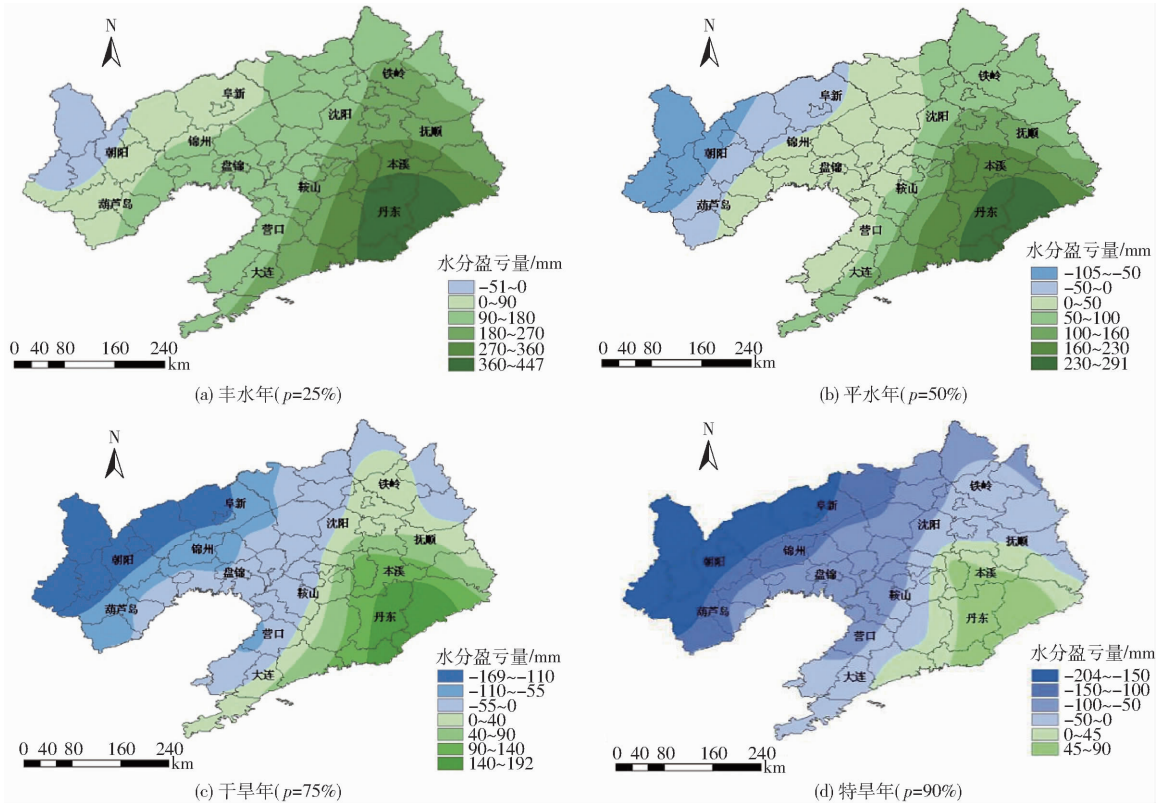


图 7 组合确定的辽宁省玉米全生育期水量盈亏

Fig. 7 Combined determination of water budget in the whole stages of maize in Liaoning Province

等^[27]利用虚拟年法对陕西省不同区域冬小麦、夏玉米、棉花、水稻等进行频率分析,得到了这几种主要作物不同水文年型下的净灌溉需水量。上官周平等^[7]采用虚拟年法对西北地区旱地作物不同水文年灌溉需水量进行确定,潘灵刚等^[28]采用虚拟年法对陕西某水库来水量进行划分,计算结果较好。但在本文中,18.5%~44.4%的研究站点,虚拟年法计算的盈亏量大于典型年法,这主要是因为计算结果受降水量的影响较大。

在降水量较为充沛时,生育期出现干旱的频率和程度均较低,此时生育期内降水量分配对需水量的影响并不大,典型年法的计算结果更接近于实际情况,而虚拟年法由于未考虑连续降水造成的水分利用系数的降低,高估了降水利用量,造成了盈亏量计算结果偏低。由此可见,虚拟年法计算结果也存在一定误差,虽然前人研究指出了现有方法的不足,但是对 2 种方法进行比较研究和综合运用成果还较为少见,本文为了克服单一模型的不足,使得计算结果更接近于实际情况,采用组合模型对不同水文年的水分盈亏量进行确定。

在降水量较少时,特别是降水量低于同期作物需水量时,作物对水分的利用率非常高,基本没有降水量损失,此时典型年法的计算结果也比较接近于实际情况。本研究利用投影寻踪法确定 2 种方法的

权重系数,在各个水文年下均为虚拟年法大于典型年法,但是随着水文频率的增加(水文年型由丰水年变为特旱年),虚拟年法的权重系数逐渐降低,从 0.59 降低到 0.53,甚至接近 0.50。即在干旱年型,2 种方法计算结果趋于一致,对最终结果的贡献基本相同,这与玉米需水的实际情况相符合。这也进一步表明了组合模型 2 种方法权重选取的合理性。

4 结论

(1) 辽宁省玉米全生育期需水量空间分布,西部最高($ET \geq 380\text{ mm}$),东部和中部次之,南部最低($ET \leq 345\text{ mm}$),水分盈亏量从西北到东南依次增加,辽西大部普遍存在水分亏缺($M < 0\text{ mm}$),特别是朝阳一带水分亏缺量较大($M \leq -60\text{ mm}$)。辽中、辽北和辽南西部水分基本平衡($0\text{ mm} \leq M \leq 80\text{ mm}$),但其年际变异较大(110~175 mm),个别年份也会出现水分亏缺,辽东地区特别是辽东东部水分盈余量较多($M \geq 260\text{ mm}$)。辽宁省不同区域,水分盈亏量均呈现逐年减少趋势($U_F < 0$),即水分盈余量逐年减少,亏缺量逐年增加,其中辽西、辽北地区下降趋势显著($U_F < U_{0.05/2} = 1.96$),辽中地区下降极其显著($U_F = -2.89 < U_{0.01/2} = -2.58$),下降速率达 19.465 mm/10 a。

(2) 2 种方法确定的玉米 M 值均随着水文频率

的增加而逐渐降低,甚至出现负值。其中辽东地区典型年法的计算结果均大于虚拟年法。而在辽宁的其他地区,2 种方法计算结果的分布无明显规律。不同的站点选取会对 2 种方法的计算结果产生显著影响。大部分站点典型年法的计算结果高于虚拟年法。大部分研究站点(48% ~ 74%),2 种方法计算结果的相对差异小于 30 mm。丰水年、平水年、干旱年、特旱年,典型年法偏大的站点数分别达到了 15、22、20、16 个,占到总研究站点数的 55.6%、81.5%、74.1% 和 59.3%。在不同水文年,2 种方法计算结果一致性由好到差依次为:丰水年、干旱年、特旱年

和平水年。

(3)不同水文年,辽宁省玉米的水分盈亏量均呈现西北低、东南高的特点,在丰水年仅辽西的朝阳地区出现水分亏缺($M < 0$ mm),其他地区均存在不同程度的水分盈余。在平水年出现水分亏缺的地区扩展到辽西的朝阳、阜新、葫芦岛一带。干旱年出现水文亏缺的地区进一步扩展至铁岭、沈阳、鞍山、大连以西的地区。在特旱年,仅辽东的本溪、丹东一带有水分盈余($0\text{ mm} \leq M \leq 90\text{ mm}$),其他地区均有不同程度的水分亏缺,特别是辽西的朝阳一带,亏缺量超过 150 mm。

参 考 文 献

- 1 张建平,王春乙,杨晓光,等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报,2009,25(7):50-55.
ZHANG Jianping, WANG Chunyi, YANG Xiaoguang, et al. Future climate change on the influence of the three provinces in Northeast China corn water demand forecasting[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 50-55. (in Chinese)
- 2 国家统计局. 国家统计局关于 2015 年粮食产量的公告[R]. 2015-12-08.
- 3 水利部农村水利司. 全国节水灌溉“十五”发展计划及 2010 年规划[R]. 2001.
- 4 刘章君,郭生练,李天元,等. 设计洪水地区组成的区间估计方法研究[J]. 水利学报,2015,46(5):543-550.
LIU Zhangjun, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Study on the method of design flood region composition interval estimation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(5):543-550. (in Chinese)
- 5 李天元,郭生练,刘章君,等. 梯级水库下游设计洪水计算方法研究[J]. 水利学报,2014,45(6):641-648.
LI Tianyuan, GUO Shenglian, LIU Zhangjun, et al. Downstream of the cascade reservoirs of design flood calculation method for the study[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(6):641-648. (in Chinese)
- 6 康绍忠,贺正中,张学. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M]. 北京:水利水电出版社,1992.
- 7 上官周平,邵明安,薛增召. 旱地作物需水预报决策辅助系统[J]. 农业工程学报,2001,17(2):42-46.
SHANGGUAN Zhouping, SHAO Ming'an, XUE Zengzhao. Dryland crop water requirement forecast decision auxiliary system [J]. Transactions of the CSAE,2001,17(2):42-46. (in Chinese)
- 8 冯海宽,杨福芹,李振海,等. 最优权重组合模型和高光谱估算苹果叶片全磷含量[J]. 农业工程学报,2016,32(7):173-180.
FENG Haikuan, YANG Fuqin, LI Zhenhai, et al. Optimal combination weights model and high spectral estimate apple leaf total phosphorus content [J]. Transactions of the CSAE,2016,32(7):173-180. (in Chinese)
- 9 谢恒星,蔡焕杰,张振华. 温室甜瓜加氧灌溉综合效益评价[J]. 农业机械学报,2010,41(11):79-83.
XIE Hengxing, CAI Huanjie, ZHANG Zhenhua. Greenhouse muskmelon irrigation with oxygen comprehensive benefit evaluation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11): 79-83. (in Chinese)
- 10 刘杨. 基于 SG-MA-IPSA 模型的区域可持续发展评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
LIU Yang. Based on the SG-MA-IPSA model of regional sustainable development evaluation research [D]. Chongqing: Chongqing University,2012. (in Chinese)
- 11 ATKINSON S, FARMANI R, MEMON F M, et al. Reliability indicators for water distribution system design: comparison [J]. Journal of Water Resources Planning & Management,2014,140(2):160-168.
- 12 SINGH V, AGRAWAL H M, JOSHI G C, et al. Elemental profile of agricultural soil by the EDXRF technique and use of the principal component analysis (PCA) method to interpret the complex data[J]. Applied Radiation and Isotopes,2011,69(7):969-974.
- 13 赵丽,朱永明,付梅臣,等. 主成分分析法和熵值法在农村居民点集约利用评价中的比较[J]. 农业工程学报,2012,28(7):235-242.
ZHAO Li, ZHU Yongming, FU Meicheng, et al. Principal component analysis (PCA) and entropy value method in the evaluation of intensive utilization of rural residential areas [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(7):235-242. (in Chinese)
- 14 AKRITAS M G. Projection pursuit multi-index (PPMI) models[J]. Statistics and Probability Letters,2016,114:99-103.
- 15 姜秋香,付强,王子龙. 基于粒子群优化投影寻踪模型的区域土地资源承载力综合评价[J]. 农业工程学报,2011,27(11):319-324.
JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Projection pursuit model based on particle swarm optimization of regional comprehensive evaluation on the bearing capacity of land resources [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(11):319-324. (in Chinese)
- 16 王柏,张忠学,李芳花,等. 基于改进双链量子遗传算法的投影寻踪调亏灌溉综合评价[J]. 农业工程学报,2012,28(2):84-89.
WANG Bai, ZHANG Zhongxue, LI Fanghua, et al. Quantum genetic algorithm based on improved double chain projection pursuit of regulated deficit irrigation (RDI) comprehensive evaluation [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(2):84-89. (in Chinese)
- 17 袁尧,刘超. 基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(3):38-44. <http://>

www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130308&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 03. 008.

YUAN Yao,LIU Chao. Pump station operation optimization based on ant colony algorithm and the projection pursuit selection strategy[J/OL]. Transcations of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3):38 – 44. (in Chinese)

18 倪长健,王顺久,崔鹏. 投影寻踪动态聚类模型及其在地下水分类中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学版,2006, 38(6):29 – 33.

NI Changjian, WANG Shunjiu, CUI Peng. Projection pursuit dynamic cluster model and its application in the groundwater classification[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science,2006,38(6):29 – 33. (in Chinese)

19 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2006:1 – 200.

20 李晶,张运福,班显秀. 辽宁玉米作物系数研究[J]. 辽宁气象,2000(1):18 – 20.

LI Jing, ZHANG Yunfu, BAN Xianxiu. Liaoning corn crop coefficient of research[J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 2001(1):18 – 20. (in Chinese)

21 ALLEN R G, JENSEN M E, WRIGHT J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. Agronomy Journal, 1989,81:650 – 662.

22 MAJNOONI-HERIS A, SADRADDINI A A, NAZEMI A H, et al. Determination of single and dual crop coefficients and ratio of transpiration to evapotranspiration for canola[J]. Annals of Biological Research,2012,3(4):1885 – 1894.

23 聂卫波,马孝义,幸定武,等. 基于水量平衡原理的畦灌水流推进简化解析模型研究[J]. 农业工程学报,2007,23(1):82 – 85.

NIE Wei-bo, MA Xiaoyi, XING Dingwu, et al. Based on the principle of water balance of border irrigation water simplified analytical model research[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(1):82 – 85. (in Chinese)

24 ZHANG Guoqing, XIE Hongjie, YAO Tandong, et al. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data[J]. Chinese Science Bulletin,2013,58(31):3815 – 3829.

25 徐丹,刘昌华,蔡太义,等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):157 – 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151222&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 12. 022.

XU Dan,LIU Changhua,CAI Taiyi,et al. Soil organic matter and total nitrogen distribution research in three dimensional space[J/OL]. Transcations of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):157 – 163. (in Chinese)

26 徐志侠,王浩,董增川,等. 南四湖湖区最小生态需水研究[J]. 水利学报,2006,37(7):784 – 788.

XU Zhixia,WANG Hao,DONG Zengchuan,et al. Minimum ecological water requirement for Nansi Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(7):784 – 788. (in Chinese)

27 陕西省作物需水量及灌溉分区研究课题组. 陕西省作物需水量及灌溉分区研究成果报告[R]. 1989 – 09.

28 潘灵刚. 基于模糊理论的冯家山水库汛期汛限水位的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.

PAN Linggang. Based on the theory of fuzzy Feng Gushan reservoir flood season limited water level by research[D]. Yangling: Northwest A&F University,2010. (in Chinese)

(上接第 78 页)

23 孙中兴,唐力伟,汪伟,等. 考虑土壤滑转流动的柔性履带应力分布研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):317 – 324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170142&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 042.

SUN Zhongxing, TANG Liwei, WANG Wei, et al. Flexible track stress distribution considering slip subsidence [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):317 – 324. (in Chinese)

24 陆华忠,罗锡文. 水田驱动叶轮轮叶下土壤流动特性与动力性能研究[J]. 农业机械学报,2010,41(7):50 – 53.

LU Huazhong,LUO Xiwen. Rule and dynamic performance under a paddy-field wheel lug[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(7):50 – 53. (in Chinese)

25 郭俊,姬长英,CHAUDHRY Arslan,等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):11 – 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20161002&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 002.

GUO Jun,JI Changying,CHAUDHRY Arslan,et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(10):11 – 18. (in Chinese)

26 陈子文,张春龙,李伟,等. 株间锄草机器人刀苗信息优化系统设计及试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):62 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150909&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 009.

CHEN Ziwen,ZHANG Chunlong,LI Wei,et al. Design and experiment on hoe-crop-positioning optimization system for intra-row weeding robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):62 – 67. (in Chinese)