

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0133

曹永强,李玲慧,路洁,等. 辽宁省玉米水分生产率时空变化规律及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6): 201-208. CAO Y Q, LI L H, LU J, et al. Spatiotemporal variation in water productivity of corn and its influencing factors in Liaoning Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 201-208. (in Chinese)

# 辽宁省玉米水分生产率时空变化规律及影响因素

曹永强,李玲慧,路洁,张若凝,宁月

(辽宁师范大学 地理科学学院,辽宁 大连 116029)

**摘要:**基于2005—2017年辽宁省14个地级市玉米种植数据、灌溉用水量及气象数据等资料,运用线性倾向估计及全局空间自相关分析等方法,从不同地区、不同降水年型(枯、平、丰)角度出发,分析不同玉米水分生产率指标的时空变化规律及其影响因素,结果表明:在时间尺度上,全省玉米灌溉水分生产率多年平均值为 $1.63 \text{ kg/m}^3$ ,玉米水分生产率总体每10 a以 $0.04 \text{ kg/m}^3$ 的速率波动上升;在空间尺度上,全省玉米灌溉水分生产率均值呈现出西北高、东南低的空间分异,玉米水分生产率在枯水年(2006)和平水年(2007)总体均表现为东北高、西南低,而丰水年(2012)则表现为西北高、东南低;玉米单产量是影响各水分生产率指标最显著的因素。该研究成果可为提高辽宁省农业用水效率、缓解水资源压力提供一定参考。

**关键词:**水分生产率;时空变化;农业用水;玉米;辽宁省

中图分类号:S271 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Spatiotemporal variation in water productivity of corn and its influencing factors in Liaoning Province

CAO Yongqiang, LI Linghui, LU Jie, ZHANG Ruoning, NING Yue

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** The spatiotemporal variation and influencing factors of different corn water productivity index are analyzed based on the corn planting, irrigation water consumption data and meteorological data of the 14 cities of Liaoning Province from 2005 to 2017 using linear tendency estimate and global spatial autocorrelation analysis method under different rainfall year type (dry, flat, wet) perspective. The results show that: On the time scale, the entire province perennial average corn irrigation water productivity is  $1.63 \text{ kg/m}^3$ , and the overall corn water productivity fluctuated at a rate of  $0.04 \text{ kg/m}^3$  per 10 years. On the spatial scale, the annual corn irrigation water productivity of the whole province is high in the northwest and low in the southeast. In the dry year (2006) and flat year (2007), corn water productivity was high in the northeast and low in the southwest, while in the wet year (2012), it was high in the northwest and low in the southeast, respectively. Single corn yield is the most significant factor that affected the water productivity indices. The research results can provide some references for improving agricultural water use efficiency and relieving water resource pressure in Liaoning Province.

**Key words:** water productivity; spatiotemporal change; agricultural water; corn; Liaoning Province

国际水资源管理研究所(International Water Management Institute, IWMI)于1997年首次提出

了水分生产率的定义,即单位水量所生产出的某种物品的数量或价值<sup>[1-2]</sup>。在农业生产领域中则表现

收稿日期:2019-12-25 修回日期:2020-04-07 网络出版时间:2020-06-28

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200628.1405.002.html

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079060;51779114);辽宁省重点研发计划(2020JH2/10200043)

作者简介:曹永强(1972—),男,内蒙古镇人,教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

为单位水资源量所能生产出的粮食产量或收益<sup>[3]</sup>。水分生产率反映了水分投入与作物产出基本规律,是评价水资源利用效益的重要指标之一。当前,农业是我国最大的用水产业,其用水量约占全国用水总量的 70%<sup>[4]</sup>。一直以来,我国农业生产用水经济效益处于较低水平,因此,研究水分生产率变化规律对合理改善农业用水结构,提高水资源利用效率具有重要意义<sup>[5]</sup>。

国内外学者在作物水分生产率领域研究颇丰。Mainuddin 等<sup>[6]</sup>研究 Mekong 流域主要作物水分生产率时发现,水分生产率在时间上具有增加趋势,在空间上具有显著变异性;Abdullaey 等<sup>[7]</sup>对中亚 Syr Darya 流域的水分生产率进行了时空分析,发现干旱年水分生产率高于湿润年,农场类型和大小对水分生产率也有影响;Zwart 等<sup>[8]</sup>基于遥感数据开发的水分生产率模型 WATPRO 实现了用较少参数估算产量及蒸发量,为研究粮食作物水分生产率提供了良好的平台;操信春等<sup>[9]</sup>在计算全国 400 多个主要灌区的水分生产率指标的基础上,分别研究其在时间和空间尺度上的变化规律,发现全国灌区水分生产率不仅逐年增大,而且越来越聚集;陈皓锐等<sup>[10]</sup>对石津灌区净灌溉水分生产率在不同尺度(作物、田间、分干、干渠和灌区尺度)产生的效应进行分析,结果表明水分生产率随尺度增大而明显减小;闫娜娜等<sup>[11]</sup>通过研究海河流域冬小麦水分生产率变化规律,发现其在年际间呈稳定增加趋势。

鉴于以往的研究大多只选取了灌溉水分生产率或综合水分生产率 1 种指标作为研究对象,难以全面揭示水分生产率的变化规律,并且大多以某一特定灌区或流域为研究区域,针对辽宁省的研究较少,因此,本文在参阅已有研究成果的基础上,按照狭义水分生产率的定义将其细化为灌溉水分生产率和作物水分生产率,分析研究 2005—2017 年辽宁省 14 个地级市玉米水分生产率指标的时空变化规律,并探讨其主要影响因素,为揭示农业水资源与粮食生产的关系、提高辽宁省农业部门用水效率、优化水资源配置等提供一定理论指导。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

辽宁省地处欧亚大陆东岸、东北地区南部,为我国 13 个粮食主产区之一,同时也是水资源严重匮乏的省份之一。全国第二次水资源评价成果表明,辽宁省多年平均水资源总量为 341.79 亿  $m^3$ ,人均占有量为 808  $m^3$ ,仅为世界人均水资源占有量的 1/12。

农业生产用水是辽宁省最大的用水部门,占总用水量的 64%。玉米是辽宁省种植面积最广的作物,2017 年玉米播种面积达 2 179.7  $hm^2$ ,占粮食总播种面积的 68.08%<sup>[12-14]</sup>。

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)建议将作物的生育期划分为初期、发育期、中期和后期等 4 个阶段。本文在此基础上按照实际生产经验,进一步将玉米生育期划分为 4—9 月。选用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/wa>)2005—2017 年 4—9 月辽宁省 14 个地级市的逐日气象观测数据,包括最高气温、最低气温、日照时数、降水、相对湿度等。玉米灌溉用水量等水资源相关数据取自《辽宁省水资源公报》及各市水务局所提供的年报资料,其中不完整数据采用线性插补法进行插补。玉米种植面积及总产量数据取自《辽宁省统计年鉴》,时间尺度为 2005—2017 年。辽宁省 14 个地级市分布情况见图 1。



图 1 辽宁省各地级市分布

Fig. 1 The distribution of prefecture-level city in Liaoning Province

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 水分生产率指标的选取

广义的水分生产率是指单位水资源量在一定的作物品种和耕作栽培条件下所获得的产量或价值<sup>[15]</sup>。虽然其概念明确并能客观评价区域水分利用效率,但数据资料积累较为困难,达不到计算方法的要求,因而未被普遍应用。因此,在参阅已有研究成果基础上,将水分生产率指标进行细化,按照狭义水分生产率的定义进行分析。狭义的水分生产率包括灌溉水分生产率和作物水分生产率,这种指标方法统一且计算简便,目前在我国被广泛采用<sup>[16]</sup>。

(1)灌溉水分生产率。单位灌溉水量所能获得的作物产量。它能直接显示出灌区投入的单位灌溉

水量的农作物产出效果,综合反映灌区的农业生产水平<sup>[17]</sup>。其计算公式为

$$W_{PI} = Y/W_t \quad (1)$$

式中: $W_{PI}$ 为灌溉水分生产率, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Y$ 为作物总产量, $\text{kg}$ ;  $W_t$ 为总灌溉用水量, $\text{m}^3$ 。

(2)作物水分生产率。作物消耗单位水资源量所获得的作物产量,其在年际间、地区间均具有可比性,且方法简便,因而被广泛应用<sup>[16]</sup>。其计算方法为

$$W_{PC} = Y/ET \quad (2)$$

式中: $W_{PC}$ 为作物水分生产率, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $ET$ 为实际蒸散发量, $\text{mm}$ ,采用单作物系数法计算,具体算法为

$$ET = K_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

式中: $K_c$ 为综合作物系数,参考FAO编写的《作物需水指南》中标准条件下玉米作物系数<sup>[17]</sup>,为使计算结果更加精确,本文参考以往辽宁省玉米作物系

数研究成果<sup>[18]</sup>,根据14个地级市的地理空间分布情况,按照表1所示系数进行计算; $ET_0$ 为潜在蒸散发量, $\text{mm}$ ,采用FAO推荐的Penman-Monteith公式<sup>[19]</sup>

$$ET_0 = \frac{(0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a))}{\Delta + \gamma(1 + G_d u_2)} \quad (4)$$

式中: $R_n$ 为净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $T$ 为日平均温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $G$ 为热通量密度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $u_2$ 为2 m高处风速; $e_s$ 为饱和空气水汽压, $\text{kPa}$ ;  $e_a$ 为空气水汽压, $\text{kPa}$ ;  $\Delta$ 为饱和水汽压-温度曲线的梯度, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$ 为湿度计常数; $G_n$ 、 $G_d$ 为固定常数,在估算逐日潜在蒸散发量时取值分别为900和0.34,各参数详细计算及取值参考文献<sup>[18]</sup>。

表1 辽宁省各区域玉米作物系数

Tab.1 The corn crop coefficient in each region of Liaoning Province

区域	辽宁省东部	辽宁省南部	辽宁省西部	辽宁省北部	辽宁省中部
作物系数	0.86	0.87	0.75	0.79	0.81

基于玉米产量、种植面积、灌溉用水量及气象数据,通过式(1)至(4)分别计算2005—2017年辽宁省14个地级市玉米灌溉水分生产率和作物水分生产率。

### 1.2.2 线性倾向估计

用 $x_i$ 表示样本为 $n$ 的某一变量,用 $t_i$ 表示 $x_i$ 所对应的时间,建立 $x_i$ 与 $t_i$ 之间的一元线性回归方程为

$$x_i = a + bt_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: $a$ 表示线性回归常数; $b$ 表示回归系数。 $a$ 和 $b$ 一般用最小二乘法进行估计。采用此方法对辽宁省玉米水分生产率指标的时序变化进行趋势分析<sup>[20]</sup>,其中 $n$ 取值为13。

### 1.2.3 反距离权重法

反距离权重插值法是一种比较常用的空间差值方法,其主要原理是根据插值点与样本间的距离计算权重并进行加权平均<sup>[21]</sup>。借助ArcGIS软件运用此方法对辽宁省各地级市玉米水分生产率指标进行空间插值,以直观高效地反映出其空间分布特点。

### 1.2.4 全局空间自相关分析

全局空间自相关分析法是从全区域角度出发,描述属性值在整个区域的空间分布特征,是检验某一要素的属性值是否显著地与其相邻空间点上的属性值相关联的重要指标。通过ArcGIS软件计算空间自相关系数Moran's I,并对其进行Z检验,在此基础上分析辽宁省各地级市水分生产率指标的空间

差异及关联情况。具体计算方法详见文献<sup>[22]</sup>。

### 1.2.5 相关分析法

相关分析法是指对多个具有一定关联的元素进行统计分析,从而衡量其间的相关程度,其优点在于可以避免不同影响因素之间的相互干扰<sup>[23]</sup>。通过计算辽宁省玉米水分生产率指标与各影响因素之间的相关系数进而探讨其影响程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米灌溉水分生产率空间分布特征

由于灌溉用水量受作物种植面积、灌溉制度等多重因素制约,玉米灌溉水分生产率在年际间、地区间不具备可比性,实践中大多用其多年平均值作为宏观评价指标<sup>[16]</sup>。2005—2017年辽宁省各地级市玉米灌溉水分生产率多年平均值情况见图2。可以看出,近13年来,全省玉米灌溉水分生产率均值为 $1.63 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。丹东、营口、辽阳、盘锦4地均值在 $1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下,盘锦为全省最低( $0.10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ),这主要是由于玉米并不是其主要粮食作物,种植面积相对较少,产量较低。均值在 $1 \sim 2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的有沈阳、鞍山、抚顺、本溪4地,其值与全省玉米灌溉水分生产率均值均相差不大。其余6地(大连、锦州、阜新、铁岭、朝阳、葫芦岛)玉米灌溉水分生产率在 $2 \sim 10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,单从玉米方面来看,为灌溉用水效率较高的地区,其中,阜新市高达 $8.06 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。统计资

料显示,2013 年阜新市粮食产量达 275 万 t,创历史最好水平,沈阜 13 万  $\text{hm}^2$  现代农业示范带全面启

动,完成节水滴灌工程 2.7 万  $\text{hm}^2$ ,农田综合机械化水平高达 82.5%,居全省前列<sup>[24]</sup>。

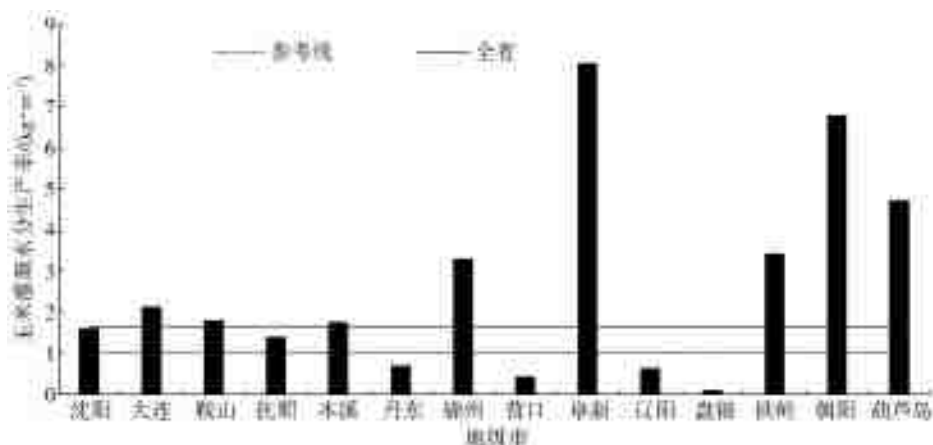


图 2 2005—2017 年各地级市玉米灌溉水分生产率均值

Fig. 2 The annual average corn irrigation water productivity in each city from 2005 to 2017

对 2005—2017 年辽宁省 14 个地级市玉米灌溉水分生产率多年平均值进行反距离权重插值,得到其空间分布情况见图 3。分析可知,全省玉米灌溉水分生产率总体上呈现出西北地区较高、东南地区较低的空间分异。位于西北部的朝阳、阜新和葫芦岛年均值高于  $3.29 \text{ kg/m}^3$ ,是玉米灌溉水分生产率较高的地区。辽西北地区主要为低山丘陵区,河流径流量少,土地贫瘠,旱情严重,但辽宁省政府实施的辽西北供水工程解决了辽西北的用水严重短缺问题<sup>[25]</sup>。另外,近年来阜新、朝阳、葫芦岛等地区实施了“节水增粮”行动,通过节水滴灌工程得到了较好成果,有效提高了灌溉水利用率。大连、营口、丹东等东南部地区玉米灌溉水分生产率普遍相对较低,因其沿海且降水丰富等地域优势而忽略了对灌溉水资源的合理利用,相关部门应加强节水灌溉力度,提高农业灌溉用水利用效率。

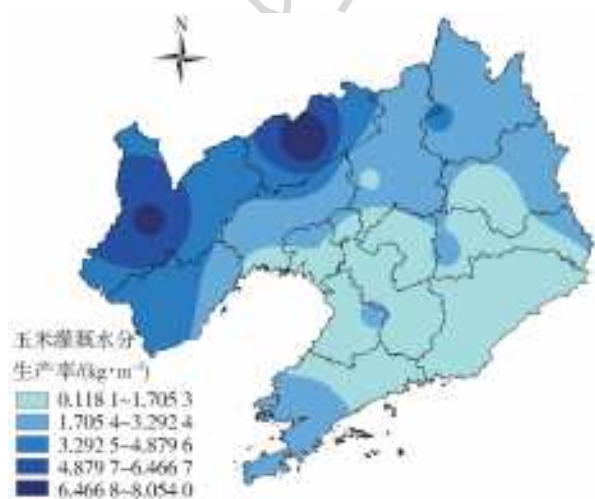


图 3 2005—2017 年各地级市玉米灌溉水分生产率均值空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of mean corn irrigation water productivity of all cities from 2005 to 2017

## 2.2 玉米水分生产率时空变化分析

### 2.2.1 玉米水分生产率的时序变化

2005—2017 年辽宁省各地级市玉米水分生产率年际变化趋势见图 4。分别对各线性趋势进行显著性检验,结果见表 2。总体来看,辽宁省各地级市玉米水分生产率差异较大,但年际间变化情况相差不大。14 个地级市均在 2008、2010、2012 和 2016 年出现波峰,结合计算数据可知,这是由于上述年份玉米单产量较高且潜在蒸散量值较小。从之前对玉米产量变化的研究成果可知,2000—2010 年玉米增产较快主要是由于种植面积的扩大。此波峰时间点与吴世德等<sup>[26]</sup>研究结果基本一致。从线性趋势显著性检验(表 2)可知,14 个地级市中有一半地区回归系数为负(沈阳、大连、鞍山、营口、阜新、铁岭、葫芦岛),且全未通过 0.05 显著性水平检验,说明各地区玉米水分生产率减小趋势并不明显。在其余 7 个呈增大趋势的地区中,丹东、盘锦为 2 个显著增长地区( $p < 0.05$ ),且盘锦通过了 0.01 显著性水平检验,表明其增长趋势十分显著。

总体上看,全省玉米水分生产率变化趋势并不显著,总体每 10 a 以  $0.04 \text{ kg/m}^3$  的速率波动上升。研究时段内全省均值为  $1.21 \text{ kg/m}^3$ ,其中最小值为  $0.90 \text{ kg/m}^3$ (2009 年),最大值为  $1.47 \text{ kg/m}^3$ (2012 年)。2009 年玉米在全省范围减产,其中朝阳地区最为严重,单产量仅  $2\ 216 \text{ kg/hm}^2$ ,未及多年平均值的 1/3。《2009 年中国水旱灾害公报》显示,2009 年我国东北西部地区夏伏旱严重,辽宁省作物受灾面积达  $208.37 \text{ 万 hm}^2$ <sup>[27]</sup>。7 月下旬至 8 月上旬正是玉米生长关键期,需水量较高,严重的旱情导致玉米大片绝收。玉米产量的大幅度减少直接导致玉米水分生产率在 2009 年达到波谷。

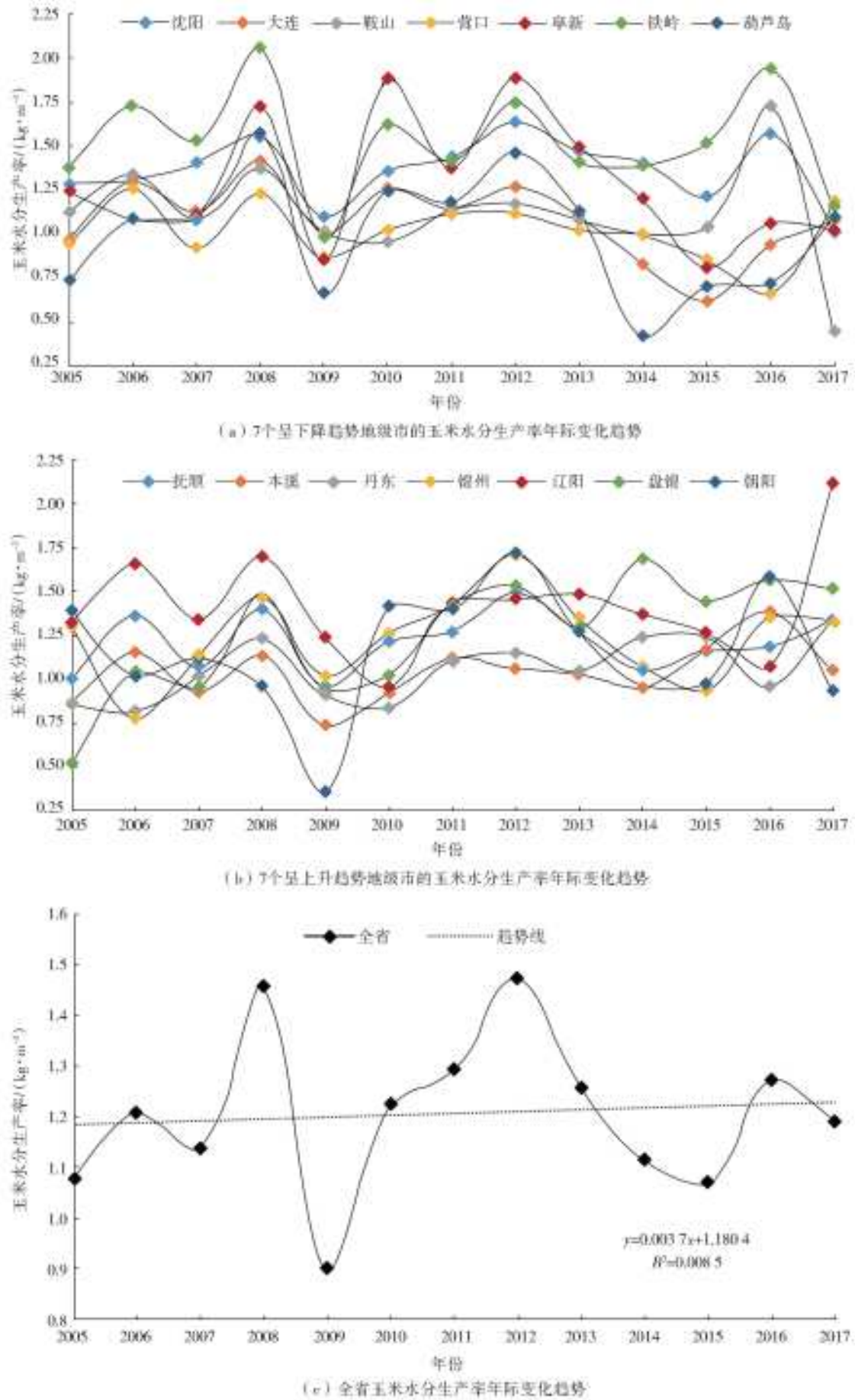


图4 辽宁省玉米水分生产率年际变化趋势

Fig. 4 The interannual change trend between corn water productivity in Liaoning Province



表 2 线性趋势显著性检验

Tab. 2 Linear trend significance test

地级市	回归系数	相关系数	显著性检验
沈阳	-0.003 1	0.064 8	不显著
大连	-0.024 0	0.465 7	不显著
鞍山	-0.015 8	0.227 4	不显著
抚顺	0.006 8	0.172 9	不显著
本溪	0.017 6	0.442 7	不显著
丹东	0.026 3	0.620 2	显著*
锦州	0.013 4	0.194 2	不显著
营口	-0.010 8	0.266 6	不显著
阜新	-0.016 5	0.171 8	不显著
辽阳	0.008 5	0.111 8	不显著
盘锦	0.068 3	0.782 8	显著**
铁岭	-0.007 6	0.097 0	不显著
朝阳	0.009 9	0.099 5	不显著
葫芦岛	-0.021 4	0.226 1	不显著
全省	0.003 7	0.092 2	不显著

注：\* 代表通过 0.05 显著性水平检验，\*\* 代表通过 0.01 显著性水平检验。

### 2.2.2 玉米水分生产率的空间分布

根据文献[26]对丰枯水年的划分,选取 2006 年(枯水年)、2007 年(平水年)和 2012 年(丰水年)作为代表年份,探讨不同降水年型下玉米水分生产率的空间分异规律。运用反距离权重法分别对以上 3 年玉米水分生产率及其平均值进行空间插值,得到空间分布见图 5。分析可知:枯水年(2006)和平水年(2007)与其玉米水分生产率的多年平均值空间分布情况大体一致,总体上均表现为东北高、西南低的规律,这种空间分异主要是受地理空间相似性的降水、气温、辐射等气象因素以及土壤、作物类型等自然因素共同作用<sup>[2]</sup>;丰水年(2012)则表现为西北高、东南低,这一年由于台风“苏拉”“达维”等影响,我国沿海地区暴雨洪涝灾害严重,其中辽宁省为全国 17 个严重受灾省之一,玉米等作物受灾面积达 59.35 万  $\text{hm}^2$ <sup>[28]</sup>,辽宁省东南沿海地区因此受灾尤为严重,导致玉米减产,同时因蒸散量较高,从而在大体上呈现出由西北向东南方向递减的趋势。

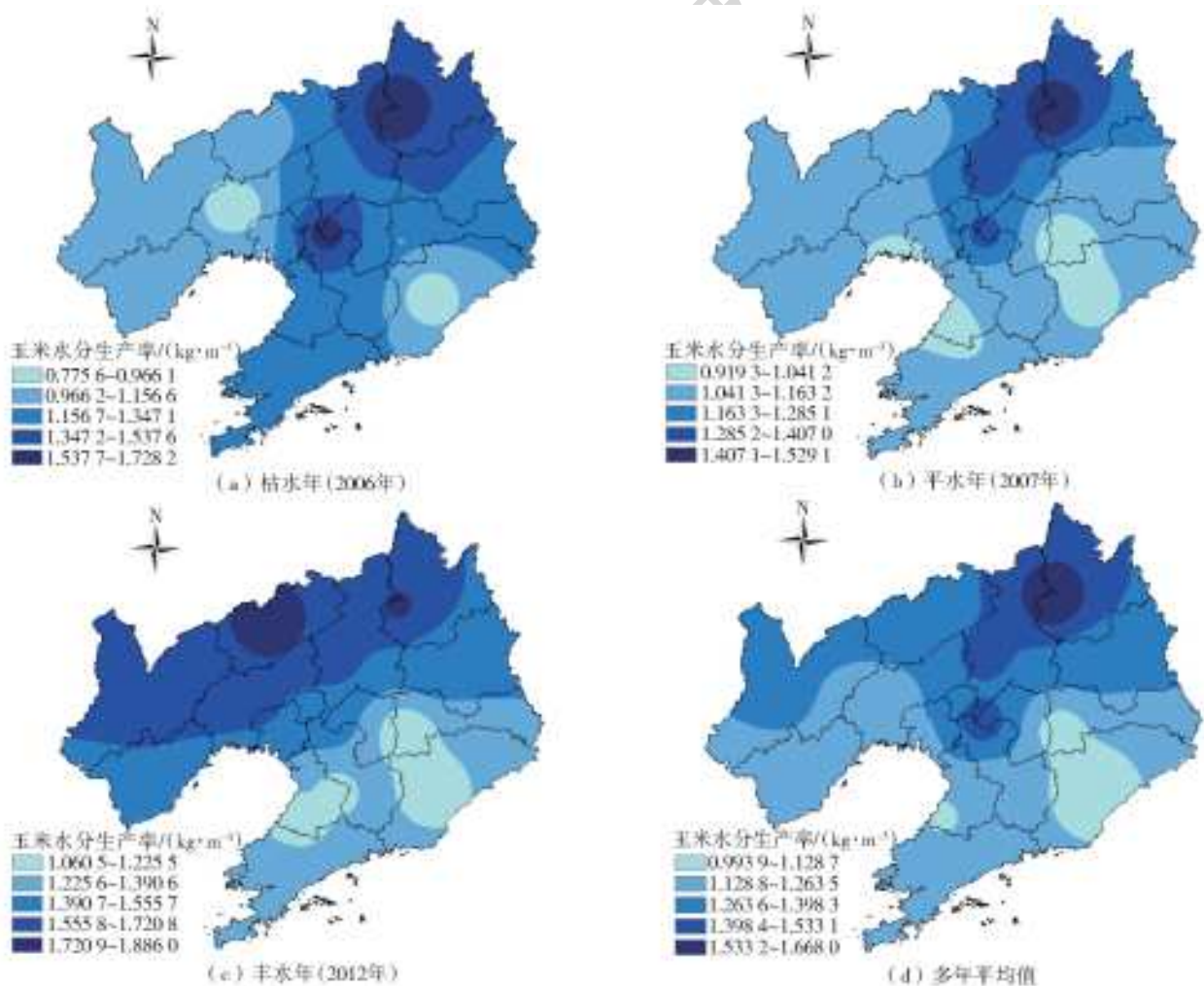


图 5 辽宁省玉米水分生产率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of corn water productivity in Liaoning Province

运用全局空间自相关分析法定量分析不同降水年型下玉米水分生产率的 Moran's I 估计值及检验见表 3。从其结果来看,3 年的全局 Moran's I 估计值均大于零,但只有丰水年(2012)对应的显著性检验  $p$  值小于 0.05,其余 2 年均远未通过显著性检验,表明不同降水年型下辽宁省玉米水分生产率在各地级市间虽然存在正自相关关系,但总体上并未表现出空间聚集。制约玉米水分生产率的因素比较复杂,其中包括自然因素、社会经济条件、农业管理方式及其他众多因素,而这些因素之间又相互影响,难以单从地理空间的角度究其规律,导致玉米水分生产率在空间上分布较为离散,这方面有待在以后的研究中进一步深入。

表 3 辽宁省各地级市玉米水分生产率全局 Moran's I 指数  
Tab. 3 The global Moran's I index of corn water productivity in each city of Liaoning Province

参数	2006 年	2007 年	2012 年
Moran's I	0.398 3	0.081 9	0.636 8
Z(I)	1.773 7	0.607 4	2.555 9
P	0.076 1	0.543 5	0.010 5

表 4 辽宁省各地区玉米水分生产率指标与影响因素相关系数

Tab. 4 The correlation coefficients of maize water productivity index and influencing factors in different regions of Liaoning Province

影响因素	年降水量	年均气温	水资源总量	玉米播种面积	玉米灌溉用水量	玉米单位面积产量
玉米灌溉水分生产率	-0.023 5	-0.416 8	-0.005 3	0.857 0**	-0.858 5**	0.683 1**
玉米水分生产率	0.400 5	-0.339 1	0.497 4	-0.063 9	0.007 6	0.593 5*

注: \* 代表通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 代表通过 0.01 显著性水平检验。

### 3 结论与讨论

选取灌溉水分生产率和作物水分生产率 2 个指标,从不同地区、不同降水年型角度出发,具体分析了 2005—2017 年辽宁省玉米水分生产率的时空变化规律,并探讨了各影响因素与其相关程度,在此基础上为各地区提高农业用水效率提出了相应建议,弥补了过去研究选取指标单一及针对辽宁省研究较少的不足。通过分析发现,粮食作物水分生产率指标受气候、资源、技术等综合影响,但对于经济、管理制度等其他因素的影响还有待深入研究。主要结论如下:

(1) 从时序变化上来看,全省玉米水分生产率变化趋势并不显著,总体每 10 a 以  $0.04 \text{ kg/m}^3$  的速率波动上升;14 个地级市中呈增长和下降趋势的地区各占一半,其中,丹东、盘锦是变化最显著的 2 个地区( $p < 0.05$ )。

(2) 在空间尺度上,全省玉米灌溉水分生产率多年平均值为  $1.63 \text{ kg/m}^3$ ,总体呈现出西北高、东南低的空间分异。位于西北部的朝阳、阜新和葫芦岛

### 2.3 玉米水分生产率影响因素分析

基于上文分析可知,辽宁省各地级市玉米水分生产率指标存在着明显的时空分异,为进一步究其原因,根据已有数据资料条件,从气候(年降水量、年均气温)、资源(水资源总量、玉米播种面积)、技术(玉米灌溉用水量、单位面积产量)等 3 个方面入手,分别计算各影响因素与各水分生产率指标的相关系数,结果见表 4。可以看出,除玉米播种面积和玉米单产量对其呈显著正相关( $p < 0.01$ )外,各影响因素与玉米灌溉水分生产率均呈负相关关系,其中,玉米灌溉用水量是负效应最为显著的因素( $p < 0.01$ )。因此,为提高辽宁省玉米灌溉水分生产率,建议各地区在合理扩大玉米播种面积的同时,致力于提高增产技术水平,并加大节水灌溉力度。各影响因素与玉米水分生产率大多呈正相关关系(年均气温和玉米播种面积除外)。其中,只有玉米播种面积达到显著性水平( $p < 0.05$ ),说明提高玉米各水分生产率指标的关键在于提高玉米产量。

是较高的地区;而大连、营口、丹东等东南部地区普遍相对较低。

(3) 在 3 个不同降水代表年中,枯水年(2006)和平水年(2007)与其均值玉米水分生产率空间分布情况大体一致,总体均表现为东北高、西南低,而丰水年(2012)则表现为西北高、东南低。不同降水年型下玉米水分生产率在各地级市间存在正自相关关系,但总体上并未表现出空间聚集。

(4) 从影响因素上来看,玉米播种面积和单产量以及灌溉用水量是影响玉米灌溉水分生产率的关键因素( $p < 0.01$ ),玉米单产量对玉米水分生产率影响最为显著( $p < 0.05$ )。提高玉米水分生产率指标的关键在于提高玉米产量。

#### 参考文献:

- [1] SANDER J Z, WIM G M B, SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89 (3): 287-296. DOI:10.1016/j.agwat.2007.02.002.

- [2] 高景灏. 西安地区主要粮食作物水分生产率时空分布规律分析及其模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [3] 陈超, 于强, 王恩利, 等. 华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1477-1485. DOI: 1007-7588(2009)09-1477-09.
- [4] 姚成胜, 滕毅, 黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.04.001.
- [5] 吕新业, 冀县卿. 关于中国粮食安全问题的再思考[J]. 农业经济问题, 2013, 34(9): 15-24. DOI: 10.13246/j.cnki.iae.2013.09.010.
- [6] MAINUDDIN M, KIRBY M. Spatial and temporal trends of water productivity in the lower Mekong River Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1567-1578. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.06.013.
- [7] ABDULLAEY I, MOLDEN D. Spatial and temporal variability of water productivity in the Syr Darya basin, central Asia [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(8). DOI: 10.1029/2003WR002364.
- [8] ZWART S J, BASTIAANSEN W G M, FRAITURE C D, et al. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1617-1627. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.05.018.
- [9] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.11.002.
- [10] 陈皓锐, 伍靖伟, 黄介生, 等. 石津灌区冬小麦水分生产率尺度效应[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 49-55. DOI: 1001-6791(2013)01-0049-07.
- [11] 闫娜娜, 吴炳方, 杜鑫. 农田水分生产率估算方法及应用[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 298-312. DOI: 1007-4619(2011)02-298-15.
- [12] 王福林. 区域水资源合理配置研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [13] 徐丽娟, 李可用. 辽宁沿海经济带产业结构研究[J]. 中国市场, 2014(8): 11-13. DOI: 1005-6432(2014)8-0011-03.
- [14] 王建迎, 李书平. 辽宁省玉米生产现状及发展前景[J]. 国外农学-杂粮作物, 1999(6): 45-49. DOI: 1003-4803(1999)06-0045-04.
- [15] 刘焯. 黑龙江省粮食作物水分生产率时空分布规律及影响因素分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [16] 李远华, 赵金河, 张思菊, 等. 水分生产率计算方法及其应用[J]. 中国水利, 2001(8): 65-66, 5. DOI: 1000-1123.2001.08.027.
- [17] ALLEN R G, SMITH M, PRUITT W O, et al. Modifications to the FAO crop coefficient approach//Camp C R, E J Sadler and R E Yoder (eds) *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling (Proceed Int Conf, San Antonio, Nov 1996)*[M], ASAE, St Joseph, 124-132.
- [18] 纪瑞鹏, 班显秀, 张淑杰. 辽宁地区玉米作物系数的确定[J]. 中国农学通报, 2004(3): 246-248, 268. DOI: 1000-6850.2004.03.086.
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*[M], FAO, Rome, 1998, 300; 6541.
- [20] 章毅之. 基于日降水量的江西省极端降水变化研究[J]. 气象与减灾研究, 2007(4): 33-36. DOI: 1007-9033(2007)04-0033-04.
- [21] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析: 以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539-548. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00539.
- [22] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005(4): 11-18. DOI: 1000-0690(2005)04-0393-08.
- [23] 段俭君, 徐会军, 王子河. 相关分析法在矿井涌水量预测中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 114-116, 76. DOI: 0253-2336(2013)06-0114-03.
- [24] 辽宁省水利厅. 辽宁省水资源公报[N]. 辽宁日报, 2014-03-22(003).
- [25] 路广平, 郁凌峰, 梁立章. 2009 年辽西北地区特大干旱的分析[J]. 东北水利水电, 2011, 29(10): 50-51. DOI: 1002-0624(2011)10-0050-02.
- [26] 吴世德, 秦丽杰. 辽宁省粮食作物水分生产率时空差异研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(11): 14-18. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2017.11.006.
- [27] 国家防汛抗旱总指挥部. 2009 中国水旱灾害公报[M]北京: 中国水电出版社, 2009; 1-26.
- [28] 国家防汛抗旱总指挥部. 2012 中国水旱灾害公报[M]北京: 中国水电出版社, 2012; 1-16.