

文章编号: 1007-4929(2019)12-0082-06

辽宁省玉米生产水足迹影响因素分析及空间聚类

张旭东¹ 吴迪² 郝迪^{1,3} 孙仕军¹ 石瑞强¹

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054;
3. 北京市富通环境工程有限公司, 北京 100083)

摘要: 为探究和协调不同区域作物生产和水分消耗之间的关系, 运用水足迹理论和方法, 选取影响玉米生产水足迹的 17 个因素进行显著性分析, 并基于主成分分析利用 K-means 聚类、分层聚类法、模糊 C 均值聚类 3 种方法对辽宁省玉米生产水足迹进行空间聚类。结果表明: 在与玉米生产水足迹呈正相关关系的因素中, 单位面积施肥量达到显著水平, 蓝水足迹占总水足迹的比值达到极显著水平; 在呈负相关关系的因素中, 降水量、平原区占总面积的比值达到显著水平, 纬度和玉米单产达到极显著水平。根据聚类结果将辽宁省分为 I 绿水满足—综合发展区(鞍山、抚顺、本溪、丹东)、II 高生产水足迹—保护发展区(大连、营口、葫芦岛)、III 低生产水足迹—重点发展区(沈阳、铁岭、盘锦)、IV 蓝水依赖—优化发展区(阜新、锦州、朝阳)和 V 较高生产水足迹—适度发展区(辽阳), 各区应结合各自的特点, 采用不同的用水策略和玉米生产模式。本研究为辽宁省玉米生产空间布局和农业水资源科学管理提供参考。

关键词: 水足迹; 显著性分析; 聚类; 玉米; 辽宁省

中图分类号: S271; TV213.4 文献标识码: A

Influencing Factors and Spatial Clustering of Maize Production Water Footprint in Liaoning Province

ZHANG Xu-dong¹, WU Di², HAO Di^{1,3}, SUN Shi-jun¹, SHI Rui-qiang¹

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, 110866, China;
2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China;
3. Beijing Futong Environmental Engineering Co., Ltd, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore and coordinate the relationship between crop production and water consumption in different regions, the water footprint theory and method were used and 17 factors affecting the water footprint of corn production were selected for significant analysis. Based on principal component analysis, three methods including K-means clustering, hierarchical clustering method and fuzzy C-means clustering were used to cluster the water footprint of maize production in Liaoning province. The results showed that among the factors positively correlated with the water footprint of maize production, the fertilizer amount per unit area reached a significant level, and the ratio of blue water footprint to the total water footprint reached an extremely significant level. Among the negatively correlated factors, the ratio of precipitation and plain area to the total area reached a significant level, and the latitude and maize yield per unit area reached an extremely significant level. According to the clustering results, Liaoning were divided into five regions. Including the I zone of Green Water Satisfaction-Comprehensive Development Zone (Anshan, Fushun, Benxi, Dandong), the II zone of High Production Water Footprint-Protection Development Zone (Dalian, Yingkou, Huludao), the III zone of Low Production Water Footprint-Key Development Zone (Shenyang, Tieling, Panjin), the IV zone of Blue Water Dependence-Optimized Development Zone (Fuxin, Jinzhou, Chaoyang) and the V zone of Higher Production Water Footprint-Moderate Development Zone (Liaoyang). Different water use strategies and maize production models should be adopted in different regions according to their own characteristics. This study provides reference for spatial distribution of maize production and scientific management of agricultural water resources in Liaoning province.

Key words: water footprint; significance analysis; clustering; corn; Liaoning province

收稿日期: 2019-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-03); 国家自然科学基金青年基金项目(51609137); 辽宁省自然科学基金项目(20180550617)。

作者简介: 张旭东(1979-), 男, 讲师, 主要研究方向为节水灌溉与水资源高效利用。E-mail: zxxddd@126.com。

通讯作者: 孙仕军(1969-), 男, 教授, 主要研究方向为水资源高效利用。E-mail: sunssj69@163.com。

2002年世界水贸易专家会议上,荷兰学者 Hoekstra 提出“水足迹”的概念^[1,2],从生产和消费的角度来评价水资源利用情况^[3,4]。涵盖了商品生产或消费服务过程中的直接耗水量和间接耗水量^[3],为水资源管理提供了新的视角。另外,水足迹概念的提出使得区域水资源消耗与全球水资源配置产生联系成为可能,打破了流域、区域的局限,人们开始将全球水资源作为整体进行思考问题,为全球范围内的水资源利用、配置和管理提供了新思路。作物的生产水足迹就是特定区域内某作物生产过程中所需消耗的水资源量,即绿水、蓝水、灰水总量^[5,6]。蓝水足迹指作物生长过程中所消耗的地下水和地表水^[7],绿水足迹指作物生长过程中所消耗的存储在土壤中的有效降水^[7,11,12],灰水足迹指稀释污染物需要的水量,量化为将污染物稀释到一定的程度使周围水体环境质量保持在约定标准之上需要的水的体积^[13]。

国内外学者对作物水足迹进行了广泛研究。Chapagain 和 Hoekstra 对世界上主要国家的水足迹进行了计算、分析与对比^[8]。侯庆丰利用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 CLIMWAT 数据库和 CROPWAT 软件计算甘肃省农作物生产水足迹,认为甘肃省农作物生产水足迹及其构成地区差异明显,河西地区主要以蓝水为主,而陇中、陇东、陇东南地区以绿水为主^[14]。张容等梳理了农业水足迹理论的形成历程,对农业水足迹影响因素进行了研究,认为气象因素的变化会影响水足迹,灌溉技术是影响粮食和经济作物水足迹的主要因素之一^[15]。韩宇平等对京津冀作物水足迹时空分布特征进行了分析,发现该地区西北部和北部水足迹较小,而南部、东南部和中部较大^[16]。郭相等对中国农作物水足迹时空分布与影响因素进行分析,发现水足迹在时间上呈先下降后缓慢上升态势,空间上呈从东南向西北逐渐递减的格局;人口密度、人均纯收入和化肥施用量是农作物生产水足迹随时间变化的主要驱动因子,而降雨量、人均 GDP 及人均纯收入对其空间分布有重要影响^[17]。冯变变等对山西省作物生产蓝绿水足迹进行了核算及影响因素分析,结果表明不同区域间作物生产蓝绿水足迹均表现出由北向南波动中下降的趋势,日照、气温和降雨是影响作物生产水足迹的主要因素^[18]。上述研究多对作物水足迹空间变化及其影响因素进行分析,而基于水足迹及其影响因素对区域聚类分区研究较少,本文以辽宁为例进行了尝试。

辽宁省面积 148 万 km^2 ,常年玉米种植面积为 330 万 hm^2 ,辽宁位于我国玉米种植的适宜区和最适宜区^[9],14 个地级市均有种植,以雨养为主,灌溉为辅。本文以地级市为单元,对 2011–2015 年内影响玉米生产水足迹的 17 个因素进行显著性分析,提取玉米水足迹和其影响因素的主成分,以降维后的前 5 个主成分为指标对地级市进行聚类,将辽宁分为 5 个区,分析各区的玉米生产水足迹空间特征,提出玉米生产发展和农业水资源高效利用的策略。

1 材料与方法

1.1 数据来源

(气象观测数据来自各地级市的 25 个气象观测站,玉米单

产、产量、种植面积和化肥施用量等数据来自《辽宁省统计年鉴》,生育阶段数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 的《中国农作物生长发育状况资料数据集》,玉米灌溉水量和农业灌溉用水量数据来自水利部松辽水利委员会的统计,数据时段均为 2011–2015 年。

1.2 生产水足迹计算方法

作物生产水足迹是指生产单位作物产品所需要的水资源数量,即作物生产绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹之和。其中,绿水主要来自天然降水,蓝水主要来自灌溉水,灰水足迹核算时以稀释淋失氮所消耗的水资源量作为代表^[19]。辽宁省 2011–2015 年玉米生产水足迹计算主要采用 CROPWAT8.0,玉米生育阶段划分和具体参数选取详见参考文献^[20]。

1.3 分析方法

影响水足迹的因素众多,本文采用基于玉米生产水足迹和其影响因素提取的主成分对辽宁各地级市进行聚类。主成分分析是通过原始变量相关矩阵或者协方差矩阵内部关系的研究,利用原始变量的线性组合形成几个综合指标(主成分)的多元统计方法^[21,22]。分析问题时用较少的几个主成分来代替原来较多的因子,能够在保留原始变量信息的前提下达到降维与简化问题的作用。常用的聚类方法有 K 均值聚类 (K-means)、层次聚类 (HAC) 和模糊 C 均值聚类 (FCM) 等,每种聚类算法各有优缺点:K-means 聚类算法的初始点是随机选取的,易引起聚类结果不稳定^[10];HAC 法不需要确定分类数,但是一旦一个合并被执行就不能修正,聚类质量受限制^[21,23];FCM 法对初始聚类中心敏感,需要人为确定聚类数,容易陷入局部最优解^[24,25]。因此,为确保聚类的客观性,本文以从玉米水足迹和其 17 个影响因素中提取的前 5 个主成分作为聚类指标,分别采用 K-means 聚类、层次聚类、模糊 C 均值聚类 3 种方法进行聚类,在综合考虑不同聚类结果基础上确定分区。

2 结果与分析

2.1 玉米生产水足迹影响因素及其相关性分析

作物生产水足迹受作物生产过程中水资源消耗量及作物单位面积产量的直接影响,而区域农业气象条件、农业生产资料投入、地形地貌和田间管理水平等因素也会对作物生产水足迹产生影响。为进一步明确这些影响因素和玉米生产水足迹之间的关系,利用 SPSS 软件计算出辽宁省 14 个地级市 2011–2015 年气温 (X_1)、大气压 (X_2)、相对湿度 (X_3)、降雨量 (X_4)、日照时数 (X_5)、风速 (X_6)、湿润度 (时段内年降雨量与潜在蒸发量的比值, X_7)、经度 (X_8)、纬度 (X_9)、陆面平均海拔高度 (X_{10})、平原区占总面积的比值 (X_{11})、单位面积氮肥施用量 (X_{12})、玉米种植面积 (X_{13})、玉米灌溉面积占种植面积比例 (X_{14})、玉米灌溉水占农业灌溉用水量比例 (X_{15})、玉米蓝水足迹占总水足迹比例 (X_{16}) 和玉米单产 (X_{17}) 等 17 个因素与玉米生产水足迹 (X_{18}) 与之间相关矩阵并进行显著性分析,详见表 1。

由表 1 可知,气温、大气压、日照时数、风速、陆面平均海拔高度、玉米灌溉水占农业灌溉用水量比例、单位面积施肥量、玉米蓝水足迹占总水足迹比例与玉米生产水足迹呈正相关关系,

表 1 各影响因素与玉米生产水足迹的相关矩阵与显著性分析
Tab.1 Significance analysis of influencing factors of water footprint in maize production

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	
X_1	1.00																		
X_2	0.38**	1.00																	
X_3	-0.56**	0.34**	1.00																
X_4	-0.40**	-0.03	0.66**	1.00															
X_5	0.47**	0.17	-0.47**	-0.50**	1.00														
X_6	0.50**	0.41**	-0.22	-0.46**	0.43**	1.00													
X_7	-0.44**	-0.05	0.68**	0.96**	-0.53**	-0.54**	1.00												
X_8	-0.56**	-0.07	0.35**	0.47**	-0.20	-0.59**	0.55**	1.00											
X_9	-0.12	-0.25*	-0.27*	-0.20	0.10	-0.11	-0.14	0.23	1.00										
X_{10}	0.04	-0.44**	-0.29*	0.01	0.16	-0.18	-0.02	0.02	-0.14	1.00									
X_{11}	0.47**	0.46**	-0.21	-0.23	0.25*	0.37**	-0.24*	-0.07	0.34**	-0.25*	1.00								
X_{12}	0.21	0.30**	0.26*	0.13	-0.07	0.21	0.09	-0.2	-0.81**	-0.01	-0.15	1.00							
X_{13}	0.09	-0.05	-0.23	-0.28*	0.13	0.21	-0.30*	-0.26*	0.52**	0	0.07	-0.51**	1.00						
X_{14}	0.36**	-0.11	-0.45**	-0.54**	0.12	0.53**	-0.56**	-0.72**	0.23	-0.05	0.11	-0.08	0.53**	1.00					
X_{15}	0.16	-0.43**	-0.41**	-0.42**	0.05	0.35**	-0.45**	-0.73**	0.16	0.12	-0.23	-0.18	0.44**	0.82**	1.00				
X_{16}	0.48**	0.06	-0.62**	-0.82**	0.50**	0.45**	-0.79**	-0.41**	0.07	0.01	0.17	0.01	0.19	0.48**	0.35**	1.00			
X_{17}	0.03	-0.06	-0.03	0.04	0.01	0.07	0.03	0.03	0.56**	-0.11	0.43**	-0.37**	0.31**	0.08	0.02	-0.26*	1.00		
X_{18}	0.10	0.14	-0.09	-0.24*	0.09	0.07	-0.22	-0.14	-0.41**	0.05	-0.27*	0.25*	-0.19	0	0.06	0.38**	-0.89**	1.00	

注: * 为 $p < 0.05$, ** 为 $p < 0.01$ 。

其中单位面积氮肥施用量达到显著水平,作物蓝水足迹达到极显著水平。说明在辽宁省的地级市随着单位面积氮肥施用量和蓝水足迹增大,有导致玉米总水足迹变大的趋势,欲降低玉米的生产水足迹可以从降低单位面积施肥量和蓝水足迹入手。低化肥施用量主要是通过减少水的污染来减少灰水足迹,进而减少玉米生产水足迹。蓝水足迹的降低则需要提高灌溉水的水分生产率。在一定的条件下如低气温、短日照、低气压和低海拔有利于降低玉米的生产水足迹。玉米田间耗水依赖于热力学和动力学因素,其中风速是动力学因素的主要来源,故风速的降低可以大大削弱作物对水分的蒸散,从而减小作物生产水足迹;气温、日照时数是主要的热力学因素,适当的低温可以在不减少或者稍微减少产量的情况下减小玉米的生产水足迹。

而相对湿度、降水量、湿润度、经度、纬度、平原区占总面积的比值、作物种植面积、单位面积产量与玉米生产水足迹呈负相关关系,其中降水量、平原区占总面积的比值达到显著水平,纬度和玉米单产达到极显著水平。说明辽宁越靠北的地级市,单产越大,降水量越大且地势越平,则玉米的生产水足迹越小。其原因是降雨量大时,相对湿度高,叶面与大气之间的水汽梯度小,水汽扩散率低,使得蒸发量小,因而作物需水量小,从而减少玉米的生产水足迹。可见,辽宁降水量越大,空气越湿润,且土地越平坦,越有利于减小玉米的生产水足迹;玉米种植面积越大,该地区就有规模优势,单位产量越高,玉米的水足迹就会越小。

2.2 基于主成分分析的辽宁省玉米水足迹空间聚类

2.2.1 主成分分析

(1) 分区聚类指标选取。选取辽宁省 14 个地级市 2011-2015 年的玉米生产水足迹及其影响因素 (X_1, X_2, \dots, X_{18}) 18 个指标作为聚类指标。

(2) 聚类主成分的确定。由于各指标之间存在线性关系,为消除这种线性相关的影响,利用 SPSS 软件进行主成分分析,采用相关矩阵求解主成分,得出主成分的特征值以及各个主成分的贡献率与累计贡献率,见表 2。由表 2 可知第 1、第 2、第 3、

表 2 主成分的特征值和贡献率

Tab.2 Characteristic value and contribution rate of principal components

主成分	特征值	贡献率	累计贡献率	主成分	特征值	贡献率	累计贡献率
1	6.716	0.373	0.373	10.000	0.142	0.008	0.990
2	4.574	0.254	0.627	11.000	0.101	0.006	0.996
3	2.528	0.140	0.768	12.000	0.065	0.004	1.000
4	1.310	0.073	0.840	13.000	0.006	0	1.000
5	0.881	0.049	0.889	14.000	0	0	1.000
6	0.635	0.035	0.925	15.000	0	0	1.000
7	0.495	0.028	0.952	16.000	0	0	1.000
8	0.346	0.019	0.971	17.000	0	0	1.000
9	0.200	0.011	0.983	18.000	0	0	1.000

第4、第5主成分的累计贡献率已高达88.9%,即选取前5个主成分已经能够对18个指标88.9%的信息进行概括。

(3) 主成分荷载与主成分得分。计算与各特征值相对应的特征向量,从而得到主成分荷载矩阵表,见表3。通过主成分荷载矩阵和各样本的标准化值,可得出不同样本的主成分得分值表,见表4。

表3 主成分荷载矩阵表
Tab.3 Principal component load matrix

指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5
X_1	0.421	0.747	0.136	0.322	-0.176
X_2	0.069	0.405	0.817	-0.213	0.163
X_3	-0.753	0.125	0.258	-0.443	0.240
X_4	-0.948	0.105	-0.007	0.107	-0.075
X_5	0.447	0.413	0.292	0.367	0.488
X_6	0.661	0.469	0.372	-0.147	0.010
X_7	-0.969	-0.009	-0.052	-0.051	-0.077
X_8	-0.851	-0.376	0.175	0.083	0.103
X_9	0.179	-0.938	0.135	-0.052	0.132
X_{10}	0.004	0.081	-0.510	0.687	0.228
X_{11}	0.324	-0.230	0.803	0.286	-0.188
X_{12}	-0.109	0.832	0.074	-0.035	-0.384
X_{13}	0.508	-0.488	-0.070	-0.201	0.309
X_{14}	0.893	-0.105	-0.217	-0.26	-0.172
X_{15}	0.732	-0.092	-0.58	-0.217	-0.08
X_{16}	0.941	0.170	0.013	-0.080	0.099
X_{17}	0.359	-0.806	0.369	0.152	-0.125
X_{18}	-0.119	0.852	-0.257	-0.213	0.311

注: X_1, X_2, \dots, X_{18} 解释同表1。

2.2.2 空间聚类过程及分析

以表4的前5主成分为聚类指标,利用MATLAB2012b软件分别采用K-means聚类、分层聚类法、模糊C均值聚类3种方法进行聚类,考虑到地理位置和区划习惯,结合辽宁节水农业分区以及辽宁生态功能分区的研究结果^[26,27]将辽宁分为5个区,3种聚类方法分区结果如表5所示。由表5可知,3种聚

表5 不同方法聚类结果

Tab.5 Preliminary clustering results of three clustering methods

聚类方法	分区I	分区II	分区III	分区IV	分区V
K-means 聚类	鞍山、抚顺、本溪、丹东	大连、营口、葫芦岛	沈阳、铁岭	阜新、朝阳	锦州、辽阳、盘锦
分层聚类	鞍山、抚顺、本溪、丹东	大连、营口、葫芦岛、沈阳、铁岭、阜新、锦州	盘锦	朝阳	辽阳
模糊C均值聚类	鞍山、抚顺、本溪、丹东	大连、营口、葫芦岛	沈阳、铁岭、盘锦	阜新、锦州、朝阳	辽阳

2.2.3 空间聚类结果

由各市的玉米产量可知,沈阳、锦州、朝阳、阜新、铁岭、大连和鞍山7地市的玉米产量占到辽宁的90%,为辽宁省的玉米主产区,因此III区、IV区是辽宁玉米主产区;从水足迹的角度来看,III区玉米生产水足迹最低,II区玉米生产水足迹最高,I区的绿水足迹非常大而蓝水足迹非常小。因此,根据辽宁省各区

表4 分类样本的主成分得分表

Tab.4 Principal component score table of classification samples

地级市	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5
沈阳	0.857	2.471	1.551	0.278	-0.156
大连	-0.300	-3.312	-0.633	-0.633	-0.754
鞍山	-1.359	-0.364	-0.385	0.740	1.016
抚顺	-3.176	2.032	-0.719	1.025	0.002
本溪	-3.299	0.363	-1.216	-0.556	-0.537
丹东	-4.955	-0.289	-0.493	0.538	1.124
锦州	2.492	-0.161	1.089	0.658	-0.199
营口	0.288	-3.677	1.170	0.283	0.261
阜新	3.482	1.842	-0.642	1.227	-0.039
辽阳	-0.387	-0.348	-0.187	-2.796	-0.802
盘锦	1.289	-0.059	3.126	-1.104	1.669
铁岭	-0.554	3.356	1.290	-0.284	-1.482
朝阳	3.990	1.054	-3.623	-0.918	1.076
葫芦岛	1.633	-2.908	-0.327	1.539	-1.179

类方法分区I均为鞍山、抚顺、本溪和丹东,因此完全可以将此4个地级市归为一类。K-means聚类和模糊C均值聚类的分区2均为大连、营口和葫芦岛,而分层聚类法的分区II包含的地区较多,有大连、营口、葫芦岛、沈阳、铁岭、阜新和锦州,因此将大连、营口和葫芦岛归为一类作为分区II。3种方法的聚类的结果均将沈阳和铁岭归为一类,不过分层聚类法将它们归为了分区II,因此本文将沈阳和铁岭作为分区III。3种方法对于分区4的聚类结果分别为K-means聚类(阜新和朝阳)、分层聚类法(朝阳)和模糊C均值聚类(阜新、锦州和朝阳);考虑到分层聚类法在分区II将阜新和锦州也归为了一类,可见阜新和锦州具有相同的聚类特征;同时鉴于阜新、锦州和朝阳都属于辽西地区,所以将阜新、锦州和朝阳归为分区IV。3种方法的对于分区V的结果中均有辽阳,因此把辽阳归为分区5。由于盘锦地区玉米种植面积较小(占全省的0.7%),处于渤海湾中部,气候的玉米的种植条件等和营口类似,故将盘锦归入分区2。具体的空间聚类和分区结果详见图1。

玉米种植结构以及玉米生产水足迹主要特征,将5个分区命名为I区绿水满足—综合发展区、II区高生产水足迹—保护发展区、III区低生产水足迹—重点发展区、IV区蓝水依赖—优化发展区、V区较高生产水足迹—适度发展区,各区的位置分布图详见图1。

(1) 绿水满足—综合发展区。该区地处辽宁东部山区,

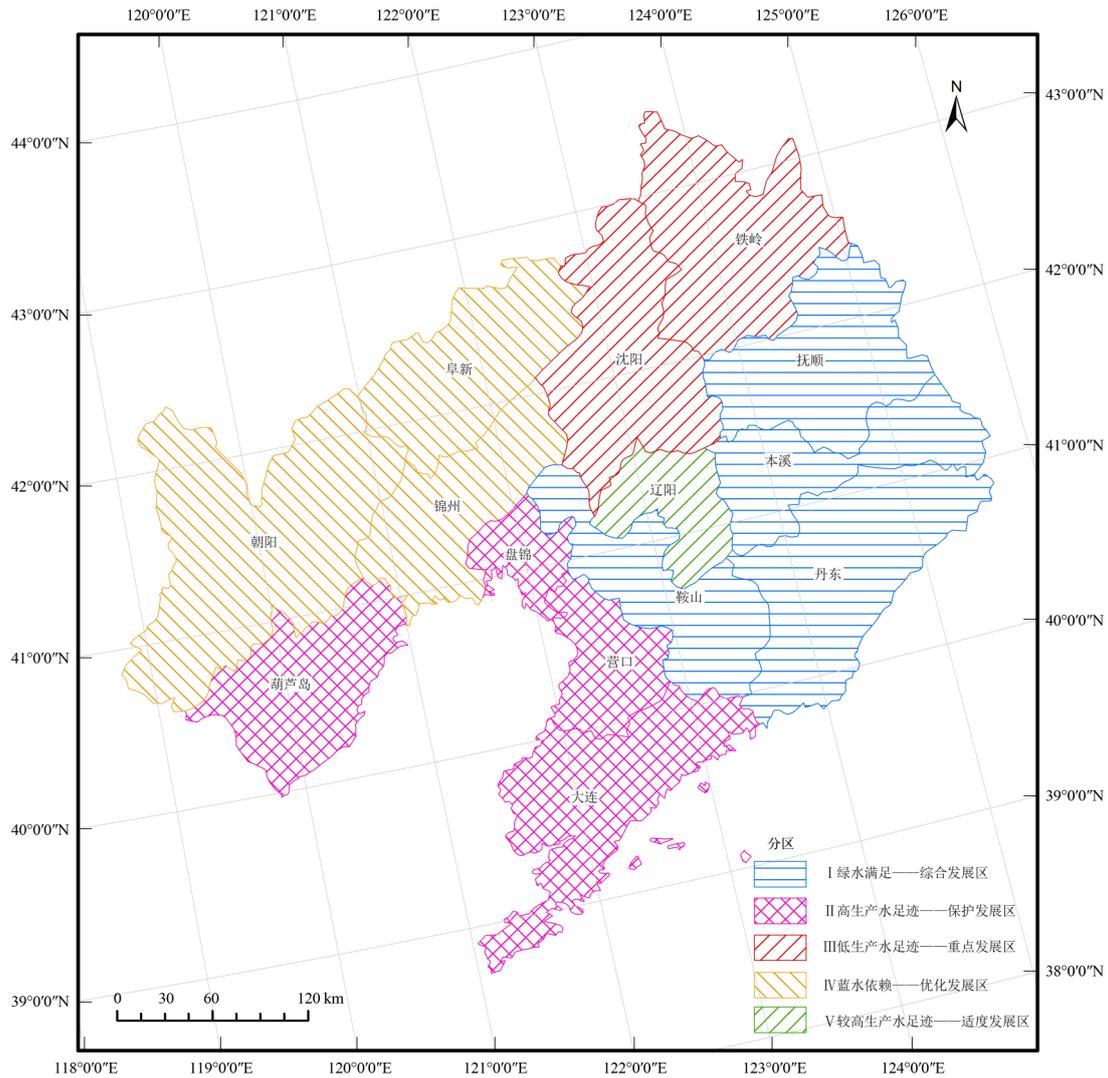


图1 辽宁省基于玉米生产水足迹的聚类分区

Fig.1 Clustering Zoning Map of Liaoning Based on Water Footprint of Corn Production

平原区面积占总面积的6%以下,湿润度0.86~1.36,多年平均降雨量740~1066 mm,水资源丰富。该区地形多为山地丘陵,地块面积小而分散,玉米种植面积较小,玉米蓝水足迹 $0.05\sim 0.14\text{ m}^3/\text{kg}$,绿水足迹 $0.52\sim 0.62\text{ m}^3/\text{kg}$,绿水基本满足玉米作物的生长需要。该区农业规模经营程度和机械化较低,矿产资源丰富,以工业为主,农业不是主导产业。但该区玉米蓝水足迹较小的特点使得它在适度范围内发展玉米种植面积不会增加其他行业的用水压力。且该区降雨量大,湿润度高,作物蒸散量相对少,故作物耗水量少。因此,该区应充分利用这些特点,减少玉米的水足迹,节水增产,起到节省农业用水从而减少其他行业用水压力综合发展的作用。除此之外,考虑到其水资源和生态资源丰富、环境优美等特点,应充分发挥“生态屏障、特色农业”这两大功能,在保证生态涵养的基础上,发展特色农产品,增加农民收入。

(2) II高生产水足迹—保护发展区。该区毗邻渤海,平原区面积占总面积的比例在0~0.23,湿润度0.61~0.77,多年平均降雨量553~773 mm,玉米的绿水足迹为 $0.52\sim 0.62\text{ m}^3/\text{kg}$,蓝水足迹为 $0.23\sim 0.30\text{ m}^3/\text{kg}$,与其他地区相比蓝水足迹、总水足

迹较高。该区可用灌溉水量较少,多以蓄水灌溉为主,存在地下水超采、海水入侵等环境地质问题,使一些水源工程报废或效率低。经济以工业和水产业为主,农业为辅。因此,该区应在发展工业和水产经济的同时,注重农业水资源的可持续发展,提高绿水和蓝水的利用率,利用水源工程引入淡水,或在有条件的条件下进行海水淡化以解决水资源压力。

(3) III低生产水足迹—重点发展区。该区域位于辽河冲积平原,地势平坦,土地肥沃,湿润度0.67~0.79,多年平均降雨量在591~700 mm,水土资源较匹配,种植作物以玉米为主,2011~2015年沈阳、铁岭玉米种植面积分别达总粮食作物播种面积的52%、63%以上,占辽宁省玉米种植面积的32%以上,是辽宁省玉米主产区。该区玉米蓝水足迹 $0.1\sim 0.16\text{ m}^3/\text{kg}$,绿水足迹 $0.39\sim 0.41\text{ m}^3/\text{kg}$,玉米生产水足迹 $0.49\sim 0.57\text{ m}^3/\text{kg}$,玉米生产水足迹最低,说明该区适宜玉米生长,玉米生产对水资源的利用比较合理。其较优的土壤、气候和种植条件使该区成为玉米种植的重点发展区,因此可考虑增加玉米播种面积,发挥玉米种植的规模优势,力争打造辽宁省的高标准农田样板,率先实现农业现代化。

(4) IV 蓝水依赖—优化发展区。该区地势起伏,水土流失严重,湿润度 0.44~0.56,多年平均降雨量 453~532 mm,降雨年内分布不均,春旱现象比较严重,属于缺水地区。该区的主要农作物为玉米,也是辽宁省玉米的主产区,2011—2015 年该区玉米种植面积均达总粮食作物播种面积的 55% 以上,占辽宁省玉米总种植面积的 38.7%,该区玉米生产水足迹为 0.58~0.67 m^3/kg ,其中蓝水足迹 0.21~0.23 m^3/kg ,绿水足迹 0.30~0.33 m^3/kg ,跟其他区相比绿水足迹明显较小,对蓝水的依赖性比较大。国家实施的东北“节水增粮行动”在该区有许多成功案例。因此,该区应吸收节水项目中的经验,大力推广不同形式的大垄双行膜下滴灌玉米种植模式,提高水分利用效率,促进粮食增产,同时也要兼顾生态环境,根据地形地貌特点因地制宜的发展多种农业类型,继续优化种植业结构,增强农产品综合生产力和竞争力。

(5) V 较高生产水足迹—适度发展区。该区位于辽东低山丘陵与辽河平原的过渡地带,平原区面积占总面积的比例 40%。湿润度在 0.76,多年平均降雨量为 700~800 mm,2011—2015 年该地区玉米种植面积均达 50% 以上,玉米蓝水足迹 0.17 m^3/kg ,绿水足迹 0.54 m^3/kg 。该区降雨量仅次于 I 区,但玉米生产水足迹较高,城市化对农业生产的影响明显,土地、资金、人力等生产资源非农化比例较高,导致农业生产投入相对较少,农业生产用水效率不高,工业生产是区域经济来源的重要组成部分。该区工业污水排放不能良好的控制,水污染问题突出,生态环境遭到破坏。因此,该区应适度开发水资源,完善地表蓄水工程建设,加强地下水保护并减少地下水开采;特别需要加强污水排放监控和管理,建立污水处理厂,合理引进先进的污水处理工艺对污水进行净化,实现达标排放。

3 结论

在计算辽宁省各地市玉米生产水足迹的基础上,对 2011—2015 年内影响玉米生产水足迹的因素进行显著性分析,对 18 个指标提取了主成分,基于前 5 主成分对 14 个地级市进行了聚类。结论如下:

(1) 辽宁各地市降水量越大,空气越湿润,土地越平坦,地理位置越靠北则玉米生产水足迹有减小的趋势;玉米种植面积比例越大,则该地市就有规模优势,单位产量越高,玉米的水足迹也有减小的趋势;欲降低玉米的生产水足迹可以从适当减少单位面积的化肥施用量和在保证玉米单产的条件下提高灌溉水的水分生产率两个方面入手。

(2) 基于玉米生产水足迹可将辽宁分为 5 个区域,分别为 I 绿水满足—综合发展区(鞍山、抚顺、本溪、丹东)、II 高生产水足迹—保护发展区(大连、营口、葫芦岛)、III 低生产水足迹—重点发展区(沈阳、铁岭、盘锦)、IV 蓝水依赖—优化发展区(阜新、锦州、朝阳)、V 较高生产水足迹—适度发展区(辽阳)。不同区应结合自身特点,调整作物种植结构,优先使用绿水,科学合理灌溉,充分利用现有的节水灌溉工程减少损失,减少面源的污染等措施来减少玉米的水足迹,从而控制农业用水量,减缓水资源压力。

参考文献

[1] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: A quantification

of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[J]. Value of Water Research Report Series, 2002(11): 13-16.

[2] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[J]. Delft: IHE, 2003: 13-23.

[3] HOEKSTRA A Y, CHAPAGIN A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resource Management, 2007, 21: 35-48.

[4] LIU J, HHG S. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2008, 5(1): 27-50.

[5] HOEKSTRA A Y, CHAPAGIN A K, ALDAYA M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011: 27-35.

[6] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2013, 93(6): 1427-1437.

[7] FALKEN M, ROCKSTROM J. The new blue and green waterparadigm: breaking new ground for water resources planning, and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129-132.

[8] CHAPAGIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual Water Flows between Nations in Relation to Trade in Livestock and Livestock Products[J]. Value of Water Research Report Series No.13. Delft: IHE2003: 11-15.

[9] CHAPAGIN A K, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective[J]. Value of Water Research Series, 2010, 70: 749-758.

[10] QI J P, YU Y W, WANG L H, et al. An effective and efficient hierarchical K-means clustering algorithm[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(8): 15-19.

[11] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1115-1124.

[12] 马育军, 李小雁, 徐霖, 等. 虚拟水战略中的蓝水和绿水细分研究[J]. 科技导报, 2010, 28(4): 47-54.

[13] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 63-72.

[14] 侯庆丰. 基于水足迹的甘肃省农作物种植结构优化分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1921-1927.

[15] 张容, 李杨. 农业水足迹影响因素研究及展望[J]. 商业经济, 2018(8): 100-104, 184.

[16] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 26-34.

[17] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302.

[18] 冯变变, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 山西省作物生产蓝绿水足迹核算及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 200-205, 214.

[19] 何奇瑾, 周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性[J]. 科学通报, 2012, 57(4): 267-275.

[20] 张旭东, 郝迪, 吴迪, 等. 辽宁省不同水文年型玉米水足迹变化规律研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 584-593.

[21] 徐秋艳, 毛军, 朱辉. SPSS 统计分析方法及应用实验教程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.

[22] 马晓艳, 唐雁. 层次聚类算法研究[J]. 计算机科学, 2008, 34(7): 34-36.

- 学报(哲学社会科学版) 2013, 15(4): 58-62, 91.
- [3] 靳玉莹. 初始水权分配方法对比与实证研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [4] 杨芳, 肖淳, 邵东国, 等. 基于投影寻踪混沌优化算法的流域初始水权分配模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(05): 621-624.
- [5] 陈卫, 张伟, 冯平. 天津市滨海新区初始水权分配问题研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(12): 101-104.
- [6] 何逢标. 塔里木河流域水权配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [7] 王新鲜. 县域水资源使用权的动态分配方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [8] 胡洁, 徐中民. 基于多层次多目标模糊优选法的流域初始水权分配——以张掖市甘临高地区为例[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 776-782.
- [9] 郑德凤, 臧正, 王平富. 改进的突变模型及其在水资源评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4): 46-52.
- [10] 郑德凤, 臧正, 苏琳. 基于突变级数法的吉林省生态补偿标准核算[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(4): 537-540.
- [11] 唐明, 邵东国, 姚成林, 等. 改进的突变评价法在旱灾风险评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 858-862, 869.
- [12] 谢霖铨, 卢茜. 基于信息熵理论的水利工程项目风险控制应用[J]. 价值工程, 2012, 31(2): 58-59.
- [13] 施玉群, 刘亚莲, 何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003(4): 132-136.
- [14] 李海红, 赵建世. 初始水权分配原则及其量化方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005(51): 8-14.
- [15] 廖琴, 谢海燕, 卢才武, 等. 基于改进突变理论的公路工程建设风险评价研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40(5): 79-85.

(上接第 87 页)

- [23] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [24] 刘玉邦, 梁川. 基于主成分和模糊 C-均值聚类算法的农业水资源高效利用综合分区[J]. 水文, 2011, 31(5): 57-63.
- [25] 吕晓燕, 罗立民, 李祥生. FCM 算法的改进及仿真实验研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(20): 144-147.
- [26] 王治江, 陈大光, 董丽新, 等. 辽宁生态功能分区制图技术方法[J]. 环境保护与循环经济, 2007(5): 42-45.
- [27] 朱文奇. 辽宁省农业资源分区与规划利用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.

(上接第 94 页)

- [13] SZILAGYI J. Temperature corrections in the Priestley-Taylor equation of evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(A): 455-464.
- [14] ESTEVEZ J, GAVILAN P, BERENGENA J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain[J]. Hydrological Processes, 2009(23): 3342-3353.
- [15] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 等. 蒸发互补关系的区域变异性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(9): 1413-1416.
- [16] GUNSTON H, BATCHELOR C H. A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries[J]. Agricultural Water Management, 1983, 6(1): 65-77.
- [17] LIU X, LIN E. Performance of the Priestley-Taylor equation in the semiarid climate of North China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(1): 1-17.

· 信息 ·

欢迎订阅《节水灌溉》

《节水灌溉》是由中国国家灌排委员会、中国灌溉排水发展中心、武汉大学、国家节水灌溉北京工程技术研究中心共同主办的技术类期刊。是全国中文核心期刊, 中国科技论文统计源期刊, 省(部)优秀科技期刊, 入选“中国期刊方阵”。

栏目设置: 试验研究、水环境与水资源、工程技术、水利经济、工程管理、技术讲座、国外动态、设备与市场、简讯等。

读者对象: 从事节水灌溉行业的水利、农业、林业、机械及相关领域的技术人员、管理人员。

《节水灌溉》邮发代号 38-17, 月刊, 10.00 元/册, 全年定价 120 元。每月 5 日出版, 全国各地邮局征订, 国内外公开发行。也可直接从编辑部订阅。

地址: 武汉市珞珈山 武汉大学(二区)《节水灌溉》编辑部

邮编: 430072

电话: (027) 68776880 (027) 68772201

传真: (027) 68776133

电子信箱: jieshuiguangai@188.com

联系人: 甘甜

单位名称: 节水灌溉编辑部

开户银行: 中行武汉珞珈山支行

账号: 570357528608