

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.016

基于多年环境特征的东北春玉米时空型种植区划研究

刘哲 刘玮 咎糈莉 封伟 李绍明 张晓东

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 玉米是我国主要粮食作物之一, 现有的玉米种植环境区划受尺度过大的影响, 分区环境特征不能满足品种精细测试要求, 只用多年平均值描述环境空间特征, 对于多环境测试中的环境不能充分地认知。为此, 以地理网格为单元, 以东北三省为研究区, 利用东北三省 21 年的气象、DEM、坡度和县域春玉米种植面积等数据, 以每年的环境特征为指标, 构建多年环境特征数据库, 通过属性聚类方法, 从时空角度研究玉米种植环境精细区划方法, 将东北三省的多年环境特征分成 7 类, 使用类别归属度分析方法, 实现东北三省玉米种植环境时空型区划。与多年环境特征均值的空间型区划对比结果表明, 时空型区划结果更加精细, 环境认知更加充分。

关键词: 玉米种植环境; 多环境测试; 空间型区划; 时空型区划; 类别归属度

中图分类号: F323.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0125-07

Temporal and Spatial Planting Regionalization Description of Spring Maize in Northeast China Based on Several Years Environmental Characteristics

LIU Zhe LIU Wei ZAN Xuli FENG Wei LI Shaoming ZHANG Xiaodong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Maize is one of the main food crops in China. Due to too much scales of maize environmental regionalization description, the partition environmental characteristics are not satisfied with the test requirements of the fine varieties, and only using several years average values to describe the spatial characteristics of the environment can not enough recognize the multiple environment test of the environment. The geographical grid was taken as the unit, and the three northeastern provinces as the study area. By using the 21-year meteorological data, DEM, slope and the planting area of spring maize in the three provinces of Northeast China, the every year environment characteristic was used as index to build a multi-year environmental characteristic mean database and a several years environment characteristics database. From the temporal and spatial perspective, the attribute clustering method was used to research a maize environment fine division method. The result was that the environmental characteristics of the three provinces in Northeast China were divided into seven categories. The regionalization of maize planting environment in the three provinces of Northeast China was carried out by using the belonging degree analysis method for category, and compared with the spatial regionalization of the mean value of environmental characteristics for many years, the result of spatial-temporal regionalization was more precise and the environmental cognition was more full.

Key words: maize planting environment; multiple environment test; spatial regionalization; spatial-temporal regionalization; belonging degree for category

引言

玉米是我国粮食生产的主要作物之一, 近年来已逐渐成为主要种植作物, 据国家统计局最新数据

显示, 2015 年, 玉米种植面积约为 3811.66 万 hm^2 , 总产量达 2.2 亿 $\text{t}^{[1-2]}$ 。然而近年来, 全球气候变化导致我国种植环境不稳, 极端气象灾害加剧, 使得全国玉米生产布局不断演变^[3], 进而促使玉米种植环

收稿日期: 2016-10-14 修回日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41301075)

作者简介: 刘哲(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事作物表型测试与种业信息技术研究, E-mail: liuz@cau.edu.cn

通信作者: 张晓东(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业空间信息技术与应用研究, E-mail: zhangxd@cau.edu.cn

境区划做出相应调整。农业种植区划是根据农业生产条件、特点和方向的相似性对宏观区域作物生产的空间分布进行科学划分^[4]。

国内外关于农业精细区划的研究比较多,刘明春等^[5]选择甘肃省不同气候生态区4个县,对玉米生育期内的光、热和水气候生态因子对玉米产量的影响进行积分回归分析,筛选出区划关键气候因子,对甘肃省进行玉米气候生态适宜区划。杨锦忠等^[6]结合玉米对热量资源的要求,开展山西省玉米热量资源精细区划,并指出了各种气象因素的空间变异性。除光、温、水等主要环境要素外,不同种植区或种植亚区区划关注的品种种植适宜性和抗胁迫类型往往也不同,需要着重考虑指标和指标权重存在的差别^[7-12]。刘哲等^[13]将积温、种植密度、倒伏、大斑病和空秆指标作为区划指标,对黄淮海夏玉米区进行了以县域为决策单元的玉米品种精细区划。CARLOS等^[14]基于气象站点数据与玉米品种测试数据,使用作物生长模型对区划单元的环境指标进行量化,最终将美国玉米种植区细分为5种环境类型,并总结出每个乡镇单元的主要环境类型和年际变异环境类型。SETIMELA等^[15]以平均产量为指标利用序贯模式分析法将南非发展中国家的玉米种植区划分为7类。CHENU等^[16]使用100年气象数据结合小麦开花到灌浆期的缺水模型将澳大利亚东北易旱区按照易缺水程度分成3个区,对指导品种试验和品种推广具有重要意义。王思嘉^[17]以5 km×5 km地理网格为区划对象,以多年环境指标均值为区划指标,利用属性空间一体化方法实现吉林省玉米种植环境区划,以地理网格为区划单元对环境的描述更加精细。

综上所述,全球环境变化导致环境气象因子波动明显,使用环境指标均值描述环境特征不能实现对玉米种植环境的充分认知,因而难以准确指导品种测试和适宜性推广工作;区划是环境认知的重要手段,但由于数据方法所限,传统玉米种植环境区划具有分区尺度大、界限不明显、主观性较强等缺点,区划结果准确不够。针对以上问题,本文从时间和空间2个维度描述玉米种植环境特征,构建多年环境特征数据库,从时空角度探索玉米种植环境精细区划的方法与测试站点的布局策略,提高环境认知度。

1 研究区与数据处理

1.1 研究区概况

东北平原位于大、小兴安岭和长白山脉之间,隶属于北方春玉米区,南北长约1 000 km,主要位于东

北三省境内,属寒温带湿润、半湿润气候。10℃以上积温在2 000~3 600℃之间,夏季平均气温在20~25℃之间,全年降水量400~800 mm,从西向东递减,主要集中在6—9月份。东北平原地势平坦,土壤肥沃,以黑土、河淤土、棕色土为主,大部分地区温度适宜、日照充足,黑龙江省、吉林省、辽宁省的东中部降水量很大,该区60%的降水集中在7—9月份,雨热同期,与玉米生育进程同步,对玉米生长发育极为有利,玉米增产潜力很大^[4]。

本文以黑龙江省、吉林省、辽宁省(以下简称东北三省)为研究区域。

1.2 数据

(1)基础地理数据:来自国家基础地理数据中比例尺为1:4 000 000的省、县级行政区划矢量数据。

(2)县域玉米种植面积数据:来自农业部2006—2013年的县域经济统计数据。

(3)生态环境数据:包括1993—2013年的气象数据和高程数据。气象数据来源于国家气象中心所提供的中国地面气候资料日值数据集。数据集包括站点名称、编号、经纬度、日平均气温、日最高气温、最低气温、日降水量、日照时数等要素。高程数据来源于STRM90米分辨率DEM数据。

(4)玉米生育期数据:本文用到的生育期数据主要是玉米播种和成熟的日期,数据来自于国家气象信息中心提供的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,是依托于农业气象站点的点状数据。

1.3 构建多年环境特征数据库

为便于对地理网格的环境特征进行描述,将研究区地理网格进行唯一标识。从栅格数据图层的左上角的格网开始,按照从左到右从上到下的顺序进行标记,标记号从1开始,依次递增,记为CellID。每个地理网格含有6个属性值,分别是生育期内累计活动积温、生育期内累计降水量、生育期内累计日照时数、高程、坡度和玉米种植面积,可以确定的是,由于年际环境变动,地理网格每一年的前3项属性值往往是不同的,而高程、坡度以及玉米种植面积是相同的。

本文利用东北三省21年的气象数据,逐网格逐年计算环境特征值,在此基础上,计算每个地理网格的多年环境指标均值,构建了地理网格环境特征值数据库流程,如图1所示。

2 方法

2.1 玉米种植环境空间型区划

玉米种植环境空间型区划将地理网格作为区划

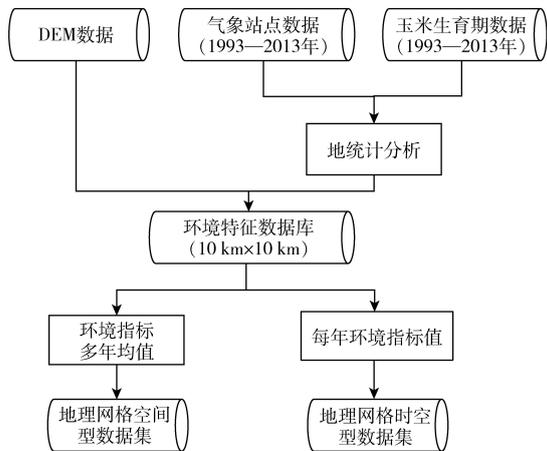


图 1 构建地理网格环境特征值数据库流程图

Fig. 1 Flow chart of constructing geographic grid environment characteristic value

对象,计算每个地理网格各个指标的多年均值,并将这些指标作为玉米种植环境的区划指标,通过 K-means 中心聚类法进行空间属性一体化聚类,通过空间连续性调整消除异类地理网格,得到最终玉米种植环境空间型区划结果,并对分区结果进行特征描述。

2.1.1 K-means 中心聚类法

K-means 聚类法^[18-20]是以数据点集合为数据源,已知需要聚类数,根据特定的距离函数,将已知数据点迭代到各聚类域中。该方法不必计算每个样品的距离,相对于系统聚类法,效率更高。具体实现步骤如下:

(1)从 N 个样品中采用一定的方法或随机选取 k 个样品作为质心。

(2)对剩余的每个样品测量其到质心的距离,并将它归到最近的质心类中。

(3)重新计算已经得到的各个类质心,迭代步骤(2)、(3)直到每个类内各个样品距离分布的标准差上限小于阈值,则聚类结束。

2.1.2 决定系数 R^2 与半偏决定系数 R'^2 统计量

R^2 统计量的计算表达式为

$$R^2 = B_k / T \quad (1)$$

式中 B_k —— k 个类的类间偏差平方和的总和

T ——总离差平方和

R^2 越大,说明 k 个类越能够区分开,聚类效果越好,因为该值会随着分类数目的减少而变小,因此单独看此值判断类别个数意义不大, R'^2 的计算方法: $R'_k = R^2_{k+1} + R^2_k$,即 R'^2 越大,说明上一次合并为 $k+1$ 类的聚类效果越好。综上可知, R^2 和 R'^2 可以一起来确定聚类个数。

2.1.3 空间连续性调整

在对地理网格进行多指标 K-means 中心聚类

后,尽管将地理坐标 $X、Y$ 值以较小的权重作为聚类指标的一部分,在一定程度上能够提高聚类结果的空间连续性概率,然而在地理空间上,仍然有异类地理网格零星地分布在其他类别内或多个类别之间的情况,违背了区划的空间连续性原则。因此,需要进行空间连续性调整,将零星区域调整到邻近大的分区内。主要非连续情况及调整方法如图 2 所示。

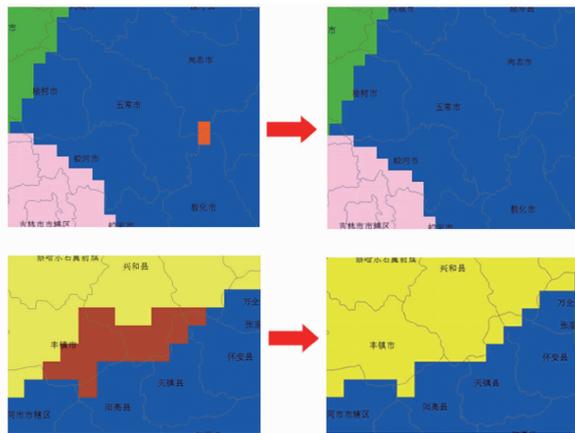


图 2 细碎区调整方法

Fig. 2 Adjustment method for crushing zone

2.2 玉米种植环境时空型区划方法

玉米种植环境时空型区划的主要流程如下:将地理网格的每年环境特征值作为聚类指标,其指标与指标权重的设定、聚类方法、聚类数目的确定方法与空间型区划时一致,在此基础上实现多年环境特征的分类,以此对地理网格完成时空型区划,主要流程如图 3 所示。

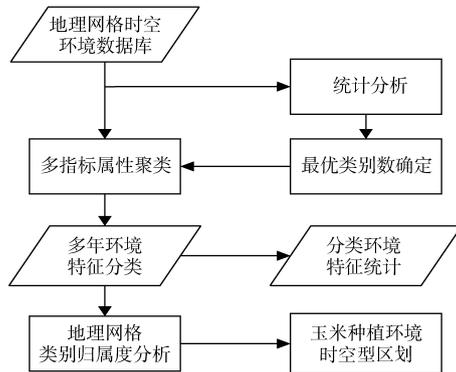


图 3 玉米种植环境时空型区划流程图

Fig. 3 Flow chart of spatial-temporal regionalization of maize planting environment

2.2.1 环境类别时空变化特征

由于环境年际间变动的影 响,同一地理网格在不同年往往会归属于不同的类,类似情形如图 4 所示,若经过多年环境特征聚类得到 A、B、C、D 等几个类,对于地理网格 m_i ,其环境特征值由 m_{ij} 标识, j 表示其来自的年份,从上往下,地理网格在第 1 年属于 A 类,而第 2、3 年又属于 B 类,第 4 年属于 C

类,第5年又属于A类,等等。根据地理网格每年的归属环境类别,则可以确定每年内各个环境类别的空间分布情况,形成研究区每一年的环境类别区划图,不同年内出现的环境类别以及各环境类别的空间分布都是不同的,经比较,可以看出地理网格年际间的环境类别时空变化特征。

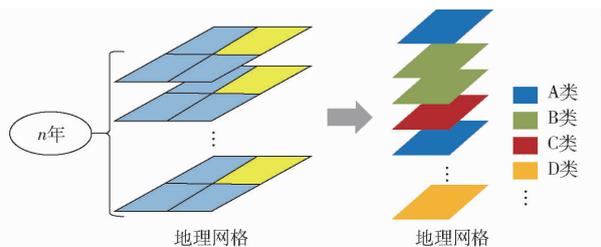


图4 地理网格每年环境指标值类别变化特征

Fig.4 Geographic grid annual category changing characteristics of environmental indicator value

2.2.2 玉米种植环境时空型区划方法

地理网格类别归属度分析方法如下:对于具有 n 年环境特征值的地理网格 m_i ,经过上面的属性聚类后,归属的类别有 u 个,分别比较这 u 个类别出现

的年数,若类别 A 出现年数最多,记为 y ,则类别 A 将作为该地理网格的最终归属类别,其中该地理网格属于类别 A 的概率 p 设定为

$$p = y/n \times 100\% \quad (2)$$

根据公式(2)得到每个地理网格的最终归属类别以及归属概率,并获得所有地理网格的环境类别在空间上的分布,实现玉米种植环境时空型区划。

3 结果与分析

3.1 环境类别在每年的空间分布特征

由图5比较可知,每一种环境类别在多年间出现的概率、分布情况往往是不同的,体现了环境在时间和空间2个维度的变异。

地理网格年际间类别的变化,可能是由以下2个原因导致:①该地理网格多年环境特征差异较大,使其在年际间属于不同的类别。②该地理网格的多年环境特征差异不大,而由于其特殊的环境与多个类的类中心距离都很大,每个分类对它的代表性都很差,使得在不同年间,环境特征值少量的变化

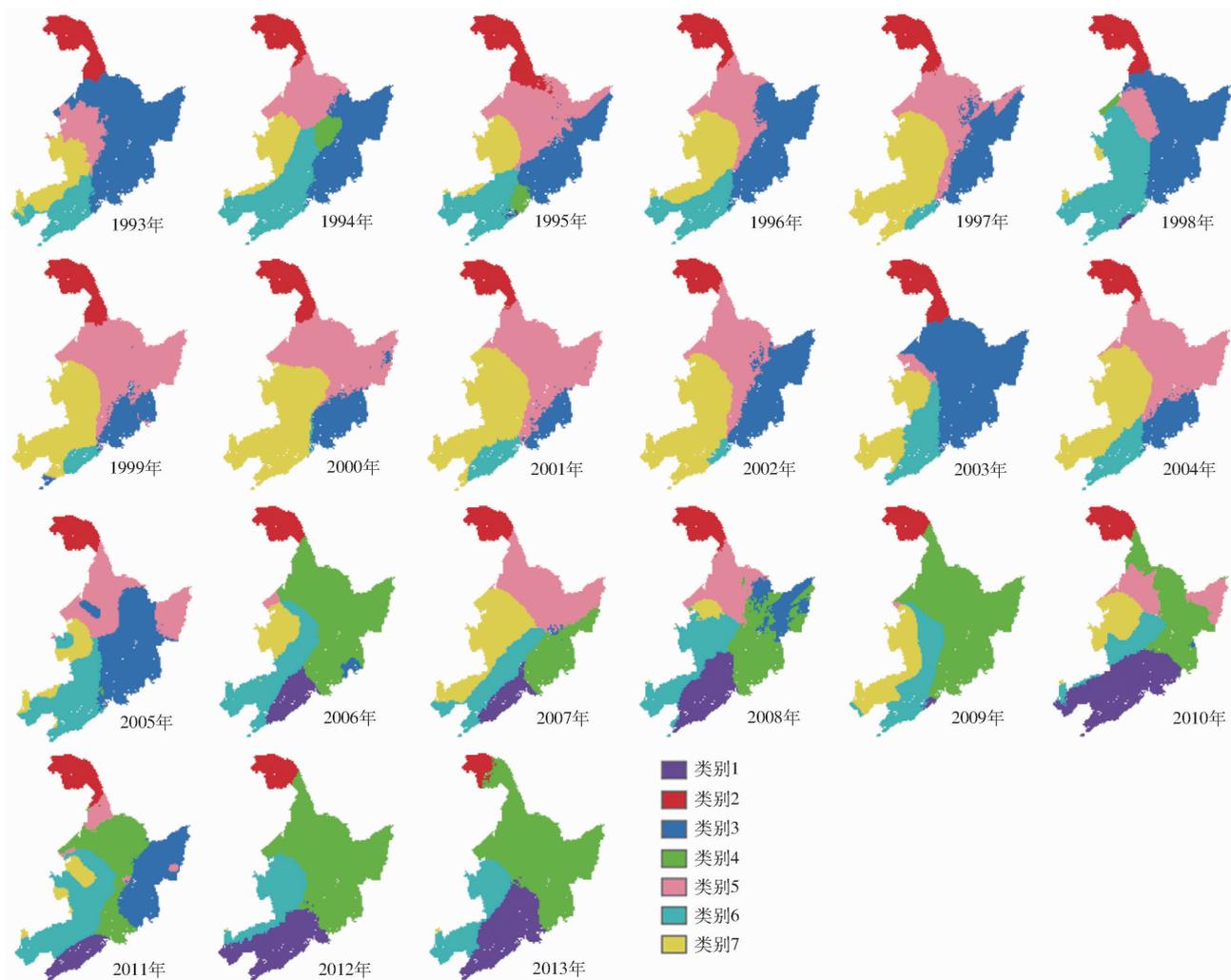


图5 环境类别年空间分布特征

Fig.5 Annual spatial distribution characteristics of environmental categories

都能使其归属到不同的类中。

尽管环境年际间的变化导致地理网格的隶属类别不确定,但由于其空间环境型的相对稳定性,必定存在属于某个类的趋势,那么这个类别就可以用来描述该地理网格,由此提出地理网格类别归属度分析方法,在此基础上实现玉米种植环境时空型区划。

3.2 玉米种植环境空间型区划和时空型区划

3.2.1 玉米种植环境空间型区划

通过 2.1 节的方法,获得最终的玉米种植环境空间型区划,结果如图 6 所示。

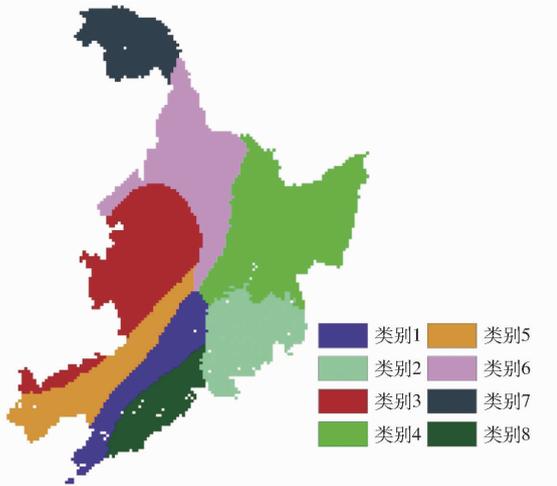


图 6 玉米种植环境空间型区划

Fig. 6 Spatial regionalization of maize planting environment

3.2.2 玉米种植环境时空型区划类别归属度

利用地理网格环境年际类别归属度分析方法,计算东北三省地理网格的环境类别归属度,确定地理网格最终归属类别,得到东北三省玉米种植环境时空型区划,结果如图 7 所示,图例中的数值,第 1 位表示地理网格的最终归属类别编号,第 2、3 位表示该地理网格归属于该类的概率,如 771 表示该地理网格的最终归属类别为环境类别 7,其归属的概率为 71%,概率越大,地理网格在年际间隶属于该

类别可能性越大,另外若第 2、3 位值皆为 0,表明该地理网格以 100% 的概率归属于该类别。由图 7 可知研究区多年间出现的主要环境类别是 2、3、5、6、7,特别是位于几个类的交界处的区域由于年际间环境特征变化较大或者位于多个类别的边缘地带的原因,其归属最终类别的概率非常小;第 1、4 类只存在一小部分区域。通过分析图 5 可知可能是由于这 2 个类在 21 年间出现的频次较小的缘故;另外,多个环境类别不仅仅在空间分布上有差别,也可能环境变异导致的同一区域在不同年之间属于不同的类别,如第 3 类和第 4 类、第 1 类和第 6 类,地理分布有很大的重合度,主要是由降雨量的差别导致。

3.2.3 玉米种植环境时空型区划最佳聚类数

将生育期内活动积温、降雨、日照时数指标的权重设置为 0.25,高程权重 0.15,为尽量保证聚类结果的空间连续性,选择 X、Y 坐标作为聚类指标,权重皆为 0.05;去掉坡度大于 25°,高程大于 2 000 的网格,这些网格将不作为测试站点的布局网格;设定拟定的聚类数目区间,预设聚类数目为 2~10 类;分别计算分成这些类的 R^2 和 R^{12} 值,如表 1 所示,经过比较,发现聚类数目为 8、9、10 的 R^2 都较大,且 R^{12} 在聚类数为 7 和 8 时差距最大,因此确定最终聚类数目为 7。最终区划结果如图 7 所示。

3.2.4 玉米种植环境空间型与时空型对比分析

在研究区内,基于空间型的玉米种植环境区划考虑的是多年的环境特征的均值,它会使多年环境特征值中的特异点被中和,而不能凸显出来,仅体现一种平均水平,同时空间型只是考虑了空间上的变异而没有考虑时间序列上的变异,导致环境特征值的离差大于时间型。

基于时空型的玉米种植环境区划不仅考虑了空间上的变异^[20],也考虑了时间序列上年际间环境特

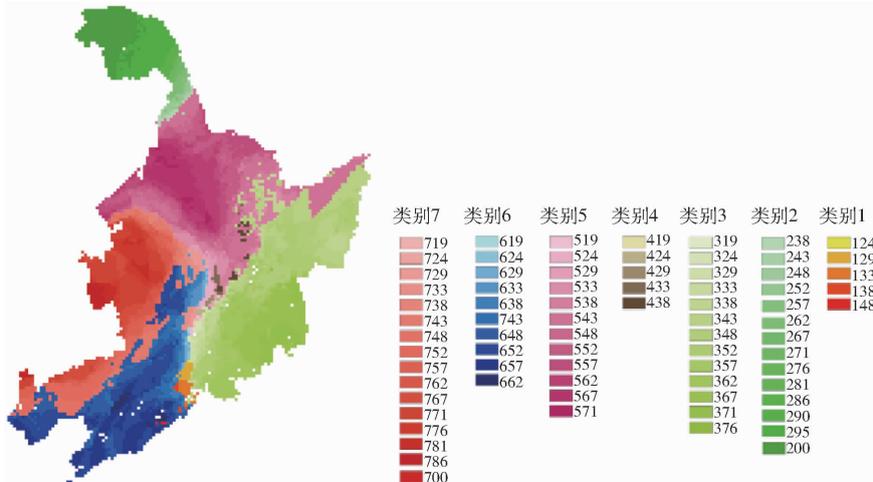


图 7 玉米种植环境时空型区划及地理网格对类别的归属度

Fig. 7 Spatial-temporal regionalization of maize planting environment and belonging degree for categories on geographic grid

表1 东北三省分成2~9类的 R^2 和 R'^2
Tab.1 R^2 and R'^2 of 2~9 classes in three
northeastern provinces

分类数	R^2	R'^2
2	0.277 147 8	0.320 741 00
3	0.597 888 8	0.103 600 70
4	0.701 489 4	0.059 406 88
5	0.760 896 3	0.040 116 01
6	0.801 012 3	0.010 613 68
7	0.811 626 0	0.054 413 68
8	0.866 039 7	0.011 345 15
9	0.877 384 8	

征值的波动,能够体现对研究区的主要环境类型的代表性,对测试环境的认知更加充分,较空间型玉米种植区划更为准确,更加具有使用价值。

3.2.5 时空型种植区划地理网格类别归属度分析

从图7中可以发现,在每一个大类之间的交汇处,地理格网所属的类别归属度非常低或类别变动非常频繁,特别是在类别7、6、5、4、3相交的地带更为明显。

由于每个地理网格含有6个属性值,分别是生育期内累计活动积温、生育期内累计降水量、生育期内累计日照时数、高程、坡度和玉米种植面积,可以

确定,由于年际环境变动,地理网格每一年的前3项属性值往往是不同的,而高程、坡度以及玉米种植面积是相同的。所以可以肯定的是在类别归属度低的地理网格生态环境不稳定,气候变动大,玉米种植需要特别的关注。

4 结论

(1)构建了多年地理环境特征数据库。为了准确描述种植环境的时空变化特征,本文基于10 km × 10 km的地理网格,计算了东北三省(黑龙江省、吉林省、辽宁省)积温、降水量、高程等种植环境指标特征值,构建了多年环境特征数据库。

(2)提出了玉米种植环境时空型区划方法。以地理网格为聚类对象,以每年的环境特征值作为聚类指标,利用属性聚类方法,将东北三省的多年环境特征分成7类,使用类别归属度分析方法,实现东北三省玉米种植环境时空型区划。较玉米种植环境空间型区划,该方法同时考虑了环境的时间与空间维度的变异特征,区划结果更加精细,提高了对环境的认知。

(3)类别交汇处地理网格的类别归属度低,所属环境类别变动频繁。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家统计局. 2015年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2016-02-29). http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201602/t20160229_1323991.html.
- 2 湛琴,高笑天. 2015年上半年国内玉米市场分析与展望[J]. 农业展望,2015,11(6):8-12.
CHEN Qin, GAO Xiaotian. China's maize market in the first half of 2015 and its prospect[J]. Agricultural Outlook, 2015, 11(6):8-12. (in Chinese)
- 3 李少昆,王崇桃. 玉米高产潜力·途径[M]. 北京:科学出版社,2010:368.
- 4 王飞,邢世和. 作物种植区划研究进展[J]. 中国农业资源与区划,2007,28(5):37-40.
WANG Fei, XING Shihe. Progress of the research on crop planing regional planing[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2007, 28(5):37-40. (in Chinese)
- 5 刘明春,邓振镛,李巧珍,等. 甘肃省玉米气候生态适应性研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3):112-117.
LIU Mingchun, DENG Zhenyong, LI Qiaozheng, et al. The suitable planting division of corn in Gansu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005,23(3):112-117. (in Chinese)
- 6 杨锦忠,崔福柱,郝建平,等. 基于GIS的山西省玉米热量资源精细区划[J]. 山西农业科学,2014,42(1):33-38.
YANG Jinzhong, CUI Fuzhu, HAO Jianping, et al. GIS-based precision zoning of heat resources for maize in Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014,42(1):33-38. (in Chinese)
- 7 石淑芹,陈佑启,李正国,等. 基于空间插值分析的指标空间化及吉林省玉米种植区划研究[J]. 地理科学,2011,31(4):408-414.
SHI Shuqin, CHEN Youqi, LI Zhengguo, et al. Spatial simulation of indices based on spatial interpolation technique and regional planing for planting maize in Jilin province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(4):408-414. (in Chinese)
- 8 何奇瑾,周广胜. 我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究[J]. 地理学报,2011,66(11):1443-1450.
HE Qijin, ZHOU Guangsheng. Climatic suitability of potential summer maize planting zones in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(11):1443-1450. (in Chinese)
- 9 杨平,张丽娟,赵艳霞,等. 黄淮海地区夏玉米干旱风险评估与区划[J]. 中国生态农业学报,2015,23(1):110-118.
YANG Ping, ZHANG Lijuan, ZHAO Yanxia, et al. Risk assessment and zoning of drought for summer maize in the Huang-Huai-Hai region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2015,23(1):110-118. (in Chinese)
- 10 吴格娥,张家卫,石群. 几个玉米新品种的丰产性及对大斑病的抗性比较试验[J]. 黔东南民族职业技术学院学报,2007,3(1):16-18.
WU Geer, ZHANG Jiawei, SHI Qun. High yield and resistance to several new varieties of corn exserohilum turcicum comparison

- test[J]. Journal of Southeast Guizhou Vocational College of Technology for Nationalities, 2007,3(1):16-18. (in Chinese)
- 11 邓振镛,李栋梁,郝志毅,等. 我国高原干旱气候区作物种植区划综合指标体系研究[J]. 高原气象, 2004,23(6):847-850.
DENG Zhenyong, LI Dongliang, HAO Zhiyi, et al. Study on integrative index system of crop ecological suitable planting division in arid climate condition of altiplano region[J]. Plateau Meteorology, 2004,23(6):847-850. (in Chinese)
- 12 高桂芹,郭丽霞. 2005年唐山市夏播玉米空秆、畸形穗气象因素分析[J]. 玉米科学, 2006,14(增刊1):119-120,122.
GAO Guiqin, GUO Lixia. Analysis of the cause of meteorological formation of barren stem crooked fringe on summer maize of Tang-shan in 2005[J]. Journal of Maize Sciences, 2006,14(Supp.1):119-120,122. (in Chinese)
- 13 刘哲,唐日晶,赵祖亮,等. 黄淮海地区玉米品种适宜性精细区划研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(8):281-288.
LIU Zhe, TANG Rijing, ZHAO Zuliang, et al. Regionalization of maize cultivars cultivated in Huang-Huai-Hai plain of China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):281-288. (in Chinese)
- 14 CARLOS L, WEI J, FAST T, et al. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems[J]. Crop Science, 2005,45(5):1708-1716.
- 15 SETIMELA P, CHITALU Z, JONAZI J, et al. Environmental classification of maize-testing sites in the SADC region and its implication for collaborative maize breeding strategies in the subcontinent[J]. Euphytica, 2005,145(1-2):123-132.
- 16 CHENU K, COOPER M, HAMMER G L, et al. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia[J]. Journal of Experimental Botany, 2011,62(6):1743-1755.
- 17 王思嘉. 玉米品种多环境测试站点的布局方法研究——以吉林省为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
WANG Sijia. Spatial distribution of multi-environment trial station for maize varieties—a case study of Jilin province [D]. Beijing: China Agricultural University,2015. (in Chinese)
- 18 李震,洪添胜,曾祥业,等. 基于K-means聚类的柑橘红蜘蛛图像目标识别[J]. 农业工程学报,2012,28(23):147-153,299.
LI Zhen, HONG Tiansheng, ZENG Xiangye, et al. Citrus red mite image target identification based on K-means clustering[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(23):147-153,299. (in Chinese)
- 19 汪虎. 玉米品种级种植区划算法研究及系统实现[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
WANG Hu. Maize varieties and planting division algorithm and system implementation [D]. Beijing: China Agricultural University,2010. (in Chinese)
- 20 YAO Xiaochuang, ZHU Dehai, YE Sijin, et al. Spatial interpolation methods study based on geostatistics for the grasshopper population[J]. Sensor Letters, 2014,12(3):645-650.

(上接第99页)

- 13 常景彩,王志强,李兴平,等. 大型泵站新型钟形进水流道流动特性的研究[J]. 水力发电学报,2011,30(1):165-169,179.
CHANG Jingcai, WANG Zhiqiang, LI Xingping, et al. Study on hydraulic characteristics of new bell suction duct in large-scale pumping stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(1):165-169,179. (in Chinese)
- 14 张德胜,王海宇,施卫东,等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(11):139-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.022.
ZHANG Desheng, WANG Haiyu, SHI Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):139-145. (in Chinese)
- 15 DAVIS C V. Handbook of applied hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1952:555-556.
- 16 PFLEIDERER C. Die kreiselpumpen für flüssigkeiten und gase[M]. New York: Springer Verlag,1961:168.
- 17 HUTTON S P. Component losses in kaplan turbines and the prediction of efficiency from model tests[M]. New York: Institution of Mechanical Engineers,1954:168-228,743-746.
- 18 张仁田,张平易,阎文立,等. 大型泵站系统性能参数的换算方法[J]. 农业机械学报,1999,30(2):50-54.
ZHANG Rentian, ZHANG Pingyi, YAN Wenli, et al. Research on conversion method of performance parameters for large-scale pumping station system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1999,30(2):50-54. (in Chinese)
- 19 刘竹溪,刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 20 杨帆,谢传流,刘超,等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(2):15-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.002.
YANG Fan, XIE Chuanliu, LIU Chao, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2):15-21. (in Chinese)