•研究报告•

基于空间统计学分析农作物种质资源的空间分布特征

陈彦清¹ 曹永生¹ 吴彦澎² 陈丽娜³ 方 洸^{1*}¹ (中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)² (北京市农林科学院, 北京 100097) ³ (商丘师范学院计算机与信息技术学院, 河南商丘 476000)

摘要: 掌握农作物种质资源的空间分布特征, 分析种质资源在地理空间上的聚集离散特征, 对于作物种质资源全面收集、有效保护和高效利用具有重要意义。本研究基于空间统计学原理和方法, 借助ArcGIS软件, 对全国种质资源的分布进行了冷热点分析, 定性分析了我国种质资源分布的聚集和离散区域; 然后分析了不同种植业区域内种质资源的数量和重心分布特征, 确定各类主导作物区的资源密度和均质性情况。最后分析了各种种植业分区内资源分布的方位特征, 确定资源分布的范围、角度和方向性。结果表明: 我国华北平原和部分黄土高原地区属于种质资源分布的聚集区, 甘肃中部、四川及新疆西部、青海东部属于种质资源分布的离散区, 除了部分空白区外, 其余部分为种质资源的随机分布区; 西北绿洲麦棉甜菜葡萄区、青藏高原青稞小麦油菜区、东北大豆春麦玉米甜菜区和北部高原小杂粮甜菜区4区, 资源分布密度低且分布不均匀, 说明这4个地区的部分种质资源相对集中分布在局部地区, 而东南部6区的种质资源分布不仅密度大, 而且分布相对均匀, 说明我国东西部种质资源分布特点差异明显; 西北绿洲麦棉甜菜葡萄区的资源分布范围最广, 华南双季稻甘蔗热带作物甘蔗区的资源分布方向趋势性最明显。北部高原小杂粮甜菜区、东北大豆春麦玉米甜菜区和青藏高原青稞小麦油菜区的种质资源大部分分布在区域的南部, 西北绿洲麦棉甜菜葡萄区的种质资源的分布偏向北部, 东南6区的资源分布则不存在明显的偏向性。

关键词: 作物种质资源; 空间统计学; 冷热点分析; 方位分析; 种植业分区

Spatial distribution characteristics of crop germplasm resources using spatial statistics

Yanqing Chen¹, Yongsheng Cao¹, Yanpeng Wu², Lina Chen³, Wei Fang^{1*}¹ Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081² Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097³ Department of Computer and Information Technology, Shangqiu Normal College, Shangqiu, Henan 476000

Abstract: It is important to understand and analyze the spatial distribution features and models of crop germplasm resources for the comprehensive collection, effective protection, and efficient utilization of these resources. This paper analyzed these characteristics based on spatial statistical principles and methods with ArcGIS software. Firstly, we did a cold and hot spot analysis of germplasm resources at the national scale to determine discrete regions of Chinese germplasm resources from a qualitative aspect. Then, we analyzed the number and center of gravity characteristics of germplasm resources to determine density and homogeneity of germplasm resources in main crop regions. Finally, we analyzed the bearing distribution characteristics of germplasm resources in different planting partitions to determine the scope of resource distribution, angle, and direction. According to results of cold and hot spot analysis, the northern China plain and a part of the loess plateau region belong to accumulation areas of germplasm resources. The central region of Gansu province, the western part of Sichuan and Xinjiang, and the eastern part of Qinghai belong to a discrete area of germplasm resources. In addition to the blank area of germplasm resources, the rest is part of the random distribution area of germplasm resources. According to quality and gravity center analysis results, the

收稿日期: 2017-08-03; 接受日期: 2017-10-09

基金项目: 国家农作物种质资源共享服务平台(NICGR2017-000)和农作物种质资源保护与利用专项(2017NWB036-10)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fangwei@caas.cn

Northwest Oasis region mainly grows wheat, cotton, beets, and grapes, the Qinghai-Tibet Plateau region mainly grows barley, wheat and rape, the Northern plateau region mainly grows small grains and beets, and the Northeast region mainly grows soybeans, spring wheat and beets. These are all located in the northeast and the west of China, and their germplasm resources' densities are low and uniformities are uneven, which means a small amount of the germplasm resources in the four areas are relatively concentrated in a small area. Not only are the densities of germplasm resources of the 6 regions in southeastern of China large, but also the uniformities are relatively homogeneous. The differences in density and uniformity of germplasm resources between eastern and western China are obvious. According to results of the orientation analysis, the distribution range of germplasm resources in the Northwest Oasis is wheat, cotton, beets, and grapes, while the directional trend of germplasm resources in the South are double crops of rice, tropical crops, and sugarcane. Germplasm resources are distributed as follows in these three regions: in the Northern plateau small grains, beets, Northeast soybean, spring wheat and beets; in the Qinghai-Tibet Plateau highland barley, wheat, and rape, mostly distributed in southern areas; and in the Northwest Oasis wheat, cotton, beets, and grapes found in the north of the region. The distribution of germplasm resources of these 6 southeastern regions has no obvious bias.

Key words: crop germplasm resources; spatial statistics; cold and hot spot analysis; orientation analysis; cropping regionalization in China

农作物种质资源是培育优良品种, 推动农业可持续发展的物质基础, 是最有价值、最有战略意义的宝贵财富(王述民, 2002; 黎裕等, 2015)。种质资源的空间分布信息不但有助于我们了解物种的历史演化过程, 还可用于研究不同种质资源对环境的生态适应性及变化(Elith et al, 2006; McPherson & Jetz, 2007)。近年来学者们对我国种质资源的分布特征开展了多项研究, 如曹永生等(1997, 1999)根据资源数据的经纬度信息, 分析了中国主要农作物种质资源的地理分布特点; 杨忠义等(2008, 2010)利用云南种质资源调查数据对云南省资源的空间分布进行了分析; 吴元奇等(2013)、任民等(2009)、杨青川等(2016)分别针对指定作物的分布利用相应的数学方法进行了分析。以上学者重点强调数学统计分析方法, 部分引入地理学空间分析方法进行了研究, 但研究还不够深入。空间统计分析方法是一种研究空间分布格局的较为有效的方法, 目前在分析区域经济差异等问题上的应用较为成熟(胡青峰等, 2007; 任家强等, 2010; 陈楚祥, 2015), 但在生物多样性方面, 除了空间自相关分析相对应用较多外(刘军等, 2008; 陆光远等, 2009; 汤飞燕等, 2009; 祁彩虹等, 2011), 其他空间统计学方法的应用还比较少见。另外, 目前以行政区划对种质资源的分布情况进行统计的居多(杜雄明等, 2007; 任民等, 2009; 刘洋洋等, 2013), 虽然具有一定的统计意义, 但从地理空间来看, 种质资源的分布在很大程度取决于自然条件, 以行政区划为分析单元的方法割裂了种质资源在地理空间上的连续性。而种植业分区是以种植作物为

对象进行的单项农业区划, 其任务是根据作物的生态要求和地区生态环境条件, 因地制宜地划分种植业适宜种植区。所以, 以种植业分区为单元分析各区种质资源的空间分布特性更具有实际应用价值。

由于运用空间分析方法深入挖掘农作物种质资源空间地理分布的研究较少, 目前针对全国农作物种质资源空间分布特征的结论大部分停留在资源点地理密度分布和相关的数据统计层面, 对资源收集等工作的支撑作用不足。本文以国家农作物种质资源数据中心多年积累的资源数据为基础, 从宏观尺度出发, 基于空间统计学原理, 分别从全国尺度和种植业分区尺度分析种质资源的聚合情况、数量和重心分布、方位特征, 分析农作物种质资源的空间分布特征, 确定农作物种质资源重点保护区域, 从而有重点、有目标地保护和高效利用农作物种质资源。同时, 以种植业分区作为农作物种质资源的研究单元, 能够为合理开发利用农业资源、调整种植业生产结构和布局、选建农作物商品生产基地、制定种植业生产规划提供科学依据。

1 数据来源

20世纪50年代以来, 我国先后组织了两次全国规模的农作物种质资源调查, 在资源调查和信息共享方面取得了重大进展和显著成效, 积累了大量的种质资源数据(曹永生和方洸, 2010; 司海平等, 2010; 王述民和张宗文, 2011)。同时, 近10年来, 我国开展了多次种质资源调查工作, 丰富了农作物种质资源数据库。经过多年的调查与收集, 除去国外

引进资源外,农作物种质资源数据库共收录了约32万条数据记录,根据其经纬度属性信息转换为地理空间数据。种植业分区数据采用中国农业百科全书农业经济卷中的全国种植业分区图(中国农业百科全书总编辑委员会,1991),由于其原始格式为图片,需进行地理空间位置配准和矢量化操作,得到其矢量化数据。将矢量化后的种植业分区面状数据与农作物种质资源点状数据进行空间叠加,可确定各种质资源分布点所属的种植业分区。处理后的数据如图1所示。

2 研究方法

利用空间统计学方法,分别从全国角度和种植业分区角度对种质资源的分布特征进行分析。首先在国家尺度上,利用热点分析方法揭示农作物种质资源的聚合情况。冷热点分析能够从定性的角度分析我国农作物种质资源的大体分布情况,然后再分作物从定量的角度分析其地理分布特征。由于我国农作物种质资源丰富,包含粮食、纤维、油料、蔬菜、果树、糖、烟、茶、桑、牧草、绿肥、热作等350多种作物,且交叉分布,故很难对它们分别

进行细化分析。所以,本研究使用种植业区划来表示不同作物的地理分布空间。由于种植业区一级区以主导作物为标志,所以使用一级种植业分区反映不同作物的地理空间分布是合理的。

2.1 资源分布的冷热点分析

优化热点分析方法是对于给定事件点或加权要素(点或面),使用Getis-Ord G_i^* 统计创建具有统计学上的显著性热点(聚集区域)和冷点(离散区域)的地图。该方法根据输入要素类的特征,为寻求最优的聚集和离散区域提供了解决方案。本研究使用的ArcGIS的优化热点分析工具,能够对点或面数据进行分析,用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类。在进行事件数据聚合时,该工具提供3种事件数据聚合方法:Count Incidents Within Fishnet Polygons方法,Count Incidents Within Aggregation Polygons方法和Snap Nearby Incidents to Create Weighted Points方法。根据本研究数据的特点,选择第一种方法进行聚类,所以文章仅对该方法进行详细介绍,其他两种方法省略。

Count Incidents Within Fishnet Polygons方法首先将位置上重复的点进行折叠,使唯一位置上仅生

图1 中国各种种植业分区作物种质资源分布情况

Fig. 1 Distribution of crop germplasm resources in different cropping regionalization in China

成一个点,然后计算所有唯一位置点(位置异常值除外)的平均和中位最近邻距离。根据所计算的距离自动调整像元大小,构建渔网面网格,并使用事件点叠加网格,计算每个面像元中的事件点数量。对处理后的数据使用Getis-Ord G_i^* 统计方法进行冷热点分析。然而该方法不适用于聚合过程产生的面像元少于30个,或所有面像元中的计数都相同的情况。由于本研究的数据对象为全国的农作物种质资源分布点,并且资源分布的差异较为明显,聚合后产生的像元数量远大于30,所以该方法对于种质资源的聚合分析是适用的。

在使用该方法时,可选择定义事件潜在发生位置的边界多边形,如果提供限定可能发生事件的区域的边界面时,则边界面中所有的面像元都将得到保留。如果不提供限定可能发生事件的区域的边界面,将移除不含事件的面像元。由于全国种质资源点数据并非抽样点数据,所以不必选择潜在位置多边形进行控制。

2.2 资源分布数量与重心分析

冷热点分析结果与种植业分区进行叠加可大体看出不同种植业分区内的资源分布情况,但仅能完成初步的定性描述。为了得出各分区内资源丰富程度的定量化数值,本研究利用各种种植业分区资源数量与分区的面积值作比值,计算单位面积上的资源数量,即分布密度。该值能够反映各种种植业分区内种质资源数量上的多样性程度:数值越大,说明对应种植业分区内的种质资源越丰富,从而说明区内主导作物的品种越多样。

资源分布密度可反映区内资源丰富性程度,但通过该值无法判断区内种质资源分布是否均匀。利用ArcGIS软件中的重心分析工具计算各种种植业分区的地理重心和各分区内种质资源的地理重心,比较两者差异。除非资源围绕重心呈对称分布,否则肯定会造成两个重心位置上的差异。重心差异越明显,说明种质资源在区域内分布越不均匀,反之说明其地理分布越均匀。

2.3 资源分布的方位分析

结合空间统计方法,本研究主要通过标准差椭圆对种质资源的方位特征,包括资源在区内的分布范围、方向角度、方向趋势性等进行分析,从而确定不同种植业分区内种质资源的空间分布特性,也可研究影响种质资源分布的关键因素提供理论

依据。

标准差椭圆最早是由美国南加州大学社会学教授Welly Lefever在1926年提出(王宝军, 2009),是一种能够同时对点的方向和分布进行分析的一种经典算法,在研究经济空间分异方面应用较多(龙剑等, 2014; 赵璐和赵作权, 2014; 沈体雁等, 2013)。标准差椭圆的重要指标有面积、方向角度、长轴和短轴,如图2所示。标准差椭圆面积能够反映资源分布的空间范围。标准差椭圆分为三级:一级内包含数据的68%,即该区域内68%的目标要素均在椭圆范围内;二级包含95%的数据;三级包含99%的数据。由此可见,标准差椭圆的范围覆盖了大部分的目标要素,可概略地根据标准差椭圆面积的大小来判定资源的主要分布范围。方向角度反映资源分布的主要方向性,椭圆的方向角度是指椭圆长轴以椭圆中心旋转,与正北方向形成的角度,能够定量描述资源的主趋势分布方向。长短轴差异反映资源分布的方向趋势性,长半轴表示的是资源分布的方向,短半轴表示的是资源分布的向心力,短半轴越短,表示数据呈现的向心力越强,反之则表示数据的离散程度越大。长短半轴的值差距越大,表示资源的方向性越显著,反之,表示方向性越不显著。根据椭圆扁率的计算公式可知,扁率能够反映长短半轴的差异性,所以在具体计算中,利用椭圆扁率反映目标要素的方向趋势性。利用标准差椭圆的面积、方向角度、长短轴差异,不仅能够有效判定出种质资源的整体空间分布方位特征,同时,这3项指标也可用于辅助寻找影响种质资源空间分布的关键因素,若某一因素(如温度或降水)具有与对应区域种质资源类似的分布范围、方位角度和方向趋势性,则说明该因素与种质资源具有相似的空间分布特

图2 标准差椭圆三要素示意图

Fig. 2 Diagram of three elements of standard deviation ellipse

征, 与种质资源具有关联的可能性, 可作为影响资源分布的备选因素, 并借助其他回归方法进一步分析两者的关系。

椭圆的长短轴计算和方向角度计算如下:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (1)$$

方向角度计算如下:

$$\tan \theta = \frac{A + B}{C}$$

$$A = \left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right)^2}$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \quad (2)$$

其中 x_i 和 y_i 为要素 i 的坐标, $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ 表示要素的平均中心, n 等于要素总数。 $\tilde{x}_i$ 和 $\tilde{y}_i$ 是 xy 坐标与平均中心的偏差。

3 结果

3.1 全国农作物种质资源冷热点分析

利用优化热点分析工具对全国农作物种质资源进行冷热点分析, 结果如图3: 全国农作物种质资源的分布存在明显的聚集和离散区域, 以及空白区域, 但大部分区域仍属于随机分布区域。明显的聚集区域主要分布在我国的华北平原及部分黄土高原地区。这些农业科技及农业主产区对种质资源收集保存十分重视, 但种质资源多样性并不突出。究其原因, 从历史的角度来看, 华北平原及黄土高原均属于中华民族发祥地之一, 有着悠久的农耕历史, 积累了丰富的农作物种质资源。从自然条件分析, 华北平原具有充分的作物生长的光能和热量资源及水、热、光同季的优越自然条件, 适合多种作物种植, 特别是小麦、玉米、棉花和油料。黄土高原地区地势复杂、生态多样, 并且具有光热条件优越、降水量少、蒸散量大等特点, 因而形成了丰富多彩的杂粮作物种质资源。有学者指出, 山西及其

邻近地区是谷子、黍稷和裸燕麦的富集中心和起源中心(董玉琛和郑殿生, 2006), 是高粱、小豆、绿豆、饭豆、豇豆、普通菜豆以及荞麦的富集中心(刘旭等, 2009)。另外, 这些地区人口密集, 人类的交流与活动大大提升了资源被发现和利用的概率, 使得一些珍稀的地方品种得到有效保存, 丰富了该地区的资源多样性。相反, 一些偏远地区, 少有人类活动, 部分资源可能还未被发现, 甚至有些资源已经灭绝, 所以, 这些地区也是以后进行资源调查和收集的重点区域。离散区域主要分布在青海东部、甘肃中部、四川西部和新疆的西部地区。这些地区的资源相对于其周边地区来说, 分布数量更为稀少, 这些地区被聚合成一个离散的区域。该离散区域恰好处于我国地势的第一阶梯和第二阶梯的交界处, 地势的升高导致光热的减少, 并且人口密度变小, 多方面原因导致这些地区相较于周边地区来说种质资源分布更加离散。大部分区域属于种质资源的随机分布区, 这些地区相较于其邻近区域来说, 其种质资源的分布不具有明显的聚散特征。

3.2 数量与分布重心分析

根据各种植业分区的面积与各区内种质资源的数量, 计算得到每个区内种质资源的分布密度(图3)。根据图3可知, 黄淮海棉麦油烟果区的资源密度最大, 每1,000 km²平均具有89份资源, 说明黄淮海地区种质资源丰富。其次为青藏高原青稞小麦油菜区, 每1,000 km²平均具有5.7份资源。最少的西北绿洲麦棉甜菜葡萄区每1,000 km²平均仅具有3.2份资源。由此可见, 区域之间资源的数量分布差异明显。与全国尺度的冷热点分析结果相比较, 全国的热点主要集中在黄淮海棉麦油烟果区和北部高原小杂粮甜菜区, 但由于北部高原小杂粮甜菜区内的资源分布差异明显, 热点区、冷点区、空白区和随机区均存在, 拉低了该区的资源分布密度。西北绿洲麦棉甜菜葡萄区和青藏高原青稞小麦油菜区由于存在大面积的资源空白区, 导致密度偏低。一些随机分布的区域, 如长江中下游稻棉油桑茶区、川陕盆地稻玉米薯类柑桔桑区、华南双季稻热带作物甘蔗区、云贵高原稻玉米烟草区, 由于空白区域较少, 其资源分布密度相对较高。

种植业分区地理重心与各区内种质资源分布重心如图4所示。从图4可以看出, 有的地区两类重心位置接近, 而有的地区则相距甚远。为了更精确

图3 全国作物种质资源冷热点分析结果图
Fig. 3 The distribution map of cold and hot spots of crop germplasm resources in China

图4 各种业分区作物种质资源密度及重心分布图
Fig. 4 Density distribution of crop germplasm resources and geographical center of gravity in different cropping regionalization in China

地分析其差距, 根据两类重心的坐标信息, 计算获得不同地区两类重心的距离, 如表1所示。距离最大的是北部高原小杂粮甜菜区, 达到346 km; 其次为东北大豆春麦玉米甜菜区, 相距321 km; 青藏高原青稞小麦油菜区和西北绿洲麦棉甜菜葡萄区两类重心距离也偏远, 分别为315 km和270 km。根据地理位置来看, 这4个区域主要集中在图4中的虚线以西地区, 包括了我国的东北地区及西部地区, 说明我国东北地区及西部地区的种质资源分布相对不均匀。分析原因, 东北大豆春玉米甜菜区的北部地区气温相对较低, 所以资源分布重心偏南; 西部地区大部分属于农牧交错地带, 并且海拔过高的以及一些沙漠和戈壁地区也无法发展农业。而图4中的东部地区, 种质资源的分布不仅密集, 而且相对均匀, 南方丘陵双季稻茶柑桔区两重心仅相距29 km。西部即使是两重心差距最小的西北绿洲麦棉甜菜葡萄区也是东部两重心差距最大的长江中下游稻棉油菜区的2倍多。东部相较于西部来说, 人口分

布密集, 耕地资源多, 气候也适宜多种农作物生长, 所以相对来说种质资源的分布较为均匀。

3.3 资源分布的方位分析

利用ArcGIS软件生成每个区域种质资源的一级标准差椭圆, 如图5所示。北部高原小杂粮甜菜区、东北大豆春麦玉米甜菜区和青藏高原青稞小麦油菜区的椭圆偏南, 西北绿洲麦棉甜菜葡萄区的椭圆偏北, 说明这4个地区的资源分布相对不均匀。椭圆偏南的3个地区, 其种质资源大部分分布在区域的南部, 主要因为这3个地区的北部气候条件满足不了大多数农作物的生长; 而西北绿洲麦棉甜菜葡萄区的中南部由于有大片的沙漠地带, 导致种质资源的分布偏向北部。东南部的6个地区的椭圆的分布则不存在明显的偏向性, 这也验证了这几个地区的种质资源分布相对均匀的结论。

各区的椭圆长短轴、扁率和方向角度如表2所示。椭圆扁率反映了资源分布的方向趋势性大小, 方向角度定位了资源的具体方向。根据表2数据可

图5 各种植业分区作物种质资源标准差椭圆
Fig. 5 Standard deviation ellipses of crop germplasm resources in different cropping regionalization in China

表2 各种植业分区标准差椭圆长短轴、扁率及方向角度
Table 2 Axis, oblateness and direction angle of germplasm resources in different cropping regionalization in China

种植业区划名称 Agricultural districts	短轴标准差距离 Standard deviation distance of short axis (m)	长轴标准差距离 Standard deviation distance of long axis (m)	扁率 Oblateness	方向角度 Orientation angles (°)
华南双季稻热带作物甘蔗区 Southern part of China region mainly grows double cropping of rice, tropical crops and sugarcane	221,221	813,953	0.728	85.78
西北绿洲麦棉甜菜葡萄区 Northwest Oasis region mainly grows wheat, cotton, beets, and grapes	359,814	1,179,873	0.695	109.1
青藏高原青稞小麦油菜区 Qinghai-Tibet Plateau region mainly grows barley, wheat and rape	199,418	590,554	0.662	85.76
北部高原小杂粮甜菜区 Northern plateau region mainly grows small grains and beets	225,016	621,073	0.638	53.05
南方丘陵双季稻茶柑桔区 Southern hill region mainly grows double cropping of rice, tea and citrus	230,811	573,503	0.598	64.42
川陕盆地稻玉米甘薯柑桔桑区 Chuanshan basin region mainly grows rice, corn, sweet potato and citrus mulberry	172,228	367,451	0.531	74.92
长江中下游稻棉油桑茶区 Yangtze River region mainly grows rice, cotton, oil, mulberry and tea	193,111	403,958	0.522	73.26
东北大豆春麦玉米甜菜区 Northeast region mainly grows soybeans, spring wheat and beets	209,459	436,072	0.520	16.84
云贵高原稻玉米烟草区 Yunnan-Guizhou Plateau region mainly grows rice, corn and tobacco	208,596	399,255	0.478	79.54
黄淮海棉麦油烟果区 Huang-Huai-Hai region mainly grows cotton, wheat, rape, tobacco and fruit	293,828	427,092	0.312	47.79

知, 华南双季稻热带作物甘蔗区的扁率最大(0.728), 黄淮海棉麦油烟果区的扁率最小(0.312), 说明前者种质资源分布的方向趋势性最强, 后者最弱; 除了西北绿洲麦棉甜菜葡萄区外, 其他分区的方位角度均小于90°。种质资源的椭圆扁率和方向角度的大小不仅受到种质资源分布的影响, 同时也受到各区的形状轮廓和所处方位的影响, 两者的影响作用大小取决于种质资源分布的均匀程度: 种质资源分布密度相对均匀的地区(如东南部的6个地区), 受区域形状和地理方位的影响较大; 而西北部种质资源分布密度不均的4个地区, 主要受到区域内种质资源分布的影响, 区域形状和地理方位的影响相对较小。椭圆扁率和方向角度结合考虑能够更好地分析资源的方向分布特性, 如长江中下游稻棉油桑茶区的椭圆扁率为0.522, 方向角度为73.26°, 相比全国其他区域, 该区种质资源的分布方向趋势性属于中下等水平, 资源的分布方向呈北偏东73.26°。若某一因素与资源分布的方向趋势性和方向角度相似, 说明

该因素与种质资源分布具有一定的空间相关性, 可将其作为影响种质资源分布的备选因素考虑。

4 讨论

本研究方法与注重数理统计方法的资源分布分析相比, 充分利用了空间统计学的理论和方法, 从资源的冷热点、数量、方位等方面分析了不同种植业分区内农作物种质资源的空间分布特点, 从更深层次挖掘了种质资源的地理分布特征, 直观地表达出不同区域间种质资源分布的差异性和区域内部的关联性。

根据前人研究, 黄淮冬麦区和西南冬麦区为我国小麦遗传多样性中心(郝晨阳等, 2008), 河南、海南、湖北、湖南和云南为我国栽培稻地方品种等位基因最丰富的地区(魏兴华, 2002), 来自黄土高原(山西和陕西)和西南地区(云南、四川、广西和鄂西)的玉米地方品种多样性指数较高(Li et al, 2002)。可以看出, 水稻、小麦、玉米三大粮食作物种质资源

的遗传多样性中心主要集中在黄淮海区、西南地区和黄土高原区。而根据本文分析结果,我国农作物种质资源分布整体上呈现东南多西北少的特点,最集中的地区为黄淮海区和黄土高原区,主要以小麦、杂粮类作物为主,其次为长江中下游地区。西南地区的种质资源的分布密度在全国范围看属于中等水平,与该区域突出的遗传多样性相比较还具有一定的差距。综合资源数量与遗传多样性地理位置的比较分析,应重点保护遗传多样性丰富且资源数量多的黄淮海区、黄土高原区;对于西南地区,不仅需要重点保护,还须加大资源调查收集力度,近年来农业部开展的云南和贵州的农业生物资源的专项调查项目也印证了这一点。

西南地区地形、地貌、气候条件十分复杂,具有明显的立体农业特征,因而成为国内农业生物多样性最为丰富的地区之一。而另一方面,该地区相对于黄淮海、长江中下游平原地区来说,不论是社会经济发展还是农业发达程度均比较落后,地势复杂的原因也使得人类活动减少,这些原因均导致了该地区的种质资源被保护和收集的机率大大降低。由此可见,西南地区仍具有很大的资源收集潜力。

参考文献

- Cao YS, Fang W (2010) Establishment and application of national crop germplasm resources infrastructure in China. *Biodiversity Science*, 18, 454–460. (in Chinese with English abstract) [曹永生, 方涛 (2010) 国家农作物种质资源平台的建立和应用. *生物多样性*, 18, 454–460.]
- Cao YS, Zhang XZ, Bai JJ, Gong GF (1997) Distribution on the main crop germplasm resources in China. *Acta Geographica Sinica*, 52, 10–17. (in Chinese with English abstract) [曹永生, 张贤珍, 白建军, 龚高法 (1997) 中国主要农作物种质资源地理分布. *地理学报*, 52, 10–17.]
- Cao YS, Zhang XZ, Bai JJ, Gong GF (1999) Distribution on the wild germplasm resources of main food crops in China. *Acta Agronomica Sinica*, 25, 424–432. (in Chinese with English abstract) [曹永生, 张贤珍, 白建军, 龚高法 (1999) 中国主要粮食作物野生种质资源地理分布. *作物学报*, 25, 424–432.]
- Chen CX (2015) Spatial Statistical Analysis and Comprehensive Evaluation System for the Development of High-Tech Industry. PhD dissertation, Ji'nan University, Guangzhou. (in Chinese with English abstract) [陈楚祥 (2015) 高新技术产业发展空间统计分析与综合评价系统研制. 博士学位论文, 暨南大学, 广州.]
- Chinese Agricultural Encyclopedia Editorial Committee, The Agricultural Economy Editorial Committee, Chinese Agricultural Encyclopedia Editorial Office (1991) *Chinese Agricultural Encyclopedia: The Agricultural Economic Volume*. Agricultural Publishing House, Beijing. [中国农业百科全书总编辑委员会, 农业经济卷编辑委员会, 中国农业百科全书编辑部 (1991) 中国农业百科全书·农业经济卷. 农业出版社, 北京.]
- Dong YC, Zheng DS (2006) *Crop and Their Wild Relatives in China—Food Crops*. China Agricultural Publishing House, Beijing. [董玉琛, 郑殿生 (2006) 中国作物及其野生近缘植物——粮食作物卷. 中国农业出版社, 北京.]
- Du XM, Zhou ZL, Jia YH, Liu GQ (2007) Collection and conservation of cotton germplasm in China. *Cotton Science*, 19, 346–353. (in Chinese with English abstract) [杜雄明, 周忠丽, 贾银华, 刘国强 (2007) 中国棉花种质资源的收集与保存. *棉花学报*, 19, 346–353.]
- Elith J, Graham HC, Anderson PR, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Peterson AT, Phillips SJ, Richardson K, Pereira RS, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Hao CY, Dong YC, Wang LF, You GX, Zhang HN, Gai HM, Jia JZ, Zhang XY (2008) Construction of core germplasm and genetic diversity analysis of common wheat in China. *Chinese Science Bulletin*, 53, 908–915. (in Chinese) [郝晨阳, 董玉琛, 王兰芬, 游光霞, 张洪娜, 盖红梅, 贾继增, 张学勇 (2008) 我国普通小麦核心种质的构建及遗传多样性分析. *科学通报*, 53, 908–915.]
- Hu QF, Zhang ZP, He R, Zhu SW (2007) Study on spatial statistical analysis of regional economic growth rate based on Geoda 095i. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 30(2), 53–55. (in Chinese with English abstract) [胡青峰, 张子平, 何荣, 朱遂旺 (2007) 基于Geoda 095i区域经济增长率的空间统计分析研究. *测绘与空间地理信息*, 30(2), 53–55.]
- Li Y, Li YH, Yang QW, Zhang JP, Zhang JM, Qiu LJ, Wang TY (2015) Genomics-based crop germplasm research: advances and perspectives. *Scientia Agricultura Sinica*, 48, 3333–3353. (in Chinese with English abstract) [黎裕, 李英慧, 杨庆文, 张锦鹏, 张金梅, 邱丽娟, 王天宇 (2015) 基于基因组学的作物种质资源研究: 现状与展望. *中国农业科学*, 48, 3333–3353.]
- Li Y, Shi YS, Cao YS, Wang TY (2002) A phenotypic diversity analysis of maize germplasm preserved in China. *Maydica*, 47(2), 107–114.
- Liu J, Chen YT, Sun ZX, Jiang JM, He GP, Rao LB, Wu TL (2008) Spatial genetic structure of *Toona ciliata* var. *pubescens* populations in terms of spatial autocorrelation analysis. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(6), 45–52. (in Chinese with English abstract) [刘军, 陈益泰, 孙宗修, 姜景民, 何贵平, 饶龙兵, 吴天林 (2008) 基于空间自相关分析研究毛红椿天然居群的空间遗传结构. *林业科学*, 44(6), 45–52.]
- Liu X, Li Y, Cao YS, Dong YC, Fang W, Lu P (2009) Geographic distribution and germplasm-rich region of cereals in China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 10, 1–8. (in Chinese with English abstract) [刘旭, 黎裕, 曹永生, 董玉琛, 方涛, 陆平 (2009) 中国禾谷类作物种质资源地理分布及其富集中心研究. *植物遗传资源学报*, 10, 1–8.]
- Liu YY, Liu CS, Zeng BF, Fan BD, Li PS, Xu DH, Liu TH

- (2013) Research progress on germplasm resources of *Glycyrrhiza Radix et Rhizome*. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 44, 3593–3598. (in Chinese with English abstract) [刘洋洋, 刘春生, 曾斌芳, 范冰冰, 李朋收, 徐敬海, 刘铜华 (2013) 甘草种质资源研究进展. 中草药, 44, 3593–3598.]
- Long J, Zhu HN, Cao BY (2014) Spatial variance analysis for economic density of Guizhou Province based on the standard deviation ellipse model. Hubei Economic Management, 13, 114–117. (in Chinese) [龙剑, 朱海宁, 曹邦宇 (2014) 基于标准差椭圆模型的贵州省经济密度空间差异分析. 湖北经济管理, 13, 114–117.]
- Lu GY, Wu XM, Xu K, Chen BY, Gao GZ (2009) Spatial autocorrelation analysis of European wild *Brassica oleracea* germplasm. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 31, 440–444. (in Chinese with English abstract) [陆光远, 伍晓明, 许鲲, 陈碧云, 高桂珍 (2009) 欧洲原始野生甘蓝资源的时空自相关性分析. 中国油料作物学报, 31, 440–444.]
- McPherson JM, Jetz W (2007) Effects of species' ecology on the accuracy of distribution models. Ecography, 30, 135–151.
- Qi CH, Jin ZX, Li JM (2011) Small-scale spatial patterns of genetic structure in *Castanopsis eyrei* populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 31, 5130–5137. (in Chinese with English abstract) [祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (2011) 浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析. 生态学报, 31, 5130–5137.]
- Ren JQ, Dong LY, Wang JK, Li SY (2010) Study on spatial variability of intra-county economies in Liaoning Province based on spatial statistical analysis. Economic Geography, 30, 1435–1439. (in Chinese with English abstract) [任家强, 董琳瑛, 汪景宽, 李双异 (2010) 基于空间统计分析的辽宁省县域经济空间差异研究. 经济地理, 30, 1435–1439.]
- Ren M, Wang ZD, Mu JM, Liu YH, Zhang XW (2009) Overview of species and distribution of tobacco germplasm resources in China. Chinese Tobacco Science, 30(Suppl.), 8–14. (in Chinese with English abstract) [任民, 王志德, 牟建民, 刘艳华, 张兴伟 (2009) 我国烟草种质资源的种类与分布概况. 中国烟草科学, 30(Suppl.), 8–14.]
- Shen TY, Zhang XH, Zhao ZQ, Zhao L (2013) Spatial characteristics of employment density in China. Geography and Geo-information Science, 29(1), 64–68, 1. (in Chinese with English abstract) [沈体雁, 张晓欢, 赵作权, 赵璐 (2013) 我国就业密度分布的空间特征. 地理与地理信息科学, 29(1), 64–68, 1.]
- Si HP, Fang W, Tang P, Cao YS (2010) Research of crop germplasm resources investigation information system based on SOA. Journal of Plant Genetic Resources, 11, 517–521. (in Chinese with English abstract) [司海平, 方涛, 唐鹏, 曹永生 (2010) 基于SOA的农作物种质资源调查信息系统研究. 植物遗传资源学报, 11, 517–521.]
- Tang FY, Li SC, Chen YY, Li ZZ (2009) The spatial autocorrelation study for genetic structure in an *Isoetes Sinensis* population in Anhui. Journal of Jiangxi Normal University (Nature Science Edition), 33, 445–451. (in Chinese with English abstract) [汤飞燕, 李守淳, 陈媛媛, 李作洲 (2009) 极濒危植物中华水韭安徽居群遗传结构的时空自相关分析. 江西师范大学学报(自然科学版), 33, 445–451.]
- Wang BJ (2009) Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 31, 1082–1087. (in Chinese with English abstract) [王宝军 (2009) 基于标准差椭圆法SEM图像颗粒定向研究原理与方法. 岩土工程学报, 31, 1082–1087.]
- Wang SM (2002) The protection and utilization of Chinese crop germplasm resources. China Seed Industry, (10), 8–11. (in Chinese) [王述民 (2002) 中国农作物种质资源保护与利用现状. 中国种业, (10), 8–11.]
- Wang SM, Zhang ZW (2011) The state of the world's plant genetic resources for food and agriculture. Journal of Plant Genetic Resources, 12, 325–338. (in Chinese with English abstract) [王述民, 张宗文 (2011) 世界粮食和农业植物遗传资源保护与利用现状. 植物遗传资源学报, 12, 325–338.]
- Wei XH (2002) Studies on the geographical distribution of allozymic alleles of Chinese rice landraces (*Oryza sativa* L.) and the protecting of rice genetic diversity. PhD dissertation, Zhejiang University, Hangzhou. (in Chinese with English abstract) [魏兴华 (2002) 中国栽培稻地方种资源等位基因地理分布及遗传多样性保护研究. 浙江大学博士学位论文, 杭州.]
- Wu YQ, Zheng L, Rong TZ (2013) Genetic diversity analysis and germplasm resource distribution of white maize landraces in southwestern China. Acta Prataculturae Sinica, 22(4), 160–169. (in Chinese with English abstract) [吴元奇, 郑灵, 荣廷昭 (2013) 西南地区白玉米地方种质资源分布及遗传多样性. 草业学报, 22(4), 160–169.]
- Yang QC, Kang JM, Zhang TJ, Liu FQ, Long RC, Sun Y (2016) Distribution, breeding and utilization of alfalfa germplasm resources. Chinese Science Bulletin, 61, 261–270. (in Chinese with English abstract) [杨青川, 康俊梅, 张铁军, 刘凤歧, 龙瑞才, 孙彦 (2016) 苜蓿种质资源的分布、育种与利用. 科学通报, 61, 261–270.]
- Yang ZY, Su Y, Cao YS, Zou J, Liu XL, Kui LM, Lu YX (2008) Studies on geographical distribution of rice germplasm diversity in Yunnan Province. Journal of Plant Genetic Resources, 9, 475–479. (in Chinese with English abstract) [杨忠义, 苏艳, 曹永生, 邹菊, 刘晓利, 奎丽梅, 卢义宣 (2008) 云南稻种资源多样性的生态地理分布研究. 植物遗传资源学报, 9, 475–479.]
- Yang ZY, Su Y, Liu YF, Lu YX, Liu XL, Kui LM, Chen XY, Cao YS (2010) Characteristics and geographical distribution of Yunnan crops resources XIII. Study on distribution diversity of rice germplasm in disease resistance. Journal of Plant Genetic Resources, 11, 611–615. (in Chinese with English abstract) [杨忠义, 苏艳, 刘义富, 卢义宣, 刘晓利, 奎丽梅, 陈晓艳, 曹永生 (2010) 云南作物资源特征特性及生态地理分布研究XIII. 稻抗病性资源的多样性分布研究. 植物遗传资源学报, 11, 611–615.]
- Zhao L, Zhao ZQ (2014) Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China. Scientia Geographica Sinica, 34, 979–986. (in Chinese with English abstract) [赵璐, 赵作权 (2014) 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究. 地理科学, 34, 979–986.]

(责任编辑: 龙春林 责任编辑: 时意专)