

地理空间分布整体统计研究进展

赵作权

(中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080)

摘 要:利用统计学方法研究社会经济与自然等要素的地理空间分布在最近几十年来已引起许多学者的关注。地理空间分布的整体性就像它的局部性一样,是空间统计分析的主要对象。本文目的是综述各种地理空间分布整体性特征的统计研究进展。在这里,地理空间分布的整体性特征是指它在二维空间上的中心和方位以及它自身的地理范围、空间密集度和形状。文中介绍了对这些整体性特征进行统计描述、预测和估计的方法。已有近 20 个空间统计指标用于描述社会经济和自然地理空间分布的各种整体性特征,分析和预测它们的时空演化过程,如空间移动、扩张、加密、旋转,并确定不同空间分布的相关关系。文中探讨了地理空间分布整体统计目前存在的主要科学问题,如空间独立性假设、空间随机抽样、时空过程分析(包括时空稳态随机过程)、空间统计描述方法和空间分布函数等。

关 键 词:空间分布;空间统计;空间分析;地理范围;空间密集度

1 引言

对社会、经济和自然等要素的地理空间分布进行有效的统计分析是包括地理学家在内的许多学科学者关注的研究领域。经济学家一直在寻找能够度量经济体、产业或城市在地理空间上分布集中和聚集程度的方法^[1,2];生态学家试图利用统计方法描述生态系统地理分布多方面特征^[3];地理学家一直在探索地理空间分布的统计规律^[4];统计学家更加关注有关空间分布统计的基本问题、理论和方法^[5]。据美国统计学会杂志近期发表的 1 篇论文,有关空间随机性的检验方法已有 100 多种,涉及近 20 个学科领域^[6]。

地理空间分布统计分析侧重空间分布的两方面特征:一是属性方面的空间局部性、差异性或依赖性^[7-9],一是二维空间上的整体性特征^[10-12]。目前有关空间分布局部性特征统计研究的综述分析已有许多^[9,13-15],而有关空间分布整体性特征统计研究的综述只有 2 篇,分别于 1937 年、1981 年在英文杂志“Geographical Review”和系列出版物“Concepts and Techniques in Modern Geography”上发表^[16,17]。在最近这 20 多年里,空间分布整体统计出现了许多新的进展,如空间分布的推理分析以及地理空间分布

密集度的计算分析,但还没有对这些进展进行比较全面系统的综述分析。中文文献中有关地理空间分布整体统计方法的介绍往往局限于少数几个空间统计指标^[18-20],而有关这种方法的应用研究大多局限于重心方法^[20-22],还没有考虑地球曲率和地理尺度对重心计算精度的影响。本文的目的是综述各种地理空间分布(如社会、经济和自然)整体性特征的统计研究现状。在这里,地理空间分布的整体性特征是指它在二维空间上的中心和方位以及它自身的地理范围、空间密集度和形状。文中介绍了对这些整体性特征进行统计描述、预测和估计的方法和应用情况;还探讨了当前地理空间分布整体统计研究中存在的问题,如空间随机抽样、时空过程分析(包括时空稳态随机过程)、空间统计描述方法和空间分布函数。

地理空间分布整体统计作为一个相对独立的研究领域,具有悠久的历史 and 巨大的发展潜力。早在地理学计量革命发生以前,美国学者 Hilgard、Lefever 和 Furfey 分别在 1872 年、1926 年和 1927 年探讨了如何测度美国人口地理分布的各种整体性特征,如空间中心、离散性和密集度^[23-25]。美国国家统计局(US Census)局长 Walker 在 1874 年率先认可空间中心方法,并在美国统计年鉴第 1 卷正式发

收稿日期:2008-08;修订日期:2008-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(70673099);中国科学院科技政策与管理科学研究所所长基金项目(0700841J01);国家科技基础性工作专项课题(2007FY140800-4)。

作者简介:赵作权(1962-),男,博士,研究员。研究领域为空间统计、空间经济和聚集创新。E-mail: zhao1@casipm.ac.cn

布了美国 1790–1870 年的人口中心^[26]。前苏联、德国、法国、意大利、加拿大和日本等国学者使用有关方法确定各种社会经济要素和自然要素 (如自然资源和国土空间)的地理中心性特征^[16]。前苏联 Sviatlovsky 在 20 世纪 30 年代组建了以门捷列夫名字命名的专门的实验室,领导实验室研究人员确定了前苏联社会、经济和产业的空间中心。值得一提的是,美国学者 Warntz 为地理空间整体统计的发展做出了重大贡献。他和他的学生 Neft 系统探讨了如何更好地利用统计学方法描述空间分布的各种整体性特征^[10, 27],出版了到目前为止最为全面深入的有关空间分布统计的书籍^[10]。Warntz 曾任哈佛大学计算机图形学与空间分析实验室主任 (1968–1971 年),美国现任国家地理信息与分析中心 (NCGIA) 主任 Goodchild、国家空间整合社会科学中心(CSISS)主任 Janelle 以及世界主要地理信息系统软件公司 ESRI 创始人 Dangermond 都曾在 Warntz 领导下工作^[28]。目前,空间分布整体统计的影响在日益加强。美国国家统计局至今每隔 10 年就报告 1 次美国不断西移的人口中心^[29]并记载在美国统计年鉴。空间分布整体统计方法已成为地理信息系统软件 ArcGIS9.2 和许多统计软件如 MATLAB2008 的常规空间统计工具,会随着 ArcGIS 和有关的统计软件的推广普及得到更大的发展。本综述包括五个部分,其中第二部分系统介绍空间分布整体统计方法;第三部分综述近半个世纪(1960–2007 年)以来空间分布整体统计方法用于社会、经济和自然地理空间分布的进展情况;第四部分剖析空间分布整体统计领域存在的问题;最后做了简要总结。

2 地理空间分布整体统计方法

空间分布整体统计描述二维空间变量—地理

空间分布如下五个方面的特征,即中心性、离散性、密集度、方位和形状。这五个特征对一个空间分布来讲是相互独立的,这一点在标准离差椭圆方法提出和发展的过程中充分展现出来^[24–26,30]。其中中心性和方位反映空间分布与空间参照系的相互(位置)关系,而离散性、密集度和形状反映空间分布自身的特征。空间中心是指一个空间分布整体在二维空间(平面或球面)的相对位置,通常用一对坐标值表达;空间范围是指一个空间分布围绕其中心在二维空间(平面或球面)上展布的规模大小;空间密集度是指一个空间分布在二维空间上展布的密集程度;方位是指一个空间分布在二维空间上展布的主趋势方向;形状被数学家 Kendall 定义为一个空间分布在二维空间上展布而不受平移、旋转和扩张 (或收缩)转型影响的特征^[31]。这五个特征相当于五个不同的二维尺度,可以将一个二维的空间分布转换成五个一维的但具有二维空间特性的可计量的维度,从而对待一个空间分布就像对待五个非空间变量一样进行相对独立的统计分析^[32]。例如这五类指标为理解和描述空间动态过程及时空随机过程提供了新的参考标准。

针对地理空间分布(主要是点状)的各种整体性特征,学者们提出了许多统计描述方法(表 1)。其中用于计算空间中心的有 5 种,用于计算空间范围(或离散性)的有 6 种,用于计算空间密集度的有 3 种,用于计算空间方位的有 2 种,而用于计算二维形状的有 2 种。其中部分方法在 Burt & Barber 编辑的《地理学者基本统计学》^[12]和 Hammond & McCullagh 编辑的《地理学定量技术》^[11]中介绍过。

2.1 空间中心

与经典统计指标平均值、中值和众数相对应,空间中心包括空间分布的平均中心 (Mean center)、中值中心(Median center) 和众数中心(Modal center,

表 1 空间分布整体统计描述指标

Tab. 1 Descriptive global statistics of spatial distribution

空间变量	描述性统计指标 (作者和时间)
空间中心	平均中心 (Hilgard 1872); 中值中心 (Neft 1966); 众值中心 (Warntz & Neft 1960); 球面平均中心(US Census 2001); 球面重心(Aboufagel & Austin 2006)
空间范围	标准离差椭圆 (Lefever 1926; Furfey 1927); 标准距离离差 (Stewart & Warntz 1958); 平均距离离差 (Warntz & Neft 1960); 标准距离 (Bachi 1962); 平均半径 (Jones 1980); 球面平均距离 (Zhao 2004)
空间密集度	密度指标 (Bachi 1962); 分布密度指标 (Gong 2002); 球面空间密集度指数 (Zhao 2004)
方位	标准离差椭圆长轴 (Lefever 1926; Furfey 1927; Gong 2002); 分布轴线(郭仁忠 2001)
形状	标准离差椭圆长短轴之比 (Jones 1980; Gong 2002); 叠合指数 (Zhao & Stough 2005)

表 1)^[10,23,27,33]。这三个空间中心分别描述一个空间分布在二维空间上的平均位置、中值位置和众值位置。平均中心分为算术、几何和调和三种^[10,27],其中算术平均中心有时也叫重心 (centroids or the center of gravity)。中值中心有两方面含义:一个空间分布均分为四个部分的一对正交数轴“中点”或者是一个到一个空间分布所有的点的距离最短的点^[10,33]。美国国家统计局提出了考虑球面曲率效应的平均中心计算方法^[29]。

2.2 空间范围

描述空间范围主要有六个不同的指标,即标准离差椭圆^[24,25]、标准距离离差^[34]、标准距离^[35]、平均半径^[26]、球面平均距离^[36,37]和平均距离离差^[27](表 1)。其中前五个指标是相对空间分布的平均中心或重心而言的,而最后一个指标以中值中心为参照点;标准距离是标准离差在二维空间的表现形式,是基于标准离差椭圆发展起来的;球面平均距离是以球面坐标系和大圆距离为基础的,而其它五个指标仅局限于平面空间。此外,有人探讨了空间分布离散性的一般化指标^[27]。

2.3 空间密集度

空间密集度主要有三个指标,即分布密度指标 (Distributional density indicator)^[30]、Bachi 密度指标^[35]和球面空间密集度指数(Spatial intensity index, 参见表 1)^[36,37]。Gong 提出了基于所有点的距离的分布密度指标并用该指标评估点状物体的分布密度,在这里距离不是以空间中心为参照点的,而是指所有点之间的距离^[30]。

2.4 方位

描述空间分布方位的方法有两种:一是标准离差椭圆的长轴^[24,25,30],二是分布轴线^[19]。

2.5 形状

测度空间分布形状的方法有两种:一是基于几何叠合的度量各种面状空间分布形状相似程度的指数^[38],二是标准离差椭圆的长短轴之比^[26,30]。前者用标准几何形状(如三角形)测度离散的或不规则的面状物体的空间分布的形状,后者描述一个空间分布接近于圆的程度。

3 地理空间分布整体统计方法应用

在相当多的学者使用空间分布整体统计方法描述各种地理空间分布(主要是点状)的整体性特征

的同时,一些学者探讨了如何估计、预测空间分布整体性特征的变化,分析两个或多个空间分布在整体性特征方面的相关性(表 2,3)。

3.1 自然要素地理空间分布及其动态过程

平均中心(或重心)的方法被用来描述全球大陆以及美国(全部国土和大陆)、中国、英国、澳大利亚、日本、巴西、印度等国家国土空间的地理中心(或重心)^[10,20,29,39]。平均中心(或重心)方法还用于确定中国多种生态区空间重心移动路径以及长春市城市用地空间格局重心的演化趋势^[40,41]。另外,标准距离方法被用来确定美国、法国、意大利、瑞典和以色列等国国土空间的地理离散性^[35]。

3.2 社会经济地理空间分布

平均中心、中值中心和众数中心方法用于确定美国、中国、英国、澳大利亚、日本、巴西、印度等国人口分布的空间中心^[10]。中值中心方法还用来确定全球人口、财富与对外贸易的地理中心以及美国不同类型城市的空间中心^[39,42]。平均距离离差方法被用来分析美国不同类型城市的空间离散范围,显示交通枢纽型城市体系最离散,制造业型城市体系最聚集^[42]。

3.3 社会经济地理空间分布的动态过程

3.3.1 空间移动 平均中心方法用于确定美国、加拿大和中国若干城市人口或居民空间重心的移动过程^[43-46]。该方法还广泛用于确定中国几十年来社会经济空间分布重心的演化轨迹^[20-22,47-53]。球面平均中心方法被用于揭示美国大陆经济在 1969~2000 年间向西偏南不断移动的过程^[36,37]。

3.3.2 空间扩张/收缩 标准离差椭圆方法用于揭示美国和中国几个城市人口或就业空间格局的变化^[44,46,54];标准距离离差方法既用于确定美国大陆人口在 1960 年以前的一个世纪左右的空间扩张的过程^[10,35,55],又用于确定美国若干城市人口、就业、旅行和贫困空间格局的演化过程^[26,54,56,57];平均距离离差方法被用来确定美国大陆人口 1754-1960 年间的地理扩张过程^[10];标准距离方法一方面用于确定美国大陆人口 1870-1960 年间空间扩张的过程^[35,55],另一方面应用于揭示美国底特律市和英国 Belfast 市居民和产业在半个多世纪里的空间扩张或收缩过程^[43,58],及从美国圣路易斯到其他 27 个大城市在 1960-1965 年间空中旅客交通的空间变化情况^[59];平均半径方法用于确定美国亚特兰大市在 1940-1975 年间人口的空间扩张过程^[26];球面平均距离方

法用于揭示美国大陆经济 1969–2000 年间空间扩张的过程^[36,37]。

3.3.3 空间加密过程 Bachi 密度指标用于确定美国大陆人口在 1870–1950 年间处于空间加密的过程^[35]。球面空间密集度指数被用来揭示美国大陆经济在 1969–2000 年间既地理扩张又空间加密的过程,表明美国大陆经济的总量增长快于它的空间扩张^[36,37]。

3.3.4 空间旋转 标准离差椭圆方法被用于揭示一个美国城市在 1920 年和 1970 年人口和就业两个空间分布方位的变化^[54]。

3.4 社会经济地理空间分布的趋势预测、相关性分析和统计抽样

截至目前,有关社会经济地理空间分布的预测、相关性和统计抽样研究各有 1–2 例。平均中心和标准距离法用于预测美国洛杉矶市某地区待租房屋空间格局的重心和地理范围^[60]。标准离差椭圆用于预测美国大陆人口在 2015 年、2035 年和 2060 年的空间分布,表明美国人口整体持续向西偏南移动,呈现持续扩张和顺时针旋转趋势^[61]。平均中心、球面平均距离和球面空间密集度指数用于确定美国在 1969–2000 年间就业人员空间分布与收入空间分布的相关性^[36,37]。空间抽样和平均中心方法用于估计美国地理学家学会会员空间分布的重心^[10]。

3.5 地理空间分布整体统计方法应用评述

综上所述,空间分布整体统计研究主要有以下四方面特点。第一,在上个世纪中叶以前地理空间分布整体统计主要是把空间分布作为双变量(地理坐标对)的描述性统计方法^[17],从上个世纪中叶开始空间分布整体统计转变为描述性与推理性并重、将空间分布分解为五个空间整体性特征的统计方法。

这一发展趋势可以通过比较表 1 和表 2 体现出来。这个缓慢的转变过程既与多数空间数据是全样本数据有关,也与缺乏合适的空间抽样方法有关。第二,空间分布整体统计主要关注各种空间分布的空间中心和地理范围,而对空间分布另外三个特征关注比较少(表 3)。这一点显然受经典统计学侧重均值和方差传统的影响,另一方面与这三个特征缺少和时空过程的有机联系有关。例如,空间密集度指标还没有很好地与各种地理尺度社会经济的聚集过程建立密切的联系。第三,空间分布整体统计关注社会经济现象多于自然现象(表 3)。这是因为社会经济现象往往是“点分布”,符合空间分布整体统计要求,而自然现象往往是线、面状分布,需要转换成“点分布”数据。另一个原因可能与社会经济现象变化快,而地表自然现象变化缓慢有关。第四,我国学者对空间分布统计的关注与研究比英美等国晚 20 多年,而且大多数研究局限于空间重心这一个指标(表 3)。这一点显然与我国学者对空间分布整体统计主要文献了解较少有关,特别是有关文献分布比较零散、出版时间比较早,不易收集。但是,我国学者非常关注空间分布整体统计,为这一领域提供了大多数最新的研究成果。

表 2 空间分布整体统计分析类型

Tab. 2 Categories of the inferential global statistics of spatial distribution

空间变量	统计检验与分析(作者)
空间中心	估计(Neft 1966); 预测(Huff 1986; Tellier 1995); 回归(Zhao 2004)
空间范围	预测(Huff 1986; Tellier 1995); 回归(Zhao 2004)
空间密集度	回归(Zhao 2004)
方位	预测(Tellier 1995)
形状	预测(Tellier 1995)

表 3 空间分布整体统计描述指标应用

Tab. 3 Applications of the descriptive global statistics of spatial distribution

统计指标	自然空间分布(作者和时间)	社会经济空间分布(作者和时间)
空间中心	全球大陆(Raisz 1944); 国土空间(Neft 1966; US Census 2001; 孟斌等 2005); 其他(Yue, et al. 2005; 匡文慧 2005)	全球社会经济(Raisz 1944); 国家社会经济(Neft 1966; 王劲峰 1992; Tellier 1995; 樊杰等 1996; 李秀彬 1996; 徐建华等 2001; Zhao 2004; 孟斌等 2005; 乔观民等 2005; 乔家君等 2005; 许月卿等 2005; 冯宗宪等 2006; 王欣等 2006); 城市社会经济(Deskins 1972; Wiseman & Wirten 1977; Janelle & Goodchild 1983; 俞路等 2006); 城市体系(Marshall 1989)
空间范围	国土空间(Bachi 1962)	国家社会经济(Bachi 1962, 1974; Neft 1966; Tellier 1995; Zhao 2004); 城市社会经济(Deskins 1972; Bechdolt 1974; Wiseman & Wirten 1977; Jones 1980; Hanson & Hanson 1981; Jones & Manson 1982; Brown 1987; Huff 1986; Greene 1991; 俞路等 2006); 城市体系(Marshall 1989)
空间密集度		国家社会经济(Bachi 1962; Zhao 2004)
方位		国家社会经济(Tellier 1995); 城市社会经济(Jones & Manson 1982)
形状		国家社会经济(Tellier 1995); 城市社会经济(Jones 1980)

4 空间分布整体统计存在的问题

地理空间分布通常是在球面上连续(或不连续)分布的不同地理尺度的实体。这种地理空间分布的(不)连续性、球面曲率效应和尺寸效应使空间分布整体统计的发展和应用面临许多问题。这些问题体现在空间随机抽样、时空(稳态随机)过程和空间分布统计描述等方面。

4.1 空间独立性假设

在 30 多年前地理学家就怀疑统计学的若干假设特别是样本的独立性假设能否适用于空间统计分析^[62-66]。这一怀疑在今天被普遍接受。如 Getis 在评述空间统计学进展时强调空间统计学是关于空间依赖性的统计学科^[13]。空间独立性假设真的不能成立吗?为何学者们一方面分析空间依赖性的普遍性^[5,13,67-70],另一面又检验空间(点)分布随机程度^[71]?最近的研究表明,空间抽样能消除空间依赖性的影响;空间随机抽样可以确定在一个多区系统中不同的(属性)变量具有稳定的相关关系^[5]。Neft 的研究表明,多次空间抽样可以使空间分布诸样本的平均中心的抽样分布呈正态(曲面)分布,而且随着样本的增加,趋近正态分布的速度越快^[10]。可见,问题的关键是区分抽样和观测,在观测中存在的空间依赖性只证明空间结构等非随机性因素的存在,但这并不意味着空间抽样后的样本还存在空间依赖性问题。

4.2 空间分布随机抽样

空间分布随机抽样是地理空间分布整体统计研究中最薄弱的领域。为什么要空间随机抽样?目前空间统计中常用的空间抽样方法主要关注空间分布的局部属性特征,而对空间(包括球面空间)全局整体特征关注很少^[72-74]。只有 Neft 对一个空间分布全部具有位置特征的个体进行空间抽样,进而解析这个空间分布的总体位置即平均中心特征^[10]。空间分布整体统计还需要关注一个空间分布的空间范围、密集度、形状和方位特征,并对这些特征进行评估和预测。其次是实现空间分布随机抽样的方式和方法。例如计算中国和美国国土空间分布这样大尺度球面空间连续体的整体统计特征需要将它转变成样本然后进行随机抽样。可是如何将国土空间分布转变成样本?是不是转变成的样本越多、越精细,就越有可能消除尺寸效应?已有的研究还没有探讨这些问题^[10,20,35,39]。

4.3 时空过程

时空过程或空间动力学综合分析非常薄弱^[75]。Haining 认为空间动力学有四种过程:扩散、交换、相互作用和离散^[76]。空间分布整体统计表明,时空过程有五个方面,它们分别反映空间分布中心、地理范围、空间密集度、方位和形状的变化^[77]。对一个现实的时空过程,它在这五方面可能具有不同的动态特征。因此,认识时空过程的复杂性需要对这五方面动态特征的各种组合进行归纳分类并用于鉴别各种自然、社会和经济的时空过程。

4.4 时空稳态随机过程

空间统计一般将时空随机过程分成两个部分,一是空间部分,一是时间部分,二者可加或者不可加^[78-80]。对空间分布整体统计来讲,它侧重空间分布的五个整体性特征,因此可以对每一个特征进行单独分析,从而建立五个不同的时空稳态随机过程。也就是说,随机空间分布既可以用空间中心表述^[10],也可以用地理范围、空间密集度、方位和形状表述。

4.5 空间分布统计描述

对球面上的空间分布的整体性特征的统计描述是相当困难的^[81]。特别是,统计分析侧重每个个体的非空间上的属性特征,而空间分布整体统计关注的是所有个体组成的空间宏观特征。目前还没有有效的描述球面地理空间分布重心^[17,29,82]、方位和形状的方法。例如有关国土空间重心的研究还没有考虑球面曲率效应和尺寸效应,从而影响了空间分布整体统计分析的准确性^[10,20,35,39]。

4.6 空间(随机)分布函数

许多随机分布都有对应的概率分布函数(曲线),但对二维空间分布建立一维的概率分布函数是十分困难的^[83]。目前所用的与空间分布有关的最近邻居距离分布^[68]、跨样方密度分布^[84]和城市规模位序曲线^[68],都没有反映空间分布的整体性特征。解决这个问题有两方面的途径:一是对待空间分布的每一个整体性特征就像对待一般非空间变量一样,二是用等距离和等面积的同圆心体系将二维空间分布转变成一维曲线^[77,85]。对第一个途径来讲,一个空间分布的五个方面特征可能属于不同的概率分布;对第二个途径来讲,由二维空间(连续的或封闭不规则的)上的空间分布转变的概率分布有可能与一般非空间变量的概率分布不一致。如一个偏右的空间概率分布曲线可能表达的是一个“圆谷式”分布。因此,一些统计学常用的概率分布函数可能不适用于二维的空间分布。

5 结语

空间分布整体统计是研究一般地理空间分布的整体性或全局性特征的统计方法。本文的目的是综述各种地理空间分布整体性特征的统计研究现状。在这里,地理空间分布的整体性特征是指它在二维空间上的中心和方位以及它自身的地理范围、空间密集度和形状。文中介绍了对这些整体性特征进行统计描述、预测和估计的方法和应用情况。文中探讨了地理空间分布整体统计目前存在的主要科学问题,如空间独立性假设、空间随机抽样、时空过程分析(包括时空稳态随机过程)、空间统计描述方法和空间分布函数。

整体性特征同局部性或依赖性特征一样是各种地理空间分布的重要组成部分。空间分布整体统计注重分析空间分布的整体性特征,能够从全局整体的角度揭示空间分布及其动态过程的统计规律。例如,空间分布整体统计利用空间分布重心、地理范围、密集度、方位和形状的变化揭示各种复杂的时空过程。本综述表明,空间分布整体统计已从双变量的描述转变成描述与推理并重的统计领域,成为空间统计的重要前沿领域,为统计方法更直接有效地用于各种地理空间分布提供了一种注重整体全局的途径。在我国,空间分布整体统计研究仅有十几年的历史,但发展潜力很大。我国幅员辽阔的国土空间,姿态万千的社会经济进程,文化深厚的整体综合思维,必为空间分布整体统计的全面发展提供坚实的基础。特别是地理空间分布整体统计的发展面临着地理空间分布(不)连续性、球面曲率效应以及尺寸效应的巨大挑战,值得学术界更大的关注和不懈的努力。

参考文献

- [1] Vining R. Delimitation of economic areas: Statistical conceptions in the study of the spatial structure of an economic system. *Journal of the American Statistical Association*, 1953, 48: 44~64.
- [2] Duranton G, Overman H G. Testing for localization using micro-geographic data. *Review of Economic Studies*, 2005, 72: 1077~1106.
- [3] Wagner H H, Fortin M J. Spatial analysis of landscapes: Concepts and statistics. *Ecology*, 2005, 86: 1975~1987.
- [4] Barnes T J. Lives lived and lives told: Biographies of geography's quantitative revolution. *Environment and Planning D*, 2001, 19(4): 409~429.
- [5] Gotway C A, Linda L J. Combining incompatible spatial data. *Journal of the American Statistical Association*, 2002, 97: 632~648.
- [6] Kulldorff M. Tests of spatial randomness adjusted for an inhomogeneity: A general framework. *Journal of the American Statistical Association*, 2006, 101(475): 1289~1305.
- [7] Anselin L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Norwell, Mass.; London and Dordrecht: Kluwer Academic, 1988.
- [8] Cressie N. *Statistics for Spatial Data*. New York: Wiley, 1993.
- [9] 王劲峰 等著. 空间分析. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] Neft D S. *Statistical Analysis for Areal Distributions*. Philadelphia: Regional Science Research Institute, 1966.
- [11] Hammod R, McCullagh P. *Quantitative Techniques in Geography: An Introduction*. Oxford: Clarendon, 1978.
- [12] Burt J E, Barber G M. *Elementary Statistics for Geographers* (2nd edn.). New York and London: Guilford, 1996, 76~112.
- [13] Getis A. Spatial statistics. In: Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. (eds.). *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues* (2nd edn.). John Wiley & Sons., 1999, 1. 239~251.
- [14] 王劲峰, 李连发, 葛咏 等. 地理信息空间分析的理论体系探讨. *地理学报*, 2000, 55: 92~103.
- [15] 应龙根, 宁越敏. 空间数据: 性质、影响和分析方法. *地球科学进展*, 2005, 20: 49~56.
- [16] Sviatlovsky E E, Eells W C. The centrographical method and regional analysis. *Geographical Review*, 1937, 27: 240~254.
- [17] Kellerman A. Centrographic measures in geography. *CATMOG (Concepts and Techniques in Modern Geography)*, 1981, 32.
- [18] 张超, 杨秉廉. 计量地理学基础. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [19] 郭仁忠. 空间分析. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [20] 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. *地理科学*, 2005, 25: 393~400.
- [21] 王欣, 吴殿廷, 肖敏. 产业发展与中国经济重心迁移. *经济地理*, 2006, 26: 978~981.
- [22] 冯宗宪, 黄建山. 1978~2003 年中国经济重心与产业重心的动态轨迹及其对比研究. *经济地理*, 2006, 26: 978~981.
- [23] Hilgard J E. The advance of population in the United States. *Scribner's Monthly*, 1872, 4: 214.
- [24] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse. *American Journal of Sociology*, 1926, 32: 89~94.
- [25] Furfey P H. A note on Lefever's "standard deviational ellipse". *American Journal of Sociology*, 1927, 33: 94~98.
- [26] Jones B G. Applications of centrographic techniques to the study of urban phenomena: Atlanta, Georgia 1940~1975. *Economic Geography*, 1980, 56 (3): 201~222.
- [27] Warntz W, Neft D. Contributions to a statistical methodology.

- gy for areal distributions. *Journal of Regional Science*, 1960, 2: 47~66.
- [28] Janelle D. In memoriam William Warntz, 1922~1988. *Journal of the American Statistical Association*, 1997, 87: 723~731.
- [29] U.S. Census Bureau. Centers of Population Computation for 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 and 2000. Washington, D.C, 2001.
- [30] Gong J. Clarifying the standard deviational ellipse. *Geographical Analysis*, 2002, 34: 155~167.
- [31] Kendall D G. Shape manifolds, procrustean metrics, and complex projective space. *The London Bulletin of the London Mathematical Society*, 1984, 16: 81~121.
- [32] Stevens S S. On the theory of scales of measurement. *Science*, 1946, 103: 677~680.
- [33] Caprio R J. Centrography and geostatistics. *The Professional Geographer*, 1970, 22: 15~19.
- [34] Stewart J Q, Warntz W. Macrogeography and social science. *Geographical Review*, 1958, 48(2): 167~184.
- [35] Bachi R. Standard distance measures and related methods for spatial analysis. *Papers - Regional Science Association*, 1962, 10: 83~133.
- [36] Zhao Z. The economic growth of a nation: A spatial perspective. Ph.D. Dissertation, George Mason University, 2004.
- [37] Zhao Z. Spatial Distribution and Economic Growth: The U. S. Economy 1969~2000. Germany: VDM Verlag, 2008.
- [38] Zhao Z, Stough R R. Measuring similarity among various shapes based on geometrical matching. *Geographical Analysis*, 2005, 37: 410~422.
- [39] Raisz E. Our lopsided Earth. *Journal of Geography*, 1944, 43: 81~91.
- [40] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960. *Global and Planetary Change*, 2005, 48: 287~302.
- [41] 匡文慧, 张树文, 张养贞 等. 1900 年以来长春市土地利用空间扩张机理分析. *地理学报*, 2005, 60: 841~850.
- [42] Marshall J U. The Structure of Urban Systems. Toronto, Buffalo and London: University of Toronto Press, 1989, 277~297.
- [43] Deskins Jr, D R. Race, residence, and workplace in Detroit, 1880 to 1965. *Economic Geography*, 1972, 48(1): 79~94.
- [44] Wiseman R F, Virden M. Spatial and social dimensions of intraurban elderly migration. *Economic Geography*, 1977, 53: 1~13.
- [45] Janelle D, Goodchild M. Diurnal patterns of social group distributions in a Canadian city. *Economic Geography*, 1983, 59: 403~42.
- [46] 俞路, 张善余. 近年来北京市人口分布变动的空间特征分析. *北京社会科学*, 2006, 1:7~12.
- [47] 樊杰, W. 陶普曼. 中国农村工业化的经济分析及省际发展水平差异. *地理学报*, 1996, 51:398~407.
- [48] 乔家君, 李小建. 近 50 年来中国经济重心移动路径分析, 地域研究与开发, 2005, 24: 12~16.
- [49] 王劲峰. 区域社会—经济空间结构与行为分析的重心方法及实验研究. *甘肃科学学报*, 1992, 4: 1~5.
- [50] 李秀彬. 地区发展均衡性的可视化测度. *地理科学*, 1996, 19: 254~257.
- [51] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心和经济重心的演变及其对比分析. *地理科学*, 2001, 21: 385~389.
- [52] 许月卿, 李双成. 我国人口与社会经济重心的动态演变. *人文地理*, 2005, 20: 117~120.
- [53] 乔观民, 丁金宏, 刘振宇. 1982~2000 年中国人力资本受教育程度空间变化研究. *人文地理*, 2005, 20: 105~109.
- [54] Jones B G, Manson D M. The geography of enterprise zones: A critical analysis. *Economic Geography*, 1982, 58(4): 329~342.
- [55] Bachi R. Geostatistical analysis of internal migrations. *Journal of Regional Science*, 1976, 16: 1~19.
- [56] Hanson S, Hanson P. The travel-activity patterns of urban residents: Dimensions and relationships to sociodemographic characteristics. *Economic Geography*, 1981, 57: 332~347.
- [57] Greene R. Poverty concentration measures and the urban underclass. *Economic Geography*, 1991, 67(3): 240~52.
- [58] Brown S. The complex model of city centre retailing: An historical application. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 1987, 12(1): 4~18.
- [59] Becholdt Jr B V. Vector representation and analysis of areally distributed variables. *Annals of Regional Science*, 1974, 8(3): 99~110.
- [60] Huff J O. Geographic regularities in residential search behavior. *Annals of the Association of American Geographers*, 1986, 76: 208~227.
- [61] Tellier L N. Projecting the evolution of the North American urban system and laying the foundations of a topodynamic theory of spatial polarization. *Environment and Planning A*, 1995, 27(7): 1109~31.
- [62] Gould P R. Is statistic inference the geographical name for a wild goose? *Economic Geography*, 1970, 46: 439~448.
- [63] Gudgin G, Thornes J B. Probability in geographic research: Applications and problems. *The Statistician*, 1974, 23: 157~177.
- [64] Mather P, Openshaw S. Multivariate methods and geographical data. *The Statistician*, 1974, 23: 283~308.
- [65] Taylor P J, Goddard J. Geography and statistics: An introduction. *The Statistician*, 1974, 23: 149~155.
- [66] Tobler W R. Frame independent spatial analysis. In: Goodchild M F, Gopal S (eds). *Accuracy of Spatial Databases*. London, New York and Philadelphia: Taylor & Francis, 1989. 115~122.
- [67] Berry B J L. Problems of data organization and analytical methods in geography. *Journal of the American Statistical Association*, 1971, 66: 510~523.
- [68] Cliff A D, Ord J K. Model building and the analysis of

- spatial pattern in human geography. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1975, 37: 297~348.
- [69] Bennett R J, Haining R P. Spatial structure and spatial interaction: Modeling approaches to the statistical analysis of geographical data. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1985, 148: 1~36.
- [70] King L J. The analysis of spatial forms and its relation to geographic theory. *Annals of the Association of American Geographers*, 1969, 59: 573~595.
- [71] Ripley B D. Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1977, 39: 172~212.
- [72] Holmes J. Problems in location sampling. *Annals of the Association of American Geographers*, 1967, 57: 757~780.
- [73] MacEachren A M. Compactness of geographic shape: Comparison and evaluation of measures. *Geografiska Annaler B*, 1985, 67: 53~67.
- [74] Griffith D A. Effective geographic sample size in the presence of spatial autocorrelation. *Annals of the Association of American Geographers*, 2005, 95: 740~760.
- [75] Harvey D. Between space and time: Reflections on the geographical imagination. *Annals of the Association of American Geographers*, 1990, 80: 418~434.
- [76] Haining R. *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2003.
- [77] Zhao Z. Statistics of spatial distribution: Characterizing global structure in 2-D space. Presented at the Annual North American Meeting, Regional Science Association International, Toronto, Canada, November 16~18, 2006.
- [78] Cressie N, Huang H C. Classes of nonseparable, spatio-temporal stationary covariance functions. *Journal of the American Statistical Association*, 1999, 94: 1330~1340.
- [79] Stein M L. Space-time covariance functions. *Journal of the American Statistical Association*, 2005, 100: 310~321.
- [80] Stroud J, Müller P, Sanso B. Dynamic models for spatio-temporal data. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 2001, 63: 673~689.
- [81] Tobler W. Global spatial analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26: 493~500.
- [82] Aboufagel E, Austin D. A new method for computing the mean center of population of the United States. *The Professional Geographer*, 2006, 58: 65~69.
- [83] Lahiri S N, Kaiser M S, Cressie N, Hsu N-J. Prediction of spatial cumulative distribution functions using subsampling. *Journal of the American Statistical Association*, 1999, 94: 86~97.
- [84] Rogers A. A stochastic analysis of the spatial clustering of retail establishments. *Journal of the American Statistical Association*, 1965, 60: 1094~1103.
- [85] Glass L, Tobler W R. Uniform distribution of objects in a homogeneous field: Cities on a plain. *Nature*, 1971, 233: 67~68.

Global Statistics of Spatial Distribution: A Literature Review

ZHAO Zuoquan

(Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: The past five decades have witnessed increasing interest in the statistical analysis of spatial distribution, whose local and global characteristics are major concerns among geographers, statisticians, and spatial analysts. The purpose of this paper is to present a review of the global statistics of spatial distribution, the methods that describe, estimate, and predict the overall characteristics of spatial distribution as an independent field of research. The global characteristics of a spatial distribution include its center (or centroid), range, intensity, orientation, and shape in 2-D space. About 20 spatial statistical indices are proposed and employed to identify those global characteristics and their changes (or spatiotemporal processes) for a variety of spatial distributions, socioeconomic or natural, and to examine the relationships between different spatial distributions. The fundamental issues of this field that are discussed include spatial independence assumption, spatial random sampling, spatiotemporal process, spatiotemporal stationary stochastic process, spatial descriptive statistics and spatial probabilistic functions.

Key words: statistics of spatial distribution; spatial analysis; spatial statistics; geographical range; spatial intensity