中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

第 37 卷第 4 期 华中师范大学学报(自然科学版) Vol. 37 No. 4
2003 年 12 月 JOURNAL OF CENTRAL CHINA NORMAL UNIVERSITY(Nat. Sci.) Dec. 2003

文章编号：1000-1190(2003)04-0567-05

基于加权 Voronoi 图的城市经济区划分方法探讨

闫卫阳，郭庆胜，李圣权

(武汉大学 资源与环境科学学院，武汉 430079)

摘 要：在分析目前划分城市经济区的方法的基础上，考虑到加权 Voronoi 图几何性质的独特性、在空间分割上的合理性以及计算机自动生成的可行性，试图将其应用于城市体系研究. 通过深入分析城市断裂点理论的性质，并应用加权 Voronoi 图对其扩展，发现了包括传统断裂点在内的城市吸引范围的理论上的准确边界，提出了"断裂弧"的概念. 通过构建两种不同形式的加权 Voronoi 图，提出了确定区域中心城市和划分城市经济区的新方法，并以河南省为例进行了实证分析.

关键词：城市经济区；中心城市；加权 Voronoi 图；断裂点理论

中图分类号：P208；P28 **文献标识码**：A

城市经济区是以大中城市为核心、与其紧密相连的广大地区共同组成的经济上紧密联系、生产上互相协作、在社会地域分工过程中形成的城市地域综合体[1].

目前划分城市经济区常用的方法主要有 Rd 链方法、断裂点方法、场强分析法等. 本文考虑到 Voronoi 图在空间分割和地图制图应用中的广泛性、合理性以及计算机自动生成的可行性，探讨了将扩展后的城市断裂点理论和加权 Voronoi 图相结合确定中心城市并划分城市经济区的新方法，并以河南省为例，提出该省的城市经济区划方案.

1 常规 Voronoi 图和加权 Voronoi 图的定义、性质和应用

Voronoi 图又叫泰森多边形，是计算几何的重要研究内容，在许多领域有着广泛的应用[2,3].

1.1 常规 Voronoi 图

设平面上的一个控制点集 $P=\{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$，其中任意两点都不共位，且任意四点都不共圆. 则任意点 p_i 的 Voronoi 图定义为[1]：

$$T_i=\{x: d(x,p_i)<d(x,p_j)/p_i,p_j\neq p_j\}. \quad (1)$$

在此 d 为欧氏距离.

平面上的 V-图可以看作是点集 P 中的每个点作为生长核，以相同的速率向外扩张，直到彼此相遇为止而在平面上形成的图形. 除最外层的点形成开放的区域外，其余每个点都形成一个凸多边形.

Voronoi 图(图 1a)的一个重要性质就是，位于 Voronoi 格网中的每一个点到该格网控制点(即发生元)的距离都小于到其它格网控制点的距离. 空间剖分是 Voronoi 图的一个重要用途，由于位于 Voronoi 格网中的每一个点到该格网控制点的距离都小于到其它格网控制点的距离，这对于空间划分有着重要的意义，我们可以近似地认为位于 Voronoi 格网中的每一个点都具有与其控制点相同的性质.

1.2 加权 Voronoi 图

Voronoi 图有许多扩展形式和生成方法[5,6]. 加权 Voronoi 图是较常用的一种.

设 $P_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为二维欧氏空间上的 n 个点，$\lambda_i(i=1,2,\cdots,n)$ 是给定的 n 个正实数.

$$V_n(P_i,\lambda_i)=\bigcap_{j\neq i}\left\{P\left|\frac{d(P,P_i)}{\lambda_i}<\frac{d(P,P_j)}{\lambda_j}\right.\right\},$$
$$(i=1,2,\cdots,n). \quad (2)$$

将平面分成 n 部分，由 $V_n(P_i,\lambda_i)$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 确定的对平面的分割称为点上加权的 Voronoi 图，称 λ_i 为 P_i 的权重(见图 1b，图中各点附近的数字表示该点的权重)[1].

当 $\lambda_1=\lambda_2=\cdots=\lambda_n$ 时，(1)式等价于(2)式，即

收稿日期：2003-05-22.
基金项目：国家自然科学基金(49971068)和国家教育部青年骨干教师基金(2000G07)资助项目.
作者简介：闫卫阳(1968—)，男，河南方城人，博士研究生，主要从事地图学与地理信息系统理论及应用研究.

转载

中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

常规 Voronoi 图是点上加权的 Voronoi 在所有权重相等时的特例.

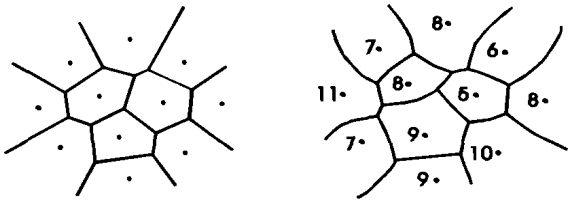

图 1 常规 Voronoi 图和加权 Voronoi 图

加权 Voronoi 图同样适用于空间剖分,位于加权 Voronoi 图格网中的每个点到该格网发生元的距离与该点到相邻格网发生元的距离之比小于两发生元的权重之比.加权 Voronoi 图用于各发生元权重有较明显差别的情况下的空间剖分.我们可以认为,在加权 Voronoi 图所划分出的每个区域内的所有点受该区域发生元的影响最大.这正是我们以此划分以城市为中心的城市经济区的原因所在.

2 基于加权 Voronoi 图的城市断裂点理论的验证和扩展

划分城市经济区的理论依据是空间相互作用理论.该理论指出:城市对周围区域的影响力与城市规模成正比,与至城市的距离成反比.P. D. Converse 进一步将这一理论形式化,提出了断裂点理论,给出了具体的计算方法.该理论将相邻两个城市间的吸引力达到平衡的点定义为断裂点(Breaking Point),并给出计算公式[1]:

$$d_A = D_{AB}/(1 + \sqrt{P_B/P_A}),$$

或

$$d_B = D_{AB}/(1 + \sqrt{P_A/P_B}). \quad (3)$$

其中,d_A、d_B 分别为断裂点到两城的距离,D_{AB} 为两城的直线距离,P_B,P_A 分别为两城的人口.

虽然城市断裂点理论在实际应用中较多,仍存在一些缺陷,需加以改进和扩展.

第一,公式以城市人口表示城市的规模和吸引力,但是城市的吸引力应体现为其综合实力.为此,需选取反映城市综合实力的指标体系予以定量、综合分析和评价.本文用中心强度值代替城市人口.

第二,公式仅计算相邻两个城市的一个断裂点,而两城市间的吸引范围的界限是一条线.因此,在具体界定时就出现了多种方法,具有很大的任意性.如过断裂点作垂线[7],用平滑曲线连接相邻断裂点等[8].应该说,这些方法在理论上是不严密的、不正确的.

为此,我们对断裂点公式进行分析,可以得出以下三个推论(证明略):

推论(1) 两个相邻城市之间的欧氏距离等于断裂点到两个城市欧氏距离的和.用公式表示为:

$$d_A + d_B = D_{AB}. \quad (4)$$

推论(2) 断裂点到相邻两个城市的距离与这两个城市中心性强度值的平方根成正比.用公式表示为:

$$d_A/d_B = \sqrt{P_A/P_B}. \quad (5)$$

推论(3) 在匀质平面区域中,以各个城市点为发生元,其影响力扩张的速度与相邻两个城市的中心性强度值的平方根成正比.用公式表示为:

$$a_1/a_2 = \sqrt{P_A}/\sqrt{P_B}. \quad (6)$$

推论(3)表明,发生元的扩张速度不是每个城市的中心性强度值,而是中心性强度值的平方根.基于这一点,我们可以生成以各个城市的中心性强度值的平方根为权重的加权 Voronoi 图.根据加权 Voronoi 图的性质和几何特征可知,相邻两个城市的吸引范围的界线是一条弧段,而断裂点仅是这条弧段上的一个特殊的点,断裂点自然地扩展为断裂弧.由此,我们可以通过计算机图形生成的方法,构建基于城市点集的加权 Voronoi 图,明确的计算城市的空间影响范围,从而克服了任意性和盲目性.

3 基于扩展断裂点理论和加权 Voronoi 图的城市经济区划分方法

3.1 城市综合实力评价

本文以河南省为例,考虑到县级城镇的综合实力与地级城市相差较大,显然不能承担省域内中心城市的职能,故而排除在外,仅对 17 个地级城市(地级行政中心)作为候选中心城市进行评价.

目前评价城市的指标体系较多,但主要指标大致相同.我们在综合分析的基础上,经过筛选,选取反映城市综合实力的 4 类 16 个指标.即城市社会经济发展水平指标(7 个),包括市区非农业人口(x_1),市区国内生产总值(x_2),市区工业增加值(x_3),市区财政收入(x_4),市区固定资产投资(x_5),市区人均国内各生产总值(x_6),市区职工平均工资(x_7);城市建设水平指标(4 个),包括建成区面积(x_8),人均住宅面积(x_9),人均道路面积(x_{10}),人均绿地面积(x_{11});城市建设条件指标(2 个),包括矿

中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

产，旅游资源条件(x_{12})，交通便捷度(x_{13})；区域发展基础指标(3 个)，包括区域人均国内生产总值(x_{14})，区域农民人均纯收入(x_{15})，区域城市化水平(x_{16})．其中定量指标采用 1999 年河南省统计资料(《河南统计年鉴 2000》)，定性指标(x_{12}、x_{13})由省直有关职能部门专家评分，赋分采用 1、3、5、7 IV 级标准，运用主成份分析方法，对河南省 17 个地级中心城市(地级行政中心)综合实力进行评定．其中主成份按照特征值大于 1，贡献率大于 88%选取．选取的 5 个主成份的累计贡献率是：19.484%、62.187%、72.121%、81.129%、88.241%

计算所得的城市排序和相应的综合得分是：郑州(4.12)、洛阳(2.39)、南阳(0.63)、安阳(0.25)、新乡(0.05)、平顶山(−0.16)、焦作(−0.21)、濮阳(−0.23)、漯河(−0.25)、三门峡(−0.25)、开封(−0.42)、许昌(−0.48)、商丘(−0.58)、信阳(−0.66)、驻马店(−0.99)、鹤壁(−1.23)、周口(−1.98)．

可以看出有些城市的综合得分为负值，如果直接代入公式(3)计算断裂点位置，必然存在负值开方的运算，显然是不可行的．为此，必须对各中心城市的综合得分进行数据变换．

经分析，我们采用 Jiawei Han 和 Micheline Kamber 阐述的最小－最大规范化方法[9]．为了便于计算和对比，并保证变换后的数据全部为正值、保证原数据列数值大小次序特征不变，我们选取在[1,10]闭区间上对各城市的综合得分进行数据变换．计算所得的城市排序结果和相应的中心性强度值是：郑州(10.00)、洛阳(7.44)、南阳(4.85)、安阳(4.29)、新乡(4.00)、平顶山(3.69)、焦作(3.62)、濮阳(3.58)、漯河(3.55)、三门峡(3.55)、开封(3.30)、许昌(3.21)、商丘(3.06)、信阳(2.95)、驻马店(2.46)、鹤壁(2.10)、周口(1.00)．

3.2 区域中心城市的选择

目前，确定中心城市的主要方法是属性数据分析方法，较少考虑城市在空间上的邻近关系．王新生提出了两种基于常规 Voronoi 图的分析城市体系的新方法，试验表明，运用此方法确定河南省的中心城市，结果只能是郑州和安阳两个，与实际情况有很大差距．

为此，本文对此问题进一步深化，探讨基于加权 Voronoi 图确定中心城市的新方法．具体方法步骤：

第一，构建以各候选中心城市的中心性强度值为权重的加权 Voronoi 图．基于矢量数据的加权 Voronoi 图的计算十分复杂．这里我们采用胡鹏等提出的地图代数方法生成[10]．图 2 为河南省 17 个地级城市的加权 Voronoi 图．其意义在于，各城市的综合实力及其辐射范围可以直观的显示出来，便于空间分析．

第二，分析图 2 中每个格网的包含关系．其中被包含在其它城市辐射范围内的城市被排除在外．这样，候选中心城市减为 12 个：郑州(包含新乡、焦作、开封)，洛阳(包含三门峡)，安阳(包含鹤壁)，濮阳，商丘，南阳，信阳，许昌，平顶山，漯河，驻马店，周口．

第三，分析图 3 中每个格网的邻近关系．在空间分布上吸引范围邻近的归并为一个组团．这样可划为 7 个城市组团：①郑州组团(含郑州、新乡、焦作、开封)，②洛阳组团(含洛阳、三门峡)，③南阳组团，④信阳、驻马店组团，⑤商丘组团，⑥安阳、濮阳

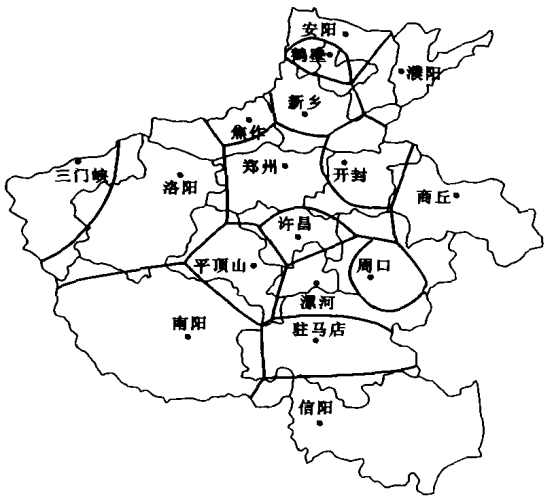

图 2 基于城市中心性强度的加权 Voronoi 图

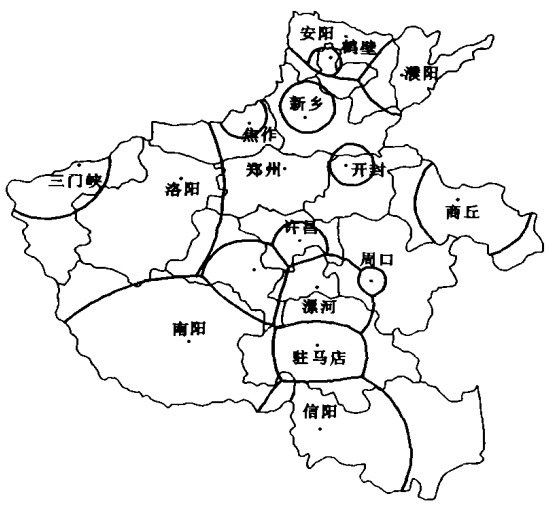

图 3 基于断裂点理论的加权 Voronoi 图

中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

组团(含安阳、濮阳、鹤壁),⑦许昌、平顶山、漯河、周口组团.这也是初步的城市经济区划分方案.

第四,确定每个组团的中心城市.原则上按照中心性强度值最大者作为每个组团的中心城市.这样第①②③①⑤⑥组团的中心城市分别为郑州、洛阳、南阳、信阳、商丘、安阳.对于第⑦组团,平顶山的中心性强度值大于漯河,但是考虑到漯河是河南重点改革试验区,交通条件便利,位置适中.因此,作以调整,将漯河作为该组团的中心城市.

3.3 划分城市经济区

首先,以17个地级城市的中心性强度值得平方根为权重构建加权Voronoi图.按照前面的分析,每个格网应为相应每个城市的空间影响范围(见图3).

其次,按照经济区划的原则,即保持县级行政区划的完整性,区内自然开发条件大致一致等,同时还要考虑城市之间的交通联系、产业结构的互补性及经济协作潜力等多种因素,对初步划定的基于加权Voronoi图的城市经济区进行调整(图4).这样,河南省可划分为7个一级经济区,17个二级经济区.划分结果见图5和表1.

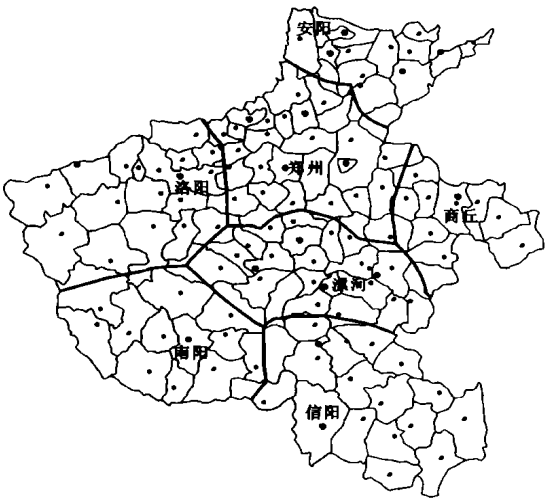

图4 基于加权Voronoi图的城市经济区划分

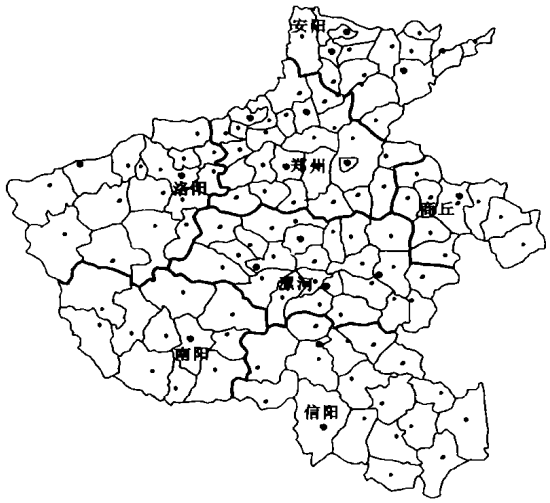

图5 河南省城市经济区划分方案

表1 河南省城市经济区划分方案(按照1999年底行政区划)

I级城市经济区	区域中心城市	II级城市经济区	所含(县、市、区)
中原核心区	郑州	郑州经济区	郑州市所辖6区,6县市,原阳、武陟、尉氏、温县
		开封经济区	开封市所辖5区,兰考、杞县、通许、长垣、封丘
		新乡经济区	新乡市所辖4区,辉县、获嘉、卫辉、延津
		焦作经济区	焦作市所辖4区,修武、博爱、沁阳
豫中南区	漯河	漯河经济区	漯河市所辖1区,3县,西平、上蔡
		许昌经济区	许昌市所辖1区,禹州、长葛、郾陵、扶沟
		平顶山经济区	平顶山市所辖4区,6县市,襄城
		周口经济区	周口,太康、淮阳、西华、商水、单城、沈丘、项城
豫南区	信阳	信阳经济区	信阳所辖2区,8县,桐柏
		驻马店经济区	除遂平、西平以外所辖县市
豫西南区	南阳	南阳经济区	除桐柏以外所辖县市区
豫西区	洛阳	洛阳经济区	洛阳市所辖6区,5县市,济源、义马、渑池、孟县
		三门峡经济区	三门峡市所辖1区,灵宝、卢氏、陕县
豫北区	安阳	安阳经济区	安阳市所辖1区,安阳、林州、汤阴
		濮阳经济区	濮阳市1区,5县市,滑县、长垣
		鹤壁经济区	鹤壁市所辖3区,2县
豫东区	商丘	商丘经济区	商丘市所辖2区,7县,鹿邑

4 讨论

由于加权 Voronoi 图的矢量计算十分复杂,其应用发展受到一定的限制,许多本该应用的领域认识和研究还很不够.本文考虑到加权 Voronoi 图几何性质的独特性、在空间分割上的合理性以及栅格方法生成的可行性,提出了基于扩展断裂点理论和加权 Voronoi 图划分城市经济区的新方法.由于城市经济区划的复杂性,许多问题还有待在实践中进一步探讨.

参考文献:

[1] 许学强,周一星,宁越敏.城市地理学[M].北京:高等教育出版社,1998. 128; 129.

[2] 王新生,郭庆胜,姜友华.一种用于界定经济客体空间影响范围的方法 Voronoi 图[J].地理研究,2000,**19**(3):312~315.

[3] 王新生,李 全,郭庆胜,等. Voronoi 图的扩展、生成及其应用于界定城市空间影响范围[J].华中师范大学学报(自然科学版),2002,**36**(1):107~111.

[4] 张有会.线段加权的 Voronoi 图[J].计算机学报,1995,**18**(11):822~829.

[5] Okabe A, Boots B, Sugihara K. Nearest Neighborhood Operation with Generalized Voronoi Diagram[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1994, **8**: 43~71.

[6] Li C, Chen J, Li Z. A Raster-based Method for Computing Voronoi Diagrams of Spatial Objects Using Dynamic Distance Transformation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, **13**: 209~225.

[7] 郑纯辉.河南省城市经济空间组织研究[D].开封:河南大学硕士论文,1999. 38~45.

[8] 张 伟,顾朝林.城市与区域规划模型系统[M].南京:东南大学出版社,2000. 118.

[9] Jiawei Han, Micheline Kamber. 数据挖掘:概念与技术[M]. 范 明,孟小峰译.北京:机械工业出版社,2001. 76; 77.

[10] 胡 鹏,游 涟,杨传勇,等.地图代数[M].武汉:武汉大学出版社,2002. 158; 159.

A study on the division of urban economic regions based on weighted Voronoi diagram

YAN Wei-yang, GUO Qing-sheng, LI Sheng-quan
(School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract: The division of urban economic regions is an important content of urban system planning, and also the important aspect of urban science building. This paper analyzed the existing methods for the division of urban economic regions. Considering weighted Voronoi diagram's geometric particularity, the rationality for dividing up space and the solvability by computer, the paper tried to apply it in urban system studying. The exact boundary of each city's absorbed region in theory is found and the conception of breaking arc was put forward by analyzing the breaking point theory deeply ,and expanding the theory with weighted Voronoi diagram. The paper put forward new methods for selecting regional central cities and dividing urban economic regions by means of two kinds of weighted Voronoi diagrams, and gave an analytic demonstration taking Henan province as an example.

Key words: urban economic regions; central city; weighted Voronoi diagram; breaking point theory