

8-14-2020

## Overview of Cartogram Algorithm

Chen Yi

*Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

Yunfang Zhao

*Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

Xiaomin Du

*Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Overview of Cartogram Algorithm

### Abstract

**Abstract:** Cartogram is a type of visualization method for effectively presenting the geographical information distribution of the statistical data, which has a wide range of usage in many fields. The concepts, classifications and generation methods of the Cartogram were described. *Different generation algorithms of it were summarized, considering the continuity and regularity features. Besides, from the two aspects of both statistical and geographical distortions, three evaluation indexes were proposed: an index that evaluated whether the area sizes represented the true attribute values; and one which represented the degree of the regional shape distortions; and last but not the least, the algorithm execution time;* after that the comparison of different Cartogram generation algorithms were generally given and the future of Cartogram was prospected.

### Keywords

Cartogram, map continuity, geographical distortion, statistical distortion, shape distortion

### Recommended Citation

Chen Yi, Zhao Yunfang, Du Xiaomin. Overview of Cartogram Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 1970-1978.

## 变形统计地图构建方法综述

陈谊, 赵云芳, 杜晓敏

(北京工商大学计算机与信息工程学院食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 变形统计地图是一种可视化表达统计数据地理分布的有效方法, 在很多领域都有应用。介绍了变形统计地图(Cartogram)的概念、分类和生成方法。归纳总结了连续型和非连续型、规则型和非规则型变形统计地图的构建算法, 从统计失真、地理失真和算法效率三个方面, 给出了变形统计地图构建算法的 3 个评价指标, 即面积-属性匹配度、区域形状扭曲度和算法执行时间。根据这 3 个指标对各类构建算法进行了对比分析, 并对未来变形统计地图的发展前景进行了展望。

**关键词:** 变形统计地图; 地图连续性; 地理失真; 统计失真; 形状扭曲

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-1970-09

## Overview of Cartogram Algorithm

Chen Yi, Zhao Yunfang, Du Xiaomin

(Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Cartogram is a type of visualization method for effectively presenting the geographical information distribution of the statistical data, which has a wide range of usage in many fields. The concepts, classifications and generation methods of the Cartogram were described. *Different generation algorithms of it were summarized, considering the continuity and regularity features. Besides, from the two aspects of both statistical and geographical distortions, three evaluation indexes were proposed: an index that evaluated whether the area sizes represented the true attribute values; and one which represented the degree of the regional shape distortions; and last but not the least, the algorithm execution time;* after that the comparison of different Cartogram generation algorithms were generally given and the future of Cartogram was prospected.

**Keywords:** Cartogram; map continuity; geographical distortion; statistical distortion; shape distortion

## 引言

地理信息可视化分为点数据可视化、线数据可视化、区域可视化。在区域数据可视化的过程中, 通常地图用颜色表示数量。但从可视化角度讲, 人们对面积的感知远大于色彩。所以当数据分布与地

理区域大小不对称时, 大区域显示小数据, 小区域显示大数据会造成用户理解偏差, 造成数据堆叠与空间浪费。按照各区域单元属性值的区际比例, 调整每个区域单元的几何面积, 同时保持各个区域单元的空间邻接关系。以这种方式制作的地图称为 Cartogram(变形统计地图)。变形统计地图可以根据用户给定属性对地图进行适当扭曲变形, 以克服传统地图对空间使用的不合理性而给用户带来的视觉侵扰。

变形统计地图是一种专题地图, 为表达某种属



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-14;  
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划  
(2012BAD29B01-2), 国家科技基础性工作专项  
(2015FY111200);

作者简介: 陈谊(1963-), 女, 北京, 博士, 教授, 研究方向为信息可视化与可视分析。

<http://www.china-simulation.com>

• 1970 •

性信息, 将地图中各区域进行比较, 根据属性值所占权重大小将地图区域进行放大、缩小, 而这势必会造成区域的扭曲变形。不同变形统计地图构建方法使地图发生扭曲变形的形式和程度不同。由于这种缺乏平面上的正确性的现象存在, 所以变形统计地图需要在适合的情况下使用。本文对变形统计地图的特性进行分类总结与评价, 便于用户在地理信息可视化过程中选择合适的变形统计地图。

## 1 变形统计地图分类与构建方法

### 1.1 变形统计地图分类

根据地图连续性变形统计地图分为连续型统计地图、非连续型统计地图。连续型统计地图对区域形状进行扭曲变形以达到表达属性值的目的, 一般保持区域间相邻关系, 但难以保持区域形状<sup>[1]</sup>。非连续型统计地图直接放缩地图达到属性值所占的权重比例, 不改变区域形状, 难以保持区域间相邻关系; 根据目标形状统计地图可以分为面积统计地图与距离统计地图。面积统计地图通过某地区要素的数值和该地区面积成比例来反应要素特征<sup>[2]</sup>。距离比较统计地图主要用于线状地物, 是针对距离属性的长度变形<sup>[3]</sup>。各地区的面积大小与实地无关, 只是与该地区某些属性的数量或者密度有关, 保持原有的拓扑结构; 根据变形统计地图形状是否规则可以分为规则形状统计地图与非规则形状统

计地图。规则形状主要指圆圈、矩形等规则几何形状<sup>[4]</sup>。规则形状变形统计地图由于区域均为规则几何形状, 所以需要添加标识帮助用户理解; 变形统计地图也可以按照形状保持情况与拓扑保持情况分为形状保留型统计地图与拓扑结构保留型统计地图<sup>[5]</sup>。形状保留型即最大程度保留区域形状, 使变形地图与原始地图的形状尽可能相近。但可能丧失原始地图的拓扑结构。拓扑结构保留型统计地图最大程度保留原始地图的拓扑结构, 但是形状扭曲程度大, 存在过度扭曲问题。用户在选择算法的时候需在形状与拓扑之间进行取舍; 统计地图还可以按照用户所选择的扭曲变量即兴趣变量进行分类。可以分为地理变量与非地理变量。地理变量即点位数据、线性数据、面积数据和体积数据。点位数据如居民点, 线性数据如河流, 地图上所有面状物体都用面积数据表示, 体积数据是三维的, 可以是具体的如降水量等, 也可以是抽象的如城市人口、国民生产总值等<sup>[6]</sup>。图 1 为统计地图分类。

### 1.2 变形统计地图

本文将经典变形统计地图的详细信息进行总结归纳, 详见表 1。其中地理失真是指在制图过程中地图有形变或相邻关系有改变, 统计失真是指地图区域面积没有准确地表达属性值<sup>[7]</sup>。

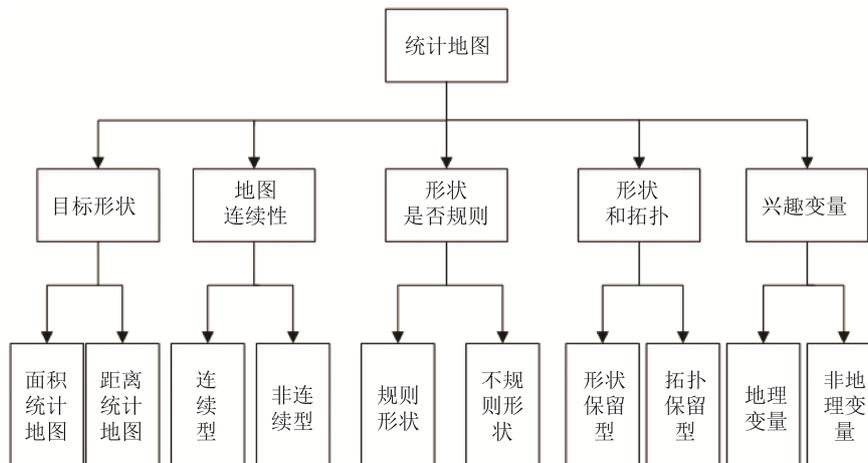


图 1 变形统计地图分类

表 1 统计地图构建方法小结

分类	时间	算法	提出者	基本原理	地理失真		统计失真	其他特性
					拓扑保持	形状保持		
	1985	橡胶板算法 <sup>[8]</sup>	Dougenik 等	弹力从每一个图心外露并对区域边界起作用,力为正顶点相互靠近;力负顶点相互远离	不绝对保持	有扭曲	有	可能出现重叠,但是速度相对于橡胶映射算法有提升
	2004	扩散算法 <sup>[9]</sup>	Gastner 等	基于普通物理学,每次迭代重新计算每个点的位移与位置。所有点的位移界定整张变形地图	严格保持	有扭曲	准确	可以实现准确计算更大的区域,能移动地图上的任意点
	2007	直线型统计地图 <sup>[10]</sup>	van Kreveld 等	基于精确的形式化的相邻关系,建立在 VLSI 算法的基础上	基本保持	直线围成矩形	精确	每一个矩形的面积规格可能使其难以注意彼此间的邻接关系,可能打乱拓扑支持并行计算,支持数据量更多的网格,支持 SOM 的软件即可实现
	2009	自组织算法 <sup>[11-15]</sup>	Heriques 等	基于自组织算法 SOM	基本保持	有扭曲	准确	
	2010	直线型变形统计地图 <sup>[16]</sup>	De Berg 等	用一个多项式时间算法最优化二进制空间划分计算,利用一般最优化标准,并应用专用的代价函数检验二进制空间的划分	不能完全保持	有非矩形存在	精确	为保证时间复杂度拐角不超过 10 个
	2013	Opti-DCN 算法 <sup>[17]</sup>	Shipeng Sun	提出一个保存拓扑关系的数学条件,推导出满足这个条件转换方程,优化整体弹性系数,简化了 DCN 的转化方式	不能完全保持	有扭曲	准确	计算效率有待提高,工作达不到全功
	2013	Carto3F <sup>[18]</sup>	Shipeng Sun	利用空间四叉树和数学环境进行拓扑等价;按照优先权设计,通过使用辅助四叉树减少需要转换点的数量实现效率提升	基本保持	有扭曲	准确	允许多核心多线程并行计算;通过数学计算减轻了算法本身所固有的消除作用
连续型	2013	T 型统计地图 <sup>[19]</sup>	Jawaherul Alam 等	通过数值迭代法或爬山函数法利用 8 变形构建统计地图	基本保持	直线围成 T 型	零制图误差	最佳情况下,每次迭代 1~5 s、1-3 次就可以实时出图且误差可忽略
	2013	圆弧形统计地图 <sup>[20]</sup>	Kamper J H 等	用圆弧取代直线段来修饰多边形边界,使得图斑看起来像是云朵或者雪花,取决于边界内弯曲或外弯曲	基本保持	轻微变形	有	该算法有时候会发生制图错误,所以膨胀与缩小有时候无法得到绝对的保障
	2014	数学形态学算法 <sup>[21]</sup>	B. S. Daya Sagar	空间加权骨架化的影响决定了从多种二维平面图形的图心伸出的多前线的移动速度。多前线代表了所要表达的可变的变量	不能完全保持	轻微变形	有较低的面积误差	
非连续型	2002-2005	基于中轴线的算法 <sup>[22-23]</sup>	Keim 等	简化目标形状,连接其最大内接圆得到中轴线,区域沿线扩大或缩小,迭代若干次得到结果	基本保持	轻微变形	面积误差低于 3%	此方法可以应对比较大的地图
	2011	圆圈统计地图 <sup>[24]</sup>	Ryo Inoue	能保持各地区的相对位置,不必与原始地图对比便可识别。圆圈大小代表属性值大小	无法保持	圆圈	有	可以附加标注以利于识别,还可以附加颜色信息表达更多性质
规则形状	2013	大型圆圈统计地图的并行构建 <sup>[25]</sup>	Tang W	为提高计算效率,利用 GPU 进行并行构建。可以很好解在密集空间计算问题	无法保持	圆圈	有	比好的 CPU 提速 15-20 倍
	2004	矩形统计图 <sup>[26]</sup>	Heilmann et al.	算法将矩形置于特定位置使当前位置距与原始位置尽可能最近	无法保持	矩形	有	不具有原始地图的可读性,需要附加标注帮助用户识别

## 2 评价指标

好的构建变形统计地图的算法通过放缩地图中的区域以反应属性值,同时尽可能保持其特征形状,相对位置和邻接关系。绘制地图时通常面临三种误差。如图 2 所示,(a)代表制图误差,制图误差即绘制的地图与实际地图比例化之后地图之间的误差。制图误差不可完全消除。(b)为拓扑误差,在(a)中相邻的区域在(b)图中不再相邻(比如 A 与 C)。(c)为形状误差,如图所示的矩形区域产生形变<sup>[27]</sup>。在进行构建变形统计地图方法选择的时候,要在保持形状与拓扑关系方面进行取舍<sup>[28]</sup>。考量各种构建变形统计地图的标准有很多,2004 年 Tobler 在他的文章中提出三个评价指标<sup>[29]</sup>: 1) 面积是否准确表达了预先设置的属性; 2) 区域形状扭曲程度; 3) 算法执行时间。应根据实际应用需求与用户偏好选择最适合的统计地图。

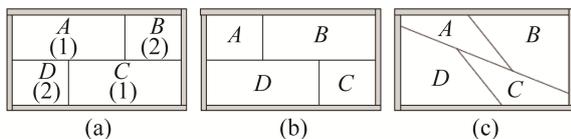


图 2 绘制地图时遇到的三种类型的误差

## 3 变形统计地图构建算法对比分析

按照地图连续性与形状是否规则,针对地图区域面积是否准确表达属性值、形状扭曲程度、算法执行时间三个标准对变形统计地图构建算法进行归纳总结与对比分析。

### 3.1 连续型变形统计地图

连续型统计地图优先保证区域之间的邻接关系和相对位置不变,通过改变区域的形状实现面积与属性成正比。构建连续型统计地图的方法可以分为变形算法与拓扑算法<sup>[30]</sup>。变形算法通过移动顶点和区域边界进行变形来直接修改输入地图<sup>[31]</sup>。拓扑算法利用地图的拓扑结构,构建一个直角对偶平面,在对偶平面上利用不同的组合性质

进行统计地图的构建<sup>[32]</sup>。下面通过列举若干具有代表性的连续型统计地图算法并进行对比分析来阐述连续型统计地图特点。

连续型变形统计地图构建算法中最典型的是 2004 年 Gastner 和 Newman 提出的扩散算法。它基于普通物理学,通过迭代的扩散过程达到期望面积,避免以前算法带来的可读性缺失、区域重叠、对坐标轴强烈依赖等缺点。其制图误差、形状扭曲程度与时间复杂度取决于被选择栅格的大小。如图 3(a)所示为美国大选中共和党和民主党的选票分布情况。(a)是原图,(b)是经过扩散方法变形之后的统计地图。另一典型算法是 2013 年 Kamper J H, Kobourov S G, Nollenburg M.提出的圆弧算法。该算法用圆弧取代直线段来修饰多边形边界,这使得整个国家外形看起来像是云朵或者雪花,像云朵或是雪花取决于边界向外弯曲或向内弯曲。如图 3(c)所示为经过圆弧算法计算之后的美国大选分布情况。圆弧算法由于只对边界进行内弯曲或者外弯曲,所以比扩散算法的输出地图更加接近原始地图。即区域形状保持程度高。而扩散算法提供更低的制图误差。即拓扑结构保持程度高,面积-属性匹配度高。

拓扑算法中最典型的是直线型变形统计地图。直线统计图即用直线围成的一种变形统计地图,所有区域均是由直线围成的矩形,矩形面积用来表示属性值。2007 年 van Kreveld 和 Speckmann 提出了一种直线型变形统计地图。如图 3(d)所示为美国人口统计图,图中所有区域均为直线围成的矩形。这种算法能保持原始地图的拓扑结构,为使地图成直角地表达,有时需删除或隐藏一个或更多相邻区域,造成很大制图误差。但是这种丢失邻接关系的缺点可以通过使一些区域不成矩形来避免。2012 年 Mark de Berg 等提出最优化二进制空间划分直线型变形统计地图的方法能提供零制图误差,如图 3(e)所示为利用最优化二进制空间划分直线型变形统计地图方法计算得出的美国人口统计图。图 3(d)、(e)对比可以看出,前者所有区域均为矩形,后者则不然。

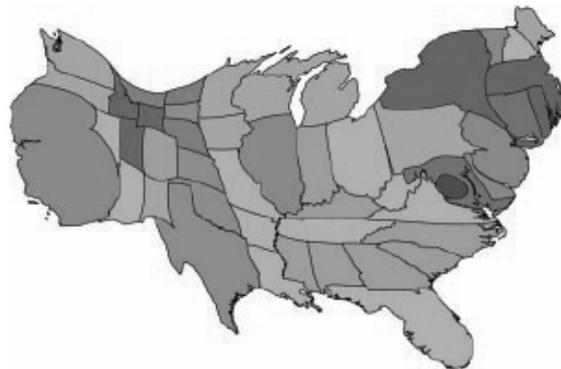
但是前者在保证拓扑方面却比后者更为出色。在 2013 年, Md. Jawaherul Alam 提出了一种 T 型统计地图, 在直线型统计地图的基础上, 用 T 型代替矩形来表示所有区域。这种算法能降低时间复杂度, 提供零制图误差即面积-属性匹配度高, 同时保证拓扑。但是形状改变大(均为 T 型)。如图(f)所示为构建 T 型统计地图迭代过程的示意图, 颜色深浅代表

下一步放大缩小的程度。

以上介绍的几种变形算法与拓扑算法均属于迭代算法。T 型统计地图运行 1~3 次迭代足以保证产生出变形统计地图且只产生可以忽略的误差。圆弧算法与直线型算法的运行时间取决于迭代次数, 运行 20~30 次迭代能输出结果, 每次迭代用时 1~5 s, 不同地图用时不同。扩散算法大概用时 25~50 s<sup>[33]</sup>。



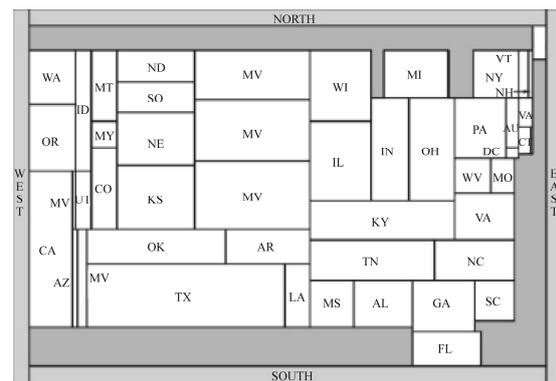
(a) 美国大选选票分布原图



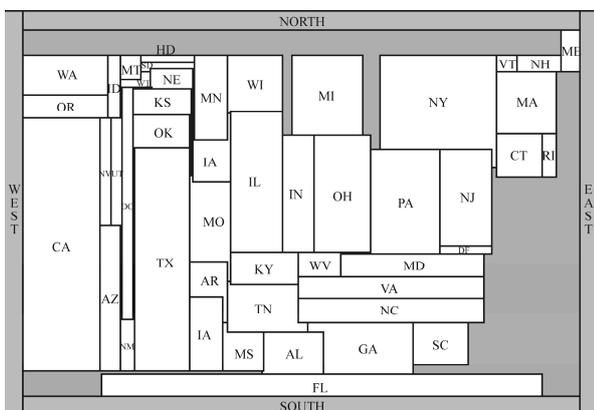
(b) 美国大选选票分布扩散算法变形统计地图



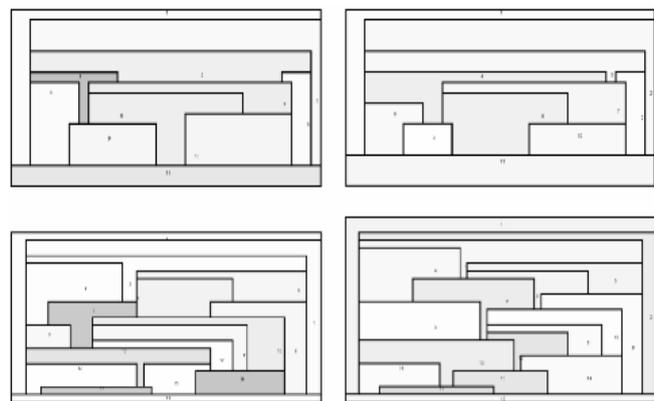
(c) 美国大选选票分布圆弧算法变形统计地图



(d) 美国人口分布直线变形统计地图(2007)



(e) 美国人口分布直线变形统计地图(2012)



(f) 构建 T 型变形统计地图过程图解

图 3 连续型变形统计地图构建算法

连续型统计地图中拓扑算法一般较变形算法更能保证地图的拓扑结构, 面积计算往往更加精确, 即面积-属性匹配程度高, 且算法效率较高。但变形算法构建的变形统计地图往往更加美观, 与拓扑算法相比构建的地图与原始地图更加接近, 便于识别, 符合人们的审美。所以如果用户需要区域面积精确表现属性值, 对算法效率要求较高, 那么适合选择拓扑算法。若用户只观测区域之间的对比结果, 使地图更好地被人们识别, 那么变形算法较适宜。连续型统计地图一般在算法开始的时候, 就给予面积和形状约束, 但是连续型统计地图并不能同时地完全满足形状和面积目标。所以在制作统计地图的过程中包括一个非常复杂的面积和形状的均衡问题。尽管连续统计地图很难制作, 但是制作出来的多边形网格仍比其他方法与原始地图更加接近<sup>[34]</sup>。

### 3.2 非连续型变形统计地图

非连续的统计地图, 直接比例化所有多边形到它们的目标大小, 完美满足面积目标, 形状轻微松弛, 拓扑结构松弛, 不存在重叠问题, 具有较低的统计失真, 各个区域的形状与原始地图最为接近。但是由于比例化多边形是在原始区域内进行, 拓扑结构丢失不能被很好地感知, 所以多边形并没有保持它们原始的相邻关系, 即失去了原来的拓扑结构。且在区域调整的同时失去了原来地图的总体形状, 很难将其视为一种地理信息的可视化。但是非连续型变形统计地图的统计失真较低, 且算法运行速度较高, 能在比较短的时间内生产出误差可以忽略的变形统计地图。

一种比较经典的非连续型变形统计地图构建算法是 Keim 于 2005 年提出的基于中轴线的 M-Cartodraw 算法。该算法用反向的中轴去建造一个统计地图。连接简化后目标形状的最大内接圆得到中轴线, 之后区域沿着中轴线进行放缩。如图 4 所示为中轴线 M-Cartodraw 算法迭代 11 次的过程。每一次迭代中颜色的深浅表示下一步所应放大或缩小程度的大小。最终到第 11 步时面积误差少于 3%。

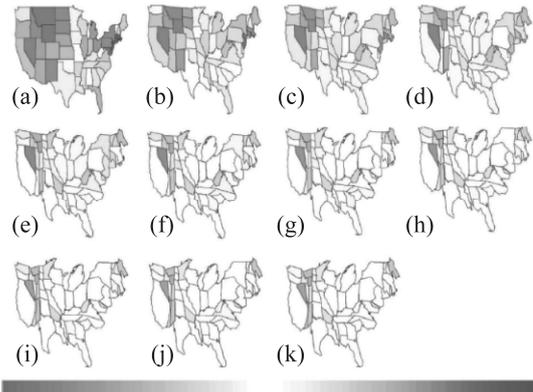


图 4 M-Cartodraw 构建过程

相比连续型变形统计地图, 非连续型统计地图在保持原始地图拓扑结构方面较弱。但是由于直接比例化地图区域到期望大小, 所以面积精确度较高, 且形状得以保持。这对于用户需要保持区域形状, 且仅需要了解区域属性之间对比关系的情况比较实用。而若用户必须知道地图拓扑结构的时候, 则连续型统计地图更加适宜。

### 3.3 规则形状统计地图

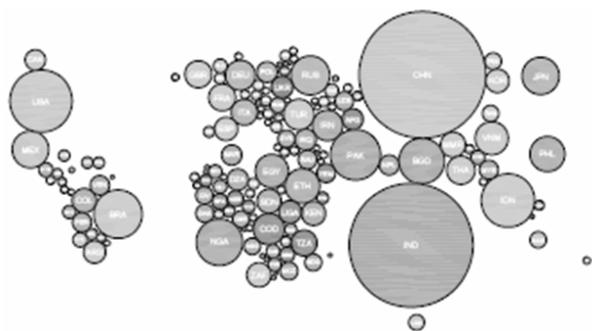
这种划分方式完全忽略了原始多边形的形状, 生成所有区域均为圆形或矩形等规则几何图形的变形统计地图。在很多情况下, 这种划分方式无法满足面积约束, 且拓扑结构松弛, 相邻关系难以辨识, 丧失了传统地图的辨识性与易读性。但是对于不同地区进行某种属性的直观对比很有优势。其对于统计量的直观表达是无可比拟的。通过辅加地理标识, 能弥补其地理区域难以辨识的缺陷<sup>[35]</sup>。

其中比较经典的矩形变形统计地图是 2004 年 Heilmann et al. 提出近似矩形变形统计地图。用矩形代表每一个区域。每一个矩形面积都是某些属性比例化的结果。为了最好地识别变形统计地图信息, 算法将矩形置于特定位置, 使其距其在原始地图中的位置尽可能接近。这种方法生产的变形统计地图有较低的面积误差。如图 5(a) 所示为美国各州人口, 矩形大小和该州人口成正比, 加州(CA)是美国人口最多的州, 而怀俄明州(WY)人口很少。圆圈变形统计地图是由 Dorling 于 1996 年的时候第

一次提出, 以避免重叠和保持邻接关系为目的。2011 年 Ryo Inoue 提出一种新的构建圆圈变形统计地图的方法, 在 Dorling 提出的方法基础之上, 这种方法重点在于, 在保持各地区相邻关系的同时保留圆圈之间的相对位置。如图 5(b)所示是世界 2020 年人口分布图。圆圈大小代表人口数量。



(a) 世界人口分布矩形变形统计地图



(b) 世界人口分布圆形变形统计地图

图 5 规则型变形统计地图

相比连续型变形统计地图与非连续型变形统计地图, 规则形状变形统计地图是拓扑结构最松弛的一种, 且形状变形也最厉害(均为规则形状)。但是规则形状变形统计地图对于统计量的直观对比显示具有前两种统计地图无可比拟的优越性。面积-属性匹配程度是最直观的。若用户想进行大面积区域的统计量的直观对比, 通过规则形状大小表示属性值大小, 通过附加标识, 使用户了解地图区域所代表的地区, 可以实现属性值最直观的对比。同时可以添加颜色信息代表更多属性。

## 4 结论

传统地图在展示大量数据时存在数据分布与地理区域大小不对称问题。大量数据集中于地图上小面积的区域, 而大面积区域却用来表示少量数据。用大量的屏幕空间来表示小部分数据的做法十分不经济, 且易造成用户对数据的错误理解。而且大量数据堆积在一起难免有重叠问题, 给用户的观察与交互都造成困难。变形统计地图可以按照地理区域的属性值对各个区域进行适当变形, 以克服传统地图对空间使用的不合理性。本文叙述了变形统计地图的分类以及枚举了不同的算法, 并总结了按照连续型变形统计地图与非连续型变形统计地图以及规则形状分类的变形统计地图的特点, 并对典型算法进行了举例及分析。通过以上分析可知, 没有一个变形统计地图的构建方法可以满足所有期望标准。一些可以保证比较低的统计失真, 一些可以保证比较低的地理失真。加之时间复杂度的影响, 无法简单判定一个变形统计地图构建方法的好与坏。因此, 变形统计地图的使用应根据实际应用需求与用户偏好。比如, 如果需要零制图误差, 那么直线统计图可以满足需求, 进一步地, 如果在零制图误差的基础上要求保留拓扑, 那么可以选择 T 型统计图。如果地图的可读性更重要, 那么扩散算法与圆弧算法可以满足需求。如果允许合理的制图误差同时要求地图的可读性与低时间复杂度, 那么 2007 年的直线统计图更合适一些。如果需要展现统计数据直观的观察与对比, 而且又要避免区域重叠, 那么矩形统计地图就可以满足要求。同时又要求保证区域之间的相对关系, 也可以选择圆圈统计地图。

关于变形统计地图, 前人已做了很多工作, 无论何种变形统计地图构建算法其目的都在于找到一种尽可能满足所有评价指标的构建方法。随着大数据时代的到来, 未来变形统计地图技术也朝着准确、高效、实时、动态的方向发展, 具体如下:

(1) 变形统计地图是一种统计专题地图。首要

的, 是对统计量的准确表达。无论变形统计地图如何发展, 保证变形后地图面积准确表达属性值是前提。

(2) 在保证最低统计失真的前提下, 应尽可能满足最低的地理失真。即尽可能不丧失传统地图的地理可识别性与易读性。现有算法均是要在形状与拓扑之间进行平衡。找到最佳平衡点, 是重点也是难点。现并没有一个算法能够完全满足面积精确、形状保持、拓扑保持这三点要求。未来统计地图构建算法仍需不断探索完善, 以期找到三者间的最佳平衡点。

(3) 变形统计地图构建算法中, 有的是在对偶面中利用拓扑结构对地图进行多边形化进行构建的。这类方法计算速度非常快, 需要的迭代次数也非常少。用到了很多神经网络、机器学习与人工智能方面的算法。由此可见, 未来变形统计地图的构建中, 与现今热门算法的结合是一个非常热的趋势。通过这些科学算法在变形统计地图构建中的越来越多地应用, 变形统计地图构建算法的时间复杂度会实现总体降低。

(4) 当今时代, 数据量成指数级增长。所以在构建变形统计地图的时候, 不得不考虑的问题是如何应对海量的数据。这就要求未来变形统计地图构建算法必须支持多核心并行计算, 以支持更大规模数据的表达及提高计算速度。

(5) 并不是所有变形统计地图构建算法都支持构建实时地图。现今卫星定位系统已十分发达, 人们越来越需要生成实时地图。统计数据大部分情况是值一段时间之内的数据。但是有些数据, 例如微博数据、GPS 数据等数据, 是海量的、动态的、实时的。如何准确不失真地表达这种类型的统计数据一直是一个难点。实时生成动态变形统计地图是一个创新也是面临着极大的挑战。

## 参考文献:

- [1] Tobler W R. Choropleth maps without class intervals [J]. *Geographical Analysis* (S1538-4632), 1973, 5(3): 262-265.
- [2] Bonsai B, Regier M. Historical Comparison of the 2001/2002 Drought in the Canadian Prairies [J]. *Climate Research* (S0936-577X), 2007, 33(3): 229-242.
- [3] Randy Christensen, Danielle Droitseh. Fight to the Last Drop: A Glimpse Into Alberta's Water Future [R]. *Ecojustice*. Canada: Bow Riverkeeper, 2008.
- [4] Kocmoud C J. Constructing continuous cartograms: a constraint-based approach [D]. USA: Texas A&M University, 1997.
- [5] Villmann T, Merényi E, Hammer B. Neural maps in remote sensing image analysis [J]. *Neural Networks* (S0893-6080), 2003, 16(3): 389-403.
- [6] Skupin A, Fabrikant S I. Spatialization methods: a cartographic research agenda for non-geographic information visualization [J]. *Cartography and Geographic Information Science* (S1523-0406), 2003, 30(2): 99-119.
- [7] Alam M J, Kobourov S G, Veeramoni S. Quantitative Measures for Cartogram Generation Techniques [C]// *Computer Graphics Forum*. Wiley Subscription Services, USA: A Wiley Company, Inc., 2015: 351-360.
- [8] Dougenik J A, Chrisman N R, Niemeyer D R. An Algorithm to Construct Continuous Area Cartograms [J]. *Professional Geographer* (S0033-0124), 1985, 37(1): 75-81.
- [9] Gastner M T, Newman M E J. Diffusion-based method for producing density-equalizing maps [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (S0027-8424), 2004, 101(20): 7499-7504.
- [10] van Kreveld M, Speckmann B. On rectangular cartograms [J]. *Computational Geometry* (S0925-7721), 2007, 37(3): 175-187.
- [11] Henriques R, Bação F, Lobo V. Carto - SOM: cartogram creation using self - organizing maps [J]. *International Journal of Geographical Information Science* (S1365-8816), 2009, 23(4): 483-511.
- [12] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps [J]. *Biological Cybernetics* (S0340-1200), 1982, 43(1): 59-69.
- [13] Kaski S, Honkela T, Lagus K, et al. WEBSOM-self-organizing maps of document collections [J]. *Neurocomputing* (S0925-2312), 1998, 21(1): 101-117.
- [14] Maenou T, Fujimura K, Kishida S. Optimizations of TSP by SOM method [C]// *Progress in Connectionsist-Based Information Systems*, Proceedings of the 1997 International Conference on Neural

- Information Processing and Intelligent Information Systems. New Zealand: Eureka Pubns, 1997, 2: 1013-1016.
- [15] Takatsuka M. An application of the self-organizing map and interactive 3-D visualization to geospatial data [C]// Proceedings of the 6th International Conference on GeoComputation. USA: CiteSeerX.2001: 24-26.
- [16] De Berg M, Mumford E, Speckmann B. Optimal BSPs and rectilinear cartograms [J]. International Journal of Computational Geometry & Applications (S0218-1959), 2010, 20(2): 203-222.
- [17] Sun Shipeng. An Optimized Rubber-Sheet Algorithm for Continuous Area Cartograms [J]. The Professional Geographer (S0033-0124), 2013, 16(1): 16-30.
- [18] Sun Shipeng. A Fast, Free-Form Rubber-Sheet Algorithm for Contiguous Area Cartograms [J]. International Journal of Geographic Information Science (S1365-8816), 2013, 27(3): 567-593.
- [19] Alam M J, Kobourov S G, Veeramoni S. Quantitative Measures for Cartogram Generation Techniques [C]// Computer Graphics Forum. Wiley Subscription Services USA: A Wiley Company, Inc., 2015: 351-360.
- [20] Kamper J H, Kobourov S G, Nollenburg M. Circular-arc cartograms [C]// Visualization Symposium (PacificVis), 2013 IEEE Pacific. USA: IEEE, 2013: 1-8.
- [21] Sagar B S D. Cartograms via mathematical morphology [J]. Information Visualization (S1473-8716), 2013, 13(1): 42-58.
- [22] D A Keim. Efficient Cartogram Generation: A Comparison [C]// IEEE Symp. Information Visualization (InfoVis). USA: IEEE CS Press, 2002: 33-36.
- [23] Keim D, Panse C, North S C. Medial-axis-based cartograms [J]. Computer Graphics and Applications, IEEE (S0272-1716), 2005, 25(3): 60-68.
- [24] Dorling D. Area Cartograms: Their Use and Creation[M]// The Map Reader: Theories of Mapping Practice and Cartographic Representation. Ireland: WILEY-BLACKWELL. 2011: 209-212.
- [25] Tang W. Parallel construction of large circular cartograms using graphics processing units [J]. International Journal of Geographical Information Science (S1365-8816), 2013, 27(11): 2182-2206.
- [26] Heilmann R, Keim D, Panse C, et al. Recmap: Rectangular map approximations [C]// Information Visualization, 2004, INFOVIS 2004, IEEE Symposium on. USA: IEEE, 2004: 33-40.
- [27] Kadmon N, Shlomi E. A polyfocal projection for statistical surfaces [J]. The Cartographic Journal: (S0008-7041), 1978, 15(1): 36-41.
- [28] Sarajedini A, Chau P M. Quality of service prediction using neural networks [C]// Military Communications Conference. USA: IEEE, 1996, 2: 567-570.
- [29] Tobler W. Thirty Five Years of Computer Cartograms [J]. Annals of the Association of American Geographers (S1467-8306), 2004, 94(1): 58-73.
- [30] Hennig B D, Pritchard J, Ramsden M, et al. Remapping the world's population: Visualizing data using cartograms[M]// Fair Play. 2012:379-384.
- [31] Berg M, Elenamumford, Bettinaspeckmann. Optimal BSPs and Rectilinear Cartograms [J]. International Journal of Computational Geometry & Applications: (S0218-1959), 2012, 20(2): 19-26.
- [32] Kohonen T. Learning vector quantization [M]// Springer. Germany: CiteSeerX. 30(2015):537-540
- [33] Merényi E, Jain A, Villmann T. Explicit magnification control of self-organizing maps for "forbidden" data [J]. Neural Networks, IEEE Transactions on (S1045-9227), 2007, 18(3): 786-797.
- [34] M van Kreveld, B Speckmann. On rectangular cartograms [C]// Proc. 12th European Symposium on Algorithms, number 3221 in LNCS. USA: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 724-735.
- [35] Alam M J, Biedl T, Felsner S, et al. Computing Cartograms with Optimal Complexity [J]. Discrete & Computational Geometry (S0179-5376), 2013, 50(3): 784-810.