



一种顾及制图区域要素密度均衡的 地图变换算法

亢孟军^{1,2} 叶 蕾¹ 朱 军¹ 王孟琪¹ 杜清运¹ 王明军¹

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 城市空间信息工程北京市重点实验室,北京,100027

摘 要:制图区域要素密度分布不均衡会增加地图表达难度,常规地图表达方式无法解决视觉不平衡的问题。在 Gastner-Newman 地图变形算法的基础上,提出了一种顾及制图区域要素密度平衡和公众地图认知一致性的地图变换算法。首先,设计多种变形单元尺度以及配置制图要素密度权重组合;然后,代入线性扩散方程,构建变形格网并映射各离散控制点;最后,生成多种变形地图结果。开展了地图认知实验,获得 56 份问卷结果,针对中国广西南宁市青秀区行政区划图的形态控制,应控制 $S_{\text{周长}} > 0.975$ 、 $S_{\text{周长面积比}} > 0.961$ 、 $S_{\text{形状比}} > 0.966$,能兼顾地图形变以及公众认知的一致性。为解决地图要素密度不均衡的问题提供了新的思路,变形后的地图达到视觉平衡,同时,通过调整形变权重参数实现了公众地图认知的一致性。

关键词:地图载负量;信息熵;视觉平衡;地图综合;地图认知

中图分类号:P208;P28

文献标志码:A

正确表达地图要素的协调关系,并满足视觉平衡要求,能够使地图在实现信息承载、传输和认知功能的基础上,保持其艺术性和科学性^[1]。传统的普通地图编制通常使用固定的比例尺选取地图要素,导致以下问题:(1)由于幅面尺寸限制,需要对要素进行重要性评价和筛选;(2)地图要素分布不均衡,使要素展示与图幅尺寸的矛盾更加严重^[2]。因此,急需研究新型地图设计方法,以解决制图区域地图要素密度不均衡分布的问题,达到全区域的视觉平衡。对此,目前主要有两种解决方案:(1)采用地图综合方法,对地图要素进行筛选、合并^[3];(2)使用多幅不同比例尺的子图来保持地图要素细节和视觉平衡。前者采用多标准,经过地图要素进行选择、简化、综合和关系协调来实现地图视觉平衡。例如基于凸壳原理选取点要素^[4]、基于 Delaunay 三角剖分的保持空间特征的选择方法^[5]、基于遗传算法的点群目标选取模型^[6]、目标点群渐进式选取方法^[7]、最优信息熵约束的居民地点状要素选取^[8]等。线要素的选取方法包括基于开方根定律与图论的线要素选取方法^[9]、基于遗传算法的线要素选取模

型^[10]、基于网眼密度的线要素选取方法^[11]等。该方案可以保持地图上不同区域要素位置和主要分布特征不变,达到一定程度的视觉平衡,但区域间要素密度差异的特殊情况仍无法彻底解决。后者是针对某个区域的多种细节的常规设计方法,使用不同的比例尺地图来切换显示同一区域,或使用不同的窗口来显示多尺度地图^[12]。该方案不利于地图读者把握整体与局部的关系^[13]。因此,可以考虑从改变区域面积的角度寻找解决方法。在一定阈值或认知一致性范围内,增大要素密集区域的面积,缩小要素稀疏区域的面积,以达到地图视觉平衡。

变形地图可以根据特定属性对地图区域进行适当的变形,以克服空间不合理使用带来的视觉干扰^[14]。它使用一定的数学规则来变换地图几何形状,使距离或面积与某个属性值成正比。同时,它试图保持相对正确的空间关系,以获得地理空间“扭曲”的映射表达^[15-16]。目前已被广泛应用于人口统计和流行病学制图^[17]、耕地变化^[18]、疾病分析^[19]、人口统计学^[20]、PM2.5 分布^[21]、教育资源配置^[22]、学校制图^[23]、城市收缩与

收稿日期:2022-01-07

项目资助:城市空间信息工程北京市重点实验室经费(20210211)。

第一作者:亢孟军,博士,副教授,研究方向为空间信息可视化、空间决策建模。mengjunk@whu.edu.cn

通讯作者:王明军,博士,讲师。dawnson.wang@263.net

扩张^[24]等方面。变形地图可看作为地图综合的一种特例,传统地图综合在约定地图框架单元不变前提下,对其内部地图要素的表达进行选择、化简和合并处理,而本文是确保内部信息在一定程度展示的前提下,对外部框架单元进行形态的调整。变形地图算法会改变行政单元面积,与公众对制图区域固有的形态认知产生冲突,因此算法设计中应协调、控制行政单元的形状变量,使其兼顾面积形变和公众认知不变。

本文基于 Gastner-Newman 的变形地图算法^[25],研究不同尺度单元以及不同形态要素密度差异对变形效果的影响,对地图面积单元进行形态调整,从而实现数据表达、地图认知与地图美学相结合的地图设计。

1 地图变换算法

1.1 算法流程

本文针对特定制图区域要素分布严重不均衡的情况,提出一种基于 Gastner-Newman(G-N)算法的地图变换算法,主要包括变形单元尺度选择(choose unit, CU)、密度权重(w)设定、形变效果量化评估与认知校正等方面,过程如图1所示。变形单元选择是指研究不同尺度单元对变形效果的影响。权重选择是对比点、线要素密度和两者结合的效果,研究不同几何形态要素密度差异对变形效果的影响。将上述两种尺度和3种密度权重方式组合代入G-N算法,得到多幅结果变形地图。分别计算研究区域和变形单元形变度量值,并根据形变值从小到大准备若干幅变形地图集合(M_t),开展地图认知实验。统计分析被试结果,获得研究区域的优化参数组合。

1.2 G-N算法

G-N变形地图算法^[25]基于物理学的线性扩散原理,根据密度势差构建扩散过程,最终达到“处处密度一致”的平衡状态。因此,该算法生成的变形地图满足以下3个性质:(1)各变形单元的面积比与指定变量值(如兴趣点(point of interest, POI)密度)的比值相同;(2)研究区域总面积不变;(3)各变形单元间的拓扑关系保持不变。

从数学表达而言,G-N算法寻求一个转换函数 $T:r \rightarrow T(r)$,使得研究区域在变形后满足上述3个性质。该算法令其雅克比矩阵与属性密度 $\rho(r)$ 成比例:

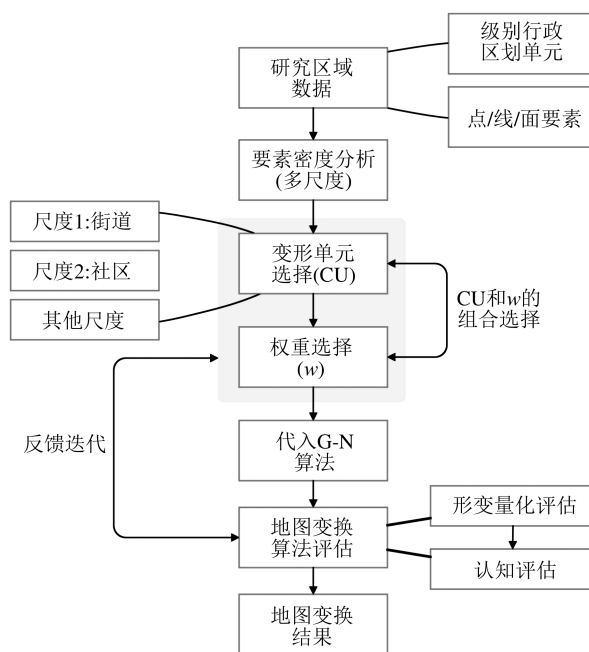


图1 地图变形过程概述

Fig.1 Overview of Map Deformation Process

$$\frac{\partial(T_x, T_y)}{\partial(x, y)} = \frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial T_y}{\partial y} - \frac{\partial T_x}{\partial y} \frac{\partial T_y}{\partial x} = \frac{\rho(r)}{\bar{\rho}} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为初始坐标; (T_x, T_y) 为转换后坐标; $\rho(r)$ 为 r 点对应 CU 的密度值; $\bar{\rho}$ 是研究区域平均属性密度。通过结合扩散过程并达到平衡状态的约束,可使式(1)唯一确定,标准扩散方程为:

$$J = v(r, t) \rho(r, t) \quad (2)$$

式中, r 为点的位置; t 为时间; J 为密度梯度差; $v(r, t)$ 为速度扩散系数; $\rho(r, t)$ 为密度。根据菲克第一定律,某点处的扩散通量是该点密度场梯度的反向向量,计算如下:

$$J = -\nabla \rho \quad (3)$$

式(3)表明,扩散是从密度大的区域向密度小的区域进行,密度差别越大,扩散强度也就越大。同时,扩散过程的局部方程为:

$$\nabla J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

联立式(2)~式(4),即可得到扩散方程如下:

$$\nabla^2 \rho - \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

利用式(5)制作变形地图,将原始的多边形属性密度 ρ 作为求解偏微分方程(5)中的 $\rho(r, t)$,而扩散速度 $v(r, t)$ 可用属性密度 ρ 表示为:

$$v(r, t) = -\frac{\nabla \rho}{\rho} \quad (6)$$

则地图上任一点在时刻 t 的位置可以通过速度场积分计算得到:

$$r(t)=r(0)+\int_0^t v(r,t')dt'$$
 (7)

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $r(t)$ 即为点的最终位置。原地图上所有点的位移集合定义了结果变形地图。

1.3 基于 G-N 算法的地图变换

如图 2 所示,本文算法包含 4 个步骤:数据输入确认、建立规则格网(regular grids, RGs)、生成变形格网(transformed grids, TGs)和投影图层。



图 2 基于 G-N 算法的地图变换流程

Fig.2 Map Transformation Process Based on G-N Algorithm

1)数据输入确认。包括输入图层(input feature class, IFC)的空间和属性数据的检查、变形约束点的坐标设置、密度权重值的设定。

密度权重值设定首先读取 IFC 属性表,获取各变形单元内要素数量、单元面积,将要素数量与面积的比值作为要素密度。然后经过归一化计算获取密度权重值,作为 IFC 属性数据填入属性表中。最后在点线面要素不同配置情况下计算出不同的密度权重值。

2)建立格网。读取 IFC 信息,遍历空间要素(f_i)并获取密度权重值(d_{f_i})。将研究区域设置为 IFC 的最小外包矩形的 120%,以保证生成的 TGs 覆盖全部附加图层。

假设 w 和 h 分别为 IFC 的宽和高,则单个格网的宽度为 $w_g = 1.2w/2^n$,高度为 $h_g = 1.2h/2^n$,其中 n 为整数, n 取值越大,则格网数越多,细节刻画更准确,但运算量也更大。本文实验取 $n=7$,格

网如图 3(a)所示。

假设 $d_{avg} = \frac{\sum d_{f_i}}{1.2 \times \text{Area(IFC)}}$,其中 d_{avg} 为研究区域平均密度, d_{f_i} 为空间要素 f_i 的密度权重值。

依次判断每个格网单元(g_i)中心与 f_i 的拓扑关系,若 f_i 包含 g_i 的中心,则 $d_{g_i} = d_{f_i}$;反之, $d_{g_i} = d_{avg}$ 。其中 d_{g_i} 为 g_i 的密度。密度权重赋值结果如图 3(b)所示。

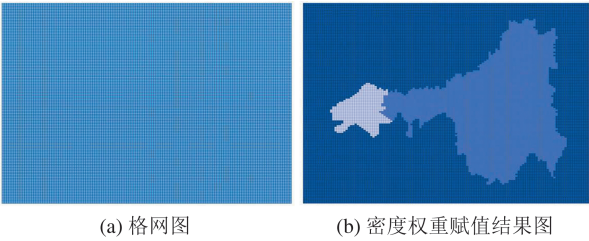


图 3 格网密度权重赋值结果

Fig.3 Grid Density Weight Assignment Results

3)生成变形格网。根据步骤2)确定的格网密度权重值 d_{gi} 及格网单元节点(包括4个角点: (x_{i_0}, y_{i_0}) 、 (x_{i_1}, y_{i_1}) 、 (x_{i_2}, y_{i_2}) 、 (x_{i_3}, y_{i_3}))的位置,代入式(7),即以二元组 $\{d_{gi}, (x_{ij}, y_{ij}) | 0 \leq j \leq 3\}$ 代入式(7),共得到常微分方程 2^{n+2} 个,联立方程组,使用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta, RK)高精度单步算法求解,得到格网节点的最终位移坐标 (x_{i_j}, y_{i_j}) 。图3(a)变形后的格网如图4所示。

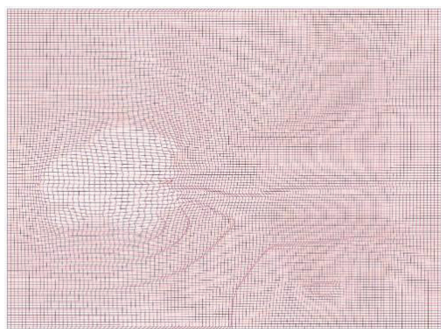


图4 变形格网效果

Fig.4 Deformation Grid Effect

4)以步骤3)建立的变形格网作为模板构建空间要素坐标的转换关系,即构建 $(x_{i_j}, y_{i_j}) = T((x_i, y_i))$ 。该变换函数 $T(x)$ 是独立的转换函数,是在变形格网约束下的相对距离关系的换算,本质是基于双线性插值的函数,其变换原理如图5所示。对任意点 $P(x, y)$,首先获取其所在的格网 g_i 及其4个角点,以其左下角点 O 为原点,分别计算点 P 到 OA 和 OC 的垂线,获得偏移量 d_{OD} 和 d_{OE} ;然后利用双线性插值,计算变形之后 P 的最终位置 (x_{i_j}, y_{i_j}) ;最后依次遍历空间要素的所有几何结点,获得变形后的位置信息。

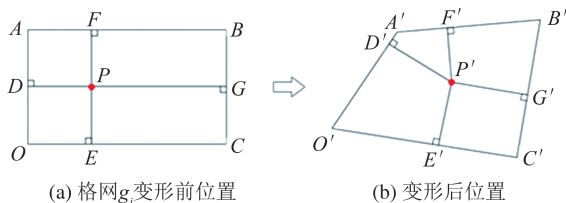


图5 空间要素坐标变换原理

Fig.5 Principle of Coordinate Transformation of Spatial Features

1.4 变形单元尺度选择及密度权重配置

变形单元尺度的选择以及研究区域内密度权重的配置是决定地图变换形态的主要因子。其中更小的变形单元能够表达更具体的微观单元信息和反映更丰富的区域内部的细节差异,但增加了计算量,同时微观单元变形的扩散形态和

累积效应可能导致整体行政区划形态的不可预测性;而大的变形单元无法体现区域内部的异质特征,使整体变形形态更为可控,同时运算消耗也更小。因此,变形单元尺度选择的原则是:(1)优先选择低于整个研究区域级别的统计单元集合;(2)对于更大尺度的研究区域,如全国地图,选择区县级别能够体现更丰富的细节。

密度权重配置主要依赖研究区域内点、县、面要素的数量,3种类型的绝对密度值一般可用“个/km²”“km/km²”“km²/km²”表达,代入运算前对其进行线性归一化,计算如下:

$$d' = \frac{d_i - \min(d_i)}{\max(d_i) - \min(d_i)} \quad (8)$$

为充分顾及3种不同几何形态的密度权重贡献,采用综合密度权重 d ,计算如下:

$$d = w_1 \times d'_{pt} + w_2 \times d'_{pl} + w_3 \times d'_{plg} \quad (9)$$

式中, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; d'_{pt} 、 d'_{pl} 、 d'_{plg} 分别表示归一化的点、线、面要素的密度权重值。

在实际应用中,考虑到点要素间易压盖的情况,优先给予其更高的权重,一般可按照6:2:2配置。同时,可根据变形结果动态调整3个权重值,使其效果更符合认知习惯。

2 实验结果与认知评价

2.1 研究区域

中国广西南宁市青秀区是南宁政治、经济、科技中心,总面积872 km²,地理范围为108°18'45"E~108°50'29"E,22°39'41"N~23°00'03"N。青秀区既覆盖南宁市中心,又包含大量城郊区域,行政区划整体形态西部窄、面积小、要素集中,东部方正、面积大、要素稀疏,城区地图呈现一种地图要素不均衡、细节不突出的效果。研究区域内主要包含点、线要素,具体数据如表1所示,分布情况如图6所示。

针对制图区域的变换既要考虑密度的均衡性,又要使变形不打破公众对研究区域形状的固有认知,因此需要选择合适的变形单元尺度(S_u)及密度权重值(d)。本文设计了一套针对 S_u 和 d 的调参实验策略,并获得研究区域青秀区的优化参数值。

1)变形单元尺度 S_u 选择。设计多种低于研究区域级别的变形单元,可以是低级别行政区划或管理网格等。本文选择青秀区下辖街道 S_1 和自定义网格 S_2 两个尺度。

2)密度权重值 d 设定。选择研究区域内POI

表1 研究区域数据统计

Tab.1 Statistics of Research Regional Features

行政区划名称	面积/km ²	POI个数	POI密度/(个·km ⁻²)	路网数量/km	路网密度/(km·km ⁻²)
新竹街道	5.1	2 540	498	61.1	12
建政街道	9.6	1 032	107.5	74.2	7.7
中山街道	12.7	1 326	104.4	105.6	8.3
南湖街道	32.9	1 212	36.8	174	5.3
津头街道	37.7	1 606	42.7	197.8	5.2
南阳镇	94.9	21	0.2	19.7	0.2
刘圩镇	159.7	24	0.2	33	0.2
伶俐镇	236.3	43	0.2	59.7	0.3
长塘镇	276.6	792	2.7	258.6	0.9
合计	856.5	8 596		983.7	



图6 研究区域数据分布情况

Fig.6 Distribution of Research Regional Data

和路网两种几何类型要素,分为3种情况取 d 值:

(1) $d=d_{\text{POI}}$; (2) $d=d_{\text{路网}}$; (3) $d=w_1 \times d_{\text{POI}} + w_2 \times d_{\text{路网}}$,且 $w_1 + w_2 = 1$ 。情况3可对 w_1 和 w_2 进行多种情况配置。

3)对上述两种尺度和3种密度权重方式组合生成多种变形地图。分别计算研究区域和变形单元形变度量值,并根据形变值从小到大准备若干幅变形地图集合(M_i),准备开展地图认知实验。

形变度量选择重叠面积比、周长面积比(interior edge ratio, IER)和形状比3个特征指标计算^[26-27]。假设图形 g 为原变形单元, g_i 为其变形后的图形,则有:

重叠面积比为:

$$V(g, g_i) = \frac{A_{g \cap g_i}}{A_g} \quad (10)$$

周长面积比为:

$$V_{\text{周长面积比}} = \frac{P}{A} \quad (11)$$

形状比为:

$$V_{\text{形状比}} = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times A}} \quad (12)$$

$$S_v(g, g_i) = 1 - \frac{|V_g - V_{g_i}|}{\max(V_g, V_{g_i})} \quad (13)$$

式中, $S_v(g, g_i)$ 表示某一特征指标的相似度,其值越高,表示 g_i 与 g 的相似度越高; V_g 与 V_{g_i} 分别表示图形 g 与 g_i 的某一指标; P 表示图形周长; A 表示图形面积。IER指标反映了面积和形状的双重特征;形状比是无量纲值,反映了图形的紧凑度^[28]。

4)开展地图认知实验。邀请若干被试人员,先阅读未变形研究区域地图1 min,然后休息1 min。依次取出上述 M_i ,请被试读图,并选择与原图不一致的图幅,即变形严重影响认知的变形地图。

5)统计分析被试结果,确定最优参数组合。

2.2 认知实验测试样例

按照步骤4),采用线上问卷调查的方法(链接地址: <https://www.wjx.cn/vm/tQpgckZ.aspx>)。调查问卷明确了认知实验任务,展示了变形前的地图,并将结果变形地图作为选项,邀请被试勾选出与原图形状不一致的变形地图,可多选。被试为本科生或硕士生,年龄18~24岁,共得到56份有效问卷。根据本文算法,共设计22份变形地图(见图7),命名规则为 $S_i-w_1-w_2$,其中 S_i 表示统计单元尺度, S_1 为街道, S_2 为自定义网格; w_1 表示POI权重, w_2 为路网权重,且 $w_1 + w_2 = 10$ 。

2.3 认知实验结果及分析

实验过程中发现, S_2 为变形单元时提升了算法数据处理量,影响算法性能,以 S_1 为变形单元,使整体变形形态更为可控,同时运算速度更快。对22份变形地图分别计算其形状相似度,并统计其不一致票数 v_i 及不一致率 d_i , $d_i = v_i/56$,结果如

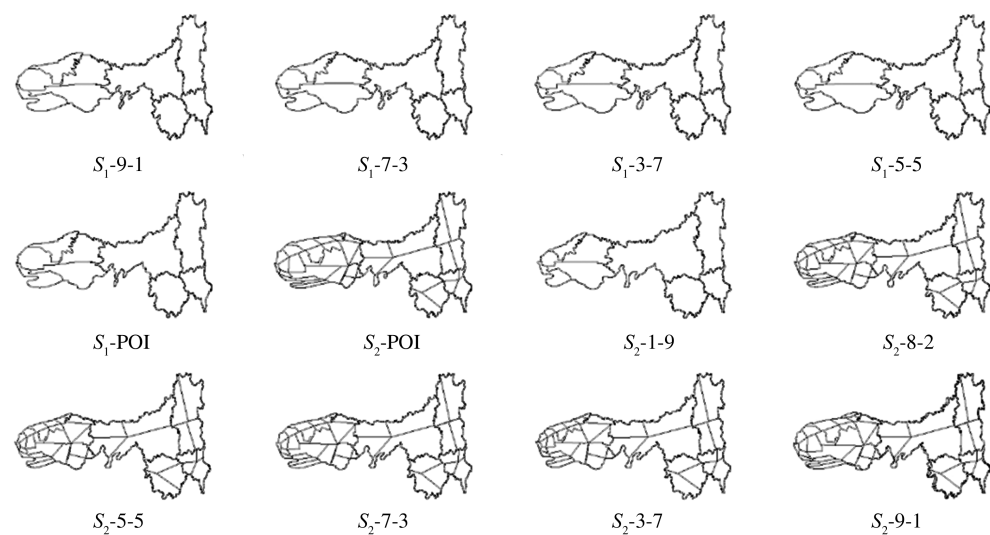


图7 变形地图样例
Fig.7 Samples of Cartogram

表 2 所示。不一致率越高,表示被试认为地图形变相似性低的人数越高,反之亦然。 S_2 -7-3 为不一致率刚好为 0.500 的情况。

表 2 认知实验结果
Tab.2 Cognitive Experiment Results

变形地图编号	形变度量指标				不一致票数	不一致率
	重叠面积比	$S_{\text{周长}}$	$S_{\text{周长面积比}}$	$S_{\text{形状比}}$		
S_1 -9-1	0.746	0.926	0.892	0.908	40	0.714
S_1 -7-3	0.746	0.926	0.891	0.909	40	0.714
S_1 -3-7	0.746	0.925	0.891	0.908	40	0.714
S_1 -5-5	0.747	0.927	0.893	0.910	38	0.679
S_1 -POI	0.776	0.948	0.914	0.931	36	0.643
S_2 -POI	0.775	0.972	0.953	0.963	31	0.554
S_1 -1-9	0.814	0.971	0.954	0.960	30	0.536
S_2 -8-2	0.794	0.974	0.957	0.967	29	0.518
S_2 -5-5	0.803	0.983	0.966	0.975	28	0.500
S_2 -7-3	0.787	0.975	0.961	0.966	28	0.500
S_2 -3-7	0.802	0.983	0.968	0.975	27	0.482
S_2 -9-1	0.770	0.969	0.949	0.961	27	0.482
S_2 -4-6	0.797	0.983	0.967	0.975	26	0.464
S_2 -6-4	0.797	0.981	0.965	0.973	25	0.446
S_1 -2-8	0.814	0.971	0.949	0.960	25	0.446
S_2 -1-9	0.811	0.991	0.975	0.983	24	0.429
S_2 -2-8	0.810	0.990	0.974	0.982	22	0.393
S_2 -路网	0.948	1.000	1.000	1.000	18	0.321
S_1 -4-6	0.952	0.999	0.998	0.999	16	0.286
S_1 -6-4	0.954	0.998	0.997	0.997	15	0.268
S_1 -路网	0.885	0.982	0.966	0.974	10	0.179
S_1 -8-2	0.951	0.996	0.992	0.994	10	0.179

注: $S_{\text{周长}}$ 表示变形前后周长的相似度; $S_{\text{周长面积比}}$ 表示变形前后周长面积比的相似度; $S_{\text{形状比}}$ 表示变形前后形状比的相似度; S_1 -路网、 S_2 -路网表示只考虑路网权重; S_1 -POI、 S_2 -POI表示只考虑POI权重

图 8 为待测试变形地图不一致率与其形变度量指标关系。从图 8 可看出,4 个形变相似度指标与不一致率呈显著的负相关关系,即相似度越低,不一致率越高。按照少数服从多数的投票原则,将投票不一致率 0.5 作为分界点,作一条垂直于横轴的辅助线,将该辅助线与趋势线的交点作为原点,将数据区域分为 4 个象限,异常情况为分布在第一和第三象限的记录。其中,位于第一象限的记录,形变相似度高而不一致率高,称为高估;位于第三象限的记录,形变相似度高而不一致率低,称为低估。探究异常情况,除图 8(a)被低估外,图 8(b)、8(c)、8(d)皆被高估。图 8(a)中异常点主要集中在第三象限,且异常点较多。面积重叠比对于形状细节的刻画欠缺,容易出现图形相似度与认知不一致的情况。例如 S_2 -6-4,与原图产生了一定程度的位移,因此重叠面积较小,重叠面积比较低。但该图与原图细节特征相似,肉眼观察所见变形程度不大,故不一致率较低。图 8(b)、8(c)、8(d)的异常点集中在第一象限,且异常点较少。这 3 个形变度量指标能反映更详细的形态特征。例如 S_2 -8-2 对于图形轮廓的细节保留较好,这 3 个指标反映出的相似度较高,但是该图左边变大、右边变小,面积变形程度较大,故不一致率较高。

综上所述,后 3 种指标能更好地量化形状相似性。针对南宁市青秀区行政区划图的形态控制,应控制 $S_{\text{周长}} > 0.975$ 、 $S_{\text{周长面积比}} > 0.961$ 、 $S_{\text{形状比}} > 0.966$ 的参数配置,能兼顾地图形变以及公众认知的一致性。 S_1 -8-2 更符合公众认知。

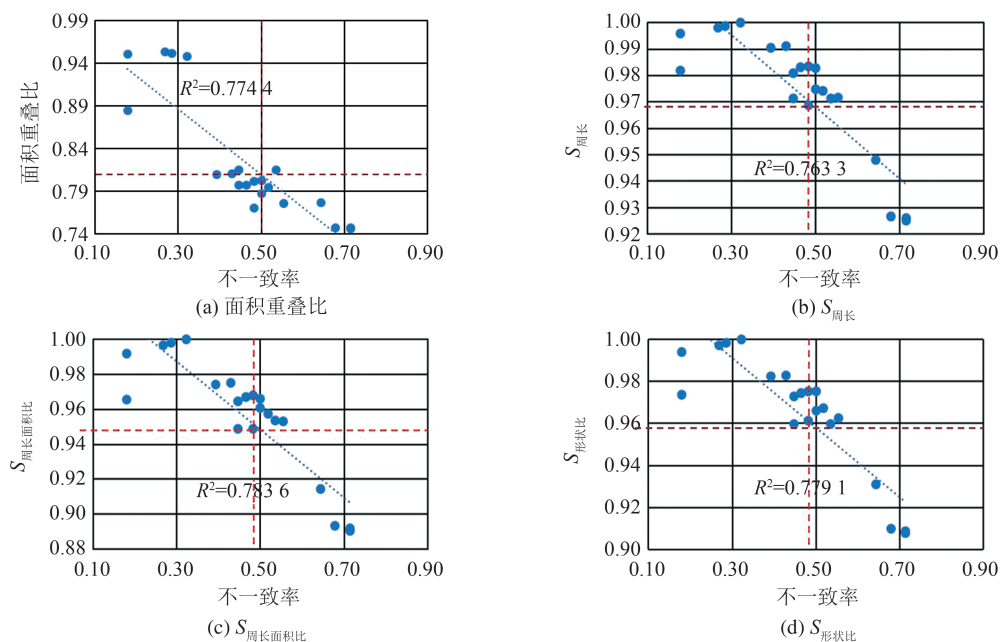


图8 待测试变形地图不一致率与其形变度量指标关系

Fig.8 Relationship Between Inconsistency Rate of Cartogram to be Tested and Its Deformation Measurement Index

3 结 语

针对特定地图要素分布严重不均衡的情况,本文提出了一种基于G-N算法的地图变换算法,兼顾地图要素密度的均衡性和公众对研究区域形状的认知一致性,分别从变形单元尺度的选择、研究区域内制图要素密度权重的配置、形变效果量化评估与认知校正等方面展开了研究。

本文以南宁市青秀区为研究区域,选择下辖街道和自定义网格两个尺度的变形单元,以POI和路网两种几何形态要素不同组合配置密度权重,生成多种变形地图。分别计算变形地图的形变度量值,并开展地图认知实验,获得研究区域的优化参数值。经过实验,获得56份问卷结果,4个形变相似度指标与不一致率呈显著的负相关关系,针对研究区域的形态控制,应确保 $S_{\text{周长}} > 0.975$ 、 $S_{\text{周长面积比}} > 0.961$ 、 $S_{\text{形状比}} > 0.966$ 的参数配置,能兼顾地图形变以及公众认知的一致性。

本文为解决地图要素密度不均衡的问题提供了新的思路。变形后的地图达到视觉平衡,原本要素密度密集的区域面积增加,要素稀疏的区域面积相对缩小;同时,通过调整形变权重参数保持公众地图认知的一致性。后续将进一步研究如何确定最优参数组合,以达到最优的变形表达和认知效果。

参 考 文 献

[1] Feng Tao, Yue Zhilan, Liang Fahong, et al. Several

Issues on the Case Base Construction Aided for the Thematic Maps Design [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(11): 156-159 (冯涛, 岳志兰, 梁发宏, 等. 专题地图设计辅助案例库建设的若干问题[J]. 测绘科学, 2016, 41(11): 156-159)

[2] Li Shifeng. Cartographic Representation of Object Balance Theory [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018 (李士锋. 对象平衡理论的地图制图表达[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018)

[3] Gao Xiaorong, Yan Haowen, Lu Xiaomin, et al. Recognition and Progressive Simplification of Short-Edge Structure of Buildings Using Calculation Regions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1782-1790 (高晓蓉, 闫浩文, 禄小敏, 等. 利用“计算区”进行建筑物短边结构识别和渐进式化简[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1782-1790)

[4] Wu Hehai. Principle of Convex Hull and Its Applications in Generalization of Grouped Point Objects [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 1997, 6(1): 1-6 (毋河海. 凸壳原理在点群目标综合中的应用[J]. 测绘工程, 1997, 6(1): 1-6)

[5] Ai Tinghua, Liu Yaolin. A Method of Point Cluster Simplification with Spatial Distribution Properties Preserved [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 175-181 (艾廷华, 刘耀林. 保持空间分布特征的群点化简方法[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 175-181)

[6] Deng Hongyan, Wu Fang, Qian Haizhong, et al. A Model of Point Cluster Selection Based on Genetic

- Algorithms [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(8): 970-976 (邓红艳, 武芳, 钱海忠, 等. 基于遗传算法的点群目标选取模型[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(8): 970-976)
- [7] Guo Qingsheng. Spatial Reasoning and Progressive Map Synthesis [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007 (郭庆胜. 空间推理与渐进式地图综合[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007)
- [8] Liu Wanzeng, Lu Chenni, Huo Liang, et al. Selection Method of Residential Point Features Constrained by Optimal Information Entropy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1178-1185 (刘万增, 陆辰妮, 霍亮, 等. 最优信息熵约束的居民地点状要素选取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(8): 1178-1185)
- [9] Chen Bo, Wu Fang, Qian Haizhong. Study on Road Networks' Auto-Selection Algorithms [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(12): 2388-2393 (陈波, 武芳, 钱海忠. 道路网自动选取方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2388-2393)
- [10] Deng Hongyan, Wu Fang, Zhai Renjian, et al. A Generalization Model of Road Networks Based on Genetic Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 164-167 (邓红艳, 武芳, 翟仁健, 等. 基于遗传算法的道路网综合模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(2): 164-167)
- [11] Chen Jun, Hu Yungang, Zhao Renliang, et al. Road Data Updating Based on Map Generalization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 1022-1027 (陈军, 胡云岗, 赵仁亮, 等. 道路数据缩编更新的自动综合方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11): 1022-1027)
- [12] Karnick P, Cline D, Jeschke S, et al. Route Visualization Using Detail Lenses [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(2): 235-247
- [13] Wang Liying, Ti Peng, Yu Chonghu, et al. Generation of Variable-Scale Route Maps with Consideration of Distortion Reduction for Small Display Sizes [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(9): 1245-1252 (王俐颖, 逯鹏, 喻崇湖, 等. 顾及形变控制的小屏幕变比例尺交通路线图生成方法[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(9): 1245-1252)
- [14] Chen Yi, Zhao Yunfang, Du Xiaomin. Overview of Cartogram Algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(9): 1970-1978 (陈谊, 赵云芳, 杜晓敏. 变形统计地图构建方法综述[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 1970-1978)
- [15] Hennig B D. Rediscovering the World: Gridded Cartograms of Human and Physical Space [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2011
- [16] Panse C, North S C, Keim D A. Medial-Axis-Based Cartograms [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005, 25(3): 60-68
- [17] Wang Lina. Research on Automatic Construction Method and Application of Cartogram [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (王丽娜. Cartogram 自动构建方法与应用研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2018)
- [18] Feng Yue, Lu Chunxia, Ma Beibei. Spatial Pattern Changes of Grain Supply and Demand in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 566-573 (冯跃, 鲁春霞, 马蓓蓓. 京津冀地区粮食供需的空间格局变化特征[J]. 资源科学, 2009, 31(4): 566-573)
- [19] Houle B, Holt J, Gillespie C, et al. Use of Density-Equalizing Cartograms to Visualize Trends and Disparities in State-Specific Prevalence of Obesity: 1996-2006 [J]. *American Journal of Public Health*, 2009, 99(2): 308-312
- [20] Zhang Xun, Zhong Ershun, Zhang Xiaohu, et al. A Modified Algorithm to Construct Gridded Area Cartograms by Scale Effect Index [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(8): 1100-1104 (张珣, 钟耳顺, 张小虎, 等. 一种尺度效应指数修正的格网数据示意地图制图算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(8): 1100-1104)
- [21] Lawal O, Arokoyu S B. Visualizing Spatial Distribution of Vulnerable Groups and Their Exposure to PM2.5 Using Cartograms [J]. *International Journal of Extensive Research*, 2014, 3: 1-9
- [22] Zhao Guanglong. The Research of China's Higher Education Resource Allocation in Spatial Distribution [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014 (赵光龙. 中国高等教育资源配置空间分布研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014)
- [23] Reyes J J. The Use of Cartograms in School Cartography [M]// Cham: Springer, 2014
- [24] Wu Kang, Long Ying, Yang Yu. Urban Shrinkage in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Yangtze River Delta: Pattern, Trajectory and Factors [J]. *Modern Urban Research*, 2015, 30(9): 26-35 (吴康, 龙瀛, 杨宇. 京津冀与长江三角洲的局部收缩: 格局、类型与影响因素识别[J]. 现代城市研究, 2015, 30(9): 26-35)

- [25] Gastner M T, Newman M E J. Diffusion-Based Method for Producing Density Equalizing Maps[J]. *arXiv*, 2004, DOI: 0401102
- [26] Lang S, Blaschke T. Landschaftsanalyse Mit GIS [M]//Stuttgart:Ulmer Verlag, 2007
- [27] Peter B. Measures for the Generalization of Polygonal Maps with Categorical Data[C]. The 4th ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Beijing, China, 2001
- [28] Imre A R. Compactness Versus Interior-to-Edge Ratio; Two Approaches for Habitat's Ranking[J]. *Acta Biotheoretica*, 2006, 54(1): 21-26

An Improved Map Transformation Algorithm Considering the Balance of Features Density in Cartographical Region

KANG Mengjun^{1,2} YE Lei¹ ZHU Jun¹ WANG Mengqi¹ DU Qingyun¹ WANG Mingjun¹

¹ School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering, Beijing 100027, China

Abstract: Objectives: In the case of uneven distribution of map features, the density difference breaks the visual balance and reduces the beauty of the map. A large number of spatial features are concentrated in the small area, resulting in the contradiction between the display of features and the size of the area. Map details are not prominent, which increases difficulties in obtaining spatial information and is not conducive to decision analysis. The uneven distribution of feature density in mapping area increases the difficulty of map expression. Conventional map expression cannot solve the problem of visual imbalance. **Methods:** Based on Gastner-Newman cartogram algorithm, this paper proposes a map transformation algorithm that balances the feature density and achieve consistent public perception. Various cartograms can be generated through five steps: Designing deformation unit scales, configuring density weight combination of features, applying linear diffusion equation, constructing deformation grids and mapping discrete control points. **Results:** Taking Qingxiu district of Nanning city, China as the research area, we select two scale deformation units of sub-district and custom grid, and configure density weights with different combinations of point of interest and road network geometry features to generate various cartograms. The deformation measurement values of the deformation map are calculated respectively. After cognitive experiments, 56 questionnaires were obtained. Regarding the morphological control of the administrative map of Qingxiu District in Nanning, the parameters configurations should be controlled as in $S_{\text{perimeter}} > 0.975$, $S_{\text{perimeter area ratio}} > 0.961$ and $S_{\text{shape ratio}} > 0.966$. In this way, public cognition can be consistent. **Conclusions:** This study provides a new idea to solve the problem of uneven density of map features. The deformed map reaches visual balance. The area where the original features are dense increases while the area where the features are sparse decreases. By adjusting the deformation weight parameters to maintain the consistency of public map cognition. Subsequently, we will further study how to determine the optimal parameter combination to achieve the optimal deformation expression and cognitive effect.

Key words: map load; information entropy; visual balance; map generalization; map cognition

First author: KANG Mengjun, PhD, associate professor, majors in spatial information visualizing, spatial-decision modeling. E-mail: mengjunk@whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Mingjun, PhD, lecturer. E-mail: dawson.wang@263.net

Foundation support: Fund of Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering(20210211).

引文格式: KANG Mengjun, YE Lei, ZHU Jun, et al. An Improved Map Transformation Algorithm Considering the Balance of Features Density in Cartographical Region[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 2096-2104. DOI: 10.13203/j.whugis.20220022(亢孟军, 叶蕾, 朱军, 等. 一种顾及制图区域要素密度均衡的地图变换算法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(12): 2096-2104. DOI: 10.13203/j.whugis.20220022)