

网络结构空间格局相似度分析—— 以 1938~2014 年北京市骨干交通网络为例

杨 静^{1,2} 程昌秀¹ 李晓岚³ 陈 驰⁴

1 北京师范大学减灾与应急管理研究院,北京,100875

2 昆明理工大学国土资源与工程学院,云南 昆明, 650093

3 中国科学院地理科学与资源研究所,北京,100101

4 中国科学院信息工程研究所信息安全国家重点实验室,北京,100093

摘要:某个区域在不同时间序列、不同尺度序列以及不同区域的格局之间通常存在一定程度的相似性,包括位置、形状、大小等空间特征,也包括非空间特征等。提出了一种“流水模型”空间格局相似性评价方法,引入了空间格局相似度系数和综合空间格局相似度系数。该方法兼顾整体与局部的格局特征,以某一时刻水流覆盖区域代替景观指数值对格局的描述,一定程度上降低了景观指数“一值多形”的不确定性,避免了空间相关性对统计学方法结果的干扰。以 1938~2014 年的北京市骨干交通网络结构数据为例,探讨了不同年度交通网络的相似程度,揭示了历年交通网络格局的变化趋势和格局的变化过程。

关键词:网络结构;空间格局;相似度;流水模型;时间域

中图法分类号:P208

文献标志码:A

景观空间格局分析是研究景观结构组成特征及其空间配置关系的过程^[1]。迄今为止,生态学领域专家已经提出大量景观格局指数,以分析景观及其组分的大小、数目、形状、分布及组合方式;同时也提出了类斑匀度、斑匀度、类斑散度、斑散度等^[2] 景观格局动态度指标,来反映景观生态空间格局的性质和特点。与此同时,空间统计学方法,如空间自相关分析、趋势面分析、谱分析、半方差分析以及克里金空间插值法等,在生态学领域的应用也日趋成熟。以 Fragstats 为代表的景观格局指数计算软件大大推动了国际景观格局研究的快速发展。这些软件大多是通过格局指数的计算定量描述景观的空间形态、结构和异质性,分析同一景观不同时段的空间格局或者对比不同景观不同时段的空间格局动态^[3]。

景观格局数量化评价方法能在一定程度上反映空间格局的变化,并能从多方面分析研究区域的全局统计性规律^[4-6]。分形结构的研究在一定程度上解释了空间格局的相似性^[7]。空间统计学方法在空间格局分析中也得到广泛的应用^[8]。然

而上述方法对空间格局的表达均存在一定程度的“一值多形”问题,即不同的空间格局可以具有相同的景观指数值^[9]。具有同样分维数的物体也可以是不同形状的,例如,在相似维数中,设该物体的几何图形可分为 N 个局部,每个局部按相似比与整体相似,则其相似维数为 $D = \ln N / \ln(1/B)$ 。如果有正方形和长方形两个不同形状,将他们各自 4 等分,则二者均有相似比 $N=4$,但是实际上它们是完全不同的形状。空间统计学方法除了存在“一值多形”问题外,地理数据中普遍存在的空间相关性也与经典统计学样本独立的前提相悖,这会导致使用经典统计学分析空间数据得到的结论是有偏的和非最优的^[10]。

有专家指出,作为景观生态学研究热点之一的空间格局研究通常需要借助地理信息系统^[11]。在地理空间信息领域,一个核心的任务便是描述、表达、判断和推理地理空间实体及其相互关系^[12]。空间相似关系理论是空间关系理论不可或缺的重要组成部分,也是对地理空间目标及其之间关系的描述,需要拓扑、距离、方向、相似等关

系的共同作用,缺一不可。缺少对空间相似关系理论的透彻研究就不能很好地对地理空间对象进行描述^[13]。

本文借助地理信息系统从空间相似性角度提出了一种“以时间换空间”的空间格局相似度评价方法——流水模型法,并进行了实验。

1 原理和基本思路

流水模型首先将空间格局抽象成一个有向管道网络,即将格局的轮廓线想象成一个彼此相通的管道,并固定入水点和出水点。从入水点开始以均匀的流速不断给该管道网络注水,水流沿着管道流淌。由于管道形态不同,不同的时间段水流流过的管道数及管道距离也不相同,某一时刻的流水覆盖面积亦所差异,该覆盖面积包含了管道的形态信息。因此,只要保证水流流速一致,某段时间内的流水覆盖面积就能反映网络的组成结构及其形态大小。若两种格局的管道网络形态相似,某时间序列内对应的流水覆盖区域面积应比较一致;若两种格局具有不同细节分布形态的管道网络,则该时段的流水覆盖面积就会有所区别。

1.1 流水模型的算法

基于上述流水模型原理,本文以组成“管道”的线数据为基础,设计了流水模型算法如下。

(1) 线数据有起点 ID_{start} 和终点 ID_{end} 两个属性。水流从 ID_{start} 流向 ID_{end},首先通过循环检索,得到入水点 ID_{start},从而得到对应的入水线 Polyline₁,即水流是从该线开始不断流入的;

(2) 某一时刻,水流流量即为水流流过的长度,当入水线(Polyline₁)的长度 Length₁ 大于该水流长度时,记录该水流最终流到的点 Point₁;当 Length₁ 小于该水流长度时,转到步骤(3);

(3) 继续检索与当前线段连接的其他线段,即 Polyline₁ 的终点 ID_{end} 即为连接线段 Polyline₂

的起点 ID_{start},此连接线段的长度为 Length₂。若 Length₁ 与 Length₂ 之和依然小于水流流量,则继续检索与 Polyline₂ 的连接线段,并继续循环类似操作;若大于水流流量时,则记录该流水点 Point₂;

(4) 记录该时刻下水流流过的线段 WaterPastLines,水流正在流的线段 WaterPassingLines,以及水流流到的点 WaterPoints;

(5) 将 WaterPoints 的纵坐标按照从大到小的顺序排列,连接形成对应的水头线段;将水流流过的线段,水流正在流经的线段及水头线段形成闭合区域,记录该时刻下水流流量及对应的闭合区域。

模拟开始前需要固定入水点和出水点位置来有效控制水流流向,模拟实验中需要根据多次试验选择最合适的水流流速和时间点来模拟相应时刻的流水覆盖面积。

以图 1 为例,固定入水点和出水点,从入水点开始不断给网络管道注水,水流流速为 300 m/s,记录不同时刻的流水区域。流水区域为水流流过的管道与水流到达点相连形成的闭合区域,该区域包含了对应时刻的管道形态信息,当某一区域形态不同时,流水区域会有所差别。图 2(a)~2(c)依次为 1 s、2 s、3 s 时该网络对应的流水覆盖图。这种“以时间换空间”的思想不用考虑具体的管道空间分布形态,但是某种程度上能反映出管道的细节形态信息。

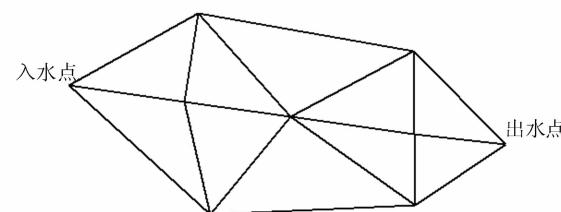
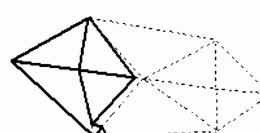


图 1 示例网络图

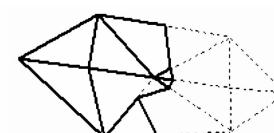
Fig. 1 Example of Network Diagram



(a) 流水 1 s 覆盖的情况



(b) 流水 2 s 覆盖的情况



(c) 流水 3 s 覆盖的情况

图 2 注水时间为 1 s、2 s、3 s 对应的流水覆盖图

Fig. 2 Current Water Coverage Maps Overlays on 1 s, 2 s, and 3 s

1.2 基本思路

相似度评价是针对两种格局的比较。为了表

征不同时刻格局的差异,我们依次记录每一时刻流水覆盖的形态信息。实验中利用空间格局相似

度系数 S 来描述格局相似性。该系数记录了对应时刻的格局相似程度,反映了该时刻的格局差异信息。以记录时刻为横轴,空间格局相似度为纵轴,绘制相似度曲线。该曲线能直观地表达格局随时间的变化情况,局部区域的相似程度会随着曲线的走势明显体现。但该系数只限于整体格局的局部(某一流水时刻)相似性评价。为了满足整体格局的评价需要,本文以各时刻的空间格局相似度系数为统计数据,计算得到综合空间格局相似度系数 S_{synth} 。 S_{synth} 值综合了水流流完一个完整格局的所有时刻点的格局相似度信息,代表了该组数据的相似性属性,能够直接表达两种格局的整体相似程度。

当有多个格局进行比较时,首先选定一标准格局,其他格局与标准格局逐次比较。根据误差累加效应,如果与标准格局比较的相似度值接近,则其他格局之间的空间格局也彼此相似;反之,则相差较多。表达空间格局相似度的多条曲线会根据相似度值的差异大小自动聚类,综合空间格局相似度曲线直接表达两两格局的相似度。

1.3 空间格局相似度系数

空间格局相似度系数用来描述不同格局同一时刻的相似程度,不同时刻的系数值大小揭示了格局的细节信息。本文用 Jaccard 系数作为空间格局相似度系数,Jaccard 系数也称共同出现百分率,是变化范围在 0~1 的无中心指数,包含 0 和 1^[14],相似度值越大表示相似度越高。文献[4]指出了作为多点相似性评价方法之一的该系数在相似性评价中的重要性^[15]。本文将面看成许多连续的点,Jaccard 系数是流水覆盖面积间的交集 I 与并集 U 的比值。如果两幅图的空间格局比较相似,则同一时刻的流水覆盖面积也比较接近。此时可将两格局叠加比较其流水覆盖面积差异得到相似度。这样不仅考虑到了形状信息又包含了各自的位置信息:

$$S = I/U \quad (1)$$

式中, S 值介于 0~1, S 值为 1 表示两格局完全相似, S 值为 0 则表示完全不相似。 S 值的大小与格局间的相近程度呈正相关。

1.4 综合空间格局相似度系数

综合空间格局相似度系数从整体上来描述格局间的相近程度。近年来,通过求相似性平均值的多点相似性指数已经被用来计算包含多点数据的数据组的综合相似性,但是这种平均相似度系数忽略了相似值间的相关性^[19],试验中不同时刻的数据之间是彼此相关的。本文以整体格局为单位,将

水流流完整个格局所记录所有时刻的空间格局相似度系数为统计数据,用变异系数(coefficient of variation, CV),即统计数据的标准差(σ_s)与均值(μ_s)的比值来综合反映每组数据的变异程度:

$$CV = \sigma_s / \mu_s \quad (2)$$

实验中,为了便于人们对相似度的直观理解,将变异系数转化成 1 与变异系数的差值来表示综合空间格局相似度:

$$S_{\text{Synth_sim}} = 1 - CV \quad (3)$$

该值的大小与格局间的相近程度呈正相关。

2 实例验证

2.1 数据准备

本文搜集了北京各历史时期的地图以及道路建设资料,选取了 1938 年、1967 年、1970 年、1984 年、1993 年、2001 年、2005 年、2007 年、2012 年、2014 年共 10 个时间评价点。经数据矢量化和地图配准得到各节点的路网格局示意图,如图 3 所示。

北京市的路网结构以“棋盘+环形+放射”形式不断向外扩张。从 20 世纪 30 年代的北京地图上可以看出,循着城墙,北京城有一条环城铁路,在城外形成一条运输线,它与前门东西的两座车站连成一体,直达外埠。后来随着交通的发展,环城铁路渐渐成为障碍而被拆除,被之后的二环路所取代。北京三环路始建于 20 世纪 50 年代,直到七十年代还没有形成完整的环路,因为长期缺少“西环路”,南、北、东三段便被俗称“三环路”。三环路于 20 世纪 80 年代初期打通全环,并正式命名为“三环路”。在 1990 年北京举行第 11 届亚运会之前,四环路的部分路段就已经建成并通车,但整个四环路的建设持续了十余年,到 2001 年 6 月,整个四环路全部连成一体。五环路于 2000 年 11 月开工,至 2003 年 10 月底完工。北京六环高速路作为国庆 60 周年献礼工程,于 2009 年 9 月 12 日实现全线贯通。

2.2 实验流程

本文实验以 2014 年道路格局为基准格局,其他时间节点均与其作相似性评价,由此推断出各时间节点间道路网络格局的相近程度。实验过程如下。

- 1) 运用流水模型依次模拟 1938~2014 年各个时间节点在 1~24 s 的 24 个时刻的空间格局,并予以记录。由于目前模型的水流只能集中向一个方向流动,因此实验的入水点均选定为左上方同一点。对于格局中没有该点的情况,则先假设设

该点存在，并引辅助线连接到被模拟格局。如图4所示。

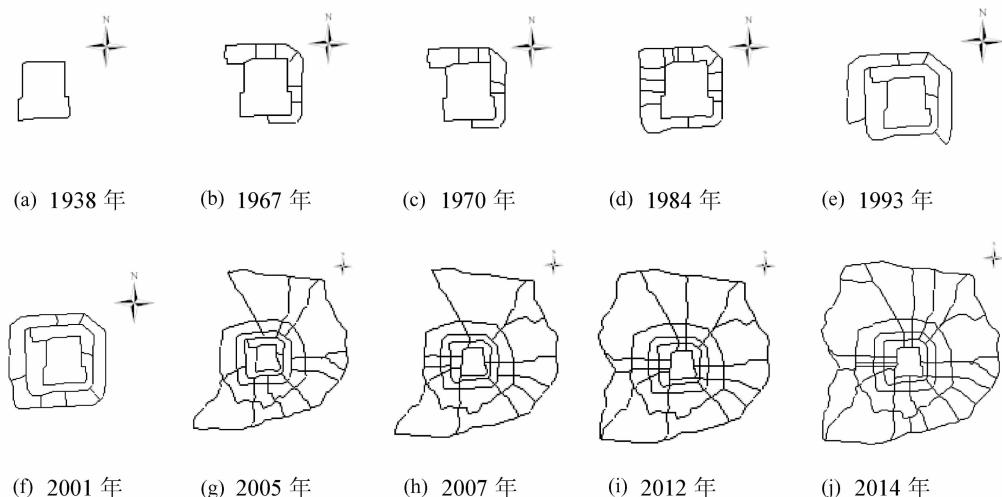


图3 北京市历年路网格局示意图

Fig. 3 Road Network Pattern Sketches of Beijing in Different Years

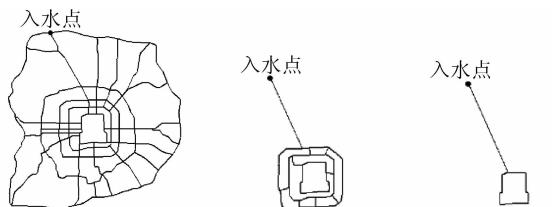


图4 2014年、2001年、1938年流水模型入水点示意图

Fig. 4 Entrance Points on 2014, 2001 and 1938 Water Network

2) 计算相应时刻以2014年为基准的其他各个时间节点间空间格局相似性值和综合空间格局相似性值。对应曲线图如图5、图6所示。

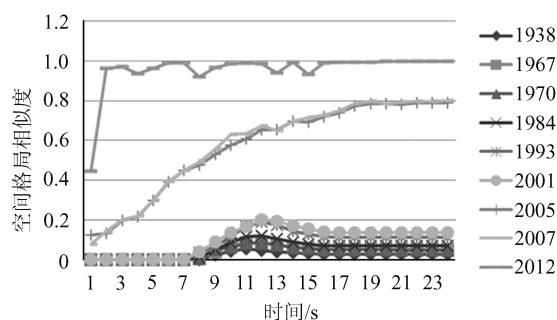


图5 空间格局相似度

Fig. 5 Similarities of Spatial Patterns

本文对北京市多年的骨干网络道路进行了研究。图5中的每条曲线的波动情况表示了每个时刻格局间的相近程度，曲线根据相近程度自动聚类。曲线与基准格局空间结构形态越相似，则曲线复制越逼近1，差异越大则曲线越远离1。可以看出，2012年与2014年空间格局相似度最接近

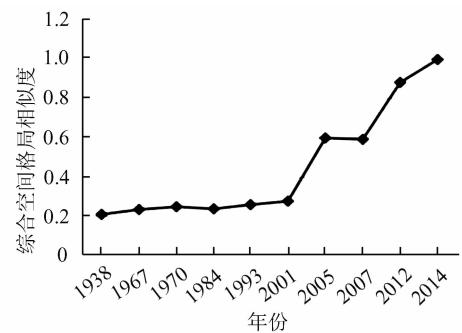


图6 综合空间格局相似度

Fig. 6 Synthesized Similarities of Spatial Patterns

1,据此推断2012年与2014年空间结构和形态在这几年当中最接近;1938~2001年间空间格局相似度均保持在0.2以下,据此推断出1938~2001年间空间结构和形态均与2014年相差较大,与实际格局相吻合;空间格局越相似则相似度曲线越接近,2005年和2007年空间格局相对接近,则它们的曲线位置及波动情况均保持一致。

不同时刻的空间格局相似度系数值代表该时刻水流覆盖的格局相似度信息,揭示了格局的细节。以2012年为例,水流开始2 s内,其空间结构和2014年有一定差异,相似度仅为0.4,因此曲线发生明显波动,之后格局基本相似曲线则一直保持相对平稳状态。2007年的空间结构在水流开始一段时间与2014年相似度值较低,可以推断在这段时间内的空间结构有很大差异。结合实际格局,2007年西六环还未完全竣工,因此与2014年结构差异较大。随着水流时间的推移,水流逐渐流向右下角,2014年和2007年右下角的

空间格局渐渐保持一致,空间格局相似度曲线越来越趋近于 1,可见 2014 年和 2007 年的空间格局是由不相似到逐渐相似的变化过程。

综合空间格局相似度曲线综合了各个时刻的相似度信息,从整体来描述两格局间的相近程度,综合考虑了每一部分细节差异的影响,较景观格局指数值等用单一值描述景观格局再通过值来判断格局间的相似程度更加精确完善。从该曲线可以看出,1938 年起,道路网络格局不断向 2014 年靠拢。1938~2001 年格局综合相似度保持在 0.2 ~0.3 之间,彼此综合相似度差异值不超过 0.1;2001 年和 2005 年之间发生突变,相似度相差 0.3;2005 年和 2007 年又保持相对稳定状态,几乎未发生改变;2007 年~2012 年间,相似度相差 0.2,再次发生跳跃性变化;2014 年和 2012 年间相似程度也相对接近,保持在 1.5 范围内,与实际情况基本吻合。

3 结语

北京市道路网络格局的实例表明,本文采用的流水模拟分析方法可以描述网络空间格局的分布规律和变化趋势。空间格局相似度曲线反映了格局的局部变化情况,同时定性反映了格局之间随着流水覆盖面积变化而呈现的相近程度;格局综合相似度值定量得出两格局的整体相似度,其曲线又揭示空间格局的变化规律。

该方法兼顾格局的整体与局部特征,既考虑了格局的形态大小信息又考虑了位置信息,同时减轻了传统值描述格局信息的“一值多形”不确定性,并避免了空间相关性对统计学方法所得结果的干扰,流水模拟空间格局相似性的判断方法是对常规空间格局分析方法的有益补充。

流水模型空间格局相似性评价方法刚刚起步,还有很多问题有待完善,具体如下。

本文选择属性均一的网络结构为实验对象,但格局通常和属性相关联,仅仅从图形的结构上归纳特征是不够符合实际的,在后续的研究中应考虑如何在流水模型中增加对格局的属性特征的考量。

同一实验的所有流水模拟图都固定在同一个人水点,所以随着模拟时间的推移格局信息依次叠加,局部格局信息得不到自适应表达。找到一个自适应的流水模拟方法也是研究的焦点。

实验中入水点和出水点的选择会对实验结果有一定影响,如何选择入水点和出水点也是值得

深思的一个问题。同时,流水模拟实验参照对象的选取对结果的影响程度如何还有待大量实验验证。

参 考 文 献

- [1] Cao Yu, Ouyang Hua, Xiao Dunling, et al. Landscape Patterns Analysis Based on APACK for Ejin Natural Oasis [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 776-785(曹宇,欧阳华,肖笃宁,等. 基于 APACK 的额济纳天然绿洲景观空间格局分析[J]. 自然资源学报,2004,19(6):776-785)
- [2] Zhao Jingzhu. The Dynamic Indicator System for Measurement of Spatial Pattern in Landscape Ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 10(2): 182-186(赵景柱. 景观生态空间格局动态度量指标体系[J]. 生态学报,1990,10(2):182-186)
- [3] Lv Yihe, Chen Liding, Fu Bojie. Analysis of the Integrating Approach on Landscape Pattern and Ecological Process [J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 1-10(吕一河,陈利顶,傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析[J]. 地理科学进展,2007,26(3):1-10)
- [4] Zhang Jintun, Qiu Yang, Zheng Fengying. Quantitative Methods in Landscape Pattern Analysis [J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(4): 346-352(张金屯,邱扬,郑凤英. 景观格局的数量研究方法[J]. 山地学报,2000,18(4):346-352)
- [5] Tao Yu, Li Feng, Wang Rusong, et al. Research Progress in the Quantitative Method of Urban Green Space Patterns [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2 330-2 342(陶宇,李峰,王如松,等. 城市绿色空间格局的量化方法研究进展[J]. 生态学报,2013,33(8):2 330-2 342)
- [6] Li Jianping, Gao Feng, Zhang Bai. Research on Dynamic Change of Landscape Pattern of Jilin Province from 1980 to 2000 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 364-367(李建平,高峰,张柏. 吉林省近 20 年景观空间格局动态变化研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(4):364-367)
- [7] Huang Yao. Fractal Study on Spatial Park Scenic [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010(黄曜. 风景名胜区景区空间结构分形研究[D]. 雅安:四川农业大学,2010)
- [8] Wang Yaoge, Wang Zhiwei, Zhu Changqing. Analysis of Digital Terrain Error Based on Spatial Auto-correlation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1 259-1 262(王耀革,王志伟,朱长青. DEM 误差的空间自相关特征分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,

- 33(12):1 259-1 262)
- [9] Wu Jianguo. Landscape Ecology——Pattern, Process, Scale and Level [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000(邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000)
- [10] Wang Jingfeng. Space Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2006(王劲峰. 空间分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006)
- [11] Xiao Dunling, Su Wengui, He Hongshi. The Development of Landscape Ecology and Its Application [J]. *Journal of Ecology*, 1988, 7(6): 43-48(肖笃宁, 苏文贵, 贺红士. 景观生态学的发展和应用 [J]. 生态学杂志, 1988, 7(6): 43-48)
- [12] Ding Hong. A Study on Spatial Similarity Theory and Calculation Model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004(丁虹. 空间相似性理论与计算模型的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004)
- [13] Liu Tao. Similarity of Spatial Group Objects [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(刘涛. 空间群(组)目标相似关系及计算模型研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011)
- [14] Li Jianmin, Xie Fang, Chen Cunji, et al. Interspecific Association of Dominant Species in Betula Luminifera Natural Forest Communities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 168-170(李建民, 谢芳, 陈存及, 等. 光皮桦天然林群落优势种群的种间联结性研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 168-170)
- [15] Jurasinski G, Jentsch A, Retzer V, et al. Detecting Spatial Patterns in Species Composition with Multiple Plot Similarity Coefficients and Singularity Measures [J]. *Ecography*, 2012, 35 (1): 73-88

A Similarity Evaluation Method on Spatial Patterns of Network Structures: A Case Study About Beijing Traffic-network Backbones from 1938 to 2014

YANG Jing^{1,2} CHENG Changxiu¹ LI Xiaolan³ CHEN Chi⁴

1 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

3 Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

4 Institute of Information Engineering, State Key Laboratory of Information Security, Beijing 100093, China

Abstract: Similarities exist in spatial patterns over time, such as in serial landscapes of an area at different times, serial expressions of an area in difference scale maps, spatial patterns in different areas and so on. These similarities often refer to spatial attribute (i.e., location, shape, size) and non-spatial attribute data (i.e., type, quality). This paper presents a “flowing water model” to evaluate similarities between different spatial patterns. Both global and local situation of landscape features are considered in this method. This method uses flow overlay areas for time points to describe the landscape patterns instead of landscape indexes. To some extent it avoids the uncertainty that one value may describe more than one type of landscape index and disturbances in spatial correlation. We explored the similarities of Beijing traffic-network backbones from 1938 to 2014, revealing the tendency of the traffic-network pattern and change in this pattern over time.

Key words: network structure; landscape pattern; similarity; flowing water model; timeline

First author: YANG Jing, master, specializes in the theories and methods of the special pattern. E-mail: yangjing@lreis.ac.cn

Corresponding author: CHENG Changxiu, PhD, professor. E-mail: chengcx@bnu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41222009, 41271405; the Open Research Fund Program of Key Laboratory of Information Safety, No. 2013-3-2.