

线性抽样及分形理论在景观异质性研究中的应用

武鹏飞^{1,2,3}, 周德民^{1,2,3}, 官辉力^{1,2,3}

(1. 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048;

2. 教育部三维信息获取与应用重点实验室, 北京 100048; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 景观异质性是景观生态学研究的核心, 对景观格局、动态和功能具有决定作用。将线性抽样与分形理论相结合的方法应用于景观空间异质性的表达中, 相比于传统方法, 可以定量表达景观类型在空间序列中的组合规律, 而该组合规律可以作为指标来测度景观空间异质性的高低。景观类型在空间序列中的组合越复杂, 则景观的空间异质性越高。该方法以景观类型空间序列的线形图像为基础, 利用分形理论计算线形图像的分维, 以分维数值的大小来表达景观空间异质性的高低。但样线的布设方法、分维计算方法以及景观分类系统的不同都会对分维数值产生影响。以奶水河流域为试验区, 对该方法的适用性进行验证, 结果表明, 该方法可以有效表达景观空间异质性的高低。

关键词: 景观异质性; 分形理论; 线性抽样; 奶水河流域

1 引言

景观异质性是景观生态学的核心, 也是景观生态学研究的一个热点问题^[1], 对景观结构、功能、动态和性质具有决定作用^[2]。各国学者对景观异质性进行了大量研究。景观异质性指数、地统计分析、线性抽样和分形理论等是景观异质性研究的常用方法^[3]。多样性、镶嵌度和破碎化等景观异质性指数常被用于景观异质性研究中^[4], 但这些指数注重于景观整体结构差异的一般统计学特征, 而对景观类型之间的数量关系以及空间组合规律较少涉及^[5]。空间自相关作为地统计分析方法的代表, 在景观异质性研究中也有应用^[6], 但该方法也存在一定局限性。地统计方法注重于研究空间连续数据的变化规律和趋势, 而在实际研究中, 景观数据往往是空间非连续数据^[7]。线性抽样方法是景观异质性研究的常用方法^[8], 研究结果主要是以样线上不同景观类型的出现频率或所占比例来表达景观类型空间分布的异质性, 侧重于表达景观类型的数量组合关系^[9]。分形理论目前主要是作为景观异质性研究的一种辅助方法, 主要用于确定景观异质性研究的适宜尺度, 或用于斑块异质特征的表达, 很难实现对景观类型数量组合关系的有效表达^[10]。还有学者利用距离系数、面向对象技术对景观异质性进行研究^[11,12]。虽然景观异质性的定量表达方法很多, 但各种方法的侧重点不同, 且通用性差。概而言之, 现有研究主要实现了景观类型之间的数量关系表达, 以及景观整体结构差异的一般统计学特征描述。而本文认为, 景观异质性研究的重点应该是景观类型空间组合规律的挖掘, 即景观类型的空间序列特征。

线性抽样方法与分形理论的结合可以实现对景观类型空间组合规律的表达。线性抽样

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2013-05-12

基金项目: 国际科技合作项目 (2010DFA92400); 北京市自然科学基金项目 (8082010, 8101002)

作者简介: 武鹏飞 (1984-), 男, 北京通州人, 博士研究生, 主要从事LUCC及景观生态学研究。

E-mail: wupf30@163.com

方法用来提取景观类型的空间序列特征，利用笛卡尔坐标系将景观类型的空间序列特征转化为线形图像，横轴代表样线长度，纵轴代表景观类型。分形理论中的分维可以对线形图像的复杂性，即对景观类型空间序列复杂程度进行定量表达。原则上，景观类型的空间组合规律越复杂，则景观的空间异质性越高。因此，分维也可以作为一种景观异质性指数来定量表达景观的异质性信息。目前，该组合方法主要用于植被、土壤物理特性、热环境的异质性研究^[13-15]，针对景观空间异质性的研究尚不多见。

1967年Mandelbrot在《Science》上发表了题为《英国海岸线有多长》的文章^[16]，随后分形理论应运而生。分形理论目前主要用于研究自相似性和不规则性^[17]。本文主要应用分形理论来表达不规则性，也就是复杂性和异质性。目前，分维的常用计算方法主要是步长法和网格法，这两种方法需要通过大量不同粒度的重采样来实现^[18]。还有学者利用半方差、缓冲区分析等方法来计算分维数^[13,19]。半方差方法同样需要进行多次试验，需要大量的时间和精力；缓冲区分析方法与步长法的原理相似，步长法需要对线形要素进行多次不同粒度的重采样，而缓冲区分析方法只需要对线形要素以一定的间隔同时进行多个缓冲区分析即可实现，大大节省了工作量。相对而言，利用缓冲区分析方法计算分维数是一种简单、可行的方法。

本文以妫水河流域为研究区，以2009年8月28日的Landsat 5 TM影像为数据源，对线性抽样与分形理论相结合的方法在景观空间异质性研究中的适用性进行验证。研究区位于北京市西北部，区内海拔差异明显，地貌类型多样，且森林、农田、水域、建筑等多种景观类型在研究区内广泛分布，该区域具有明显的景观异质性。本文对TM影像进行解译得到景观矢量分布数据，将景观矢量分布数据进行栅格化，以样线提取的栅格序列所形成的线形图像为研究对象，计算每条线形图像的分维，以分维的大小来定量表达景观类型空间组合规律的复杂程度及其景观空间异质性的高低。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

妫水河流域位于北京市西北部，地处华北平原北部。研究区的主要县级行政区包括北京市延庆县、河北省张家口市怀来县和涿鹿县等，经纬度范围为：39°32'13"-41°8'6"N、114°55'19"-116°37'37"E，海拔高度在469-2381 m之间，总面积为2387.47 km²（图1）。研究区四周地势较高，以山地为主，中部地势较低，属平原区，官厅水库分布在研究区的中部。区内景观异质性较高。研究区左侧气候相对干旱，经济相对落后，森林、草地等人为干扰较少的景观类型明显多于其他地区；区中部地势较低，官厅水库分布在该区域，气候湿润；右侧位于妫水河的上游，气候相对湿润，经济相对发达，农田、建筑等人为干扰较多的景观类型明显多于其他地区。

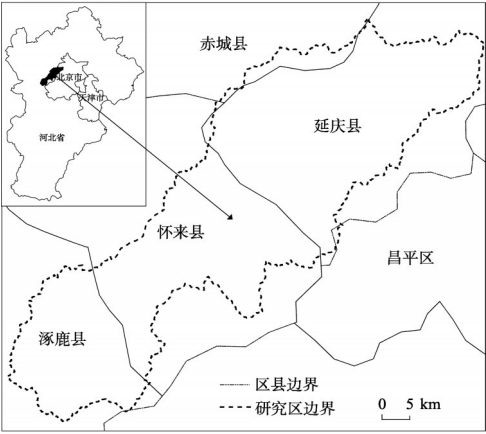


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

2.2 基础数据及处理

以2009年8月28日的landsat 5 TM数据为基础数据，影像轨道号为124-32，采集时天气条件较好，天空云量小于5%，有利于影像解译。对原始影像进行波段组合、增强、几何校正、裁剪等预处理工作，得到研究区预处理后影像。利用目视解译和决策树分类方法，结合Google Earth、统计年鉴等其他工具，以及实地调查、走访结果对影像进行解译。结合数据源及研究区实际情况。将研究区划分为8种景观类型（表1）。首先利用实地调查、走访结果结合Google Earth的高空间分辨率影像对影像进行目视解译，对目视解译方法不能确定的区域，本文根据宫兆宁等^[20]对该地区秋季地物光谱的研究，采用决策树分类方法对不确定区域进行分类，得到研究区的景观分布图。利用统计年鉴^[21]以及2010年实地抽样验证的方法对解译结果进行检验，结果表明各种景观的解译正确率均在90%左右，满足分类精度要求。

2.3 线性抽样方法

由于研究区呈现狭长分布特征（图2），且水域和陆地生态系统在研究区内的分布存在明显差异，不利于样线的布设。因此，对研究区进行子区域划分。官厅水库作为研究区内最大的水域生态系统分布在研究区的中部，本文以官厅水库为基础进行10 km的缓冲区分析，缓冲区将研究区划分为3个子区域（图2）。A区域位于研究区的左侧，气候相对干旱；B区域位于中部，也就是官厅水库的10 km缓冲区区域，地处官厅水库腹地，气候相对湿润；C区域位于右侧，作为奶水河的上游，气候介于A区域和B区域之间。

由于研究区地处延怀盆地，且呈现狭长状分布，各种景观类型又以官厅水库为中心大致呈现圈层分布特征，这使得传统的平行样线在本研究中的应用受到限制，所以采用放射状样线对研究区的景观异质性进行研究。为了使样线尽可能多地表达地表景观异质性信息，利用ArcGIS软件寻找每个子区域的最大内切圆，以最大内切圆的圆心为样线起点，以最大内切圆的边界为样线终点，分别在每个子区域的16个空间方向（N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW、NNW）上构建样线，

表1 研究区景观分类系统

Tab. 1 Landscape classification system of the study area

景观类型	代码	含义
森林景观	1	除果园景观以外的天然或人工生长的乔木及灌木的区域
果园景观	2	种植以采集果、叶为主的集约经营的多年生木本和草本植物的区域
草地景观	3	天然生长草本植物的土地
水体景观	4	河流、湖泊、鱼塘、水库、集雨池、污水池、拦河坝及蓄水区等水体景观面积
建筑景观	5	城乡、居民点、垃圾场、工矿、畜禽养殖用地及内部道路
农田景观	6	用于种植农作物、蔬菜等的土地以及田间道路和水渠
交通景观	7	国省市县级公路、铁路、机场
其他景观	8	滩涂、荒地、裸岩、沙地等未利用地

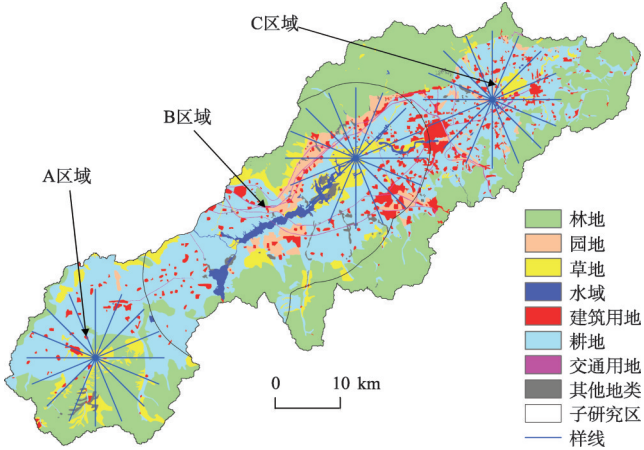


图2 子区域、样线及景观类型分布图

Fig. 2 Distribution of subareas, sample lines and landscape types

共计 48 条样线，提取地表景观异质性信息（图 2）。

2.4 分维计算

本文利用邓敏等^[19]提出的利用缓冲区分析计算分维的方法，来计算本文中样线线形图像的分维。缓冲区可以平滑曲线形状，保持曲线的基本特征，并除去空间尺度上小于缓冲区半径的细节。其基本原理与步长法相似，假设缓冲的半径依次设为 r_1 、 r_2 、 \cdots 、 r_n ，生成缓冲区的周长依次为 BP_1 、 BP_2 、 \cdots 、 BP_n ，那么利用第 i 次缓冲周长计算得到的曲线长度 (L_i) 可以表达为：

$$L_i = (BP_i - 2\pi r_i) / 2 \tag{1}$$

然后利用与步长法和网格法相似的方法，根据式（1）建立观测尺度（ r ）与测度值（ L ）之间的点对序列，建立回归方程（式 2）：

$$L = M \times r^{1-D} \tag{2}$$

式中： M 为待定常数； D 为被测线形图像的分维。

对式（2）两侧同取双对数，可得式（3），进而可以计算得到分维 D 。

$$\lg L(r) = (1 - D) \lg r + C \tag{3}$$

式中： C 为待定常数； $1-D$ 为式（3）的斜率值，分维 $D=1-k$ （该式斜率值）。

在计算分维之前需要确定式（3）的无标度区间，只有在无标度区间内计算的分维数才有意义。利用蔡金华等^[22]的研究结果确定无标度区间，其计算公式如式（4）所示：

$$\begin{aligned} r_1 &= \exp[\ln r_{\min} + 0.2113(\ln r_{\max} - \ln r_{\min})] \\ r_2 &= \exp[\ln r_{\min} + 0.7887(\ln r_{\max} - \ln r_{\min})] \end{aligned} \tag{4}$$

式中： r_1 和 r_2 分别是无标度区间的下界和上界； r_{\min} 和 r_{\max} 分别是拟合区间的最小尺度和最大尺度。

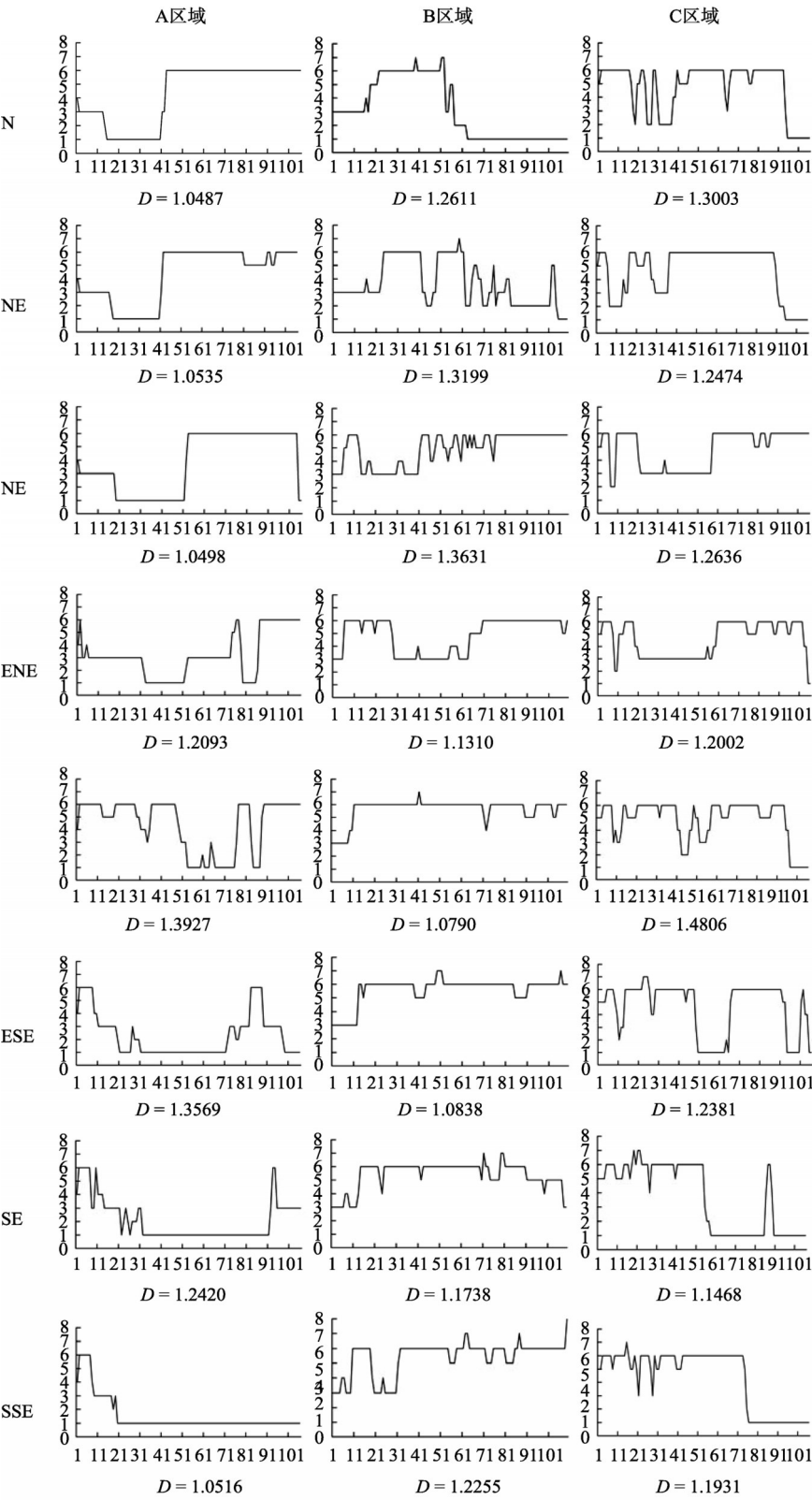
3 结果分析

利用线性抽样方法提取研究区景观类型的空间组合序列，并通过线形图像对研究区景观类型的空间组合进行可视化表达（图 3）。折线图中横轴代表样线从起点到终点的栅格数，纵轴代表表 1 中的景观类型代码，为了使景观类型 1 与横轴不重合，在纵轴中加入了没有实际意义的景观类型 0。原则上图中的折线波动越多，景观类型的空间组合规律越复杂，相应样线所在地区的景观空间异质性越高。

分维可以对线形图像的复杂性进行定量表达。利用 ArcGIS 软件对图 3 中每个样线线形图像进行 200 个间隔为 1 m 的缓冲区分析，进而计算每个样线线形图像的分维（图 3）。

景观空间异质性在研究区内存在明显差异（图 3）。A 区域中分维最小的是 N 方向的样线，最大的是 SSW 方向的样线；B 区域中分维最小的是 E 方向的样线，最大的是 NE 方向的样线；C 区域中分维最小的是 S 方向的样线，最大的是 E 方向的样线。在整个研究区中，分维最大的样线是 A 区域中的 SSW 方向的样线，最小的是 A 区域中的 N 方向的样线。分维大小直接反映了样线所在地区景观空间异质性的高低。由图 3 可知，A 区域中分维较大的样线主要是 E、ESE、S、SSW 和 SW 方向的样线；B 区域中分维数较大的样线主要是 NE、N、WSW、NNE 方向的样线；C 区域中分维较大的样线主要是 N、E、NE、ENE 和 NNE 方向的样线。

样线提取的线形图像的分维可以定量表达景观类型空间组合规律的复杂程度，也就是



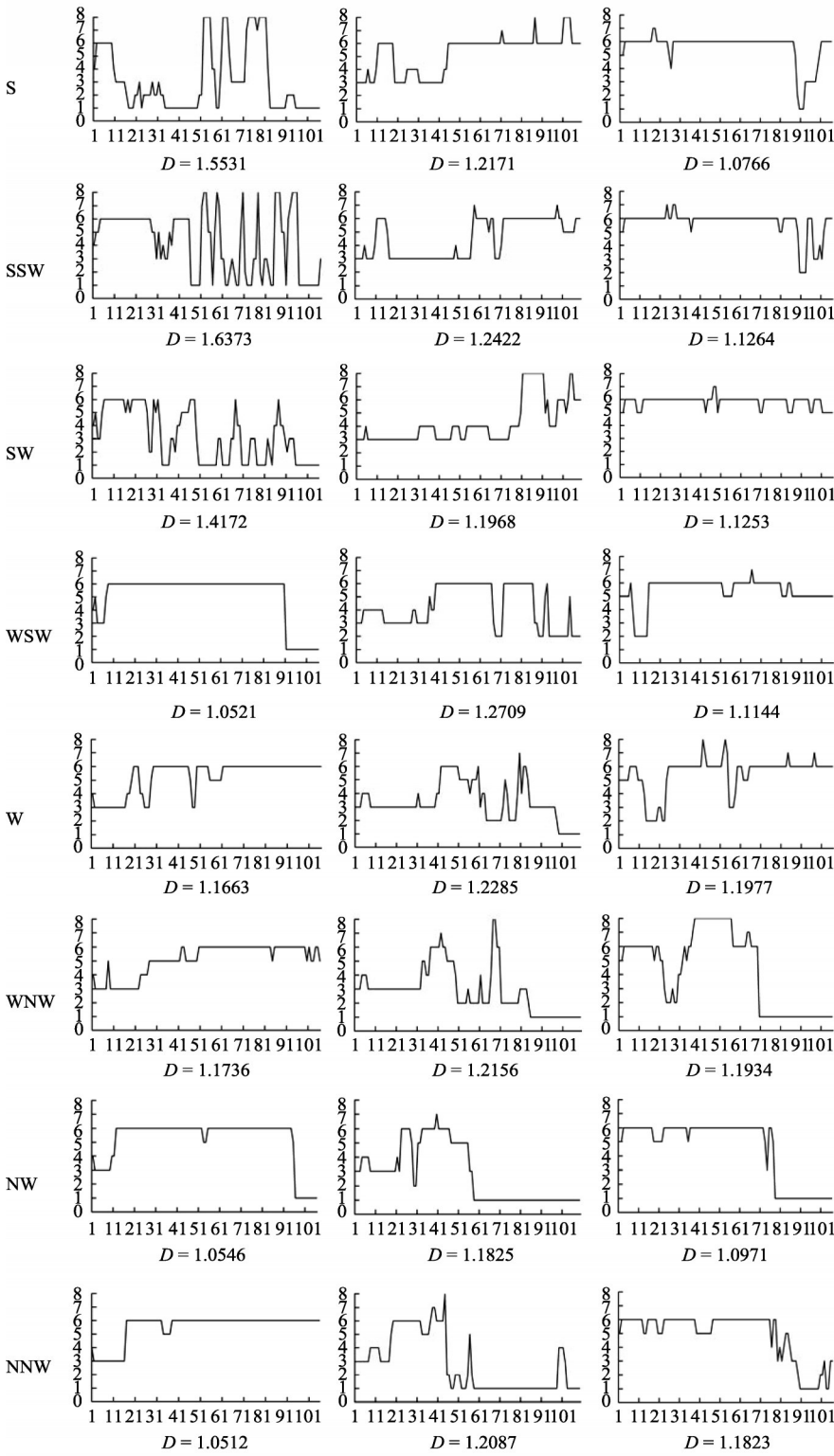


图 3 样线的景观类型空间组合序列的线形图像及其分维

Fig. 3 Alignment images and their fractal dimension of each spatial combination sequence obtained from sample line

景观的空间异质性。利用图3中所有线形图像分维的平均值可以作为景观异质性指数，近似地定量表达整个研究区景观空间异质性的高低，经计算研究区的景观空间异质性指数为1.2102。在3个子区域之间，A区域的平均分维最大（1.2193），景观空间异质性最高；C区域的平均分维最小（1.1990），景观空间异质性最低。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文将线性抽样与分形理论相结合，作为一种新方法用于景观空间异质性的研究之中。相比于单纯的线性抽样方法，该方法不仅能够表达景观类型在数量上的差异，更重要的是可以定量表达景观类型在空间序列中的组合规律。该方法在一定程度上丰富了现有景观空间异质性的研究方法体系。

该方法的基本思想是以景观类型空间序列的线形图像为基础，利用分形理论计算线形图像的分维，以分维数值的大小来表达景观空间异质性的高低。样线布设方法、分维计算方法、景观分类系统及代码顺序等都会对分维计算结果产生影响，进而影响到景观异质性的研究结果。其中，影响最严重是样线的布设方法，样线提取的景观异质性信息是该方法的研究对象。样线只是对研究对象整体的抽样，只能在一定程度上反应研究对象的真实情况，样线的代表性多少直接决定了研究结果能在多大程度上真实反映研究对象整体的景观异质性信息，选取的样线是否具有代表性是该方法应用的最基本、最重要的问题。

本文以妫水河流域为试验区，并将试验区划分为A、B和C 3个子区域，用于验证该方法在景观空间异质性表达中的适用性。结果表明，3个子区域的景观异质性顺序为A>B>C，A区域中N方向和SSW方向的样线分别是该子区域分维最小和最大的样线，同时也是整个试验区48条样线中分维最小和最大的样线；B区域中E方向和NE方向的样线分别是该子区域分维最小和最大的样线；C区域中S方向和E方向的样线分别是该子区域分维最小和最大的样线。该方法可以有效表达研究区内景观空间异质性的差异。

4.2 讨论

4.2.1 样线的代表性

样线的位置对研究结果具有重要影响。A、B区域的景观空间异质性明显高于C区域（图3）。因为A区域中样线所在地区的景观类型以森林景观、农田景观和草地景观为主，相对于C区域而言，各种景观类型所占比例差异较小（图2、图3）；相对于C区域而言，B区域中样线所在地区的景观类型同样多样，各种景观类型所占比例差异也相对较小（图2、表2）。因此，A、B区域中样线所反映的景观空间异质性较高。相反，C区域中样线所在的地区，农田景观是主要景观类型，且其分布比例达到了58.73%（表2）。研究表明，在一定的阈值内某种景观类型所占比例的增加会提高景观的异质

表2 不同景观类型在各个子区域内分布比例（单位：%）

	Tab. 2 Distribution proportion of each landscape type in each sub-area		
景观类型	A 区域	B 区域	C 区域
森林景观	27.89	11.38	12.79
果园景观	2.83	6.13	3.71
草地景观	16.33	25.18	7.25
水体景观	3.30	7.67	2.71
建筑景观	5.48	8.49	12.21
农田景观	42.33	41.33	58.73
交通景观	0.29	1.36	1.36
其他景观	1.53	1.30	1.24

性,但是一旦某种景观类型所占比例超过这一阈值,景观的异质性会明显降低^[23]。因此,C区域中样线所反映的景观空间异质性低于A、B区域。

线性抽样方法作为本文方法的一部分,会对景观空间异质性的研究结果产生影响。线性抽样方法作为一种抽样方法,在研究中就存在一定的概率信息^[24]。样线的位置和数量直接影响着样线的代表性,并决定着其所反映景观异质性信息的真实性,即能在多大程度上表达真实的景观异质性信息。另外,样线位置和数量的改变都会使研究结果产生差异。

4.2.2 分维计算方法多样

分维计算方法较多,不同计算方法得到的分维存在差异,进而对研究结果产生影响。目前,线形要素的分维计算方法主要有步长法和网格法两种,也有学者利用半方差和缓冲区分析等方法计算分维^[25]。虽然各种方法的计算过程不同,但其基本原理相同,都是利用观测尺度与测度值的点对序列构建回归方程,进而计算分维。因为各种方法的计算过程不同,所以针对同一个线形图像,不同方法计算的分维必然存在差异。虽然各种方法计算的分维数值不同,但是各种方法计算的分维之间存在相关性^[26]。因此,本文利用缓冲区分析方法计算的分维不一定是最近真实值的,但本文利用分维来表达景观异质性空间差异的方法正确。本文研究目的不仅是要计算每个线形图像的分维,来定量表达景观的空间异质性,更重要的是探讨线性抽样与分形理论相结合的方法在景观空间异质性研究中的适用性,以及利用计算的分维来表达景观类型空间组合规律的复杂程度。

尺度转换影响分维的计算结果。本文应用分维来解决线形图像的复杂性定量表达问题。分维计算是通过建立回归方程来确定的,而回归方程的建立具有严重的尺度依赖性,需要结合多尺度研究^[27]。尺度变换过程中的粒度和幅度对研究结果具有决定性的影响,也就是重采样的次数和间隔。本文利用ArcGIS软件对样线线性图像进行200个间隔为1 m的缓冲区分析,从而得到200对观测尺度与测度值的点对序列,利用其中处于无标度区间内的点对序列建立回归方程,计算分维。研究中粒度和幅度选择的差异必然会使回归方程产生差异,进而影响到分维计算结果。然而尺度转换过程中粒度和幅度的选择却没有明确的标准^[28],研究中只能依赖于研究对象和研究者的经验。景观异质性研究中的尺度依赖性问题尚需要进行深入研究,从而完善尺度选择相关理论及方法,为尺度变换提供相应标准。

4.2.3 景观分类系统影响分维

景观分类系统对景观格局指数具有重要影响,这一问题早已受到国内外学者广泛关注^[5,29]。应用不同景观分类系统对同一地区的景观格局进行研究,会使应用的景观格局指数产生变化,进而使研究结果产生差异^[30]。彭建等^[31]曾选取24种景观格局指数,探讨了土地利用分类系统变化对景观格局指数的影响,结果表明这种影响明确存在。文中的分维作为一种景观格局指数来表达景观异质性同样受到景观分类系统的影响。然而,在相应研究中关于景观分类系统的确定还没有统一的标准。景观分类系统的确定需要结合相应的研究尺度^[32]。本文研究区面积为2387.47 km²,基础数据是30 m空间分辨率的Landsat TM影像。研究区面积的大小一定程度上决定了景观分类系统的详尽程度。另外,基础数据的空间分辨率限制了景观分类系统的细化,景观分类系统的粗化又会掩盖景观空间异质性信息^[33]。因此,本文将景观分类系统划分为8种类型(表1)。

另外,文中景观分类系统中景观类型的代码顺序也会对研究结果产生影响。本文所计算的分维完全是由图3中每个线形图像的形状决定的,而线形图像的形状又与表1中的代码顺序密切相关。如图4所示,本文选取A区域和B区域中E方向的2条样线作为典型样线来

说明景观类型的代码顺序对分维的影响。图4a和4b分别是由A区域和B区域中E方向的样线所得的线形图像，其景观类型的代码顺序与表1一致；图4c和4d分别由图4a和4b演变得到，其景观类型的代码顺序为表1中相邻奇偶代码的互换。如图所示，虽然景观类型的代码顺序对景观空间异质性的研究会产生影响，但其主要是改变图3中样线线形图像的形状，一定程度上改变线形图像分维数的数值，但其对景观空间异质性的表达不会产生实质性影响，景观类型的代码顺序并不能完全决定景观异质性的研究结果。因此，只有拥有相同的分类系统及代码系统，景观空间异质性的研究结果才具有可比性。

4.2.4 线性抽样与分形理论相结合方法的优越性

能否表达景观类型之间的空间组合规律是本文方法与传统线性抽样方法的本质区别。景观异质性的测度方法很多，但各种方法的侧重点不同，通用性差，且一些方法存在理论或应用的局限性^[34]。本文利用线性抽样与分形理论相结合的方法研究景观的空间异质性，目的是以一个景观异质性指数的形式，表达景观类型空间组合规律的复杂程度。以往的研究方法往往只注重于景观类型的数量组合关系，而忽视了景观类型之间的空间组合规律，也就是景观类型的空间序列^[35]。针对图5中的2个图形，以往的线性抽样方法往往认为二者的景观异质性是相同的，因为2种景观类型在2个图中所占的比例是相同的。2个图形中景观类型1和2所占比例均为50%，图5a中的景观类型1和类型2是连续分布的，图5b中景观类型1和类型2是以25%为间隔交叉分布的。实际上，2个图形所表达的异质性信息是有差异的，单纯的应用线性抽样方法只能表达景观类型之间数量关系而不能表达景观类型之间的空间组合规律，结合分形理论则可实现对这种差异的区分。

参考文献(References)

[1] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 235-254.

[2] Kotliar N B, Wiens J A. Multiple scales of patchiness and patch structure: A hierarchical framework for the study of

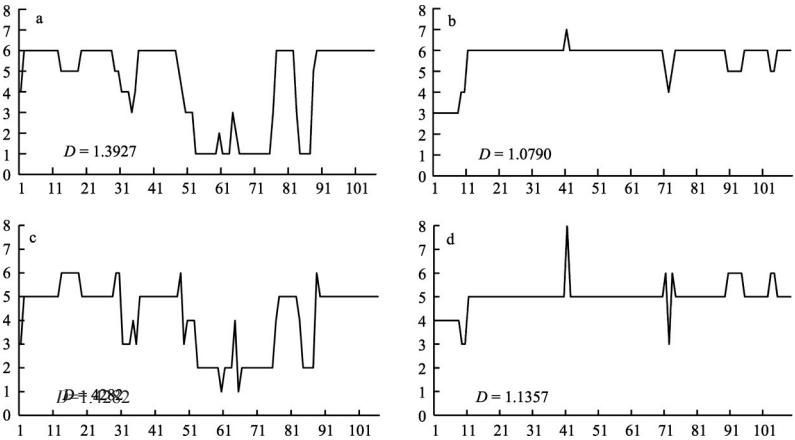


图4 不同景观类型代码顺序的典型样线的线形图像及其分维
Fig. 4 Linear image and their fractal dimension of typical sample line with different landscape types code sequence

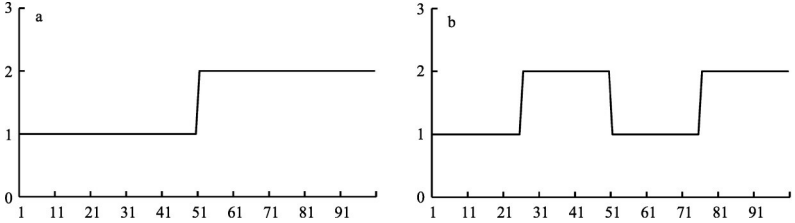


图5 两种样线的线性图像（横轴代表样线的长度，纵轴代表景观类型的代码）
Fig. 5 Alignment images of two line transect (horizontal axis represents the length of line transect, vertical axis represents the landscape type code)

- heterogeneity. *Oikos*, 1990, 59(2): 253-260.
- [3] 赵玉涛, 余新晓, 关文彬. 景观异质性研究评述. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 495-500.
- [4] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems*, 1998, 1(2): 143-156.
- [5] Li H B, Wu J G. Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 2004, 19(4): 389-399.
- [6] Uuemaa E, Roosaare J, Kanal A et al. Spatial correlograms of soil cover as an indicator of landscape heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2008, 8(6): 783-794.
- [7] 王丽, 曾辉. 深圳市道路网络结构特征的成因及其景观格局效应. *地理研究*, 2012, 31(5): 853-862.
- [8] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453-461.
- [9] 魏伟, 赵军, 王旭峰. 石羊河流域土地利用类型景观异质性. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 760-765.
- [10] Milne B T. Measuring the fractal geometry of landscapes. *Applied Mathematics and Computation*, 1988, 27(1): 67-79.
- [11] Morgan J L, Gergel S E. Quantifying historic landscape heterogeneity from aerial photographs using object-based analysis. *Landscape Ecology*, 2011, 25(7): 985-998.
- [12] Shi X L, Li Y, Deng R X. A method for spatial heterogeneity evaluation on landscape pattern of farmland shelterbelt networks: A case study in Midwest of Jilin province, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(1): 48-56.
- [13] 祖元刚, 马克明, 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报*, 1997, 17(3): 333-337.
- [14] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil: I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Journal of Soil Science*, 1983, 34(3): 577-597.
- [15] 徐丽华, 岳文泽, 徐建华. 城市热场剖面的分形维数计算及其意义研究: 以上海中心城区为例. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3): 384-390.
- [16] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156(3775): 636-638.
- [17] Pickett S T A, Cadenasso M L. Landscape ecology: Spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 1995, 269(5222): 331-334.
- [18] Soille P, Rivest J F. On the validity of fractal dimension measurements in image analysis. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1996, 7(3): 217-229.
- [19] 邓敏, 陈杰, 李志林. 计算地图线目标分形维数的缓冲区方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(6): 745-747.
- [20] 宫兆宁, 宫辉力, 赵文吉. 北京湿地生态演变研究: 以野鸭湖湿地自然保护区为例. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [21] 延庆县志编纂委员会. 延庆县志. 北京: 北京出版社, 2006.
- [22] 蔡金华, 龙毅, 毋河海, 等. 基于反 S 数学模型的地图目标分形无标度区自动确定. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(3): 249-253.
- [23] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [24] 梁进社, 张华. 土地利用变化遥感监测精度评价系统: 以随机抽样为基础的方法. *地理研究*, 2004, 23(1): 29-37.
- [25] 赵海英, 杨光俊, 徐正光. 图像分形维数计算方法的比较. *计算机系统应用*, 2011, 20(3): 238-241, 246.
- [26] 朱晓华. 海岸线分维数计算方法及其比较研究. *黄渤海海洋*, 2002, 20(2): 31-36.
- [27] Jiang J W, Plotnick R E. Fractal analysis of the complexity of United States coastlines. *Mathematical Geology*, 1998, 30(5): 535-546.
- [28] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- [29] Saura S. Effects of remote sensor spatial resolution and data aggregation on selected fragmentation indices. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2): 197-209.
- [30] Buyantuyev A, Wu J G. Effects of thematic resolution on landscape pattern analysis. *Landscape Ecology*, 2007, 22(1): 7-13.
- [31] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 土地利用分类对景观格局指数的影响. *地理学报*, 2006, 61(2): 157-168.
- [32] Shanmugam P, Ahn Y H, Sanjeevi S. A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modeling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India. *Ecological Modelling*, 2006, 194(4): 379-394.

- [33] 马礼, 唐冲. 尚义县景观生态分类和生态建设方略. 地理研究, 2008, 27(2): 266-274.
- [34] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- [35] Sklenicka P, Lhota T. Landscape heterogeneity: A quantitative criterion for landscape reconstruction. Landscape and Urban Planning, 2002, 58: 147-156.

Application of linear sampling and fractal theory in landscape heterogeneity

WU Pengfei^{1,2,3}, ZHOU Demin^{1,2,3}, GONG Huili^{1,2,3}

(1. Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Beijing 100048, China;

3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Landscape heterogeneity plays a decisive role in landscape structure, function, and dynamics. It is one of universal characteristics of the natural world, and is in a core position in landscape ecology studies. So it plays a crucial role in understanding landscape dynamics, as well as complex process of ecology and its interactive mechanism. The common measuring methods for landscape heterogeneity include landscape index, geostatistical analysis, fractal theory, and linear sampling. Although there are many ways to quantitatively express landscape heterogeneity, the focuses of these methods are different, and these methods are poor universality. In general, the current studies mainly focus on understanding the expression of quantitative relationship between landscape types, as well as general statistical characteristics description of landscape structure difference. However, this paper thinks that landscape heterogeneity studies should focus on excavation of landscape types' spatial combination law, namely spatial sequence feature of landscape types. In this paper, the method of combining linear sampling and fractal theory is applied to express landscape spatial heterogeneity. Compared with traditional methods, this method can be used to express landscape types' spatial combination law in spatial sequence, and this combination law can be used as an index to measure the level of landscape spatial heterogeneity. The more complex the spatial combination rule of landscape types in spatial sequence is, the higher landscape spatial heterogeneity is. The Guishui river basin is taken as a test area and a Landsat TM image taken in August, 2009 is used as basic data to verify the applicability of this method. A landscape distribution map of the study area is gained by interpreting the TM image through visual interpretation and decision-tree classification method. Linear sampling method is used to extract surface landscape pattern information, and fractal theory is applied to calculate fractal dimension of landscape types' spatial sequence with linear sampling. In order to test this method's capacity to express discrepancy of landscape heterogeneity among different regions, the study area is divided into three sub-areas according to the differences of natural environmental characteristics. The results show that this method can effectively express the discrepancy of landscape spatial heterogeneity within the study area.

Key words: landscape heterogeneity; fractal theory; linear sampling; Guishui river basin