

基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别

蔡 青, 曾光明, 石 林, 梁 婕, 黄 璐, 韦安磊

(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 利用图论中最短路算法思想和 ArcGIS 的空间分析功能, 对生境中动物迁徙廊道的识别与构建进行研究。通过对具有不同空间自相关特征的模拟景观进行分析, 发现该方法具有较好的适应性, 能识别出不同类型模拟景观的廊道。在模拟景观分析的基础上, 将该算法应用于长沙市大河西先导区, 计算了先导区重要栖息地之间的廊道。研究表明该计算方法提取的生态廊道具有明显的冗余性, 充分反映了物种在不同栖息地之间迁徙的需求, 具有一定的生态学意义。同时廊道提取结果在一定程度上反映了城市发展对生态系统尤其是生态廊道的胁迫与挤占。通过对廊道空间结构的分析还发现生态廊道存在一定的瓶颈区域, 对该区域的生态恢复与重建将对物种多样性的保持起到关键作用。该方法为区域土地管理以及生态环境保护规划提供一定的科学依据。

关 键 词: 最短路算法; 累积阻抗; 生态廊道

文章编号: 1000-0585(2012)08-1523-12

1 引言

景观生态学中廊道定义为呈条带状分布的景观要素^[1], 生态廊道则是指具有保护生物多样性等一系列生态服务功能的廊道类型^[2]。生态廊道主要由分布在其它景观类型(基质)中的植被、水体等组成^[3], 部分学者用绿道(greenways)表示生态廊道^[4]。生态廊道由于其独特的形态和分布特征, 在自然生态系统中具有重要作用。通常认为, 生态廊道最主要的功能是提供生物迁徙的通道, 为物种在不同的栖息地之间迁移提供场所, 对自然界物质、能量和基因的流动意义重大^[5]。此外, 生态廊道还兼具净化污染物、防止水土流失等生态服务功能^[6]。本文的研究从生物多样性保护的角度出发, 参照美国保护管理协会的定义, 将生态廊道理解为“供野生动物使用的狭长带状植被, 通常能促进两地间生物因素的运动”^[2]。

随着城市化的进程的加快, 城市扩张导致植被、绿地被侵占或者破碎化, 由此带来的直接后果就是物种栖息地的丧失, 生物多样性程度降低。近年来规划编制人员和环境保护工作者逐渐重视生物多样性的保护, 在科学研究以及制订相关规划时, 将保护物种栖息地放在了重要的位置^[7], 部分规划和研究甚至将具有重要生态服务功能的区域列为禁止开发

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2012-02-08

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项资助(2009ZX07212-001-06); 国家自然科学基金资助项目(51009063、51039001); 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-08-0181); 国务院三峡委员会项目(SX2010-026); 湖南省环境保护科技项目(No. 2008108)

作者简介: 蔡青(1984-), 男, 湖南华容人, 博士研究生, 主要从事 GIS 与城市生态规划研究。

E-mail: awfgef196@163.com

通讯作者: 曾光明(1962-), 男, 湖南华容人, 教授, 博士生导师, 主要从事城市生活垃圾综合利用、环境系统分析研究。E-mail: zgmin@hnu.edu.cn

区^[8,9], 尝试从立法和规划的角度来保护重要的物种栖息地。随着时间的推移, 越来越多的研究人员意识到仅仅对栖息地的保护是不够的, 这种方式虽然保存了部分生境, 但客观上这些人为划定的保护区容易形成一个个单独的生态孤岛, 不同栖息地之间物种群落难以维持正常的物质和能量流通, 物种多样性保持的效果有限^[10,11], 生态廊道在物种保持中的作用不能忽视^[12]。虽然越来越多的学者认识到了生态廊道的重要性, 但目前对生态廊道识别与提取的方法研究还比较少。本文利用基于栅格数据的最短路算法思想, 以长沙市大河西先导区为实例, 对生态廊道识别与提取方法进行了初步探讨。

2 资料来源与研究方法

2.1 生态廊道识别的理论依据

文中使用一种改进的图论算法来提取动物迁徙廊道。根据俞孔坚^[13]的研究, 生态过程对景观覆盖的响应和反馈, 可以用阻力或其它类似概念来表达。动物穿越景观等生态过程带有克服空间阻力的特性, 并可用可达性、费用距离、最小累积阻力等加以度量, 所有这些阻力的度量实际上均可视为空间距离概念的扩展。在陆地景观系统中, 阻力不仅仅是几何空间距离, 景观基质的特性也有重要作用。空间阻力的量度可以通过趋势表面或者耗费表面形象表达。具体到本研究, 不同类型地表对物种迁徙有不同的作用, 例如动物在迁移过程中通过城镇和交通线的时候, 比通过森林和农田时面临更大的危险。将动物在不同介质迁徙所面临的危险视为某种阻抗。显然, 区域景观格局决定了阻抗的空间分布特性。根据动物趋利避害的本能, 往往会自发选择阻抗小的路径迁徙 (或者理解为动物在低阻抗介质中成功完成迁徙到达目的地的可能性高于高阻抗介质)。基于这一思想, 建立生态廊道识别规则。

2.2 栅格表面廊道的提取与识别方法

2.2.1 建立基于栅格阻抗的迁徙规则 将不同地表类型视为耗费栅格, 物种可以向空间位置邻接的栅格迁移, 如图 1 所示。邻接栅格分为两类, 一类是有公共边的邻接栅格, 如图 1 中 C 和 a, 另一类是有公共点的邻接栅格, 如图 1 中 C 和 b。根据两类栅格中心的空间距离, 物种在邻接栅格之间迁移运动时阻抗按下式方法计算^[14]:

$$Cost(C \rightarrow a) = \frac{1}{2}Cost(C) + \frac{1}{2}Cost(a) \quad (1)$$

$$Cost(C \rightarrow b) = \frac{\sqrt{2}}{2}Cost(C) + \frac{\sqrt{2}}{2}Cost(b) \quad (2)$$

式中 $Cost(a)$ 、 $Cost(b)$ 、 $Cost(C)$ 分别表示栅格 a、b、C 的阻抗值; $Cost(C \rightarrow a)$ 、 $Cost(C \rightarrow b)$ 则分别表示从 C 向 a、b 迁移的阻抗。

按照式 (1)、(2) 确定的迁移阻抗原则, 可以计算物种在连续栅格表面迁移的累计阻抗值, 从而进一步确定物种在源地与目的地之间的迁移的最小累积阻力路径。

2.2.2 最短路算法 本文研究的关键在于确定物种迁移的最小阻力路径。确定最小阻力路径的方法一般运用图论中的最短路算法^[15,16]。目前关于最短路算法的研究很多, 在计算机科学以及图论科学中有广泛应用。最短路问题是重要的最优化算法之一, 可以直接应用于解决生产实践中解决众多问题, 包括管道的铺设, 线路安排等等。常用的算法包括

b	a	b
a	C	a
b	a	b

图 1 物种在邻接栅格中迁移的阻力耗费图

Fig. 1 The cost of moving between adjacent raster

Dijkstra 算法、Warshall-Floyd 算法等等^[17]。这类算法的共性是需要建立所有节点邻接矩阵，当需要计算的节点较多时（如文中的栅格表面），邻接矩阵会非常大，占用大量的内存空间，计算效率下降。本文的研究中选用 ArcGIS 软件 Spatial Analyst 模块的功能，计算基于栅格数据的最小累积阻力路径。该计算模块以图论为理论核心，处理数据类型为栅格，计算思路如下^[14]：（1）将出发栅格（源）的累积阻抗值记为 0；（2）激活出发栅格的所有邻接栅格，计算源栅格到各激活栅格的累积阻抗值；（3）将激活栅格的累积阻抗值进行排序，选择累积阻抗值最小的栅格，将其归入“已处理”类；（4）激活步骤（3）中最小累积阻抗值栅格的所有邻接栅格，计算激活栅格的累积阻抗值；重复（3）（4）进行扩展，直至所有栅格进入“已处理”类。该方法执行效率高，处理多节点的栅格数据更是比传统最短路算法具有独特的速度优势，同时对多个分散源地的计算具有较好的适应性。

2.2.3 廊道的识别 在以往对生态廊道的研究中，大部分学者将生态廊道看成一条简单的最优路径^[18]。但是从动物迁徙运动的规律来看，单一的走廊带无法描述动物在生态环境中复杂运动规律，动物也不可能沿着由人类设计和规划好的最优路径迁徙^[19]，因此生态廊道在空间上存在一定的不确定性。从源地到目的地的最优和部分次优路径，都可能成为物种迁徙的潜在廊道，生态廊道在空间上具有一定的冗余性^[20]。考虑廊道结构的不确定性和冗余性，研究采用如下方法提取生态耗费表面中的潜在动物迁徙廊道：

对于某一栅格表面（图 2a），S（Source）表示物种迁移的起始点，D（Destination）表示物种迁移的目标点，M 则表示该栅格表面中区别于 S 和 D 的任意一点，则物种从 S 经 M 中转迁移到 D 的最小累积阻抗（Cumulative Cost） $CCost(S \xrightarrow{M} D)$ 可记为：

$$CCost(S \xrightarrow{M} D) = CCost(S \rightarrow M) + CCost(M \rightarrow D)$$

(3)

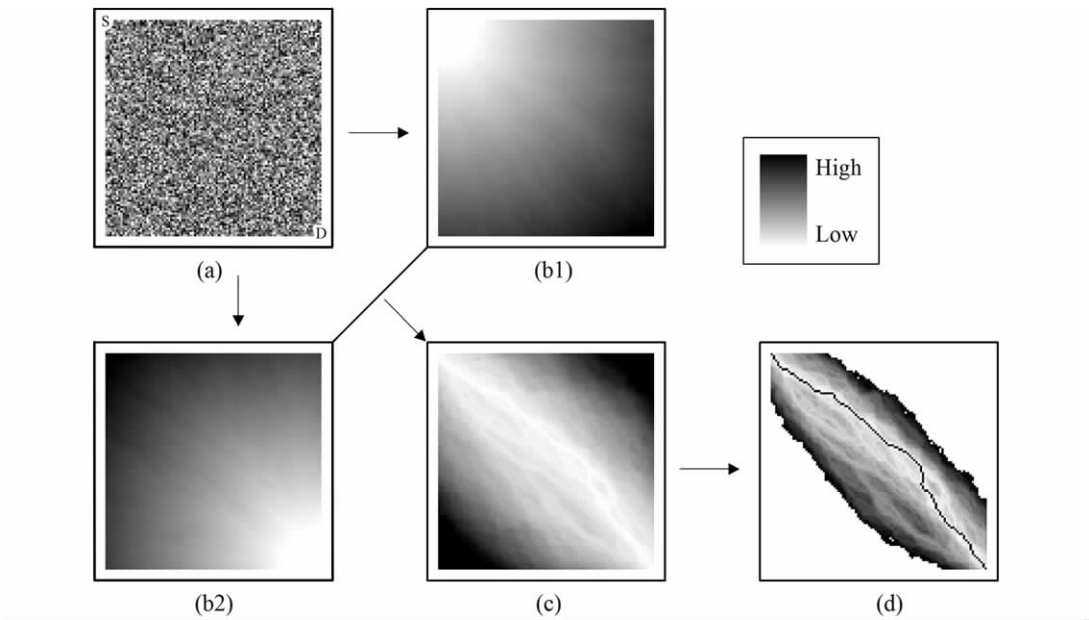


图 2 最小阻抗路径计算方法

Fig. 2 The computation of the least-cost routes

物种在生境中的迁移规则显然为一无向图,即从 A 到 B 的阻抗与从 B 到 A 的阻抗值相等。对于无向图,显然有:

$$CCost(M \rightarrow D) = CCost(D \rightarrow M) \quad (4)$$

所以:

$$CCost(S \xrightarrow{M} D) = CCost(S \rightarrow M) + CCost(D \rightarrow M) \quad (5)$$

如图 2 所示, a 表示阻抗表面 (此处 a 为生成的随机表面); b1 表示从 S 点到阻抗表面每个点的最小累积阻抗值, b2 表示从 D 点到阻抗表面每个点的最小累积阻抗值 (b1、b2 使用 2.1.2 小节方法计算); c 为 b1 与 b2 两者栅格求和运算的结果, 显然 c 中栅格的属性值表示从 S 经由该栅格迁徙到 D 的最小累积阻抗值, 即 $CCost(S \xrightarrow{M} D)$; 栅格 c 的最小值记为 minC, 该值表示从 S 到 D 的最小累积阻抗路径 (即最优路径) 的累积阻抗值; 根据物种对迁徙路径选择的不确定性, 部分次优路径也可作为物种迁徙的潜在廊道, 因此研究将 c 中小于某累积阻抗值 (如 $\min C + 10\% \min C$) 的栅格提取出来, 即可得到源地 S 与目的地 D 之间的廊道 d; d 中黑色线为 S 到 D 的最小累积阻抗路径, 即 minC 对应的最优路径 (单个栅格宽度)。在实际的研究中, 可以根据不同的需求, 选择不同的提取阈值。该方法所有计算过程均可利用 ArcGIS 的 Spatial Analyst 和 ModelBuilder 模块完成, 与 Pinto 等的研究相比, 不需要编写复杂的程序, 具有计算过程简便、速度快的优势^[19]。

2.3 模拟景观的廊道提取与分析

文中首先对计算机生成的模拟生境进行计算, 以检验该方法的准确性与对不同类型景观的适用性。

2.3.1 生成模拟景观 为了分析本文方法在不同阻抗表面中的适用性与准确性, 本文利用数学方法生成一系列具有不同空间自相关特征的人工模拟生境, 然后计算各种模拟生境的廊道分布及特征, 以达到检验模型的目的。

不同的地物在空间上的分布通常被称作景观格局。真实景观格局通常具有一定的空间自相关性, 即空间位置上越靠近的地物类型越相似, 分布具有空间位置的依赖关系。基于这点, 部分研究人员使用 RULE 和 SimMAP 等软件来实现景观格局模拟^[21], 这种方法生成的景观通常被称作中性景观, 即不考虑地形变化、空间聚集性、干扰历史等生态学过程及其影响的景观格局, 在应用上有一定的局限性。本文参照 Lennon 等的研究, 利用生成空间 $\frac{1}{f^k}$ 分布的方法, 得出具有不同空间自相关特征的模拟景观格局^[22]。计算出的模拟景观格局见图 3。

如图 3 所示, 研究生成了具有不同空间自相关性的 6 种模拟景观 (A0~A5)。从右侧的直方图可以看出, A0 到 A5 的取值范围都在 (0, 1) 之间, 均呈正态分布, A0~A5 栅格属性的统计特征基本一致, 主要区别在空间分布方面。各种模拟景观的统计学特征和景观格局指数见表 1。从表 1 可以看出, 生成的模拟景观值的分布都是均值接近 0.5 的正态分布, 但从空间上来看, 分维数从 A0 的 3.0 下降到 A5 的 1.25, 而全局 Moran's I 指数从 A0 的 0.0070 逐步上升到 A5 的 0.8371, 表明 6 种模拟景观的空间自相关性逐渐增加, 模拟的景观也逐渐从随机分布过渡到类似真实景观格局。

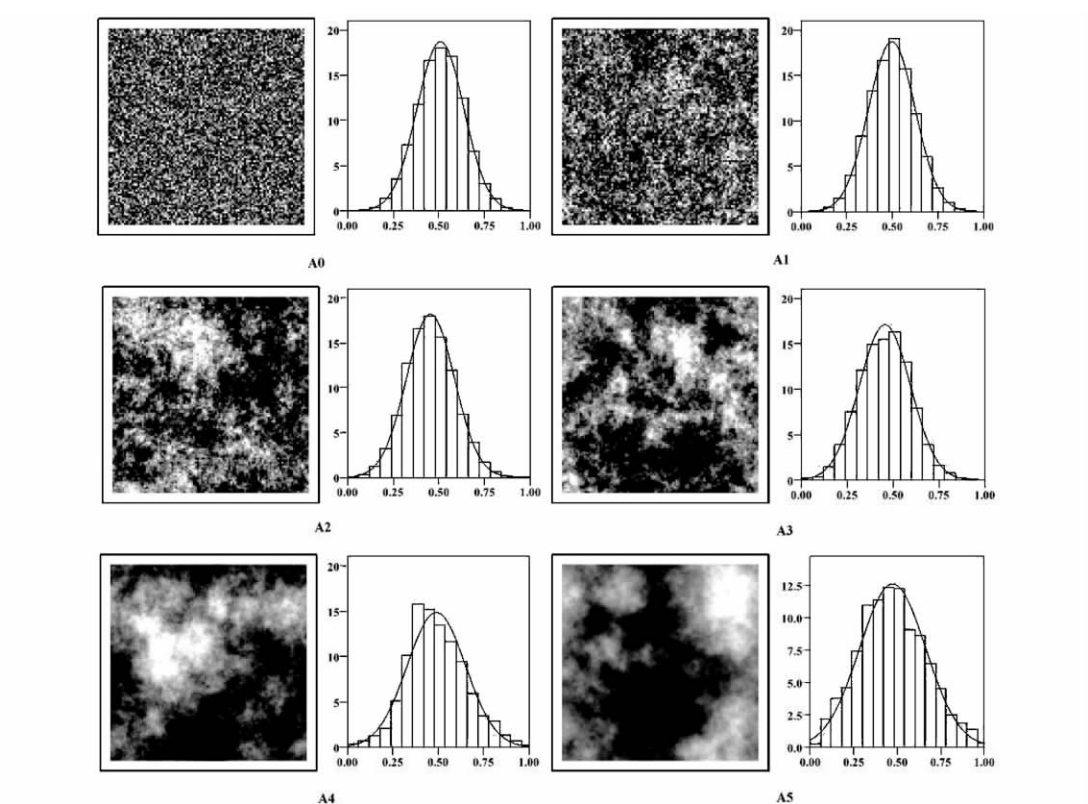


图 3 不同空间自相关性的模拟景观

Fig. 3 The simulated landscape patterns with different spatial autocorrelations

表 1 模拟景观统计特征及空间自相关指数

Tab. 1 The statistical characteristics and spatial autocorrelation index of the simulated landscape patterns

统计值	A0	A1	A2	A3	A4	A5
均值	0.508	0.497	0.454	0.456	0.491	0.474
方差	0.016	0.016	0.017	0.020	0.026	0.036
分维数	3.0	2.5	2.0	1.75	1.5	1.25
全局 Moran's I 指数	0.0070	0.2065	0.5753	0.6914	0.8218	0.8371

2.3.2 不同模拟景观的计算 对生成的 6 种模拟景观进行计算，同时选取 6 种不同的方案进行廊道的识别和提取（图 4），分别为：源地 S 到目的地 D 之间的最小累积阻抗路径（Single Path，最优路径，宽度为 1 个栅格单元）；模拟景观面积的 10%（Area10%）；模拟景观面积的 20%（Area20%）；小于 $\text{minC} + 2.5\% \text{minC}$ 的区域（Min+2.5%）；小于 $\text{minC} + 5\% \text{minC}$ 的区域（Min+5%）；小于 $\text{minC} + 10\% \text{minC}$ 的区域（Min+10%）。

从图 4 可以看出，采用面积比例（Area10%、Area20%）和阻抗阈值（Min+2.5%、Min+5%、Min+10%）方法提取出的生态廊道均包含了最优路径，都具有一定程度的冗余性，符合物种迁徙的规律。同时该方法对不同空间自相关的模拟景观均获得了较为理想的计算结果。论文统计了不同提取规则识别的廊道占整个景观的面积比例，见表 2。

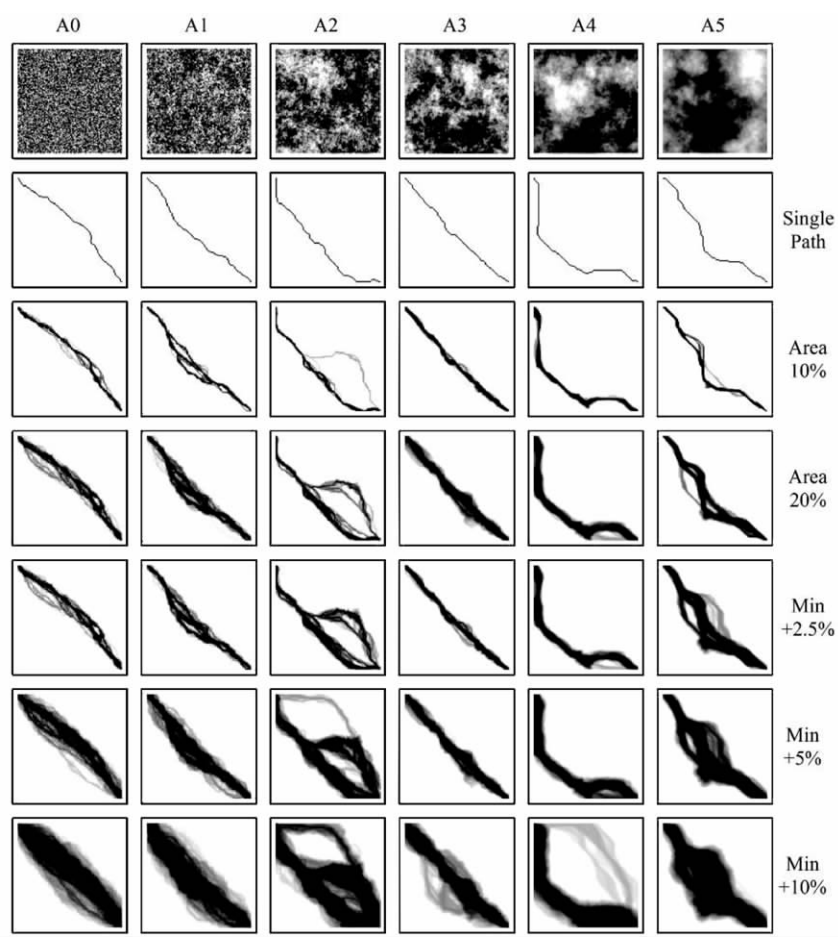


图 4 模拟景观廊道的提取

Fig 4 Extracting corridors from the simulate landscape patterns

表 2 不同识别规则廊道面积比例 (单位: %)

Tah 2 The proportion of the corridor area compared with the whole simulated landscape pattern

识别规则	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Single Path	1. 23	1. 24	1. 37	1. 14	1. 52	1. 32
Area10	10	10	10	10	10	10
Area20	20	20	20	20	20	20
Min+2. 5	18. 40	17. 59	27. 13	13. 27	19. 30	29. 34
Min+5	34. 39	31. 82	45. 79	21. 64	26. 97	39. 24
Min+10	53. 83	52. 81	67. 67	43. 85	62. 92	54. 35

2. 4 在实际景观研究中的应用

2. 4. 1 研究区概况 以长沙市大河西先导区为研究对象, 进行实证研究。研究区域地处湖南省中部, 长沙市湘江以西, 涉及 3 个区县, 15 个乡镇, 总面积约 1200km²。规划区地貌类型复杂多样, 岗地、平原、丘陵、低山兼有, 生态植被良好, 自然资源丰富。区域城市建成区总面积约 230km², 森林总面积约 560km², 农田面积约 370km²。长沙市大河

西先导区纳入了长株潭“两型社会”综合配套改革试验区的建设序列,是长沙市未来城市的重要增长区域。该区域在规划编制的时候,十分重视生态环境的保护,为了防止城市扩张对区域生态系统破坏,编制了专门的生态控制线规划。区域内自然保护区,风景名胜区,森林公园以及生态环境质量较好、生态服务功能价值较高的自然山体、湿地、水域等均纳入了生态保护范围。该规划偏重物种栖息地的保护,对于物种迁徙运移的生态廊道,则没有提出明确的保护方案。本文以生态控制线确定的保护区为基础,将其划定的禁止开发区作为物种迁徙的源地与目的地,提取了相邻栖息地之间的廊道,并将其一同纳入生态控制线的范畴,对生态控制线规划进行优化。

2.4.2 建立阻抗表面 景观中影响和决定廊道分布的因素较多,其中最主要的是土地利用和植被覆盖的空间格局。林地和农田均可作为物种迁徙提供场所,城市建成区和交通线路则难以成为物种迁移运动的廊道;并且植被覆盖度越高、植被质量越好的区域越适宜物种的迁徙。根据这些原则,研究选取区域土地利用现状、归一化植被指数(NDVI)以及植被覆盖度指数(VCF)三个因子来建立区域景观阻抗表面。其中土地利用数据从先导区2008年9月的TM影像解译获取,归一化植被指数和植被覆盖度指数来源于MODIS数据。特别的,考虑到植被覆盖的季节变化情况,选择一年的植被指数累计值进行分析。区域物种迁移阻抗表面的具体计算步骤如下:(1)依据不同地物覆盖对物种迁徙的作用,将土地利用现状赋值得到landuse因子,其中城市建设用地和交通线赋高值,农田和林地则依次赋低值。(2)利用MODIS数据提取研究区域2008年(23幅影像,时间间隔16天)NDVI指数,用栅格求和工具计算全年NDVI累计值。根据NDVI值越大,则植被质量越好,阻抗值越小的原则,将研究区域分别赋值得到NDVI因子。(3)利用MODIS植被覆盖率数据,根据覆盖率越大,越利于物种迁徙,其阻抗值越小的原则,得到VCF因子。(4)将(1)~(3)中得到的3个因子数据重采样到100m空间分辨率之后进行栅格求和,然后将求和结果归一化,得到最终的物种迁移阻抗表面(图5)。

2.4.3 生态廊道宽度确定 生态廊道结构与功能相当复杂,具有很大的不确定性。生态廊道的宽度主要由保护目标、植被情况、廊道功能、周围土地利用、廊道长度等多个因素决定。Harrison等的研究认为廊道宽度与动物的行动圈面积或者半径相关,并提出了廊道宽度计算的公式^[23,24]。而达良俊等^[25]认为生态廊道的结构特征与研究尺度有很大关系,大尺度下的生态廊道在中小尺度上可能表现为大面积的森林生境^[26],生态廊道根据分析尺度的不同,可以分为大廊道和小廊道。大廊道又称生境廊道,起连接大型保护区和重点保护区的作用,主要保护对象为低密度分布种(大型动物);小廊道以保护小型动物目的,连接小面积的保护区或保留带。对大廊道,一方面由于大型动物行动圈面积与直径大,另一方面大廊道长度较大且兼具栖息地的功能,因此其宽度越大越好。而对于小廊道来说,其保护对象是行动圈面积偏小的小型动物,且研究尺度决定了廊道不会太长,同时考虑到小廊道主要提供迁徙通道的功能,过宽的迁徙廊道可能导致物种在廊道中的横向迁徙,增加其迁徙运动的时间,反而增加了动物迁徙过程风险,因此小廊道宽度一般在100m到1700m之间。据调查,长沙市大河西先导区范围内已查明陆生野生动物68种,均为中小型物种,包括国家二级保护动物穿山甲、鹰嘴龟、猴面鹰、水獭等,三级保护动物竹鸡、山斑鸠、黄鼠狼、刺猬等。参照国内相似地区的研究,从廊道的迁徙功能出发,综合考虑研究区域尺度、廊道使用的目标物种以及生态保护与城市发展的平衡,确定廊道的宽度为200m~600m。

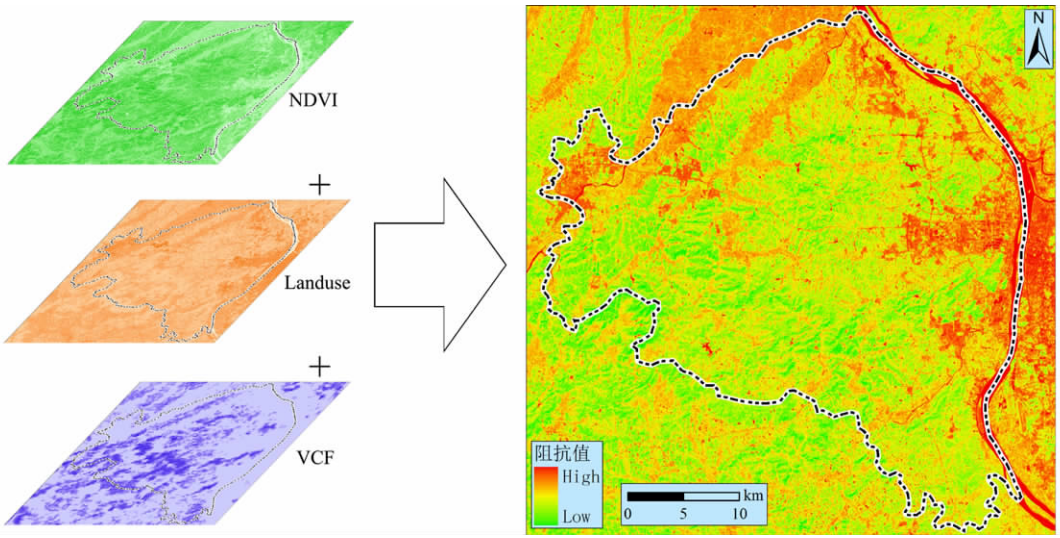


图 5 先导区物种迁移阻抗表面
Fig 5 The resistance surface of the research area

2.4.4 实际廊道的识别与提取 根据先导区生态控制线规划中划定的禁止开发区, 结合研究区域的生态资源现状, 确定 11 处重要的物种栖息地。将空间位置相邻, 存在物种迁徙需求的栖息地一一配对, 分别作为源地与目的地, 运用 2.2.3 小节所述方法, 计算提取配对栖息地之间的廊道。在计算中, 综合考虑廊道长度和冗余性, 以及区域保护目标物种对廊道宽度的需求, 提取两栖息地之间最小累积阻力路径 (single path) 面积 8 倍区域 (按栅格数计) 作为廊道。即廊道栅格数为最小累积阻力路径栅格数的 8 倍, 当最小累积阻力路径上所有栅格均满足四邻规则时, 生态廊道平均宽度为 800m; 考虑景观基质的不均匀性, 这一条件难以满足, 因此廊道平均宽度小于 800m, 但基本满足前文确定的廊道宽度为 200m~600m 的要求。全局范围的廊道分布见图 6, 底图为 TM 遥感影像的 543 波段合成; 图中彩色色块代表先导区十一个重要的栖息地, 黑灰色不规则线条为物种迁徙廊道。同时为了进一步研究各条廊道的特征, 将提取的 20 条廊道的细节绘制出来 (图 7), 图 7 中红线表示两生态源地之间最小累积阻力路径。

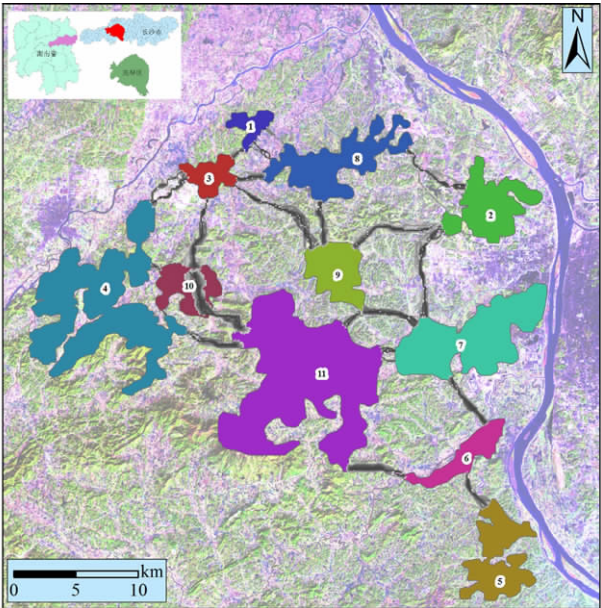


图 6 先导区生态廊道全局图
Fig 6 The distribution of all the corridors in the research area

全局范围的廊道分布见图 6, 底图为 TM 遥感影像的 543 波段合成; 图中彩色色块代表先导区十一个重要的栖息地, 黑灰色不规则线条为物种迁徙廊道。同时为了进一步研究各条廊道的特征, 将提取的 20 条廊道的细节绘制出来 (图 7), 图 7 中红线表示两生态源地之间最小累积阻力路径。

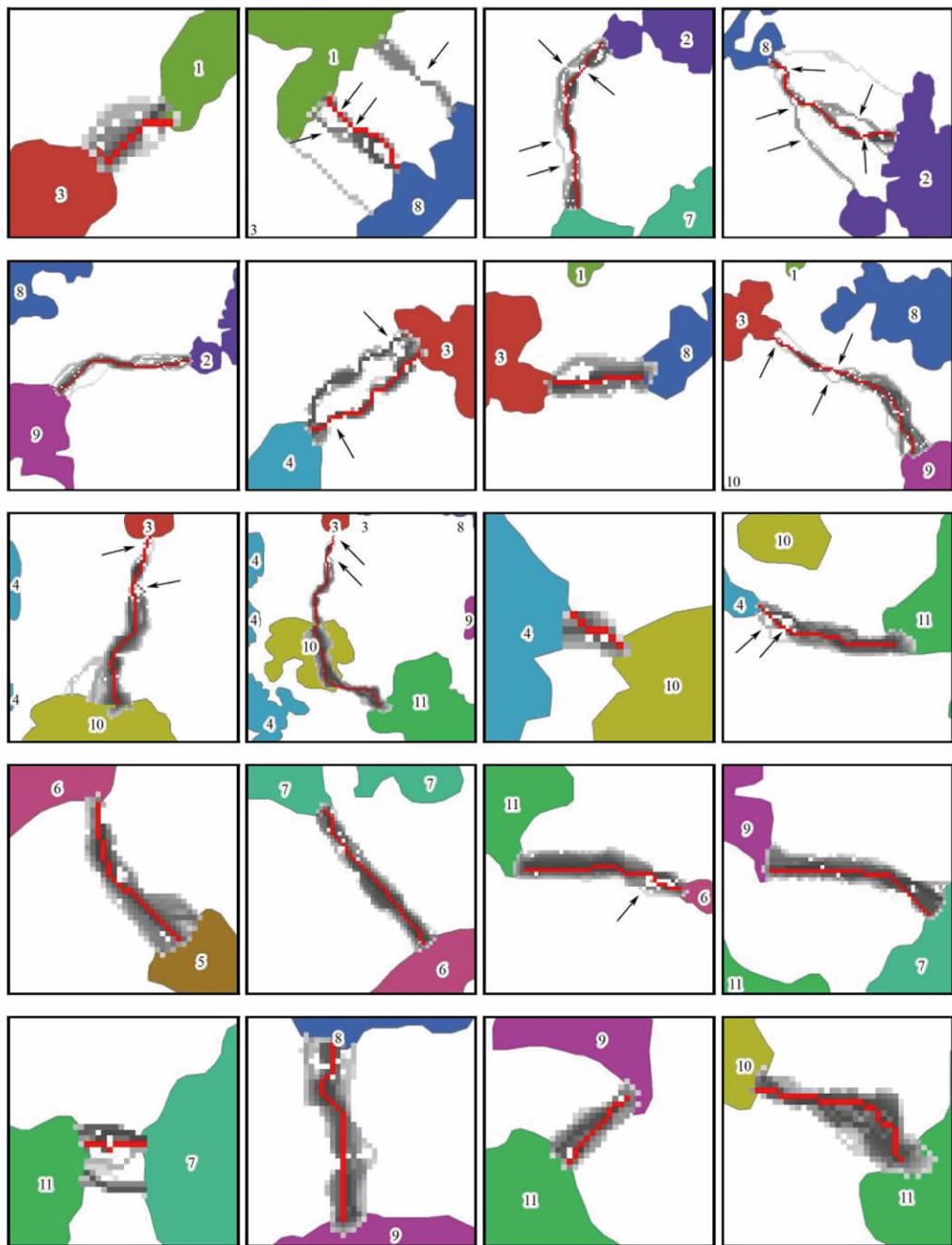


图 7 先导区生态廊道细节图与廊道上瓶颈区域分布

Fig. 7 The details of all the 20 corridors and the bottleneck in those corridors

从先导区生态廊道的分布（图 6、图 7）看，该方法提取的廊道均包含了源地之间的最小累积阻力路径，同时又不同于最短路径，而是最小累积阻力路径和部分次小累积阻力路径的组合，廊道具有明显的冗余性，与传统廊道设计的单一走廊带相比更符合物种迁徙规律。如 1—8、2—8、3—4、3—9、3—11、7—11 等廊道均有较大和较明显的分岔，3

号栖息地到 11 号栖息地之间的廊道甚至有部分穿越了 10 号栖息地。2 号栖息地（谷山森林公园）与 7 号栖息地（岳麓山风景名胜区—桃花岭自然保护区）之间的廊道由于受城市扩张的影响，明显偏离了两者之间最短几何距离直线，并且在西侧沿着城市边界分布。可以预见，随着城市继续向西扩张，该廊道将进一步受到胁迫。这条走廊带明显体现了城市发展对物种迁徙通道的影响。为了减缓这种影响，建议先导区在未来城市继续向西扩张时，将该廊道所在区域划定为保留区，留出一定的空间。同时注意到廊道 2—8、3—10、6—7 穿越了交通线，而且从图 6 可以看出，这些栖息地之间的迁徙廊道已无法绕避已有的交通线路。对于这些穿越既有交通线路的生态廊道，建议在廊道与交通线的交叉点附近区域设置一定形式的生物通道，同时在道路两侧设置隔离带，诱导动物从生物通道迁徙。

2.4.5 廊道冗余性分析 由于动物行为的不确定性，物种迁徙廊道应具有一定的空间冗余性。动物迁移廊道的宽度随着物种、廊道结构、连接度、廊道所处基质的不同而不同。研究区域没有对廊道宽度需求较高的大型动物分布，区域廊道的主要作用在于保存中小型动物的物种多样性。根据前文的分析，保护生物多样性比较合适的宽度为 200~600m。根据研究区域的空间发展战略规划，区域城镇用地、农田和生态保护区基本按照 1:1:1 分配，在土地资源日益紧张的情况下无限制的增加生物通道的宽度显然是不现实的，需要在生态保护与城市发展之间取得平衡。基于以上原因，本文将廊道冗余性条件定量为：对没有分岔的廊道，其最窄处至少有两个满足四邻规则的栅格（分析栅格大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ ）；对于存在分岔的廊道，所有分岔最窄处满足四邻规则的栅格不少于三个，即至少存在三条满足四邻规则的潜在迁徙路径。

对廊道的细节图分析发现，研究区域部分廊道不满足冗余性条件，存在较为明显的瓶颈区域（此处瓶颈区域定义为生物迁徙通道中显著窄的部分，生物迁徙通过瓶颈区域最容易受到周边环境的影响）。图 6 中箭头指向部分均为较明显的瓶颈区域。为了保证廊道的连通性，使其在物种保存中发挥作用，需要消除瓶颈区域对廊道连通性的影响。在廊道的瓶颈区域采取植被恢复等措施，修复廊道的连通性，对区域物种多样性的保存往往会起到事半功倍的效果。

3 结论与讨论

（1）生态廊道为物种在不同栖息地之间的迁徙和运动提供了场所，是生态系统中不可或缺的部分。以保存物种多样性为目的划定自然保护区等时，在保护栖息地、食源地等的基础上，同时注重物种迁徙廊道的保护，往往会起到事半功倍的效果。

（2）生态廊道并不是迁徙源地与目的地之间累积迁徙阻抗值最小的最优路径，而是包括最优路径与部分次优路径的组合。生态廊道应具有一定的冗余性与复杂性。模拟景观的计算结果显示，本文廊道识别方法较好的提取了源地与目的地之间的迁徙廊道，提取结果均包含了最优路径，同时又是最优路径的扩展，具有一定的冗余性。根据不同的阈值标准，提取出的廊道具有不同的分布特征。

（3）实证研究的廊道提取结果具有明显冗余性，部分廊道甚至有明显的分岔，比传统的单一走廊带更能反映物种的迁徙规律。廊道提取结果充分显示了城市扩张对物种迁移廊道的影响：谷山森林公园与岳麓山风景名胜区—桃花岭自然保护区之间的廊道明显的偏离了两者之间的最短几何距离直线，沿着城市的外边界分布。部分廊道结构存在较为明显的瓶颈地带。瓶颈区域是物种运行面临风险较大的区域，同时也是生态恢复的关键区域。

(4) 生态廊道识别与提取的一般步骤是首先建立阻抗表面和确定迁徙运动的源地和目的地, 然后利用 ArcGIS 的 Spatial analyst 模块分别计算源地和目的地到景观表面上所有点的累积阻抗值, 得到两个累积阻抗栅格; 这两个栅格求和的结果表示物种在源地与目的地之间迁徙经过某一栅格的最小累积阻力值; 考虑到物种迁徙运动的不确定性和廊道的冗余性, 将求和结果栅格中小于某一特定阈值的栅格提取出来, 即可得到源地与目的地之间的廊道; 阈值取求和结果栅格的最小值时, 提取出的廊道即为源地与目的地之间的最小累积阻力路径, 此时的廊道不具有冗余性, 当阈值逐渐增大时, 廊道的宽度和冗余性随着增大; 阈值的选取需综合考虑廊道的结构和功能特点、保护目标物种、区域土地利用现状和规划。本文实证研究综合考量各项要素, 提取面积为最小累积阻力路径 8 倍的区域作为先导区物种迁徙廊道, 提取结果充分反映了区域物种迁徙对生态廊道的需求, 对先导区生态控制线规划作了较好的补充与完善。

基于特定种类动物的行为理论, 研究廊道的分布对特定物种的保护具有重要科学意义。由于篇幅限制, 本文的研究仅对城市空间发展规划中如何保持各重要生态源地的连通性进行了分析, 并没针对某一具体物种进行分析。在后续研究中将进一步分析针对区域关键物种保护的生态廊道特性。

参考文献:

- [1] Forman T, Godron M. Landscape Ecology. New York: Wiley, 1986: 5~37.
- [2] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9): 2406~2412.
- [3] 邬建国. 景观生态学—格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007: 2~14.
- [4] 周年兴, 俞孔坚, 黄震方. 绿道及其研究进展. 生态学报, 2006, 26(9): 3108~3117.
- [5] 宋波, 倪婷玉, 王瑾. 基于迁移意愿的动物迁移廊道修正. 生态学报, 2010, 30(17): 4571~4577.
- [6] 蔡婵静, 周志翔, 陈芳, 等. 武汉市绿色廊道景观格局. 生态学报, 2006, 26(9): 2996~3004.
- [7] 从明珠, 欧向军, 赵清, 等. 基于主成分分析法的江苏省土地利用综合分区研究. 地理研究, 2008, 27(3): 574~583.
- [8] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累计阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. 生态学报, 2010, 30(2): 421~428.
- [9] 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): 266~275.
- [10] 赵清, 郑国强, 黄巧华. 南京城市森林景观格局特征与空间结构优化. 地理学报, 2007, 62(8): 870~879.
- [11] 李素英, 王计平, 任慧君. 城市绿地系统结构与功能研究综述. 地理科学进展, 2010, 29(3): 377~385.
- [12] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价. 地理研究, 2009, 28(2): 284~293.
- [13] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型. 地理学报, 1998, 53(增刊): 11~21.
- [14] Ersi. 成本距离工具工作原理. <http://help.arcgis.com/zh-cn/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z00000025000000/>, 2010.
- [15] 郭金来, 胡鹏. 网络最短路径的地图代数栅格算法. 测绘科学, 2007, 32(1): 109~114.
- [16] 马林兵, 曹小曙. 一种启发式 A* 算法和网络划分空间的空间可达性计算方法. 地理研究, 2008, 27(1): 93~101.
- [17] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 matlab 实现. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 12~36.
- [18] 张小飞, 王仰麟, 李正国. 基于景观功能网络概念的景观格局优化——以台湾地区乌溪流域典型区为例. 生态学报, 2005, 25(7): 1707~1714.
- [19] Pinto N, Keitt T H. Beyond the least-cost path: Evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. Landscape Ecology, 2009, 24: 253~266.
- [20] Rayfield B, Fortin M, Fall A. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. Landscape Ecology, 2010, 25: 519~532.
- [21] 王绪高, 李秀珍, 贺红士, 等. 中性景观模型与真实景观的一致性. 应用生态学报, 2004, 15(6): 973~979.
- [22] Lennon J J. Red-shifts and red herrings in geographical ecology. Ecography, 2000, 23: 101~113.

- [23] Marcelo G L, Claude G. The conservation value of linear forest remnants in central Amazonia. *Biological Conservation*, 1999, (91):241~247.
- [24] Harrison R L. Toward a theory of inter-refuge corridor design. *Conservation Biology*, 1992, 6(2):293~295.
- [25] 达良俊,陈克霞,辛雅芬. 上海城市森林生态廊道的规模. *东北林业大学学报*, 2004, 32(4): 16~18.
- [26] 腾明君,周志翔,王鹏程,等. 基于结构设计与管理的绿色廊道功能类型及其规划设计重点. *生态学报*, 2010, 30(6): 1604~1614.

Identifying ecological corridors using shortest path algorithm based on raster data

CAI Qing, ZENG Guang-ming, SHI Lin, LIANG Jie, HUANG Lu, WEI An-lei

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University; Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: Ecological corridor, which plays an important role in biodiversity protection, is defined as a stretch of nature mosaic that facilitates the migration of animals. Many GIS software packages use raster cost surface to identify the path of least resistance between source and destination. Limitation of these methods is that only a single path can be identified. However, ecological corridors should be more complicated and more redundant. Many alternative paths with less cost might exist in fact for animals may not choose the optimum path when moving between different habitats. In this paper, a new approach based on Spatial Analyst Tools of ArcGIS using raster data is proposed to identify the redundant routes. Firstly, the resistance cost surface moving from source to adjacent raster was defined. Secondly, the accumulated least-cost raster from both source and destination habitat to any other raster on the cost surface was evaluated. Two accumulated least-cost raster were added by raster calculation module. The value of the added raster is the accumulated least-cost which passed the current raster. Thirdly, the corridor was obtained by extracting the added raster with a certain value. Corridors of six simulated landscape patterns with different spatial autocorrelations were used to assess this procedure. The results showed that the corridors obtained by the procedure include not only the optimum path, but also some sub-optimum paths. The corridor is redundant and fit for describing the migration behavior of animals. Lastly, the identification of the ecological corridors in West Bank Pilot Planning Area of Changsha was taken as an example. The results showed that eleven key habitats existed in the study area. Corridors of twenty adjacent habitat pairs were analyzed. The results showed that all the corridors were of certain width and some of the corridors had furcation or even bypath. However, there are some bottlenecks in some corridors, which become the key zone for the ecological restoration.

Key words: shortest path algorithm; accumulated cost; ecological corridor