

基于迁移意愿的动物迁移廊道修正 ——以德化县云豹为例

宋波*, 倪婷玉, 王瑾

(北京科技大学土木与环境工程学院环境工程系, 北京 100083)

摘要: 针对人工设计的廊道未必是动物最终选择的迁移路径问题, 从迁移意愿角度提出了新的解释。基于动物迁移意愿流与水流的相似性, 提出了依托动物迁移适宜性图, 利用水文分析模块量化并提取迁移意愿流的方法。以福建省德化县境内的国家 I 级保护动物云豹 (*Neofelis nebulosa*) 为研究对象, 分析了其在两个保护区之间的迁移意愿流。结果表明: 迁移意愿流穿越基于最小累积阻力法设计的迁移廊道, 云豹从意愿流流出位置迁出廊道的可能性较大。可考虑在此处设置人工屏障, 以引导云豹按照设计的廊道迁移。该方法对于自然保护规划和管理具有一定的借鉴意义。

关键词: 迁移意愿; 迁移意愿流 最小累积阻力法; 廊道设计; 物种保护

Revising the designed migration corridor based on animal's migration desire: a case study of clouded leopard (*Neofelis nebulosa*) in Dehua

SONG Bo*, NI Tingyu, WANG Jin

Department of Environmental Engineering, School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: Regarding the possible inconsistency between the actual corridor and the designed corridor, a new framework was put forward to improve the designed process from the perspective of the animals' migration desire. In light of the similarity between the water flow and the flow of the animals' migration desire, hydrological analysis was employed to quantify the intensity of the migration desire from the animals' migration suitability. Then the model was applied for the design of clouded leopards' (*Neofelis nebulosa*) migration corridor in Dehua county. The result showed that the flow of clouded leopards' migration desire crossed the corridor designed by model of Minimum Cumulative Resistance. A barrier was recommended to establish in the outlet of the migration desire flow in order to prevent the underside animal migration. The method is useful in ecosystem conservation planning and management.

Key Words: migration desire; migration desire flow; minimum cumulative resistance model; corridor design; wildlife conservation

自然保护区的建设普遍存在着过度强调被保护物种本身, 而对生态系统的完整性和自然栖息地的整体保护重视不够问题。这导致了保护区成为孤立的岛屿, 缺少区际间物种迁移和基因交换的通道^[1]。景观破碎化以及景观整体质量退化已被认为是生物多样性丧失的基本诱因^[2]。通过建立合理的迁移廊道, 可加强景观斑块间的连通性, 促进斑块间物质和能量的交流^[3-4], 并增加相似栖息地斑块间的基因交换和物种流动, 给缺乏空间扩散能力的物种提供连续的栖息地网络, 对物种多样性保护起到积极作用^[5]。

在物种保护管理项目中, 采用最小累积阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 设计动物迁移廊道得到了广泛关注^[6-8]。MCR 是基于加权距离的模型, 它综合考虑了源、距离和景观界面特性 3 方面的因素,

收稿日期: 2009-06-24; 修订日期: 2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songbo@pku.edu.cn

把动物穿越不同的景观界面所耗费的成本量化为阻力,最终选取源之间阻力累积值最小的路径^[9-11]。利用该方法设计动物迁移廊道,不仅能连通离散的生境,而且具有迁移成本低、迁移效率高的优点。

然而,实践观察表明,动物迁移的实际路径往往与人工设计的迁移廊道不符。虽然一些研究人员从不同角度对这种现象提出了解释^[12-16],但都忽视了动物迁移意愿(Migration Desire)对其选择迁移路径的影响。

本研究从动物迁移意愿的角度,对动物实际迁移廊道偏离人工设计廊道现象作出了新的解释。提出了依托动物迁移适宜性图,利用 GIS 中水文分析模块提取迁移意愿流,在此基础上修正迁移廊道的方法。应用该方法,以福建省德化县境内的国家 I 级保护动物云豹(*Neofelis nebulosa*)为研究对象,对传统 MCR 法设计的廊道进行了修正。该方法是对目前动物迁移廊道设计方法的有益补充。

1 研究方法

1.1 动物的迁移意愿

人类活动聚集区沿山谷狭长分布的景观格局普遍存在(图 1)。当设计两片林地(A 区与 B 区)之间的动物迁移廊道时,如果 A、B 区之间的城镇(P 区)足够狭长,即使 P 区被赋予了很高的景观阻力值,采用 MCR 法得到的动物迁移路径仍可能直接穿越城镇(路径 A—B)。

但研究表明,人口密度对动物种群的构成有直接影响^[17],大多数动物回避人类活动。例如,野生象群不摄食一、二级公路旁的食物,并避免接近公路等人类活动密集区^[18];鸟类^[19]和两栖类^[20-22]动物的空间分布也受到人类活动影响。

因此,采用 MCR 法设计的迁移廊道,虽具有迁移成本最小的优点,却很可能因距离城镇等人类活动聚集区较近,而不被动物所选择。动物实际选择的迁移路径,可能位于人类活动较弱的区域(如路径 A—M—B 或路径 A—N—B)。

MCR 法设计的廊道之所以会出现以上偏差,原因之一在于,它隐含假设了动物具有较高度度的理性,认为动物能够凭籍这种理性对整体环境进行评估,并优选出总成本最低的迁移路径——尽管这条路径中可能包含一些并不适宜动物活动的路段。显然,动物不具备这种理性。虽然在远离人类干扰的自然环境中,动物的迁移路径可能体现出迁移成本的最优或次优,但这是经历漫长时间演化的结果,并不是动物的理性选择。

当今人类活动对自然环境造成了巨大影响。人类的频繁干扰,尤其是严重影响动物关键生境因子(如有蹄类的迁徙路线、狼的洞穴、干旱区的水源地、舔盐场等)的干扰,导致动物放弃适宜生境^[23],从而破坏了长期演化形成的迁移路径,迫使动物寻找新的迁移路径。新迁移路径是动物根据周边的环境状况,凭借其趋利避害的本能所做出的选择,与最小迁移成本路径可能存在较大偏差。因此,新迁移路径体现的是动物的迁移意愿,廊道设计必须与动物的迁移意愿相一致。

1.2 动物的迁移意愿流

将动物活动区域简化为网格(图 2),用 1—100 表示适宜性。数值越小表示越适宜。如果在某一时刻,目标动物位于适宜性为 39 的网格 A 中,由于动物选择迁移路径时倾向于向更适宜的网格移动,即向当前位置下方的网格(环境适宜性为 24 的网格)移动。以此类推,可以得到动物迁移方向图。将迁移方向首尾相连,可得到迁移意愿链路。多条迁移意愿链路在空间某区域汇流,即形成迁移意愿流。

意愿流的值是上游各迁移意愿链路累积的网格数量(图 3)。仍以网格 A 为例,由于上游各迁移意愿链路总共流经 8 个网格,因此对该网格的迁移意愿流赋值为 8。以此类推,可得到动物迁移意愿流图。图中任意一点的意愿流值表征了动物在此点出现的可能性,数值越大,则动物迁移至此的可能性越大。

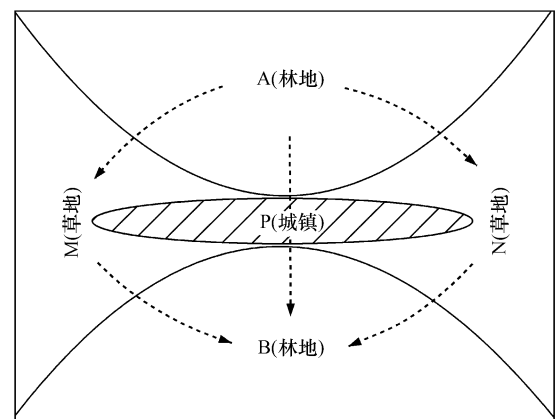


图 1 动物迁移路径示意图

Fig. 1 Map showing the animals' migration route

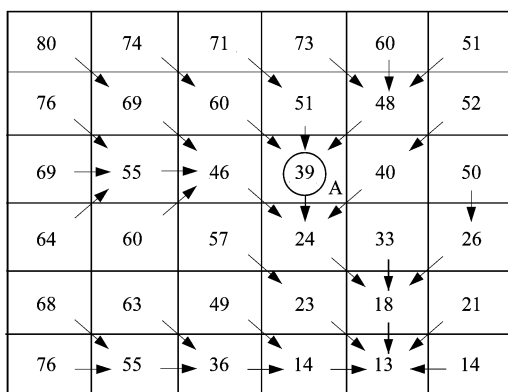


图2 动物迁移方向图

Fig. 2 The migration direction

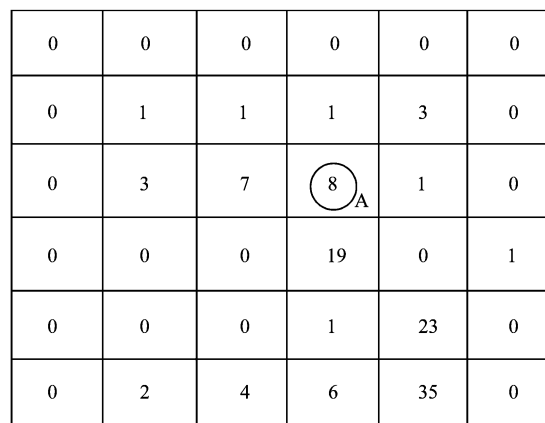


图3 动物迁移意愿流图

Fig. 3 The migration desire flow

1.3 动物迁移意愿流的提取

动物具有趋利避害的本能,倾向于从适宜性较差的地区向适宜性较好的地区移动。这种迁移意愿的方向选择,类似于水由高处向低处流动时所表现出的方向选择,因此可将动物迁移意愿流类比于水流。借助地理信息系统(GIS)中的水文分析(Hydrology)模块,可实现动物迁移意愿流的量化。

水文分析模块以数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为基础,通过提取和分析地表水流的流向、汇流累积量等水文因子,再现水流的流动过程,从而建立地表水的运动模型^[24-25]。

本研究加权考虑了土地利用类型、海拔高度和坡度等客观因素对动物迁移的影响,得到动物迁移适宜性图。以该图作为“DEM”图,利用水文分析模块提取动物迁移意愿流图。

将动物迁移意愿流图与基于MCR法设计的迁移廊道进行叠加比较,如果两者路径吻合,则表明廊道设计较为合理;否则,应按照动物迁移意愿流对廊道进行修正。

2 案例分析

2.1 研究区域

以位于福建省中部、闽江和晋江上游的德化县(北纬 $25^{\circ}23'$ — $25^{\circ}57'$,东经 $117^{\circ}56'$ — $118^{\circ}33'$)为研究区域。德化县境内森林资源丰富,拥有野生珍稀动物38种,其中国家I级保护动物3种。综合考虑德化县的实际情况,选择戴云山自然保护区(国家级)和石牛山国家森林公园(同时也是国家地质公园)作为本研究的“源”。

戴云山自然保护区面积 97.31km^2 ,森林覆盖率93.4%。石牛山国家森林公园位于戴云山自然保护区东南部,保护区面积为 86.82km^2 ,森林覆盖率95%,是我国东南地区重要的生物多样性基因库。

德化县境内的大型猫科动物云豹,为国家I级保护动物,生性极为谨慎,主要栖息于中低海拔阔叶林间,成年个体的活动面积约为 40km^2 。云豹主要以树上的猴、鸟、松鼠以及地上的黄鹿、黑鹿、斑羚、苏门羚、野兔等为食,有时也吃一些草来调节肠胃。

随着当地经济的发展,上述2个保护区之间的林地逐渐被农业用地、种植园地、建设用地等土地利用类型所替代,影响了云豹种群在2个保护区之间的迁移,孤

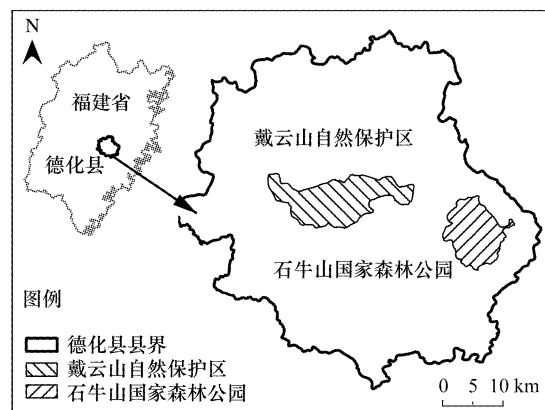


图4 研究区域位置示意图

Fig. 4 Location of the study area

岛效应日益凸显。

2.2 基于 MCR 法的云豹迁移廊道

(1) 土地利用适宜性赋值

云豹主要栖息于中低海拔阔叶林,亚热带和热带山地及丘陵常绿林间,是豹类中最典型的林栖动物,因此林地是本研究廊道设计的基础。根据各种土地利用类型对云豹迁移适宜性的影响进行赋值(表 1)。

表 1 土地利用适宜性赋值表
Table 1 Land suitability evaluation

大类别 Category	小类别 Classification	适宜性 Habitat suitability	大类别 Category	小类别 Classification	适宜性 Habitat suitability
耕地	—	50	居民点及工矿用地	—	100
园地	果园	30	水域	河流水面	100
	茶园	35		水库水面	不可通过
	其他园地	35		苇地	70
林地	有林地	5		滩涂	70
	灌木林	20	未利用土地	荒草地	50
	疏林地	15		沼泽地	70
	未成林造林地	20		沙地	90
	迹地	40		裸土地、裸岩石砾地	90
	苗圃	40	交通用地	—	100

(2) 海拔、坡度适宜性赋值

云豹对海拔的适应范围较宽,适合其生存的垂直高度为海拔 1600—3000m,海拔高度主要通过对云豹食物分布和生活栖息植被的影响决定其垂直分布。坡度方面,有研究表明,坡度越陡,豹类动物出现的概率越小^[26]。结合云豹生活习性和德化县垂直地形植被分布资料,根据海拔高度和坡度对云豹迁移适宜性进行赋值(表 2)。

表 2 海拔高度和坡度适宜性赋值表
Table 2 Altitude and slope suitability evaluation

海拔/m Altitude	适宜性 Habitat suitability	坡度/(°) Slope	适宜性 Habitat suitability
2—400	10	0—10	10
>400—1100	20	>10—20	20
>1100—1300	25	>20—50	50
>1300—1400	30	>50—80	80
>1400—1600	40		
>1600—1700	60		
>1700—1824	80		

根据土地利用类型、海拔高度和坡度这 3 个要素对云豹迁移适宜性影响的大小,确定其权重分别为 80%、10% 和 10%,加权叠加后得到云豹迁移适宜性图。利用 GIS 空间分析(Spatial Analyst)模块中的 cost distance、corridor 工具,得到云豹在 2 个保护区之间的最小迁移成本路径。有关研究表明,豹猫类动物的最小生态廊道宽度应为 1000—1700m^[27]。鉴于云豹体形较小(最小的豹类动物之一),廊道缓冲区半径取下限 500m,得到云豹在保护区区际间的迁移廊道(图 5)。

2.3 基于迁移意愿流的廊道修正

以土地利用类型、海拔高度和坡度加权所得的云豹迁移适宜性图作为“DEM”图,利用 ArcGIS 空间分析模块中 Hydrology 工具集下的 Fill 工具将“DEM”图预处理后,再通过 Flow Direction 工具提取流向,最后利用

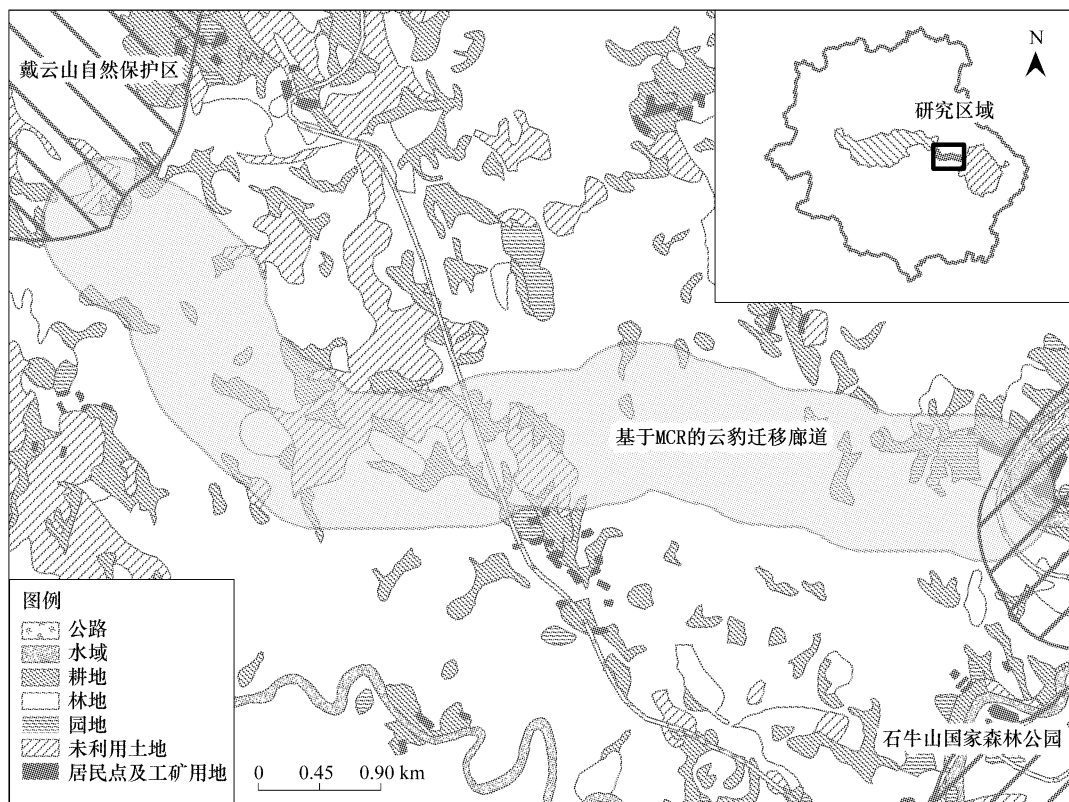


图5 基于 MCR 法的云豹迁移廊道

Fig.5 The migration corridor of clouded leopard based on the MCR model

Flow Accumulation 工具计算得出汇流累积量,得到若干条云豹迁移意愿流(图6)。

从图6中可见,戴云山自然保护区和石牛山国家森林公园之间存在3条主要的云豹迁移意愿流。其中,意愿流A流向北方,意愿流B流向石牛山森林公园,意愿流C流向戴云山自然保护区。

将云豹迁移意愿流图与基于MCR法设计的云豹迁移廊道相叠加,可发现迁移意愿流B、C与迁移廊道不相叠,因此这2条意愿流对廊道的影响可以不予以考虑;意愿流A横穿迁移廊道(图7),这意味着廊道南边的云豹,虽有可能通过M处迁入廊道,但廊道中的云豹也具有由N处向北迁出的趋势。为弱化这一不良后果,可考虑在意愿流流出廊道处(N处)人为设置屏障。

3 讨论

(1)本研究所提出的基于动物迁移意愿流的迁移廊道修正方法,不仅可以修正MCR法设计的动物迁移廊道,而且也适用于修正其它方法^[28]设计的廊道。该方法在理论上具有一定合理性,但实际效果尚需实践验证。另外,由于本研究的目的在于探讨迁移意愿对动物选择迁移路径的影响,为简化问题,没有考虑边缘效应对动物选择迁移路径的影响,在具体的规划设计过程中应予以考虑。

(2)案例中所提出的“人为设障”,包含各种能够促使动物改变迁移意愿的举措,既可采用沟渠、围栏等直接阻挡性设施,也可采用改变目标区域的土地利用类型等间接手段。虽然类似方法已得到较广泛的应用,如

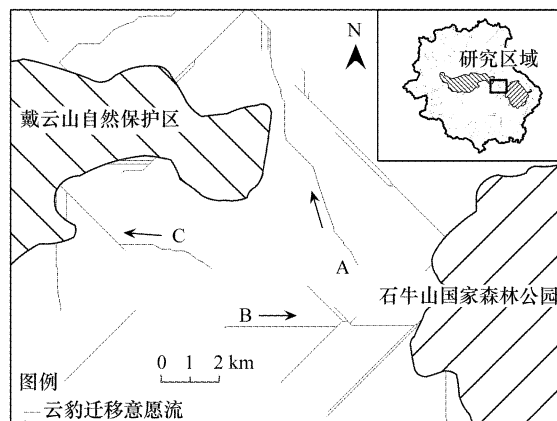


图6 云豹迁移意愿流图

Fig.6 The migration desire flow of clouded leopard

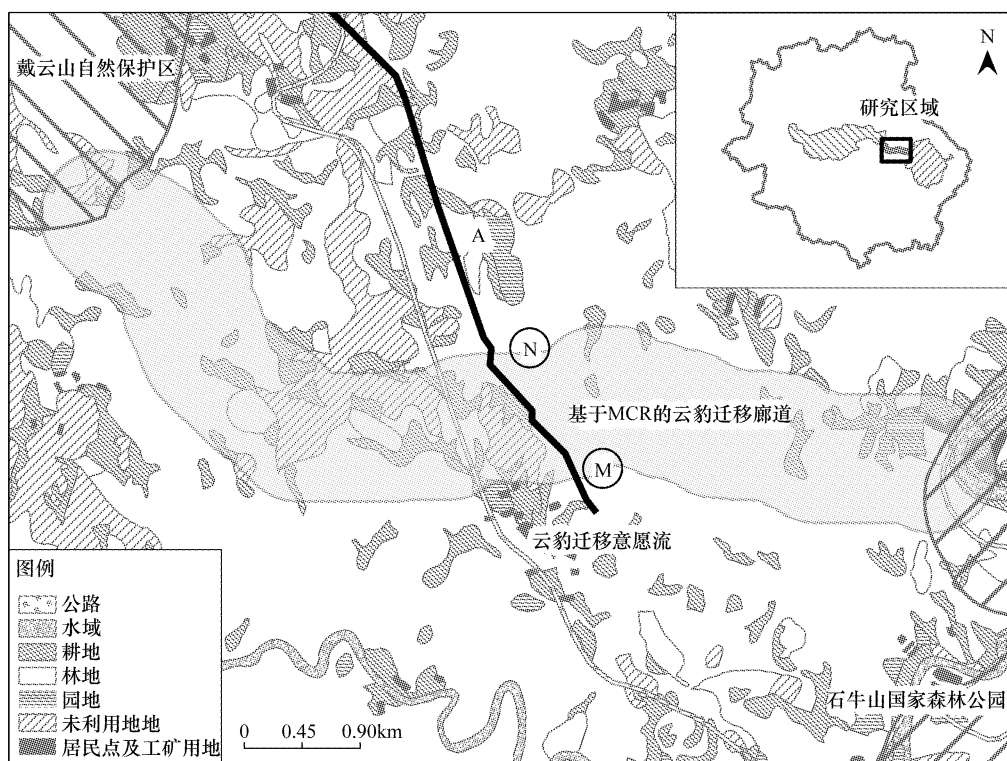


图7 基于迁移意愿的云豹迁移廊道修正

Fig. 7 The revised corridor of clouded leopard revised which based on the migration desire

西双版纳生物多样性保护廊道建设示范项目^[29],但具体的设障方式还要依托具体目标物种、周边环境、其它影响等外部因素综合考虑。

(3)本研究存在一定的不确定性,主要表现在:

①在获得云豹迁移适宜性图的步骤中,土地利用类型、海拔高度和坡度的权重大小,以及各单项迁移适宜性的赋值均为主观赋值,具有不确定性。由于MCR法也包含此步骤,因此在这方面本研究并未提出改进。

②在实际情况中,动物的迁移方向与适宜性的空间梯度方向并不总是保持一致。由于天敌、猎物、人类活动等偶然因素的影响,导致动物存在侧向甚至逆向迁移的可能。因此,本研究提出的迁移意愿方向,应理解为动物移动的最大概率方向;迁移意愿流,应理解为迁移流的最大可能分布。今后的研究中,可考虑对迁移意愿各方向的概率予以量化,并进一步推演迁移意愿流的空间分布概率。研究工具方面,除继续利用GIS中的水文分析模块外,还可采用SWARM等基于多主体(Multi-Agent)的建模平台模拟动物的迁移过程^[30]。

References:

- [1] Noss R F, Quigley H B, Hornocker M G, Merrill T, Paquet P C. Conservation biology and carnivore conservation in the Rocky Mountains. *Biology Conservation*, 1996, 10(4): 949-963.
- [2] Wilcox B A, Murphy D D. Conservation strategy: the effects of fragmentation on extinction. *American Naturalist*, 1985, 125(6): 879-887.
- [3] Harris L D, Scheck J. From implications to applications: the dispersal corridor principle applied to the conservation of biological diversity. *Biological Conservation*, 1991, 60(1), 189-220.
- [4] Renata P, Sergio M S, Ricardo B N. The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammal abundance and diversity in an Atlantic forest landscape. *Biological Conservation*, 2005, 124(2): 253-266.
- [5] Broquet T, Ray N, Petit E, Fryxell J M, Burel F. Genetic isolation by distance and landscape connectivity in the American marten (*Martes Americana*). *Landscape Ecology*, 2006, 21(6): 877-889.
- [6] Adriaenssens F, Chardon J P, Blust G D, Swinnen E, Villalba S, Gulincik H, Matthysen E. The application of least-cost modeling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 2003, (64): 233-247.
- [7] Michelle A L, Clayton K N. Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods.

- Ecological Modelling, 2008, 212(3/4): 372-381.
- [8] Gan H X, Hu H B. Biodiversity conservation corridor design based on habitat selection of gaur (*Bosgaurus*): A case study from Xishuangbanna, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2153-2158.
- [9] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(2): 1-16.
- [10] Yu K J, Duan T W, Li D H, Peng J F. Landscape accessibility as a measurement of the function of urban green system. *City Planning Review*, 1999, 23(8): 8-11.
- [11] Li J H, Liu X H. Research of the Nature Reserve Zonation Based on the Least-cost Distance Model. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 217-224.
- [12] Kassandra D, Frank A, Carlo R, Doncaster C P, Erik M. Evaluating least-cost model predictions with empirical dispersal data: A case-study using radiotracking data of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Ecological Modelling*, 2007, 209(2/4): 314-322.
- [13] Martin H. When corridors work: Insights from a microecosystem. *Ecological Modelling*, 2007, 202(3/4): 441-453.
- [14] Alejandro J R, Elizabeth N A, Julieta B, Carlos A B, Paula M, Jorge M A. Environmental analysis in the selection of alternative corridors in a long-distance linear project: A methodological proposal. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80(3): 266-278.
- [15] Susan G L, William F L. Tropical wildlife corridors: use of linear rainforest remnants by arboreal mammals. *Biological Conservation*, 1999, 91(2/3): 231-239.
- [16] Sharon K C. Spatial arrangement of habitat patches and corridors: clues from ecological from field experiments. *Landscape and Urban Planning*, 1998, (42): 157-168.
- [17] Tania UH, Carlos A P, Paul M D. Regional scale effects of human density and forest disturbance on large-bodied vertebrates throughout the Yucatan Peninsula, Mexico. *Biological Conservation*, 2009, (142): 134-148.
- [18] Ralph B, William J M, Patrick C, Michelle E L, Francisco D, Sylvain G, Loic M, Nicaise G, Serge M, James E H, James D N, Alfonso A. Patch-occupancy models indicate human activity as major determinant of forest elephant *Loxodonta cyclotis* seasonal distribution in an industrial corridor in Gabon. *Biological Conservation*, 2007, 135(2): 189-201.
- [19] Karina L S, Sergio A L, Ola O. Disturbance from roads negatively affects Andean condor habitat use. *Biological Conservation*, 2008, 141(7): 1765-1772.
- [20] Iñaki R P, Esteban F J. Effects of direct human disturbance on the endemic Iberian frog *Rana iberica* at individual and population levels. *Biological Conservation*, 2005, 123(1): 1-9.
- [21] Hecnar S J, M' Closkey R T. Effects of human disturbance on five-lined skink, *Eumeces fasciatus*, abundance and distribution. *Biological Conservation*, 1998, (85): 213-222.
- [22] Converse S J, Smith G R, Valiulis J M. Long-term trends in the demography of the Allen Cays Rock Iguana (*Cyclura cychlura inornata*): Human disturbance and density-dependent effects. *Biological Conservation*, 2006, 132(3): 300-310.
- [23] Ma J Z, Cheng K. Impacts of ecotourism on wildlife in nature reserves: monitoring and management. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2818-2827.
- [24] Johnson A C, Keller V, William R J, Young A. A practical demonstration in modelling diclofenac and propranolol river water concentrations using a GIS hydrology model in a rural UK catchment. *Environmental Pollution*, 2007, 146(1): 155-165.
- [25] Swetnam R D, Mountford J O, Armstrong A C, Gowing D J G, Brown N J, Manchester S J. Spatial relationships between site hydrology and the occurrence of grassland of conservation importance: a risk assessment with GIS. *Journal of Environmental Management*. 1998, 54(3): 189-203.
- [26] Thomas M M, Todd K F, Bariusha M. Movements and activities of snow leopards in Southwestern Mongolia. *Biological Conservation*, 2005, 124(4): 527-537.
- [27] Da L J, Chen K X, Xin Y F. The Scale of Ecological Corridor in the Urban Forest of Shanghai. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(4): 16-18.
- [28] Ferenc J. A reliability-theory approach to corridor design. *Ecological Modelling*, 2000, (128): 211-220.
- [29] Li Z L, Chen M Y, Wu Z L. Research advances in biological conservation corridor. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 523-528.
- [30] Ding H, Yang X P. SWARM — An Object-Oriented Platform to Construct Artificial Life Model. *Journal of System Simulation*, 2002, 14(5): 569-572.

参考文献:

- [8] 甘宏协, 胡华斌. 基于野牛生境选择的生物多样性保护廊道设计: 来自西双版纳的案例. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2153-2158.
- [10] 俞孔坚, 段铁武, 李迪华, 彭晋福. 景观可达性作为衡量城市绿地系统功能指标的评价方法与案例. *城市规划*, 1999, 23(8): 8-11.
- [11] 李纪宏, 刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 217-224.
- [23] 马建章, 程鲲. 自然保护区生态旅游对野生动物的影响. *生态学报*, 2008, 28(6): 2819-2827.
- [27] 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.
- [29] 李正玲, 陈明勇, 吴兆录. 生物保护廊道研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 523-528.
- [30] 丁浩, 杨小平. SWARM——一个支持人工生命建模的面向对象模拟平台. *系统仿真学报*, 2002, 14(5): 569-572.