

道路生态学研究进展

宗跃光¹, 周尚意¹, 彭 萍¹, 刘 超¹, 郭瑞华², 陈红春³

(1. 北京师范大学资源与环境科学系, 资源科学研究所, 北京 100875; 2. 国地土地估价中心, 北京 100135; 3. 深圳市规划与国土资源局福田分局, 深圳 518045)

摘要:“道路生态学”是当代景观生态学的最新研究领域。重点探讨道路生态学和生态道路网的研究进展。从景观生态学的点效应、廊道效应和边际效应出发, 引入景观生态网络的概念, 即由点、线、网按照一定等级结构、功能分工和空间秩序组合成的生态网络体系, 其中道路网和水网是最主要的表现形态。根据网络理论构造网络结构影响度模型, 在 GIS 和 RS 的支持下, 通过对北京局部地区道路网动态模拟的分析表明, 道路网对其他景观的影响是通过点效应、廊道效应、点-廊道-网络叠加效应共同作用的结果, 这种影响与道路网络密度和道路影响带的范围成正比。因此, 为了最大限度减少道路网对自然生态系统的干扰与破坏, 提出生态道路网络建设的 8 点建议。

关键词:道路生态学; 道路影响带; 景观生态网络; 生态道路建设

Perspective of road ecology development

ZONG Yue-Guang¹, ZHOU Shang-Yi¹, PENG Ping¹, LIU Chao¹, GUO Rui-Hua², CHENG Hong-Chun³ (1. The Department of Resources and Environmental Sciences, Institute of Resources Science, Beijing Normal University 100875, China; 2. GUODI Land Appraisal Center, 100135, China; 3. FUTIAN Sub-division Bureau, Urban Planning and National Land Resources Management Bureau, SHENZHEN, China, 518045). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2396~2405.

Abstract: Road ecology, representing a new frontier of landscape ecology and just emerging in recent years, has both opportunities and challenges for landscape ecologists. Based on reviewing former research literature, this paper tried to explore a landscape eco-network theory in detail to find a framework of eco-road network construction. Road networks crossing landscape, yet except for their social and economical benefits, divide natural landscape into pieces, alter landscape spatial patterns, destroy wildlife habitats, interrupt horizontal ecological flows, completely change layer's structures of soils in roadbeds, spread out contaminants and noise through total networks, and therefore disturber or inhibit balance of natural ecosystems. This situation become more serious associated with extending road-effect zones, which are

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40171029); 国家留学基金管理委员会资助项目(留金出[1997]007 号)。

收稿日期:2002-07-10; **修订日期:**2003-08-10

作者简介:宗跃光(19~), 男, 北京人, 博士, 教授, 主要从事城市生态学、城市地理学、景观生态学及空间决策与支持系统研究。

本文的基本构思得到美国哈佛大学 Forman 教授研究工作富有建设性的启发和帮助, 英文摘要得到 Lara 博士的精心修正, 在此一并表示感谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40171029) and China Scholarship Council, No. [1997]007.

Received date: 2002-07-10; **Accepted date:** 2003-08-10

Biography: ZONG Yue-Guang, Ph. D., Professor, main research field: Urban ecology, urban geography, landscape ecology, and spatial decision support system.

usually much greater than the coverage areas of road networks.

The structure of road-effect zone can be further divided into node-effect zone, corridor-effect zone, node-corridor-effect zone, and therefore net-effect zone based on a landscape eco-network theory. The theory views a landscape ecosystem as a complex network system constructed with physical, economical and social networks. Both road networks and stream networks belong to physical networks for them constructed between natural and artificial networks, designed for carrying ecological flows among functional units of landscape, and still most often observed as major conspicuous objects in landscape. Original stream networks have been constructed by natural ecosystem for carrying ecological flows efficiently, but after road networks interrupt them and create sections with various road-stream crossings and effect zones, the functions of stream networks have been partially or totally altered.

One of the pilot projects chosen for this study was a process of urban landscape altering agriculture landscape associated with several small natural patches along the section of Jing-Chang Highway in Beijing. Supported by Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) techniques, three images of urban landscape structure were identified in the periods of 1975, 1985 and 2000. The result demonstrated, after overlying of the images, there were only small node-effects on both sides of corridor section, Qinghe and Shahe, and almost no visual landscape indicated corridor-effect along the section in 1975. Ten years later in 1985, node-effects performed much stronger than that of before, especially on Qinghe site for it is closer to the central area of Beijing, and on the other hand several urban landscape patches connected with the corridor section indicated an increasing corridor-effects. Those corridor-effects could be observed from continuous growing urban patches along the section and almost connected each other in 2000. Therefore, this trend may lead to the result of complete dividing agriculture landscape in the study area. This process was further explained with several hypothesis maps and an effect-indicator model originally innovated from the network theory. The final results show us road network effect zones associated with nodes, corridors and nets are positively increasing with road network densities.

However, this primary study was only a small context of road ecology discipline and there are still remain a lot of areas to be explored, such as roadside ecosystem conservation, road eco-engineering construction, road eco-economic assessment, road eco-design, road eco-network theory, road pollution prevention, or even more, likely eco-road network policy, planning, assessment and construction. Finally, 8 proposals related to the eco-road network construction were presented.

Key words: road ecology; road-effect zone; landscape eco-networks; eco-road construction

文章编号:1000-0933(2003)11-2396-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

2002年1月,美国著名景观生态学家R. T. T. Forman教授,在北卡罗来纳州立大学发表了题为“道路生态学——我们在地上的巨作(Road Ecology: Our Giant on the Land)”的著名讲演,标志着“道路生态学”的研究进入一个崭新的时代^[1,2]。Forman教授指出:道路网络已经成为当今社会和经济发展的中枢,其分布范围之广和发展速度之快,都是其他人类建设工程不能比拟的。当道路网络和各种交通工具为人类社会带来巨大效益的同时,它们对自然景观和生态系统的分割、干扰、破坏、退化、污染等各种负面影响也在不断加大,而这种影响长期以来被人类社会所忽视。有关资料研究表明,这种影响至少涉及到全球陆地的15%~20%^[3~7]。因此,面对我们经济社会中交通流量和道路网络突飞猛进的发展,景观生态学家有责任、有义务和道路规划师、工程师、经济师共同对话,对道路网络建设极其产生的广泛影响进行全面分析、研究和评价,在追求人类社会经济效益的同时,最大限度的减少道路网络对自然生态系统的影响和破坏。

道路生态学的研究可以追溯到20世纪70年代,Oxley等人开始研究道路对小型哺乳动物和野生动物造成的影响^[8,9];Free等人曾经研究道路对某些种类昆虫带来的影响^[10];美国交通部的研究机构于1979

年出版的手册,已经开始重视高速公路对湿地的生态影响^[11]。Laursen 研究过道路对鸟类空间分布和出现频率带来的影响^[12]。Knutson 重点研究道路对动物区系生态行为极其生境的影响^[13]。进入 20 世纪 90 年代以来,有关道路生态学的文献大量出现,荷兰和澳大利亚的学者率先研究道路网络和交通廊道对自然生态系统的分割、干扰与破坏^[14~16],90 年代末期美国学者开始主导道路生态学的研究,重点转移到道路网络、道路影响带极其相关领域^[17~23]。2002 年英国学者 Sherwood 等人在分析了道路网对野生生物巨大的毁灭能力之后,提出有必要全面进行生态道路网设计^[24]。同年,Forman 等人的巨著《道路生态学:科学与解答》(Road Ecology: Science and Solution, 2002)开始发行,在本书的 14 个章节中,Forman 教授详细论述了道路生态学的形成基础、发展过程以及道路与各种景观要素、动植物区系相互作用的关系。进入 2003 年,国际社会多次召开道路生态学的学术会议,例如 2003 年 5 月在美国加州首次召开的道路生态学研讨会以及 8 月在纽约召开的“国际生态学与运输大会”。尽管道路生态学还是一个新兴学科,但是她在协调人工与自然生态系统之间的关系方面可以发挥巨大的潜力。道路生态学的理论基础可以植根于流域生态学、植被生态学、野生生物生态学、化学生态学、水文生态学等学科领域,但是只有景观生态学才为她提供广泛而又充分的活动舞台,为其在理论和方法论上提供坚实的基础^[1,2]。

道路生态学涉及的主要研究领域^[3~8] (1)道路对生物种群和生物栖息环境的影响,其中包括:动植物的分布、侵入、隔离、迁移、种群规模、数量、极其动态影响,道路建设对野生动植物生境的影响等;(2)道路对地质、地形、地貌、水文、土壤、小气候等物理环境的影响;(3)道路和车辆产生的道路污染带研究,其中包括:噪音污染、汽车尾气和扬尘形成的大气污染、汽车泄漏和交通事故形成的有害、剧毒物质的污染等;(4)道路网络和道路影响带(road effect zone)的研究。道路网络是由节点和交通廊道按照一定空间规则组合起来的网络,道路影响带是指由于道路极其载体交通流量而形成的空间生态效应影响地带,这种影响带的范围往往数十倍于道路本身的面积。因此道路网络的研究包括网络结构、功能、密度、网络流、动态演替等;道路影响带研究包括空间距离、范围、格局、形态、影响类型、影响度等;(5)生态道路和生态道路网设计,包括生态道路规划、设计和建设;(6)道路交通政策、规划与发展对策研究,其中包括制定环境保护的法律、法规,环境影响评价、生态经济效益分析以及可持续发展对策等。

我国的道路网建设自解放以来也有迅猛的发展,据统计 1999 年底全国公路网 135.17 万 km,是 1952 年的 10.7 倍,客运量 126.9 亿人次,货运量 99.04 亿 t。全国铁路网 5.79 万 km,是 1952 年的 2.52 倍,客运量 10.02 亿人次,货运量 16.7 亿 t^[25]。“要致富,先修路”已经成为改革开放以来城乡经济建设的中心口号,不少学者研究道路建设对区域经济发展的巨大推动作用^[26,27],并且开始研究道路建设对区域自然生态系统和城市环境产生的影响^[28,29],但是还没有上升到道路生态学的角度。本文在总结国内外研究成果的基础上,抛砖引玉,以期国内更多学者加入到“道路生态学”的研究领域。

1 道路生态学的节点、廊道效应与道路影响带研究

道路生态学的基本理论基础是景观生态学,景观生态学的结构与功能原理、空间格局和空间演替理论等等都可以有力支持道路生态学的研究。例如:肖笃宁等人提出的景观整体性、异质性、多样性、等级性、镶嵌性、空间聚合性、生态流传播、自然和人文性、价值性、演替性等^[30,31];傅伯杰等人从 5 个方面探讨了景观生态学基本理论,在土地持续利用评价中的应用,即综合性、整体性、尺度性、空间格局与生态过程、干扰与人类影响以及多重价值与多目标性^[32];俞孔坚等人从生物保护安全格局出发,提出源、缓冲区、源间联结,辐射道和战略点等^[33]。此外,王仰麟等人从景观生态系统的空间结构概念出发,提出斑、廊、基、缘是空间结构的 4 个主要元素^[34]。Johes 等人认为,道路廊道存在 4 种生态效应,传输、隔离、源和汇(sink)^[35]。综合上述观点,景观生态系统是由景观单元(斑块、镶嵌体)、廊道、网络、基质等共同构成。由于景观格局具有等级性和层次性,因此在实际工作中要注意划分的相对性,例如:如果从区域的角度出发,景观单元可以作为“点”来研究,如果深入到景观单元内部,则可以作为“面”来研究,它就转变为另一等级层次的景观体系^[36~39]。

目前道路生态学理论上的研究重点转向“道路影响区”,例如尽管美国道路的面积仅占国土面积的 1% 左右,但是其影响区域可以达到总面积的 20%,甚至 25%^[1,6],由此可见道路影响区研究的重要性。图 1 是

道路产生的节点(交通中心、枢纽、交汇点、立交桥或其他景观类型相互作用点等)和廊道(交通线)极其影响区分布示意图。道路影响区理论上可以分为点效应(A,C)和廊道效应(B,D)两种基本类型,根据其影响区的形状,可以分为规则形(A,B)和不规则形(C,D)2类。Forman 等人曾经以美国麻省的郊区为例,研究高速公路对9种生态因子(湿地、河流、道路盐化、外来植物侵入、北美驯鹿、鹿、两栖动物和草原与森林鸟类)的影响范围。结果表明,所有因子的受影响范围至少在100m 以上,有些因子可以达到1000m,平均影响范围600m 左右,其影响区是由各种规则形和不规则形共同组成的^[20]。

为了进一步从实践中验证交通网络的点效应和廊道效应,本文在GIS 和RS 的支持下,对北京市京昌高速公路的清河~昌平地段,城市景观在点和廊道效应作用下的动态增长过程进行解译(图2,表1)。从图中可以看到,1975 年昌平、清河与沙河镇的城市景观都表现为相对孤立的点的集合,除了点效应以外,几乎观察不到廊道效应的存在,城市景观斑块数量14 个,大部分集中在上述3 个城镇。交通廊道影响范围长度7km,占影响范围总长度的28%;交通廊道影响范围面积约5.62km², 占总影响范围面积的4.76%,因此城市景观对农业和自然景观的影响较小。1985 年点和廊道效应都明显增强,由于清河离母城较近,因此点效应大于昌平和沙河。此外,在廊道效应的作用下,沿京昌路出现一系列城市景观斑块,这些斑块不断增大,加大对农业和自然景观的侵入和分割过程,交通廊道影响范围长度增加到13.07km,占影响范围总长度的52.3%;交通廊道影响范围面积约17.39km², 占总影响范围面积的14.74%。由于点-廊道叠加效应不断强化,到2000 年已经出现城市景观斑块相互粘合的特征,交通廊道影响范围长度增加到22.71km,占影响范围总长度的90.8%;交通廊道影响范围面积约57.98km², 占总影响范围面积的49.14%。根据这一发展趋势,预计2005 年前后,清河~昌平地段的城景观将会在点和廊道效应共同作用下粘合成片,完成对本区农业和自然景观的分割过程。

2 道路生态学的生态网络理论

Forman 曾经形象地把道路比喻作一张巨大的人工网络,将大地紧紧捆绑起来,将自然生态系统分割开来,以提供人类主宰世界的空间便利度^[1-6]; Jones

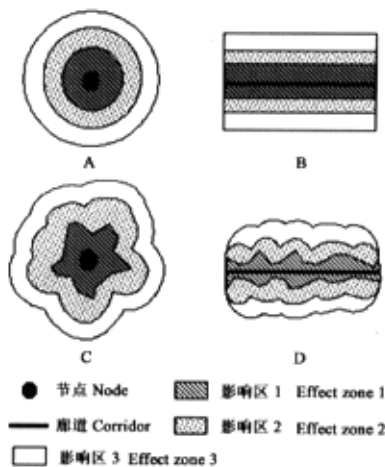


图1 道路影响区的点效应和廊道效应示意图

Fig. 1 Sketch map of node-effect and corridor-effect within road-effect zones

表1 京昌高速公路廊道效应作用下的城市景观动态变化基本指标*

Table 1 Indicators of dynamic process of urban landscape along Jing-Chang Highway from 1975 to 2000

时 期 Stage	1975	1985	2000
城市景观斑块数量 Numbers of urban landscape patches	14	25	31
交通廊道影响范围长度(km) Length of road effect zones(km)	7	13.07	22.71
影响范围长度百分比(%) Percentage length of road effect zones(%)	28	52.3	90.8
交通廊道影响范围面积(km ²) Areas of road effect zones(km ²)	49.62	17.39	57.98
影响范围面积百分比(%) Percentage areas of road effect zones(%)	4.76	14.74	49.14

* 京昌高速公路段的起算点是从规划外环线(五环)的交叉点到昌平,全长约25km;总面积包括高速公路两侧各2km的范围,以遥感影像上城市景观空间分布特征为依据 The section of Jing-Chang Highway is from the intersection of outside ring road planned (Fifth ring road) to Changping. The total length is about 25 km and the total area included both both sides of Jing-Chang Highway within 2 km. The spatial distributions of urban landscape are based on TM images.

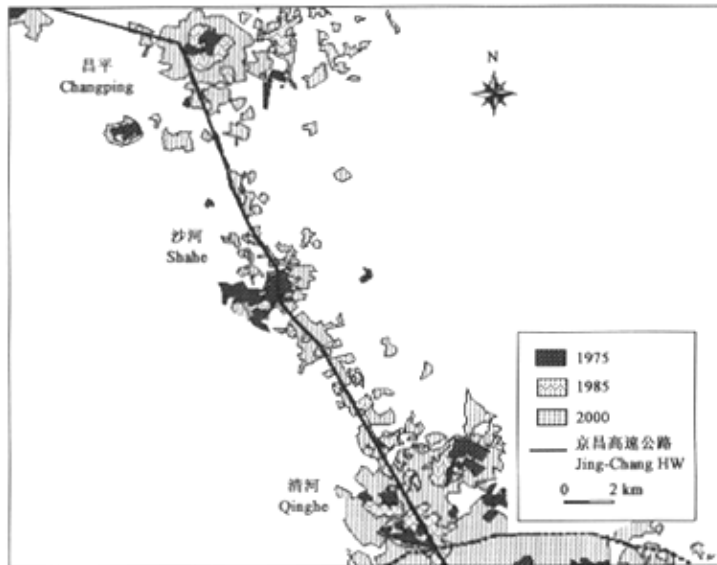


图2 京昌高速公路廊道效应作用下的城市景观动态变化特征(1975~2000)

Fig. 2 Dynamic process of urban landscape under the driving force of corridor effect along the section of Jing-Chang HW (1975~2000)

等人重点研究水网和道路网相互作用的关系之后,发现道路网对水网具有强烈的干扰作用^[35]。本文将上述思想进一步拓展,结合马世俊、王如松的复合生态系统理论^[40],提出景观生态网络的概念,即由各种景观功能单元和自然、经济、社会等各种关系网组合而成的空间网络体系,其中水网和道路网是最基本的景观生态网络表现形态。生态网络理论可以追溯到达尔文的进化论,大自然本身就是一张复杂的关系网(a web of complex relation),没有一种生物的生存能够脱离这张关系网,例如食物网、种群关系网等等。据此本文将景观生态网络分为3层4结构体系(图3),底层基础是物理网络,包括各种自然网络(地质、地貌、土壤、水文、气候以及生境等)和人工网络(给排水网、电力网、电讯网、燃气网、供热网等等),其中道路和河流网络位于自然和人工网络之间,因为它们兼有2者的共同特征。第二层是经济网,对于自然生态系统来说,食物链与食物网是其主要表现形式,对于人类社会来说,主要通过商品的生产网、流通网、交换网与消费网来实现。最高层是社会网,对于自然生态系统来说主要体现的是动植物种群的社会关系,对于人类社会来说,主要体现的是

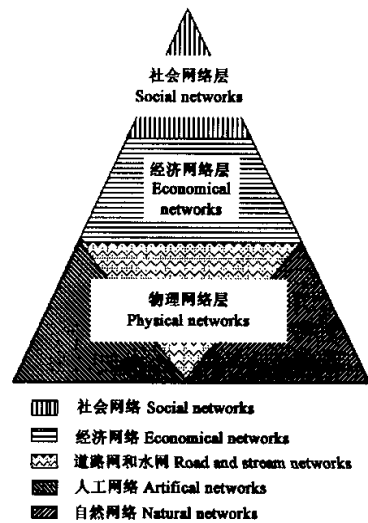


图3 景观生态网络结构示意图

Fig. 3 Theoretical sketch of landscape eco-network structure

人与人之间的社会关系,可以进一步分为民族文化社区网和行政管理网。由于道路和河流网络位于生态网络基础层的核心部位,因此“道路生态学”的研究对象主要通过道路网和水网展开,由此涉及到自然生态系统中的动植物种群、群落、生境,自然要素中地质、地貌、土壤、水文、气候等,以及人类社会中的人工网络和各种社会经济关系^[41]。

景观生态网络有各种分类方法,如果从人类的视觉来分,空间上可以分为可视和不可视部分,道路与河流网络是最基本的可视性景观网络。图4是北京地区景观生态网络的空间体现,由水网、道路网和一级城镇体系构成的基本结构和空间格局。如果进一步分析北京地区景观网络的结构,可以发现它们是由点(城镇、水体等)、线(道路、河流等)、网(道路网、水网等)按照一定等级结构、功能分工和空间秩序组合成的不同空间“体”,即景观生态系统。这些“点、线、网、体”的存在和组合产生特定的生态位(niche)和复杂多样的生态位势场,即我们通常提到的边际效应(edge effect),同时形成不同类型的景观虚体(景观效应场)。各种生态流(水流、交通流等)在不同生态位势场力的作用下,在这些网络中的流动和交换,引起各个景观功能单元的发生、发展、壮大、停滞、衰亡以及灭绝,即所谓的景观生态演替过程^[42]。

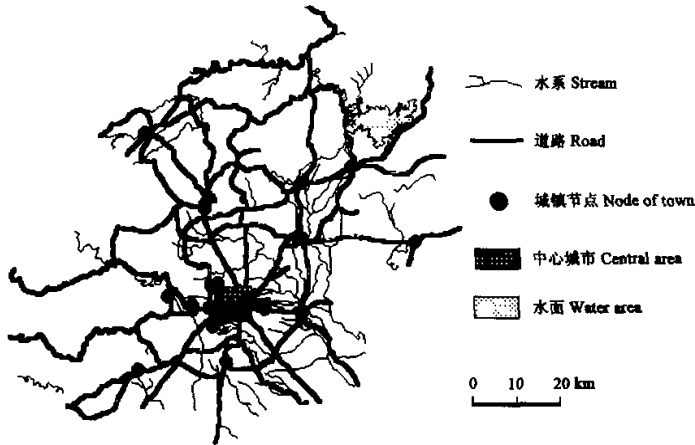


图4 北京地区基本景观生态网络的空间结构与特征

Fig. 4 Typical landscape eco-networks described with its spatial structure and characteristics in Beijing

3 道路生态学的生态经济理论研究

如果说河流网是自然生态系统为传送生态流所形成的最经济形式,道路网则是人类为满足自身的社会经济需求所形成的输送人流、物流和信息流等最经济的形式,两种网络的存在都在追求自身效益的极大化。由于道路网叠加于自然网之上,因此对自然景观的负面影响伴随道路网络的发展日益增大。所以在道路网的规划建设过程中,不能仅仅考虑其经济效益,同时要考虑道路网产生的环境影响(图5)。可以从理论上假设,两种效益在道路影响带内都是距离的函数,即经济效益遵循距离衰减率,环境效益遵循距离递增率^[17],则最大道路总效益产生在两条曲线的交点D。寻求最大综合效益点和有效控制道路影响区的范围,应该是道路规划、评价、决策和建设的最基本出发点。

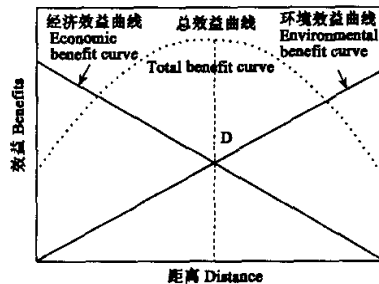


图5 道路影响带产生的环境经济效益示意图

Fig. 5 Sketch of eco-economic benefits produced by road-effect zone

4 道路生态学的动态演替理论研究

道路网是伴随人类社会经济的发展而逐步形成的景观网络,因而存在动态演替过程。图6是根据北京市局部地区水网与道路网的相互作用关系,抽象出道路网络化对水网的影响过程。为了分析其动态演替过程,本文根据网络模型^[41,43],设定网络中的边、节点和环都对整个网络产生影响,据此构造道路网和水网的结构度指数(1)和影响度模型(2):

$$S = E + P + L \quad (1)$$

式中, S 表示网络结构度指数; E 表示边数或廊道数; P 表示节点数,可以定义为两条或两条以上边的交点; L 表示环数:

$$F = \frac{S_1}{S_2} \quad (2)$$

式中, F 表示道路对水网的影响度模型, S_1 和 S_2 分别表示道路网和水网的结构度指数。

为简化起见,本文对图6的动态过程作了两点假设:一是水网结构度指数保持不变;二是道路对水网的影响主要通过水网与道路网相交的节点、通过节点的水网边和水网与道路网形成的环实现。分析结果表明,对于局部地区,1条道路的影响度达到0.381,3条道路的影响度达到1.095,6条道路的影响度达到1.714,每条道路的影响度大体上以0.3左右的速度递增。

实际上,由于点效应、廊道效应极其叠加效应的存在,道路影响带在道路网效应中体现的更加明显。Jones等人将其归纳为3种相互作用过程,道路网与水网、道路网与斑块以及水网与斑块^[35]。本文将点效应、廊道效应进一步推广到网络效应,在图6的基础上加上水网和道路网的影响带,其景观格局用图7表示。假设研究地区的景观类型属于一个完整的自然生态系统(阶段A),在道路分割和隔离效应的作用下;阶段B,一条道路将一个完整的自然生态系统分割为2;阶段C,四条道路进一步将其分割为9;阶段D,六条道路进一步将其分割为16。显然,道路网络越密集,对自然生态系统分割越强烈。此外,由于道路影响带的存在,道路网络的影响范围也不断加大,阶段A、B、C、D分别为0、10%、30%和60%以上。根据Trombulak等人的研究^[23],道路网往往可以通过河流网将其影响范围扩大到整个流域,因为河流网本身就是交通网的一部分,特别是道路建设在河流的上游地区,通过对水流的控制、阻挡、分流及污染等过程影响到整个下游地区。因此理论上可以推测,当道路网络达到一定密度之后,其影响范围可以覆盖整个区域^[44]。

5 结论与讨论

道路生态学是当代景观生态学的最新研究领域,道路生态学作为景观生态学的一个重要分支,有着广泛的发展和应用前景。其产生的历史背景与现代化交通网络突飞猛进的发展,以及对自然生态系统日益强大的影响有关。根据这一发展趋势,本文重点探讨道路生态学以及生态道路网建设的基本进展。从景观生

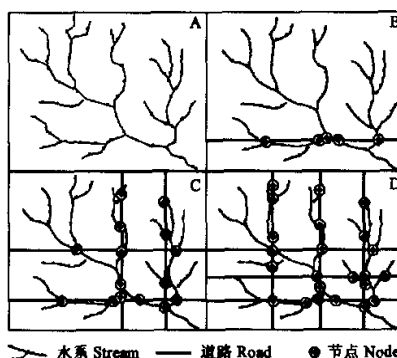


图6 北京局部地区道路网对水网影响的动态过程模拟
Fig. 6 Dynamic simulation processes of effects produced by a road network on a stream network within a typical area of Beijing

表2 道路网对水网的影响度指数变化*

Table 2 Changes of effect-index describing effects created by a road network on a stream network

		阶段 A	阶段 B	阶段 C	阶段 D
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase D
边数	E	0	7	19	28
Line number	E				
节点数	P	0	5	15	23
Node number	P				
环数	L	0	4	13	21
Circle number	L				
结构度指数	S	0	16	47	72
Structure index	S				
影响度指数	F	0	0.381	1.095	1.714
Effect index	F				

* 水网的结构度指数为42

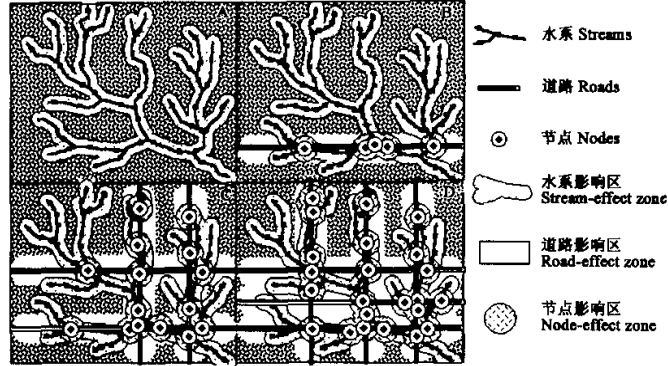


图7 局部地区道路网和水网空间影响带的动态过程模拟

Fig. 7 Dynamic simulations with the process of effect-zones on a stream network influenced by a road network
生态学的点效应、廊道效应和边际效应出发,结合前人在道路网和道路影响带方面的研究工作,引入景观生态网络的概念,即由点、线、网按照一定功能分工、等级结构和空间秩序组合成的生态网络体系,在生态位势场力的作用下,各种生态流在这些网络中的流动和交换,引起景观生态演替过程。其中道路网和水网是景观生态系统传输生态流的最主要表现形态。据此本文根据网络理论构造一种网络结构影响度模型,在GIS和RS的支持下,通过对北京局部地区道路网动态过程模拟的分析表明,道路网对其他景观的影响是通过点效应、廊道效应、点-廊道-网络叠加效应共同作用的结果,这种影响与道路网络密度和道路影响带的范围成正比。

上述研究仅仅是道路生态学领域的极小部分,其研究理论、方法与应用还有许多亟待探讨的方面,涉及的领域有:道路生态系统保护学、道路生态经济学、道路生态工程学、道路景观生态设计学、道路污染防治学、道路建设生态评价、规划、决策,以及生态道路网的建设等。对于生态道路网建设,本文根据Forman等人的工作基础^[1-5],归纳出几种发展对策供参考:(1)生态道路网建设要尽量避免对动植物种群生境的分割、破坏以及动态干扰;(2)建设大范围的绿地网络体系与道路网共同构成相互融合的景观生态网络体系,以保持生物多样性和生态系统稳定性;(3)设计有效的生态路基通道,以消除道路的隔离效应,使动物和水流可以顺利通过;(4)对道路影响带极其产生的边际效应进行调控,增加其正面影响的同时将负面影响控制在最小范围;(5)有效利用网络理论,从最短距离、最小运费、最大网络流和最小生态干扰出发,设计生态道路网络的空间结构;(6)从最佳生态经济效益出发,对生态路网密度/网孔尺度进行合理调整;(7)利用生态道路网络的变异性性和可替代性,使道路网偏离生态脆弱带和景观敏感区,对于一级生态保护区应该全面限制道路网的建设;(8)生态道路网的建设要进行生态适宜性评价与环境决策评价。总之,道路生态学作为一门新兴边缘学科,具有重要发展前景,同时也面临许多机遇和挑战。

References:

- [1] Forman R T T. Road ecology: our giant on the land. A CTE Distinguished Speaker Series Lecture Presented at NC State University, 2002, <http://www.itre.ncsu.edu/cte/DSS.html>.
- [2] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, *et al.* Road ecology: science and solutions. Inland Press, 2002. 3~397.
- [3] Reijnen R, Foppen R, Terbraak C, *et al.* The effects of car traffic on breeding bird populations in woodland III. Reduction of density in relation to the proximity of main roads. *Journal of Applied Ecology*, 1995, **32**: 187~202.
- [4] Forman R T T. Road ecology: a solution for the giant embracing us. *Landscape Ecology*, 1998a, **13**: iii~v.
- [5] Forman R T T, and Deblinger R D. The ecological road-effect zone for transportation planning and a

- Massachusetts Highway example. In: Proceedings of the International Conference on Wildlife Ecology and Transportation, 1998b. 78~96.
- [6] Forman R T T, and Alexander L E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998c, **29**: 207~231.
- [7] Forman R T T. Horizontal processes, roads, suburbs, societal objectives, and landscape ecology. In: *Landscape ecological analysis: Issues and applications*, 1999. 35~53.
- [8] Oxley D J, Fenton M B, and Carmody G R. The effects of roads on populations of small mammals. *Journal of Applied Ecology*, 1974, **11**: 51~59.
- [9] Vestjens W J M. Wildlife mortality on a road in New South Wales. *Emu*, 1973, **13**: 107~112.
- [10] Free J B, Gennard D, Stevenson J H, et al. Beneficial insects present on a motorway verge. *Biological Conservation*, 1975, **8**: 61~72.
- [11] Research Board Transportation. *Ecological effects of highway fills on wetlands; user's manual*. Transportation Research Board, 1979.
- [12] Laursen K. Birds on roadside verges and the effect of mowing on frequency and distribution. *Biological Conservation*, 1981, **20**: 59~68.
- [13] Knutson R M. *Flattened Fauna: A field guide to common animals of roads, streets, and highways*. Ten Speed Press, 1987. 23~56.
- [14] Andrews A. Fragmentation of Habitat by Roads and Utility Corridors: A Review. *Australian Zoologist*, 1990, **26**: 130~141.
- [15] Lamont DA, Blyth JD. Roadside corridors and community networks. In *Nature Conservation 4: The Tale of Networks*, 1995. 425~35.
- [16] May S A, and Norton T W. Influence of fragmentation and disturbance on the potential impact of feral predators on native fauna in Australian forest ecosystems. *Wildlife Research*, 1996, **23**: 387~400.
- [17] Forman R T T, Friedman D S, Fitzhenry D, et al. *Ecological effects of roads; toward three summary indices and an overview for North America*, 1995. 40~54.
- [18] Forman R T T, and Hersperger A M. Road ecology and density in different landscapes, with international planning and mitigation solutions. In: *Trends in addressing transportation related wildlife mortality*, 1996. 1~22.
- [19] Forman R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conservation Biology*, 2000, **14**: 31~35.
- [20] Forman R T T, and Deblinger R D. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway. *Conservation Biology*, 2000, **14**: 36~46.
- [21] Kareiva P. Roads and ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, **16**(8): 430~440.
- [22] Spellerberg I F. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 1998, **7**: 317~333.
- [23] Trombulak S C, and Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 2000, **14**: 18~30.
- [24] Sherwood B, Burton J, Cutler D. *Wildlife and roads; The ecological impact*. Imperial College Press, 2002. 1~69.
- [25] Chinese Statistics, editor, *The Almanac of China*. Beijing, China: Chinese Statistics Press, 2000.
- [26] Yang Y K. Basic theory of economic-transportation belt and its life-cycle analysis. *Geographical Research*, 2000, **20**(4): 276~286.
- [27] Zhou J. Corridor effects of railway transportation and urban land use analysis. *Journal of Urban Railway Transportation Study*, 2002, **5**(1): 38~45.
- [28] Xiao D N, Li X Z. Development and perspective of contemporary landscape ecology. *Geographical Science*, 1997, **16**(4): 355~364.
- [29] Wu J G. Landscape ecology: concepts and theories. *Journal of Ecology*, 2000, **19**(1): 1~12.

- [30] Fu B J, Yue Y. Foundation of landscape for assessments of sustainable land use. *Resource Science*, 2000, **22**(6): 124~135.
- [31] Yu K J. Ecological safety patter of landscape in biological preservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(1): 23~33.
- [32] Wang Y L, Zhao Y B, Han D. Spatial structure of landscape ecosystem: concepts, indices and cases. *Journal of Geosciences Progress*, 1999, **3**: 34~42.
- [33] Jones J A, Swanson F J, Wemple B C, et al. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. *Conservation Biology*, 2000, **14**(1): 76~85.
- [34] Chang X L, Wu J G. Analyzing on characteristics of landscape patterns in Kerxin desert. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(3): 225~232.
- [35] Lu Y H, Fu B J. Scales and conversion methods of scales in Ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2096~2105.
- [36] Liu C R, Chen L Z. Shape-indices analysis of vegetation patches in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(4): 559~567.
- [37] Xiao H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, et al. Spatial structural analysis on landscape of Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 20~28.
- [38] Ma S J, Wang R S. Social-economical-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, **4**(1): 1~9.
- [39] Zong Y G. *Theory and method of urban landscape planning*. Beijing, Chinese Science and Technology Press, 1993. 34~61.
- [40] Wang R S. High efficiency, harmonious, principles and methods of urban ecological regulation. Hunan, Hunan Education Press, 1987. 28~96.
- [41] Haggett P, Richard J C. Network analysis in geography. London, Cambridge University Press, 1966. 36~96.
- [42] Zong Y G. Studying on corridor effects in urban ecological landscape planning. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2): 145~150.

参考文献:

- [25] 国家统计局, 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [26] 杨荫凯. 交通经济带及其生命周期分析的基本理论. *地理科学*, 2000, **20**(4): 276~286.
- [27] 周俊. 轨道交通的廊道效应与城市土地利用分析. *城市轨道交通研究*, 2002, **5**(1): 38~45.
- [28] 肖笃宁, 刘秀珍. 当代景观生态学进展与展望. *地理科学*, 1997, **16**(4): 355~364.
- [29] 邬建国. 景观生态学: 概念与理论. *生态学杂志*, 2000, **19**(1): 1~12.
- [30] 傅伯杰, 邱扬. 可持续土地利用评价的景观学基础. *科学研究*, 2000, **22**(6): 124~135.
- [31] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, **19**(1): 23~33.
- [32] 王仰麟, 赵一斌, 韩荡. 景观生态系统的空间结构: 概念, 指标与案例. *地球科学进展*, 1999, **3**: 34~42.
- [34] 常学礼, 邬建国. 科尔沁沙地景观格局特征分析. *生态学报*, 1998, **18**(3): 225~232.
- [35] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2096~2105.
- [36] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观中斑块形状的指数分析. *生态学报*, 2000, **20**(4): 559~567.
- [37] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱. 海南岛景观的空间结构分析. *生态学报*, 2001, **21**(1): 20~28.
- [38] 马世俊, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, **4**(1): 1~9.
- [39] 宗跃光. 城市景观规划的理论和方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 34~61.
- [40] 王如松. 高效 和谐: 城市生态调控的理论与方法. 湖南: 湖南教育出版社, 1987. 28~96.
- [42] 宗跃光. 城市景观规划中的廊道效应研究. *生态学报*, 1999, **19**(2): 145~150.