

文章编号: 1002-0268 (2010) 12-0152-07

# 环长白山旅游公路改扩建对景观格局的影响

赵世元<sup>1,3</sup>, 陈济 丁, 孔亚平<sup>2</sup>, 王 云<sup>2</sup>, 魏明建<sup>1</sup>

(1 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048 2 交通运输部科学研究院, 北京 100029,  
3 二十一世纪空间技术应用股份有限公司国土事业部, 北京 100096)

**摘要:** 针对环长白山旅游公路改扩建工程, 以 ETM+ 遥感影像为基础数据, 提取公路经过区域各景观要素信息, 应用景观生态学分析软件 Fragstats3.3 计算该公路不同距离缓冲区的景观格局指数, 通过分析其变化规律, 定量地研究环长白山旅游公路改扩建对公路沿线区域景观格局的影响。结果表明, 公路改扩建导致不同缓冲距离带内斑块密度、Shannon 多样性指数、景观分割指数增加, 蔓延度指数、最大斑块指数减小; 公路改扩建前后各景观指数的变化幅度随缓冲距离的增加而减小。环长白山旅游公路改扩建加剧了路域景观格局破碎化, 对景观格局影响集中表现在 200m 范围以内。

**关键词:** 环境工程; 景观格局; 景观指数; 公路; 路域生态

中图分类号: U418.9

文献标识码: A

## Effect of Reconstruction and Expansion of Tourist Highway Circumscribing Changbai Mountain on Landscape Pattern

ZHAO Shi yuan<sup>1,3</sup>, CHEN Jiding<sup>2</sup>, KONG Yaping<sup>2</sup>, WANG Yun<sup>2</sup>, WEI Mingjian<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China 3. Land Resource

Department, Beijing Twenty-first Century Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100096, China)

**Abstract** Based on the reconstruction and expansion of the tourist highway which circumscribing Changbai Mountain, ETM+ remote sensing data of various landscape types were extracted. The changes of landscape pattern indices of different buffer zones were calculated by landscape ecology software Fragstats3.3 to quantitatively analyze the landscape pattern affected by reconstruction and expansion of the road. The results show that (1) The reconstruction and expansion lead to patch density, Shannon-Wiener index and splitting index of different buffer zones increase while largest patch index and landscape contagion index decrease. (2) The variation range of each landscape index decreases with buffering distance increases after the reconstruction and expansion of the road. The reconstruction and expansion of this highway caused fragmentation of the landscape and the influence distributes in the roadside 200 m buffer zone.

**Key words** environmental engineering; landscape pattern; landscape pattern index; highway; road ecology

## 0 引言

景观生态学理论认为, 景观是空间上不同生态系统的聚合<sup>[1]</sup>, 景观受到外界扰动时, 会影响到生

态系统的稳定<sup>[2]</sup>。由于景观破碎化是导致生物多样性丧失的主要原因之一, 因此景观完整性保护对于生态系统稳定性及其物种多样性意义重大<sup>[1-3]</sup>。而公路建设是导致景观破碎化的重要因素<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2009-12-26

基金项目: 吉林省交通厅科技项目 (2008-1-2); 交通部西部交通建设科技项目 (200731822010); 吉林省交通厅建设科技项目 (2008-1-29)

作者简介: 赵世元 (1981-), 男, 山东陵县人, 硕士研究生, 从事道路生态学研究 (zhshiyuan@163.com)

国外在公路对景观格局及生态环境影响方面已展开了广泛深入的研究<sup>[5-7]</sup>。2000年4月第十五届美国景观生态学会会议把公路和公路网的生态效应作为新兴学科领域之一。Davide<sup>[7]</sup>用景观指数评价了公路对景观格局的影响,为规划选线提供参考依据。Miriam<sup>[8]</sup>从宏观和微观尺度分别论述了公路对景观破碎化的影响。进入21世纪以来,国内有关公路对景观的生态影响的研究也相继展开<sup>[9-16]</sup>,但研究多以公路网络及高速公路研究为主,并着重理论研究,与实际工程结合不紧密。

当前,我国公路建设重点正转向经济欠发达地区,这些地区大多生物多样性丰富,生态环境脆弱,公路建设中的生态环境保护十分必要<sup>[15]</sup>。本研究以吉林省环长白山旅游公路为研究对象,应用3S技术定量分析该公路改扩建对景观格局的影响,为从景观层面保护路域生态完整性提供理论依据,为公路生态环境保护提供指导。

## 1 研究区概况

长白山自然保护区建于1960年,1980年加入了联合国教科文组织“人与生物圈”计划,是我国最早被纳入该计划的自然保护区。1986年,经国务院批准成为国家级自然保护区,是最早一批被批准的国家级区之一。

环长白山旅游公路二道白河至漫江段(以下简称“本公路”)为“2004年交通部和省级主管部门联合组织实施的典型示范工程”之一,是连接长白山北、西、南三坡最便捷的旅游公路。于2007年年底开始扩建,2009年年底通车。起点为吉林省延边朝鲜族自治州安图县二道白河镇,终点为白山市漫江镇,全长84.132 km,有大约21 km(K10~K31)与保护区边缘重合,有约6 km(K31~K37)穿越了长白山自然保护区实验区。本公路采用二级公路标准,设计行车速度60 km/h,路基宽度10 m。公路选线大多基于原有林道,部分路段因裁弯取直而改线重新修建。原道路为运输木材修建的碎石子路,宽5 m,多数路段年久失修,杂草丛生,对景观格局的分割效应很小。

研究区位置如图1所示。公路沿线分布着原始红松阔叶混交林、白桦山杨次生林等森林,植物物种丰富,有珍稀树种(如黄檗 *Phellodendron amurense* Rupr)分布。沿线野生动物资源丰富,调研发现路侧分布有马鹿、熊、狍子、野猪等多种动物活动踪迹<sup>[17]</sup>。公路沿河流水系发达,景观特色突出,生

态环境极为敏感,资源环境保护尤为迫切。本研究以本公路为对象,从不同尺度上研究公路改扩建工程对不同缓冲区景观的影响。

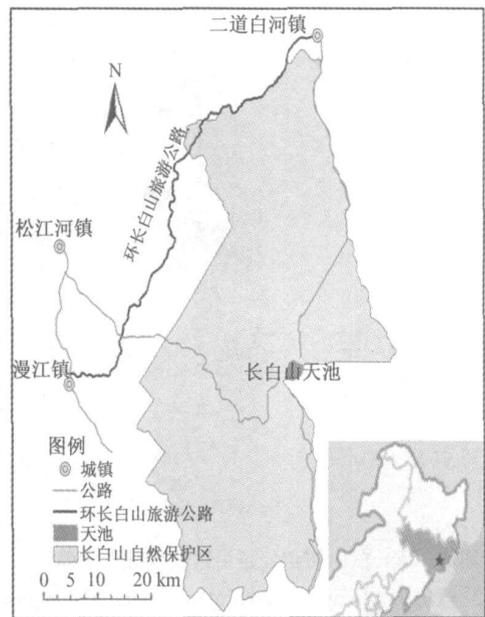


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

## 2 研究方法

### 2.1 数据源及处理

本研究数据源选取了1999年10月3日、2001年6月3日以及2008年8月9日与8月25日空间分辨率为30 m的ETM+影像,用于提取公路建设前后的景观信息以及区分常绿针叶林和落叶阔叶林。采用的ETM+影像均已经过了正射校正。本研究投影采用高斯-克吕格投影,首先将ETM+影像进行投影转换,然后,以1:50 000地形图为准进行位置配准,配准后影像误差均小于一个像元。

在借鉴国内外土地利用及景观分类研究成果的基础上,考虑其土地利用及景观特点,综合ETM+遥感影像特征和人类活动影响力度,本研究将景观类型划分为耕地、针叶林地、落叶阔叶林地、城乡建设用地、水域湿地等基本类型,把公路用地从城乡建设用地中单独划出(如图2)。

ETM+遥感影像数据经几何精校正后,应用NDVI法提取各期影像的植被信息。美国地质调查局地面覆盖特征计划提出,由于ETM+影像在空间分辨率和可解译性方面的限制,无法由影像直接区分落叶林和常绿林<sup>[18]</sup>。针叶林和落叶阔叶林的光谱特

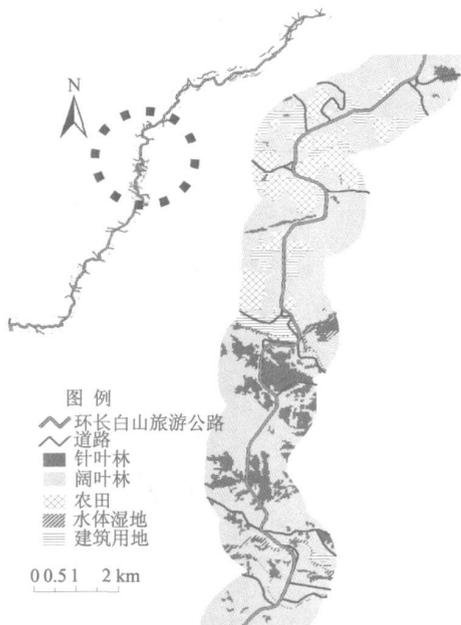


图 2 环长白山旅游公路沿线景观分布示意图

Fig. 2 The landscape pattern along the tourist highway circling Changbai Mountain

征在夏季十分相似，但在冬季存在很大差异，10月份，针叶林还是绿色，NDVI值与夏季相比变化不大，而落叶阔叶林树叶已枯黄凋落，NDVI值明显变小。因此，计算6月与10月ETM+影像的NDVI比值，比值大的为落叶阔叶林，反之是针叶林，二者差异明显。

Zha等计算了归一化建筑指数 (Normalized Difference Built-up Index, NDBI)，用这种方法提取影像中建筑用地信息的精度达到92%<sup>[18]</sup>，因此，本文采用该方法提取出城乡建设用地。提取水体则采用了改进型归一化差异水体指数MNDWI (Modified NDWI)<sup>[19]</sup>。然后将计算机自动分类结果根据经验及实地调研结果进行人工修正，以缩小计算机自动分类所产生的误差，提高分类精度。耕地的自动识别一直是遥感信息提取的一大难点，本文参考多时相影像以及实地调研数据，采用人工目视解译的方法提取研究区的耕地信息。

由于ETM+影像分辨率较低，对地表覆被识别存在一定误差，为了避免这些误差造成大的影响，本研究没有考虑除公路建设以外其他干扰对景观格局影响。

## 2.2 景观指数的选择

在景观类型图的基础上，考虑各景观指数的生态意义和各指数之间的相关性，应用Fragstats3.3软件计算比较下列景观指数：斑块密度、蔓延度指数、

景观分割指数、Shannon多样性指数、最大斑块指数。分析比较公路建设前后这些指数的变化情况。各景观指数的生态意义见表1。

表 1 景观指数及其生态意义

Tab 1 Landscape indices and their ecological meanings

景观指数	生态意义
斑块密度	反映景观类型的破碎化程度，同时也反映整体空间异质性程度
蔓延度指数	描述的是景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势
景观分割指数	反映景观类型的破碎化程度，景观斑块被分割程度的量化表示
Shannon多样性指数	反映景观斑块丰富度信息和各斑块类型在面积上的均匀程度
最大斑块指数	反映景观优势类型，反映人类活动的方向和强弱

## 2.3 景观分析范围的确定

道路对不同生态因子的影响具有一定的空间范围，称为道路影响域。Foman等<sup>[20]</sup>研究高速公路对不同生态因子的空间影响范围表明，生态因子受影响范围至少在100m以上，有些因子可以达到1000m，平均影响范围600m左右。在分析公路对景观格局的影响时，要充分考虑公路对生态系统的影响区域，用一定宽度的缓冲区表示各等级公路的景观分析范围。

本公路设计标准远低于高速公路，分别统计公路两侧距离路基100、200、300、500、1000m缓冲区内的各种景观指数变化，分析公路的改扩建对路域景观格局的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 公路改扩建之前路域景观类型分布情况

如表2所示，公路所经区域景观类型以落叶阔叶林为主，阔叶林占各缓冲带总景观面积的75%以上。阔叶林与针叶林所占比例随公路缓冲区距离的增加而增加；农田在300m缓冲区内所占比例达到最大；道路、城乡建设用地及水体湿地所占比例随公路缓冲区距离的增加而减小。

从图3中可看出，各景观类型分布随缓冲距离的增加呈现明显的规律性变化，变化速率均呈现随缓冲区距离的增大而减小的趋势。农田及城乡建设用地集中分布在公路两侧，表明公路对各景观类型的影响集中在距离公路一定距离范围内。

表 2 环长白山旅游公路不同缓冲区景观比例

Tab. 2 Proportion of the landscape types in different buffer zones along the tourist highway circumscribing Changbai Mountain

缓冲距离 /m	100	200	300	500	1 000
阔叶林 %	75.46	76.44	76.53	77.42	79.47
针叶林 %	2.58	3.21	3.83	4.65	5.49
道路 %	3.26	1.85	1.34	0.94	0.64
建筑用地 %	8.53	7.04	6.75	6.14	5.61
农田 %	7.42	8.63	8.92	8.43	6.78
水体湿地 %	2.75	2.83	2.63	2.42	2.01

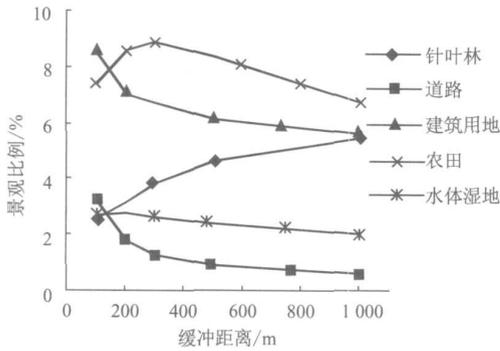


图 3 环长白山旅游公路不同缓冲区景观比例变化

Fig. 3 Proportional change of the landscape types in different buffer zones along the tourist highway circumscribing Changbai Mountain

3.2 公路缓冲区景观格局变化分析

斑块密度 (PD) 反映景观的空间格局, 常被用来描述整个景观的异质性, 其值大小与景观破碎度有很好的正相关性。如图 4 所示, 公路改扩建后斑块密度有所增加, 且增加幅度随缓冲距离的增加而逐渐减小, 这说明公路改扩建导致的景观破碎化程度随与公路距离的增加而降低。究其原因, 主要两个方面, 一是新线将许多老线裁弯取直产生大量三角地 (图 5), 二是公路施工的临时用地 (取弃土

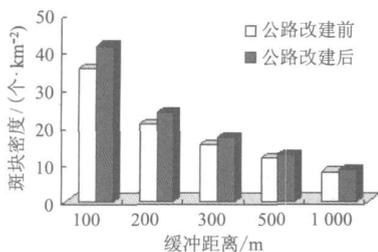


图 4 不同缓冲距离斑块密度变化趋势

Fig. 4 Patch densities of different buffering distances

场、施工便道等) 集中分布在公路两侧, 导致距离公路越近, 景观越破碎。斑块密度随缓冲距离的增加而减小。该结论与昆瑞、昆磨高速公路的研究结论<sup>[13]</sup>相反, 而与大理至丽江高速公路的研究结果<sup>[14]</sup>相似, 这是由于本项目不是新建, 而是公路改扩建工程, 公路选线多基于原有旧路, 缓冲区内景观格局早已受到了原道路影响。

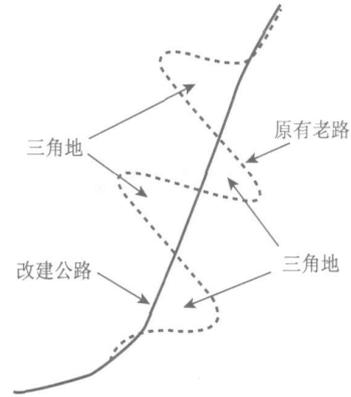


图 5 公路改扩建产生三角地导致景观破碎化示意图

Fig. 5 Landscape fragmentation caused by triangular areas produced by the highway reconstruction and expansion

蔓延度指数 (CONTAG) 描述的是不同斑块类型的团聚程度或延展趋势, 是描述景观格局的最重要的指数之一。一般来说, 高蔓延度值说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连通性; 反之则表明景观是具有多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度较高。从图 6 中可以看出, 公路改扩建后蔓延度指数有所下降, 且离公路越近, 下降越大, 这说明公路建成后各类型景观斑块连通程度降低, 趋于离散, 距离公路越近, 离散程度越大。随着缓冲距离的增加, 蔓延度指数有所增加, 公路改扩建前增加较为平缓。说明改扩建后距离公路越近, 景观连通性越差, 景观破碎化程度越高。

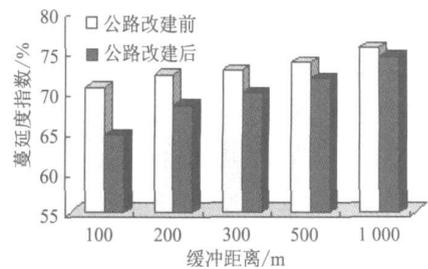


图 6 不同缓冲距离蔓延度指数变化趋势

Fig. 6 Contagion indexes of different buffering distances

景观多样性反映区域中不同景观类型分布的均

匀化和复杂化程度，斑块类型数目越多，Shannon多样性指数 (SHDI) 越大，同样，各种斑块之间个体分配的均匀性增加也会使 Shannon多样性指数升高。图 7表明，公路改扩建后，Shannon多样性指数有所增加，缓冲距离越小，增加幅度越大。Shannon多样性指数在公路改扩建前，随缓冲距离的增加而稍许减少，但变化很不明显，而在公路改扩建后这种变化趋势有所增强。由于公路改扩建前后，研究区内的景观丰富度不变，即斑块类型不变，因此 Shannon多样性指数的升高是各种斑块类型的均匀程度增加造成的，说明公路改扩建使得各斑块面积趋于均匀，自然景观受到了人类的干扰。

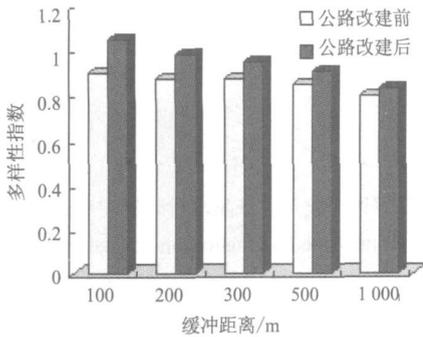


图 7 不同缓冲距离 Shannon多样性指数变化趋势  
Fig 7 Shannon-Wiener indexes of different buffering distances

景观分割指数 (SPLIT) 是反映景观斑块之间离散程度的重要指数，指某一景观类型中不同元素或斑块个体分布的离散程度，分割指数越大，表明景观在地域分布上越分散，景观分布越复杂，破碎化程度也越高。图 8显示，公路改扩建后，不同距离缓冲区的景观分割度指数均比原来增加了 1倍，由此可见公路对景观的破碎化影响不可小视。在改建路段，原有道路与新建公路之间的区域被分割形成许多小的三角区域，这加剧了景观斑块的破碎化，导致景观分割度指数大幅升高。目前，本公路建设者拟将废弃的三角地予以植被恢复或人工促进自然恢复，这有望将景观的破碎化程度降低。

公路改扩建对不同景观类型的影响程度存在明显的差异，这与景观布局特征有很大关系。最大斑块指数 (LPI) 等于某一景观类型中的最大斑块占据整个景观面积的比例，公路的改扩建使得所经区域内除道路之外的各景观类型最大斑块指数有不同程度的下降，下降比例如图 9所示。总体来看，阔叶林受到的影响最大，各缓冲区阔叶林的最大斑块指数下降均超过 40%。农田的最大斑块指数在 300 m

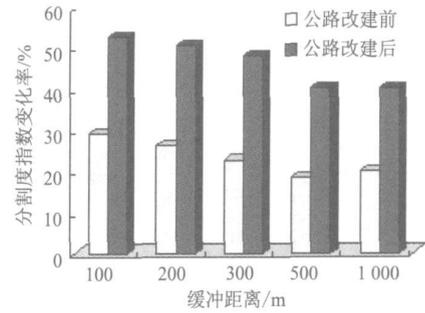


图 8 不同缓冲距离景观分割度指数变化趋势

Fig 8 Splitting indexes of different buffering distances

以内缓冲区的变化很大，比原来降低了 43% ~ 55%，而缓冲距离大于 300 m 时农田的最大斑块指数几乎没有变化。而从大区域来看，针叶林和水体湿地也受到很大的影响。林地最大斑块指数降低幅度大，表明对动植物栖息地影响较大，特别是对栖息地变化敏感的野生动物。Forman建议为了降低道路系统对生态环境的影响，要尽量保持大型无道路区域<sup>[5]</sup>。

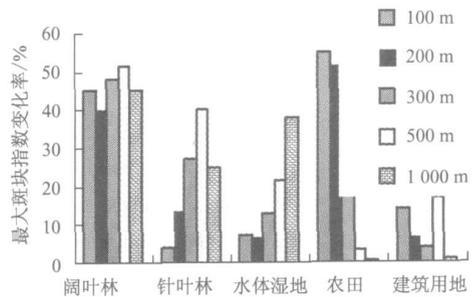


图 9 各景观类型最大斑块指数随缓冲距离变化趋势

Fig 9 Largest patch indexes of different landscape types in different buffering distances

选取斑块密度、最大斑块指数、蔓延度指数、景观分割度指数和 Shannon多样性指数，分析这些指数随缓冲距离增大的变化速率，辨析缓冲距离和景观格局变化的关系，结果如图 10所示。可以看出，缓冲距离越小公路改扩建对景观格局的影响越大，缓冲距离在 200 m 以内各指数的变化率最高，随缓冲距离的增加景观指数变化率趋于平缓，这说明本公路改扩建对 200 m 缓冲区内景观格局影响最大，景观破碎化程度较高。

#### 4 小结

环长白山旅游公路改扩建工程对路域景观格局造成了一定影响，斑块密度、Shannon多样性指数以及景观分割指数的增加和最大斑块指数、蔓延度指数的减小都说明在本公路改扩建之后，公路沿线区

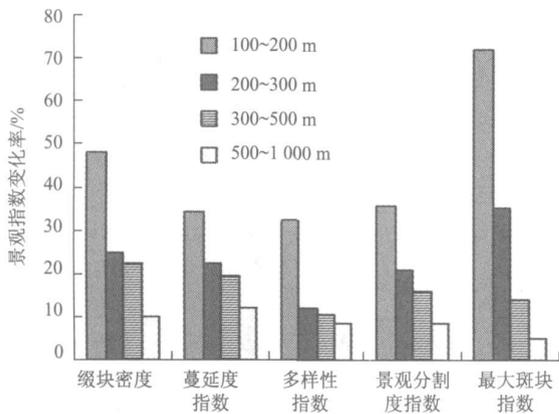


图 10 公路改建前后不同缓冲区景观指数变化率

Fig. 10 Change rates of landscape pattern indexes pre and post road reconstruction

域的景观破碎化程度有所加重。本研究发 现环长白山旅游公路改扩建对景观格局的影响程度随距离公路距离的增加而递减。环长白山旅游公路对 200 m 缓冲区以内的景观格局影响最为剧烈。

本公路多数路段在原有林区道路基础上扩建, 改线新建公路里程少, 一定程度上降低了对景观格局的影响。在改建路段, 原有道路与新建公路交叉围成小的三角区域, 加剧了公路路域一定范围内的景观破碎化。对这些三角区域进行植被恢复或人工促进自然恢复, 可将公路改扩建导致的景观破碎化程度降低, 尽可能地保护景观完整, 对维持生态系统稳定有重大意义。

受 ETM+ 遥感影像分辨率的限制, 本研究仅把景观要素分为 6 类, 影响了分析结果的精度, 如用高分辨率影像分析, 能够得出高精度的景观分类, 对实际工程有更为直接的指导意义。景观斑块的破碎化很可能对当地的野生动植物产生一定程度的影响, 有待于进一步研究。

#### 参考文献:

#### References

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
FU Bojie, CHEN Liding, MA Keming, et al. Landscape Ecology Principles and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] KRATZ T K, BENSON B J, BLOOD E R, et al. The Influence of Landscape Position on Temporal Variability in Four North American Ecosystems [J]. American Naturalist, 1991, 138 (2): 355-378.
- [3] 李晓文, 胡远满, 肖笃宁. 景观生态学与生物多样性

保护 [J]. 生态学报, 1999, 19 (3): 399-407.

LI Xiaowen, HU Yuannan, XIAO Duning. Landscape Ecology and Biodiversity Conservation [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (3): 399-407.

- [4] 刘佳妮, 李伟强, 包志毅. 道路网络理论在景观破碎化效应研究中的运用——以浙江省公路网络为例 [J]. 生态学报, 2008, 28 (9): 4352-4362.  
LIU Jianji, LI Weiqiang, BAO Zhiyi. Application of Road Network Theory in Studying Ecological Effects of Landscape Fragmentation: A Case Study with the Road Network of Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (9): 4352-4362.
- [5] FORMAN R T T, CLEVENGER A P, CUTSHALL C D, et al. Road Ecology: Science and Solutions [M]. Washington, D. C.: Island Press, 2002.
- [6] SPELLERBERG I F. The Ecological Effects of Roads [M]. New Hampshire: Science Publishers, 2002.
- [7] GENELETTI D. Using Spatial Indicators and Value Functions to Assess Ecosystem Fragmentation caused by Linear Infrastructures [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5 (1): 1-15.
- [8] SERRANO M, SANZ L, PUG J, et al. Landscape Fragmentation Caused by the Transport Network in Navarra (Spain): Two-scale Analysis and Landscape Integration Assessment [J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 58 (2-4): 113-123.
- [9] 张镜铨, 阎建忠, 刘林山, 等. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例 [J]. 地理学报, 2002, 57 (3): 253-266.  
ZHANG Yili, YAN Jianzhong, LIU Linsan, et al. Impact of Qinghai-Xizang Highway on Land Use and Landscape Pattern Change From Golmud to Tanggula Shan Pass [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57 (3): 253-266.
- [10] 李双成, 许月卿, 周巧富, 等. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析 [J]. 地理科学进展, 2004, 23 (5): 78-85.  
LI Shuangcheng, XU Yueqing, ZHOU Qiaofu, et al. Statistical Analysis on the Relationship between Road Network and Ecosystem Fragmentation in China [J]. Progress In Geography, 2004, 23 (5): 78-85.
- [11] 刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 等. 道路对景观的影响及其生态风险评价——以澜沧江流域为例 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (2): 897-901.  
LIU Shiliang, YANG Zhifeng, CUI Baoshan, et al. Effects of Road on Landscape and Its Ecological Risk Assessment: A Case Study of Lancangjiang River Valley [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 (2): 897-901.

- [12] 李俊生, 张晓岚, 吴晓莆, 等. 道路交通的生态影响研究综述 [J]. 生态环境学报, 2009, 18 (3): 1169-1175.  
LI Junsheng, ZHANG Xiaolan, WU Xiaopu, et al. Ecological Impacts from Road Traffic: A Review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18 (3): 1169-1175.
- [13] 刘世梁, 崔保山, 杨志峰, 等. 高速公路建设对山地景观格局的影响——以云南省澜沧江流域为例 [J]. 山地学报, 2006, 24 (1): 54-59.  
LIU Shiliang, CUI Baoshan, YANG Zhifeng, et al. Effects of Highway Construction on Mountain Landscape Pattern: A Case Study in Lancangjiang River Valley of Yunnan Province [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24 (1): 54-59.
- [14] 段禾祥, 王崇云, 彭明春, 等. 大理至丽江高速公路建设对沿线景观格局的影响 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2008, 30 (S1): 398-420.  
DUAN Hexiang, WANG Chongyun, PENG Mingchun, et al. Impact of Construction of Dali-Lijiang Highway on Landscape Pattern [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2008, 30 (S1): 398-420.
- [15] 毛文碧, 段昌群, 李海峰, 等. 公路路域生态学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
MAO Wenbi, DUAN Changqun, LI Haifeng, et al. Road Ecology [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [16] 张前进, 江玉林, 陈学平. 高速公路环境破坏与生态恢复评估研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (5): 147-149.  
ZHANG Qianjin, JIANG Yulin, CHEN Xueping. Study on Expressway Related Environmental Destruction and Ecorrestoration Assessment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (5): 147-149.
- [17] 王云, 朴正吉, 孔亚平, 等. 动物穿越环长白山旅游公路的调查研究及保护对策 [J]. 交通建设与管理, 2009 (9): 51-55.  
WANG Yun, PIAO Zhengji, KONG Yaping, et al. Investigation and Protection Countermeasures of Animal Road-crossing on the Changbai Mountain Tourist Highway [J]. Transportation Construction & Management, 2009 (9): 51-55.
- [18] JENSEN J R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective [M]. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2005.
- [19] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. 遥感学报, 2005, 9 (5): 589-595.  
XU Hanchou. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9 (5): 589-595.
- [20] FORMAN R T T, DEBLINGER R D. The Ecological Road-effect Zone of a Massachusetts (U. S. A.) Suburban Highway: Ecological Effects of Roads [J]. Conservation Biology, 2000, 14 (1): 36-46.

(上接第 139 页)

- [9] 黄崇超, 李亚萍. 基于一般相位结构的区域信号配时二层规划模型与算法 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42 (3): 368-376.  
HUANG Chongchao, LI Yaping. Modeling and Algorithm for Equilibrium Area Signal Timing Based on General Signal Phase Structure [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42 (3): 368-376.
- [10] 杨祯山, 邵诚. 基于双层规划模型的电梯交通系统群组优化 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23 (1): 170-176.  
YANG Zhenshan, SHAO Cheng. Optimum Dispatching of Elevator Banks for Elevator Traffic System Based on Bi-level Programming Model [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23 (1): 170-176.
- [11] FAN Zhiping, MA Jian, JIANG Yanping, et al. A Goal Programming Approach to Group Decision Making Based on Multiplicative Preference Relations and Fuzzy Preference Relations [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 21 (2): 311-321.
- [12] FAN Zhiping, FENG Bo. A Multiple Attributes Decision Making Method Using Individual and Collaborative Attribute Data in a Fuzzy Environment [J]. Information Sciences, 2009, 179 (20): 3603-3618.