

# 云南纵向岭谷区道路网络对生态系统影响的阈值分析

郑 钰, 李晓文\*, 崔保山

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 云南纵向岭谷区由于受到人类活动, 尤其是道路网络的影响, 使得该地区生态系统退化日益严重。通过云南纵向岭谷区路网密度与生态系统转换 (1980 ~ 2000 年期间) 的多尺度空间相关分析, 研究了路网的对生态系统的影响及其阈值。研究结果表明, 路网是导致有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地转变的主要影响因子。路网导致有林地向疏林地转变的路网密度均值为  $0.8381 \sim 0.8800 \text{ km/km}^2$ , 导致有林地向中覆盖度草地转变的路网密度均值为  $0.6984 \sim 0.8124 \text{ km/km}^2$ , 导致灌木林地向疏林地转变的路网密度均值为  $1.2770 \sim 3.6426 \text{ km/km}^2$ 。随着尺度的增大, 路网密度的变化不显著。路网影响阈值的研究, 开始从定量的角度探索道路网络对生态系统的影响, 对公路建设、规划和管理具有一定的理论和应用价值。

**关键词:** 云南纵向岭谷区; 道路网络; 生态系统; 阈值

文章编号: 1000-0933(2009)11-5823-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

## The influential threshold of road network impacts on the ecosystem in longitudinal range-gorge region of Yunnan Province, China

ZHENG Yu, LI Xiao-Wen\*, CUI Bao-Shan

Environmental School, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5823 ~ 5831.

**Abstract:** Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) of YUN Nan Province is characterized with its complex mountain ecosystem and the globally important biodiversity. However, this unique mountain ecosystem is experiencing extensively increased degradation largely due to the human activities, especially the road network development and associated land-use changes. To analyze the ecological impacts of road network on the ecosystem in LRGR, the impact threshold of road network on the ecosystem in LRGR was quantitatively evaluated through spatial correlation between road network density and ecosystem (i. e. landcover types) transformation from 1980 — 2000 at multi scales. The results showed that road network density functioned as the major anthropogenic factors to the transformations of some ecosystems. The transformation of forested land to sparse woodland was spatially correlated with overall road network density ranging from  $0.8381 \sim 0.8800 \text{ km/km}^2$ . The road network density ranging from  $0.6984 \sim 0.8124 \text{ km/km}^2$  had triggered transformation of the ecosystem from forested land to medium-covered grassland. The transformation from brush land to sparse woodland can be driven by the road network density from  $1.2770 \sim 3.6426 \text{ km/km}^2$ . In addition, the results revealed that those ecological threshold of road network density mostly occurred at the sites where the elevation ranged from 1500 — 2000m, the slope was below 10 degrees and the aspects were on south and southeast.

**Key Words:** Longitudinal Range-gorge Region; road network; ecosystem; ecological threshold

道路生态学研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。这一时期, 道路生态学的研究主要集中于某一段道路对动

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2003CB415104); 国家自然科学基金资助项目 (U0833002)

收稿日期: 2008-12-14; 修订日期: 2009-03-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixw@ignrr.ac.cn.

物及环境污染的影响研究,尚处于探索研究阶段<sup>[1~3]</sup>。进入 20 世纪 80 年代,许多学者对道路的生态影响进行了更为深入的研究,从对物种、种群、群落、生态系统尺度的研究,扩展到景观尺度,开始定量计算一些具有生态学意义的指数,如:道路位置、道路密度等<sup>[4~7]</sup>。20 世纪 90 年代以来,道路生态学的研究发展到对道路网络的研究。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<sup>[8]</sup>。进入 21 世纪以后,道路生态学研究得到迅速发展。这一时期的研究通常基于“3S”技术,采用野外调查、缓冲区分析、生态敏感性分析、生态风险评价等方法,研究道路的生态影响。

生态阈值研究是当今道路生态学研究的一个重点和热点问题。20 世纪 70 年代 May 首先把阈值的概念引入生态学研究领域<sup>[9]</sup>。此后 30 多年里,生态阈值作为资源保护及可持续生态系统管理的概念基础,不断受到生态学家的关注<sup>[10~12]</sup>,其概念、研究方法及实践应用也在不断完善之中。但是,道路对生态系统影响的阈值研究却仍基本为空白。道路作为线状人工设施对于生态系统具有一系列的生态效应,直接或间接地影响到生态系统的结构、功能和格局。在区域尺度上,道路的影响主要表现为道路网络的各种负面影响。因此,路网既是连接人类与自然之间的桥梁,也是反映人为干扰的一个综合指标。生态系统对人为干扰的响应存在一定的阈值,只有当人为干扰超过这一阈值时其影响才会显著体现,而以往的研究还未涉及生态系统对路网压力的响应阈值等方面。因此,阈值研究已成为道路生态学研究的热点和难点问题。

## 1 研究区概况

纵向岭谷区(longitudinal range-gorge region, LRGR)位于我国西南、与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向山系河谷区,是反映地球演化重大事件的关键区域,以其沿南北向发育、东西向分布的巨大山系和深切河谷格局,构成了全球独特的高山峡谷景观。本研究主要以纵向岭谷区在云南省境内的部分作为研究区域,其总面积 260700km<sup>2</sup>,占整个纵向岭谷区面积的 63%<sup>[13]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集与处理<sup>[13]</sup>

### 2.2 空间网格分析

研究区域的范围较大,考虑到原始数据的分辨率及实际处理的可操作性,依次选取 2km × 2km、4km × 4km、6km × 6km、…、20km × 20km 网格作为 10 个不同空间尺度。借助 GIS 技术,利用 VBA 编程完成各尺度网格数据的制作,并建立各个尺度下的空间属性数据库,包括公路网络密度、生态系统类型变化指数、海拔、坡度和坡向。

#### 2.2.1 道路网络密度

道路网络密度包括各级路网的密度和整体路网密度。各级路网包括:高速路网、国家干线路网、省干线路网、县乡路网、乡村路网和小路网。各级路网密度即每个网格内该等级道路单位面积内的总长度<sup>[13]</sup>。

#### 2.2.2 生态系统类型变化面积指数

生态系统的类型变化面积指数是通过 1980 ~ 2000 年生态系统发生变化的面积在网格内占的面积百分数来表示,用于分析公路网络密度与生态系统类型变化指数之间的空间相关性,研究公路网络对生态系统变化的影响。

#### 2.2.3 地形因子(海拔、坡度、坡向)

基于 DEM 数据,采用最邻近法(nearest neighbor),即取距离被抽样点最邻近的输入像元值作为该像元的输出像元值,得到 2km × 2km、4km × 4km、6km × 6km、…、20km × 20km 栅格的 DEM,再利用 Arcview 下的 Surface 扩展模块,分别得到不同尺度下的坡度图和坡向图。

## 2.3 阈值分析

本研究主要在 SPSS 软件下,运用 Pearson 相关分析方法,研究道路网络和地形因子与生态系统分布的相关性及其尺度效应,从而分析路网对生态系统的影响阈值。

3 研究结果

3.1 1980 ~2000 年土地利用/覆盖变化

基于研究区的 1980 和 2000 年 TM 遥感影像,提取 1:10 万土地利用类型图,然后根据研究目的划分为有林地、灌木林地、疏林地、其他林地(果园、苗圃等)、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地等土地利用类型。利用 Arcview 软件下 Analysis 分析模块,进行土地利用变化分析。

研究结果表明,在 1980 ~2000 年这一时期内,研究区内土地利用发生变化的面积为 8781 km<sup>2</sup>,约占研究区总面积的 3.37%(图 1)。其中,林地的变化面积最明显,有林地转化为灌木林面积 1177 km<sup>2</sup>,转化为高覆盖度草地面积 566 km<sup>2</sup>;灌木林转化为高覆盖度草地面积 639 km<sup>2</sup>;疏林地转化为耕地面积 425 km<sup>2</sup>,转化为灌木林面积 865 km<sup>2</sup>,转化为高覆盖度草地面积 423 km<sup>2</sup>。在所有土地利用变化类型中,耕地、林地和草地之间的转化面积占总的变化面积的 96%,具体土地利用转移矩阵见表 1。

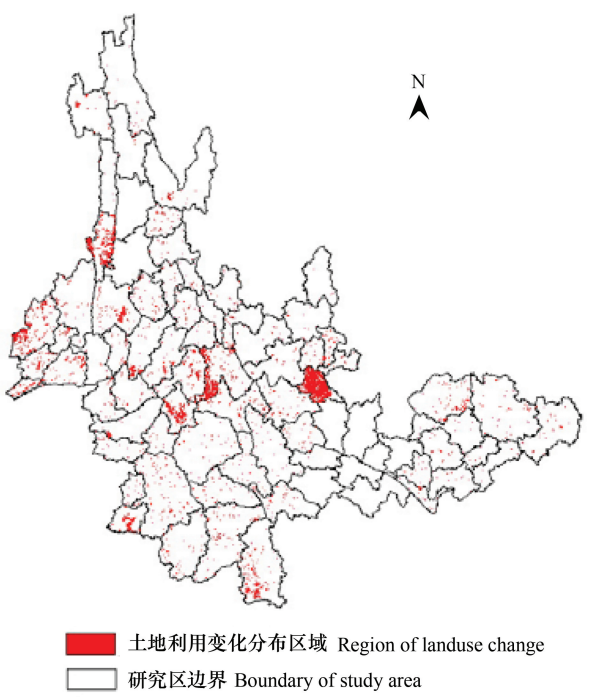


图 1 云南纵向岭谷区 1980 ~2000 年土地利用/覆盖变化分布图  
Fig. 1 Changes in the land use/cover map from 1980 —2000 in LRGR

表 1 1980 ~2000 年主要土地利用类型转移矩阵 (km<sup>2</sup>)

Table 1 The landuse transformation matrix of landcover types from 1980 —2000

项目 Item	耕地	有林地	灌木林	疏林地	其它林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地
耕地	42291	221	293	135	2	219	69	0
有林地	170	63028	1177	225	7	566	219	137
灌木林地	272	177	56717	245	0	639	122	47
疏林地	425	310	865	33448	0	423	60	0
其他林地	7	7	33	1	1488	13	0	0
高覆盖度草地	233	207	457	134	3	35332	85	11
中覆盖度草地	18	48	61	213	0	35	14564	0
低覆盖度草地	0	26	2	2	0	7	1	1803

耕地 Cultivated land; 有林地 Forested land; 灌木林 Shrub land; 疏林地 Woodland; 其它林地 Artificial forested land; 高覆盖度草地 High coverage grass land; 中覆盖度草地 Medium coverage grassland; 低覆盖度草地 Low coverage grassland

3.2 道路网络密度与生态系统变化的相关性分析

基于 1980 ~2000 年的主要土地利用转移矩阵,通过空间景观采样,计算多尺度下的生态系统类型变化的面积指数,再利用 Pearson 相关分析方法,研究公路网络密度与生态系统类型变化的相关性(表 2)。路网密度与某一类生态系统变化指数的相关性显著,说明路网对此类生态系统的变化具有影响作用,如果二者正相关,表明随着路网密度的增加,生态系统发生变化的面积也增大,路网是导致此类生态系统发生变化的驱动因子,如果负相关,则表明随着路网密度的增加,生态系统发生变化的面积反而减少,则路网不是导致此类生态系统发生变化的驱动因子。

研究结果表明,耕地向林地的转化与路网密度的相关程度较低,说明耕地转变为林地主要不是由路网引起的,而是与其他人为因素有关,例如:退耕还林等。有林地向灌木林、疏林地和中覆盖度草地的转变与公路网络的相关程度都较高,说明路网是导致森林生态系统发生变化的主要因子,路网主要导致森林生态系统退

化并发生逆向演替,退化表现在有林地向疏林地的转变,逆向演替表现在有林地向灌木林和中覆盖度草地转变。灌木林向疏林地的转化与路网密度的相关程度较高,但灌木林向疏林地的转化属于正向演替,因此,说明路网对生态系统也存在一定的正面影响,但这些影响不是道路网本身具有的,而可能是道路建设过程中采取的相关保护措施带来的。疏林地向高覆盖度草地的转变与道路网络相关性显著,但是相关程度较低,说明路网虽然对疏林地向草地这一逆向演替过程有影响作用,但路网并不是主要影响因素。高覆盖度草地向灌木林的转化与路网密度的相关程度较低,说明路网与这一变化过程虽有一定的相关性,但路网不是导致高覆盖度草地向灌木转变的主要影响因子。

表2 道路网络密度与生态系统转换的统计相关分析 (Pearson 相关指数)

Table 2 The statistical correlation between the density of road networks and the ecosystem transformations (The Pearson's correlation index)

林地类型 Forest types	尺度 Scale									
	2 × 2	4 × 4	6 × 6	8 × 8	10 × 10	12 × 12	14 × 14	16 × 16	18 × 18	20 × 20
102	0.112	0.176	0.086	0.239 *	0.161	0.175	0.299 *	0.200	0.136	0.149
104	-0.037	0.001	-0.126	-0.220 *	-0.219 *	-0.192	-0.237 *	-0.155	-0.080	-0.049
203	0.047	0.090	0.286 **	0.187 *	0.168	0.325 **	0.205	0.203	0.094	0.208
204	-0.055	-0.284 *	-0.385 **	-0.401 **	-0.492 **	-0.551 **	-0.409 **	-0.450 **	-0.338 *	-0.548 **
207	0.042	-0.244 *	-0.198	-0.401 **	-0.241	-0.326 *	-0.359 **	-0.365 *	-0.304 *	-0.458 **
304	-0.280 *	-0.252	-0.504 **	-0.418 **	-0.589 **	-0.587 **	-0.574 **	-0.290	-0.529 **	-0.528 **
406	-0.019	-0.179 *	-0.145	-0.199 *	-0.234 **	-0.178	-0.249 **	-0.199 *	-0.204 *	-0.325 **
603	0.052	-0.082	-0.099	-0.212 **	-0.053	-0.012	-0.019	-0.091	-0.006	-0.003

\*  $p < 0.05$  相关 correlated; \*\*  $p < 0.01$  显著相关 prominently correlated;

102 耕地-有林地 Cultivated land- Forested land; 104 耕地-疏林地 Cultivated land- Woodland; 203 有林地-灌木林地 Forested land- Shrub land; 204 有林地-疏林地 Forested land- Woodland; 207 有林地-中覆盖度草地 Forested land- Medium coverage grassland; 304 灌木林地-疏林地 Shrub land- Woodland; 406 疏林地-高覆盖度草地 Woodland- High coverage grass land; 603 高覆盖度草地-灌木林地 High coverage grass land- Shrub land

根据上述研究结果,路网密度与生态系统变化的 Pearson 相关指数随尺度的变化表现出不同的变化特点(图2),大致可以分为以下3类:

#### (1) 耕地向有林地和疏林地、有林地向灌木林地、高覆盖度草地向灌木林地

这些土地利用变化类型与路网密度仅在个别尺度具有显著相关性,不具有普遍的尺度效应。例如耕地向有林地的转化与路网密度在  $8\text{km} \times 8\text{km}$  和  $14\text{km} \times 14\text{km}$  两个尺度下显著相关。这些土地利用变化类型与路网密度的相关程度也比较低,说明路网不是导致这些土地利用类型发生变化的主要因子。

#### (2) 疏林地向高覆盖度草地

该土地利用变化类型的面积指数与路网密度在多个尺度都显著相关,但是相关程度较低,说明公路网络虽然对疏林地向草地这一逆向演替过程有影响作用,但路网并不是主要影响因素。

#### (3) 有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地

这些土地利用变化类型与路网密度基本在所有尺度下都显著相关,具有普遍的尺度效应,且相关程度较高,说明路网是导致这些土地利用类型发生变化的主要影响因子之一。

### 3.3 道路网络影响区域的地形特征

根据道路网络与生态系统类型变化的相关分析可知,道路网络对耕地向有林地、耕地向疏林地、有林地向灌木林地、有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地、疏林地向高覆盖度草地和高覆盖度草地向灌木林地的变化均有相关性。其中,路网是导致有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地转变的主要影响因子。

在道路网络显著影响区域内,地形作为最重要的自然地理因素,也表现出一定的分布特征(图3)。海拔主要集中于  $1500 \sim 2000\text{m}$ ,范围相对较集中,且随着尺度的增加无明显变化(表3)。坡度基本都在  $10^\circ$  以下,属于缓坡,并且坡度不随尺度的增加而变化(表4)。坡向以东南坡( $112.5 \sim 157.5^\circ$ )和南坡( $157.5 \sim 202.5^\circ$ )

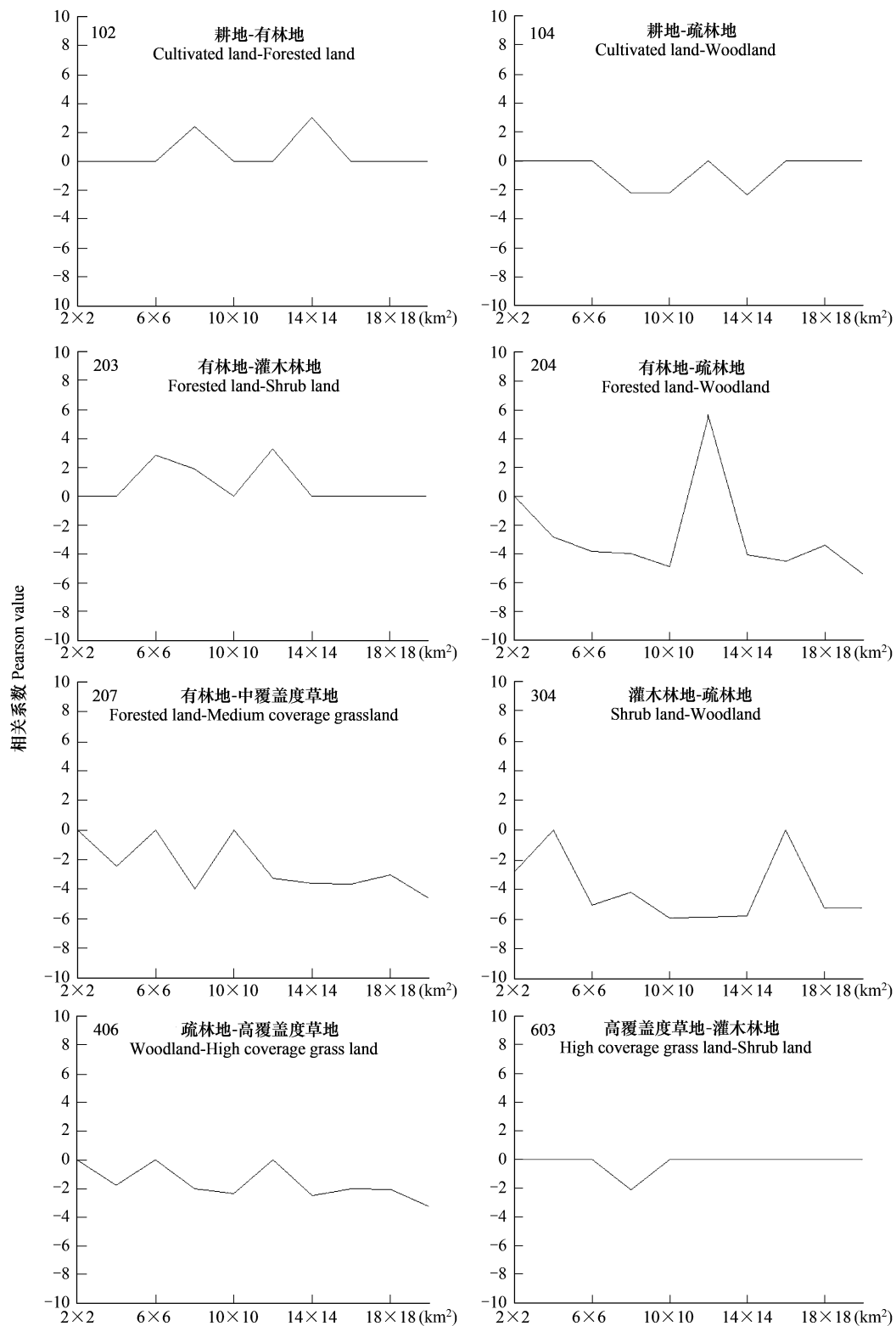


图2 道路网络密度与生态系统转换类型间的 Pearson 相关指数

Fig. 2 The Pearson's value between the density of road networks and the ecosystem transformation types

为主(表 5)。

### 3.4 道路网络密度对生态系统类型变化的影响阈值分析

本研究所说的阈值是指道路网络导致生态系统从一种状态转变为另一种状态的路网密度在多尺度下的

均值。生态系统从一种状态转变为另一种状态可能是受到多个因素的共同作用,如:自然演替、社会经济、人口密度等。因此,本研究在讨论路网的密度阈值时,主要基于以下前提条件:(1)相关分析结果表明,道路网络密度与有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地转变的相关程度非常高。(2)生态系统变化方式为逆向演替,不包括自然演替。(3)道路的开通使其沿线出现新的居民点甚至村镇,随之带来了路旁的商业发展,因此,本研究把社会经济发展和人口密度变化视为道路产生的间接影响。

在路网导致有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地转变的区域内,路网密度( $\text{km}\cdot\text{km}^{-2}$ )都具有相对集中的分布范围(表6),且随着尺度的增大,路网密度的变化不显著。其中,对有林地向疏林地转变的路网密度均值为 $0.8381\sim0.8800\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ ,对有林地向中覆盖度草地转变的路网密度均值为 $0.6984\sim0.8124\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ ,对灌木林地向疏林地转变的路网密度均值为 $1.2770\sim3.6426\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

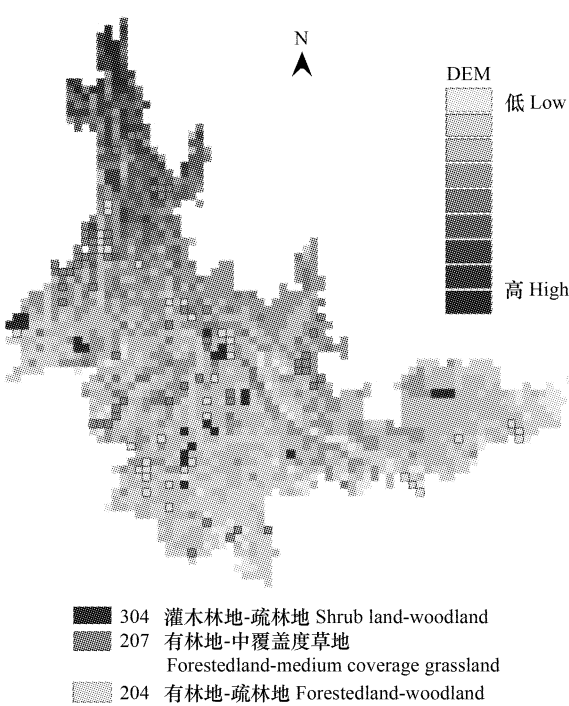


图3 道路网络影响区域的DEM(以 $12\text{ km}\times12\text{ km}$ 尺度为例)  
Fig. 3 The DEM impacted by the road networks in LRGR with spatial scale at  $12\text{ km}\times12\text{ km}$

表3 不同尺度道路网络影响海拔特征

Table 3 The characteristics of elevation impacted by the road networks effect at different spatial (m)										
林地类型 Forest types	尺度 Scale									
	2×2	4×4	6×6	8×8	10×10	12×12	14×14	16×16	18×18	20×20
204		1807.00	1688.00	1658.50	1610.50	1528.00	1480.00	1677.00	566.10	1526.00
207		1970		1868.00		1962.5	1962.00	1995.00	604.97	1817.00
304	1603.00		1620.00	1566.50	1527.00	1494.00	1568.00		453.11	1478.00

204 有林地-疏林地 Forested land- Woodland; 207 有林地-中覆盖度草地 Forested land- Medium coverage grassland; 304 灌木林地-疏林地 Shrub land- Woodland. 空白处表示在该尺度下,土地利用变化与路网密度的相关性不显著,故略去 No data indicates the correlation between landuse change and road networks density is not prominent, so omitted. 下同 the same below

表4 不同尺度道路网络影响的坡度(°)特征

Table 4 The characteristics of the slope affected by the road networks										
林地类型 Forest types	尺度 Scale									
	2×2	4×4	6×6	8×8	10×10	12×12	14×14	16×16	18×18	20×20
204		7.5	5.88	5.49	6.52	5.18	5.45	4.32	5.99	5.01
207		6.86		6.77		6.33	6.15	6.84	6.68	4.96
304	4.13		4.22	4.95	3.75	2.95	4.54		3.70	6.00

从表6还可以看出,在相同的尺度下,路网对这3种生态系统类型变化的影响阈值大致处于相同的区间内,表明有林地和灌木林地的系统稳定性和对路网影响的抵抗能力比较相近。随着尺度的增大,路网密度没有发生显著的变化,路网的阈值区间也没有显著变化,表明在大的尺度下,路网对生态系统的影响并未减弱。

表 5 不同尺度道路影响的坡向(°)特征

Table 5 The characteristics of the aspects influenced by the road networks effect

林地类型	尺度 Scale									
Forest types	2 × 2	4 × 4	6 × 6	8 × 8	10 × 10	12 × 12	14 × 14	16 × 16	18 × 18	20 × 20
204		235.46	189.03	173.05	206.58	179.55	180.68	201.89	136.92	192.51
207		178.87		153.62		143.56	175.21	155.02	133.85	205.04
304	220.16		143.08	130.03	96.37	98.13	164.29		173.21	122.21

表 6 道路网络密度统计表(km/km<sup>2</sup>)

Table 6 The statistics of the density of road networks

林地类型	尺度 Scale									
Forest types	2 × 2	4 × 4	6 × 6	8 × 8	10 × 10	12 × 12	14 × 14	16 × 16	18 × 18	20 × 20
204	Min	0.0006	0.0003	0.0002	0.0426	0.0001	0.0254	0.0655	0.0332	
	Max	1.8969	1.5830	1.7586	1.3441	1.2928	1.2740	1.2064	1.3086	
	Mean	0.8786	0.8613	0.8800	0.8673	0.8612	0.8551	0.8383	0.8381	
207	Min	0.0006		0.0002			0.0001	0.0655	0.0332	0.0330
	Max	1.5786		1.2967			1.2397	1.2648	1.2563	1.2811
	Mean	0.8124		0.7655			0.6984	0.7434	0.7199	0.7362
304	Min	0.0054	0.0945	0.0841	0.0262	0.0609	0		0.0662	0.0138
	Max	3.6426	2.1164	1.7586	1.4930	1.2652	1.2506		1.3325	1.2770
	Mean	1.2162	0.9024	0.8947	0.9121	0.9000	0.8833		0.9083	0.8871

最小 Min; 最大 Max; 平均 Mean

从路网密度的阈值区间范围来看,路网对有林地向疏林地转变的阈值区间明显大于其它两种变化类型,说明对于森林生态系统,其在路网的影响下先发生退化,当路网的影响继续增大时,才会发生逆向演替,发生逆向演替受到的路网影响程度远大于生态系统退化受到的影响程度(图 4)。

4 结论与讨论

通过研究道路网络密度与 1980 ~ 2000 年土地利用变化的相关性,路网密度与有林地向疏林地、有林地向中覆盖度草地、灌木林地向疏林地转变的相关程度较高。在这些发生变化的区域内,地形表现出一定的特征,其中,海拔主要集中于 1500 ~ 2000m,坡度基本都在 10°以下,属于缓坡;坡向以东南坡(112.5 ~ 157.5°)和南坡(157.5 ~ 202.5°)为主。路网密度(km·km<sup>-2</sup>)作为生态系统发生变化的影响因子之一,其影响阈值具有一定的区间范围。路网对有林地向疏林地转变的路网密度均值为 0.8381 ~ 0.8800 km·km<sup>-2</sup>,对有林地向中覆盖度草地转变的路网密度均值为 0.6984 ~ 0.8124 km·km<sup>-2</sup>,对灌木林地向疏林地转变的路网密度均值为 1.2770 ~ 3.6426 km·km<sup>-2</sup>。随着尺度的增大,路网密度的变化不显著。在相同的尺度下,路网对这 3 种生态系统类型变化的影响阈值大致处于相同的区间内,表明有林地和灌木林地的系统稳定性和对路网影响的抵抗能力比较相近。随着尺度的增大,路网密度没有发生显著的变化,路网的阈值区间也没有显著变化,表明在大的尺度下,路网对生态系统的影响并未减弱。

重大工程建设作为区域生态系统变化的主要人文驱动力之一,对区域生态系统造成了巨大压力,改变了区域的生态平衡,因此,重大工程建设对生态系统的作用与影响研究成为当前的热点问题<sup>[13]</sup>。公路网络的阈值研究可以与道路建设规划相结合,进行不同发展时期的情景预测、模拟等研究。此外,现行的公路规划和建设环境影响评价,主要是针对单一路段的环境影响评价,无法评价公路网络的整体效应,存在较大的局限性。本研究的方法和结果将为区域路网的环境影响评价提供一种快速评估方法,对评价路网的综合影响和优化路网结构具有重要意义。

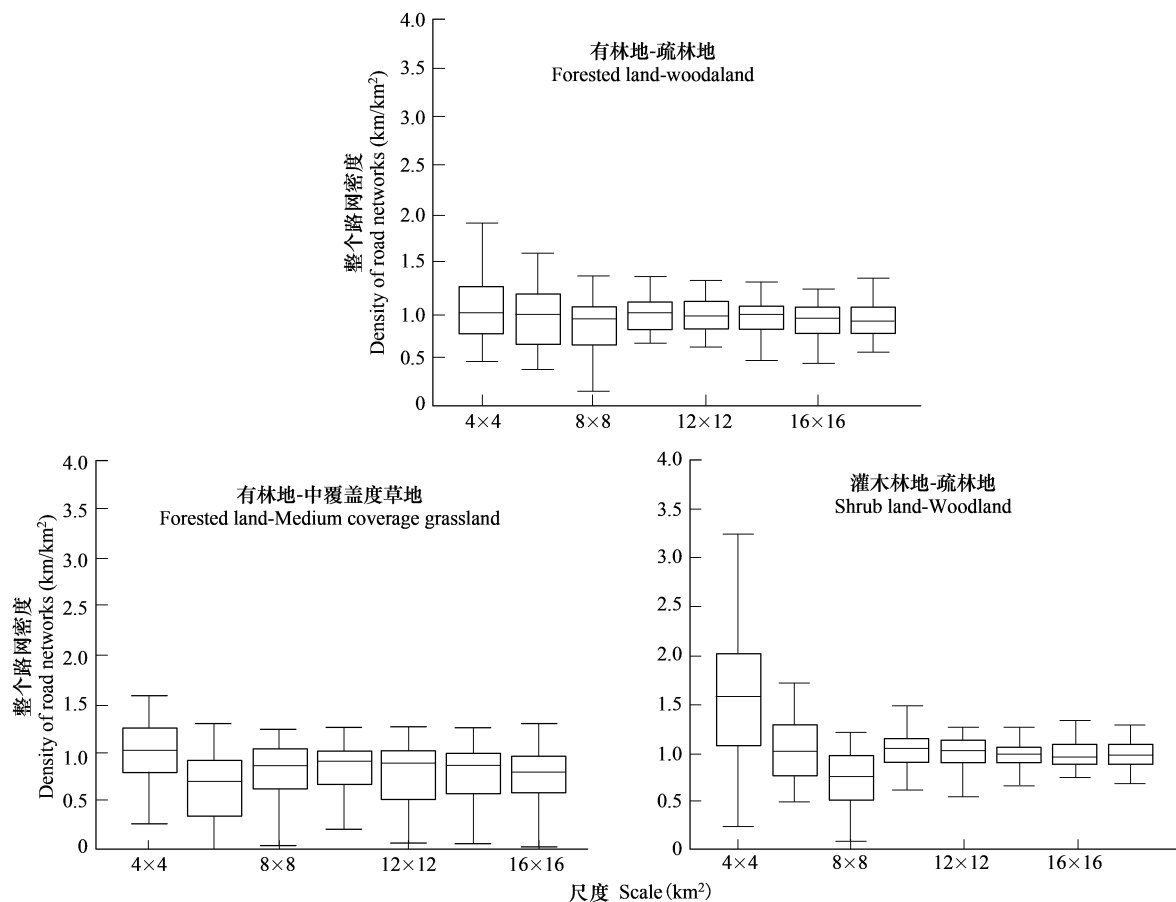


图4 道路网络影响生态系统变化的路网密度范围

Fig. 4 The range of the density of road networks affecting the ecosystem transformation

## References:

- [ 1 ] Oxley D J, Fenton M B, Carmody G R. The effects of roads on populations of small mammals. *Journal of Applied Ecology*, 1974, 11(2): 51 — 59.
- [ 2 ] Flanagan J T, Wade K J, Currie A, *et al.* The deposition of lead and zinc from traffic pollution on two roadside shrubs. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 1980, 1(1): 71 — 78.
- [ 3 ] Research Board Transportation. Ecological effects of highway fills on wetlands; user's manual. Transportation Research Board, 1979.
- [ 4 ] Laursen K. Birds on roadside verges and the effect of mowing on frequency and distribution. *Biological Conservation*, 1981, 20(1): 59 — 68.
- [ 5 ] Knutson R. M. Flattened Fauna: A field guide to common animals of roads, streets and highways. Ten Speed Press, 1987, 23 — 56.
- [ 6 ] Nasralla M M, Ali E A. Lead accumulation in edible portions of crops grown near Egyptian traffic roads. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1985, 13(1): 73 — 82.
- [ 7 ] Scanlon P F. Heavy metals in small mammals in roadside environments; Implications for food chains. *The Science of the Total Environment*, 1987, 59(1): 317 — 323.
- [ 8 ] Sherwood B, Burton J, Cutler D. Wildlife and roads; The ecological impact. Imperial College Press, 2002. 1 — 69.
- [ 9 ] Robert M M. Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature*, 1977, 269(5628): 471 — 477.
- [ 10 ] Perrings C, Opschoor H. The loss of biological diversity; some policy implications. *Environmental Research Ecology*, 1994, 4(1): 1 — 11.
- [ 11 ] Kohn R E. Thresholds and complementarities in an economic model of preserving and conserving biodiversity. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1999, 33(2): 151 — 172.



- [12] Mark E, Eiserich J, Christopher H. Maximizing conserved biodiversity: why ecosystem indicators and thresholds matter. *Ecological Economics*, 2001, 38(2): 259–274.
- [13] Zheng Y, Li X W, Cui B S, *et al.* The multi-scale effect of road network on the ecosystem in Longitudinal Range-Gorge region of Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4267–4277.
- [14] Cui B S, Hu B, Zhai H J, *et al.* Interaction between major construction projects and ecosystem changes. *Science Bulletin (supplement)*, 2007, 52(S2): 19–28.

**参考文献:**

- [13] 郑钰, 李晓文, 崔保山, 等. 云南纵向岭谷区道路网络对生态系统影响的尺度效应. *生态学报*, 2009, 29(8): 4267–4277.
- [14] 崔保山, 胡波, 翟红娟, 等. 重大工程建设与生态系统变化交互作用. *科学通报(增刊)*, 2007, 52(S2): 19–28.