

基于网络特征的道路生态干扰 ——以澜沧江流域为例

刘世梁, 温敏霞, 崔保山, 杨 敏

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 道路网络对区域景观的生态格局和过程产生较大的影响, 作为干扰因子, 区域道路网络的特征和所产生的生态干扰水平存在一定的相关性。利用 GIS 和网络分析法, 以澜沧江流域县域为基本单元, 分析了研究区各县的道路网络特征指数, 在揭示了区域道路网络不同特征之间的规律性的基础上, 进一步对区域网络特点和生态干扰之间相关性进行了内在关系的探讨。结果表明, 澜沧江流域道路网络结构的差异很大, 流域内各县的道路网络节点数、连接线数目、 α 环度、 β 线点率、 γ 连接度指数等网络特征因子也存在较大差异; 道路密度和道路总长度与区域海拔高度呈现较明显的负相关关系; 道路密度和区域道路的廊道密度呈现正相关关系, 和区域道路的 α 指数、 β 指数和 γ 指数关系可以用倒数模型来拟合。缓冲区分析表明, 耕地比例和道路密度线性相关关系显著, 而其他类型相关性较差, 但区域综合的人工干扰指数 (Hd) (1980, 2000) 和道路网络的特征指数相关显著, 而且不同时期的区域景观的斑块密度、平均斑块面积和区域道路网络特征之间也存在较强的相关性, 即网络扩展使得区域生态系统受干扰强度增加, 破碎化严重, 但较短时期内的生态系统变化和道路网络特征之间相关性不显著。

关键词: 道路网络; 道路干扰; 网络结构; 澜沧江

文章编号: 1000-0933(2008)04-1672-09 中图分类号: X144 文献标识码: A

Ecological effect of road based on network analysis: a case study in Lancang River Valley

LIU Shi-Liang, WEN Min-Xia, CUI Bao-Shan, YANG Min

School of Environment, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1672 ~ 1680.

Abstract: Regional ecological pattern and process are influenced by the existence and extension of road networks. As road is an intrinsic disturbance factor in landscape, the study of the relationship between road features and its disturbance level is important to regional ecosystem management. We analyzed the characteristic indexes of road network and their relationship at the county scale and further sought the regularity between the index and region ecological disturbance using GIS and network methods. The results showed that the indexes of road network, such as road connectivity nodes number, line number, α circuitry index, β line-node ratio, and γ connectivity index, varied greatly in Lancang River Valley. Road density and road length are negatively correlated with regional elevation. Road density has a positive relation with road corridor number, α connectivity index, β line-node ratio, and γ circuitry index. Linear regression can simulate the relation between road density and line number density while the relationship between road density and α , β , γ indexes can be

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB415104); 国家自然科学基金资助项目(40501067)

收稿日期: 2007-01-16; **修订日期:** 2007-07-19

作者简介: 刘世梁(1976 ~), 男, 山东沂水人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态、土地利用和土壤学研究. E-mail: shiliangliu@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China(No. 2003CB415104), the National Natural Science Foundation of China (No. 40501067)

Received date: 2007-01-16; **Accepted date:** 2007-07-19

Biography: LIU Shi-Liang, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in landscape ecology, land use change and soil science. E-mail: shiliangliu@163.com

modeled by reciprocal model. Buffer analysis showed that the percentage of farmland type is significantly linearly correlated with road density while other types have no significant relationship. Human disturbance index (Hd), patch density and average patch area (1980, 2000) have a significantly positive relationship with α , β , γ indexes which suggest the ecological disturbance increased and ecosystem fragmentation was intensified with the network expanding. However, the correlation between ecological change and road network index was not significant in relatively short period.

Key Words: road networks; ecological disturbance; network structure; Lancang River Valley

网络是自然界和社会系统中客观存在的现象,遵循一定自然和社会规律^[1]。抽象地看,网络可由许多节点(nodes)和连接节点之间的线段(edges)来表示,其中节点用来代表真实系统中不同的元素或者位置,而线段则用来表示网络的延展或者节点之间的关联程度。道路系统本身具有网络特点,有等级结构,由点、线按照一定空间秩序组合成的体系^[2,3]。道路所经过的城市、城镇、村落可视为节点,而不同道路类型构成了道路网络的主体。

道路网络同时具有其他网络所不具备的一些特点,主要表现在道路既是区域景观的内在因子,又是区域生态系统变化的干扰体。内因是指道路本身作为区域土地系统的组成要素,它的存在和扩展除了和节点的特征相关性比较大外,更多的和区域的景观因子关系密切,这是道路网络和其他网络的区别之一;干扰体是指道路网络存在干扰效应,作为“廊道”,增强了人类干扰的广度和深度,作为“阻隔”,约束了不同景观流的生态过程,这两种作用都使得道路网络对周边生态系统产生很强的直接或者间接效应,且这些影响可以从物种的尺度延续到景观、区域尺度。已有研究表明,道路对生态系统的影响至少涉及到全球陆地近 1/5。在较大的时空尺度上,道路网络的效应可以反应在道路影响域(road effect zone)土地利用格局的改变上^[4]。道路网络作为社会和经济发展的中枢,具有其他建设工程不能比拟的分布范围和发展速度^[5,6],道路的生态效应研究也越来越受到重视,道路生态学也成为生态学重要的前沿领域^[7]。目前,我国关于道路对生态系统的影响目前刚刚起步,虽然许多学者探讨了道路对生态系统的影响,但主要集中道路段或者道路类型对生态系统的影响上,案例分析较少,基于网络特征的道路所产生的生态干扰研究目前尚为报道^[8]。网络分析是运筹学的一个分支,主要运用图论方法研究各类网络的结构及其优化问题。网络分析方法虽然在地理学中得到了广泛的应用,但更多的是集中在城市地域结构、交通问题、商业网点布置等^[1]。

本研究利用 GIS 和景观生态学的方法,以澜沧江流域为案例区,分析区域道路的网络特征和区域生态系统干扰特征,在此基础上,揭示区域道路网络特征的规律性,研究道路网络特征和区域生态干扰之间的关系。澜沧江流域由于具有独特的自然环境和生态系统特征,同时也遭受到强烈的道路建设干扰,使得在该区研究道路建设作用具有重要现实意义^[2]。

1 研究区域

澜沧江流域(98°36'~102°19'E, 21°08'~29°15'N)位于我国西南纵向岭谷区,云南省西部,澜沧江从北向南贯穿 7 个地州 39 个县市(包括保山市、大理市、景洪市、思茅市等),总面积 $1421 \times 10^4 \text{ km}^2$;整个流域以山地为主,北部地区位于横断山系南段,高山峡谷相切的主体地貌,中部地区多为中山宽谷,南部地区呈中低山宽谷盆地景观。该区域生物多样性突出,土地覆盖类别繁多,生态环境保护意义重大,但同时该区域所遭受的人类干扰呈增加趋势,云南省在建的“滇缅”和“昆曼”国际大通道皆跨越澜沧江流域,道路的存在和扩展于该流域不仅具有社会、经济效益,更突出的是其重要的生态影响。

2 数据和研究方法

2.1 数据及来源

研究选择县域为研究单元,利用 GIS 等手段进行道路的网络特征分析,同时进行区域生态系统特征和变化的分析,试图分析道路网络的发展和形成对生态系统的影响,特别是宏观尺度上生态干扰的时空分异情况。

生态系统变化特征利用 1980 年和 2000 年两个时期段的遥感影像所提取的 1:100000 类型图,道路矢量数据以 1:250000 中国基础地理信息中中国公路图,并利用 1:1000000 云南省交通图数字化加以更新,区域地貌因子利用 1:10 万的 DEM 图进行提取^[8]。

2.2 网络分析

2.2.1 道路廊道结构分析

由于生态网络是由节点和廊道组成,因此生态网络的分析应包括生态廊道的结构分析,主要包括:宽度、组成成分、内部环境、形状、连续性等。其中廊道的宽度和连结度是控制廊道功能的主要因素。因此,选择廊道的数量、长度和密度进行廊道的结构分析。

2.2.2 道路网络结构分析

网络的复杂性可用网络闭合度,线点率和网络连接度进行描述^[9],网络闭合度是用来描述网络中回路出现的程度,可用 α 指数来表示,线点率(β 指数)指网络中每个节点的平均连线数,网络连接度(γ 指数)是用来描述网络中所有节点被连接的程度^[10]。 α 指数、 β 指数和 γ 指数用来测度网络的抽象属性,这些指标经常被用来评价网络的连通度^[5],而且在生态网络连接度和有效性评价中也可使用这些指数^[11,12]。区域道路系统简化为由节点和连线组成的图论意义下的网络,通过这些指数,可进一步定量地测度它们的拓扑结构、连通性和复杂性。

2.2.3 拓扑结构

网络的拓扑结构包括 3 种,即规则网络、随机网络和复杂网络(主要是无标度网络)^[13]。规则网络所有节点的几何参数相同,并不符合真实的道路网络的实际状态。科学家们发现大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络。这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络,其诸多统计特征中最重要的是小世界效应和无标度特性^[14,15]。大多数道路网络是动态演化的开放网络,是随机性和规律性共同作用的结果。通过比较随机网络和无标度网络的参数(表 1),从特征上看,可以得出,道路网络更符合无标度网络的特征,无标度网络对比随机网络具有更好的完备性和更高的网络效率^[1]。

表 1 随机网络和无标度网络特征对比^[1]

Table 1 The contrast of stochastic and non-scale networks

对比参数 Parameters compared	随机网络 Random network	无标度网络 Non-scale network
节点的分布 Node distribution	泊松分布 Poisson	幂律分布 Power-law distribution
特征尺度 Character scale	均值 Average	无特征尺度 No character scale
网络平均距离 Average distance	小 Small	小 Small
网络簇系数 Network cluster ratio	小 Small	大 Large
轴心节点 Axial node	不存在 Nonexistence	存在少数 Exist minority

2.2.4 网络结构的形成和类型

每一个系统中的网络都有其自身特殊性质和独特形成机制。对于道路网络来说,每一个节点都希望与其他节点建立直接、快捷和方便的联系,然而往往受到各种制约条件的限制而不能形成完全连接状态。限制两个节点间能否存在边的因素是包括许多因素,如经济限制,政府规制,地形限制,土地限制等等。但已经有研究发现城市化水平与交通网络之间也应存在相关关系揭示出城市化过程与交通网络的发展互为因果^[16,17]。另外道路网络的形成具有明显的等级结构特点,这和我国城市体系的发展具有一定的关系,但是等级结构的发展模式和最优化选择目前仍缺少相关研究。

从形态上看,网络可分为分枝网络和环形网络两种形式,分枝网络可以有单一放射性分支和多分枝网络,环形网络有单一环状网络、多环网络、网络分枝组合网络。如每个节点只与一条连线相接则网络建造费用最小,而任意两个节点都被直接连接起来则使用费用最小^[18,19]。从阻隔作用来看,公路由于存在等级和结构的差异,网络也可以分为封闭型(如高速公路)、可渗透型(公路)或开放型网络(如田间小路),不同类型的生态

影响差异较大。

在纵向岭谷区,道路所呈现网络结构空间差异很大,不同的网络类型存在研究区于不同的类型和等级公路中。从网络形成、发展及其相互作用看,空间网络化随着时间变化有 5 个基本过程:初始化的均质状况演变到点状态(主要是道路节点),再进一步到连接成线状态,形成枝状态或者网络化状态。从宏观尺度来看,特定区域内包含多个等级的道路系统,如粗网格的高速公路系统和细网格的道路系统,平原区道路网络系统往往属于直线性的网络结构,而山区道路系统往往弯曲度大,并呈现出分枝结构。从中尺度看,土地利用的格局,如居民点、农田的分布也制约着道路网络的分布特点;同时景观因子影响了道路网络的状况,这些中尺度的特征更多的影响了道路网络的网格大小。

3 结果与讨论

3.1 澜沧江流域道路网络的特征分析

选取了区域道路的长度,道路密度和道路网络特征 α 指数、 β 指数和 γ 指数,以县域为研究尺度,分析澜沧江流域道路网络的特征。为更好分析其规律性的内容,本文对各个县具体的指标大小不一列出,而是对道路网络特征本身和区域人类干扰等相互关系因子做内在关系的探讨。

分析表明,澜沧江流域不同县之间道路类型、道路类型的组合、道路数量、道路密度差异较大。道路的类型存在空间不均匀性,如较偏远的地区,目前仍没有国家干线路,如高速公路,省际干道的存在;而从道路类型的空间组合来看,差异也很显著,各级道路所占的比例差异较大,以澜沧江上中下游的德钦,保山,景洪县为例,小路:乡村路:县乡路:高等级路的比例分别为:42%:27%:18%:13% (德钦);54%:35%:4%:7% (保山);52%:31%:11%:5% (景洪),可以看出,上中下游 3 个县不同道路的等级结构变化较为明显,而且小路在整个道路体系中所占的比例比较大,高等级路在区域中所占的比例较少;从总的道路密度来看,空间变异也比较显著,数值从 0.27 km/km² 到 0.58 km/km²,相差超过了 1 倍,其中道路密度较低的县有维西,德钦等县,而较高的县如:西盟佤族自治县,孟连等县。

利用 GIS 分析和拓扑功能,分析了道路网络的 α 指数、 β 指数和 γ 指数的变化情况,其中节点的设置以道路所连接的村落为节点。结果表明,不同区域道路网络的 3 个指数差异也较大,所有道路的 α 环度指数的变异范围在 0.53 到 0.71 之间, β 线点率指数在 0.59 到 2.1 之间, γ 连接度指数在 0.30 到 0.57 之间。

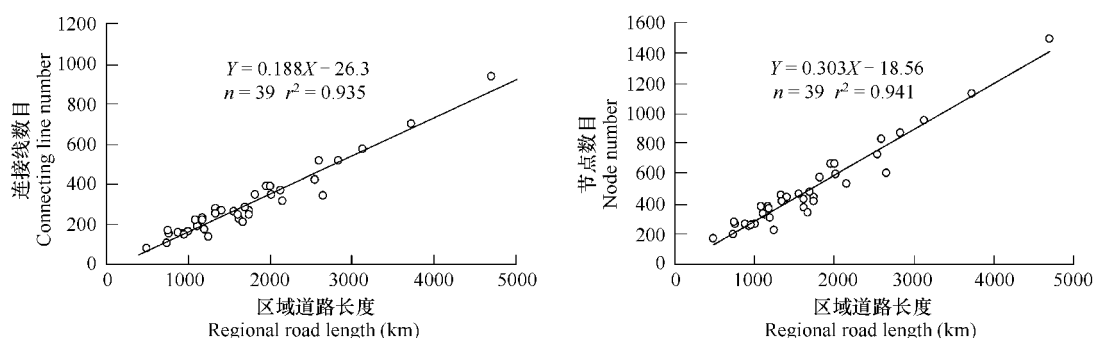


图 1 区域道路长度和道路网络节点、连接线的关系

Fig. 1 Relationship between regional road length and connecting line, node numbers

一般来说, α 值的变化范围在 0~1 之间,当 $\alpha=0$ 时,表示网络无回路,当 $\alpha=1$ 时,表示网络具有最大可能的回路数。当 $\beta<1$ 时,表示形成树状格局, $\beta=1$ 时,表示形成单一回路, $\beta>1$ 时,表示有更复杂的连接度水平。 γ 指数的变化范围为 0~1, $\gamma=0$ 时,表示没有节点相连, $\gamma=1$ 时表示每个节点都彼此相连^[10]。由此可见,澜沧江流域各县的道路网络特征存在较大的差异。研究进一步分析澜沧江流域道路网络的内在规律性,通过 GIS 分析,将各级道路廊道特征做了统计,并和区域道路网络特征做了相关分析。

图 1 是利用区域道路总长度和区域道路网络的节点、及其连接线所做的相关分析。结果显示,两者之间的相关关系显著。随着道路的扩展,道路网络所形成的节点数目增加,而且连接线的数目也呈增加趋势,在澜

沧江流域,这种增加为直线关系。同时可以看出,不同区域节点数、连接线的数目差异较大,这也造成了区域的道路密度之间有一定的差异。通过对道路密度和道路总长度与区域海拔高度的关系分析发现,澜沧江流域各县所在的平均海拔高度越高,则道路密度越低,而且道路长度也显著降低,这和澜沧江流域的实际情况相符合,海拔高度越高,则区域经济水平相对较低,而且山地所占比例变大,道路的长度随之降低(图2)。

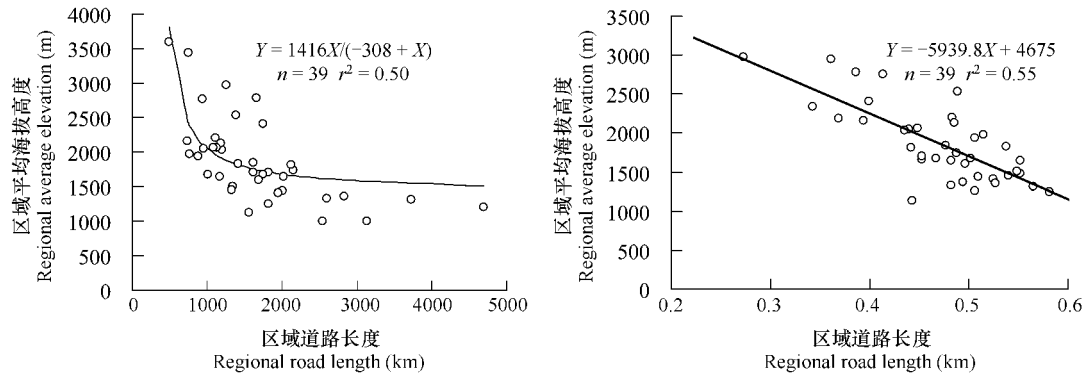


图2 区域道路长度、道路密度与平均海拔高度的相关性分析

Fig. 2 Relationship between average elevation and regional road length, density

进一步对道路网络的道路廊道数量、 α 指数、 β 指数和 γ 指数和区域道路的密度做了相关分析,结果见图3。总体上来看,道路密度和区域道路的廊道密度、道路的 α 指数、 β 指数和 γ 指数呈现正相关关系,即随着道路密度的增加,连接度、线点率和环度增加,道路廊道和道路密度呈较好的直线相关关系,而道路的 α 指数、 β 指数和 γ 指数和道路密度的关系皆可以用倒数模型来拟合,而且相关系数达到了显著的水平。

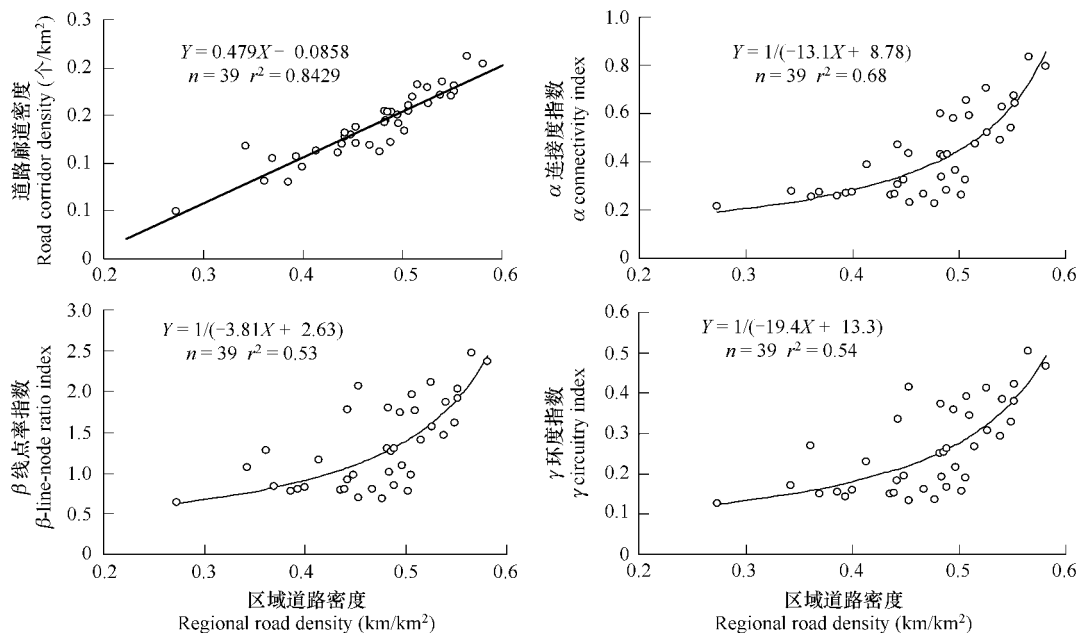


图3 澜沧江流域道路密度与道路网络特征的相关性分析

Fig. 3 Relationship between road network index and regional road density

研究同时也分析了道路网络特征之间相关关系,表2比较了节点数目、道路廊道数目和道路网络的 α 指数、 β 指数和 γ 指数相关性。结果表明,道路节点数目和网络特征相关性不显著,而且节点密度同样和网络特征关系不密切,说明节点的数目和密度对区域道路网络的影响度较小。而道路廊道的数目和 α 指数、 β 指数和 γ 指数相关性都达到了显著性水平,图3也表明道路密度与网络特征关系也比较密切,这说明无论是区域

道路网络的数目还是区域道路网络的长度,都对区域网络的特征产生了较大的影响,而节点数目对区域网络特征影响较小。

表 2 的结果也表明,道路的 α 指数、 β 指数和 γ 指数三者之间相关关系密切,呈直线相关的关系,且相关系数在 0.95 以上。但结果也表明道路的总长度和网络指数之间关系不明显,说明道路密度更能反应一个区域景观的连接水平,而道路的总长度等特征受区域面积等影响较大。

表 2 区域道路网络特征之间的相互关系

Table 2 The relationship between road network features

因子 Index	道路廊道数 Road corridor number	节点数目 Node number	α 指数 α index	β 指数 β index	γ 指数 γ index
道路廊道数 Road corridor number	1				
节点数目 Node number	0.623 **	1			
α 指数 α index	0.424 **	-0.083	1		
β 指数 β index	0.463 **	-0.111	0.984 **	1	
γ 指数 γ index	0.539 **	-0.095	0.962 **	0.975 **	1

** 显著性水平 $p < 0.01$, Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * 显著性水平 $p < 0.05$, Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); 下同,the same below

3.2 研究区道路网络特征和生态系统空间分异的规律分析

从上述分析可以得出,道路的网络特点和区域生态环境之间有相互作用,道路网络的结构特点和区域生态干扰关系也存在一定的关系,但目前这方面的定量化的关系分析仍比较缺乏。运用 GIS 的空间分析功能,对两个时段的 1:10 万生态系统类型进行空间分析,进而分析道路网络特征和区域生态系统空间分异的规律。

研究首先利用 Buffer 缓冲区方法对道路进行 200、500 m 和 1000 m 的缓冲区分析,分析不同缓冲区各类生态系统类型所占的比例,进而和区域道路密度相比较。图 4 显示的是澜沧江流域道路密度与不同缓冲区耕地比例的相关性,耕地作为主要人类干扰类型,可以看出,随着缓冲距离的增加,耕地面积所占的比例增加,而且对于澜沧江流域来说,区域道路密度和不同道路缓冲区周边的耕地面积比例存在较好的线性相关性(显著性水平 $p < 0.01$),即道路密度对区域干扰存在一定的相关性。但其他生态系统和道路密度的相关性较差,说明其他生态系统类型的空间分异影响因子更为复杂。

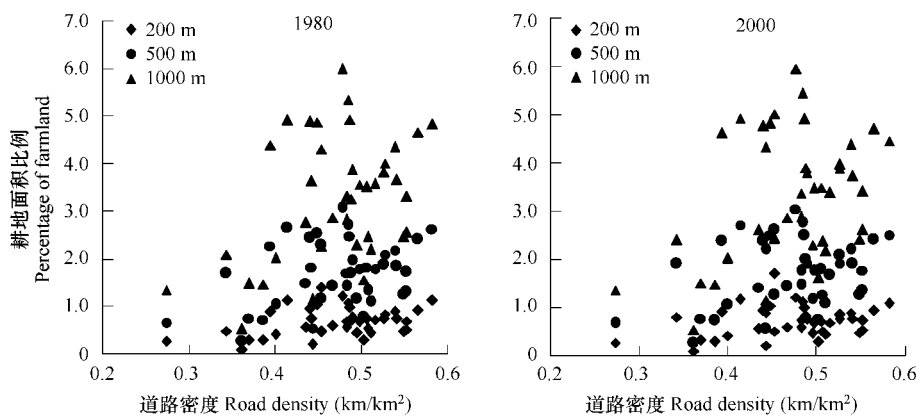


图 4 澜沧江流域道路密度与不同缓冲区耕地比例的相关性

Fig. 4 Relationship between regional road density and farm percentage of different buffers

进一步选择了区域生态系统的人工干扰指数(Hd)作为生态系统干扰的总体强度指标^[20]。干扰指数即人工干扰的生态系统(耕地、建设用地)与其他生态系统类型(林地、灌丛等)之间的比值,利用此简单的指数建立道路网络特征和景观格局变化的定量化联系。表 3 是利用相关分析得到的相关矩阵,结果表明,无论

是 2000 年的人工干扰指数(2000Hd),还是 1980 年的人工干扰指数(1980Hd),都和道路网络的特征关系比较密切。总体上, α 指数、 β 指数和 γ 指数和 2000 年的人工干扰指数相关系数分别为:0.495,0.454,0.402;和 1980 年的人工干扰指数相关系数为 0.518,0.477,0.424;都达到了显著性水平。

表 3 区域道路网络特征和生态干扰之间的关系

Table 3 The relationship between road network features and ecological disturbance

因子 Index	α 指数 α index	β 指数 β index	γ 指数 γ index	2000Hd	1980Hd
α 指数 α index	1				
β 指数 β index	0.987 **	1			
γ 指数 γ index	0.966 **	0.980 **	1		
2000Hd	0.518 **	0.477 **	0.424 **	1	
1980Hd	0.495 **	0.454 **	0.402 *	0.971 **	1

* Hd: 人工干扰指数 Human disturbance index

研究同时也分析了区域道路密度和村落密度的相关关系为正相关,达到显著水平,这和图 1 中区域道路长度和村落数目呈正相关的结论上是一致的。区域道路的扩展和村落的存在分不开的,村落作为人类活动的聚集地,其空间分布特征也可以视为人类干扰体,而村落作为道路网络的节点,其空间分布特点和道路网络本身也有一定的相关性。而道路密度和区域人类干扰指数相关性也比较紧密,相关系数在 0.578,0.604。从这个意义上来说,利用道路密度来反应区域的干扰水平是合适的。

研究对区域生态系统类型的变化(1980~2000 年)和道路特征做了相关分析,结果表明,所有道路的特征指数和生态系统变化相关性不显著,这说明了区域生态系统在较小的尺度变化在较短的时间尺度上仍没有反映到区域道路网络或区域格局变化上,这也导致了相关性差的主要原因。研究利用景观格局指数,计算了区域景观的斑块密度、平均斑块面积、Shannon-Winner 多样性指数和区域道路网络特征之间的相关性。结果如图 5 所示。结果表明不同时期各指数之间的变化不明显,这也证实了区域尺度上景观格局的变化幅度较小,但从澜沧江流域总体上来看,区域道路网络特征指数(α 、 β 和 γ 指数)和斑块密度呈现正的相关关系(显著性水平 $p < 0.05$),而平均斑块面积呈现负相关关系(显著性水平 $p < 0.05$),而多样性指数相关不显著,从而说明道路网络越发达,区域生态系统的斑块密度越大,平均面积越小,生态系统破碎化越严重,区域受干扰强度也越大。

4 结论和讨论

景观生态学中,基于斑块的格局分析是目前的主要研究方向,而景观要素中,廊道和基质的研究目前非常缺乏,而三者之间的关系也研究相对较少。对于道路网络来说,很多研究集中在某一段道路或道路类型的生态影响上,利用缓冲区或者其他分析来进行景观格局的变化分析,较少从网络特征入手进行分析^[21]。本研究利用 GIS 和网络分析法,借助图论方法研究道路网络的结构及其和生态干扰之间的关系,将景观要素从真实的复杂状态,抽象为相对单调的“图”的水平,并进行定量分析。研究结果表明,澜沧江流域道路网络结构的差异很大, α 指数、 β 指数和 γ 指数和道路密度的关系可用倒数模型来拟合,而道路密度及长度与海拔高度呈现较明显的负相关关系,而和廊道密度呈现正相关关系。

研究进一步对道路网络特征和生态系统空间分异的规律分析,利用 Buffer 缓冲区分析了不同生态系统类型在 200m,500m 和 1000m 缓冲区所占的比例,进而和区域道路密度相比较,结果表明,耕地比例和道路密度线性相关关系较好,而其他类型相关性较差。利用人类干扰指数来表征区域生态干扰的水平,结果表明,不同时期的 α 指数、 β 指数和 γ 指数和干扰指数的相关都达到了显著性水平,结果从流域的宏观尺度上反应了区域道路和干扰的相关关系。景观格局指数计算表明区域景观的斑块密度、平均斑块面积和区域道路网络特征之间存在较强的相关性,即随着网络的发展,区域斑块密度增大,平均面积越小,显示出区域生态系统受干扰强度增加,破碎化严重。而区域景观多样性指数和道路密度相关性不明显。研究进一步对比了不同时期生态系统变化和道路网络的关系,相关性分析都不显著,说明了在较小和较短时空尺度上,区域生态系统的变化没

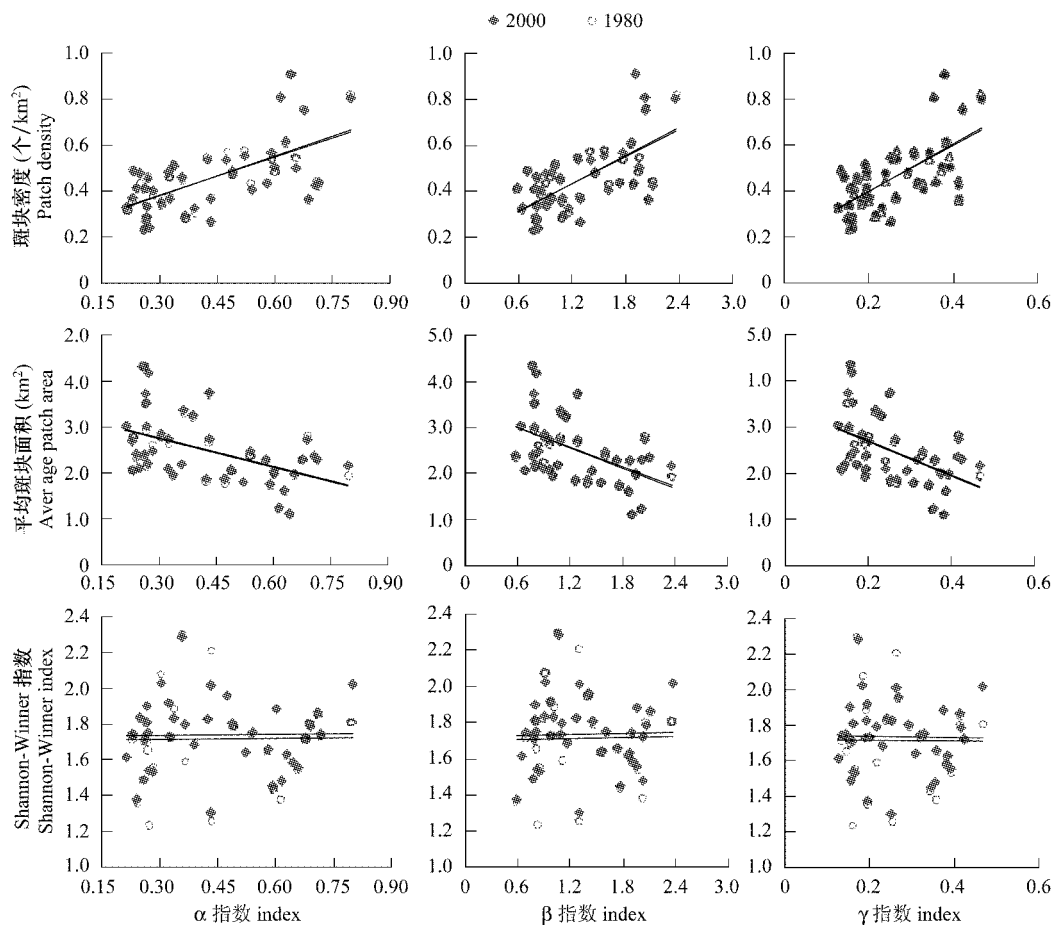


图5 澜沧江流域区域道路网络特征和景观格局相关性

Fig. 5 Relationship between regional road density and landscape pattern

有反映到区域道路网络或区域格局变化上。

以往研究也有表明道路密度和土地利用类型,房屋密度和土壤类型相关^[22],以往研究往往低估了低等级道路类型的效应,本研究将小路考虑在道路网络内,而低等级道路正是区域道路网络化的主要驱动因子,低等级道路加剧了区域生态系统的破碎化程度。对于道路网络来说,道路网络的完备性和不同类型的组合对于结果影响较大,已经有研究利用遥感影像来提取道路网络,如边缘探测与追踪、线性滤波、空间关系的道路特征识别,基于知识的道路网络提取以及数学形态学识别等方法,但由于道路光谱与空间特征随着道路的延伸而不断发生变化,道路特征的提取仍存在不同的缺陷。

道路生态学作为景观生态学最新的研究领域,道路网络的发展使得道路网络的生态安全研究有着现实的生态意义。从多尺度的道路网络系统入手,研究了道路网络对区域生态系统的驱动是目前研究的内容和方向,早期的研究集中于道路对野生动物行为及道路径流等理化环境或过程的影响,近 10 多年来,尺度扩展到景观水平,同时道路规划和自然保护等领域的应用研究也相应展开。而基于道路网络特征的分析也为区域生态可持续发展、道路的生态适宜性、区域生态安全等研究提供了研究的新思路。

References:

- [1] Zhou P. The topological characters and developing mechanism of aviation network in Sichuan Province. *Economical Geography*, 2006, 26 (4): 577—580.
- [2] Liu S L, Cui B S, Yang Z F, *et al.* Driving effect analysis of road network on regional land use change in Lancangjiang River Valley. *Acta*

Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (1): 162—167.

- [3] Liu S L, Cui B S, Yang Z F, *et al.* Effects of highway construction on mountain landscape pattern — A case study in Lancangjiang River Valley of Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24 (1): 54—59.
- [4] Forman R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conservation Biology*, 2000, 14: 31—35.
- [5] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sone, 1986.
- [6] Zong Y G, Zhou S Y, Peng P, *et al.* Perspective of road ecology development. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (11): 2396—2405.
- [7] Li Y H, Hu Y M, Li X Z, *et al.* A review on road ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (3): 447—452.
- [8] Liu S L, Yang Z F, Cui B S, *et al.* Road effect on landscape and its ecological risk assessment: A case study of Lancangjiang River Valley. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (8): 897—901.
- [9] Taaffe E J. *Geography of transportation*. New York: Prentice Hall, 1995, 142—150.
- [10] Hagget P, Cliff A D, Fry A. *Location Analysis in human geography* 2nd edn. New York: Wiley, 1977.
- [11] Linehan J, Gross M, Fin J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33, 179—193.
- [12] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58, 269—280.
- [13] Pastor S R, Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks. *Physics Review Letter*, 2001, 91—101.
- [14] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small world' networks. *Nature*, 1998, 393, 440—442.
- [15] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286, 509—512.
- [16] Chen Y G. A mathematical model of linear relationship between level of urbanization and transport network connectivity. *Human Geography*, 2004, 19 (1): 62—65.
- [17] Chen Y G, Liu J S. The DBM features of transport network of a district-A Study on the Laplacian Fractals of Networks of Communication Lines. *Geography Science*, 1999, 19 (2): 114—118.
- [18] Hellmund P. Quabbin to Wachusen wildlife Corridor Study. Harvard Graduate School of Design, Cambridge, MA. 1989.
- [19] Wang H Z. and Zhang L Q. A GIS landscape pattern and network analysis based planning of ecological networks for Xiamen Island. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (1): 144—152.
- [20] Xiao D N. Natural resources and regional exploitation in the Liaohe River Delta. *Journal of Natural Resources*, 1994, 9 (1): 43—50.
- [21] Li S C, Xu Y Q, Zhou Q F, *et al.* Statistical analysis on the relationship between road network and ecosystem fragmentation in China. *Progress in Geography*, 2004, 23 (5): 77—85.
- [22] Hawbaker T J, Radeloff V C, Hammer R B, *et al.* Road density and landscape pattern in relation to housing density, and ownership, land cover, and soils. *Landscape Ecology*, 2005, 20 (5): 609—625.

参考文献:

- [1] 周蓓. 四川省民用航空网络的拓扑结构特征及其演化机制. *经济地理*, 2006, 26 (4): 577~580.
- [2] 刘世梁, 崔保山, 杨志峰, 董世魁. 道路网络对澜沧江流域典型区土地利用变化的驱动分析. *环境科学学报*, 2006, 26 (1): 162~167.
- [3] 刘世梁, 崔保山, 杨志峰, 甘淑, 董世魁. 高速公路建设对山地景观格局的影响——以澜沧江流域为例. *山地学报*, 2006, 24 (1): 54~59.
- [6] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 刘超, 郭瑞华, 陈红春. 道路生态学研究进展. *生态学报*, 2003, 23 (11): 2396~2405.
- [7] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 等. 道路生态研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14 (3): 447~452.
- [8] 刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 甘淑. 道路对景观的影响及其生态风险评价——以澜沧江流域为例. *生态学杂志*, 2005, 24 (8): 897~901.
- [16] 陈彦光. 交通网络与城市化水平的线性相关模型. *人文地理*, 2004, 19 (1): 62~65.
- [17] 陈彦光, 刘继生. 区域交通网络分形的 DBM 特征——交通网络 Laplacian 分形性质的实证研究. *地理科学*, 1999, 19 (2): 114~118.
- [19] 王海珍, 张利权. 基于 GIS 景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划. *植物生态学报*, 2005, 29 (1): 144~152.
- [20] 肖笃宁. 辽河三角洲的自然资源与区域开发. *自然资源学报*, 1994, 9 (1): 43~50.
- [21] 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. *地理科学进展*, 2004, 23 (5): 77~85.