

流域景观功能网络构建及应用 ——以台湾乌溪流域为例

张小飞¹, 王仰麟^{1,2}, 李贵才¹, 吴健生¹, 李正国²

(1. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 选择生态及城市功能并重的台湾乌溪流域, 在乡镇行政单元的基础上, 利用耗费距离模型将景观功能网络落实于实际的空间单元。通过网络节点间的通达性分析可知, 乌溪流域的景观功能网络中以城市功能网络结构较佳, 城市节点多环绕于城市功能中心, 功能的输出与传递有较高的效益; 而生态功能网络节点间通达性差异并不显著, 唯作为一级及二级功能节点的红香、高美湿地等位置孤立、通达性较差, 需就其功能向外传输路径进行优化, 并提升二载山及北坑子等重要联系节点的生态功能强度。

关键词: 景观网络; 景观格局优化; 最小耗费距离模型; 台湾乌溪流域

1 前言

景观是有序的整体, 是生态系统水平之上, 基于人地综合体的一个更高水平的等级系统^[1, 2], 由于层次水平、尺度不同, 系统及部分的概念就有相应变化^[3-6], 为达到结构和功能的整合、格局优化及景观功能的可持续发挥, 需重视景观生态系统的复杂性、不确定性及等级性^[7-9]。网络是由线状要素相互联系组成的系统^[10], 可抽象表征复杂的相互关系及空间结构, 从景观生态学的角度来看, 景观网络是由空间中相互联系的廊道、斑块与节点所构成的实体^[11]。各景观组分间的交互作用通过网络产生能量、物质、信息的流动与交换, 因此, 网络内部“流”的作用便可用以表征网络的功能, 而借由强化景观网络结构, 便可同时提升景观功能^[4]。

依据功能的差异, 景观网络又可细分为生态网络与城市网络^[12-18]。由于不同功能导向的景观功能网络, 其组成结构间会因为相互作用而显得复杂, 以生态功能景观及城市功能景观为例, 便具有两级化、分散性、连贯性及制约性等 4 项格局特征^[19]。为探讨流域尺度的景观网络结构及景观功能间相互作用, 将功能网络落实于实际的空间单元, 以制定景观格局优化策略, 本研究基于生态与社会经济单元的完整性及功能结构的典型性, 选定台湾岛乌溪流域为研究区, 进行流域景观功能网络构建及应用研究。

2 研究区域和方法

2.1 研究区概况

乌溪流域位于台湾岛中部 (图 1), 为台湾第四大河流。流域东西长约 84 km, 南北宽约 52 km, 主流全长 116.7 km, 面积达 2025.6 km², 平均海拔 651 m。流域横跨台湾中部主要县市, 对中部地区未来区域发展扮演相当重要的角色, 其范围涵盖台中市全部及台

收稿日期: 2005-04-25; 修订日期: 2005-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40471002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40471002]

作者简介: 张小飞 (1977-), 女, 台湾台中人, 博士, 主要从事景观生态与土地利用的学习和研究。

通讯作者: 王仰麟, E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

中县、彰化县与南投县部分地区，流域中、下游工商业发达，社会经济活动密集，随着人口增加及城市化加剧，流域生态环境面临巨大压力。

2.2 技术路线

景观功能网络构建的核心在于确定网络的节点、影响范围、方向以及联系廊道。整个网络的构建乃基于经济功能、生态功能以及景观类型分布等。

其中城市功能分析的目的一方面在于确定城市功能网络的节点影响强度，从而对其进行等级划分。结合具体景观类型分布，可以确定研究区城市功能网络节点分布。另一方面，要考虑城市功能对空间发展的影响，对城市的集聚效应，及道路的连通效应等，结合地形、河流以及自然保护区的限制作用，在此，本研究基于城市发生概率模型，运用 Logistic 回归方法，对城市功能的影响因子权重加以计算，综合得出城市功能空间耗费系数的分布。

生态功能分析除对生态功能网络节点的等级和分布加以确定外，同时通过对研究区生态指标 (如 NDVI 的均值与方差) 进行采样分析，考虑到样点之间的距离和方向对插值结果的可能影响，故采用 Kriging 插值方法，得出生态功能空间耗费系数的分布。

按照最小累积耗费计算方法，通过 ARC/INFO 中 GRID 模块的 Cost distance 功能循环计算，可得研究区城市与生态功能最小累积耗费表面，并借此判定城市与生态功能在空间中的分布差异。然后，基于 Cost allocation 和 Cost back link 功能，可由景观功能累积耗费表面分别得到景观功能分区、最小耗费方向与路径。依据上述结果，综合得出景观功能网络的空间分布、城市与生态功能间相互作用的关系，具体构建流程如图 2。



图 1 台湾乌溪流域区位图
Fig. 1 Geographical location of Wuxi watershed in Taiwan

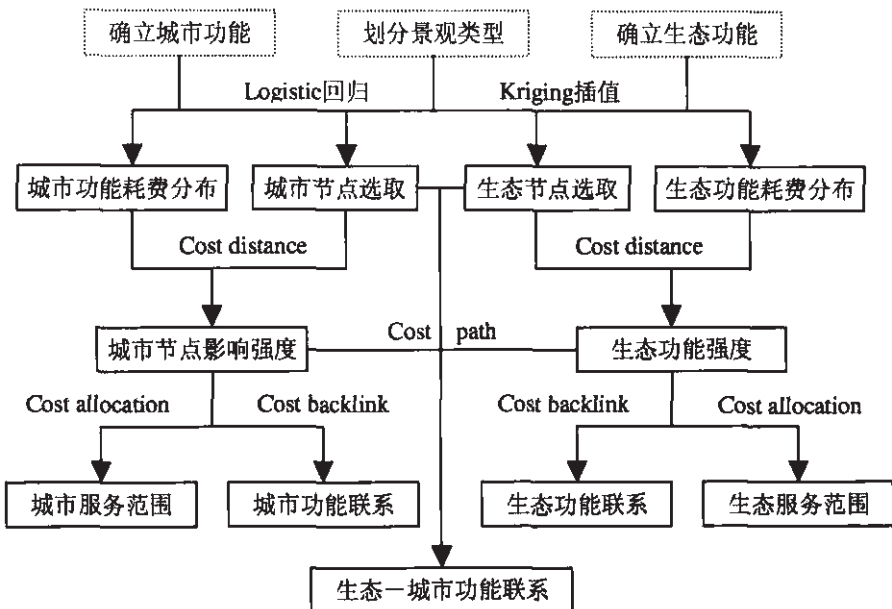


图 2 台湾乌溪流域景观功能网络构建流程

2.3 节点选取原则

景观功能网络的实现需要现实空间的联系廊道和服务节点两种基本元素组成。节点是物质、能量甚至功能服务的源头或汇集处。在乌溪流域的城市功能网络中，功能节点应为区域行政中心或主要人口集聚地，达到特定人口规模、人口密度或非农人口到达一定比例的地域，区域工业、商业或运输等主要经济活动中心；而生态网络节点可选择为防范自然灾害、维护生态环境及敏感性资源所设立的限制开发区。所有的景观结构皆有其独特的发生背景^[6]，自然环境与社会经济影响因子各不相同，使得每个景观单元皆具有自身的资源特性与成因。景观功能网络节点的大小、形状、类型、边界或邻域特征皆会影响物质、能量流动等功能的发挥，除节点本身的功能强度外，空间上的功能联系亦必须加以考虑，整理相关研究，城市与生态功能网络节点具有一定的特征，本文基于其特征选择可空间化及量化的指标(表1)，并由空间中确立各级景观功能网络节点(图3, 4)。

表1 景观功能网络节点特征与评价指标

Tab. 1 Node characteristic and evaluation index of landscape function network

评价指标	城市网络节点	生态网络节点
特征	社会经济活动频率高 格局聚集度高 与其他城市功能节点联系紧密	生态系统服务功能价值高 生态资源维护良好 与其他生态功能节点联系紧密
数量指标	人口密度 人口增长率 金融机构数量 二、三产业比重	环境品质
空间指标	城市斑块聚集度 交通网络密度 对外交通条件	植被覆盖率 绿带及河流廊道连通度

景观功能网络节点具有一定的特征，本文基于其特征选择可空间化及量化的指标(表1)，并由空间中确立各级景观功能网络节点(图3, 4)。

2.4 景观功能空间耗费分析

在功能节点确立的基础上，本研究结合各景观类型对于城市及生态功能传播的阻力及空间特征(包括城市发生概率、平均植被覆盖及年内植被分异)，进行功能耗费系数的修正，进而获得各景观类型的平均功能耗费系数，其中几乎未造成阻碍的视为1，而阻力大到功能无法穿过的赋值为200(表2)。

其中，城市扩展概率模型的因子选取，考虑了与现有城市的发生关系较大的自然环境与景观格局特征，经相关分析后，最终选取距道路远近(dist_road)、距河流远近(dist_river)、高程(con_wx)、坡度(slope_wx)及道路密度(road_dens)等5个因子，经逻辑回归得到的城市扩展概率模型：



图3 台湾乌溪流域城市功能节点及廊道



图4 台湾乌溪流域生态功能节点及廊道

$$CITY = 1 \div (1 + (\exp (3.614 + 1.129 * dist_road + 0.147 * dist_river + 2.085 * con_wx + 0.392 * slope_wx - 0.183 * road_dens))) \quad (1)$$

式中：RMS Error = 0.305 Chi-Square = 445.648

借由上述模型可得空间中各土地利用类型转变为城市的概率，进而将其作为城市功能耗费系数设定的参考。而生态功能的耗费阻力则依据该景观类型的植被覆盖均值。

表 2 景观类型耗费阻力系数

Tab. 2 Cost coefficient of landscape type

景观类型	城市功能 耗费阻力	城市发展概率 (均值, 0-1)	生态功能 耗费阻力	植被覆盖度 (均值, 0-1)
建成区	5	-	200	0.0397
道路	1		100	0.1214
级产业用地	50	0.6135	50	0.6197
河流	100	0.3389	10	0.0125
森林	200	0.0412	1	0.8358

2.5 景观功能网络评价方法

景观功能网络评价主要针对景观功能网络的连接水平以及由此所决定的景观节点间联系的便捷程度。

首先，基于景观功能网络拓扑图，将两节点间直接连接记为 1，两节点间不直接相连记为 0，相应地做出乌溪流域景观功能网络的连接性矩阵 $T^{[21]}$ 。

$$T = (C_{ij})_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

连接性矩阵 T 经过 N 次方后，得到的没有出现 0 的矩阵为最短径道矩阵 T^N 。即矩阵中没有 0 出现，此时的径道数为 N 。节点 i 到节点 j 需要的最短径道数所形成的矩阵为最短径道矩阵。于乌溪流域景观功能网络中，城市功能网络的连接性矩阵经过 6 次方后，得到最短径道矩阵，生态功能网络的连接性矩阵也经过 6 次方后，得到最短径道矩阵。

$$T^N = (S_{ij})_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

而后，通过计算景观功能网络廊道的最小累积耗费距离 U ，构建耗费距离矩阵 D ，用以评价节点间联系强度。相应地做出乌溪流域景观功能网络的耗费距离矩阵。

$$D = (U_{ij})_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

最小累积耗费距离之和乘以最短径道数之和 $\sum_{j=1}^n U_{ij} \times \sum_{j=1}^n S_{ij}$ ，可综合反映了节点 i 在网络中的联系与耗费状况，其值越小，表明节点 i 在网络中的通达性越佳。反之，节点 i 在网络中的通达性越差；矩阵中所有耗费距离之和乘以最短径道数之和，即 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{ij} \times \sum_{i=1}^n$

$\sum_{j=1}^n S_{ij}$ ，反映了整个网络的通达程度与网络完善程度，其值越小，表明整个网络中的通达性越好，网络越完善。

3 景观功能网络构建及其应用

3.1 景观功能网络节点

基于乌溪流域各景观功能节点的功能强度评价，可将其分为 3 等级 (图 3, 4)。城市功能节点分布主要是以台中市为中心向周围扩散，其中以台中市北部及西部为主，一直扩展至台中地区主要出海口梧栖，而越往东部地区，城市节点虽为行政中心，功能强度却不及西部；在生态网络方面，主要以红香地区为中心向外扩散，次级节点以山岭、河谷为主，另外包括海岸带的湿地，三级节点则主要分布于西部外围及城市内部。

3.2 廊道选取

基于廊道的连通度以及功能随着与节点距离增加而衰减的特性，利用最小耗费距离模型，可获得城市与生态功能网络的廊道结构 (图 3, 4)。在城市功能网络中，具廊道主

要是以交通干线为主，由图3可知，处于一、二级的节点，对其他点皆有较多的联系廊道，向西部的廊道则较为单一；在生态网络中，流域东部廊道多位于山岭和河谷等植被较佳的区域，由于河流对于生态功能具有一定的阻碍，廊道则多位于北部，西部则主要沿着台地及丘陵，一直联系至海岸带的湿地。

3.3 景观功能网络评价

整合联系度及耗费度所得的通达性，可同时反映网络节点间的拓扑关系及空间耗费距离。在城市功能网络中，以功能中心台中市的通达性最佳、其次为大里市及乌日乡，其中大里市属二级节点，其他的二级节点丰原市、沙鹿镇、梧栖镇、潭子乡及大雅乡的通达性较差。在生态功能网络中仍以二载山及山坪两个三级生态功能节点通达性最高，而一级及二级生态节点红湘、松岭、北东眼山、顶猴洞山、大尖山、崁顶山、北坑子以及高美湿地通达性均较低。乌溪流域的景观功能网络中以城市功能网络结构较佳，城市节点多环绕于城市功能中心，功能的输出与传递效率较高，但彼此通达性差距较大，需就南投县境内的城市节点的网络结构进行优化。而生态功能网络节点间通达性相对较为一致，只有一级及二级功能节点红香、高美湿地的通达性较差，需就其功能传输路径进行优化或提升二载山及北坑子等通达性较好节点的生态功能强度。

3.4 景观功能网络应用

通过功能节点和廊道的组合，可获得景观功能网络在空间的具体位置与功能等级，及其间相互依存的空间关系。借由城市与生态网络的叠合(图5)可知，城市功能主要聚集在流域西部，网络间的廊道联系较生态网络紧密，与东部联系较为单一，有助于降低对生态系统的冲击；生态网络由于受城市阻隔，东部地区与海岸带的生态用地联系中断。整体而言，乌溪流域的景观功能网络问题在于城市聚集区缺少生态功能节点，不仅阻隔了生态功能的联系，影响物种迁徙、移动，亦使得城市居民缺乏休闲游憩的开放空间，降低城市生活环境品质。因此乌溪流域需就下述功能联系问题点进行格局优化(图5)。

(1) 高美湿地与其他生态节点的联系。高美湿地北邻大甲溪出海口、南接清水大排，面积约300 hm²，约为大肚溪口湿地的1/10，其间的有机质为底栖生物提供了重要的营养来源，间接提供过境候鸟的休息地，并为海岸带居民提供洪水来袭的缓冲区，因此为保护高美湿地功能的健全，除加强其与周边生态节点的联系外，亦需确立其周围缓冲区，以降低人为干扰。

(2) 国姓乡与雾峰、大里及太平等城市节点的联系。国姓乡受地形条件限制，城市发展一直局限于内陆地区，由于其地处流域中心，为加强与东部城市的联系，首先需就国姓乡的交通建设，进行改善。

(3) 雾峰与芬园的城市联系。由于乌溪在此分流为大肚溪及猫罗溪，造成雾峰与彰化芬园的



图5 乌溪流域景观功能网络结构及功能冲突点

空间阻隔,需绕至大里、乌日或转向南部草屯,建议可选择河岸较窄或生态冲突较小的区域建筑桥梁,以加强功能联系。

(4) 中寮与名间的城市联系。中寮乡与名间乡受地形影响,城市间联系不便,交通运输需依赖南投市,是流域内部城市功能联系较低的地区。

(5) 亚哥花园、公老坪及大肚山等主要支持城市网络中心区的生态节点,受潭子及大雅两重要城市功能联系节点影响,功能联系受阻,需加以沟通联系。

4 结论与建议

景观功能网络的构建,可将无形的景观功能流落实于实际的空间中,有助于在强化景观空间联系的格局优化中,同时提升景观的功能。通过景观功能网络的应用,显示研究区的城市结构明显较生态结构更有利于功能的传输,故于未来的生态景观优化上,研究区需要在功能联系出现障碍的区域,适度增加生态用地面积,以强化生态联系提升生态保护功能。

景观功能受景观类型、空间结构及相对距离的影响,产生空间分布上的差异,传统单纯构建廊道进行景观功能联系的方法,往往因为忽略了周边的景观组成及格局特征,而降低了景观功能网络的实际作用。利用耗费距离模型的网络构建模式,可结合各景观类型、景观格局、城市发展概率、生态环境质量等参数,落实景观网络的联系廊道,其最小景观功能耗费的联系路径,可作为景观格局优化策略拟定的参考。

由于本研究针对城市发展对景观的生态功能联系造成妨碍的前提下,将研究区景观类型简化为支持生态功能、城市功能及身处其间的过渡区域。建议后续研究可就其他功能及组成的景观类型进行更详细的划分,并就影响景观功能空间分布差异的相关参数进行修正。

参考文献 (References)

- [1] Naveh Z. What is holistic landscape ecology? a conceptual introduction. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 50: 7-26.
- [2] Chen Bo, Bao Zhiyi. Application of landscape ecology principle of holism to landscape planning and design. *Planners*, 2003, 3(19): 60-63. [陈波, 包志毅. 整体论的景观生态学原则在景观规划设计中的应用. *规划师*, 2003, 3(19): 60-63.]
- [3] Wang Yangli, Zhao Yibin, Han Dang. The spatial structure of landscape eco-systems: concept, indices and case studies. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(3): 235-241. [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, 14(3): 235-241.]
- [4] Wu J, David J L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 2002, 153: 7-26.
- [5] Wu Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000. [邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [6] Xiao Duning, Bu Rencang, Li Xiuzhen. Spatial ecology and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 453-461. [肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453-461.]
- [7] Qi Y, Wu J. Effect of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, 1996, 11: 39-48.
- [8] Antrop M. Background concepts for integrated landscape analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 77: 17-28.
- [9] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming et al. *The Principle and Application of Landscape Ecology*. Beijing: Science Press, 2002. 52-56. [傅伯杰, 陈利顶, 马克明等. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001. 52-56.]
- [10] ESRI. *Arc/Info User's Guide*. 2002.
- [11] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: Willey, 1986. 64-72.
- [12] Collinge S K. Spatial arrangement of habitat patches and corridors: clues from ecological field experiments. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42: 157-168.
- [13] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58: 269-280.
- [14] Chen Cunyou, Liu Houliang, Zhan Shuifang. Power in the world city network. *Foreign Urban Planning*, 2003, 18(2):

- 47-49. [陈存友, 刘厚良, 詹水芳. 世界城市网络作用力. 国外城市规划, 2003, 18(2): 47-49.]
- [15] Miller W, Collins M G, Steiner F R et al. An approach for greenway suitability analysis. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42: 91-105.
- [16] Taylor P J, Walker D R F, Catalano G et al. Diversity and power in the world city network. *Cities*, 2002, 19 (4): 231-241.
- [17] Tjallingii S P. *Ecological Conditions: Strategies and Structures in Environmental Planning*, IBN Scientific Contributions 2. Wageningen, 1996.
- [18] Zong Yueguang. Corridor effects and urban landscape structure. *Urban Environment and Urban Ecology*, 1996, 9(3): 21-25. [宗跃光. 廊道效应与城市景观结构. 城市环境与城市生态, 1996, 9(3): 21-25.]
- [19] Schrijnen P J. Infrastructure networks and red-green patterns in city regions. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 48: 191-204.
- [20] Zhu Yingming, Yu Nianwen. Urban flows in the Hu-Ning-Hang urban compact district. *Urban Planning Forum*, 2002, 137: 31-44. [朱英明, 于念文. 沪宁杭城市密集区城市流研究. 城市规划汇刊, 2002, 137: 31-33.]

Landscape Functions Network Construction and Application in Watershed Scale:

A Case Study on Taiwan Wuxi Watershed

CHANG Hsiao-fei¹, WANG Yanglin^{1,2}, LI Guicai¹, WU Jiansheng¹, LI Zhengguo²

(1. Graduate School of Shenzhen, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : On maintaining ecological balance and promoting economical development, it is necessary to strengthen the spatial relation among the landscape patterns whose functions are similar. The growing awareness of the adverse effects of habitat fragmentation on natural systems has resulted in a rapidly increasing number of actions to reduce current fragmentation of natural systems as well as a growing demand for tools to predict and evaluate the effect of changes in the landscape on connectivity in the natural world.

For promoting and positioning functions of each landscape unit in the whole Taiwan island, systematically studying characteristics of landscape patterns in the research areas, and identifying energy routes of landscape function flows, this study chooses the basic regionalism units as the research areas such as Wuxi watershed to analyze connectivity traits among network nodes with single function as well as spatial interactions of different functional networks based on landscape function network establishment. Then from the aspect of consolidating network configuration to strengthen landscape functions, this study puts forward some strategies to optimize landscape patterns. Through linkage analysis of network nodes, it is found that urban function network structure is better than ecological function network in Wuxi watershed, and most urban function sub-nodes are located around the urban function centers, which can allow landscape functions export and transmit. The connectivity of ecological function nodes is similar, but the first and second level nodes such as Hongxiang and Gaomei wetlands are isolated and less connected, so this study proposes to consolidate function transmitting routes and highlight significance of main transferring nodes like Erzhaishan and Beikengzi aiming at optimizing ecological landscape in Wuxi watershed.

Key words: Landscape functions network; landscape pattern optimization; 'least-cost' modeling; Wuxi watershed of Taiwan