

# Evaluation and Restoration on Landscape Ecological Networks of Dike-Pond System in Zhongshan City

Yan Liu, Meizhen Lin, Bizhen Fang, Di Cai, Shuling Lin

School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Email: lmzh888@163.com

**Abstract:** Six landscape ecological networks of dike-pond system in Zhongshan City have been constructed under three different thresholds based on graph theory and landscape ecology principles in this paper. We use network analysis methods and network structure indices for analyzing network structural characteristics and their evolution in 1988 and 2006. Results show that centroid of dike-pond landscape had moved. Growth of existing landscape corridors is far behind growth of landscape nodes in the number. The overall level of dike-pond landscape connectivity has not been fundamentally improved. Although the existing association between large patches is comparatively close, large numbers of small patches, which urgently need enhancing network stability and restoring degraded habitats, reveal the trend of fragmentation and isolation. A plan for dike-pond landscape ecological networks rehabilitation has been offered in conclusion to enhance regional dike-pond landscape ecosystem service functions in Zhongshan City.

**Keywords:** ecological network restoration; graph theory; dike-pond system; network analysis method

## 中山市基塘系统景观生态网络评价与恢复

刘 妍, 林媚珍\*, 方碧真, 蔡 砥, 林淑玲

广州大学地理科学学院, 广州, 中国, 510006

Email: lmzh888@163.com

**摘 要:** 本文基于图论模型与景观生态学原理, 构建了三种不同阈值下的中山市基塘系统景观生态网络, 运用网络分析法与网络结构指数分析中山市 1988 年至 2006 年的网络结构特征与演变过程。结果表明, 基塘景观质心迁移, 现有的基塘景观廊道增长量远远落后于景观节点的增长量, 研究区域的基塘景观整体连接度水平没有得到根本性的改善, 虽然现有的大型斑块之间联系较为紧密, 然而大量小型斑块走向破碎化和孤岛化, 亟需增强网络稳定性, 恢复退化生境。最后, 提出了中山市基塘景观生态网络恢复方案, 以加强区域基塘景观生态系统服务功能。

**关键词:** 生态网络恢复; 图论模型; 基塘系统; 网络分析法

### 1 引言

珠江三角洲基塘景观是一种具有因地制宜特色的南亚热带基塘农业地理景观。基面与塘面相间、养殖与种植相辅相成的基塘生态系统实现了时空连环配合、水陆交互作用的良性循环与生态平衡, 既能够发展区域农业经济, 又能够维护区域生态环境<sup>[1]</sup>。获得较高的农业产出的同时, 基塘水体与河流、地下水能够保持很好的循环关系, 滨水与低洼处能够得到很好的植被覆盖, 也具有较强水体自净能力与调节水土能力<sup>[2]</sup>。数百年的

发展历史中, 基塘利用方式不断多样化, 除了传统的桑基、蔗基、果基以外, 还产生了花基、菜基、草基、畜基、杂基等多种结构。

中山市是珠江三角洲基塘景观分布的主要区域之一, 然而, 现有的基塘景观生态研究多集中于佛山市尤其是其顺德区、南海区等基塘区域, 对于中山市基塘景观生态以及景观生态网络的研究相对比较缺乏<sup>[3]</sup>。近 20 年来, 随着珠江三角洲地区经济快速发展、城市化过程快速推进, 中山市的农业结构和土地利用方式都发生了巨大的变化, 生态系统承载力遭遇到了新的挑战。基塘系统的生态效益的维持与景观的结构、功能是密切相关

基金项目 国家自然科学基金 (40771002)

的, 本文基于不同阈值构建中山市基塘系统景观生态网络, 评价近 20 年来中山市基塘景观斑块和生态网络的特征与演变过程, 目的是正确认识现有生态网络面临外界冲击的潜在退化风险, 合理提出生态网络恢复方案, 恢复其连接性水平, 实现基塘景观生态服务功能的延续, 对于经济快速发展地区的农业生态系统恢复和区域生态经济健康可持续发展, 具有重要的现实意义。

## 2 研究区域概况

研究区域位于珠江三角洲中部偏南的西江、北江下游出海处, 北接广州市番禺区和佛山市顺德区, 西邻江门市区、新会区和珠海市斗门区, 东南连珠海市区, 东隔珠江口伶仃洋与深圳市和香港特别行政区相望。1988 年, 中山市升为地级市, 行政管辖面积 1800.14km<sup>2</sup>, 介于 22°11'N-22°47'N, 113°09'E-113°46'E 之间 (图 1)。研究区域内平原和滩涂面积广阔, 河道密集而纵横交错, 受到南海海洋潮汐的影响, 具有典型的河口区特色。珠江水系中的磨刀门水道、横门水道、洪奇沥水道经过中山市出海。主要的河道包括鸡鸦水道、小榄水道、横门水道、黄沙沥、黄圃水道、西海水道、岐江河、北台溪、大环河等。

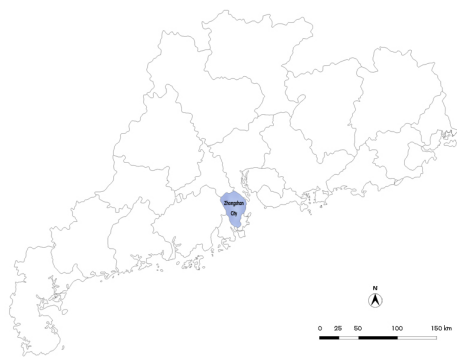


Figure 1. Location of the study area in Guangdong Province  
图 1. 研究区域在广东省的位置

## 3 数据预处理

研究采用的数据分别为中山市 1988 年 11 月 24 日及 2006 年 11 月 10 日的 Landsat-TM 影像 122-44、122-45 各两景; 中山市 1:1 万 DOM 影像数据; 2006 年版广东省地图册。在 ENVI 4.5 软件环境中, 以最近邻重采样类型输出两景影像的镶嵌文件。采用经过“GARMIN 奇遇”手持 GPS 外业测量采点、内业处理精校之后的珠江三角洲 TM 影像作为配准影像, 使用

RST 校正方法和立方卷积重采样方法对研究影像进行几何畸变校正。由于河流三角洲泥沙堆积、填海造陆、围海养殖, 造成陆地边界往海洋方向不断扩展, 因此研究以陆地面积最大的 2006 年影像陆地边界为准, 裁剪出中山市的区域范围。选择各类用地的训练样本, 建立感兴趣区域, 进行最大似然法分类, 精度检验的总精确度和 kappa 指数分别为 81.32%、89.71%和 0.79、0.88。参考中国科学院资源环境信息数据库的土地利用/覆被分类法, 将研究区域土地分为 7 个一级地类, 除了根据中山市土地利用特点而设置的基塘用地地类, 还有耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。

## 4 景观生态网络分析

### 4.1 斑块格局分析

研究区域的基塘用地发生了较为显著的变化 (图 2)。基塘景观的总面积增加了 76.17km<sup>2</sup>, 并不是简单的面积增加, 而是原有的基塘景观类型迁出、其他的景观类型迁入两种作用力共同造成的结果。主要体现在, 中山市西北部原有的大面积的基塘用地转变为建设用地, 沿东北至西南方向横贯中山市中部的原有的大面积耕地转变为基塘用地。

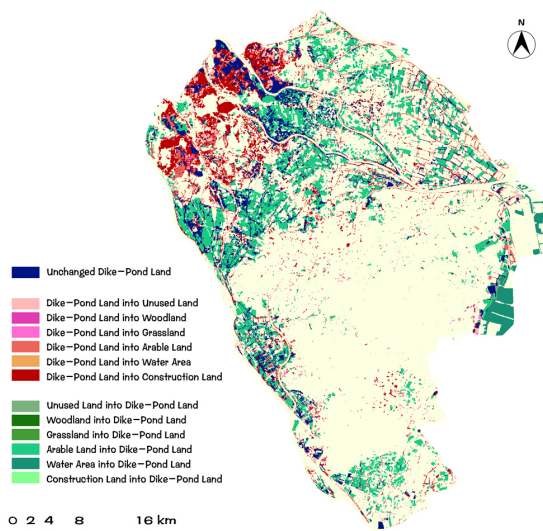


Figure 2. Land use pattern changes on dike-pond land in Zhongshan City between 1988 and 2006  
图 2. 中山市 1988 年-2006 年基塘用地变化

西北部基塘用地转变为建设用地的主要原因是中山市小榄镇的经济转型, 改革开放以前, 种桑养蚕、

种植甘蔗、塘鱼养殖曾经是小榄镇经济的主要支柱。改革开放以后，小榄镇民营经济实力不断壮大，工商业快速发展，建设用地需求猛增，使得基塘用地的几何中心逐渐外推至周边经济相对不如小榄镇的阜沙镇、东升镇、大涌镇、横栏镇等。同时，这一带的耕地转变为基塘用地的主要原因是市场经济条件下农业结构的调整。单纯的耕地经济效益远远低于基塘系统，尤其是塘鱼养殖的经济效益，造成废田改塘的现象。另外，毗邻南海的南朗镇围垦养殖，充分开发滩涂资源，也导致了基塘用地的增加。

#### 4.2 景观生态网络构建

景观生态网络主要包括廊道网络和斑块网络，本文的研究对象以廊道网络为主，廊道网络由节点和连接廊道构成，基于不同阈值水平的景观生态网络连接形态存在差异。在 ArcGIS 9.3 软件环境中，通过分析 1988 年的 5487 个基塘斑块和 2006 年的 2726 个基塘斑块的面积分布区间，选择 20hm<sup>2</sup>、50hm<sup>2</sup>、90hm<sup>2</sup> 为阈值，提取出中山市主要基塘用地分布图（图 3）。



Figure 3. Distribution of dike-pond land in Zhongshan City under three different threshold

图 3. 中山市主要基塘用地分布

利用 ArcGIS 分析功能，将中山市面积大于 20hm<sup>2</sup> 的基塘用地抽象成为节点，分别得到 1988 年的基塘景观节点 160 点，2006 年的基塘景观节点 190 点；将中山市面积大于 50hm<sup>2</sup> 的基塘用地抽象成为节点，分别得到 1988 年的基塘景观节点 58 点，2006 年的基塘景观节点 101 点；将中山市面积大于 90hm<sup>2</sup> 的基塘用地抽象成为节点，分别得到 1988 年的基塘景观节点 30

点，2006 年的基塘景观节点 61 点。将连接节点之间的带状基塘斑块以及部分与基塘用地紧密结合的水域抽象成为廊道<sup>[4]</sup>，整合生成 1998 年和 2006 年的中山市的基塘景观生态网络图（图 4）。



Figure 4. Dike-pond landscape ecological networks of Zhongshan City under different thresholds

图 4. 中山市基塘景观生态网络

#### 4.3 生态网络结构分析

对比 1988 年和 2006 年的节点数与廊道数(图 5)，可以看出，2006 年的节点数量相比 1988 年的节点数量有较大的增长，面积较小的斑块所抽象产生的节点数量增长较为明显。然而，廊道数量的增长并没有达到与之相应的水平。尤其是取较低阈值的情况下，1988 年的廊道数量是高于节点数量的，2006 年的节点数量却大幅超过了廊道数量。

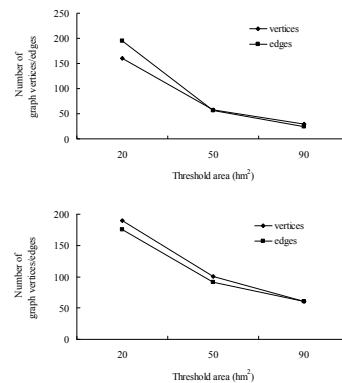


Figure 5. Comparison between corridor numbers and node numbers under increasing thresholds in 1988 and 2006

图 5. 1988 年-2006 年节点数与廊道数对比

环路是能够提供给生态流的可选的环线，生态网络中环路存在的程度可以用  $\alpha$  指数来测度，又称环路度，描述的是实际环路数与网络中存在的最大可能环路数之比。 $\alpha$  指数的值的范围在 0 至 1 之间， $\alpha=0$  时，网络无环路， $\alpha=1$  时，网络具有最大可能的环路数。 $\beta$  指数指网络中每个节点的平均廊道数，能够度量节点与其余节点联系的难易程度。 $\beta<1$  时，形成树状格局， $\beta=1$  时，形成单一回路， $\beta>1$  时，能够呈现更为复杂的连接度水平。 $\gamma$  指数表示网络中现有连接廊道数与最大可能连接廊道数之比。 $\gamma$  指数的值的范围在 0 至 1 之间， $\gamma=0$  时，节点之间不相连， $\gamma=1$  时，每个节点都彼此相连，网络近似于最大平面网络， $\gamma$  接近 1/3 时，网络呈树枝状形态<sup>[5]</sup>。由此可以得到生态网络连接度水平的指数评价结果（表 1）。

**Table 1. Index evaluation results to ecological network connectivity**  
**表 1. 生态网络连接度指数评价结果**

T (hm <sup>2</sup> )	Year	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
20	1988	0.130	1.219	0.411
	2006	0.048	0.921	0.310
50	1988	0.036	0.983	0.339
	2006	0.071	0.901	0.306
90	1988	0.018	0.833	0.298
	2006	0.085	1.000	0.345

基于 Cantwell 与 Forman 所提出的 8 种景观生态网络图论模式<sup>[6]</sup>，可以看出，1988 年的基塘景观生态网络主要为若干项链状模式的组合，网络较为连贯，零散节点较少。取较高的阈值时，呈现出几处相互独立的项链状，取较低的阈值时，研究区域北部的链与链之间能够在一定程度上闭合成为网状，南部依然呈现出项链状。2006 年的基塘景观生态网络主要为蜘蛛状模式、枝状模式与项链状模式的组合，研究区域南部的基塘景观形态已经显现出了刚性多边形模式的雏形。阈值较低的情况下，网络较为破碎，存在大量零散节点。

三种阈值下的 1988 年和 2006 年的  $\alpha$  指数值的差异非常显著。对于 1988 年的景观生态网络而言，随着阈值沿着 20hm<sup>2</sup>、50hm<sup>2</sup> 上升到 90hm<sup>2</sup>， $\alpha$  指数值不断下降，越来越小；相反，对于 2006 年的景观生态网络而言，随着阈值沿着 20hm<sup>2</sup>、50hm<sup>2</sup> 上升到 90hm<sup>2</sup>， $\alpha$  指数值却不断上升，越来越大。说明中山市 1988 年的基塘分布格局中，小斑块与小斑块之间、小斑块与大斑块之间生态流的联系较为复杂紧密，而大斑块与大斑块之间则较为独立，形成各自分散的体系；2006 年

的基塘分布格局中，小斑块与小斑块之间普遍缺乏联系，形态较为零散，大斑块与大斑块之间的联系水平显得比较高。然而，所有的  $\alpha$  指数值相对于理想状态的取值都存在着很大的差距，反映了中山市基塘景观生态网络中环路数量比较不足，不利于各种生态过程的发生<sup>[7]</sup>。1988 年和 2006 年在三种阈值下的  $\beta$  指数值基本在  $\beta=1$  左右浮动，说明网络中的节点与节点之间虽然具备一定的连接度水平，但是其强度较为一般。所有的  $\gamma$  指数取值大致在  $\gamma=1/3$  左右浮动，取较低的阈值时，1988 年的  $\gamma$  指数值略高于 2006 年的  $\gamma$  指数值，其中包含了 2006 年的景观生态网络中零散节点过多的原因，也能够印证 1988 年的小斑块与小斑块之间相对较好的连接水平。

## 5 结论与讨论

### 5.1 生态网络评价

可以看出，经过了近 20 年的演变，中山市现有的基塘景观格局与原有的基塘景观格局之间产生了明显的差异。

斑块格局方面，经济效益驱动下的废田改塘与围垦养殖，导致大量耕地与部分滩涂地变更为基塘用地，这是基塘用地面积增加的原因。同时，原有的基塘用地遭受到新的建设用地的不断蚕食，造成基塘景观质心的迁移，尤其是研究区域西北部的建设用地随时有可能继续扩张，同化周围的基塘用地范围。在这个过程中，产生了大量破碎、孤立的小型斑块，景观生态学相连小斑块原理表明，连接在廊道网络上的小斑块或者节点比面积相同却远离网络的小斑块或者节点具有较高的丰富度和较低的绝灭率<sup>[8]</sup>，如果不加以修复，这些小型斑块逐渐缩减直至濒临消亡的风险度会越来越高，其生态效益和生态价值则会越来越低。因此，为了达到区域景观生态安全与城镇的可持续发展，迫切需要遏制基塘生态资源走向孤岛化和碎裂化的分布格局，提高其抗干扰性，避免生态资源的退化。

网络格局方面，现有的基塘景观廊道增长水平和景观节点的增长水平是不相匹配的，廊道增长水平远远落后于节点的增长水平。不同阈值下  $\alpha$  指数、 $\beta$  指数和  $\gamma$  指数值表明，近 20 年来，研究区域的基塘景观整体连接度水平没有得到根本性的改善。2006 年的较大的斑块的连接度水平好于较小的斑块，与 1988 年的情况相反，原因在于 2006 年的较大的基塘景观斑块主要是在人为的废田改塘过程中重新形成的，并不完全

是原有的大型基塘景观斑块的延续，于是能够形成较为规整的形态与规模效应，而 2006 年的较小的基塘景观斑块的分散格局主要是原有的大型斑块或者其边缘破碎化，加上原有的小型斑块受到其他景观的干扰丧失联系所造成的。总体来说，研究区域的基塘景观生态网络存在一定的不连续性，环路数量依旧比较不足，连接强度依旧比较一般，现有的生态网络格局甚至在较小的尺度下呈现出退化的过程，生态网络功能和生态流的迁移效率亟需得到恢复和改善。

### 5.2 生态网络修复

景观生态系统的格局能够在很大程度上控制其生态功能的特性和发挥，因此，综合上述分析的结果，基于景观生态学原理，在原有的网络格局基础上提出中山市基塘景观生态网络初步恢复方案（图 6）。方案旨在以最小的改动步骤最大限度地实现研究区域内基塘生态网络的结构性连接，提高基塘斑块之间的联系水平，增加部分生态廊道，并且使基塘生态网络与研究区域的各条自然水道结合起来，有利于促进生态网络中的迁移与扩散作用，恢复退化生境，增强稳定性，增强抗干扰的能力。从而更加有效地保护基塘生态系统多样性，增进区域健康可持续发展潜力。

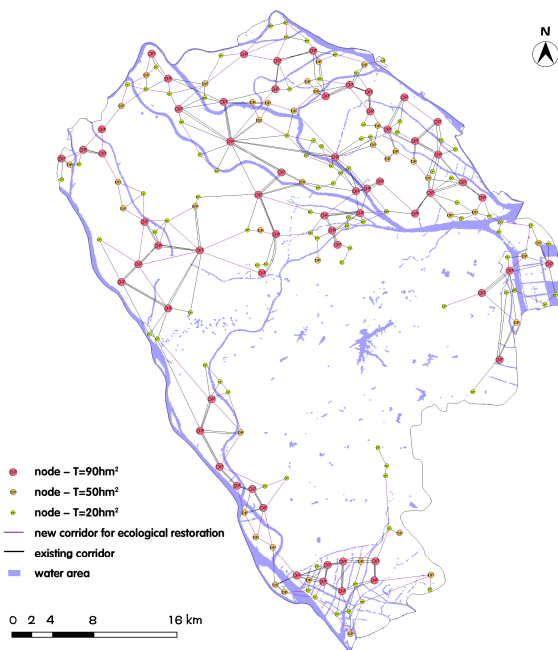


Figure 6. Ecological restoration of dike-pond landscape ecological networks in Zhongshan City  
图 6. 中山市基塘景观生态网络修复方案

### 5.3 讨论

通过网络分析法，借助图论模型，将基塘景观要素从复杂的斑块组群状态抽象成为由节点和廊道组成的景观生态网络模型，进行定量评价，有助于在分析基塘景观斑块面积变化的基础上，从无序斑块的景观镶嵌体中抽丝剥茧，进一步探究基塘景观生态网络的生态结构，发现其潜在的有意义的规律性，从而指导基塘生态网络的恢复与优化问题。

本文在基塘景观生态网络的构建过程中，景观节点与生态廊道是基于斑块质心与欧几里得距离模型抽象得出的<sup>[9]</sup>，而不是基于斑块边缘点与耗费距离模型。因此，主要侧重于评价廊道与节点之间的连接性水平，未能准确量化廊道长度的影响。如果能够再加入斑块边缘点与耗费距离模型作为对比，定量分析廊道的长度和宽度取不同阈值时景观生态网络结构的特性及其变化，或许可以更加贴近研究区域的基塘生态系统在自然条件下的真实状态。这些都是需要在今后的研究中更加全面地纳入考虑的部分。

### References (参考文献)

- [1] He Zh J, Guan L J, Kang Q, Wang X L, Wang Ch Y. Sustainable development of mulberry-dike and fish-pond farming in Pearl River Delta by remote-sensing technology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1998, 37 Suppl (2), P64-69 (Ch).
- [2] Han X L, Yu K J, Li D H, Wang S S. Building the landscape security pattern of dike-pond system with urban functions - A case of Magang Part of Shunde District, Foshan City[J]. Areal Research and Development, 2008, 27(5), P107-110+128 (Ch).
- [3] Wang X L, Kang Q. Application of TM image in investigating changes of dike-pond land on the Pearl River Delta - Samples as Shunde, Nanhai dike-pond region[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1997, (3), P8-14 (Ch).
- [4] Kong F H, Yin H W. Developing green space ecological networks in Jinan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4), P1711-1719 (Ch).
- [5] Wang H Zh, Zhang L Q. A GIS, landscape pattern and network analysis based planning of ecological networks for Xiamen Island[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(1), P144-152 (Ch).
- [6] Canewell M D, Forman R T T. Landscape graphs: Ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes[J]. Landscape Ecology, 1993, 8(4), P239-255.
- [7] Urban D L, Minor E S, Treml E A, Schick R S. Graph models of habitat mosaics[J]. Ecology Letters, 2009, (12), P260-273.
- [8] Wu J G. Landscape Ecology - Pattern, Process, Scale and Hierarchy[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [9] Bunn A G, Urban D L, Keitt T H. Landscape connectivity: A conservation application of graph theory[J]. Journal of Environmental Management, 2000, (59), P265-278.