

基于遥感的珠海市景观变化梯度分异研究*

杨一鹏¹, 孙皓铭², 郭 砾², 丁 超³

- (1. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094;
2. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081;
3. 北京大学城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 以珠海市为研究对象, 以遥感影像、野外调查和统计资料为数据源, 在 ArcGIS 支持下, 建立以城市中心区为起点的 17 个辐射状环带, 并在主城区设置不同方向的两个空间样带, 结合景观格局指数和空间梯度分析方法, 分析了珠海市全区与主城区空间格局总体特征、景观空间梯度变化规律, 分析城市化效应。结果表明, 近 15 年来城乡建设用地、道路和林地的面积均呈增加趋势, 农田、裸地, 水体、灌丛和滩涂等类型面积减小, 证明了城市化效应的扩大; 随着空间样带由中心城区向外围移动, 各景观类型随梯度带的变化较为复杂, 特别是城区的两个样带上建设用地面积均逐渐下降, 农田面积上升, 表明了城市化的梯度性和方向性; 受自然和人为因素影响, 样带的时空梯度差异较大。15 年来珠海城市主城区扩展至中心城区向西北方向 10 km 和向西南方向 12 km 的范围内。通过研究区景观时空梯度分异特征的分析, 能够量化研究城市化梯度的扩展及城市结构的变化, 对于城市的管理、资源的恢复与保护工作具有重要意义。

关键词: 遥感; 景观变化; 梯度分析; 空间异质性; 城市化

中图分类号: F901 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2013) 01-0123-07

Study on Gradient Variation of Landscape Change in Zhuhai City Based on RS

YANG Yipeng¹, SUN Haoming², GUO Luo², DING Chao³

- (1. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China
2. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China
3. SUPD, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: Based on the RS images, survey and statistic data of the study area, 17 radiatively circular bands and 2 spatial samples were built starting from central area with the support of GIS. The spatial pattern, variation of landscape gradient and urbanization effect were analyzed by using landscape pattern indexes with remote sensing images and spatial gradient statistical analysis. The results indicated that landscape structure complexity and fragmentation in Zhuhai urban area gradually increased. The area of urban building, road and forest increased obviously, while the area of farm, bare land, water, shrub and beaches decreased. The change of landscape pattern showed that urbanization effect enlarged. With the movement of spatial sample from centre to urban fringe, the area of farm increased and urban building decreased gradually. The gradient directions of urbanization were obvious. Natural environment and human disturbance influenced the temporal and spatial landscape patterns. During the past 15 years, the urban area of Zhuhai has extended 10 km to the northwest and 12 km to the southwest. With the study of spatial gradient, we can quantitatively analyse urban gradient expansion and structure change. The research is

* 收稿日期: 2012-03-12

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项先期攻关项目 (E0203/1112-06), 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B08044)

作者简介: 杨一鹏 (1974 年生), 博士, 高级工程师; 通讯作者: 郭砾; E-mail: guoluo2010@163.com

significant for urban planning and resources protection.

Key words: remote sensing; landscape change; gradient analysis; special heterogeneity; urbanization

景观空间结构是大小和形状各异的景观要素在空间上的排列,它是景观异质性的重要表现,又是各种生态过程在不同尺度上相互作用的结果。景观组分的时空异质性、时空相关性、规律性制约和影响景观中生态系统正常运转的能量流动、物质循环等各种生态过程^[1-3]。城市是受人类活动干扰最为剧烈的生态系统,它的发展是人类社会的必然趋势^[4-5]。区域城市化是城市扩展的影响过程,其实质是区域自然生态系统和农业生态系统向城市生态系统不断转化的过程。这一过程在快速城市化条件下导致城市景观结构剧烈变化,地表生态环境容量下降^[6],城市景观组分在不同水平下发生剧烈变化。不同景观组分之间复杂的相互作用除受城市建设用地扩张的影响外,还受自然资源环境条件、区域生产经营、生态保护和生态环境容纳量等因素的综合制约^[7-9]。

城市化是影响生物多样性和人类生活的最明显的土地转化形式,推动了城市形态的形成及其快速演化。城市化过程中城市活动的复杂性和多变性引发了土地资源的剧烈变动,导致了景观破碎度增加、生态功能下降、土地资源短缺等一系列问题,因此,理解城市化所带来的景观空间特征的变动,掌握城市景观格局及其动态变化规律对于促进城市的可持续发展、进行土地利用规划和建立安全的城市生态格局等应用和研究越来越重要^[10-13]。在城市生态学中,把空间格局和生态过程联系起来,理解两者之间的关系以及城市化所带来的生态后果,成为研究的重要目标和内容。基于景观指数的梯度分析法能够对同一城市不同时期的土地或景观动态变化定量分析,是将格局和过程联系起来分析的基础,国内外的学者也进行了大量的研究^[14-18]。从景观生态学来看,城市是人地关系相互作用形成的最高地域生态系统,是目前受人类活动干扰最为剧烈的生态系统,它的发展是人类社会的必然趋势^[19-20]。城市景观结构的主要特征主要表现为景观高度破碎,道路廊道纵横交错。同时,城市也是一个复杂的动态的大系统,它内容相当广泛,不仅包括生产、消费、流通等空间现象和空间过程,也包括造成空间现象的非空间过程。城市化无论在全球、区域及地方尺度都是对环境造成巨大影响的人类活动之一。

本文以珠海市城区为研究区,以 1995, 1999,

2005 和 2010 年 4 个时期的遥感影像分类图为数据源,通过对以城市中心区为起点 17 条环状梯度带和两条不同方向空间样带的梯度移动计算,分析珠海市城区由中心向外围的扩展中景观的梯度变化性和方向性以及珠海城区的城市形态特征和城市化效应,研究珠海主城区景观时空特征的梯度变化,对于合理规范城市的发展,综合考虑区域发展和生态保护,确保城市发展整体规划建设的整体性和可持续性都有重要的理论和现实意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

珠海市位于广东省南部,珠江口西岸,北纬 21°48' - 22°27'、东经 113°03' - 114°19' 之间,下辖香洲、斗门、金湾 3 个行政区,共 15 个镇和 8 个街道,总面积 7653 km²,其中陆地面积 1687 km²。濒临南海,东与香港水路相通,南与澳门陆地相连,西邻新会市、江门市,北与中山市接壤,距广州 140 km。依山傍海,海上岛屿星罗棋布,有大小近海与远海岛屿 144 个,有“百岛之城”的美称。珠海市的主城区位于香洲区,总面积 252 km²,辖狮山街、梅华街、翠香街、吉大街、前山街、拱北街、香湾街、湾仔街、唐家湾镇和南屏镇等 10 个镇级行政单位,狮山街是珠海市政府驻地,梅华街是香洲区行政中心,构成的中心城区是珠海市的经济、文化和政治中心。属亚热带海洋气候,温暖湿润,森林以常绿季雨林和季风性常绿阔叶林为主,地势自西北向东南倾斜,地貌主要为低山丘陵,将军山系坐落于主城区南部,凤凰山、南山和蜈蚣山等山体分布于主城区北部。珠海市东、南两面濒临南海,其气候特点是温暖湿润,是降水资源和热量资源都较丰富的区域。

1.2 数据来源与提取

本研究采用的资料主要包括:珠海市统计年鉴,数字地形图、1995 年 10 月,1999 年 11 月,2005 年 1 月 Landsat-TM/ETM 影像以及 2010 年 12 月 Quick Bird 高分辨率遥感影像。为了获得准确的遥感解译训练区信息,于 2009 年 10 月和 2011 年 3-4 月结合实地 GPS 定位,进行了两次野外调查。利用 Erdas8.6 进行了图像预处理(辐射校正,几何纠正,图幅裁剪和重采样),为增加反映城市化进程的元素,减少划分过细带来的数据冗余和细节

干扰，以自然属性的相似性和人为利用方式下的趋同性为原则确定了以下 8 种景观类型：城建用地（包括城镇用地、乡村居民点和工业用地等），林地，裸地，水体（包括湖泊、池塘、河流、水库），农田，道路，灌草丛和滩涂。遥感图像的分类结果已进行精度检验。

1.3 梯度分析的方法

1.3.1 梯度缓冲区的建立 本文采用梯度分析与景观指数相结合的方法，以城区中心为辐射原点，向外辐射建立梯度带，研究城市景观格局由市中心向城市边缘的变化规律。以珠海中心城区（狮山街、翠香街和梅华街）为中心建立第一个梯度环，建立多环缓冲区功能，以第一个梯度环为基准，以 3 km 为间隔，向外扩展共生成 17 个梯度环，由中心向外，分别为第 1, 2……17 梯度带，梯度环带在研究区的分布见图 1。

1.3.2 空间样带的建立 根据主城区的形状特征，在西北（NW）和西南（SW）两个方向上选取 5km 宽的样带，移动窗口为 5 km 的正方形，以中心城区为起点（零点），以 1 km 为移动步长向两个方向移动，得到一系列样方（样带见图 2）。以 1 km 为步长进行滑动的计算方法类似于时间序列的平均移动，用分割窗口沿着所选样带移动，计算每个窗口内的景观指数，利用相关格局指数的空间变化规律分析研究区的景观结构特征和由中心城区向外围的景观特征梯度变化规律。

本文选取景观类型百分比（PLAND）、斑块密度（PD）、平均斑块面积（AREA_MN）、最大斑块指数（LPI）、形状指数（SHAPE_AM）和多样性指数（SHDI）来进行空间梯度变化的计算。

2 结果与分析

2.1 珠海市景观格局环状梯度带变化的分析

2.1.1 景观类型变化的梯度带分析 珠海市景观类型的面积百分比随梯度带的变化规律较为复杂，15 年来全区农田、林地、灌草丛和城乡建设用地四个景观类型的面积相对较大，其变化特征显示出梯度差异。随着时间的变化，城市扩展反映在景观类型的梯度变化上的差异更加明显，2010 年景观类型的梯度变化具有代表性（见图 3）。受珠海市边界形状的影响，梯度带的面积变化规律不明显，第 1-6 梯度带面积较小，第 6 带后大幅度增加，在第 12 带处达到最大值，12 带以后梯度带面积逐渐减小。第 1-3 梯度带位于中心城区，城乡建设用地比例最大，成为梯度带中的优势景观，随着远

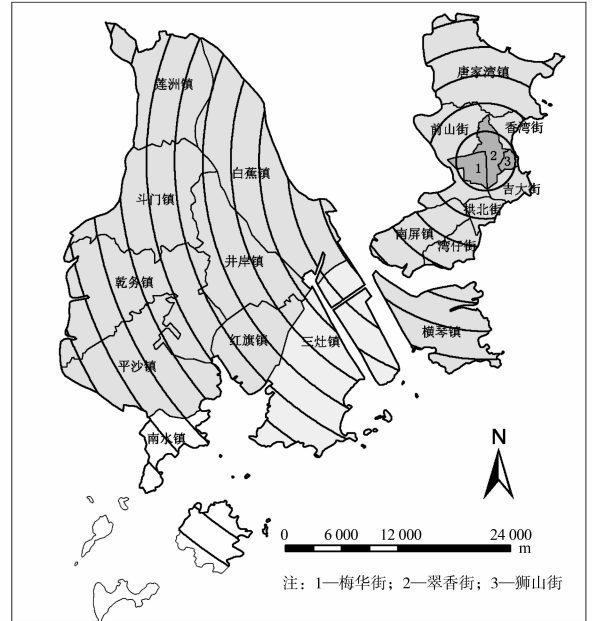


图 1 珠海市梯度带设置示意图

Fig. 1 The radiant fan transects in Zhuhai city

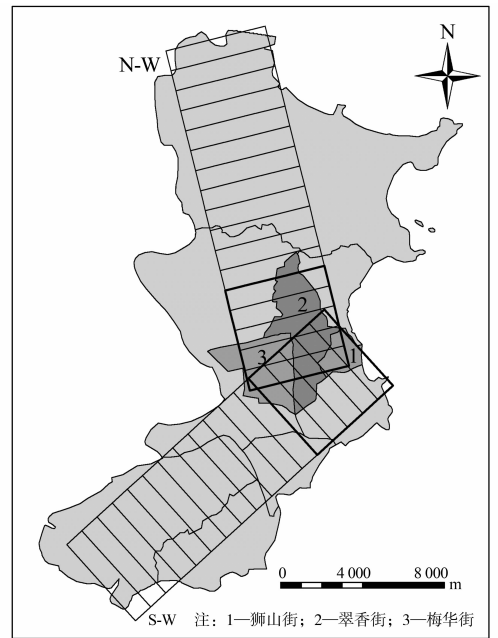


图 2 珠海市城区样带设置示意图

Fig. 2 The spatial samples in Zhuhai urban area

离市中心呈逐渐下降的趋势，在第 9 带又出现一个小峰值，因为斗门区和金湾区行政中心都分布在此处；农田面积在前 8 个梯度带内增幅度较大，8-16 带呈小幅度波动变化，第 15-16 带中农田面积最大，占主导地位，在第 17 带，由于梯度带穿过南水镇的岛屿林带致使农田比例低于林地；林地在 1-5 带因穿过唐家湾镇和主城区南面的大面积林带而成为仅次于城市用地的优势景观类型，在第 8

带中面积比例最少；灌草丛的面积随着城区距离的加大而增大，由于周围小镇的发展建设，其面积在第 6 带处下降，之后逐渐增加；水体受自然分布的影响，在第 8 带处穿过大片河口水域，面积比值最大；裸地、道路比例较低，比例分布差距较为缓和，滩涂是因海河产生的景观类型，分布聚集，仅在第 8、9 带中有大量分布。

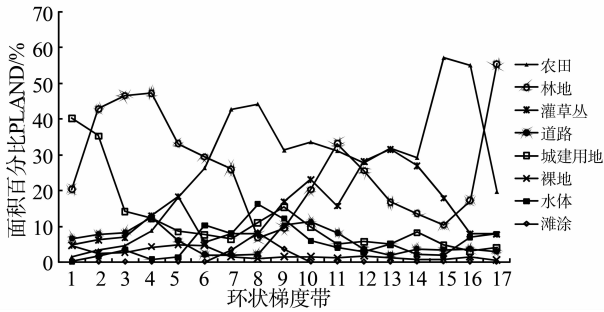


图 3 2010 年景观类型面积百分比的梯度变化
Fig. 3 The gradient changes of landscape type acreage ratio in 2010

2.1.2 景观格局变化的梯度带分析 1995 - 2010 年景观指数沿梯度带的分异特征变化曲线见图 4，从第 1 梯度带的中心城区向外一直延伸到第 5 梯度带，斑块密度均呈上升趋势，平均斑块面积呈下降趋势，第 1 - 5 梯度带位于主城区香洲区内，斑块密度的上升与城市化的集聚化有密切关系，在中心城区即第 1 带，城乡建设景观面积很大，为主导景观，随着到中心城区距离的增大，各景观类型混杂，人工斑块多且面积较小，使斑块密度增大，破碎化程度增大。第 5 - 7 带斑块密度下降，平均斑块面积上升，第 9 - 14 带，斑块密度和平均斑块面积的变化均较为稳定。由此可推断出第 6 - 8 梯度带为城市景观破碎度下降的过渡带。四个时期相比，1 - 14 梯度带变化趋势基本一致。第 14 - 17 带主要位于平沙镇和乾务镇内，1995 年两镇经济发展较弱，城镇建设用地等类型较为分散，以农田为主，1999 - 2005 年，农田和灌草丛大量减少，裸地、道路建设用地增加，斑块破碎，2010 年，建设用地开始集中，裸地减少。景观聚集度指数在

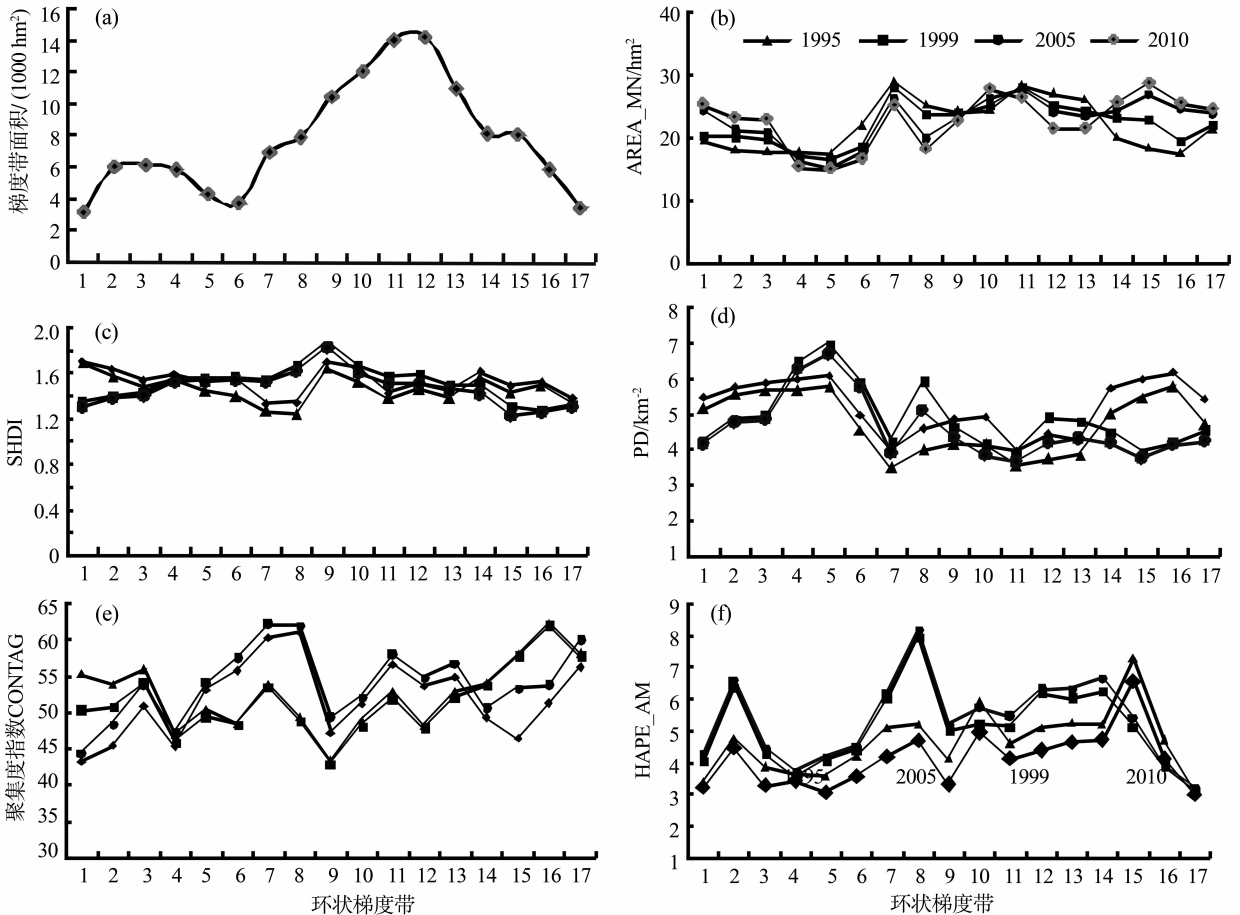


图 4 景观指数沿梯度带的分异特征变化曲线 (1995, 1999, 2005, 2010 年)

Fig. 4 The change curve of landscape index variation along gradient zones in 1995, 1999, 2005, and 2010

四个时期的变化趋势基本一致，因为第 4 梯度带林地面积较大，且 15 年来变化较小，所以景观聚集度也较低，没有明显波动。

1995 - 2010 年的形状指数在第 2 和第 8 带存在明显的峰值，指数变化基本为上升趋势，至 15 带以后逐渐下降。1995 年和 2010 年景观多样性指数在 1 - 8 带呈上升趋势，而 1999 年和 2005 年景观多样性指数在 1 - 8 带呈上升趋势，是由于 1999 和 2005 年是珠海城市化的快速发展阶段，城市景观类型变化大，而 1995 城市化没有大范围进行，2010 城市发展相对稳定，造成不同时期在空间上的差异。

2.2 珠海市城区样带梯度变化的分析

2.2.1 西北方向 (NW) 样带景观格局的梯度变化
西北样带景观指数沿方向梯度分异特征变化曲线见图 5，四个时期的多样性指数随着远离中心城区，总体上呈先下降后上升再下降的“U”型趋势，波谷在移动窗口距中心城区 4 km 处。在距中心城区 4 km 以内，斑块密度增加，平均斑块减小，与整体景观类型的斑块密度变化规律相同，因为样带在距中心城区 3 ~ 8 km 处横穿一个植被带，植被带面积较大，距中心城区 4 和 5 km 的样方几乎位于整个植被带内，窗口向外围移动时，逐渐跨入林带，使斑块减少，斑块形状更加规则，不同景观类型面积比例失调，景观多样性下降；4 km 以后，逐渐离开林带，斑块数增加，形状指数增大，各景观类型面积比逐渐均匀，景观多样性增加，距中心

城区 10 km 处斑块密度最大，斑块的边缘形状也最复杂，此处林地面积较小，不同景观类型面积较均匀，不同景观类型的斑块小而分散。在时间维度上，多样性增大，原因在于林地和城乡建设用面积的增大，在移动窗口距中心城区 10 km 以内，斑块数总体上减少，多样性下降，在距市中心 6 km 以外，随着离中心城区距离的加大斑块的形状越复杂，这一特征 2010 比 1995 更明显。

2.2.2 西南方向 (SW) 样带景观格局的梯度变化

西南样带的景观形状指数和多样性指数变化趋势相同，均呈先上升后下降，再略微上升的倒“U”型趋势（图 5）。由于林地和城市建设用地面积下降，道路、灌草丛、农田等斑块数量增加所致，斑块密度在距中心城区 4 ~ 5 km 的移动样方中达到最大值，形状指数也达到最高峰值，斑块形状最复杂。在移动窗口距中心城区 6 ~ 8 km 处，道路、农田、灌草丛、裸地和水体等景观类型形成镶嵌格局，不同斑块类型的面积差异较小，多样性最大。移动窗口距中心城区 10 km 以外，景观的斑块数量、斑块形状和多样性变化较小。

2.2.3 不同方向空间样带梯度变化的差异
在同一起点、不同方向的两个样带上，农田和城乡建设用地两个受人类干扰较强的景观类型梯度变化具有相似之处，由中心城区向外围，整体上，农田面积逐渐增大，城乡建设用地面积减小，证明了城市形态中心的位置；在时间维上，四个时期相比较，城乡建设用地不断向外围扩展，面积增大，农田、水

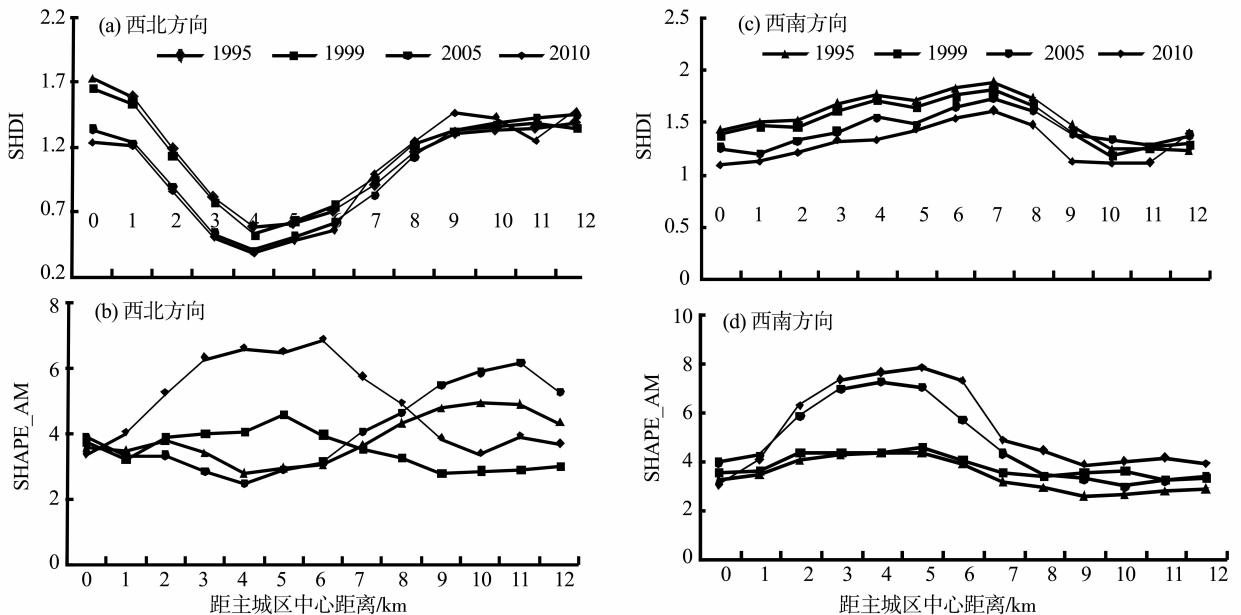


图 5 西北与西南样带景观指数沿方向梯度分异特征变化曲线 (1995, 1999, 2005, 2010 年)

Fig. 5 The change curve of landscape index variation along gradient in two spatial samples in 1995, 1999, 2005 and 2010

体面积下降、斑块变小, 表明了城市建设过程中所带来的城市化效应和城市扩展的方向特征。以城乡建设用地的优势范围可以判定 1995 年的中心位置位于中心城区向西北方向 5 km 和向西南方向 11 km 的范围内, 1999 年向西北方向扩展到 6 km 范围内, 2005 年则扩展至西北方向 7 km 和向西南方向 12 km 的范围内, 2010 年扩展至西北方向 10 km。

两个空间样带相比较, 林地、灌草丛、道路与水体的梯度变化差异最大。在两个样带中林地面积变化相反, 西北样带穿过凤凰山、小南山、蜈蚣山、珠海植物园等植被带, 由于珠海市对森林保护力度较大, 植被带受人为破坏较少, 植被面积在移动窗口距中心城区 3~6 km 处高达 80%, 城乡建设用地的变化梯度曲线呈先下降后上升的趋势, 也间接影响了对城市化发展方向的判定。同样, 西南样带在最南端穿过将军山系植被带。因此, 林地的分布对其它景观类型的梯度变化影响非常明显。

3 讨论与结论

1) 根据景观格局的梯度变化特点, 可以把珠海景观分为 4 类区域: ① 城市景观区, 包括 1-3 带, 城市建设景观成为优势景观; ② 过渡带, 包括 3-7 带, 11-13 带, 位于中心城区与次中心城区之间, 林地和农田较多; ③ 次中心城区, 包括 9-10 带和 14 带, 城市建设景观较多, 农田、林地和灌草丛等各景观类型面积差异在此处较为均匀, 景观多样性较高; ④ 农业景观, 包括第 7-8 带, 15-16 带, 第 7-8 带与河口相接, 农田和滩涂景观面积较大, 15-16 带远离城镇景观, 农田比例增加。因 17 带大部分位于南水镇的岛屿上, 与陆地相隔, 林地较高, 不列入分类中。

2) 由中心城区向外围, 四个时期的多样性指数在 NW 样带上呈先下降后上升再下降的“U”型趋势, 波谷在移动窗口距中心城区 4 km 处, 距中心城区 4 km 的样方斑块最少, 斑块形状最简单, 多样性最低, 在移动窗口距中心城区 10~11 km 处斑块最多, 斑块形状最复杂, 不同景观类型的面积差距最小, 多样性最大; 四个时期的多样性指数在 SW 样带上先上升后下降, 中心城区 4~5 km 处的样方斑块最多, 斑块形状最复杂, 在移动窗口距中心城区 7 km 处不同景观类型的面积差距最小, 多样性最大。1995-2010 年间, N-W 样带上, 由中心城区向外围, 林地面积先上升后下降, 而其它景观类型相反, 在移动窗口距中心城区 4 km 处林地面积和平均斑块面积最大, 其它景观类型面积最

小, 斑块密度和平均斑块面积较小; SW 样带上, 城乡建设用地在移动窗口距中心城区 6 km 内面积比始终最大, 成为优势景观类型, 距 5 km 以外向外围逐渐下降, 农田面积逐渐增大, 裸地面积变化不明显, 林地面积变化呈“U”型, 灌草丛、道路和水面呈倒“U”型。

3) 在以中心城区为起点的两个不同方向样带上, 城市景观空间特征的梯度变化规律在景观类型和景观水平上都表现相异, 同时也存在相同点, 即由中心城区向外围, 整体上农田面积逐渐增大, 城乡建设用地减小。在两个方向上, 景观格局的梯度变化都是主要受林地和城乡建设用地这两个优势景观类型分布的影响, 如植被带在西北方向上位于样带的中间位置, 在西南方向上则位于样带的南端, 城乡建设用地主要集中于城市形态中心, 向外围逐渐减少。主城区景观类型的空间分布和动态变化受自然驱动因子和人为因素的影响。两样带相比较, 林地、灌草丛、道路与水体梯度变化差异最大。

4) 15 年来, 珠海主城区景观空间特征的变化反映了城市化效应, 四个时期相比, 林地、城乡建设用地和道路面积增加, 城乡建设用地由 13% 增加到 33.7%, 成为第二大景观, 平均斑块面积减小, 斑块密度增加, 破碎程度明显上升; 农田减少了 1 532 hm², 减少面积最大。城乡建设用地面积和破碎程度的加深, 道路的增加以及农田的减少, 是城市发展的表现, 体现了城市化效应。

参考文献:

- [1] FORMAN R T T, GODRON M. Patches and structural components for landscape ecology[J]. *Bioscience*, 1981, 31:733-740.
- [2] BASKENT E Z, JORDAN G A. Characterizing spatial structure of forest landscape[J]. *Canada Journal Forest Ecology and Management*, 2001, 147:55-65.
- [3] 臧淑英, 黄樨, 郑树峰. 资源型城市土地利用变化的景观过程响应——以黑龙江省大庆市为例[J]. *生态学报*, 2005, 25(7):1699-1706.
- [4] 李晓文, 方创琳. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(3):280-290.
- [5] TORRY B. We need more research on the impact of rapid urban growth[M]. *Chron Higher Educ*, 1998, 45:6.
- [6] 曾辉. 南昌地区城市建成区景观结构特征对建设用地扩张的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(9):1931-1937.
- [7] CARLSON T N, ARTHUR S. The impact of land use land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 25:49-65.

- [8] 曾辉,高启辉,陈雪,等. 深圳市 1988 - 2007 年间湿地景观动态变化及成因分析[J]. 生态学报,2010,30(10):2706 - 2714 .
- [9] WANG Y Q,ZHANG X S. A dynamic modelling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes [J]. *Ecological Modelling*,2001,140:141 - 162.
- [10] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 景观生态学原理与应用[M]. 北京:高等教育出版社. 2001.
- [11] 史培军,宫鹏,李晓兵,等. 土地利用覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [12] 李俊祥,王玉洁,沈晓虹,等. 上海市城乡梯度景观格局分析[J]. 生态学报,2004,24(9):1973 - 1980
- [13] 李伟峰,欧阳志云,肖焱. 景观生态学原理在城市土地利用分类中的应用[J]. 生态学报,2011,31(3):593 - 601
- [14] ZHOU S G, LIU J J, CHEN R X. New method to extract roads in urban area from high-resolution remote sensing imagery. *Computer Engineering and Applications*[J]. 2010, 46(32): 216 - 219.
- [15] 徐丽华,岳文泽,曹宇. 上海市城市土地利用景观的空间尺度效应[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2827 - 2834.
- [16] 刘宇. 吕一河. 傅伯杰. 景观格局 - 土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. 生态学报,2011,31(1):267 - 275
- [17] GRAEME S C. Spatial resilience: integrating landscape ecology, resilience, and sustainability [J]. *Landscape Ecology*, 2011,26(7):899 - 909.
- [18] ROXANA A, MARTIN O, GONZALO I, et al. Stability of ecosystem functioning and diversity of grasslands at the landscape scale [J]. 2011,26(7):1011 - 1022.
- [19] 杨志峰,徐琳瑜. 城市生态规划学[M]. 北京:北京师范大学出版社. 2008.
- [20] 王如松,胡聃,李锋,等. 区域城市发展的复合生态管理[M]. 北京:气象出版社,2010.

(上接第 122 页)

- [8] WEN Z, LIAO W, CHEN S. Production of cellulose/ β -glucosidase by the mixed fungi culture and on dairy manure[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40: 3087 - 3094.
- [9] 陈向东,藤尾雄策. 日本根霉 IFO5318 胞外 β -葡萄糖苷酶的纯化及部分特性[J]. 微生物学报,1997,37(5):368 - 373.
- [10] 邓先余,邹谋勇,黄志坚,等. 一株产纤维素酶细菌的分离鉴定及其酶学特性研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2012,51(5):93 - 99.
- [11] HENRIQUE F, SOUZA M, NASCIMENTO C V, et al. Purification and biochemical characterization of a mycelial glucose and xylose - stimulated β - glucosidase from the thermophilic fungus *Humicola insolens* [J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45: 272 - 278.
- [12] PARRY J, DAVID E. Biochemical characterization and mechanism of action of a thermostable β - glucosidase purified from *Thermoascus aurantiacus* [J]. *Biochem J*, 2001, 353: 117 - 127.
- [13] SINGHANIA R R, SUKUMARAN R K, RAJASREE K P, et al. Properties of a major β - glucosidase - BGL1 from *Aspergillus niger* NII - 08121 expressed differentially in response to carbon sources [J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46: 1521 - 1524.
- [14] HSIEH M C, GRAHAM T L. Partial purification and characterization of a soybean β - glucosidase with high specific activity towards isoflavone conjugates [J]. *Phytochemistry*, 2001, 58: 995 - 1005.
- [15] SUE M, ISHIHARA A, IWAMURA H. Purification and characterization of a β - glucosidase from rye (*Secale cereale* L.) seedlings [J]. *Plant Sci*, 2000, 155: 67 - 74.
- [16] 瞿丽莉,朱均均,刘敏,等. β -葡萄糖苷酶的制备及在纤维素辅助水解上的应用研究[J]. 林产化学与工业 2009;29(1):13 - 17.
- [17] OPASSIRI R, POMTHONG B, ONKOKSOONG T, et al. Analysis of rice glycosyl hydrolase family I and expression of Os4bglu12 β - glucosidase [J]. *BMC Plant Biol*, 2006, 6: 33
- [18] TURNER P, MAMO G, KARLSSON E N. Potential and utilization of thermophiles and thermostable enzymes in biorefining [J]. *Microb Cell Fact*, 2007, 6: 9.
- [19] 赵林果,游丽金,孟鹏,等. 黑曲霉胞外耐高温 β -葡萄糖苷酶的分离纯化及部分特性研究[J]. 林产化学与工业,2007;27(6):41 - 46.
- [20] SHEN H, BYERS L D. Thioglycoside hydrolysis catalyzed by β - glucosidase [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2007, 362(3): 717 - 720.
- [21] WYMAN C E. Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics and opportunities [J]. *Bioresour Technol*,1994, 50: 3 - 16.
- [22] CHEN M, QIN Y Q, LIU Z Y, et al. Isolation and characterization of a β - glucosidase from *Penicillium decumbens* and improving hydrolysis of corncob residue by using it as cellulase supplementation [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2010, 46: 444 - 449
- [23] SUKUMARAN R K, SINGHANIA R R, MATHEW G M, et al. Cellulase production using biomass feed stock and its application in lignocellulose saccharification for bioethanol production [J]. *Renew Energy*, 2009, 3: 421 - 426.