

DOI: 10.5846/stxb201807021450

付凤杰, 刘珍环, 黄千杜. 深圳市福田区三维城市景观格局变化特征. 生态学报, 2019, 39(12): - .

Fu F J, Liu Z H, Huang Q D. Three-dimensional urban landscape pattern changes: A case study in the Central Business District of Futian, Shenzhen. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

深圳市福田区三维城市景观格局变化特征

付凤杰, 刘珍环*, 黄千杜

中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

摘要:城市景观是景观变化最快的类型之一, 建成景观与绿地景观格局和功能的相互影响及空间配置是城市景观优化的核心。在紧凑型城市快速发展过程中, 城市垂直方向增长成为主要扩展方式。如何定量分析三维城市景观格局变化, 为城市景观优化提供科学依据还有待深入。研究选取深圳市福田区, 以高分辨率遥感数据和建筑普查数据为基础, 运用景观格局指数和景观连通性等方法定量分析建筑景观和绿地景观变化及空间影响。研究结果表明: (1) 2003—2016 年, 福田区建筑景观主要表现为垂直向的立体扩展模式, 新增建筑主要为高层和超高层建筑, 建筑平均高度增加 6.53 m, 立体空间体积增加 $135.58 \times 10^6 \text{ m}^3$, 建筑密度仅增加 2.42%, 建筑景观高度差异逐渐增大, 呈现出明显的三维空间异质性。 (2) 2003—2016 年, 建筑景观格局由“阶梯式”转变为“金字塔”形, 受益于建筑景观的垂直向增长, 建成景观与绿地景观比例由 1.20:1 调整为 0.99:1, 建成景观减少 4.03 km^2 , 绿地景观增加 2.80 km^2 。 (3) 建成景观的三维立体化释放了绿地景观用地空间, 同时也限制了绿地景观的外部连通性, 绿地景观连通性较低, 大型绿地斑块间缺乏廊道连通, 呈现孤岛化。研究可为城市景观空间优化和国土规划等实践提供科学依据。

关键词: 三维景观指数; 建筑景观; 绿地景观; 深圳市

Three-dimensional urban landscape pattern changes: A case study in the Central Business District of Futian, Shenzhen

FU Fengjie, LIU Zhenhuan*, HUANG Qiandu

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Landscape changes associated with rapid urbanization are one of the most dramatic forms of land transformation. It is essential to quantify landscape patterns and their changes for urban landscape management policy-making. In the compact city, the growth of building height is the main form of landscape expansion. How to quantify the three-dimensional (3D) landscape patterns and their changes has become a hot topic in landscape pattern analysis, which is vital to understanding ecological consequences of urbanization and the interaction between architectural landscape and green infrastructure landscape. However, further research is needed to improve 3D landscape pattern quantitative analysis in comparison to previous studies that mainly focused on urban horizontal expansion. The focus of this paper is the vertical and horizontal urban landscape changes based on high-resolution remote sensing images and building census data by employing 3D landscape metrics and the landscape connectivity index to quantify the rapid landscape pattern changes in the Futian District, Shenzhen City. The results showed that (1) vertical growth was the main expanded feature of architectural landscape from 2003 to 2016. The high-rise buildings (27—99 m) and super high-rise buildings (over 100 m) dominate architectural landscape in Futian. These changes resulted in an increase of 6.53 m in the average building height and an

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571172)

收稿日期: 2018-07-02; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzhh39@mail.sysu.edu.cn

increase of $135.58 \times 10^6 \text{ m}^3$ in building volume. However, it only increased the building coverage ratio by 2.42%, which indicated typical three-dimensional spatial heterogeneity in Futian. (2) The architectural landscape pattern turned from the “Stepped” style into the “Pyramid” style. Because of the vertical expansion of the architectural landscape, the proportion of built-up landscape and green landscape changed from 1.20:1 to 0.99:1, which resulted in a decrease of 4.03 km^2 of built-up landscape and an increase of 2.80 km^2 green landscape. (3) The transformation of landscape type and its spatial influence showed that the three-dimensional transformation of the built-up landscape released the space for green landscape, but also restricted the external connectivity of the green landscape, which led to the Central Business District (CBD) having low-level landscape connectivity. The green landscape patches are isolated by high architectural landscape. There are inadequate corridors to connect green patches. Our results provide a scientific basis for urban landscape optimization and land use policy-making.

Key Words: three-dimensional landscape metrics; architectural landscape; green landscape; Shenzhen

景观格局分析是解析城市景观时空变化和理解城市地区格局与过程相互作用的经典方法^[1]。过去几十年,随着遥感技术的兴起,以二维景观发展起来的景观格局分析日臻完善^[2-3]。城市作为人工景观的综合体,在快速城市化进程中,城市空间形态结构与组织关系迅速地朝着三维立体化发展,建筑景观显著高过绿地景观,对城市景观的格局与功能特性产生显著影响^[4]。景观格局特征的三维立体化和景观功能联系的三维网络化,改变了三维城市景观生态特征^[5]。城市景观结构与功能联系的认识,需要突破传统二维景观空间平面镶嵌格局,增加垂直立面的景观格局解析,才能有效地理解三维城市景观生态特征^[6]。随着三维空间信息获取技术的提升,城市三维景观生态特征受到重视,三维景观格局及其变化特征分析成为当前景观格局研究的热点问题,是深化测度城市景观格局的热点方向^[7]。

三维城市景观格局研究得益于数据获取与技术方法进步,越来越受到研究者重视^[8]。地面数据调查及三维地籍数据^[9-11]、航空摄影测量^[12]、高分辨率卫星遥感影像^[13-15]及机载激光扫描(LiDAR)^[16-18]等数据源广泛应用于三维景观格局建模及变化分析。数据源对三维景观格局分析有影响,地面调查和三维地籍数据获取费时费力^[19];航空摄影测量在建筑物稠密区会出现三维信息缺失问题^[20];高分辨率卫星遥感影像数据可以为地表三维信息提供动态性和实时性等特征,但大规模处理高分辨率遥感数据尚待突破^[21];LiDAR 能获取目前最为先进的三维信息,但变化时段内的数据不容易获取^[22]。因此,综合多源数据集成获取城市景观三维信息是目前较为可行的技术。

城市景观以建成景观和绿地景观为主,已有研究针对建成景观和绿地景观分别构建多种景观格局指数,但两者相互作用的分析较少^[23-26]。三维景观格局是研究景观格局演变与生态环境效应之间关系的有效途径^[27],目前在生物多样性^[28]、大气污染^[29]、热岛效应^[30-32]、动植物的栖息和迁移^[33]等方面都有长足进展。本文选取福田区为研究区域,选用景观格局指数、景观类型转移矩阵和景观连通性等方法研究 2003 年与 2016 年建筑景观和绿地景观的空间格局及变化,以及建成景观与绿地景观相互作用的时空分异特征,以期为城市建成区城市更新及合理规划提供景观生态管理的定量依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

深圳市自 1979 年建市以来,已快速发展为超大城市^[34],城市中心不断由东向西迁移,福田区自 21 世纪以来成为深圳市的新中心,近 18 年来经历了快速发展过程。福田区位于深圳市中南部($22^\circ 30' - 22^\circ 36' \text{ N}$, $113^\circ 59' - 114^\circ 06' \text{ E}$),面积约为 78.66 km^2 。地势北高南低,北到白尾石、黄竹园等山脊与龙华区毗邻,南临深圳河、深圳湾,东与罗湖区相连,西与南山区相接。截止到 2017 年,全区常住人口 156.12 万人,地区生产总值高达 3820.56 亿元。受空间面积制约,福田区城市立体化发展趋势明显,是典型的快速三维立体城市化地区

之一。

1.2 数据源

研究采用的数据包含两期高分辨率遥感数据、建筑物普查数据、道路网数据和行政边界数据集,主要数据来源见表 1。高分辨率遥感数据经过正射校正、影像融合等预处理后,采用面向对象分类和目视解译的方法提取遥感影像信息,获取景观分类数据^[35-37]。建立两级分类体系,第一级为建成景观、绿地景观、水体三大类,建成景观二级分类包括建筑景观、不透水景观(包含道路,广场等)和推平未建景观,绿地景观二级分类包括林地和草地景观。

表 1 数据源及说明
Table 1 Data source and description

数据类型 Data type	数据内容 Data context	数据说明 Data description	数据来源 Data source
高分辨率遥感数据 High resolution remote sensing image data	福田区全境 QuickBird 高分辨率遥感影像	栅格数据,分辨率:0.6 m;获取时间:2003 年 1 月	商业影像购买
	福田区全境 Worldview—3 高分辨率遥感影像	栅格数据,分辨率:0.3 m;获取时间:2016 年 7 月	商业影像购买
数字高程数据 Digital elevation model	DEM	栅格数据,分辨率:10 m;获取时间:2004 年	深圳市规划和国土资源委员会
建筑物普查数据 Buildings census data	深圳市所有建筑物普查数据集	矢量数据 Shapefile 格式,包含建筑高度和楼层数等信息;获取时间:2015 年	深圳市规划和国土资源委员会
路网数据 Road network data	深圳市路网空间数据集	矢量数据 Shapefile 格式;获取时间:2010 年	深圳市规划和国土资源委员会
行政区划边界数据 Administrative boundary map	福田区行政区划边界数据	矢量数据 Shapefile 格式;获取时间:2015 年	深圳市规划和国土资源委员会
实测建筑高度数据 Measured building height	福田区野外样点建筑高度	矢量点文件 shapefile 格式;获取时间:2017 年 12 月	手持红外线激光测距仪

2015 年深圳建筑物普查数据包含了高度信息,根据 2003 年和 2016 年高分辨率遥感影像,在已获取的数据基础上进行建筑目视解译,增减建筑数量,利用高分辨遥感影像中建筑阴影和实际建筑高度之间的数学关系,经实地测量数据的验证,得到 2003 年和 2016 年建筑分布数据。参考《民用建筑设计通则》^[38],将建筑按高度划分为 5 种类型:低层建筑(≤ 9 m)、多层建筑(10—18 m)、中高层建筑(19—27 m)、高层建筑(28—99 m)和超高层建筑(>99 m)。基于全区 8 个街道,使用支路级城市道路网数据划分城市街区斑块,2003 年共划分 758 个斑块,2016 年共划分 766 个斑块。

1.3 研究方法

1.3.1 三维景观变化分析方法

三维景观格局指数。为了分析建筑景观在三维空间上的结构性和异质特征,探讨三维城市景观格局时空分异特征,本文参考相关研究选取能够表征建筑高度变化情况的建筑平均高度、高度标准差指数以及可以反映建筑在水平和垂直立面扩展情况的建筑密度、建筑体积和容积率指数^[11,39-40]。

1.3.2 二维景观变化分析方法

(1)景观格局指数。景观格局指数是景观生态学常用的一种定量研究方法^[41]。本文选取斑块水平的景观格局指数分析景观类型斑块的变化特征,包括斑块总面积、斑块数、面积周长比、平均斑块面积和斑块密度。

(2)景观类型转移矩阵。景观类型转移矩阵可以清楚地表达不同景观类型之间的转移情况,显示区域内景观类型变化的细节结构特征,对景观类型面积变化进行定量分析^[42-43]。

1.3.3 景观连通性分析方法

景观连通性是衡量景观格局与功能的重要指标^[44],本文选用整体连通性指数和可能连通性指数来衡量景观格局对生态流的便利或阻碍程度^[45-46],选取斑块重要值表征每个斑块对景观连通性的重要程度。

2 结果分析

2.1 建筑景观格局变化

2.1.1 三维景观格局指数

运用三维景观格局指数分析福田区 2003 年和 2016 年建筑景观的变化情况(表 2)。从全区尺度看, 2003—2016 年间, 建筑占地面积由 8.53 km² 增长到 10.24 km², 只增加 1.71 km²。建筑平均高度增加 6.53 m, 高度标准差增加 5.81 m, 建筑体积增加 135.58×10⁶ m³, 增长 50.28%, 容积率增长 0.53, 建筑密度仅增加 2.42%, 表明福田区建筑景观高度差异逐渐增大, 三维空间异质性明显, 扩展以垂直空间上的延伸为主, 空间容纳能力大幅提升。

从街道尺度看, 各街道建筑景观增长都以垂向为主, 最典型为莲花街道、福田街道和香蜜湖街道。莲花街道建筑平均高度在 2003 年和 2016 年均是全区最高, 分别为 25.82 m、28.10 m。香蜜湖街道变化最明显, 除建筑密度增长 53.29% 外, 其余各指数增长 100% 左右, 其建筑景观经历 13 年重点建设, 已由中低层为主转为以中高层为主。福田街道建筑体积增长 59.79%, 达 40.81×10⁶ m³, 增长的体积还略高于香蜜湖街道和园岭街道 2016 年的体积, 是区域 CBD 的核心区。园岭街道和南园街道的建筑密度明显高于其他街道, 13 年间变化不明显, 建筑基本维持原状, 是区内城中村集聚区域。

表 2 2003—2016 年福田区建筑景观三维格局指数统计

Table 2 Statistics on 3D landscape metrics of architectural landscape in Futian during 2003—2016

街道 Subdistrict	建筑平均高度/m Average building height		高度标准差/m Building height standard deviation		建筑体积/(10 ⁶ m ³) Building volume		建筑密度/% Building density		容积率 Floor area ratio	
	2003	2016	2003	2016	2003	2016	2003	2016	2003	2016
沙头	20.11	22.26	14.00	19.57	49.92	72.82	9.80	12.19	0.93	1.30
福田	20.67	23.46	16.42	23.85	68.26	109.07	13.74	18.18	1.76	2.73
南园	20.78	20.76	12.60	13.02	16.95	18.54	22.91	23.81	2.60	2.85
梅林	17.91	20.24	12.32	17.38	24.37	39.70	6.00	7.11	0.44	0.71
香蜜湖	13.20	24.84	14.57	29.20	17.09	40.01	8.35	12.80	0.57	1.35
莲花	25.82	28.10	23.84	28.99	36.40	53.88	11.10	14.39	1.49	2.24
华富	16.05	19.10	15.83	23.52	18.32	30.72	13.38	14.07	0.92	1.52
园岭	19.43	20.76	22.94	23.92	38.34	40.48	23.67	23.78	2.55	2.70
全区	19.60	26.13	16.50	22.31	269.64	405.22	10.95	13.37	1.10	1.63

从福田区建筑密度分布看(图 1), 建筑密度在 15%—30% 之间的街区占比最大, 2003 年和 2016 年分别占比 35.22%、37.47%, 主要分布在城市绿地及水体周边。建筑密度在 45%—60% 之间的街区主要分布在东部、中部和南部, 以商业用地为主。建筑密度大于 60% 的街区主要是大型单体建筑或建筑密集区, 如深圳会展中心和城中村。13 年间, 建筑密度变化主要集中在福田区的中部和南部的福田保税区。建筑密度小于 15% 的街区占比减少 13.99%, 其余各等级占比均有所增长, 增长最明显的是建筑密度大于 45% 的街区, 其占比增加 5.22%。

从容积率分布图看(图 2), 2003 年, 福田区容积率以第三等级(1.5—3)为主, 2016 年, 福田区的容积率以第四等级为主(3—6)。容积率呈现西北低、中部和南部高的分布状态。容积率变化明显的街区主要集中在深南大道和深南中路两侧, 该区域以商业为主。容积率大于 3 的街区主要分布于新洲路、福荣路以及深南大道、深南中路两侧。容积率大于 6 的街区以单体超高层建筑为主。13 年间, 容积率小于 1.5 的街区占比减少 15.15%, 容积率大于 6 的街区占比增至 9.53%。

2.1.2 建筑景观分布特征

运用斑块指数统计分析 2003 年和 2016 年建筑景观变化特征。建筑斑块数量分布表明中高层建筑是福

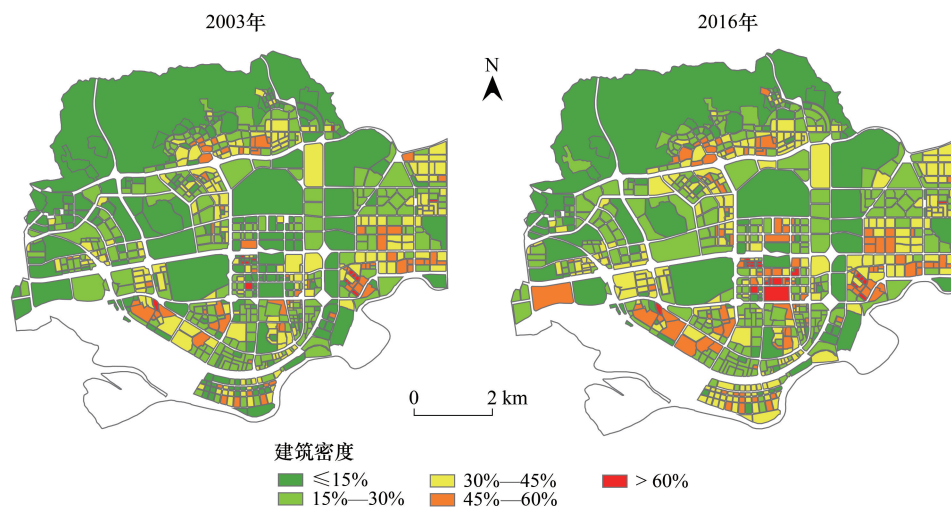


图 1 2003—2016 年福田区建筑密度空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of building density in Futian during 2003—2016

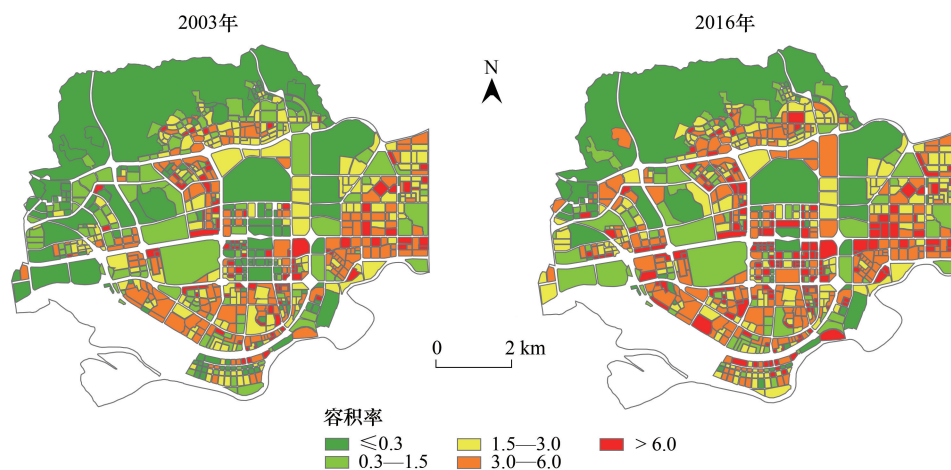


图 2 2003—2016 年福田区容积率空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of floor area ratio in Futian during 2003—2016

田区主要建筑类型,分别占建筑总量 41.54%和 41.12%(表 3)。新增建筑主要为高层和超高层建筑,13 年间分别增加 354 栋和 173 栋。低层建筑、多层建筑和中高层建筑有所减少,分别减少 488、193 和 265 栋。13 年间,建筑斑块面积周长比和平均斑块面积都有小幅增加。斑块密度显著降低,低层和多层建筑减少明显,只有高层建筑斑块密度有所增加。建筑斑块变化表明区域高层化、垂直化发展趋势。

建筑高度变化主要集中在福田区中部和西北部(图 3),建筑高度变化量介于-45—339 m 之间。福田区南北轴从莲花山至深圳湾和东西轴的深南大道是高层建筑密布区。2003 年,福田区建筑高度在 0—238 m 之间,建筑景观呈现由西向东建筑数量、建筑高度均增加的“阶梯式”格局。建筑高度密集区出现在华富街道和园岭街道,即深南中路两侧,以商业用地为主,梅林街道和沙头街道多以居住为主的中高层建筑密集区。2016 年福田区建筑高度在 0—345 m 之间,建筑景观呈现中部高,并沿南北方向建筑高度逐渐减缓的“金字塔”格局。高层和超高层建筑沿深南大道、深南中路和福荣路等交通轴线呈集聚分布,三维城市景观空间格局特征显著。

2.2 绿地景观格局变化

13 年间,绿地景观斑块数有所增加,平均斑块面积降低,斑块密度略增。2003 年绿地景观面积为 32.78

km², 占比 42.46%, 2016 年为 35.58 km², 占比 46.10%, 增长 3.64%。13 年间林地景观面积增加 15.88 km², 草地面积减少 13.07 km²(表 4)。

表 3 2003—2016 年福田区建筑景观斑块指数统计
Table 3 Patch indices of architectural landscape in Futian during 2003—2016

斑块指数 Patch indices	年份 Year	低层建筑 Low-rise building	多层建筑 Multi-story building	中高层建筑 Mid-rise building	高层建筑 High-rise building	超高层建筑 Super high-rise building	全部建筑 Total buildings
斑块数	2003	4449	3655	7065	1728	99	16996
Number of patches	2016	3923	3472	6816	2071	241	16523
面积周长比	2003	4.78	4.99	4.44	6.67	11.76	5.15
Average patch area/perimeter ratio	2016	5.49	5.88	4.68	6.92	8.64	5.75
平均斑块面积	2003	344.48	424.17	442.77	1192.93	3624.35	507.85
Mean patch area/m ²	2016	390.36	550.71	479.61	1474.46	3257.79	638.58
斑块密度	2003	2907.84	2358.06	2257.19	838.83	275.00	1969.11
Patch density/(n/km ²)	2016	2564.05	1917.80	2084.40	679.02	305.06	1565.99

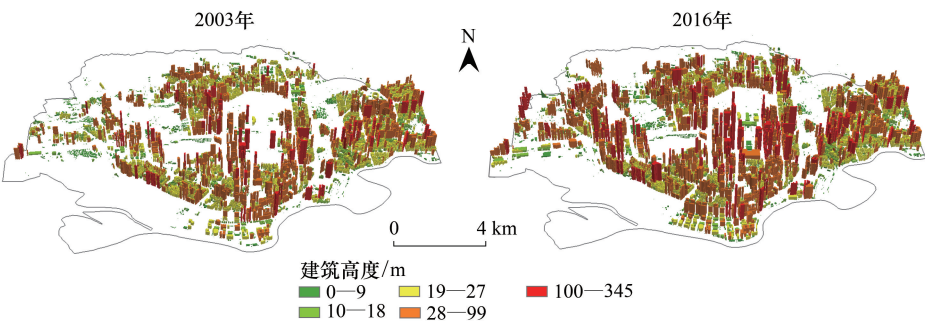


图 3 2003—2016 年福田区建筑高度分布图
Fig.3 The 3D distribution of architectural landscape in Futian during 2003—2016

表 4 2003—2016 年福田区城市绿地斑块指数统计
Table 4 Statistics on patch metrics of green landscape in Futian during 2003—2016

斑块指数 Patch indices	年份 Year	林地景观 Forest	草地景观 Grassland	绿地景观 Green landscape
总面积	2003	14.93	17.85	32.78
Total area/km ²	2016	30.81	4.78	35.58
斑块数	2003	20025	13031	33056
Number of patches	2016	24828	16307	41135
面积周长比	2003	11.24	4.74	6.37
Average patch area/perimeter ratio	2016	11.74	2.86	8.22
平均斑块面积	2003	719.12	1394.71	985.45
Mean patch area/m ²	2016	1261.84	307.80	883.63
斑块密度	2003	1390.63	717.17	1014.92
Patch density/(n/km ²)	2016	792.47	3248.41	1131.64

草地景观的斑块数和斑块密度显著增加, 平均斑块面积降低, 面积周长比降低, 表明草地斑块越来越破碎化。林地景观斑块数增加, 斑块密度变小, 平均斑块面积增加, 面积周长比小幅增加, 表明林地斑块越来越大块化, 林地景观 13 年间有向好的趋势。

2.3 景观类型格局变化

为进一步研究绿地景观与建成景观之间的相互作用,运用转移矩阵对景观类型间的变化进行了分析(表 5)。2003—2016 年间,1.38 km²的林地和 4.59 km²的草地景观转变为建成景观,主要转出类型为不透水景观。同时,有 6.99 km²和 1.28 km²的不透水景观转为林地和草地。建成景观与绿地景观比例由 1.20:1 调整为 0.99:1,建成景观优化减少 4.03 km²,绿地景观增加 2.80 km²,建筑景观的垂向增长减少了建成景观占地需求,释放了绿地景观空间。从景观类型的空间分布上看,主要表现为草地景观转变为林地景观、城市行道树生长冠幅的扩大和居住区内部花园草坪的培育(图 4)。

表 5 2003—2016 年福田区景观类型转移矩阵
Table 5 Transition matrix of landscape type in Futian during 2003—2016

景观类型/km ² Landscape type	2016						
	林地 Forest	草地 Grassland	水体 Water	推平未建地 Unbuilt	不透水景观 Impervious	建筑景观 Architecture	转出 Transform out
林地 Forest	—	0.61	0.13	0.16	1.09	0.13	2.12
草地 Grassland	9.52	—	1.34	0.35	3.83	0.41	15.45
水体 Water	0.34	0.22	—	0.02	0.09	0.02	0.70
2003 推平未建地 Unbuilt	0.75	0.26	0.18	—	1.15	0.49	2.83
不透水表面 Impervious	6.99	1.28	0.22	0.46	—	1.66	10.61
建筑用地 Architecture	0.15	0.06	0.01	0.07	0.67	—	0.96
转入 Transform in	17.75	2.43	1.88	1.06	6.83	2.71	

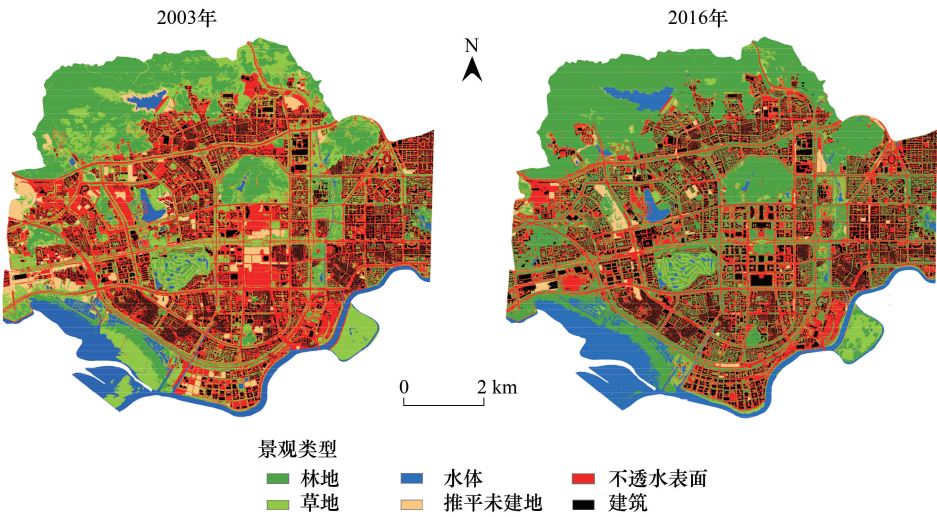


图 4 2003—2016 年福田区城市景观空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of landscape in Futian during 2003—2016

2.4 景观连通性变化

由表 6 可以看出,绿地景观整体连通性和可能连通性均有小幅上升,研究区生境斑块之间的连通性有所增加。与前人研究相比福田区景观连通性低于深圳市整体水平^[47],表明处于都市核心区的福田区绿地景观经过多年建设有孤立斑块化趋势。

为了便于分析 2003 年和 2016 年福田区景观斑块重要性变化情况,将 2003 年和 2016 年各级斑块用 1 至 5 级表征斑块重要程度,数值越大表明斑块的重要程度越高(图 5),各级斑块重要值划分为<0.5、0.5—1、1—5、5—15 和>15。2003—2016 年,5 级重要斑块数量不变,面积增加 3.18 km²,占比升高 5.86%。4 级重要斑块数量小幅增加,面积增加 3.62 km²,斑块占比由 7.64% 上升至 17.61%。3 级重要斑块显著减少,占比减少

8.84%。其余等级斑块数量和占比均有所降低。2003—2016 年,福田区景观连通性重要斑块空间分布呈现北重南轻的特征,围绕梅林水库水源保护区的斑块是区内最为重要的绿色基础设施斑块,南部福田红树林国家级自然保护区斑块重要性虽然有所上升,但受其北部城市垂向扩张影响,与外部绿色基础设施斑块连通性受限。整体上重要性高的斑块内部连通性有提升,但受建成景观的影响越来越孤立,特别是建筑景观垂向增长后相当于建立了隔离护栏,在绿色重要性斑块间建立隔离,例如笔架山公园、莲花山公园和福田红树林生态公园都已是孤立绿地景观斑块。绿地景观连通性提升有利于区域绿色基础设施的优化,但绿地景观尚未形成有效的空间连通。

表 6 2003—2016 年福田区景观连通性统计

Table 6 Statistics on landscape connectivity in Futian during 2003—2016

年份 Year	整体连通性指数 (IIC) Integral index of connectivity	可能连通性指数 (PC) Probability of connectivity
2003	0.04	0.10
2016	0.06	0.16

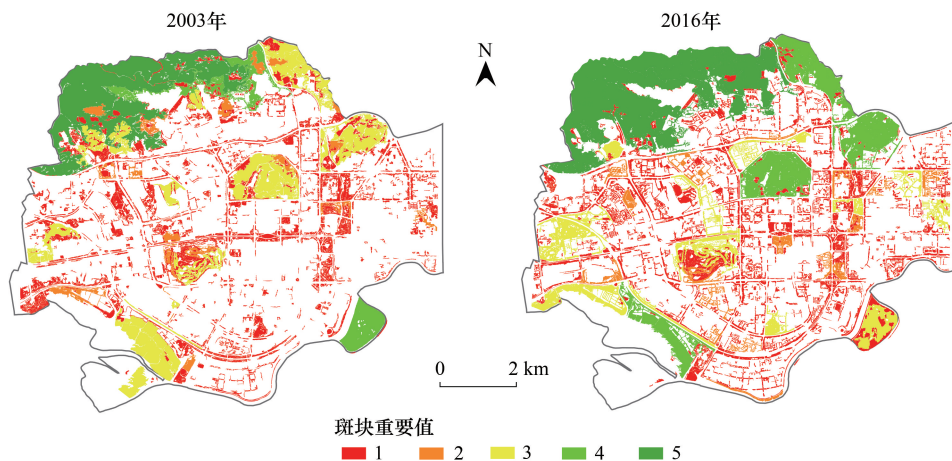


图 5 2003—2016 年福田区景观斑块连通重要程度分布图

Fig.5 Spatial distribution of connectivity important patches in Futian during 2003—2016

3 结论与讨论

研究综合高分辨率遥感数据、建筑物普查数据和路网等数据,以深圳市中心城区福田区为研究区,分析了福田区三维城市景观格局变化特征。研究结论如下:(1)研究期内,福田区建筑占地面积减少,建筑平均高度、建筑体积和容积率等三维景观指数显著增长,街道间异质性明显,变化主要集中在莲花街道、香蜜湖街道和福田街道。新增建筑以高层和超高层建筑为主,城市建筑景观格局由“阶梯式”转变为“金字塔”形。(2)2003—2016 年,绿地景观斑块数轻微提升,平均斑块面积降低,斑块密度略增,生态质量有所恢复。城市绿地景观面积比例超过建成景观,占比增加,变化主要表现为城市大型绿地斑块内部树木及道路沿线行道树的生长。(3)福田区绿地景观连通性虽有小幅上升,但景观连通性依然较低,重要性绿地景观斑块呈现孤岛化。区域绿色基础设施有所优化,但绿地景观尚未形成有效的空间连通。

研究表明三维城市空间格局的研究更能反映城市景观格局变化和提升对城市景观复杂性的认识^[23]。城市建筑的高层化降低建筑占地面积,有助于存量土地优化开发和空间资源优化配置,促进城市内部更新、控制城市蔓延,为城市布局的合理调整和城市功能的完善提供参考。现有的三维景观研究多以建筑景观为主,忽略了景观的整体格局和景观类型的相互影响。本研究通过运用多源数据,构建从二维到三维的城市景观格局

变化研究,是一类过渡型的景观格局变化研究。今后,三维景观研究通过更新算法和数据源,例如运用 LiDAR 数据做出精确的三维景观分类,将极大推动三维城市景观研究^[48]。此外,还应充分利用各类景观的高度信息,探寻能衡量建成景观和绿地景观在垂直立面相互作用的方法,如天空视域因子^[49],提升三维城市景观格局变化特征研究的深度。

参考文献 (References):

- [1] Wu J G, Hobbs R J. Key Topics in Landscape Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Shen W J, Jenerette G D, Wu J G, Gardner R H. Evaluating empirical scaling relations of pattern metrics with simulated landscapes. *Ecography*, 2004, 27(4): 459-469.
- [3] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [4] 宫继萍, 胡远满, 刘森, 常禹, 布仁仓, 熊在平, 李春林. 城市景观三维扩展及其大气环境效应综述. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 562-570.
- [5] 张小飞, 王仰麟, 李正国, 李卫锋, 叶敏婷. 三维城市景观生态研究. *生态学报*, 2007, 27(7): 2972-2982.
- [6] Chen Z Y, Xu B. Enhancing urban landscape configurations by integrating 3D landscape pattern analysis with people's landscape preferences. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(12): 1018.
- [7] Wu Q, Guo F X, Li H Q, Kang J Y. Measuring landscape pattern in three dimensional space. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 49-59.
- [8] Zheng Z, Zhou W Q, Wang J, Hu X F, Qian Y G. Sixty-year changes in residential landscapes in Beijing: a perspective from both the horizontal (2D) and vertical (3D) dimensions. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 992.
- [9] Shi L Y, Shao G F, Cui S H, Li X Q, Lin T, Yin K, Zhao J Z. Urban three-dimensional expansion and its driving forces——A case study of Shanghai, China. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(4): 291-298.
- [10] 郭仁忠, 应申. 三维地籍形态分析与数据表达. *中国土地科学*, 2010, 24(12): 45-51.
- [11] 杨俊, 国安东, 席建超, 葛全胜, 李雪铭. 城市三维景观格局时空分异特征研究——以大连市中山区为例. *地理学报*, 2017, 72(4): 646-656.
- [12] 卓莉, 黄信锐, 王芳, 陶海燕, 郑璟. 基于高空间分辨率与立体像对遥感数据的建筑物三维信息提取. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 1062-1068.
- [13] 张培峰, 胡远满, 熊在平, 刘森. 基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析. *生态学报*, 2011, 31(23): 7251-7260.
- [14] Qin J, Fang C L, Wang Y, Li G D, Wang S J. Evaluation of three-dimensional urban expansion: a case study of Yangzhou City, Jiangsu Province, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 224-236.
- [15] Magarotto M G, da Costa M F, Tenedório J A, Silva C P. Vertical growth in a coastal city: an analysis of Boa Viagem (Recife, Brazil). *Journal of Coastal Conservation*, 2016, 20(1): 31-42.
- [16] Awrangjeb M, Ravanbakhsh M, Fraser C S. Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5): 457-467.
- [17] 阚晓云, 孙景振. LiDAR 及倾斜摄影技术在数字实景城市模型中的应用. *测绘地理信息*, 2014, 39(3): 43-46.
- [18] 彭代锋, 张永军, 熊小东. 结合 LiDAR 点云和航空影像的建筑物三维变化检测. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2015, 40(4): 462-468.
- [19] 文小岳, 王振兴, 周文斌, 孙国庆. 三维地籍数据模型及可视化研究进展. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(12): 1500-1503, 1507-1507.
- [20] Dubayah R O, Drake J B. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 2000, 98(6): 44-46.
- [21] 马廷. 高分辨率卫星影像及其信息处理的技术模型. *遥感信息*, 2001, (3): 6-10.
- [22] Chen Z Y, Xu B, Gao B B. An Image-segmentation-based urban DTM generation method using airborne lidar data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(1): 496-506.
- [23] Chen Z Y, Xu B, Devereux B. Urban landscape pattern analysis based on 3D landscape models. *Applied Geography*, 2014, 55: 82-91.
- [24] 乔伟峰, 刘彦随, 王亚华, 陆昱颖. 2000 年以来南京城市三维空间扩展特征. *地理研究*, 2015, 34(4): 666-676.
- [25] 叶娟娟, 杨昕, 熊礼阳, 严艳梓, 王婷婷. 南京市老城区城市建筑点格局研究. *地球信息科学学报*, 2015, 17(11): 1404-1411.
- [26] 徐岩岩, 刘森, 胡远满, 李春林, 熊在平. 沈阳市铁西老工业区更新过程中建筑景观变化. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 499-507.
- [27] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [28] Clergeau P, Croci S, Jokimäki J, Kaisanlahti-Jokimäki M L, Dinetti M. Avifauna homogenisation by urbanisation: analysis at different European latitudes. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 336-344.
- [29] 王咏薇, 伍见军, 杜钦, 高阳华. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究. *气象学报*, 2013, 71(6):

1130-1145.

- [30] Tran D X, Pla F, Latorre-Carmona P, Myint S W, Caetano M, Kieu H V. Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 124: 119-132.
- [31] 王琳, 祝亚鹏, 卫宝立. 城市热岛效应与景观格局相关性研究. *环境科学与管理*, 2017, 42(11): 156-160.
- [32] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, Wang R H. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 415-429.
- [33] Xu X, Xie Y J, Qi K, Luo Z K, Wang X R. Detecting the response of bird communities and biodiversity to habitat loss and fragmentation due to urbanization. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1561-1576.
- [34] 中华人民共和国国务院. 关于调整城市规模划分标准的通知, 2014.
- [35] 胡荣明, 魏曼, 杨成斌, 贺俊斌. 以 SPOT5 遥感数据为例比较基于像素与面向对象的分类方法. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 366-371.
- [36] 常虹, 詹福雷, 杨国东, 牛雪峰, 张旭请, 邵鹏, 唐天琦. 面向对象的高分遥感影像信息提取技术研究. *测绘通报*, 2015, (1): 99-101.
- [37] 王冰冰, 杨鹤松, 王军锋, 徐成华. 基于高分遥感影像的城市用地现状信息提取. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(4): 61-63.
- [38] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50352-2005 民用建筑设计通则. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [39] 张培峰, 胡远满. 不同空间尺度三维建筑景观变化. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1319-1325.
- [40] 陈探, 刘森, 胡远满, 常雄凯, 李春林, 徐岩岩, 施拓. 沈阳城市三维景观空间格局分异特征. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2621-2627.
- [41] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 闫青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. *生态学报*, 2004, 24(1): 123-134.
- [42] 赵明月, 彭建, 刘焱序, 张甜. 基于高分遥感影像的滇西北村域景观格局演变——以大理市低丘缓坡山地开发区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3803-3810.
- [43] 佟光臣, 林杰, 陈杭, 顾哲衍, 唐鹏, 张金池. 1986—2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 240-245.
- [44] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性. *生态学报*, 2008, 28(5): 2237-2244.
- [45] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [46] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2/3): 91-103.
- [47] 吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 冯喆. 深圳市生态用地景观连通性动态评价. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2543-2549.
- [48] Ao Z R, Su Y J, Li W K, Guo Q H, Zhang J. One-class classification of Airborne LiDAR data in urban areas using a presence and background learning algorithm. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1001.
- [49] Li X J, Ratti C. Mapping the spatial distribution of shade provision of street trees in Boston using Google Street View panoramas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 31: 109-119.