

1979—2020 年深圳市不透水面信息提取 及其时空格局变化分析

杨丽媛, 陈洋波

(中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: [目的] 分析不透水地表比的时空分布, 探究城市的发展潜力, 为城市水土保持等规划与后续发展提供参考意见。[方法] 以深圳市作为研究区, 选取 1979—2020 年 9 期共 18 景 Landsat 3/5/7/8 影像为主要数据源影像提取不透水面比例作为参考数据, 结合不透水面平均中心、标准差椭圆和景观格局指数分析深圳市不透水面时空格局分布。[结果] ① 1979—2020 年深圳市整体不透水面比例呈增长趋势, 1990—2010 年增长率和增长强度最高, 后逐渐变缓; ② 由于深圳市发展的不平衡, 1979—2000 年, 发展重心持续向着东北方向移动, 随后 2000—2010 年, 重心向西北方向迁移, 2010 年后, 重心在东西方向上有所移动。总的来看, 深圳市的发展方向主要为东—西; ③ 景观格局变化显示各等级不透水面景观分布渐趋均衡, 分布趋势从破碎到聚集度越来越高, 连接性在逐渐增强。[结论] 不透水面增长的不同阶段具有不同的时空分布规律, 不同密度不透水面分别有各自的变化特点, 降低高密度不透水面的聚集程度对城市未来发展具有积极影响。

关键词: 不透水面比例; 时间序列; 深圳市; 完全约束最小二乘法; 景观格局指数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)05-0198-08

中图分类号: TP79, TU984.16

文献参数: 杨丽媛, 陈洋波. 1979—2020 年深圳市不透水面信息提取及其时空格局变化分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 198-205. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.027; Yang Liyuan, Chen Yangbo. Information extraction and analysis on temporal and spatial pattern changes of surfaces impervious to water in Shenzhen City during 1979—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 198-205.

Information Extraction and Analysis on Temporal and Spatial Pattern Changes of Surfaces Impervious to Water in Shenzhen City During 1979—2020

Yang Liyuan, Chen Yangbo

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

Abstract: [Objective] The temporal and spatial distribution of impervious surface ratio was analyzed in order to determine the development potential of the city, in order to provide a reference for urban plannings, such as soil and water conservation, and subsequent development. [Methods] Eighteen Landsat 3/5/7/8 images of Shenzhen City during nine periods from 1979 to 2020 were selected and used to extract the proportion information of impervious surface as the reference data. The spatiotemporal distribution of impervious surface in Shenzhen City was analyzed based on the mean center of impervious surface, standard deviation ellipse, and landscape pattern index. [Results] ① The percentage of impervious surface in Shenzhen City from 1979 to 2020 showed an increasing trend. The rate and intensity of growth was highest from 1990 to 2010, and then gradually slowed. ② Due to the unbalanced development of Shenzhen City, from 1979 to 2000, the development center moved to the northeast. From 2000 to 2010, the center moved to the northwest. After 2010, the center moved in the east-west direction. In general, the development direction of Shenzhen City was mainly from east to west. ③ The change of landscape pattern showed that the landscape distribution of impervious surface

收稿日期: 2021-04-17

修回日期: 2021-06-02

资助项目: 国家重点研发项目“城市暴雨洪涝立体检测技术”(2017YFC1502702)

第一作者: 杨丽媛(1993—), 女(汉族), 山东省沂南县人, 硕士研究生, 研究方向为城市化发展研究。Email: yangly33@mail2.sysu.edu.cn.

通讯作者: 陈洋波(1964—), 男(汉族), 湖北省崇阳县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市环境遥感、水文模型、水利信息技术研究。Email: eescyb@mail.sysu.edu.cn.

at different levels was becoming more and more balanced, and the distribution trend gradually moved from fragmentation to higher and higher concentration. Connectivity gradually increased over time. [Conclusion] Different stages of impervious surface growth exhibited different temporal and spatial distribution patterns, and impervious surfaces of different densities had their own characteristics. Reducing the degree of aggregation of high-density impervious surfaces has a positive impact on future development of the city.

Keywords: impervious surface ratio; time series; Shenzhen City; fully constrained least square method; landscape pattern index

不透水表面是指能够自然或人为隔离地表水渗入土壤的表面。不透水面会改变洪水径流和物质沉淀,它是评价城市进程和生态环境的重要指标^[1]。研究表明,不透水表面的不断增长对水循环有诸多影响,地表的不透水性导致降雨难以渗入地下,从而降低了雨水的下渗率,下渗减少而地表径流增多,城市被大量不透水面覆盖,地表径流的流速和流量都大大增加,无疑加大了城市排水的压力和洪涝的风险^[2]。不透水面作为研究城市的一个重要指标,其面积大小、增长变化趋势、所占总研究区域的比例等,可以对城市的发展变化适宜程度、人与自然和谐共处程度进行评估,对探究现阶段城市发展的的问题、对城市未来发展的规划及海绵城市的建设具有重要的意义。

不透水面的提取方法是近年来的研究热点,它在城市规划设计、智慧城市建设、城市水文监测和水环境管理等方面都有所应用。近 20 a 中城市不透水面提取技术有了明显进步,针对各种情况探究出了多种方法^[3],大批量的卫星遥感影像解译主要采用遥感影像自动分类算法^[4],如决策树法^[5]、人工神经网络法^[6]、支持向量机法(SVM)^[7]、AP 聚类算法^[8]等。以上分类方法虽然有着解译效率高、可以获取大范围内的数据的优点,但是在对像元进行分类时,仅将像元的地表覆盖类型分成一种类型,仅能判断一个像元是否为不透水面,并没有对像元的不透水率进行表示。近年来国内外开始研究计算像元不透水率的方法,Ridd 提出了著名的 V-I-S 模型(vegetation-imperviousness-soil)的亚像元分解方法^[9];Wu 等^[10]基于 Landsat ETM⁺对地表覆被的分类有了进一步的划分,分为了高反照率地物、低反照率地物、植被和土壤,实现了可操作的混合像元光谱分解。在 LS-MA 的基础上,针对固定端元的问题,后续发展了多端元光谱混合分析法(MESMA)^[11]。除此之外中外学者也从光谱波段入手,探寻一种直接的提取方法。Xu 基于不透水面地类在热红外、中红外、近红外和可见光波段的反射率特征,构建了不透水面指数 NDISI^[12]。Deng 等^[13]基于不透水面、植被和土壤在缨帽变换分量上的差异,提出了 BCI 指数(biophysical

composition index),在实际应用中不透水面与土壤的区分度欠佳,同时该方法需要预先掩膜水体。然而,城市不透水面的精确提取仍然面临多种挑战,例如在实际应用中纯净像元较少并较难提取,单个像元往往包含多种地物类型成为混合像元,混合像元的增多会导致提取地物类型的复杂度上升,如何更精准高效的提取不透水面的问题亟需解决。

本文以深圳市作为研究区,基于 30 m 空间分辨率的 Landsat 影像采用完全约束最小二乘算法的混合像元分解方法提取不透水面,解译得到深圳市 1979—2020 年的不同不透水面比例数据集,并应用不透水面数据计算其平均中心、标准差椭圆,将不同比例的不透水面进行景观格局分析。并根据深圳市不透水面的空间格局变化,总结 41 a 来城市发展的规律并对深圳市水土保持与环境保护和绿色可持续发展提供参考意见。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

深圳,简称“深”,是广东省副省级市,位于东经 113°43′至 114°38′,北纬 22°24′至 22°52′之间,占地面积 1 997.47 km²,地势东南高,西北低,大部分为低丘陵地,是粤港澳大湾区中心城市之一。1980 年被国务院确定为经济特区、经过快速的城市化进程发展为全国性经济中心城市和国际化城市。

1.2 数据源及预处理

本文选用 Landsat 影像为主要数据源。Landsat 是 20 世纪 70 年代早期唯一可用的卫星图像^[14],此前的历史遥感资料大多为航空影像和侦察卫星。深圳土地利用/覆被遥感监测选用 1979—2020 年的逐年高质量无云 Landsat 系列影像作为分类提取底图数据。深圳处于常年多云区,因此尽量选择冬季影像以避免云量和植被生长对土地利用/覆被分类精度的影响,并且 2 景影像选择相近成像时间。收集到的各期影像都已经进行了几何配准和大气校正等预处理,精度控制在 2~3 个像元以内,基本满足本研究的精度要求。

2 研究方法

2.1 完全约束最小二乘算法的线性光谱混合分解方法

线性光谱混合分解方法适合中分辨率的遥感影像,但是由于无约束最小二乘混合像元分解算法即线性光谱混合模型(linear spectral unmixing)只有一个约束条件,即解译所得不同地表覆被的盖度图结果的和设为 1,所以得到的不透水面盖度图经常会出现负值的情况,很显然这是不合理的。针对此算法提取地物端元丰度出现的局限性,通过完全约束的最小二乘混合像元分解算法(FCLS spectral unmixing)完成对研究区典型地物端元丰度的提取。该方法较好地解决了提取的端元丰度信息出现负值的情况,直接获得每个像元内各种端元的盖度图, DN 值在 0~1 之间,很好的表示了单元间不透水面的程度,并且和为 1。公式如下:

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \epsilon_{i\lambda} \quad (1)$$

式中: $R_{i\lambda}$ 为第 i 个像元在波段 λ 上的反射率; f_{ki} 为第 k 个端元类型在第 i 个像元中所占的比例; $C_{k\lambda}$ 为第 k 个端元类型在波段 λ 上的反射率; ϵ 为残差项。

2.2 精度评估

精度验证使用 Google 高分辨率影像作为参考数据。在 Arcmap 中随机生成 100 个以 1 km 为直径的圆,为样本单元,分别统计解译的每个样本的不透水面比例;将样本进行矢量化并加载到谷歌高分辨率影像上,采用目视解译的方法人工提取不透水面并计算不透水面比例。通过均方根误差(RMSE)来计算提取精度,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中: Y_i 为在高分辨率影像上提取的不透水面比例; X_i 为混合像元分解提取的不透水面比例, n 为样本数。RMSE 可以计算混合像元分解不透水面比例和原始影像不透水面比例之间的差异,并且随着两者的差异减小 RMSE 值下降,所以 RMSE 值越小意味着混合像元分解的精度越高^[15]。

2.3 平均中心和标准差椭圆

不透水面平均中心的计算可以揭示城市迁移和扩张的方向。计算公式为:

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (3)$$

$$y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (4)$$

式中: x 和 y 分别为不透水面平均中心的经纬度; X 和 Y 为算术平均中心; n 为不透水面斑块的个数。计算出每年的深圳市不透水面平均中心,分析深圳市不透水面整体变化方向。

本文采用标准差椭圆(standard deviation ellipse, SDE)衡量城市扩张的方向和时空发展趋势^[16]。其方位角计算公式为:

$$\tan\theta = \frac{A+B}{C} \quad (5)$$

$$A = \left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \right) \quad (6)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i \right)^2} \quad (7)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i \quad (8)$$

式中: θ 为方位角; \bar{x} 和 \bar{y} 为第 i 个像元的中心与不透水面平均中心 x 和 y 经纬度上的偏差。标准差椭圆的长轴和短轴分别由 σ_x 和 σ_y 表示,即:

$$\sigma_x = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \cos\theta - \bar{y}_i \sin\theta)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \sin\theta + \bar{y}_i \cos\theta)^2}{n}} \quad (10)$$

方位角可以表示不同时期不透水面的变化方向,长轴与短轴之间的比例表示不透水面的聚集或破碎程度。比值大于 1 时椭圆扁率较大,此时的不透水面分布具有明显的方向性,分布较为分散;等于 1 时椭圆扁率小,此时的不透水面分布几乎没有方向性,分布较为聚集。

2.4 景观格局指数

本文选择景观格局指数来定量分析不同密度等级的不透水面的变化特征^[17]。其中蔓延度指数(CONTAG)和香农多样性指数(SHDI)可以用来探究景观的扩散程度和异质性,香农多样性指数(SHDI)表示各斑块组成类型均等分布的程度即斑块多样性程度。同时应用斑块密度(PD)和景观形状指数(LSI)来描述不同密度水平下不透水地表的空间破碎度和形状复杂度,应用斑块类型所占景观面积的比例(PLAND)来确定不同时期占优势的不透水面类型,应用斑块聚集指数(AI)来描述不同密度不透水表面的聚集程度。

3 结果与分析

3.1 不透水面时空分布提取结果及其变化分析

以 1979—2020 年 Landsat 遥感影像为数据,基于数据预处理,最小噪声分离变换,纯净像元提取及

端元选择的研究方法,根据完全约束的最小二乘混合像元分解算法对深圳市长时间序列不透水面进行了提取,随后利用高分辨率 Google 影像对提取得到的不透水面进行精度评估,精度验证结果表明,估算结果均方根误差(root mean squar error, RMSE)为 8.94%~13.26%,表明混合像元分解解译具有较好的精度,能够较准确地反映不透水面的空间分布。图 1 是提取结果及其时空分布。

1979—2020 年深圳市不透水面比例快速增长,

表 1 和表 2 是研究区 1979—2020 年不透水面面积、面积占比、变化速率 V 及变化强度 AGR 的计算结果。由表 1—2 和图 1—2 可知研究区近 41 a 不透水面的面积不断增加,占总研究区的比例逐渐增长,但是其增长速度不是均匀的。在 1990—2010 年间增长速率和增长强度分别在 2005 年和 1995 年达到最高,后逐渐变缓,但还是保持着增长的趋势。最终不透水面面积由 1979 年的 18.64 km² 增长至 2020 年的 949 km²,不透水面占整个深圳市的比例也由 0.94% 增至 47.51%。

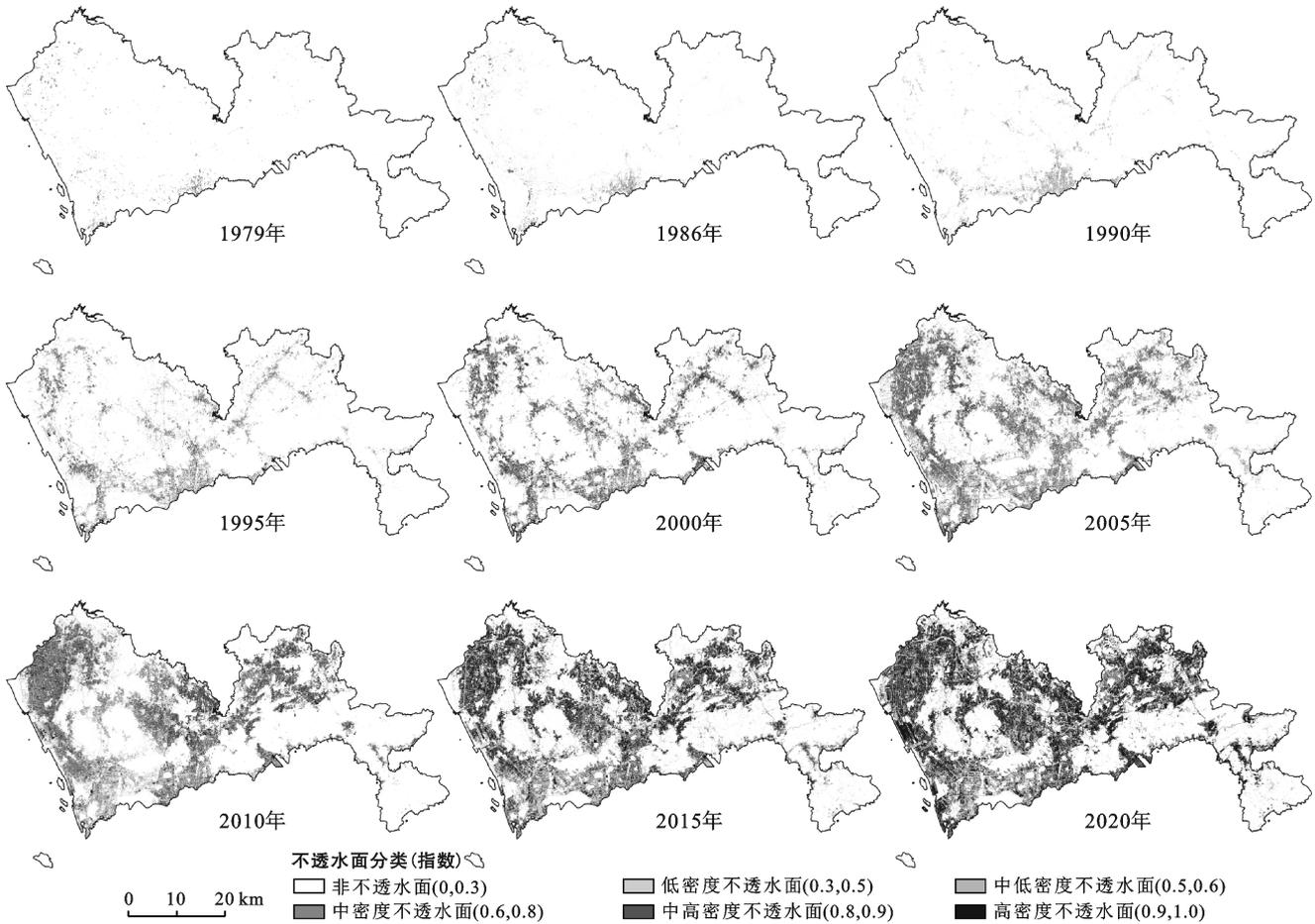


图 1 1979—2020 年深圳市不透水面信息提取结果

表 1 研究区不透水面面积及其变化统计情况

年份	不透水面面积		时期/年	水透水面面积变化	
	面积/ km ²	比例/ %		变化速率/ (km ² · a ⁻¹)	变化 强度/%
1979	18.64	0.94	1979—1986	2.80	0.15
1986	38.25	1.91	1986—1990	6.77	0.18
1990	65.32	3.27	1990—1995	30.78	0.47
1995	219.21	10.97	1995—2000	34.70	0.16
2000	392.73	19.66	2000—2005	39.84	0.10
2005	500.68	29.63	2005—2010	38.54	0.07
2010	784.60	39.28	2010—2015	21.63	0.03
2015	892.76	44.69	2015—2020	11.25	0.01
2020	949.00	47.51			

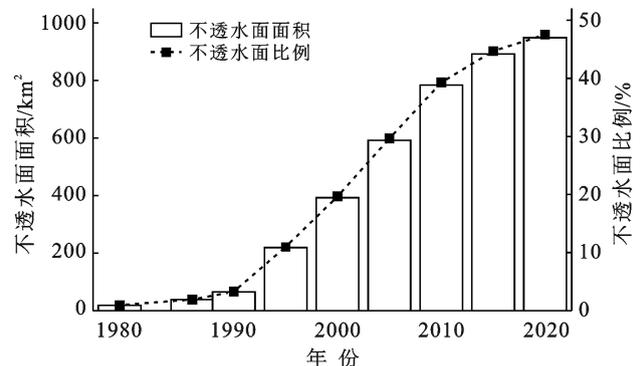


图 2 深圳市不透水面面积变化和 不透水面比例变化

表 2 深圳市各区不透水面变化速率和变化强度

地区	1979—1990 年		1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	变化速率/%	变化强度	变化速率/%	变化强度	变化速率/%	变化强度	变化速率/%	变化强度
宝安区	1.03	0.02	92.58	1.19	123.17	0.12	9.00	0.004
福田区	10.20	0.50	21.39	0.16	4.08	0.01	0.84	0.002
光明区	0.06	0.01	19.95	2.17	49.42	0.24	14.55	0.02
龙岗区	10.65	1.04	89.07	0.70	106.91	0.11	72.03	0.03
龙华区	2.47	0.93	32.61	1.09	51.76	0.15	18.45	0.02
罗湖区	9.79	0.31	6.57	0.05	4.32	0.02	6.78	0.03
南山区	5.37	0.13	38.91	0.39	16.23	0.03	20.47	0.03
坪山区	1.10	0.75	16.73	1.20	29.58	0.16	22.80	0.05
盐田区	1.69	0.61	9.16	0.43	5.45	0.05	6.11	0.04

根据不透水面扩张强度和变化速率的公式计算得到相应的数据(表 1),按陈龙乾等^[18]研究将年均扩张变化速率划分为:高速扩张($>10 \text{ km}^2/\text{a}$),快速扩张($6\sim 10 \text{ km}^2/\text{a}$),中速扩张($2\sim 6 \text{ km}^2/\text{a}$),低速扩张($<2 \text{ km}^2/\text{a}$)。由表 1 可以看出,研究区在 1979—1990 年期间扩张速率较低,为中速、快速扩张,在 1990—2020 年期间均为高速扩张,其中 1990—2010 年期间增长速度最快,到了 2010—2020 年增长速度放缓。同时由表 1 可以看出,扩张强度指数前中后时间段强度差异较大,前期扩张强度指数逐渐升高,至 1995 年达到最高后逐渐下降,并整体呈现逐渐降低的趋势。整体来看扩张强度较后期扩张强度大,前后相差 3 倍有余,这与不透水面扩张速率的变化相符。

研究区内各区的生长有所不同,为了方便研究,根据研究区的变化速率,将 8 个时间段划分为 4 个时间段,分别计算在这 4 个时间段内各个区的城镇用地扩张相关指数,从表 2 可以看出各区城镇用地的扩张速率、程度等变化不尽相同,分异明显。整体来看各区扩张变化也存在明显差距:经济发展较早的地区如福田区、罗湖区,整体的扩张强度和变化速率前后差距较小,盐田区和南山区因为地形限制则前段时间为快速扩张,很快速度转为慢速,其他区在前期也是快速的扩张,2000 年以后还保持着较大的增长趋势,2010 年以后速度下降。

由上分析可以发现,不透水面的变化速率与扩张强度变化总趋势是一致的,均呈现逐渐加快后又放缓的趋势,表明了研究区不透水面面积、变化速率和扩张程度呈明显的正相关关系,即面积增长快的同时变化速率和扩张强度相应较高。通过分析深圳市的城市发展影响因素也不难发现这一变化规律:在 1979—1986 年期间,由于经济特区刚刚建立,经济条件落后的深圳还没有迅速崛起的能力,土地变化不是

短时间内可以剧烈变化的,是一个逐渐增长的过程,所以扩张刚刚起步速率较慢,随着国家政府的政策支持下开始了招商引资、工业区大量建设、房地产投资的快速增长期,大大增加了土地的开发与应用,1986 年后城镇化进程加快,直至 1990—1995 年变化速率达到最大,扩张强度也较前期有了巨大的增长;2000—2010 年,深圳市制定和修订了一系列优惠政策来吸引外国投资,第二、三产业的增长率大大提高,该阶段的不透水面变化速率达到了最高。而随着后期适宜开发的土地基本开发完毕,基础设施也逐渐完备,盲目的扩张城市用地导致了土地供需矛盾的升级以及环境的恶化,在 2010—2020 年时期,深圳新一轮的城市总体规划颁布,放慢城市发展速度,重视土地资源的浪费问题,使得此后的扩张强度在逐渐下降,变化速度放缓。

3.2 城市迁移、扩张方向与空间变化分析

本文利用 9 期不透水面比例数据计算不透水面平均中心(图 3),探究城市迁移和扩张的方向。1979—2000 年,深圳市的不透水面变化具有明显方向性,持续向着东北方向移动,原因是在此期间光明、龙岗、龙华、坪山区以及宝安区的北部城镇化迅速发展,其中坪山区的发展强度非常高,使得不透水面重心不断向北偏东偏移。2000—2010 年,西部沿海地区填海造陆扩大城市面积,同时政策“三轴两带”沟通了深圳市东西地区的联系,全市城镇用地重心向西方向迁移。2010 年后,随着大鹏新区的建立,惠深沿海高速连接西东,大大促进了深圳北部的发展,发展速度快于中部和西部,使得不透水面重心在此时期向东偏移。但是由于东部的地形原因,城市扩张到一定程度后就变化很小,而西部已经发展成熟的宝安、南山区等填海造陆扩张了城市面积,并且在原有基础上发展为更为高密度的不透水面,所以在 2015 年后不透水面重心又向西偏移。

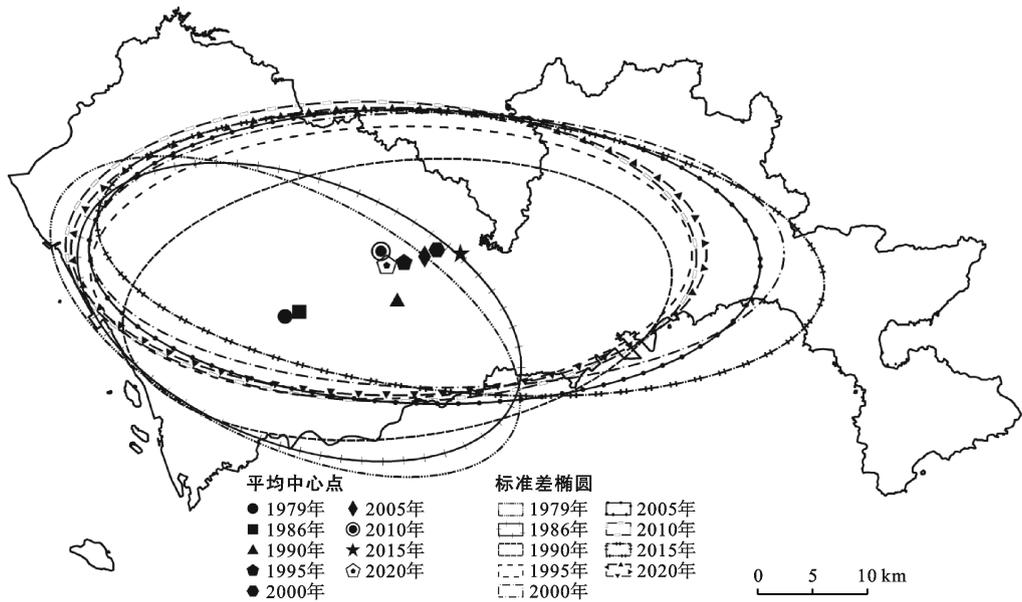


图 3 深圳市不透水面平均中心点和标准差椭圆

本文利用 9 期的不透水面数据计算标准差椭圆,分析城市的空间变化。1979—1990 年,深圳市的不透水面发展方向变化明显,由表 3 和图 3 可知,标准差椭圆的方位角在 1979—1990 年期间由 116.86°下降到 83.26°,1990 年之后开始上升,到 2015 年上升至 95.74°,表明 1979—1990 年深圳市不透水面长轴先由西北—东南指向向东—西指向移动,1990 年之后不透水面长轴主要沿着东—西方向延伸。

表 3 不同时期标准差椭圆参数

年份	长轴/m	短轴/m	方位角/(°)	长短轴比
1979	23 237.47	11 543.35	116.86	2.01
1986	21 166.33	12 131.34	111.44	1.74
1990	25 115.56	12 665.91	83.26	1.98
1995	27 388.29	12 470.50	90.35	2.20
2000	31 608.38	12 601.71	90.54	2.51
2005	30 553.42	13 478.51	91.59	2.27
2010	28 711.13	13 732.69	91.50	2.09
2015	33 226.64	12 729.91	95.74	2.61
2020	28 912.37	13 193.58	92.77	2.19

整体来看东—西剖面是深圳市不透水面发展的主要方向。1979—2000 年,标准差椭圆长短轴差距逐渐变大,长轴从 23 237.47 m 增长到 31 608.38 m,短轴从 11 543.35 m 增长到 12 601.71 m,比率变化为总体上升,椭圆扁率逐渐增大,表明不透水面分布的方向性逐渐明显,且分布由小面积的聚集变为大范围分散。2000—2020 年,除 2010—2015 年深圳东部大鹏新区的发展导致标准差椭圆扩大外,总体呈现标准偏差椭圆的长轴持续缩小,短轴逐渐增大,长轴从 31 608.38 m 下降至 28 912.37 m,短轴从 12 601.71 m

增长到 13 193.58 m,长轴与短轴的比率变化为波动下降,表明深圳各地不透水面发展的聚集趋势慢慢增加。

3.3 不透水面景观格局分析

表 4 为深圳市 1979—2020 年期间的不透水面景观格局指数。由表 4 可以看出,深圳市的不透水面斑块个数(NP)呈不断增加的趋势,在 1979—1990 年期间变化较慢,在 1990—2010 年期间变化迅速。整体不透水面斑块密度(PD)由 1979—1990 年期间快速增长后逐渐下降,说明前期发展零散而迅速,不透水面景观破碎程度高,后期随着斑块数量不断增长,城市发展不断扩大,斑块相互连接,不透水面景观破碎程度逐渐降低,团聚程度提高。同时斑块聚集指数(AI)显示除 1979 年团聚程度较高外,此后聚合度呈不断上升趋势最终聚合度达到了 79.29,相比一开始的 86.61 还是有所降低的。1979 年的不透水面范围小而聚集,聚合度高,随着全市范围的不断发展,扩大到现在的面积,聚合度较高,结构连通性较好。香农多样性指数(SHDI)增大,说明各拼块类型在景观中呈均衡化趋势分布且景观趋于丰富多元化;香农均匀度指数(SHEI)其值趋近于 1 时说明景观中没有明显的优势类型且各斑块类型在景观中均匀分布,由表 4 可以看出 1979—2015 年香农均匀度指数逐渐上升趋近 1,各斑块类型在景观中的均衡化趋势增加。由表 4 及图 4 可知,深圳市不透水面景观的蔓延度 CONTAG 指数总体呈现波动下降,不透水面 SHDI 与 SHEI 总体呈现波动上升,说明各等级的不透水面景观整体仍呈增长态势,不同不透水面类型的多样性呈增加趋势,异质化程度增加,逐渐趋于均衡化。

表4 1979—2020年深圳市不透水面景观格局指数

年份	NP	PD	CONTAG	SHDI	SHEI	AI
1979	3 270	175.55	46.00	1.21	0.75	86.61
1986	22 258	582.00	46.35	1.25	0.77	71.98
1990	38 091	583.17	38.36	1.41	0.87	72.45
1995	125 830	573.93	30.64	1.55	0.96	71.77
2000	159 968	407.32	27.91	1.59	0.98	74.80
2005	242 345	438.30	28.49	1.58	0.98	74.32
2010	254 796	324.74	29.69	1.54	0.95	76.45
2015	251 506	281.72	28.56	1.59	0.99	78.13
2020	297 117	310.66	32.78	1.50	0.93	79.29

注:NP为不透水面斑块个数;PD为不透水面斑块密度;CONTAG为蔓延度指数;SHDI为香农多样性指数,用来探究景观的扩散程度和异质性;SHEI为香农多样性指数,表示各斑块组成类型均等分布的程度即斑块多样性程度;AI为斑块聚集指数。下同。

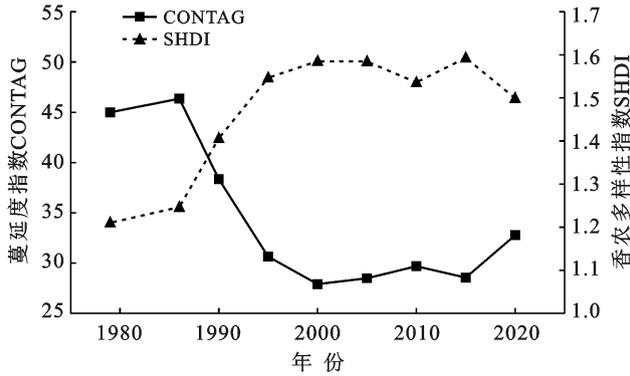
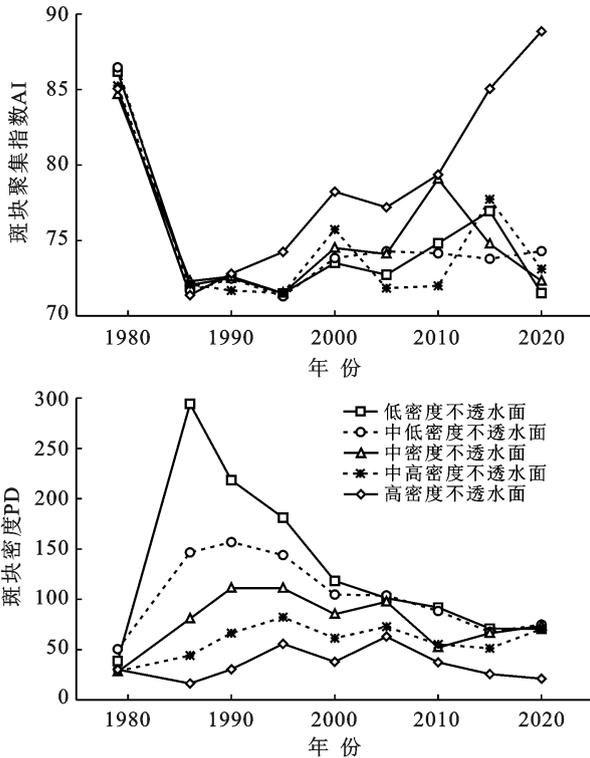


图4 1979—2020年深圳市不透水面CONTAG指数与SHDI指数变化

组分空间构型分析(图5)表明,1979年不透水面的AI指数较高,说明其聚集程度高,但是同时PD和



LSI指数可以看出不透水面密度与形状复杂度较低,此时不透水面少而聚集。低、中低密度不透水面景观在1979—1986年有了较大幅度的增长,特别是低密度不透水面PD指数突然增大,斑块密度达到最大,同时AI显示1979—1986年聚集度剧烈下降,说明此时低、中低密度不透水面成为密度等级中最为破碎的景观,之后PD开始逐渐下降,AI波动上升,表明不透水面景观不断发展,聚集程度也在不断提高。中高、高密度不透水面景观的PD保持稳定,小幅度增加,破碎化程度变化小;除高密度不透水面景观外其他等级不透水面的LSI保持增长的趋势,表明这4种密度不透水面景观形状的复杂性逐渐增长,但是高不透水面景观的LSI以2005年为转折点前期增长后期下降,表明高密度不透水面景观的形状逐渐变得复杂后又转为简单。PLAND指数显示在1979—1986年中低密度不透水面比较大幅度增长,在不透水面总体中占到51.07%,随后逐渐下降,高密度不透水面占比在波动中逐渐上升,在2020年达到39.75%,其他密度不透水面的占比在小范围内浮动,总体变化并不大。从斑块连接情况来看,高密度不透水面AI保持较高水平且缓慢增长并在2020年达到88.86,其他盖度不透水面的AI随有阶段性的小幅度上升,但总体指数不高,表明高密度不透水面景观聚集度在不断增强,其他密度不透水面景观的聚集度变化不大,只有小幅度的波动,聚集度以及连通性较高密度不透水地表景观弱。

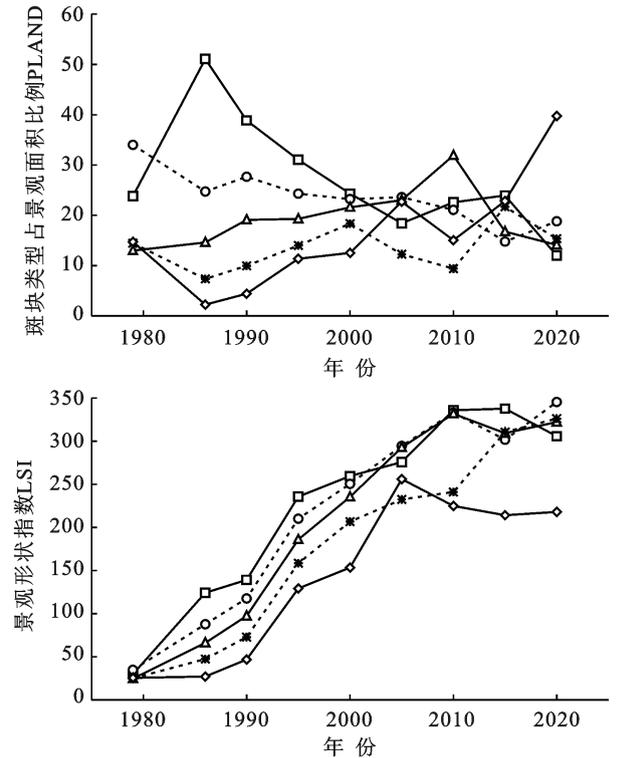


图5 1979—2020年深圳市不透水面景观格局变化

4 结论

本文运用完全约束最小二乘算法混合像元分解得到深圳市不透水面比例数据集,并应用不透水面数据计算其变化速率与强度,利用平均中心、标准差椭圆景观格局指数的方法进行了深圳市不透水面发展变化分析。

(1) 1979—2020年深圳市不透水面不断扩张,但整体扩张呈逐渐加快又变缓的趋势,1990—2010年增长速率和增长强度最高,后逐渐变缓。

(2) 1979—2000年,深圳市不透水面发展具有明显方向性,持续向着东北方向移动,随后2000—2020年,全市城镇用地重心延东西方向移动,变化较前期较小。不透水面分布由小面积的聚集变为大范围的分散,后随着不透水面密度逐渐增加而聚集度上升。

(3) 1979—2020年,深圳市不同不透水面类型的多样性呈增加趋势,异质化程度增加,逐渐趋于均衡化;低、中低密度不透水面景观逐渐从最为破碎的且占较大比例的景观开始逐渐变得较为团聚,并且面积逐渐不占优势;中、中高密度不透水面景观形状变得越来越复杂,聚集度不高;高密度不透水面景观面积不断增长,连接性在逐渐增强。

研究表明,高密度不透水面聚集度逐渐增长,但高聚集度不透水面与地表径流有显著的相关性^[19],中高密度区和高密度区不透水面对城市热环境影响最大^[20],故未来在城市发展中要。本文从不透水面比例的时空变化分析了深圳市的发展变化规律,面向实际的应用还存在一些不足,将来需要对不透水面与其他生态环境的关联性方面展开深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 祝鹏.基于SVM的GPS高程拟合研究[D].江西抚州:东华理工大学,2014.

[2] Weng Qihao. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,117:34-49.

[3] 张鸿生,林殷怡,王挺,等.融合光学与雷达遥感数据的城市不透水面提取方法[J].*地理与地理信息科学*,2018,34(3):39-46.

[4] Treitz P M, Howarth P J, Gong Peng. Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992,58(4):439-448.

[5] Pal M, Mather P M. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,86(4):554-565.

[6] Kavzoglu T, Mather P M. The use of back propagating

artificial neural networks in land cover classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003,24(23):4907-4938.

[7] Mazzoni D, Garay M J, Davies R, et al. An operational MISR pixel classifier using support vector machines [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,107(1/2):149-158.

[8] Yang Chen, Bruzzone L, Sun Fengyue, et al. A fuzzy statistics-based affinity propagation technique for clustering in multispectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010,48(6):2647-2659.

[9] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995,16(12):2165-2185.

[10] Wu Changshan, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,84(4):493-505.

[11] Rashed T, Weeks J R, Roberts D, et al. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple endmember spectral mixture models [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003,69(9):1011-1020.

[12] Xu Hanqiu. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISD) [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010,76(5):557-565.

[13] Deng Chengbin, Wu Changshan. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,127:247-259.

[14] 李爽,钱乐祥,丁彦彦.遥感影像土地覆盖(LC)专题信息提取方法研究[J].*中国土地科学*,2002,16(2):30-33.

[15] 陈良.机载GNSS/SINS组合精密导航关键技术研究[D].湖南长沙:国防科学技术大学,2013.

[16] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse [J]. *American Journal of Sociology*, 1926,32(1):88-94.

[17] 邬建国.景观生态学中的十大研究论题[J].*生态学报*,2004,24(9):2074-2076.

[18] 陈龙乾,郭达志,胡召玲,等.城市扩展空间分异的多时相TM遥感研究[J].*煤炭学报*,2004,29(3):308-312.

[19] 要志鑫,孟庆岩,孙震辉,等.不透水面与地表径流时空相关性研究:以杭州市主城区为例[J].*遥感学报*,2020,24(2):182-198.

[20] 蒋晓燕.各级不透水面百分比区间城市热环境影响分析[J].*能源与环境*,2020(4):48-49.