

深圳市不透水表面的遥感监测与时空格局

刘珍环^{1,2,3}, 王仰麟³, 彭 建³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业信息技术
重点实验室, 北京 100081; 3. 北京大学城市与环境学院 北京 100871)

摘要: 定量监测城市不透水表面扩展过程, 是分析城市景观格局动态, 深入剖析城市地区空间镶嵌体内部异质性景观相互转化的重要基础。以深圳市为例, 通过定量划分城市不透水表面等级体系, 计算不透水表面的转移矩阵与景观格局指数, 分析不透水表面的时空动态, 结果表明: 1990~2005年间, 高盖度及极高盖度的不透水表面持续增加, 中盖度及低盖度不透水表面先增加后减少, 而自然地表及极低盖度的不透水表面则为先减少后恢复, 反映了城市化进程对城市地表覆被的结构性影响。景观格局变化显示景观多样性程度较高, 且经历了低—高—低—高的变化; 斑块在1990年以自然地表为主, 1995年以后以中盖度等级为主, 高盖度等级显著增加。自然地表和中等盖度的不透水表面变化分别主导着前期和中后期的变化过程。城市建设的迅速扩张, 将林地、农田、水体及滩涂等自然地表快速地转变为不同功能的建设用地, 主导着不透水表面等级分布的梯度性变化。

关键词: 不透水表面; 空间格局; 时间变化; 深圳市

文章编号: 1000-0585(2012)08-1535-11

1 引言

目前全球约有50%左右的人口居住在城市地区, 人口在城市地区聚集, 带来了城市地表覆被快速变化, 形成典型的人工景观^[1]。城市化既是一种社会过程, 又是景观的物理变化过程, 许多受全球化影响的重要变化都发生在城市地区^[2]。城市扩展以及由此引起的不透水表面扩展, 对区域乃至全球尺度的生物地球化学循环与生物多样性变化产生显著影响, 也是城市人口分布与经济社会格局变化的影响因素^[3], 城市景观格局和动态已成为国内外关注的热点问题^[4,5]。城市景观是由一系列的建筑物、道路、草地、林地、裸露土地、水体等地表景观组成^[6]。城市景观是全球重要的景观组成, 城市景观变化是气候变化、环境变化和生态系统变化的重要影响因素^[7,8]。我国城市化过程迅速, 地表覆被变化显著, 定量评价城市景观时空格局变化, 对于分析城市化过程对区域环境变化、生物多样性变化, 乃至区域气候变化都具有重要的现实意义^[9,10]。

遥感监测城市地表覆被变化的传统方法主要有两种类型: (1) 应用中分辨率影像, 采用分类体系, 进行硬分类进而分析其格局与变化特征。该方法的缺陷是因像元分辨率不高, 存在混合像元问题, 在变化分析时容易造成误差累积, 降低了结果的可靠性^[11]; (2) 应用高分辨率影像进行影像分类变化监测。高分辨影像的应用提高了地物的分辨率, 但解

收稿日期: 2011-08-12; 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101170、40635028)

作者简介: 刘珍环 (1982-), 男, 江西泰和人, 博士, 主要从事景观生态与土地利用的相关研究。

E-mail: zhenhuanliu@gmail.com

译费时费力,且难以同时进行大幅度多时相的研究,限制了应用范围^[12,13]。为综合两种遥感影像的优势,应用光谱混合模型获取城市地表覆被组分的软分类方法受到重视,该方法克服了中分辨率影像分辨率不高的劣势,将变化监测推进到亚像元尺度,同时兼顾监测的时间跨度与范围^[14,15]。但是,如何将光谱混合模型获取到的景观组分结果应用于城市景观格局变化的分析中尚处于探索阶段^[16]。不透水表面 (Impervious Surface, 简称 IS) 是城市覆被的直观表征,主要由城市中的道路、停车场、广场及屋顶等建筑物组成^[17]。不透水表面指数 (Impervious Surface Area, 简称 ISA) 可以通过线性光谱混合模型获得,值域为 $[0, 1]$,用不透水表面指数表征的城市景观组分,用百分比表示即为不透水表面盖度 (Impervious Surface Cover, 简称 ISC)。根据深圳市的不透水表面盖度的分布状况,采用分级将按照比例分为极高盖度 (FDISA, $ISC > 85\%$)、高盖度等级 (HDISA, $65\% < ISC \leq 85\%$),中等盖度等级 (MDISA, $40\% < ISC \leq 65\%$),低盖度等级 (LDISA, $25\% < ISC \leq 40\%$) 极低盖度等级 (VLISA, $10\% < ISC \leq 25\%$) 以及自然地表 (NOISA, $ISC \leq 10\%$),将不透水表面组分转为盖度分级。因此,本研究尝试将景观组分进行分级处理,综合景观格局指数与转移矩阵方法,监测城市地表覆被的时空格局变化。

2 研究区概况与数据来源

深圳市位于广东省中南部沿海,东临大亚湾,西濒珠江口,北与东莞市和惠州市接壤,南与香港特别行政区仅一河之隔。陆地范围为东经 $113^{\circ}45'44'' \sim 114^{\circ}37'21''$,北纬 $22^{\circ}26'59'' \sim 22^{\circ}51'49''$ 。深圳是国家副省级计划单列城市,于 1979 年建市,1980 年建立经济特区。三十年来,从一个昔日人口只有 33 万、GDP 为 2.7 亿元的边陲小镇发展为 2008 年全市人口 876.83 万人、GDP 为 7806.54 亿的集工业、贸易、旅游、金融于一体的初具规模的现代化城市。大规模的工业化和城市化过程是深圳改革开放以来经济发展的主要动力。从 80 年代中期到 90 年代中期十年左右的时间,深圳迅速完成了从传统的农业地区向新兴的高速城市化地区转化的过程。为当前分析中使用的数据及来源,其中遥感影像主要为 4 个时期 8 景的 Landsat TM/ETM+ 影像,轨道号 Path/Row 分别为 121/44 (数据获取时间分别为 1990.11.23; 1995.11.17; 1999.12.23; 2005.03.05) 和 122/44 (数据获取时间分别为 1990.12.23; 1995.12.30; 2000.01.02; 2005.11.23) 左右两景影像拼接覆盖全境,辅助数据有 DEM (10m 分辨率)、土地利用调查及航片等数据。

3 研究方法

3.1 不透水表面遥感方法

线性光谱分离技术是混合光谱模型中的重要技术手段之一,主要处理流程包括几何校正、辐射校正、图像裁切、最小噪音分离、纯像元处理、端元收集、线性光谱分离、结果的检验与校正等。Ridd 认为城市景观除水体外,主要由植被、土壤、不透水表面三种典型覆被景观组成,三者 in 遥感影像特征上表现为此消彼长的特征,因此三者可以构成一个典型的植被—不透水表面—土壤 (Vegetation—Impervious surface—Soil, 简称 V—I—S) 城市景观组分三角模型^[18]。不透水表面在影像光谱特征上表现为高反射率地表与低反射率地表的组合^[19]。端元收集是线性光谱分离中最为关键的一步,通过比较光谱特征,选择出高反射率端元、低反射率端元、植被端元及土壤端元,确定典型地物波谱特征,应用最小二乘法分解像元,线性光谱分离模型的数学表达式为^[20]:

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

其中 $R_{\lambda i}$ 为第 i 个像元在 λ 波段的反射率； $C_{k\lambda}$ 为第 k 个基本组分在 λ 波段的反射率， f_{ki} 第 k 个基本组分在第 i 个像元中所占的面积比例； $\epsilon_{\lambda i}$ 为残差值。其中，水体与低反射率端元具有显著的异物同谱特征，需要采用水体过滤过滤。解译结果的精度评价及结果检验见参考文献[21]。

3.2 景观格局分析

为了定量分析不透水表面空间格局的变化特征，选择景观格局指数进行分析。景观格局对空间的度量一般包括三个层次的内容，即斑块形态特征、斑块空间构型特征和景观整体特征。本研究分别选取平均斑块面积（MPS）、面积加权平均斑块分维数（AWMPFD）表征斑块形态特征，景观聚集度指数（CONTAG）及斑块聚集度指数（AI）表征斑块组分空间构型，景观 Shannon 多样性指数表征景观整体特征，相关指数内涵参见文献[22]。

3.3 转移矩阵方法

为计算不透水表面盖度的转移变化，将不同时期的不透水盖度等级图进行空间叠加运算，最终求出不同时期的不透水盖度等级的转移矩阵。对任意两期不透水盖度等级图 $A_{m \times n}^k$ 和 $A_{m \times n}^{k+1}$ ，按照地图迭代数学方法，可以求得由 k 时期到 $k+1$ 时期的不透水表面盖度等级变化图， $C_{m \times n}$ 表现了不透水表面盖度等级及其空间分布，计算公式如下^[23,24]：

$$C_{m \times n} = A_{m \times n}^k \times 10 + A_{m \times n}^{k+1} \quad (\text{不透水盖度等级数} < 10 \text{ 时适用}) \quad (2)$$

据此可以求得不透水表面盖度等级互相转化的数量关系的原始转移矩阵，然后根据原始转移矩阵求出两个时期不同不透水表面盖度等级之间的相互转化率，得到不透水表面盖度等级转移矩阵表。表中，行表示的是 k 时期的 i 种不透水表面盖度等级，列则表示 $k+1$ 时期 j 种不透水盖度等级。

$$B_{ij} = \frac{A_{ij} \times 100}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \quad (3)$$

式中 B_{ij} 表示 k 时期 i 种不透水表面盖度等级转变为 $k+1$ 时期 j 种不透水表面盖度等级的比例，用以说明 k 时期的转出变化比例^[23]；

$$C_{ij} = \frac{A_{ij} \times 100}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \quad (4)$$

该式中 C_{ij} 表示 $k+1$ 时期的 j 种不透水盖度等级中由 k 时期的 i 种不透水盖度等级转化而来的比例，用以说明 $k+1$ 时期的转入变化比例^[23]。

4 结果分析

4.1 不透水表面盖度总体特征

不透水表面盖度等级空间分布如图 1。各研究时段内，深圳市不透水表面盖度等级的基本特征变化非常显著，各类盖度等级随时间的推移呈现不同程度的增减：高盖度、极高盖度等级的不透水表面持续增加；中盖度等级的不透水表面则先增加后略减；低盖度等级的不透水表面呈现增减的波动；极低盖度和近自然地表的不透水表面迅速减少，至研究末期略有回升（表 1）。低于 10% 盖度的不透水表面在 1990~2005 年间减少了 28.86%，大幅地减少使得地表覆盖类型趋于单一化。城市核心区的高密度建设虽然只导致极高盖度等

级的不透水表面增长 1.64%，但面积却增长了 32km²。以城市核心区及各镇为次中心的
城市功能区与工业园区推动了中等盖度和高盖度等级的不透水表面增长，研究期内分别增
长了 16.67%和 18.39%。1990 年不透水表面盖度小于 40%的面积比例占总面积比例的
80.89%；1995 年下降至 64.51%，尽管下降的比例只有 16.38%，但结构已发生明显的
变化，即以极低盖度的不透水表面分布为主；2000 年已下降至只占 42.69%，且比例结构
中以低盖度等级为主；2005 年略有回升占总面积的 44.18%，但结构特征与 2000 年类似。
这是因为城市建设的迅速扩张，将林地、农田、水体及滩涂等自然地表快速地转变为不同
功能的建设用地，致使不透水表面等级分布结构的差异性变化。

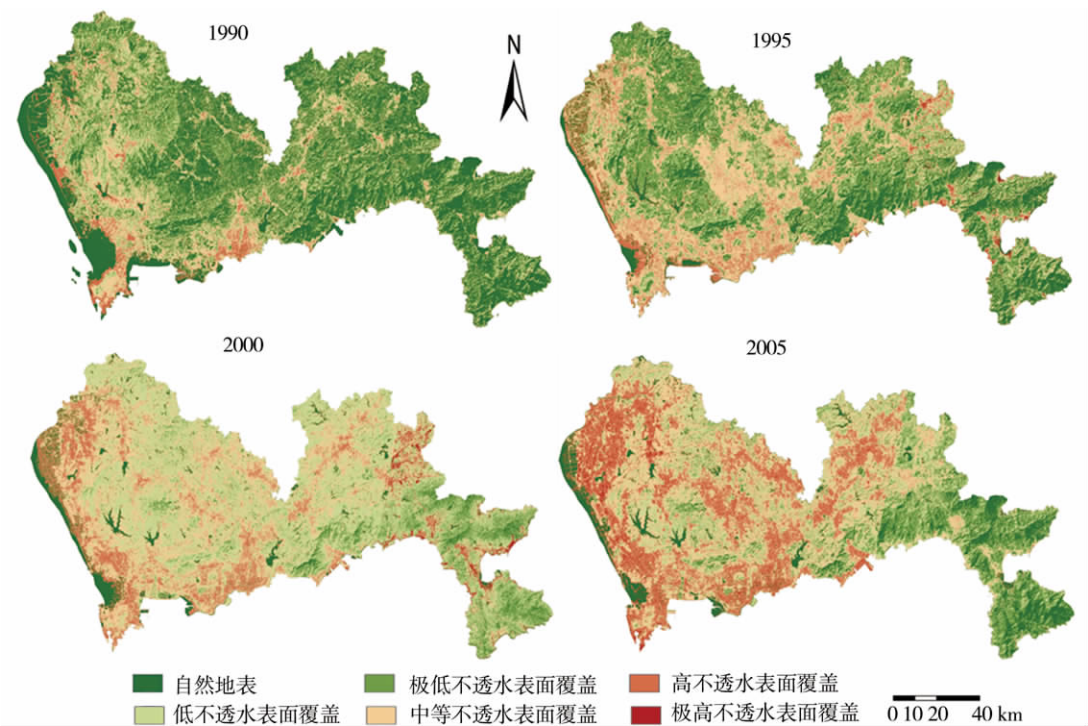


图 1 1990~2005 年深圳市不透水表面盖度等级图

Fig. 1 The distribution of impervious surface area gradation of Shenzhen, 1990-2005

表 1 1990~2005 年深圳市不透水表面等级变化总体特征
Tab. 1 Impervious surface cover change in Shenzhen, 1990-2005

不透水表面 盖度等级	1990		1995		2000		2005	
	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)
NOISA	801	41.06	448	22.91	121	6.20	238	12.20
VDISA	397	20.35	493	25.22	194	9.93	249	12.77
LDISA	380	19.48	320	16.38	519	26.55	375	19.21
MDISA	290	14.86	518	26.51	874	44.75	616	31.53
HDISA	81	4.14	168	8.60	217	11.12	440	22.53
FDISA	2	0.12	7	0.38	28	1.44	34	1.76

4.2 不透水表面盖度格局变化

图 2 表明，1990~2005 年深圳市不透水表面景观多样性程度较高，景观多样性指数经历了低—高—低—高的变化过程。各盖度等级经历了主体景观的更替过程，即从自然地表与极低盖度等级占主导的景观格局，到 1995 年各种盖度等级面积较为接近，到 2000 年演变为以中高盖度不透水盖度等级占主导，至 2005 年再次均匀的格局变化过程。

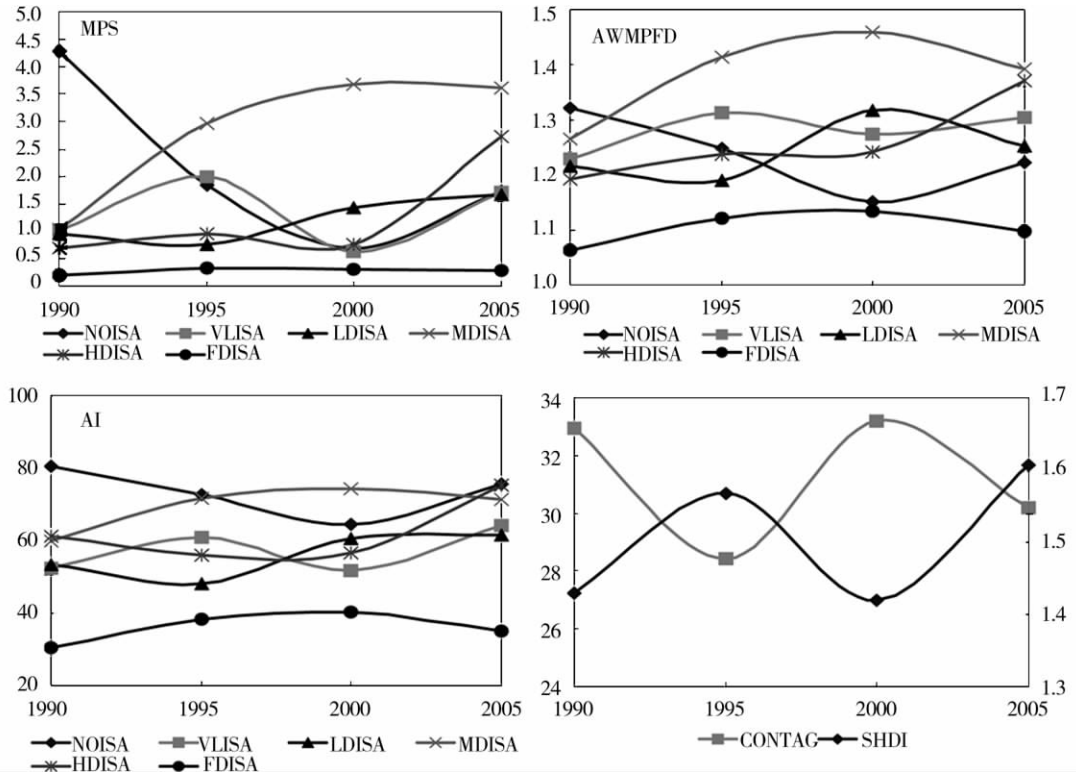


图 2 1990~2005 年深圳市不透水表面盖度等级的景观格局变化

Fig. 2 Landscape pattern change of ISA classes in Shenzhen in 1990-2005

组分空间构型分析表明，不透水盖度等级的斑块始终较为破碎，团聚程度低。类型聚集度变化较为显著，自然地表表现为较高的聚集度，研究期内总体趋势降低，与该盖度等级的面积比例变化特征一致；极低盖度类型的团聚程度不如自然地表高，但波动不大，以 2005 年最高，经历了低—高—更低—更高的变化；低盖度等级类型的团聚程度中等，以 1995 年最低，但之后有所上升，整体趋势表现为聚集度增加；中盖度类型的聚集程度持续增长；高盖度类型的聚集程度先降低然后升高，2005 年到达聚集度最高；极高盖度类型的聚集程度先升后降，2000 年最高；不透水盖度等级的聚集度变化表明了人为干扰景观的波动过程。

斑块形状特征表明，1990 年自然地表类型斑块形状占优，1995 年以后为中盖度类型，但高盖度等级在 2005 年亦有较多大斑块，仅次于中等盖度类型。自然地表类型的斑块形状由大变小，其中 2000 年达到最小；极低盖度类型斑块形状经历了小—最大—最小—大的变化过程，1995 年斑块特征最大；低盖度类型形状 1990 年及 1995 年比较破碎，2000

年以后斑块形状有所增加；中等盖度类型斑块形状一直保持增加，1995 年以后已是全市最为主要的大斑块类型；高等盖度类型的斑块形状指数 2000 年以前比较低，经历了先升后降，2005 年已是全市第二大等级类型，极高盖度类型一直保持小斑块、低分维数特征。

分维数分析的结果表明 1990 年的面积加权平均斑块分维数最大的盖度等级是自然地表，1995 年以后为中等盖度等级，说明地表覆被干扰经历由自然到人为的转变。极高盖度等级斑块形状最为简单、规则，景观分维数相应较低。1990~2000 年时段内，各个等级的不透水表面斑块变化不规则，说明人为干扰活动无序化增强；2000~2005 年时段内，高、极高盖度的面积加权平均斑块分维数有所降低，说明人为干扰活动进入调整，有序化增强。自然地表迅速萎缩，2000 后有所恢复。而中盖度斑块持续增长。城市化过程所导致的非农用地的迅速扩展，农业用地与自然植被之间转换，非农用地内部结构的调整，多样化、复杂化的土地利用变化过程的是导致不透水表面盖度等级的空间景观格局变化的主要原因。

4.3 不透水表面盖度转移矩阵

分析深圳市 1990~1995 年、1995~2000 年、2000~2005 年三个时段的不透水表面盖度等级转移矩阵（表 2~表 4），可以得到以下结论：（1）早期（1990~1995 年）的不透水表面变化表现为低盖度、极低盖度及自然地表面积减小，中盖度、高盖度及极高盖度面积增加，其中极高盖度、高盖度的主要来自于低盖度及中盖度的转入；而中盖度的主要来自于自然地表及极低盖度的转入。NOISA 是所有不透水表面盖度大于 10% 的等级的主要输入类型，主要是因自然地表的土地利用功能人工改变直接导致不透水表面盖度的增加。

表 2 1990~1995 年深圳市不透水表面盖度等级转移矩阵（单位：hm², %）
Tah 2 Impervious surface cover classes transition matrix of Shenzhen, 1990-1995

1990 \ 1995						
	NOISA	VLISA	LDISA	MDISA	HDISA	FDISA
NOISA	27903.42	16524.18	9834.12	17092.26	7092	342.45
B	35.42	20.97	12.48	21.69	9	0.43
C	63.89	34.1	30.71	32.99	42.19	47.04
VLISA	8275.59	14215.68	8039.7	7929.81	1476.27	70.83
B	20.68	35.53	20.1	19.82	3.69	0.18
C	18.95	29.33	25.11	15.3	8.78	9.73
LDISA	4796.82	11862.54	9022.86	9929.88	2034.18	102.33
B	12.71	31.43	23.9	26.31	5.39	0.27
C	10.98	24.48	28.18	19.16	12.1	14.06
MDISA	2218.68	5482.71	4597.29	12412.08	3884.85	161.55
B	7.72	19.07	15.99	43.16	13.51	0.56
C	5.08	11.31	14.36	23.95	23.11	22.19
HDISA	445.32	366.57	509.13	4347.36	2269.89	49.68
B	5.57	4.59	6.37	54.42	28.42	0.62
C	1.02	0.76	1.59	8.39	13.5	6.82
FDISA	32.94	8.37	17.28	106.38	53.28	1.17
B	15.01	3.81	7.88	48.48	24.28	0.53
C	0.08	0.02	0.05	0.21	0.32	0.16

表 3 1995~2000 年深圳市不透水表面盖度等级转移矩阵 (单位: $\text{hm}^2, \%$)

Tah 3 Impervious surface cover classes transition matrix of Shenzhen, 1995-2000

<div>2000 1995</div>	NOISA	VLISA	LDISA	MDISA	HDISA	FDISA
NOISA	6542.37	10189.08	15162.75	10136.88	1207.98	427.32
B	14.98	23.33	34.72	23.21	2.77	0.98
C	57.16	53.03	29.43	11.65	5.6	15.52
VLISA	812.34	4402.35	17749.89	23893.83	1370.88	240.39
B	1.68	9.08	36.62	49.3	2.83	0.5
C	7.1	22.91	34.45	27.47	6.35	8.73
LDISA	625.14	2468.88	9676.89	17216.37	1737.09	299.88
B	1.95	7.71	30.22	53.76	5.42	0.94
C	5.46	12.85	18.78	19.79	8.05	10.89
MDISA	1435.23	1789.29	7923.42	29082.6	10816.29	764.28
B	2.77	3.45	15.29	56.13	20.88	1.48
C	12.54	9.31	15.38	33.43	50.13	27.76
HDISA	1923.39	341.64	957.06	6475.5	6236.37	863.64
B	11.45	2.03	5.7	38.55	37.13	5.14
C	16.8	1.78	1.86	7.44	28.9	31.37
FDISA	108	21.6	47.16	180.18	208.8	157.5
B	14.93	2.99	6.52	24.91	28.87	21.78
C	0.94	0.11	0.09	0.21	0.97	5.72

表 4 2000~2005 年深圳市不透水表面盖度等级转移矩阵 (单位: $\text{hm}^2, \%$)

Tah 4 Impervious surface cover classes transition matrix of Shenzhen, 2000-2005

<div>2005 2000</div>	NOISA	VLISA	LDISA	MDISA	HDISA	FDISA
NOISA	7122.69	716.13	877.14	1714.86	1410.12	205.2
B	59.13	5.94	7.28	14.24	11.71	1.7
C	30.03	2.87	2.34	2.79	3.21	5.98
VLISA	6326.28	6468.03	3291.3	2429.46	796.05	52.56
B	32.67	33.4	17	12.55	4.11	0.27
C	26.67	25.95	8.77	3.95	1.81	1.53
LDISA	4453.65	11322.27	16028.37	15565.95	4222.35	240.57
B	8.59	21.84	30.92	30.03	8.15	0.46
C	18.78	45.43	42.73	25.29	9.6	7.01
MDISA	3761.91	5606.01	15463.8	36399.78	24628.41	1517.67
B	4.31	6.42	17.7	41.66	28.19	1.74
C	15.86	22.49	41.23	59.14	55.99	44.2
HDISA	1582.83	569.88	1285.83	4391.91	12536.01	1348.83
B	7.29	2.62	5.92	20.22	57.73	6.21
C	6.67	2.29	3.43	7.14	28.5	39.28
FDISA	470.97	241.47	563.04	1051.56	393.66	68.85
B	16.88	8.66	20.18	37.7	14.11	2.47
C	1.99	0.97	1.5	1.71	0.89	2.01

转移特征表现为低盖度等级（盖度值低于 40%）之间的相互转移，以及高盖度等级（盖度值高于 65%）之间的相互转移，而低盖度与高盖度等级转移主要为 NOISA 向 HDISA 和 FDISA 的单向转移。有两种因素导致这种转移过程的变化，来自于低密度建筑物的快速扩展和地表自然覆盖物剥离后花岗岩裸露和植被覆盖降低。

（2）中期（1995~2000 年）的不透水表面变化最为剧烈，这一时期的主要变化等级为 MDISA。中等盖度的不透水表面的转移主导着深圳市的不透水表面变化，说明大量具有中等密度不透水表面的建设用地产生，这一阶段是深圳市快速城市化过程中的最为急剧的阶段，大量的工业厂房、居住用地兴起。低盖度向中盖度转移的单向转移，和中盖度向高盖度和极高盖度的单向转移，是快速城市化过程的典型特征，说明城市中心区的集聚效应显现，大型商业区和城市居住区开始成规模，不透水表面受城市快速扩张呈现点一线的多中心格局。自然地表及极低盖度等级面积的高速向其它高盖度等级转出，值得关注的是 NOISA 的转入主要来自 MDISA 和 HDISA，因大量的沿海养殖基地被填埋为待建用地，原先由中高盖度组成的海水养殖鱼塘的基岸迅速减少。

（3）后期（2000~2005 年）的不透水表面变化表现为：MDISA 依然是变化的主要等级，几乎所有的等级类型都与之有大比例的转入或是转出，但高盖度等级的转入比例大幅增长。中低盖度（盖度值小于 40%）向更低盖度的转化有了大幅的增长，伴随的是区域生态质量的好转，植被盖度的恢复，不透水表面盖度的集中，大挖大建的快速扩展时期已经结束。NOISA 和 VLISA 的转入比例明显高于转出比例；此外，盖度值大于 65% 的盖度类型的集聚，增长幅度非常显著。HDISA 和 FDISA 的转入比例明显高于转出比例，例如 MDISA 转为 HDISA 比 HDISA 转为 MDISA 高 35.77%。这是典型的快速城市化后调整过程，不透水表面沿着在快速城市化过程时期（中期，1995~2000 年）形成的点一线格局在核心城区、次中心地区和主要交通干线两边形成聚集，大型商业区和城市居住区高度聚集；通过中等盖度向高盖度和极高盖度的转入，以及向低等级盖度的转出，不透水表面在空间上形成典型高高聚集—低低聚集的梯度特征。

5 结论与讨论

运用线性光谱分离技术获取了城市不透水表面，将不透水表面按比例划分为六个等级，应用景观格局指数和转移矩阵方法，分析了不透水表面变化的空间格局和变化特征，结论如下：

（1）不透水表面盖度总体变化表明，高盖度、极高盖度等级的不透水表面持续增加；中盖度等级的不透水表面则先增加后略减；低盖度等级的不透水表面呈现增减的波动；极低盖度和近自然地表的不透水表面迅速减少，至研究末期略有回升。城市建设的迅速扩张，将林地、农田、水体及滩涂等自然地表快速地转变为不同功能的建设用地，致使不透水表面等级分布结构的差异性变化。

（2）不透水表面的空间格局变化特征表明，1990~2005 年间，深圳市的景观多样性程度高，景观多样性指数经历了低—高一低—高的聚散变化。空间构型变化表明不透水盖度等级的景观整体团聚程度低，但类型聚集度有所变化，主要为自然地表等级聚集度持续降低，中等盖度等级的聚集度持续增长；斑块形状特征表明，1990 年自然地表类型斑块形状占优，1995 年以后为中盖度类型，但高盖度等级在 2005 年亦有较大斑块，仅次于中等盖度类型，反映了城市化进程对城市地表覆被变化的深刻影响。

(3) 1990~2005 年的不透水表面等级转移变化特征表明, 早期(1990~1995 年) 自然地表是所有不透水表面盖度大于 10% 的等级的主要输入类型。低密度建筑物的快速扩展和地表自然覆盖物剥离后花岗岩裸露和植被覆盖降低, 是这一时期不透水表面盖度转移的主要驱动因素。中期(1995~2000 年) 以中等盖度的不透水表面的转移为主导。大量具有中等密度不透水表面的建设用地产生, 是典型的快速城市化过程, 城市中心区的集聚效应显现, 大型商业区和城市居住区开始成规模, 不透水表面受城市快速扩张呈现点一线的多中心格局。后期(2000~2005 年) 中等盖度等级依然是变化的主要等级, 但高盖度等级的转入比例大幅增长。不透水表面沿着在快速城市化过程时期形成的点一线格局在核心城区、次中心地区和主要交通干线两边形成聚集, 大型商业区和城市居住区高度聚集; 通过中等盖度向高盖度和极高盖度的转入, 以及向低等级盖度的转出, 不透水表面在空间上形成典型高高聚集—低低聚集的梯度特征。

研究仍有如下问题值得深入讨论:

(1) 景观组分的等级划分方案, 历来没有统一的执行标准^[25]。研究者通常根据研究区特征, 或参照已有的报道进行划分, 随意性较大。未来需要在等级划分方案中, 增加定量划分方法, 减少人为主观影响, 提出更为合理与精确的分类方案。相关研究中多采用等级划分方法, 将景观组分按照指数的高低分为多个等级, 分析城市内不同等级组分的空间格局和演变特征。Pozzi 等^[26]曾试图用人口密度、不透水表面盖度及植被盖度分级判定景观组分, 但并没有观测到突变的组分阈值界线。美国流域保护中心(Center for Watershed Protection, 简称 CWP) 利用不透水表面比例表征城市景观组分, 将景观按等级分类类型为农村(0~10%)、郊区(11~25%)、城市(26~60%)、极密城市区(大于 60%)^[27]。类似还有肖荣波等在北京市区的研究, 用分级将不透水表面分为高密度城市用地($ISA > 60\%$), 中等建设密度用地($40\% < ISA \leq 60\%$), 低密度城市用地($10\% < ISA \leq 40\%$)以及低于 10% 的自然地表^[28]。分级的阈值标准不一, 以经验判定值为依据, 分类用于监测时不能辨别出变化的边界, 因此, 理想的景观组分分级方法尚需进一步探索。尽管如此, 分级分类亦不失为一种较为简便的分类方法, 能够有效地将城市核心景观用景观组分表征。

(2) 不透水表面是城市发展的一种典型特征, 驱动不透水表面增长和扩展的主要动力来自于城市发展对土地利用的功能改变, 然而土地利用如何驱动不透水表面扩展的定量分析还尚待深入; 此外, 不透水表面的增长对城市区域的热环境、植被生长、水环境及水文循环都有显著影响。本文对深圳市城市不透水表面的时空格局变化进行了较为详细的分析, 但对于形成不透水表面盖度变化的驱动力因素的定量分析以及不透水表面的生态环境效应尚未进行深入探讨, 这也是未来的研究重点与方向。

参考文献:

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. Database. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York, 2006. 1~15.
- [2] IHDP Report No. 15. Urbanization and global environment change. International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2005:1~60.
- [3] 匡文慧, 刘纪远, 邵全琴, 等. 区域尺度城市增长时空动态模型及其应用. 地理学报, 2011, 66(2): 178~188.
- [4] Wu J, Jenerette G, Buyantuyev A, et al. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. Ecological Complexity, 2011, 8(1): 1~8.

- [5] Weng Q, Lu D. Landscape as a continuum: An examination of the urban landscape structures and dynamics of Indianapolis City, 1991~2000, by using satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(10): 2547~2577.
- [6] Buyantuyev A, Wu J, Gries C. Multiscale analysis of the urbanization of the Phoenix Metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3~4): 206~217.
- [7] Lu D, Moran E, Hetrick S. Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban~rural frontier. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(3): 298~306.
- [8] Xian G, Homer C. Updating the 2001 national land cover database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 113(5): 1133~1147.
- [9] 李双成, 赵志强, 高阳, 等. 城市植被覆盖变化可预测行及其空间格局的定量递归分析——以深圳市为例. *地理研究*, 2008, 27(6): 1143~1151.
- [10] 谢苗苗, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同城市化阶段景观演变的热环境效应动态——以深圳西部地区为例. *地理研究*, 2009, 28(4): 1087~1094.
- [11] 梁进社, 张华. 土地利用变化遥感监测精度评价系统——以随机抽样基础的方法. *地理研究*, 2004, 23(1): 29~37.
- [12] 张良培, 黄昕. 遥感影像信息处理技术的研究进展. *遥感学报*, 2009, 13(4): 559~569.
- [13] 廖克, 成夕芳, 吴健生, 等. 高分辨率卫星遥感影像在土地利用变化动态监测中的应用. *测绘科学*, 2006, 31(6): 11~15.
- [14] 岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算. *遥感学报*, 2007, 11(6): 915~922.
- [15] Wu C, Murray A. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493~505.
- [16] 刘珍环, 王仰麟, 彭建. 不透水表面遥感监测及其应用研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1143~1152.
- [17] Arnold C, Gibbons C. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243~258.
- [18] Ridd M. Exploring a V~I~S (vegetation~impervious surface~soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165~2185.
- [19] Wu C. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480~492.
- [20] Weng Q, Lu D. A sub~pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 68~83.
- [21] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆盖格局特征——以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961~971.
- [22] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007. 103~125.
- [23] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 588~593.
- [24] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应——以云南省永胜县为例. *地理学报*, 2004, 59(4): 629~638.
- [25] Hahs A, McDonnell M. Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban-rural gradient. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(4): 435~448.
- [26] Pozzi F, Small C. Analysis of urban land cover and population density in the United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 2005, 71(6): 719~726.
- [27] Center for Watershed Protection (CWP). An Integrated Framework to Restore Small Urban Watersheds. Ellicott City, MD <http://www.cwp.org/Store/usrm.htm>, 2008-09-23.
- [28] 肖荣波, 欧阳志云, 蔡运楠, 等. 基于亚像元估测的城市硬化地表景观格局分析. *生态学报*, 2007, 27(8): 3189~3197.

Quatifying spatiotemporal patterns dynamics of impervious surface in Shenzhen

LIU Zhen-huan^{1,2}, WANG Yang-lin¹, PENG Jian^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning,
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081 China;

3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 1000871, China)

Abstract: Rapid urbanization has changed urban land cover characteristics. Impervious surface has been the main land cover categories in urban landscape. How to quantify the spatial pattern of impervious surface and its temporal change are necessary for us to understand the dynamics of processes and patterns of urban landscape and their relationship between impervious surface and other heterogeneous landscapes. Remote sensing technology has been widely applied in urban impervious surface monitoring and change detection, but the spatial pattern and temporal change of impervious surface is rarely concerned. Taking Shenzhen as a case study area, we quatify the spatiotemporal patterns dynamics of impervious surface from 1990 to 2005. In order to analyze the spatial temporal change of impervious surface, we used an index of impervious surface area to show the heterogonous of impervious surface by linear spectral mixture method, which can be divided into six cover degrees. We use the matrix change method to explain the changes among four time periods and 3 stages and landscape pattern metrics to indicate the pattern change at three different levels. Results show that there were three changing types in the 15 years, namely, high and full density impervious surface area (HDISA, FDISA respectively)—continued increasing, and medium density (MDISA) and low density (LDISA)—first increased and then decreased, while natural surface (NOISA) and very low density (VLISA) are contrary to MDISA and LDISA. However, the pattern of impervious surface indicates that cover degrees had a high landscape diversity and the value changed from low to high then decreased and reached a new high level. The landscape aggregation was very low overall in the four time periods, but had a significant fluctuation in classes level. The patches shape shows that natural surface had a high dominant position in 1990, but after that changed to medium density impervious surface and high density overtook the second position after 2005. Our research can provide a basis for the orderly development for planning urban impervious surface extension and aggregation; however, we also believe that mitigating the expansion of impervious surface is benefit to the improvement of the urban ecological and environmental quality.

Key words: impervious surface; temporal change; spatial pattern; Shenzhen