

资源与产业
Resources & Industries
ISSN 1673-2464, CN 11-5426/TD

《资源与产业》网络首发论文

题目: 广州市景观格局演变特征及驱动因素交互探测
作者: 刘月亮, 成方龙, 李芳, 杨木壮, 赵冠伟
DOI: 10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20190605.005
收稿日期: 2018-12-03
网络首发日期: 2019-06-06
引用格式: 刘月亮, 成方龙, 李芳, 杨木壮, 赵冠伟. 广州市景观格局演变特征及驱动因素交互探测[J/OL]. 资源与产业.
<https://doi.org/10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20190605.005>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

广州市景观格局演变特征及驱动因素交互探测

刘月亮¹, 成方龙¹, 李芳¹, 杨木壮^{1,2}, 赵冠伟^{1,2}

(1. 广州大学 地理科学学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学 国土资源与海岸带研究所, 广东 广州 510006)

摘要: 基于土地利用现状数据, 分析 1995—2015 年广州市景观格局时空演变特征, 并利用地理探测器探讨了空间因素对景观格局变化的影响, 以期对土地资源的合理配置提供参考和借鉴。研究结果表明: 广州市建设用地景观面积大幅增长, 其余景观类型的面积均有不同程度下降, 面积减少量从大到小排列依次为耕地、林地、水域、草地、未利用地; 耕地、林地、水域和建设用地等景观类型之间的转换较为频繁, 变化区域主要集中在花都、白云、黄埔、番禺和增城西南部; 景观类型变化与高程、坡度、离地铁和主要道路距离呈反比, 与离城市几何中心距离呈倒“U”型关系; 林地、耕地和建设用地变化主要受离地铁距离的影响, 草地变化主要受高程、坡度的影响, 离主要道路距离对未利用地变化的影响较大; 景观类型在两个因子的交互作用下比单因子决定力下更易发生变化。

关键词: 土地利用; 景观格局; 驱动因素; 地理探测器; 广州

中图分类号: F205 文献标识码: A

INTERACTIVE DETECTION BETWEEN EVOLUTIONAL FEATURES AND DRIVING FORCES OF GUANGZHOU'S LANDSCAPE PATTERN

LIU Yueliang¹, CHENG Fanglong¹, LI Fang¹, YANG Muzhuang^{1,2}, ZHAO Guanwei^{1,2}

(1. School of Geographic Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Institute of Land Resources and Coastal Zone, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper uses land use data to analyze Guangzhou's temporal-spatial evolution in landscape pattern from 1995 to 2015, and employs geographic detector to discuss the influence of spatial factor on landscape pattern, aiming at providing revelation for allocating land resources. Guangzhou's construction land use for landscape area has largely increased, while other landscape areas declined, with farmland, woods, waters, grass land, and unused land at a decreasing order. Transformation occurs frequently among farmland, woods, waters and construction land in landscape pattern, most concentrating in Huadu, Baiyun, Huangpu, Fanyu and southwestern Zengcheng. The changes are in reverse proportion to level, slope, distance to subway and major roads, and in an upside-down U shape to urban downtown. Woods, farmland and construction land changes are mainly subject to the distance to subway; grassland change is subject to level and slope; unused land change is subject to the distance to major roads. Landscape pattern changes happen more easily in two factors' interaction than one single factor.

Key words: land use; landscape pattern; driving forces; geographic detector; Guangzhou

0 引言

景观是由不同生态系统组成的地表综合体 (Haber, 2004)。景观格局是大小和形状不一的景观嵌块体在景观空间上的排列, 是景观异质性的具体表现形式 (邬建国, 2007), 研究景观格局演变时空规律是进行景观格局分析的前提, 有助于深刻理解“人地关系”, 保护生物多样性和自然资源 (张秋菊等, 2003)。人类居住用地和工农业生产扩大所引起的土地利用环境变化会对生态系统功能产生不利影响, 探讨景观格局演变驱动力对揭示其影响机制、预测未来发展方向以及制定相应对策至关重要 (池源等, 2017; 赵文佳等, 2017; 张敏等, 2016; 刘菁华等, 2017; 向英奇等, 2015)。

国内外学者对景观格局演变及其驱动力做了大量研究。研究景观格局演变的常用方法是通过计算斑块面积、密度、聚合度、形状等一系列指标来反映景观斑块变化的特征 (Cabral 等, 2017)。研究区尺度很

重要,不同的区域大小有不同的影响因素,同样的影响因素对不同的区域尺度作用力大小也不同(郭建国,2007)。目前,研究区域涵盖了全球(Dobbs等,2017)、大区域(Plieninger等,2016)、省域(Musakwa等,2018;王千等,2011)、城市(齐杨等,2013;胡冬雪等,2015)、格网(Chi等,2018;阳文锐,2015)等不同尺度。研究要素包含湿地(向英奇等,2015;许吉仁等,2013)、耕地(Gasparri等,2015;王芳等,2018)、矿区(宋丽丽等,2017)、森林(唐利等,2017)、水塘(李莹莹等,2018)等多种景观类型。研究景观格局演变驱动力的常用方法有多元线性回归(李进涛等,2018)、典型相关分析法(刘郑伟等,2018)、地理探测器(Liang等,2016)、logistics回归模型(孙才志等,2014;Xie等,2017)、Clue-s模型(王芳等,2018)、主成分分析(陆凤连等,2018)、灰色关联分析(刘明等,2008)、探索性回归和广义加权模型(吴健生等,2012)等。通常认为景观格局变化的驱动因素分为2类:时间驱动因素和空间驱动因素。时间驱动因素中,人口密度变化、人均GDP、产业结构、政策、道路密度等因素已被证明对景观类型变化产生了重要影响;空间驱动因素中,坡度,高程,距铁路、高速、县市的距离等是主要影响因素。阳文锐(2015)对北京城市景观格局时空变化驱动力进行分析,得出人口规模、产业结构调整、发展政策是景观格局变化的主要因素。Peng等(2017)对深圳市生态用地变化的驱动力进行了分析,得出高程和坡度对生态用地变化具有重要作用,距离城市中心越近,越有可能向建设用地转换。李进涛等(2018)对京津冀地区建设用地变化的影响机制进行了探讨,认为城市建设用地时间演化过程的主导驱动因子包括GDP指数、人口密度指数、财政收入指数,空间演变格局差异的主导因子包括到城市中心距离、到主要河流距离、到主要公路距离。刘郑伟等(2018)认为边境贸易地区农业总产值、固定资产投资额、国民生产总值为各地类面积变化的重要驱动力。

现有研究中使用的传统统计模型的假设条件和数据要求多,现实情况中难以满足。此外,现有研究较多采用空间统计方法分析景观格局变化的时间驱动因素,但其两者之间相关关系不一定能表征因果关系(Su等,2017)。空间驱动因素作为城市发展的基底条件,对城市景观格局演变是否有影响,有何种影响,不同的空间因素对景观类型变化有何差异,要素叠加以后对景观格局变化的影响是会增强还是减弱,目前针对这类问题的研究文章还相对少见。

快速城市化地区景观格局演变驱动机制是未来的研究重点。珠江三角洲作为中国的主要城市群区域之一,在过去几十年间经历了一个城市化的快速发展时期,区域内景观格局变化显著(吴健生等,2012)。以广州市为例,借助GIS技术对广州市20年景观格局时空演变进行分析,并利用地理探测器探讨了影响景观类型变化的空间要素驱动力,对土地资源的合理配置具有一定价值。

1 研究区概况

广州邻近香港、澳门,是中国通往世界的南大门,是粤港澳大湾区、泛珠江三角洲经济区的核心城市以及“一带一路”的枢纽城市。广州属于亚热带海洋性季风气候,全年平均气温为20~22℃,市区年降雨量约为1720mm。地势东北高、西南低,背山面海,北部是森林集中的丘陵山区,中心城区主要分布在西南地区,南部为沿海冲积平原。广州市总面积为7434.4km²,人口密度从1995年的870人/km²增长到2015年的1816人/km²。2015年人均GDP首次突破13.61万元,产业结构不断优化升级,第二产业比重由1995年的46.67%下降至2015年的31.6%,第三产业比重由1995年的47.42%上升至2015年的67.1%。随着城市化程度的提高,城市不断向外扩张,建成区面积增加,城市景观格局也发生着巨大的变化。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 土地利用数据来源与处理

数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的中国土地利用现状遥感监测数据集，以十年为间隔，选取 1995 年、2005 年和 2015 年 3 期土地利用类型数据。参考刘纪远等（2002）提出的土地利用分类体系，将研究区土地利用类型划分为：耕地（旱地、水田）、林地（有林地、灌木林、疏林地、其他林地）、草地（高覆盖度草地、低中覆盖度草地）、水域（河渠、水库坑塘、滩涂、滩地）、建设用地（城镇用地、农村居民点、其他建设用地）、未利用地（沙地、裸土地）。

2.1.2 空间驱动要素选取与来源

借鉴前人研究成果（Peng 等，2017；李进涛等，2018；刘郑伟等，2018），根据数据的科学性、可获得性等原则，结合广州市实际情况，认为广州市在城市化过程中土地利用景观变化会受到自然与社会经济条件的双重影响。广州市北部的从化区和增城区属于北部林业区，地势较高，城镇用地在扩张过程中会受到海拔、坡度等自然条件的约束；城镇建设会受到社会经济的影响，例如地铁和公路的覆盖密度会影响生产生活的便利性，城市中心的辐射作用会吸引人们在其周边聚居。因此，选取以下空间驱动要素：

1) 高程。又称为海拔，是影响人类生活舒适度的重要指标之一（吕晨等，2017）。基于 DEM 数据，利用 ArcGIS 分区统计得到每个变化栅格的平均高程值，使用联合工具将其与景观变化类型一一对应。

2) 坡度。地形中的坡度因子是景观格局形成的基础条件，不仅影响各种用地的分布及其演化特征，对交通等基础建设的限制性也较大。基于 DEM 数据提取出每个栅格的平均坡度值，使用联合工具将其与景观变化类型一一对应。

3) 到地铁的距离。地铁是市内乘客通勤的主要交通工具，其建设规模越大，城市中心化特征越弱。利用 ArcGIS 空间邻域分析获取景观变化类型到最近地铁的距离。

4) 到主要公路的距离。主要公路代表城市发展的经济区位特征，是连接城市内部和外部经济的桥梁，对城市景观格局变化有较大影响。利用 ArcGIS 空间邻域分析获取景观变化类型到最近公路的距离。

5) 到城市中心的距离。城市中心对周边地区发展具有较强的辐射带动作用，其完善的基础设施建设对景观格局变化吸引力大。利用 ArcGIS 空间邻域分析获取景观变化类型到最近城市中心的距离。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是定量研究土地利用类型间相互转化的数量和方向的主要方法，它能够反映土地利用变化的结构特征和各类型间的转移方向（姜和震等，2014）。土地利用转移矩阵的数学表达式为：

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & \dots & S_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中： i 为第一时期土地利用类型； j 为第二时期土地利用类型； n 为土地利用类型的数量； S_{ij} 为研究期内第 i 类土地向第 j 类土地转化的面积。

2.2.2 地理探测器

地理探测器是 Wang 等（2010）通过提出“因子力”度量指标，结合 GIS 空间叠加技术和集合论，用以识别多因子之间交互作用的模型。由于传统统计分析方法、模型分析方法等的前提假设较多，如正太性和

方差性，在现实情况中一般的数据很难符合要求，以致于数学模型的效果会受到影响，地理探测器的优点在于其没有过多的假设，可以克服传统数学模型统计方法的局限性，因此被广泛应用于社会经济因素和自然环境因素的影响机理研究（李颖等，2017）。

1) 因子探测器。因子探测可以识别各空间驱动因素对景观类型变化的解释力大小，其模型如下：

$$P = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^m n_i \sigma_i^2 \quad (2)$$

式中： P 为景观变化类型影响因素解释力指标； n_i 表示次级区域样本数； n 为研究区总样本数； m 为次一级区域样本数； σ^2 为整个区域景观类型变化的方差； σ_i^2 为次一级区域景观类型的方差，假设 $\sigma_i^2 \neq 0$ ，则模型成立。

P 的取值范围为[0, 1]， $P = 0$ 时，表明广州市景观类型变化的空间分布呈随机分布， P 值越大，说明空间驱动因素对广州市景观类型变化的影响越大。

2) 交互探测器。交互探测可以用来识别不同空间驱动因素之间的相互作用，探测 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 的解释力是增强还是减弱。交互探测器的 5 种结果如表 1 所示。

表 1 两个自变量对因变量交互作用的类型

Table 1 Interactive types of two controlled variables on dependent variables

表达式	解释
$P(X_1 \cap X_2) < \min[P(X_1), P(X_2)]$	非线性减弱
$\min[P(X_1), P(X_2)] < P(X_1 \cap X_2) < \max[P(X_1), P(X_2)]$	单线性减弱
$P(X_1 \cap X_2) > \max[P(X_1), P(X_2)]$ 且 $P(X_1 \cap X_2) < P(X_1) + P(X_2)$	互相增强
$P(X_1 \cap X_2) > P(X_1) + P(X_2)$	非线性加强
$P(X_1 \cap X_2) = P(X_1) + P(X_2)$	相互独立

3 土地利用景观格局变化特征

3.1 时间变化特征

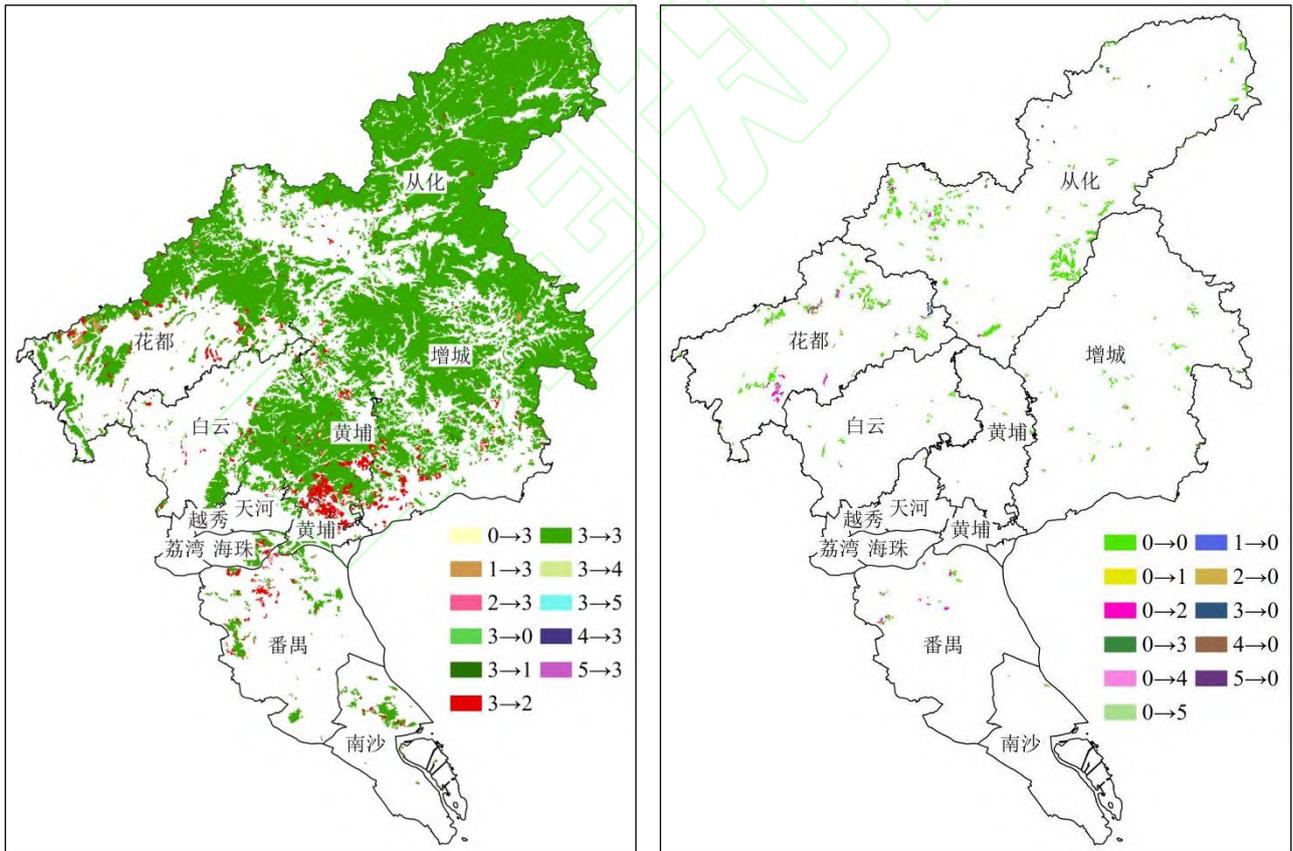
快速城市化使广州市景观格局发生了较大变化。从表 2 可知，林地、耕地、建设用地是广州市 3 种主要景观类型，1995—2015 年建设用地面积增加，草地、耕地、林地、水域等面积减少。林地一直是广州市第一大用地，1995 年、2005 年、2015 年林地面积在总面积中所占的比重分别为 43.8%、43.1%、42.1%；耕地在 20 年间出现大面积减少，所占比例下降了 6.6%；建设用地呈不断增长趋势，面积增加了 605.78 km²，所占比例从 1995 年的 11.5% 增长为 2015 年的 20.0%；水域面积在 1995—2005 年增加，2005—2015 年减少，草地和未利用地面积所占比重较少。

表 2 广州市景观类型面积变化
Table 2 Landscape area changes in Guangzhou

年份	草地		耕地		建设用地		林地		水域		未利用地	
	面积/ km ²	所占 比例 /%										
1995	107.96	1.5	2 601.36	36.2	829.95	11.5	3 153.86	43.8	497.41	6.9	4.95	0.1
2005	99.26	1.3	2 296.81	31.9	1 198.94	16.7	3 097.69	43.1	498.25	6.9	4.54	0.1
2015	98.96	1.4	2 142.16	29.6	1 435.73	20.0	3 028.53	42.1	486.11	6.8	4.27	0.1

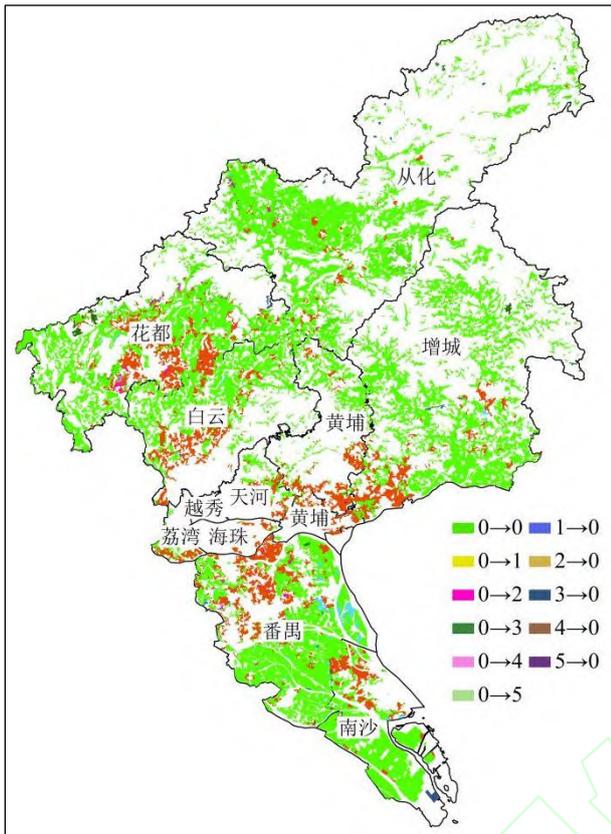
3.2 空间演变特征及类型转换

对于 1995 年和 2015 年两期景观类型图，在 ArcGIS 中利用 union 工具进行字段联合，编辑 python 语句，将变化栅格赋值为 0，未发生变化栅格赋值为 1，得到各景观类型变化的空间分布（图 1）。利用 intersect 工具将 1995 年和 2015 年相交，得到广州市景观类型转移矩阵（表 3）。

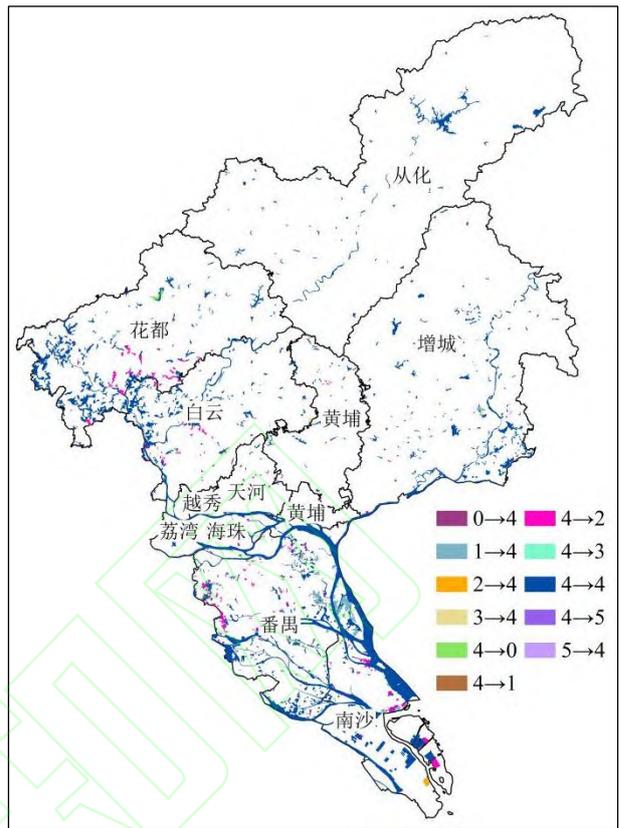


(a) 林地

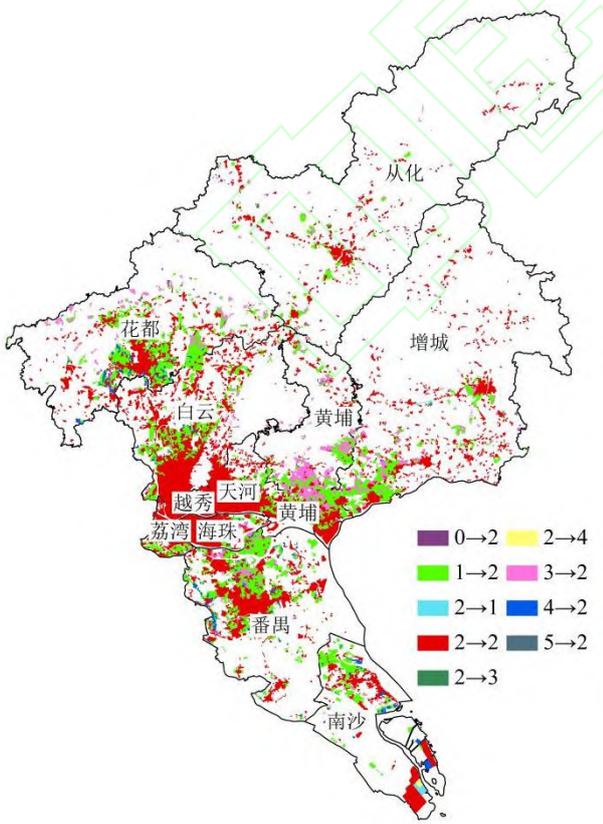
(b) 草地



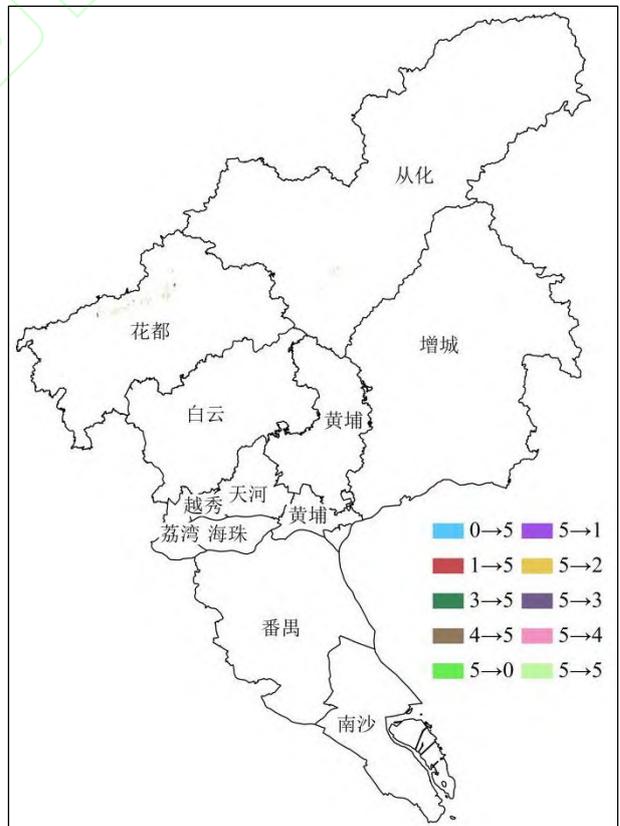
(c) 耕地



(d) 水域



(e) 建设用地



(f) 未利用地



注：0—草地；1—耕地；2—建设用地；3—林地；4—水域；5—未利用地。

图 1 1995—2015 年广州市土地利用景观空间分布变化

Fig.1 Landscape spatial distribution changes of land use in Guangzhou from 1995 to 2015

表 3 1995—2015 年广州市景观类型转移矩阵

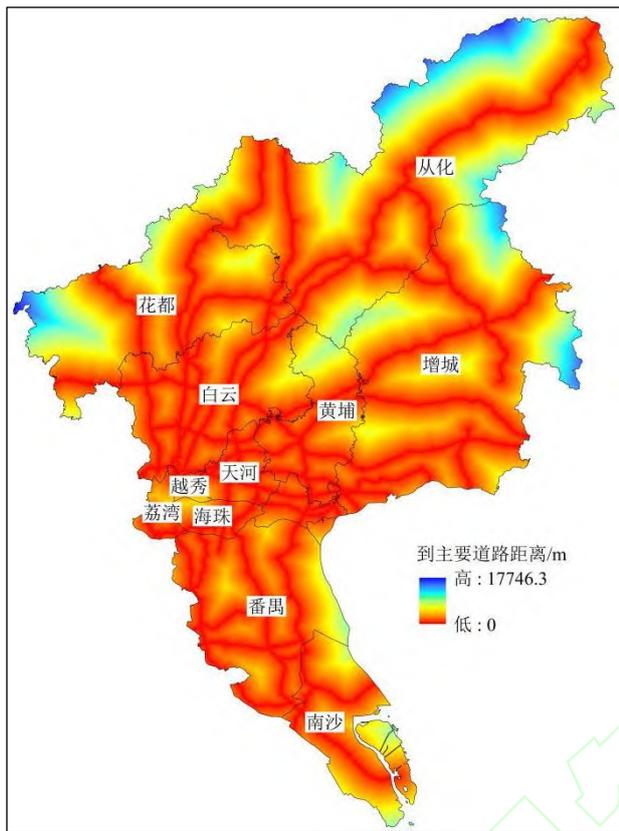
Table 3 Transfer matrix of landscape types of Guangzhou from 1995 to 2015

	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计
草地	94.417	0.13	10.137	3.254	0.011	0.007	107.956
耕地	0.307	2 131.039	436.98	10.033	22.934	0.003	2 601.296
建设用地	0.007	5.466	821.217	1.666	1.578	0	829.934
林地	2.597	3.784	133.125	3 012.868	1.351	0.017	3 153.742
水域	1.323	1.708	33.901	0.214	460.214	0.005	497.365
未利用地	0.013	0.004	0.287	0.407	0.002	4.24	4.953
总计	98.664	2 142.131	1 435.647	3 028.442	486.09	4.272	7 195.246

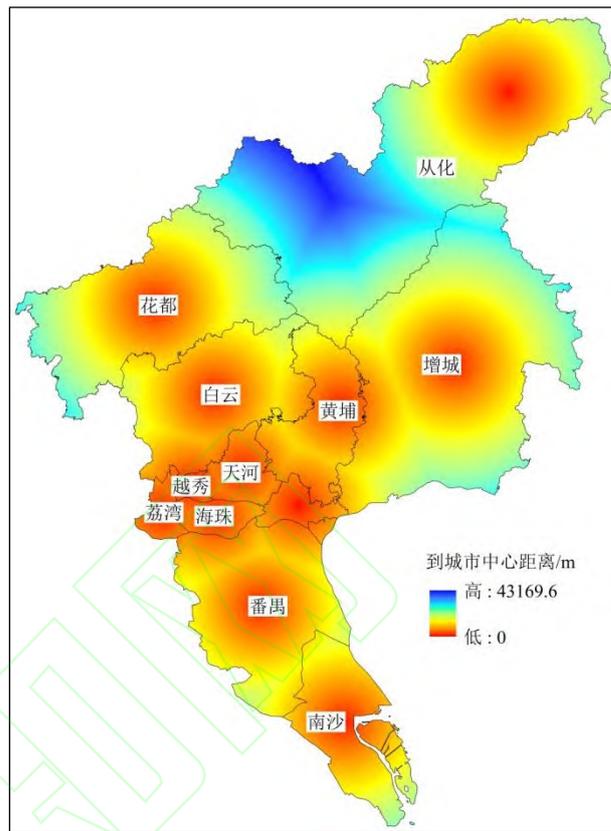
研究区内林地、耕地、建设用地、水域等景观类型之间的转换比较频繁，草地和未利用地未发生太大变化。具体表现为：林地转出的区域主要集中在黄埔区南部、增城区西南部、番禺区北部和花都区，转出类型为建设用地景观，共转化了 133.125 km²。林地转入量主要来源于耕地，发生在花都区西北部，面积约 10.033 km²。耕地是广州市内变化最大的景观类型，除从化和增城北部之外，其余区域内的耕地均发生了显著变化，主要集中在花都、黄埔、增城区西南部、番禺区、南沙区中心周边。耕地主要转换的景观类型为建设用地，达到 436.98 km²，其次为水域，转出 22.934 km²。建设用地是转入量最多的景观类型，用地面积从 1995 年的 821.217 km² 增长到 2015 年的 1 435.647 km²，主要是通过占用林地、耕地和水域等生态用地来实现空间扩张的，变化区域集中在白云区、花都区、黄埔区、增城区和番禺区等地，景观空间聚集性越来越明显。水域变化较多的是在花都、白云和番禺 3 个区，主要是向建设用地转移，面积为 33.901 km²。此外，草地向建设用地转换了 10.137 km²，未利用地变化不显著。

4 景观格局演变的空间驱动因素分析

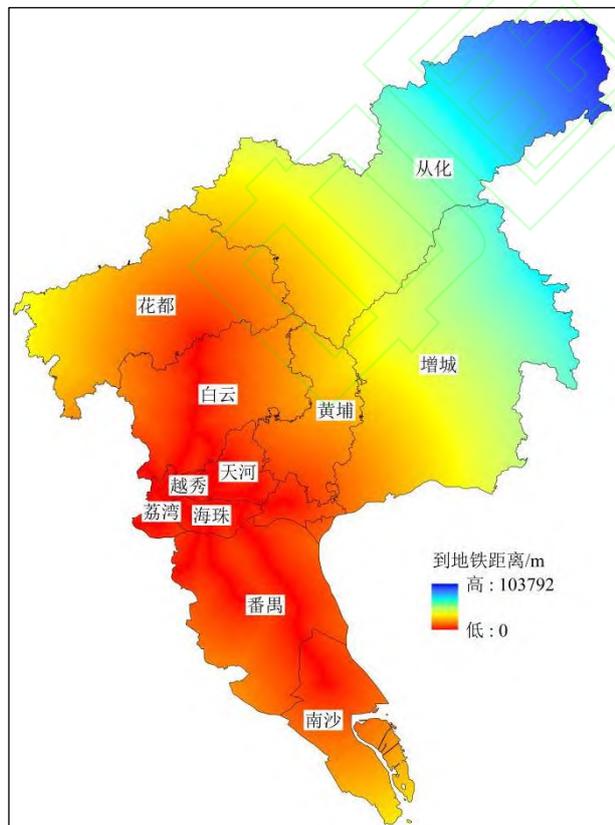
选取高程、坡度、到城市中心距离、到地铁距离、到主要公路距离 5 个因素分析广州市景观格局变化的空间驱动力。利用欧式距离得到各个因素的空间分布图，将结果进行重分类，利用自然间断点法将空间因素划分为 10 个等级。从图 2 可知，广州市高程和坡度由南向北呈递增趋势，北部从化区最高；到城市中心距离以广州市 11 个区几何中心为中心点向四周扩张，覆盖区域较广；到地铁距离从西南逐渐向东北递增；到主要公路距离是以道路为中心向两侧递增。



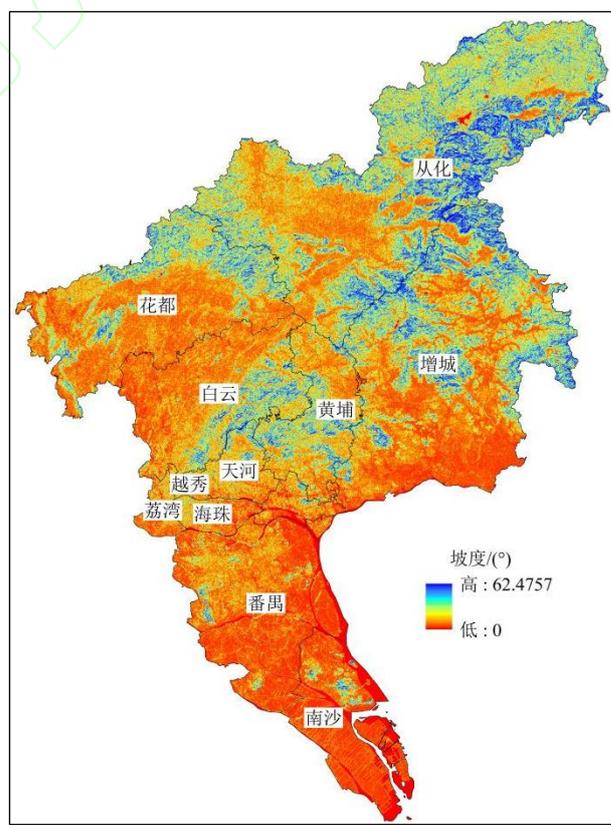
(a) 到主要道路的距离



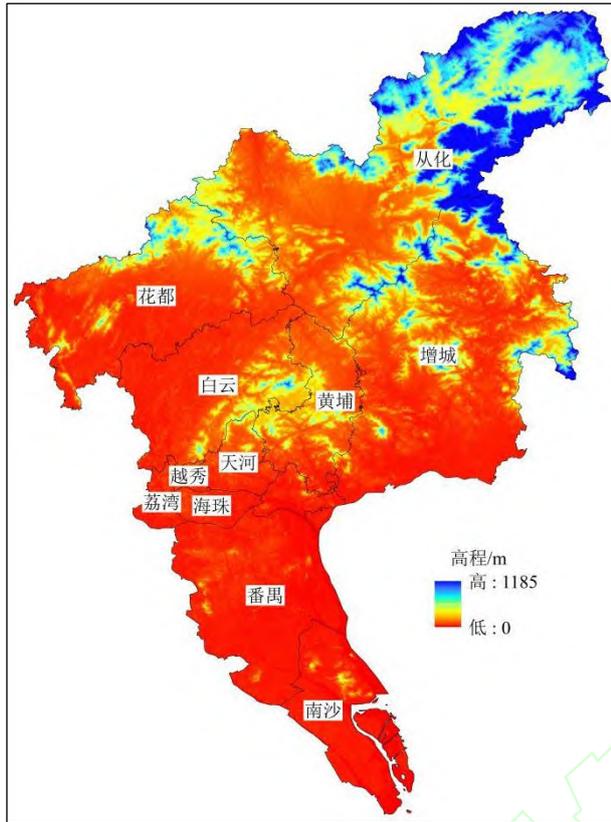
(b) 到城市中心的距离



(c) 到地铁的距离



(d) 坡度



(e) 高程

图 2 空间驱动要素分布

Fig.2 Distribution of spatial driving forces

4.1 景观格局变化的空间驱动要素

1) 景观类型的变化面积随高程上升逐渐减少, 82 m 以下为变化景观类型集中区。高程在 82 m 以下的变化景观类型总面积为 1 429.22 km², 501 m 以上的面积接近于 0 (图 3)。除未利用地之外, 其余用地面积所占比例最大值均出现在第一等级 32 m 以下, 其中水域、耕地、建设用地表现最为明显, 分别占变化景观面积的 94.66%、90.39%、82.59%; 未利用地最大值出现在第二等级上, 所占比例为 74.02%; 林地变化面积均匀分布在第一、二等级上, 总占比为 84.26%。虽然不同高程对景观类型面积变化存在差异性, 但总体上呈现低海拔集聚特征。

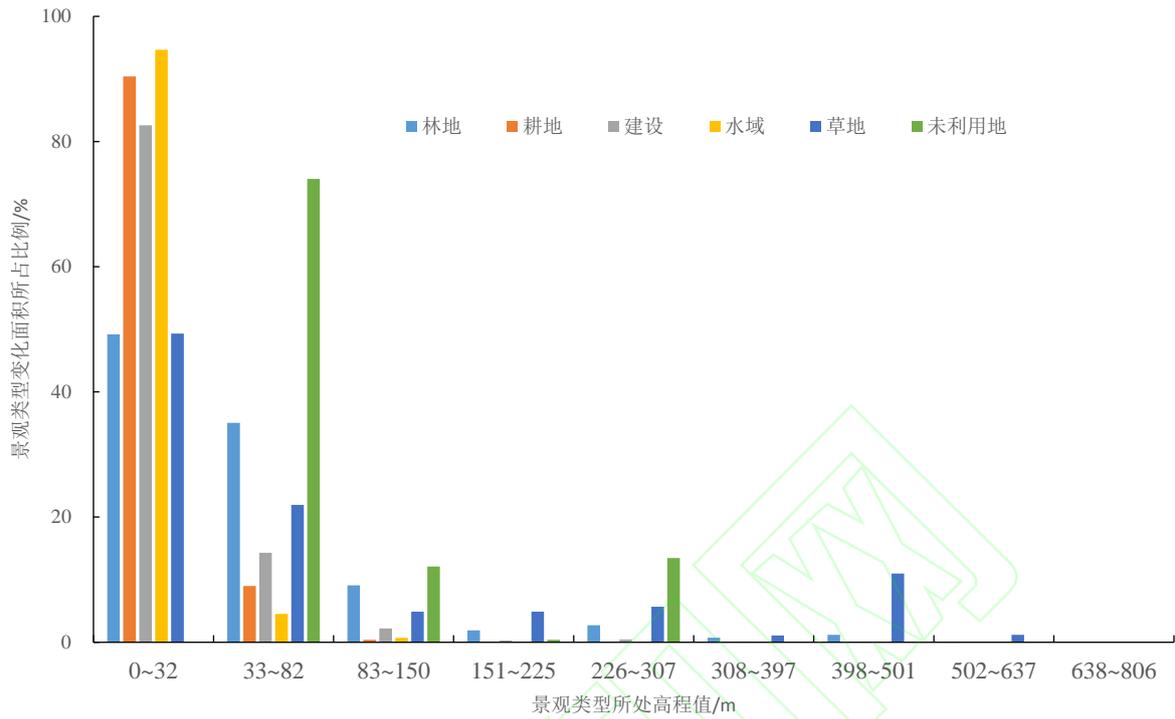


图3 景观类型变化与高程的空间关系

Fig.3 Spatial relation between landscape change and level

2) 景观类型变化面积随坡度下降逐渐增加, 坡度 14°以下为变化类型集中区 (图 4)。坡度在 14°以下的景观类型变化面积为 1 341.58 km², 占总变化面积的 90.15%。水域变化面积主要集中在 3°以下, 所占比例为 61.41%, 具有显著的低坡度指向性。未利用地变化面积主要分布在坡度较高的地区, 极大值在第 4 等级坡度上, 所占比例为 50.96%。建设用地、林地、草地、耕地比较均匀地分布在坡度 14°以下区域。

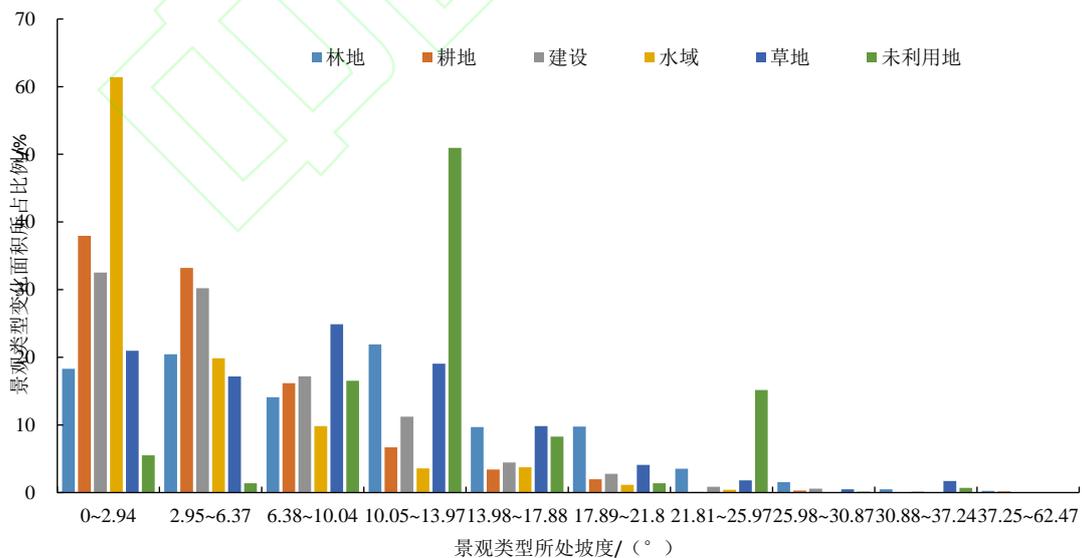


图4 景观类型变化与坡度的空间关系

Fig.4 Spatial relation between landscape change and slope

3) 距离地铁越远, 景观类型变化面积越少。由图 5 可知, 研究区景观类型变化面积集聚在距离地铁 17 km 以内的地区, 各类景观变化面积积极大值均出现在第 1 等级, 耕地表现最为显著, 面积占比为 95.61%, 未利用地和水域次之, 占比达到 70% 以上。距离地铁 46 km 以外的地区, 除了草地面积有较少变化之外, 其余用地面积变化不明显。由此可见, 地铁对耕地、林地、建设用地等景观类型之间的转换具有显著的集聚作用。草地从空间分布上来看主要集中在距地铁 46 km 以外地区, 因此其发生变化区域距离地铁相对较远。

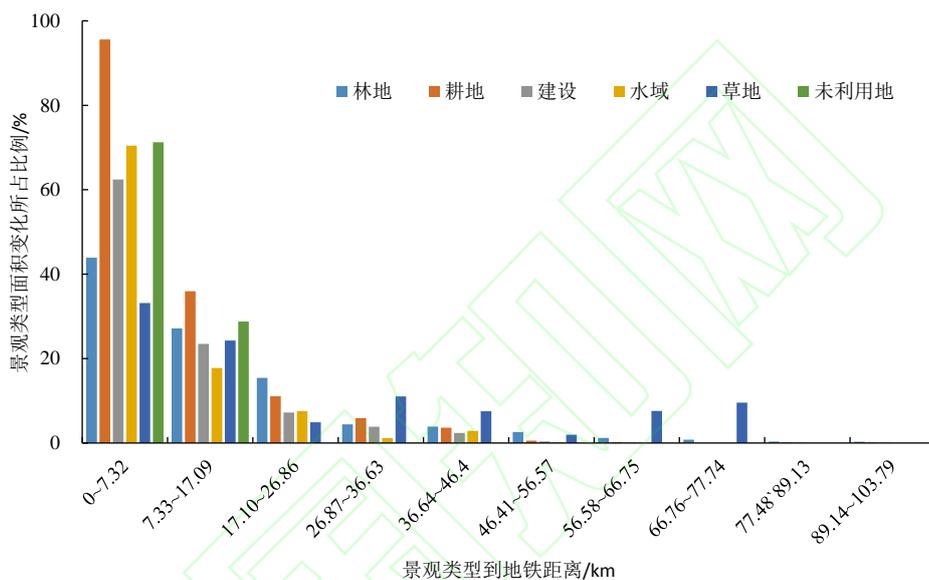


图 5 景观类型变化与地铁的空间关系

Fig.5 Spatial relation between landscape change and subway

4) 景观类型变化面积与到城市几何中心距离呈倒“U”型关系。各类景观变化面积主要分布在距离城市几何中心 5~15 km 范围内, 5 km 以下以及 15 km 以上范围内的较少。与其他空间要素不同的是, 各类用地极大值并没有出现在第一等级上, 而是集中在第二、第三等级上 (图 6)。城市几何中心一般为区域经济、政治中心, 这些地区内部本身已经聚集了较多的建设用地, 用地类型不易改变, 而且城市中心地区地价高, 人口密度大, 与郊区相比居住环境相对较差, 对城市居民的吸引力较弱。随着地铁等交通工具的发展, 人们更愿意生活在交通便利的城市周边地区, 在一定程度上促进了城市的去中心化。

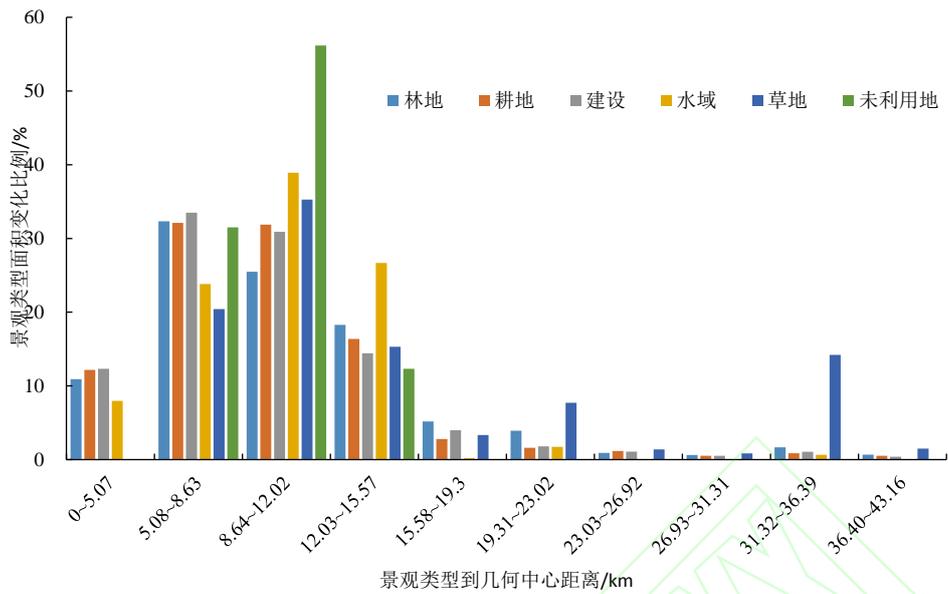


图 6 景观类型变化与城市中心的空间关系

Fig.6 Spatial relation between landscape change and urban downtown

5) 距离主要道路越远, 景观类型变化面积越小。主要道路是连接城市内部和外部的经济纽带, 交通对区域的发展起着重要的作用, 能够改变城市经济发展结构。广州市主要道路辐射范围广泛, 第一等级覆盖区域面积达到 80% 以上, 因此各景观类型变化主要集中在距主要道路 0.9 km 的范围内 (图 7), 其中耕地、林地、建设用地和水域的变化呈现显著的交通指向性, 极大值均出现在第一等级, 变化面积所占比例超过 60%。

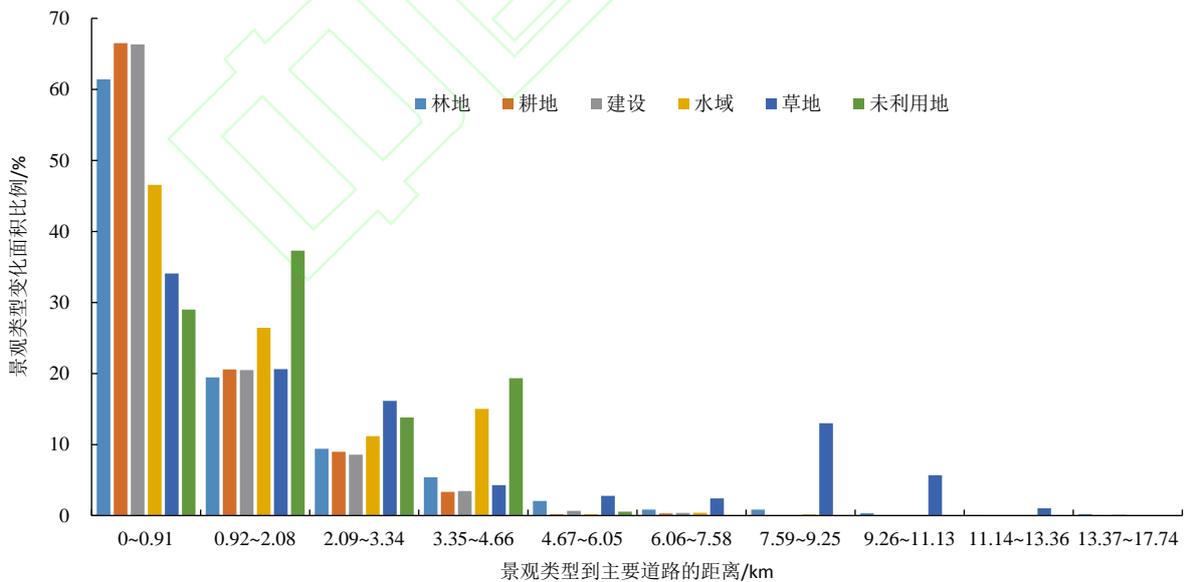


图 7 景观类型变化与主要道路的空间关系

Fig.7 Spatial relation between landscape change and major roads

4.2 不同空间驱动因素的作用强度

地理探测器结果（表 4）表明，不同的空间驱动因素对景观类型变化的作用强度不同，同一空间驱动因素对不同景观类型变化的作用强度也不同。各空间驱动因素的交互作用力强于单一空间驱动因素的作用力。耕地、林地、建设用地、草地、未利用地等景观的第一、第二主导因子均通过了 0.05 置信水平的显著性检验，而 5 个影响因子对水域变化影响不显著，显著性检验均大于 0.05，因此，对水域只比较影响因子的相对重要性。

广州市景观类型变化在一定程度上受到地理环境的制约。空间驱动要素中的高程与坡度对耕地、林地、草地等景观的影响较大，随着高程、坡度的增加景观类型面积变化减少，表明在地势低平的地区景观之间更有可能发生转换。林地和草地本身分布在广州市高程较高的地区，这些地区受到自然条件的限制，人类的开发活动比较少，但随着经济的快速发展和城市人口的迅速增加，一些集中在低海拔地区的林地、草地等景观类型会被转换为建设用地或耕地。广州市耕地在研究期间大面积减少，其主要转移类型为建设用地，综合考虑施工安全、工程造价等方面的影响，建设用地更有可能向其周边地形平坦区域扩张。建设用地受高程和坡度影响较小，原因是建设用地的不可逆性，其一旦形成便很难向其他用地发生转换。此外，由于科学技术的进步，建设用地扩张可以克服自然环境中的障碍因子，因此到地铁、城市中心、主要道路的距离等社会经济因素比高程、海拔等自然因素更容易影响建设用地发生变化。

到城市中心距离是影响广州市景观格局变化的又一重要因素，是草地和建设用地景观变化的主导因子。建设用地距离城市中心越近，越容易发生变化，主要是因为距离城市中心越近，交通网络越发达，临近商业、医疗等服务设施，出行方便，往往能享受到更完善的城市服务，城市中心所具有的优越性会对新增建设用地造成强大的吸引力，空间集聚性逐渐增强。影响草地发生变化的因素为到城市中心距离而非到地铁、主要道路距离，原因是草地所处位置跟地铁还有一段距离，地铁对它的辐射带动作用比较弱，效果不显著。

到主要道路距离对未利用地景观变化决定力最大。城市交通的发展对土地利用变化具有显著的影响，交通建设可以提升区域的空间可达性和区位优势，吸引更多的人流。由图 2a 可知，主要道路影响范围基本上覆盖全广州市，未利用地变化面积主要集中在花都区东北部，距离区域中心和地铁站点比较远，受到城市中心、地铁辐射带动作用也比较小，因此其变化主要是受到道路的影响。

到地铁距离是影响林地、耕地、建设用地空间变化的主导驱动因子。广州市地铁在 1999 年 6 月 28 日正式运营，截至 2015 年年底，共有 8 条线路运行（谭章智等，2017），辐射范围广。由地铁对土地利用景观格局的影响可知，广州市景观类型变化面积离地铁距离越远越少，主要集中在离地铁距离 17 km 的范围内，而且研究期间林地和耕地向建设用地发生了大面积的转换，因此可以认为离地铁越近，林地与耕地更有可能被建设用地占用。距离地铁越近景观类型越容易发生变化，原则上这种现象应在中心城区表现最为明显，但耕地和林地的变化区域却集中在增城、黄埔、花都、番禺等周边地区，主要是因为中心城区建筑密度已经趋于饱和状态，地铁对其的影响主要表现为用地功能的变化而不是用地类型的改变。因此，地铁对新城区景观类型变化的影响要明显大于老城区。

由表 4 得知，驱动因素对水域景观变化的影响力大小均未通过小于 0.05 的 p 值检验，说明广州市水域景观变化与所选因素无关。这是因为水域景观变化的分布呈现出零散化，受影响因素的作用力比较均匀，各因子都不能起到主导作用；本研究只考虑了跟空间相关的驱动要素，可能存在未考虑的其他因素对水域景观变化影响更大，例如，魏帆等（2018）得出影响环渤海湿地演变的因素有农田开垦、城镇建设、围海养殖，许吉仁等（2013）对南四湖湿地景观格局变化驱动因素分析中总结出渔业总产值、第一产业比重、总人口等是主导因子。

表 4 广州市景观类型用地变化的地理探测结果

Table 4 Geographic detection results of landscape land use changes in Guangzhou

景观类型	变量	q 值	P 值	景观类型	变量	q 值	P 值
林地	地铁	0.009 6	0.008 1	耕地	地铁	0.029 7	0.000 0

	高程	0.007 1	0.039 2	高程	0.001 8	0.445 4	
	坡度	0.002 1	0.853 1	坡度	0.005 9	0.031 7	
	城市中心	0.006 5	0.090 9	城市中心	0.005 7	0.167 7	
	主要道路	0.004 9	0.258 9	主要道路	0.001 9	0.758 4	
草地	地铁	0.049 4	0.119 4	建设用地	地铁	0.028 4	0.000 0
	高程	0.067 6	0.040 2	高程	0.002 2	0.337 3	
	坡度	0.013 7	0.935 4	坡度	0.002 5	0.721 5	
	城市中心	0.064 5	0.028 9	城市中心	0.006 8	0.009 7	
	主要道路	0.046 7	0.623 5	主要道路	0.004 7	0.100 2	
水域	地铁	0.005 2	0.222 2	未利用地	地铁	0.001 2	0.803 3
	高程	0.001 6	0.677 9	高程	0.126 4	0.169 4	
	坡度	0.006 9	0.218 3	坡度	0.082 7	0.851 7	
	城市中心	0.005 6	0.345 2	城市中心	0.034 4	0.394 3	
	主要道路	0.005 3	0.297 7	主要道路	0.166 6	0.036 0	

空间驱动因素的交互探测结果显示，两种空间驱动因素对景观格局变化的作用是非线性增强的，说明广州市景观格局变化的影响因子是非常复杂、相互作用的。地铁与城市中心交互作用对耕地、建设用地影响比较大，两因子交互后解释力显著大于地铁和城市中心单因子解释力之和，说明耕地和建设用地变化受社会经济因素的影响比自然环境因素的影响更大。坡度和主要道路的交互作用使水域和未利用地更易发生变化，且对未利用地决定力大于水域决定力。就水域而言，在单因子主导作用分析中各驱动要素影响均不显著，在交互主导因子中，坡度和主要道路的共同决定力（0.026）是单因子坡度决定力（0.0069）和主要道路决定力（0.0053）之和的两倍，说明广州市水域景观变化是坡度和主要道路共同作用的结果。对林地而言，交互因子决定力明显大于单因子决定力，但其影响因素并未发生变化。草地更易发生变化，这是城市中心和主要道路共同作用结果。

表 5 空间驱动因素交互作用对景观类型变化的影响

Table 5 Influence of interaction of spatial driving forces on landscape changes

景观类型	C=A∩B	A+B	比较	解释
林地	地铁∩坡度 =0.029	地铁+坡度=0.011	C>A+B	非线性增强
耕地	地铁∩城市中心=0.13	地铁+城市中心=0.035	C>A+B	非线性增强
草地	城市中心∩主要道路 =0.24	城市中心+主要道路=0.11	C>A+B	非线性增强
建设	地铁∩城市中心 =0.11	地铁+城市中心=0.035	C>A+B	非线性增强
水域	坡度∩主要道路 =0.026	坡度+主要道路 =0.012	C>A+B	非线性增强
未利用地	坡度∩主要道路 =0.78	坡度+主要道路 =0.25	C>A+B	非线性增强

5 结论与讨论

本文以 1995 年、2005 年和 2015 年 3 期土地利用数据为基础，对广州市景观格局演变的时空特征进行了分析，并利用地理探测器探讨高程，坡度，到地铁、主要道路、城市中心的距离 5 个要素对景观格局变化的影响，得出以下结论：1) 1995—2015 年广州市景观格局变化显著，建设用地面积增加，林地、耕地、水域、草地、未利用地等面积减少，其中耕地面积减少最多，林地次之。建设用地扩张过程中大面积占用耕地、林地、水域等生态用地，分别为 436.98 km²、133.125 km²、33.901 km²。景观类型之间的转移主要发生在北部的白云和花都区、南部的番禺区、东部的黄埔和增城的西南部等区域。2) 景观类型变化与高程、坡度、离地铁、主要道路距离呈反比，与离城市几何中心距离呈倒“U”型关系。高程为 82 m、坡度 14° 以下是景观类型面积变化的主要集中区；距离地铁、主要道路越近，景观面积变化越多，地铁 17 km、主要道路 0.9 km 以外的地区景观类型面积变化少；景观类型变化面积主要集中在距城市几何中心的第二、三

等级上, 范围为 5~15 km。3) 地理探测器主导驱动因素探测结果表明, 到地铁距离是林地、耕地、建设用地等景观类型的第一主导因子, 高程、坡度是草地的第一主导因子, 到主要道路距离对未利用地景观变化决定力比较大。交互探测结果显示, 景观类型变化的双因子作用力显著大于单因子作用力, 且这种作用力是非线性增强的, 因此可以认为广州市景观格局演变是自然因素和社会因素共同作用结果。

在研究期间, 广州市城市中心区建设用地的扩张占用了大量耕地、林地、水体等生态用地, 人口规模和城镇用地都已达到饱和, 出现了地价昂贵、居住拥挤、交通阻塞、环境污染等一系列城市问题, 这一城市问题的根源在于城区剩余用地不足, 已有土地配置效率低。城市道路建设能有效促进土地功能转换, 提高土地利用效率, 缓解城市拥堵, 提高城市通达度, 加速旧城更新, 优化整合各功能区, 使城市各功能区更加合理。因此在未来发展过程中, 广州市应加快城市周边地区轨道交通建设步伐, 这样不仅可以缓解城市中心区人口、环境压力, 提升中心区活力, 还可以带动沿线地区的发展, 改善区位条件, 吸引旧城区人口转移, 地价上升, 提高城市服务功能, 促进土地集约高效利用。需要注意的是, 轨道交通在建设过程中要平衡生态与发展的利益关系, 坚持按照便捷、生态、低碳的交通网络进行优化布局, 对禁止建设区进行严格控制, 对于限建区若有必要, 必须根据生态、资源、环境承载力等作出可行性、必要性等评价, 做好生态补偿措施。

本文利用地理探测器探讨了景观格局变化与高程、坡度、到地铁、主要道路、城市几何中心距离等空间可达性因素的关系, 弥补了以往研究中较多的利用数学统计方法分析自然因素和人文因素与景观格局变化的线性关系, 重点回答了空间因素对景观格局变化是否有关系, 有何关系, 贡献有多大等问题。但地理探测器中的因子探测器只能探测贡献有多大的问题, 不能反映因子的正负关系。景观格局演变是一个相当复杂的过程, 影响变化的空间因素还有很多, 本文限于数据的可获取性仅选取了上述易获得的指标, 评价指标体系还有待完善。景观格局变化驱动力具有多尺度、多时效等特征, 本文对广州市土地利用景观格局变化的影响因素研究尚缺乏横向、纵向之间的对比。如何在保护生态用地和经济发展可行性的基础上进行合理的景观格局规划是需要进一步研究的问题。

参考文献:

- 池源, 石洪华, 王恩康, 等, 2017. 庙岛群岛北五岛景观格局特征及其生态效应[J]. 生态学报, 37(4): 1270-1285.
- 胡冬雪, 唐立娜, 邱全毅, 等, 2015. 海峡西岸经济区景观格局 10 年变化及驱动力[J]. 生态学报, 35(18): 6138-6147.
- 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 等, 2018. 1985—2015 年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究[J]. 地理研究, 37(1): 37-52.
- 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等, 2018. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 38(17): 6280-6291.
- 李颖, 冯玉, 彭飞, 等, 2017. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J]. 经济地理, 37(12): 180-189.
- 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等, 2002. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. 中国科学: D 辑 (12): 1031-1040
- 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等, 2017. 京津冀城市群景观格局变化机制与预测[J]. 生态学报, 37(16): 5324-5333.
- 刘明, 王克林, 2008. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化及其驱动力[J]. 生态学杂志 (6): 1317-1324.
- 刘郑伟, 付梅臣, 丁茜, 2018. 边境贸易地区土地利用变化驱动力演变研究[J]. 资源科学, 40(4): 729-736.
- 娄和震, 杨胜天, 周秋文, 等, 2014. 延河流域 2000—2010 年土地利用/覆盖变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 28(4): 15-21.
- 陆凤连, 王新闯, 张合兵, 等, 2018. 1980—2015 年焦作矿区景观格局演变及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 25(4): 237-243.

- 吕晨, 蓝修婷, 孙威, 2017. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J]. 自然资源学报, 32(8): 1385-1397.
- 齐杨, 邬建国, 李建龙, 等, 2013. 中国东西部中小城市景观格局及其驱动力[J]. 生态学报, 33(1): 275-285.
- 宋丽丽, 白中科, 2017. 煤炭资源型城市生态风险评价及预测: 以鄂尔多斯市为例[J]. 资源与产业, 19(5): 15-22.
- 孙才志, 闫晓露, 2014. 基于 GIS-Logistic 耦合模型的下辽河平原景观格局变化驱动机制分析[J]. 生态学报, 34(24): 7280-7292.
- 谭章智, 李少英, 黎夏, 等, 2017. 城市轨道交通对土地利用变化的时空效应[J]. 地理学报, 72(5): 850-862.
- 唐利, 邵景安, 郭跃, 等, 2017. 社区水平森林景观格局动态特征与驱动因素[J]. 生态学报, 7(6): 2101-2117.
- 王芳, 陈芝聪, 谢小平, 2018. 太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力[J]. 生态学报, 38(9): 3300-3310.
- 王千, 金晓斌, 周寅康, 2011. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制[J]. 生态学报, 31(20): 5903-5909.
- 魏帆, 韩广轩, 张金萍, 等, 2018. 1985—2015 年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征[J]. 生态学杂志, 37(5): 1527-1537.
- 邬建国, 2007. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 吴健生, 王政, 张理卿, 等, 2012. 景观格局变化驱动力研究进展[J]. 地理科学进展, 31(12): 1739-1746.
- 向英奇, 刘淼, 胡远满, 等, 2015. 辽宁省沿海地区景观格局时空变化及其驱动力[J]. 生态学杂志, 34(9): 2628-2635.
- 许吉仁, 董霁红, 2013. 1987—2010 年南四湖湿地景观格局变化及其驱动力研究[J]. 湿地科学, 11(4): 438-445.
- 阳文锐, 2015. 北京城市景观格局时空变化及驱动力[J]. 生态学报, 35(13): 4357-4366.
- 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等, 2016. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 36(15): 4780-4791.
- 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶, 2003. 关于景观格局演变研究的几个问题[J]. 地理科学, 23(3): 264-270.
- 赵文佳, 董会和, 孙理政, 等, 2017. 哈尔滨市城市建设用地结构变化及其影响因素分析[J]. 资源与产业, 19(1): 41-47.
- CABRAL A I R, COSTA F L, 2017. Land cover changes and landscape pattern dynamics in Senegal and Guinea Bissau borderland[J]. Applied Geography, 82: 115-128.
- CHI Y, SHI H H, ZHENG W, et al, 2018. Archipelagic landscape patterns and their ecological effects in multiple scales[J]. Ocean and Coastal Management, 152: 120-134.
- DOBBS C, NITSCHKE C R. KENDAL D, 2017. Assessing the drivers shaping global patterns of urban vegetation landscape structure[J]. Science of the Total Environment, 592: 171-177.
- GASPARRI N I, GRAU H R, SACCHI L V, 2015. Determinants of the spatial distribution of cultivated land in the North Argentine Dry Chaco in a multi-decadal study[J]. Journal of Arid Environments, 123: 31-39.
- HABER W, 2004. Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology[J]. Ecological Research, 19:

99-106.

LIANG P, YANG X P, 2016. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. *Catena*, 145: 321-333.

MUSAKWA W, WANG S, 2018. Landscape change and its drivers: a Southern African perspective[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33: 80-86.

PENG J, ZHAO M Y, GUO X N, et al, 2017. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land: a case study in Shenzhen City, China[J]. *Habitat International*, 60: 81-90.

PLIENINGER T, DRAUX H, FAGERHOLM N, et al, 2016. The driving forces of landscape change in Europe: a systematic review of the evidence[J]. *Land Use Policy*, 57: 204-214.

SU S L, WANG Y P, LUO F H, et al, 2017. Peri-urban vegetated landscape pattern changes in relation to socioeconomic development[J]. *Ecological Indicators*, 46: 477-486.

WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al, 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107-127.

XIE H L, HE Y F, XIE X, 2017. Exploring the factors influencing ecological land change for China's Beijing-Tianjin-Hebei Region using big data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 142: 677-687.

收稿日期：2018-12-03；修订日期：2019-04-02；责任编辑：胡媛。

基金项目：国家自然科学基金项目（41671175）；广东省自然科学基金项目（2017A030313240）；广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目（YQ2015127）。

第一作者简介：刘月亮，硕士生，主要从事土地利用与生态安全研究。E-mail: 1175724492@qq.com

通讯作者简介：赵冠伟，博士、副教授，主要从事土地资源变化监测与模拟研究。E-mail: zgw11124@163.com