基于地理探测器的绿洲城镇空间扩张驱动力分析
——以新疆石河子市为例

王莉红[1,2]，张军民[3]
(1.石河子大学 理学院，新疆 石河子 832000;
2.中国科学院 城市环境研究所，福建 厦门 361021; 3.广西师范大学 环境与资源学院，广西 桂林 541001;)

摘要： 城市空间无序扩张是产生当代“城市病”的重要根源，既是可持续发展关注的热点，更是中国特色城市化发展面临的现实问题。根据城市增长自组织原理及其空间结构理论，基于遥感影像识别和空间分析技术，用空间统计分析和地理探测模型，以新疆石河子市为例分析了典型绿洲城市空间扩张的驱动因子及其作用关系，结果表明：(1) 固定资产投资对建设用地扩张的解释力度最大，而人口因子的解释力最小，其他非人口因子的内生因子的解释力度较强。表明石河子市处于投资驱动初级阶段，投资规模及强度对城市扩张影响较大，但投资结构及投资效益改进不显著。(2) 各因子交互作用呈线性增强关系，表明内生因子对建设用地扩张的交互作用具有明显的线性和非线性增强作用，符合城市化初级阶段的扩张规律。扩大人口及经济规模、提高要素及产出效率是提高交互效益的关键。(3) 道路交通发展是城市扩张的最主要环境(背景)因子，但其解释力远远小于内生因子，其他环境因子的影响力和交互力都不明显，反映了城市扩张受到流域环境条件及生态基础的影响相对较弱，对稀缺或优势资源、要素及区位的竞争压力较小，绿洲城市还有较大的扩大空间和职能扩张潜力，应该有效利用城市规划手段来规范和引导城市有序发展和扩张。

关 键 词： 探测因子; 土地城市化; 因子探测器; 解释力; 新疆; 石河子市
中图分类号： F299.27 **文献标志码：** A **文章编号：** 1003-2363(2019)04-0068-07
doi: 10.3969/j.issn.1003-2363.2019.04.011

0 引言

城市扩张是一个地域空间过程，是城市化空间行为及其结果的重要表征，即表现为城市规模、形态及功能的空间拓展，更反映其相互作用、动态关联及协同进化，本质上是城市活动与背景环境的相互作用，是人地关系地域复合系统的空间表达，除内在的人口、经济空间集聚与极化增长外，还包括与周边环境的物质、能量、信息交换。因此，城市扩张(模式)既取决于社会经济发展需要，更取决于支撑系统的格局和功能。城市空间无序扩张导致的区域景观格局破碎、环境污染、生态退化，已经成为可持续发展关注的热点议题，更是中国特色城市化健康发展将面临的重大问题[1-3]。

绿洲城市城市空间扩张驱动早期是以单一影响因子为主控制而发展起来的，如有以资源导向发展起的绿洲城市克拉玛依，以政策导向为主发展起的新疆生产建设兵团，一些城市在早期技术开发水平较低时，城市空间扩张方向受制于地形，如乌鲁木齐市等，历经早期发展现在的绿洲城市空间扩张驱动变得更加多样与复杂。在城市人口、产业及其活动和影响高度集聚、快速扩张的背景下，催生了城市化发展水平评估与监测、城市化类型、过程和模式、城市化与资源环境交互影响及可持续发展、城市化质量、地域城市化等全球化热点命题[4-6]。国内研究主要基于中国快速城市化进程及建设用地扩张的实践背景，借助遥感监测、GIS 空间分析平台，综合应用景观指数、元胞自动机模型、地统计学、系统动力学等技术方法，研究城市扩张特征及模式。如用扩张强度反映空间扩张速度和方向，用紧凑度、分形维数、重心指数等反映空间形态变化等[7]，用空间作用强度测度城市对腹地辐射带动作用，用引力模型计算空间作用关系，用空间句法模型识别空间扩张方向及趋势；基于社会、经济、生态等多指标融合的非参数系统建模方法，被广泛应用于定量识别城市扩张模式[8-9]；研究城市扩张时空过程、形态格局及动态演变认为城市扩张是城市功能结构及其变化的形态表征，主要通过扩张形态、趋势、规模、强度、方向等空间属性来表征，用景观格局指数、空间统计模型等方法来测度城市功能及其空间结构、城市扩张及其驱动胁迫[10]；研究城市空间形态演变主要从社会、经济、文化、景观生态等角度，探索城市发展演变的驱动因素和城市扩张驱动机制，并且更多关

收稿日期：2018-07-11；修回日期：2018-12-05
基金项目：国家自然科学基金项目(41761030)
作者简介：王莉红(1994-)，女，新疆奎屯市人，硕士，主要从事绿洲景观生态安全与绿洲城市化研究，(E-mail) wanglihong_xj@126.com。
通信作者：张军民(1964-)，男，新疆吐鲁番市人，教授，博士，主要从事绿洲城市化与区域发展研究，(E-mail) zjm_tea@shzu.edu.cn。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

注到城市化空间扩张的地域差异及其演变机理，对不同性质、状态的区域城市问题开展了实证研究，普遍认为：中国城市化恶化了生态结构与功能、资源供给、环境承载与安全，其中具有全球及区域影响力的城市群及生态脆弱区域的城市化人地矛盾最为突出，城市化面临的风险与挑战也最为严重[11-12]。

地理探测器集大数据支持下的 GIS 空间分析与地学统计方法于一体，将多源遥感等空间显示数据与经济统计等属性分析数据交互迭代，实现了对复杂系统问题的多层次、跨区域、多时空因子动态过程的建模与分析，被广泛应用到自然和社会现象影响的多因子交互作用研究[13]。如对不同时空尺度地域城市化的主导驱动力研究[14]；通过分析人口及产业密度与生态因子的交互作用，探索城市景观演变的控制因素[15]；研究城乡用地形成及变化机理与城乡景观分异驱动力等[16]；揭示了县域城镇化地域分异主要受经济增长及社会发展因子影响[17]；经济发展对胡焕庸线两侧人口分异性的影响不断增强，但自然差异仍然影响深刻[18]；用以诊断县域农村贫困化分异主导因子及动力机制等[19]。地理探测器弥补了 GIS 分析和地学统计在空间尺度转换、分异过程及因子驱动机制识别等方面的不足，但仍需灵活使用。如样本量较小时自变量和因变量的空间自相关检验，数值变量与类型变量的随机转换，在探测空间异质性基础上确定全局或局域参数等。本研究在探究典型内陆河流域城市空间扩张驱动因子及其空间分异规律，在修正点源、面源因子驱动机理的基础上，从内生因子驱动和环境因子约束两个维度，分析绿洲城市拓展的驱动因子及其交互作用，研究各因子间的相互作用及内在关联，揭示绿洲城市空间扩张的地域特征及变化趋势，可为绿洲城市健康发展及科学规划提供理论指导及实证依据。

1　研究区概况

石河子市是新疆玛纳斯河流域的中心城市，市区辖一市一镇，两个开发区，两个生态区，以及一个工业园区，是新疆天山北坡经济带的中心城市，据 2017 年《新疆统计年鉴》显示 2016 年城市人口达到 57.38 万人，城镇化率达到 76.78%，地区生产总值 306.46 亿元，其中第一、二、三产业产值分别为 10.06 亿元、176.4 亿元、120 亿元，人均生产总值 78 200 元，进出口总额 1 763 万美元，工业总产值 139.32 亿元，社会消费品零售总额 15.56 亿元，行政区域总面积约为 460 km^2（图 1）。

图 1　研究区功能分区

Fig.1　Functional partition of the study area

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与处理

基于 Landsat ETM+/OLI 影像，用归一化建设用地指数叠加土地利用分类方法提取建设用地边界及面积[20]，通过叠加分析在 ArcGIS 平台上统计类型及面积变化。用空间扩张指数分析方法提取石河子市道路网密度、距建设用地距离、坡度、植被覆盖度、土壤裸露度、距水源距离等空间信息，人口密度、GDP、地区生产总值、国家投资、固定资产投资等社会经济数据取自 2001—2017 年的《石河子年鉴》以及《新疆统计年鉴》。

2.2　研究方法

2.2.1　探测指标体系。选取数值和面源两类数据作地理探测空间分析的数据源。数值数据选取包括建设用地扩张面积（Y）、施工面积（X_1）、人均道路（X_2）、人均绿化（X_3）、固定资产投资（X_4）、基本建设投资（X_5）、城镇人口（X_6）、全社会用电量（X_7）、人均国内生产总值（X_8）、地区生产总值（X_9）、第一产业增加值（X_{10}）、第二产业增加值（X_{11}）、第三产业增加值（X_{12}）、建筑业总产值（X_{13}）、工业总产值（X_{14}）、社会消费品零售总额（X_{15}），数据来自《石河子年鉴》《新疆统计年鉴》。面域数据选取包括 T（建设用地扩张与否）、距离道路距离（Z_1）、人口密度（Z_2）、距离水源河流距离（Z_3）、坡度（Z_4）、土壤裸露度（Z_5）、植被覆盖度（Z_6）等空间形态属性数据，两类指标分别用作探测空间扩张驱动因子及关联性分析。

2.2.2　离散化处理。离散化可以有效降低时间复杂度，将环境因子的各变量的取值范围均匀划成四等份，进行等距离散化处理。

2.2.3　地理探测器。地理探测器模型是由王劲峰等提出的一种空间分析模型，包含风险、因子、生态、交互 4 个部分，不仅能够分析多因子之间的交互作用，度量空间分异性、探测解释因子，并且能够探测驱动因子解释力度，现已被应用在地理学的多个领域，其中风险探测器被用来用于判断两个子区域间的属性均值是否存在显著差异，因子探测器被用来探测一个变量的空间分异性，即探测某因子在多大程度上能够解释变量的空间分异，生态探测器被用来用于比较两因子对某种属性空间

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分布的影响是否有显著的差异，交互作用探测器被用来定量两个因子交互作用后相对单个因子的影响程度的变化[13]。本研究分析影响绿洲城市扩张的各因子的相对重要性和空间分异性，用“因子探测器”分析各因子对城市扩张的解释程度，q 值表示为自变量对变量的解释力，当 q 值大于 0.5 时，因子对城市扩张的解释力度较强；用“交互作用探测器”定量两个因子 A 和 B 交互作用对绿洲城市扩张的作用关系相对单个因子对绿洲城市扩张是加强还是弱化。当 $q(A\cap B)>q(A)+q(B)$ 时呈非线性增强趋势，当 $\mathrm{Mas}(q(A),q(B))<q(A\cap B)<q(A)+q(B)$ 时呈线性增强趋势。

3 结果分析

3.1 内生因子探测结果及分析

城市用地扩张是城市经济发展、功能变化的结果，经济属性等直接决定着城市扩张形态。用因子探测器定量探测内生因子对空间扩张的解释力度，以 2000 年各因子的实际值为参照值，用环比增长率反映一个周期内各指标数据在数字上的浮动，2000—2016 年间，内生因子在总体呈增长趋势，社会消费品零售总额增长幅度最大。人口数量和建筑业总产值在 2001 年变化幅度较大，固定资产投资 2008 年、2012 年波动较大（表 1）。

表 1 2000—2016 年社会经济因子环比增长率

Tab.1 Chain growth rate of socio-economic factors from 2000 to 2016

因子	参照值	环比增长率/%							
	2000 年	2001 年	2004 年	2006 年	2008 年	2010 年	2012 年	2014 年	2016 年
施工面积/km^2	0.47	−0.17	55.42	37.98	35.06	95.19	51.22	2.82	3.49
人均道路/m^2	10.56	4.26	29.17	19.46	17.45	4.68	9.13	12.50	−1.64
人均绿化/m^2	7.80	1.15	11.90	21.62	20.49	0.00	−2.69	0.09	−4.07
固定资产投资/亿元	16.24	0.00	0.90	−4.95	77.04	15.13	60.00	0.29	−9.85
基本建设投资/亿元	7.06	0.00	28.33	−15.59	55.96	28.47	89.52	18.36	13.17
城镇人口/万人	32.49	81.63	1.95	−3.09	−0.86	0.57	0.71	2.35	−0.72
全社会用电量/（亿 kW·h）	8.99	−2.39	17.34	−1.36	50.33	0.00	46.25	27.41	14.18
人均国内生产总值/元	7.09	27.96	10.78	18.90	22.17	24.39	19.08	10.41	−6.57
地区生产总值/亿元	25.36	10.61	17.49	0.04	24.19	24.58	22.04	14.69	−2.95
第一产业增加值/亿元	3.29	−37.39	−5.59	−4.89	18.66	27.50	3.36	−10.28	−6.39
第二产业增加值/亿元	10.45	15.31	22.29	−16.62	23.11	23.80	27.02	17.48	−4.85
第三产业增加值/亿元	11.62	19.97	19.09	−11.11	26.17	25.05	22.17	13.41	0.31
建筑业总产值/亿元	9.58	63.20	28.50	19.87	8.92	0.00	23.43	49.24	−3.72
工业总产值/亿元	25.29	18.39	15.74	6.93	33.81	24.78	27.86	17.73	6.77
社会消费品零售总额/亿元	15.04	−3.53	1.64	38.14	4.28	9.68	19.17	58.12	55.46

（1）分异因子：各因子对建设用地面积扩张的解释力度由大到小排序为：q（固定资产投资）>q（地区生产总值）=q（第二产业增加值）=q（第三产业增加值）=q（工业总产值）=q（社会消费品零售总额）>q（施工面积）=q（第一产业增加值）>q（人均道路）>q（建筑产业总产值）>q（人均绿化面积）>q（城镇人口）。其中固定资产投资对建设用地扩张面积的解释力度最大，为 0.922，城镇人口对建设用地扩张面积的解释力度最小，为 0.493，基本接近 50%，除人口数量、人均国内生产总值、人均绿化面积对城市面积扩张影响力度较弱，其他因子对建设用地扩张的解释力度较强。反映了石河子市处于投资驱动初级阶段，投资规模及强度对城市扩张的影响极大，但投资结构及投资效益改进不显著，城市化对产业结构升级及商业贸易驱动表现不明显，人口因子并未成为城市扩张的首位驱动。

（2）交互探测结果：各因子交互作用为互相增强，且呈线性增强关系（表 2）。反映了经济因子对建设用地扩张的交互解释力度很强，彼此间具有明显的系统关联性和结构协整性，符合城市化初级阶段的扩张规律。其中城镇人口和人均生产总值交互后对建设用地扩张解释力度最强，达到 0.983，q 值相对较小的如绿化面积、城镇人口、人均国内生产总值、建筑业总产值等，与其他因子交互作用较强，交互解释力均大于 85.5%，表明这些因子属于系统变化中的短板因子，其单独作用对城市化影响较弱但却具有明显的木桶效应。

3.2 环境等因子探测结果及分析

除了经济驱动等内生因子外，环境条件、基础设施、地缘区位等环境因子，也从基础层面影响城市扩张。用坡度、土壤裸露度、植被覆盖度表示环境属性，其中，土壤裸露度为遥感影像经缨帽变化和归一化土壤指数处理，按照权重百分比进行重分类，分类结果如图 3 所示；根据植被类型覆盖率标准与分布特征采用遥感监测法和植被归一化指数，将植被覆盖分为四类，高类（≥75%）、中高类（60%～75%）、中类（45%～60%）、低类（≤45%）（图 4）；从研究区 DEM 影像中提取坡度值，参照国家标准识别坡度分异特征将研究区坡度分为四类（图 5）。根据距离河流远近建立三重缓冲区共分四类（图 6），观察建设用地扩张区域在不同级别的河流缓冲

表 2 交互探测结果

Tab.2 Interactive detection result

$q(A\cap B)$	$q(A)+q(B)$	比较	解释
q（城镇人口∩人均生产总值）= 0.983	q（城镇人口）+q（人均生产总值）= 1.096	$\mathrm{Mas}(q(A),q(B))<q(A\cap B)<q(A)+q(B)$	线性增强
q（施工面积∩人均绿化面积）= 0.978	q（施工面积）+q（人均绿化面积）= 1.506	$\mathrm{Mas}(q(A),q(B))<q(A\cap B)<q(A)+q(B)$	线性增强

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

q(人均绿化面积∩人均国内生产总值) = 0.978	q(人均绿化面积) +q(人均国内生产总值) = 1.180	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均道路面积∩城镇人口) = 0.977	q(人均道路面积) +q(城镇人口) = 1.489	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(全社会用电量∩人均国内生产总值) = 0.963	q(全社会用电量) +q(人均生产总值) = 1.508	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均国内生产总值∩地区生产总值) = 0.963	q(人均国内生产总值) +q(地区生产总值) = 1.508	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均国内生产总值∩第一产业增加值) = 0.963	q(人均国内生产总值) +q(第一产业增加值) = 1.500	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均国内生产总值∩第二产业增加值) = 0.963	q(人均国内生产总值) +q(第二产业增加值) = 1.508	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均国内生产总值∩施工面积) = 0.961	q(人均国内生产总值) +q(施工面积) = 1.500	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强
q(人均绿化面积∩建筑产业总值) = 0.855	q(人均绿化面积) +q(建筑产业总值) = 1.421	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)$ +$q(B)$	线性增强

说明：当 $q(A\cap B) > q(A) + q(B)$ 时呈非线性增强趋势；当 $\mathrm{Mas}(q(A),q(B)) < q(A\cap B) < q(A) + q(B)$ 时呈线性增强趋势。下表同。

区内，距离河流远近对建设用地扩张的影响；根据距离道路远近建立三重道路缓冲区（图 7），观察建设用地扩张区域在不同级别道路缓冲区内，分析距离道路远近对建设用地扩张的影响；依据人口密度将石河子市划分为 4 个人口密度区，观察城市扩张与人口密度的关系（图 8）。具体分类标准见表 3。

表 3　研究区指标及评价体系

Tab.3　Soil index evaluation index system in the study area

指标	1 级	2 级	3 级	4 级
人口密度/(人·km^{-2})	≤800	800～1 500	1 500～3 000	≥3 000
距河流距离/m	≥4 500	3 000～4 500	1 500～3 000	≤1 500
距道路距离/m	≥900	600～900	300～600	0～300
坡度/(°)	55～90	35～55	25～35	0～25
土壤裸露度/%	≥75	60～75	45～60	≤45
植被覆盖度/%	≤45	45～60	60～75	≥75

将建设用地扩张面积(T)均匀分成面积相等的渔网格点，将建设用地扩张区域进行可视化表达（图 2），与对应的因子(Z)相叠加，从而提取每个格网内出现的因变量和自变量(T,Z)的比例。格点密度为 1 km×1 km 的渔网，将渔网内网格中心定义为标注点，自南向北自左向右依次标记为 y_1,y_2,y_3,…,y_{456}。根据网格内的自然等因子的等级分布，探测建设用地扩张与距离道路距离(Z_1)、人口密度(Z_2)、距离水源河流距离(Z_3)、坡度(Z_4)、土壤裸露度(Z_5)、植被覆盖度(Z_6)这 6 个指标对城市建设用地空间扩张的作用程度及异质性。其中 T(0,1)，0 表示格点内没有建设用地扩张，1 代表格点内有建设用地扩张；Z(1,2,3,4)表示对应的等级，等级数越大越有利于城市建设用地扩张。

2000—2016 年，石河子市建设用地呈团状扩张，城市扩张区域主要分布在城市东北部的开发区、北工业园区、东南部的南开发区以及北泉镇片区。此外，中心城区东部也有部分扩张区域。

3.2.1　驱动因子及变化规律。2000—2016 年间道路网密度变化最大，其他因子变化较小。植被覆盖度最小的区域为将军山生态园区和建设用地，人口密度和道路网

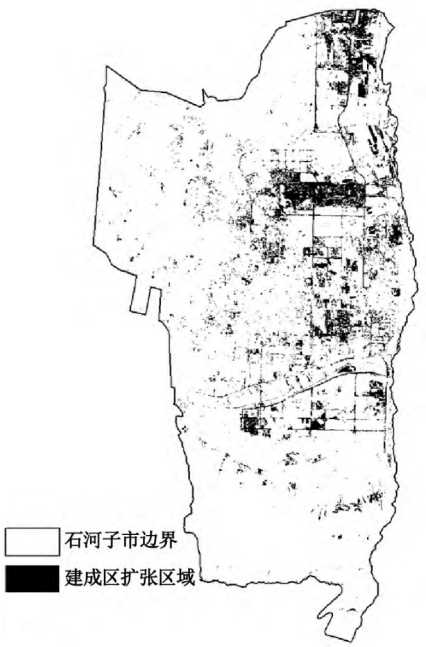

图 2　建设用地扩张区域

Fig.2　Construction land expansion area

密度最大区域是建设用地，距水源地距离最近区域在城市东侧和南山开发区。在 ArcGIS 平台上将上述因子的等级分类图层与建设用地扩张的图层相叠加，用地理探测器探测因子对城市扩张的驱动情况。

（1）2000—2016 年驱动因子解释力 q 值从大到小排列依次为：距离道路距离（30.17%）、坡度（8.95%）、土壤裸露度（7.12%）、植被覆盖度（6.63%）、距离水源河流距离（0.97%）、人口密度（0.37%）。其中距离道路远近对石河子市建设用地扩张具有较强的决定力，坡度、土壤裸露度、植被覆盖度对石河子市建设用地扩张的决定力一般，距河流水源距离、人口密度对石河子市建设用地扩张的决定力较弱。将建设用地与道路网密度相叠加，发现道路网的密度越大，对建设用地的吸引力越大，且随着道路网密度的减小，建设用地的选择也逐渐减小。王振坡等研究表明建设用地的向外扩张使其对人口和产业的吸引力不断积聚[21]，目前，石河子市建设

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

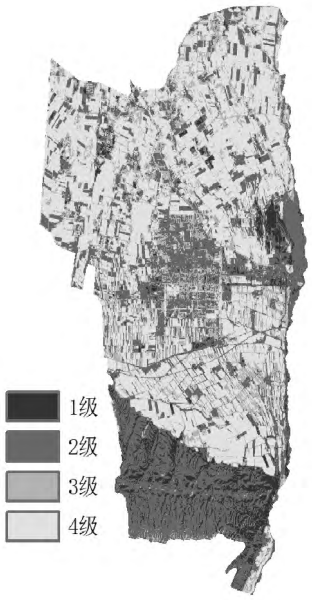

图 3 土壤裸露度分级

Fig.3 Grade of soil exposed

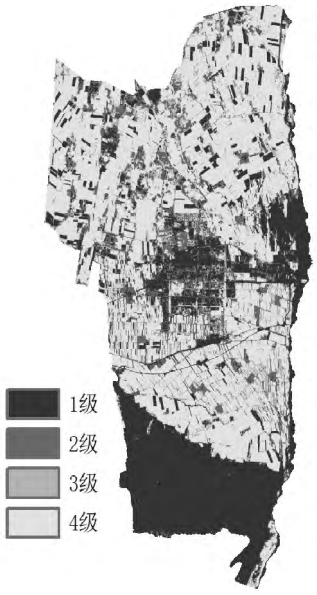

图 4 植被覆盖度分级

Fig.4 Vegetation coverage rating

图 5 坡度分级

Fig.5 Slope gr

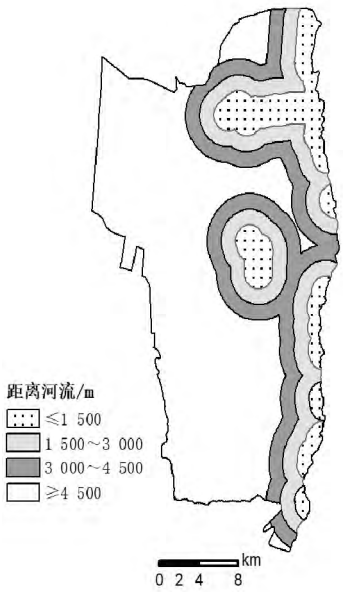

图 6 距离水源距离

Fig.6 Water distance

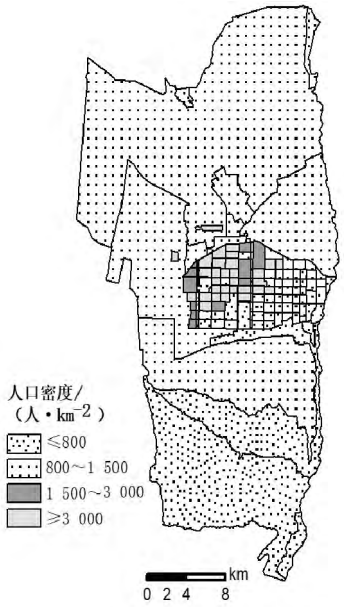

图 7 人口密度

Fig.7 Population density

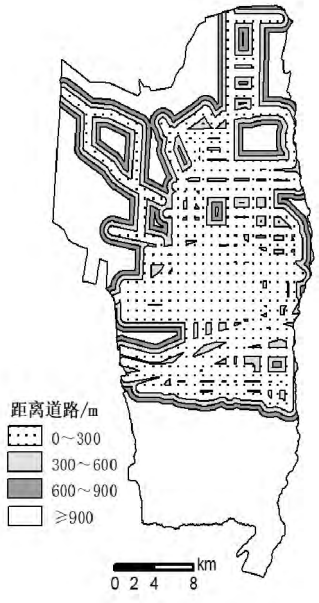

图 8 道路网密度

Fig.8 Road network density

用地的向外围扩展、分散的趋势在一定程度上已经吸引了周边城乡人口的向心积聚。

(2) 环境因子对城市扩张解释力远远小于经济驱动因子，反映了城市扩张与流域自然条件及发展基础的影响相对较小，城市发展对自然稀缺或优势资源、生态要素及区位的竞争压力较小，城市形态及功能拓展潜力还较大。

3.2.2 交互探测结果及分析。(1) 各因子交互作用后互相增强，表 4 显示解释力度 q 值从大到小依次为：距离道路距离/植被覆盖度(34.30%) >距离道路距离/人口密度(34.18%) >距离道路距离/土壤裸露度(33.72%) >距离道路距离/距离水源距离(32.69%) >距离道路距离/坡度(31.09%) >土壤裸露度/植被覆盖度(13.24%) >土壤裸露度/距离水源距离(12.26%) >土壤裸露度/坡度(11.34%) >土壤裸露度/植被覆盖度(10.88%) >土壤裸露度/人口密度(10.53%)。(2) 距离道路距离/人口密度，土壤裸露度/距离水源距离表现为非线性增强，说明距离道路距离增强了人口密度对建设用地扩张的解释力度，土壤裸露度增强了距水源距离对建设用地扩张的解释力度。其中，距离道路距离和植被覆盖度交互后对建设用地扩张解释力度最强，达到0.343，但未大于 0.5，这说明面域因子中的自然等因素对建设用地扩张的影响力度并不强，远小于社会经济因子对城市扩张的解释力度。

表 4 交互探测结果

Tab.4 Interactive detection result

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$q(A\cap B)$	$q(A)+q(B)$	比较	解释
q(距离道路距离∩植被覆盖度) = 0.343	q(距离道路距离) +q(植被覆盖度) = 0.368	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(距离道路距离∩人口密度) = 0.342	q(距离道路距离) +q(人口密度) = 0.339	$q(A\cap B)>q(A)+q(B)$	非线性增强
q(距离道路距离∩土壤裸露度) = 0.337	q(距离道路距离) +q(土壤裸露度) = 0.373	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(距离道路距离∩距离水源距离) = 0.326	q(距离道路距离) +q(距离水源距离) = 0.327	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(距离道路距离∩坡度) = 0.311	q(距离道路距离) +q(坡度) = 0.391	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(土壤裸露度∩植被覆盖度) = 0.132	q(土壤裸露度) +q(植被覆盖度) = 0.137	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(土壤裸露度∩距离水源距离) = 0.123	q(土壤裸露度) +q(距离水源距离) = 0.096	$q(A\cap B)>q(A)+q(B)$	非线性增强
q(土壤裸露度∩坡度) = 0.113	q(土壤裸露度) +q(坡度) = 0.113	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(土壤裸露度∩植被覆盖度) = 0.109	q(土壤裸露度) +q(植被覆盖度) = 0.109	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强
q(土壤裸露度∩人口密度) = 0.105	q(土壤裸露度) +q(人口密度) = 0.105	Mas($q(A)$,$q(B)$) <$q(A\cap B)$ <$q(A)+q(B)$	线性增强

4　结论

(1) 社会经济因子和自然环境因子对石河子市扩展的影响均存在交互作用，且任意两个因子交互后对建设用地扩张均呈线性或非线性增强作用。因子探测发现：社会经济因子中各因子的 q 值都较大，且各交互因子之间的解释力均大于 85.5%，各因子间的交互作用中绿化面积、城镇人口、人均国内生产总值、建筑业总产值与其他因子交互后的解释力度显著性较强；面域因子的 q 值都相对较小，但各因子间交互探测后都呈增强趋势，其中道路距离与其他因子交互后增强效果最明显，建设用地更倾向于道路网密度大的区域，随着距离的增大建设用地扩张衰减显著。经济增长比社会发展有较强的解释力度，与相关研究得出的结论一致，说明经济城镇化要强于社会、土地城镇化，体现了干旱区城市化的地域特征及阶段水平。同时，自然因子依然对城市空间扩张起基础性影响，在交通落后、交通网络不完善条件下自然因子对干旱区城市扩张影响较突出。

(2) 地理探测揭示了现阶段绿洲城市化主要受经济发展特别是经济规模扩张及投资水平扩大的影响，城市空间扩张虽然也表现为建设用地面积及产业园区增长、城市景观及城市边界扩大等城市化普遍现象，但并非表现为大规模、高强度的破坏性影响，也未伴随着内陆河流域农业用地及乡村景观的迅速衰退，体现了绿洲城市空间扩张乏力，内生动力不足；同时也没有表现出明显的吸引就业、提高收入、优化结构、改善环境等城市化虹吸效应，反映了城市空间扩张的外生引力严重不足，城市空间扩张与城市功能增强未形成良性的循环因果关系，绿洲城市化处于自发增长、无序扩张的初级阶段。

(3) 石河子市人口城市化正在减弱，经济城市化与土地城市化正在增强。自 2005 年开始，石河子市人口数量、人口密度及人均产出均增长缓慢，人口属性变化对城市扩张的空间关联性开始减弱，但城市化水平对人口增长仍然高度依赖[22-23]，扩大人口规模、提高人均效率、推进精细增长是解决短板制约、提高交互效益的关键。石河子市建设用地扩张以居住用地和工业用地为主，与我国城市扩张趋势相一致[24]，但工业用地扩张速度远大于居住用地，现阶段工业化是推动城市扩张的主要动力，第三产业及生态服务用地比重较小，增长较慢，城市扩张质量、结构及效率亟待提高。距离水源距离是影响绿洲人口和城镇布局的重要因素，但并非是石河子市空间扩张驱动的首位因子。人工引水工程改变了绿洲城镇发展格局，但河网分布及河流水情仍然是决定绿洲城镇规模等级、功能布局的限制因子。

参考文献：

[1] 陈明星.城市化领域的研究进展和科学问题[J].地理研究，2015，34(4)：614-630.

[2] 方创琳，鲍超，乔标.城市化过程与生态环境效应[M].北京：科学出版社，2008.

[3] 张静，任志远.陕西省城市可持续发展系统协调性评价[J].地域研究与开发，2016，35(4)：79-84.

[4] ROBIN L. Global Shift：Reshaping the Global Economic Map in the 21st Century by Peter Dicken[J]. Economic Geography，2004，80(4)：411-412.

[5] 鲍超，方创琳.干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析[J].地理学报，2008，63(11)：1140-1150.

[6] 龙茂乾，孟晓晨.城镇化、郊区化与中国城市空间扩张[J].地域研究与开发，2015，34(3)：53-60.

[7] 程开明.城市紧凑度影响能源消耗的理论机制与实证分析[J].经济地理，2011，31(7)：1107-1112.

[8] 关兴良，胡仕林，蔺雪芹，等.武汉城市群城镇用地扩展的动态模式及其驱动机制[J].长江流域资源与环境，2014，23(11)：1493-1501.

[9] 张小雷，杜宏茹.中国干旱区城镇化发展现状及新型城市化路径选择[J].中国科学院院刊，2013，28(1)：46-53.

[10] 方创琳，鲍超，黄金川，等.中国城镇化发展的地理学贡献与责任使命[J].地理科学，2018，38(3)：321-332.

[11] 姚士谋，陆大道，陈振光，等.顺应我国国情条件的城镇化问题的严峻思考[J].经济地理，2012，32(5)：1-6.

[12] 方创琳，王岩.中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J].地理学报，2015，70(2)：234-247.

[13] 王劲峰，徐成东.地理探测器：原理与展望[J].地理学报，2017，72(1)：116-134.

[14] 刘彦随，杨忍.中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J].地理学报，2012，67(8)：1011-1020.

[15] REN Y，DENG L Y. Geographical Modeling of Spatial Interaction between Human Activity and Forest Connectivity in An Urban Landscape of Southeast China[J]. Landscape Ecology，2014，29(10)：1741-1758.

[16] 蔡芳芳，濮励杰.南通市城乡建设用地演变时空特征及形成机理[J].资源科学，2014，36(4)：731-740.

[17] 杨勃，石培基.甘肃省县域城镇化地域差异及形成机理[J].干旱区地理，2014，37(4)：838-845.

[18] 李佳洺，陆大道，徐成东，等.胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J].地理学报，2017，72(1)：148-160.

[19] 刘彦随，李进涛.中国县域农村贫困化分异机制的地

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理探测与优化决策[J].地理学报,2017,72(1):161-173.
[20] 查勇,倪绍祥,杨山.一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J].遥感学报,2003,7(1):37-40.
[21] 王振坡,薛珂,王丽艳. 天津市人口郊区化特征及其动力因素[J].地域研究与开发,2017,36(4):158-163.
[22] 邓超,程钢,孙震辉.基于 TM 影像的焦作市城市扩张与驱动力分析[J].测绘工程,2015,24(8):57-61.
[23] 刘瑞,朱道林,朱战强,等.基于 Logistic 回归模型的德州市城市建设用地扩张驱动力分析[J].资源科学,2009,31(11):1919-1926.
[24] 王洋,王少剑,秦静.中国城市土地城市化水平与进程的空间评价[J].地理研究,2014,33(12):2228-2238.

Driving Force Analysis of Spatial Expansion of Oasis Towns Based on Geographical Detectors: Take Shihezi City in Xinjiang as An Example

WANG Lihong[1,2], ZHANG Junmin[3]
(1. *School of Science, Shihezi University, Shihezi* 832000, *China*;
2. *Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen* 361021, *China*;
3. *College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin* 541001, *China*)

Abstract: The disorderly expansion of urban space is an important source of contemporary "urban disease". It is not only a hot spot for sustainable development, but also a realistic problem facing the development of urbanization with Chinese characteristics. According to the self-organization principle of urban growth and its spatial structure theory, based on remote sensing image recognition and spatial analysis technology, the driving factors of spatial expansion of typical oasis cities and their relations of action are analyzed with the spatial statistical analysis and geographic detection model. It is concluded that: (1) Fixed assets investment has the strongest interpretation of construction land expansion area, while the population factor has the least explanatory power and other non-population factors have stronger interpretation. It shows that Shihezi City is in the initial stage of investment driving. The scale and intensity of investment have a great impact on urban expansion, but the investment structure and investment efficiency improvement are not significant. (2) The interaction of various factors is linearly enhanced, which indicates that endogenous factors have significant linear and nonlinear enhancement effects on the interaction of construction land expansion, which conforms to the expansion law in the initial stage of urbanization. Expanding population and economic scale and improving factors and output efficiency are the key to improve mutual benefits. (3) Road traffic development is the most important environmental (background) factor for urban expansion, but its explanatory power is far less than endogenous factors. The influence and interaction of other environmental factors are not obvious, reflecting the urban expansion and environmental conditions of the basin. The impact of the ecological base is relatively weak, and the competitive pressure on scarce or superior resources, factors and locations is relatively small. Oasis cities also have a large form of expansion space and functional expansion potential, and should effectively use urban planning means to regulate and guide cities orderly development and expansion.

Key words: detection factor; land urbanization; factor detector; explanatory power; Xinjiang; Shihezi City

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net