

DOI: 10.5846/stxb201809091932

高倩,方创琳,张小雷,刘海猛,任宇飞.丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空演变特征及影响机理.生态学报,2019,39(4):

Gao Q, Fang C L, Zhang X L, Liu H M, Ren Y F. Spatio-temporal evolution characteristics and mechanisms of influence of urban construction land expansion in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4):

丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空演变特征及影响机理

高倩^{1,3},方创琳^{1,2,*},张小雷^{3,4},刘海猛²,任宇飞^{2,4}

1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

2 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

3 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011

4 中国科学院大学,北京 100049

摘要:将丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展作为一个时空变化系统进行分析,提取 1980—2015 年 7 个年份用地演变信息,结合 10 km×10 km 方格网构建,从总量趋势、分地州市级区域、分用地类型及特殊性全面认知扩展的时空演变特征,采用地理探测器模型,在县域尺度定量诊断城镇建设用地扩展的人文要素和自然要素的影响程度及各要素间的交互影响作用,进而识别其主控要素并探讨其作用机理,对比分析天山北坡城市群和喀什都市圈两个重点发展区域的分异性。研究结果表明:近 35 年以来,丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展约 2.9 倍,扩展强度波动增长且以分散小斑块为主,各地州市扩展规模和强度的时空差异性显著,次一级城镇建设用地类型扩展呈现动态变化特征,用地扩展受自然本底胁迫条件和经济社会发展过程多重影响有其特殊性;全域城镇建设用地在县域尺度以低水平扩展与各级人文要素和自然要素水平的耦合匹配关系为主;综合地理探测器因子分析模块和交互作用模块的探测结果,判定地形位指数、城镇化率、地形起伏度、二三产业比重为影响丝绸之路经济带核心区新疆县域城镇建设用地扩展的主控要素,并探寻各主控要素的作用机理;在重点发展区域天山北坡城市群和喀什都市圈的驱动要素有共性也有明显分异性。该研究为丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地因地因城因类的差别化调控及区域可持续发展提供科学支撑和决策依据。

关键词:城镇建设用地扩展;时空演变;自然要素;人文要素;地理探测器;影响机理;丝绸之路经济带核心区新疆

Spatio-temporal evolution characteristics and mechanisms of influence of urban construction land expansion in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt

GAO Qian^{1,3}, FANG Chuanglin^{1,2}, ZHANG Xiaolei^{3,4}, LIU Haimeng², REN Yufei^{2,4}

1 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The expansion of urban construction land in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt, was analyzed as comprising a spatio-temporal change system. Information regarding land use change over 7 years from 1980 to 2015 was extracted. Using a 10 km×10 km grid, the spatial and temporal evolution characteristics of land use expansion

基金项目:中国科学院战略性先导科技 A 类专项(XDA20040400);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-6-2)

收稿日期:2018-09-09; 修订日期:2018-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangcl@igsnr.ac.cn

were comprehensively assessed from the viewpoints of the gross trend, sub-prefecture-level regions, sub-land types and distinctiveness. Using the Geographical Detector model, the degree of influence of human and natural elements of urban construction land expansion and the interaction between various elements were quantitatively diagnosed at the county level. Then, the main control elements were identified and their mechanism of action discussed. The differentiation between the two key development areas of the Tianshan North-slope urban agglomeration and Kashgar metropolitan region was analyzed. The results showed that, over the past 35 years, urban construction land in Xinjiang had expanded by about 2.9 times. The intensity of the expansion fluctuated, and expansion was dominated by scattered small patches. There were significant spatial and temporal differences in the scale and intensity of the expansion in various regions. The expansion of urban land and other construction land presented dynamic change characteristics. The distinctiveness of urban construction land expansion were affected by natural background constraints and economic and social development. At the county level, the low-level expansion of urban construction land and human and natural factors at all levels was the main spatial coupling and matching relationship over the entire study area. Based on the results of the factor analysis module and interaction module of the Geographic Detector, it was concluded that terrain niche index, urbanization rate, landform relief degree, and the proportion of secondary and tertiary industries were the main controlling factors affecting the expansion of urban construction land in Xinjiang. The underlying mechanisms of the main control factors were also explored. There were similarities and differences in driving factors in the key development areas, the Tianshan North-slope urban agglomeration and Kashgar metropolitan region. The present study provides scientific support and a basis for decision-making for the sustainable development of Xinjiang and the differential regulation of urban construction land due to different locations, cities, and sub-land types.

Key Words: urban construction land expansion; spatio-temporal evolution; natural elements; human elements; Geographical Detector; influence mechanism; Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt

地球迈入“人类世”后,认知人类活动与地表环境系统的影响机理进而调控和管理人类行为,成为国际“Future Earth”研究计划、IPCC 项目、生物多样性和生态系统服务政府间科学-政策平台(IPBES)等重大研究计划倡导的前沿领域与优先级主题^[1-2]。自 20 世纪 80 年代,国内地理学者也先后强调要将自然环境过程与人文社会经济现象的互动机理研究作为当代地理学发展的重要方向之一^[3-4]。近年来,生态环境与城镇化两大系统的耦合与胁迫机理调控的研究框架强调自然与人文两大系统之间的动态作用,也要认知系统内部各要素之间对另一系统要素的动态效应^[5-6]。全球范围的城镇化引发的城镇土地扩张,是人类活动影响自然环境系统改变的直观体现^[7]。城镇建设用地,是陆地表层系统演化过程中人地矛盾最突出、最不可逆转的地域,也是城镇化复杂系统内部自组织和动态演化效应对生态环境系统影响最深、作用最直接的要素之一^[8-9]。由城镇建设用地扩展引发的区域生物地球化学循环^[10]、气温变化^[11]、生物多样性减少^[12]、不透水表面增加^[13]等相继引起科学家们的重视。因此,在对城镇体系规划、资源环境管理和调控、市场分析和分配等领域宏观决策前,探明历史阶段和现状实情的城镇建设用地格局与扩展过程,实证解析城镇建设用地扩展变化的主控要素及影响机理,是区域可持续发展的一项必要性工作^[14]。

对已有城镇建设用地扩展研究作以归纳和分析,在用地数据源方面,美国国家地理信息中心(NGDC)提供的夜间灯光影像适宜全球大、中尺度城镇信息提取^[15], Landsat 等多源遥感数据与统计数据^[16-17]多用于区域中、小尺度城镇信息提取,国内刘纪远研究组搭建中国 LUCC 时空平台提供上世纪末至今的 LUCC 数据集^[18]。城镇建设用地时空特征模拟方面,除传统土地利用动态度等表征指标外,近年来相继应用自组织映射神经网络^[19]、Dyna-CLUE^[20]、FLUS^[21]、元胞自动机 CA (Cellular Automata) 与多智能体 ABM (Agent-Based Model)^[22]等新模型。在识别驱动因子的方法和技术手段上,相关或回归分析^[23]、SD 系统动力学^[24]、协整分析^[25]等及王劲峰团队基于空间分层异质性原理开发的地理探测器(Geodetector)新方法^[26-28]先后被有效应

用。已有文献结论^[27-29]证实自然要素中的地形、海拔、到市中心距离等和人文要素中的 GDP、固定资产投资、人口密度、二三产业产值、城镇化率等是影响城镇建设用地扩展的主要因素。综合来看,遥感监测数据与新模型方法的结合、自然条件和社会经济条件综合考虑探寻演变机理,是国内外城镇建设用地扩展研究的新近趋势。

2014年5月二次中央新疆工作会议,新疆被确立为“丝绸之路经济带核心区”,2015年4月,丝绸之路经济带被全国两会列为中国新时期发展的三条战略支撑带之一,2016年3月,丝绸之路经济带核心区建设作为“十三五”规划国家完善对外开放布局的重要部署。城镇建设用地作为丝绸之路经济带核心区生产与生活的重要场所,也是丝绸之路经济带国内段边疆支点与走廊门户建设水准的重要体现,把控好丝绸之路经济带核心区新疆今天与未来城镇建设用地布局的现实意义深远。然而,丝绸之路经济带核心区新疆建设用地时空格局及其影响因子的目前研究^[30-33]尚存在一些不足之处:①在城镇建设用地时空格局的研究单元上,主要以个别区域或个别城市为案例区,全疆尺度的完整分析较少;②研究时段上,以近10—20年时间序列居多;③驱动要素探索上,多局限于分析人文经济影响因素,而鲜少见自然环境本底因素和人文经济因素共同解释用地演变的时空分异程度及各因素交互作用影响的着眼点。鉴于此,本研究通过提取1980—2015年丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地变化信息,从总量趋势、分地州市级区域、分用地类型及特殊性全面探析扩展的时空演变特征,在县域尺度与各影响要素进行空间耦合匹配分析,定量判别影响城镇建设用地扩展的人文主控要素和自然主控要素,探寻其作用机理,并以核心区重点发展区域天山北坡城市群和喀什都市圈的区域分异特征作分析和对比,以期对丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地有序调控和可持续管理提供科学认知及决策依据。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

丝绸之路经济带核心区新疆,位于欧亚大陆中部,横跨东经 $73^{\circ}40'$ — $96^{\circ}23'$,纵踞北纬 $34^{\circ}25'$ — $49^{\circ}10'$ 。疆域面积 166 km^2 位列中国省区最广,边境线 5600 km 位列中国省区最长,接壤邻境8国位列中国省区最多,是“古丝绸之路”的重要经商通道、民族迁徙走廊和多元文化交融地,是“新丝绸之路”北、中、南三条大通道的必经门户。疆域典型地貌构造单元由高纬至低纬依次是:阿尔泰山、准葛尔盆地、天山、塔里木盆地、昆仑山,地形起伏大,海拔高程 -155 m 至 8611 m ,地物分布的垂直地带性明显,温带大陆性干旱气候区,年均降水约 155 mm ,现有绿洲面积约 14.3 万 km^2 。2015年土地覆被类型按分布面积占比值大小依次为:未利用地(60.8%)、草地(28.6%)、耕地(4.7%)、水域(3.2%)、林地(2.3%)、城乡建设用地(0.4%),见图1。20世纪80年代至2015年,丝绸之路经济带核心区新疆全域城镇化率由29.0%提升至47.2%,人口密度7.7%增至14.2%,年末总人口达2360万人,约占全国总人口的1.7%;GDP由53亿元增至9325亿元,约占全国总GDP的1.4%;固定资产投资额由20.5亿元增至2606亿元,约占全国总投资额的1.8%。

本文研究区域定义为丝绸之路经济带核心区新疆下辖的14地、州、市,约占全疆域总面积的99.5%,不包括生产建设兵团“师市合一”城市性质的8个县级市。另天山北坡城市群是国家主体功能区划的重点开发区,也是中国—中亚—西亚国际经济走廊的国内段起点,喀什都市圈是新疆“十三五”规划纲要的重点建设区,也是中巴经济走廊的国内段起点,因此将核心区这两个重点区域作为案例区,对比分析了二者用地扩展的区域特征、主控要素及其影响机理的共性与分异性。

1.2 数据来源与影响要素选择

研究区空间行政边界矢量数据,取自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)1:100万基础地理信息数据库。土地利用栅格数据,采用中国科学院资源环境数据云共享平台(<http://www.resdc.cn>)1980—2015年7期1 km遥感监测数据,各期数据重建的用地类型综合判别精度均符合制图要求,解译分类系统一致利于长时间序列用地信息获取。DEM数据来源于国家地理信息中心。各年份有关社会经济数据,

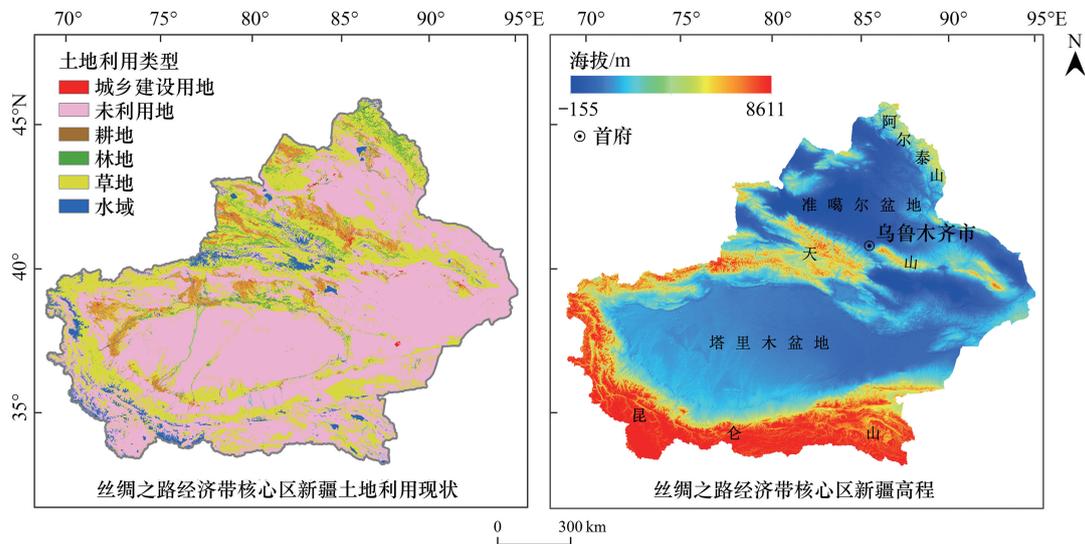


图1 丝绸之路经济带核心区新疆土地利用现状及高程示意图

Fig.1 Land use status and the elevation map in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt

来源于《中国县(市)社会经济统计年鉴》、《新疆五十年》、《新疆统计年鉴》等文献资料。

城镇建设用地扩展是社会经济发展和环境本底条件约束共同作用结果。丝绸之路经济带核心区新疆三大山系包围两大盆地的特殊地貌轮廓是城市空间扩展的刚性环境约束基底,海拔高程、坡度及地形位等自然要素的地域分异特征明显。自改革开放后,研究区经济体量和城市体量不断壮大,产业结构优化明显,现代化建设成效显著,非均衡性城市发展差异仍客观存在。基于已有城镇建设用地空间扩展因素研究的理论与实证分析结果^[26-33],考虑近35年研究区人文因子的数据可得性和自然因子的可定量性质和对城镇建设用地时空演变的影响程度,本文影响要素指标的选择如下:选取X1(城镇化率指数)、X2(人口密度指数)、X3(GDP指数)、X4(二三产业结构指数)、X5(固定资产投资指数),作为表征社会经济发展的人文驱动要素;选取X6(地形起伏度)、X7(坡度)和X8(地形位),其他作为表征区域本底环境的自然驱动要素。所选指标均采用县域统计数据,市单元不细分至辖区。

1.3 研究方法

(1) 城镇建设用地时空演变信息提取与统计

文中定义的城镇建设用地包含城镇用地与其它建设用地2类,现丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地总面积约为6700 km²,约占全疆域总面积0.4%,面积数值变化难以揭示时空扩展形态演进,遥感监测产品和GIS技术结合能直观刻画用地演变过程。对1980—2015年7期土地利用栅格数据,经重分类(Reclassify)将城镇建设用地像元类型定义为1,非城镇建设用地定义为0。针对城镇建设用地的动态演变特征,经栅格运算(Raster Calculator)和制图融合(Dissolve)识别出稳定型、扩展型和转化为其它用地三种类型^[34],提取各年份城镇建设用地时空信息。根据丝绸之路经济带核心区新疆地域面积大,城镇建设用地零星分散特点,经比对不同尺寸的网格单元大小对县域尺度用地信息的空间表达效果,最终确定,以创建10 km×10 km渔网(Fishnet)为宜,在研究区域形成15704个完整的百公里方格单元,与各年份用地数据作叠置分析,记录每个网格内城镇建设用地面积及其占网格面积百分比值;运用属性选择(Select by Attribute)功能和字段计算器(Field Calculator)工具,对叠置后的数据图层属性表结果融合处理,统计丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地时空演变信息。用城市扩展强度指数UEII(Urban Expansion Intensity Index)表征起止时相的年均用地规模数量在时间维度的相对变化幅度,表达式为^[35]:

$$UEII = \frac{UA_{n+i} - UA_i}{nUA_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, UA_{n+i} 与 UA_i 分别表示起止时相的城镇建设用地面积, n 为起止时相间隔年份。

(2) 地形要素指数提取

地形起伏度 (Landform Relief)、坡度 (Slope) 和地形位指数 (Terrain Niche Index) 是地形因子最常用的指标^[36]。其中, 地形起伏度, 是特定地域内最高海拔与最低海拔高程的差值, 宏观表征地表形态和地貌类型的空间分异程度。地形位指数, 是高程和坡度的复合地理因子, 综合表征城镇建设用地空间格局与地形梯度的关系, 表达式为^[37]:

$$T = \ln[(E/E_0 + 1) \times (S/S_0 + 1)] \quad (2)$$

式中, T 为地形位指数; E 和 S 分别为某点的海拔高程值 (m) 和坡度 ($^\circ$), E_0 和 S_0 分别为某点所在区域的平均海拔高程值 (m) 和平均坡度 ($^\circ$), 本文定义该点为各行政单元的政府所在地。海拔高程越高、坡度越大的区域地形位指数愈大, 反之则愈小。对研究区 DEM 数据利用表面分析 (Surface Analysis) 工具提取研究区地形起伏度、坡度和地形位指数, 然后对各地形要素进行等级划分。

(3) 地理探测器模型

基于空间分层异质原理开发的地理探测器, 是定量表达不同区域之间地理现象差异性因子解释效应的有力工具, 且可揭示任意两个自变量对因变量的交互作用类型, 已被广泛运用在自然环境科学和社会经济等领域^[38-42]。该模型可将用地扩展的多类影响要素在同一空间尺度下离散归一化处理, 能有效解析城市扩展空间分异的驱动机理^[26-28]。其优点在于影响因素的地理探测力 q 值没有线性假设, 其明确的物理含义能客观地探测出自变量解释 $100 \times q\%$ 的因变量^[43-44], 地理探测力 q 值的表达式为:

$$q_{D,U} = 1 - \frac{1}{n\sigma_U^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{D,i}^2 \quad (3)$$

式中, $q_{D,U}$ 为城镇建设用地变化影响因素的解释力指标, n 为整个区域样本数, m 为次级区域个数, $n_{D,i}$ 为次一级区域样本数, σ_U^2 为全域建设用地变化量的方差, $\sigma_{D,i}^2$ 为次一级区域的方差。假设 $\sigma_{D,i}^2 \neq 0$, 模型成立, $q_{D,U}$ 取值区间在 $[0, 1]$, $q_{D,U} = 0$ 时, 表示城镇建设用地不受影响因素驱动而呈随机分布, $q_{D,U}$ 越趋近于 1, 说明驱动因素对城镇建设用地的解释效力越大。本文应用地理探测器的因子 (Factor) 探测和交互 (Interaction) 探测两个子模块分析人文要素和自然要素对丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的影响程度及其交互作用。

2 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空演变特征

基于各期遥感解译数据集提取的用地类型信息, 从总量趋势、分地州市级区域、分二级用地类型及特殊性方面把握丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的时空格局与演变过程。研究区全域城镇建设用地总面积由 1980 年的 881 km^2 扩展至 2015 年的 3416 km^2 , 35 年间共扩展约 2.9 倍, 时间序列下的空间演变特征如下图 2。

2.1 扩展总量不断增加, 但强度波动增长且以分散小斑块为主

据时间序列的动态视角, 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地面积总量不断增加, 但扩展强度呈波动增长态势。具体表现为: 1980—1990 年和 2000—2005 年为较快扩展, 年均扩展强度为 4.9%、5.4%; 1990—1995 年为近乎停滞状态, 年均仅扩展 0.2%; 1995—2000 年和 2005—2010 年为缓慢扩展, 年均扩展强度 1.2%、1.6%; 2010 年后城镇建设用地扩展为近 35 年来最强, 年均扩展强度 15.4%。据空间过程的动态视角, 整体呈现扩展态势, 但城镇建设用地斑块以小面积单元为主, 且在核心区全域空间极为分散。如表 1, 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地斑块网格数量在 1990—1995 年扩展停滞阶段略减少, 其他年份均增加; 百公里方格网内分布的城镇建设用地斑块面积以 1—10 km^2 为主导, 占总网格数 57%—67%; 百公里方格网内分布的城镇建设用地在 10—50 km^2 斑块数量逐年增加, 50 km^2 以上斑块数量有扩增潜力。说明城镇建设用地总体仍呈现扩展态势, 用地斑块以小面积单元为主, 且在核心区全域空间极为分散。

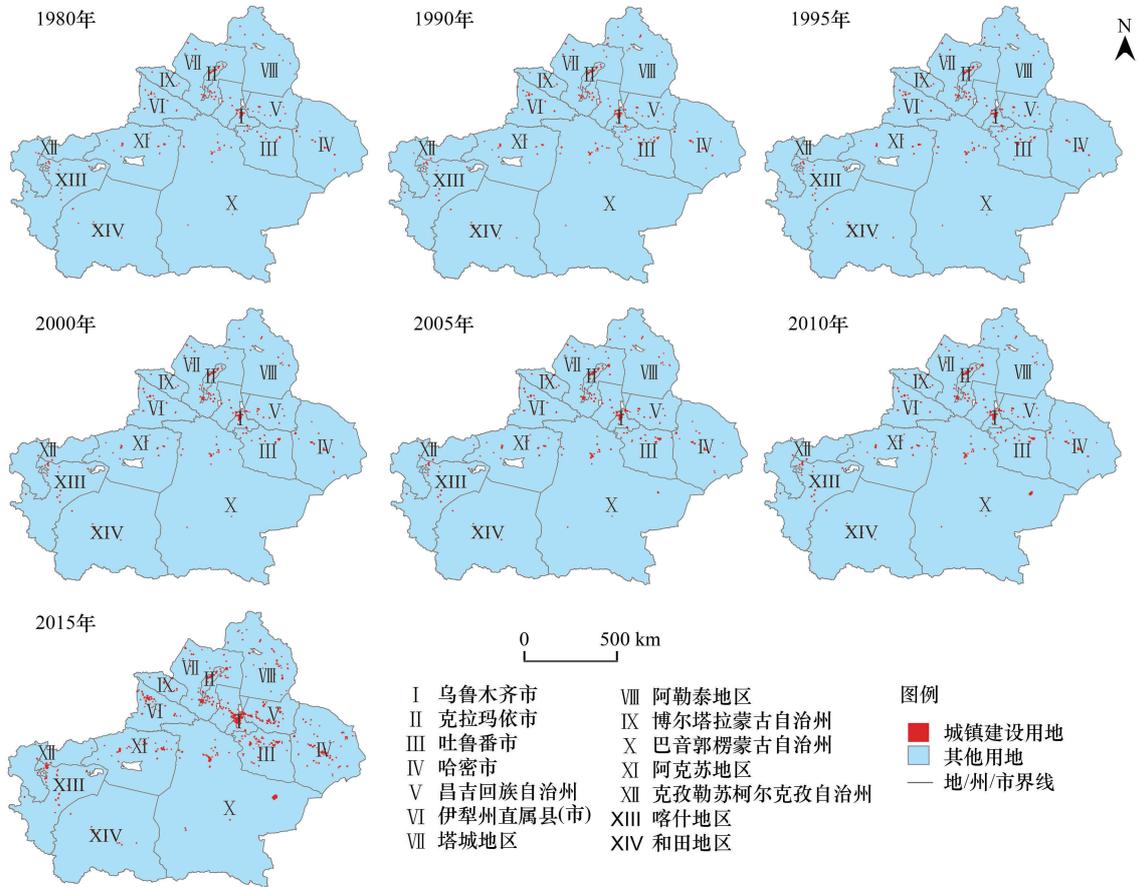


图2 1980—2015年丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地时空演变图

Fig.2 Spatio-temporal evolution map of urban construction land in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt (1980-2015)

表1 基于10 km×10 km 格网的丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展程度统计

Table 1 The urban construction land expansion degree using a 10 km×10 km grid in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt

年份 Year	城镇建设用地 Urban construction land	用地斑块面积 Patchsize/km ²				总计 Total
		0—1	1—10	10—50	50≤	
1980	网格数	63	141	17	0	221
	面积	39.0	496.0	340.3	0	875.3
1990	网格数	77	147	32	2	258
	面积	42.0	552.3	597.3	115.0	1306.6
1995	网格数	73	144	34	2	253
	面积	39.9	545.0	631.6	108.0	1322.5
2000	网格数	66	154	35	3	258
	面积	39.0	570.3	611.5	178.5	1399.3
2005	网格数	75	168	49	3	295
	面积	43.1	629.4	904.4	190.8	1767.7
2010	网格数	64	183	51	4	302
	面积	32.2	662.6	962.8	254.5	1912.2
2015	网格数	107	396	82	8	593
	面积	50.8	1201.6	1621.5	502.9	3375.7

2.2 分地州市城镇建设用地扩展的时空差异性显著

丝绸之路经济带核心区新疆各地州市城镇建设用地扩展的时空差异性显著。在面积规模上,核心区最大的地州市乌鲁木齐市城镇建设用地面积值 476 km²,城镇建设用地超过 10 km²方格网数量占全市的 1/2,超过 50 km²方格网数为 4 个,占了核心区全域的 1/2;博尔塔拉蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州、和田地区三地州的城镇建设用地面积都不足 60 km²。在扩展程度上,有“华夏第一州”之称的巴音郭楞蒙古自治州为最高,昌吉回族自治州和乌鲁木齐市次之;南疆克孜勒苏柯尔克孜自治州、和田地区 1980—2015 年仅扩展了 8 km²、19 km²,是全疆城镇建设用地扩展最慢的地州。在时序变化上,如图 3,1990—1995 年和 1995—2000 年,少数地州市单元出现不同幅度城镇建设用地向其它用地类型转化情况;2005—2010 年,除巴音郭楞蒙古自治州、喀什地区增势较为明显外,其他地州市均无明显扩展态势;进入“十二五”后,各地州市城市建设步伐加快,除克拉玛依市、塔城地区外,其余 12 地州市的城镇建设用地扩展强度均为近 35 年来最高。

2.3 次一级城镇建设用地类型扩展的动态变化明显

城镇建设用地分次一级类型来看,丝绸之路经济带核心区新疆城镇用地与其它建设用地两类扩展过程有明显动态变化特征。如下图 4 所示,1980 年城镇用地和其它建设用地面积占比约为 2:1,城镇用地分布为主导;1990—2000 年城镇用地面积占比逐年增加,2000 年占比 69.8%达到最大值;2005—2015 年其它建设用地扩展明显增强,其面积占比逐年增加至 2015 年超过城镇用地,成为次一级用地的主导类型。20 世纪改革开放初期,丝绸之路经济带核心区新疆其它建设用地主要零星分布在首府乌鲁木齐市、克拉玛依市、吐鲁番市、哈密市、昌吉回族自治州等少数资源型城市和工业化较为发达的地州市。大型工业区、矿业区、采石场、油田等工业场地开发建设及交通道路铺设与基础设施新建活动,促进其它建设用地大面积扩展。尤其自“十二五”以来,其它建设用地在在巴音郭楞蒙古自治州、阿勒泰地区、阿克苏地区、伊犁州直属县(市)、塔城地区扩展强度也均增幅明显。

2.4 城镇建设用地扩展受自然本底胁迫和经济社会要素影响的特殊性

丝绸之路经济带核心区新疆受自然本底胁迫条件和经济社会发展进程的多重因素,城镇建设用地扩展有其特殊性。全域高山与盆地相排列,盆地被高山所环抱,海拔高程、坡度及地形位等自然要素的地域分异特征明显,决定了适宜城镇建设用地比重较低的特殊性。孤立且分散的绿洲多分布在塔里木盆地和准葛尔盆地的南缘、西缘、北缘的近山地区,是人类生产生活空间的主要承载地域。研究区 2015 年城镇化水平低于全国同期近 9 个百分点,二三产业比重不足 60%的县域占全域的 15%,平均每 1 万 km²土地面积仅分布 14 人,社会基础设施建设和运营投资成本较高,决定了城镇建设用地布局在空间零星散布的不均衡性和扩展缓慢的特殊性。城镇建设用地扩展区域主要在首府乌鲁木齐市、工业化水平较高的克拉玛依市、条带状县域单元密集的昌吉回族自治州及吐鲁番市和哈密市;相较之,自然环境约束程度更高和经济社会发展水平更低的和田地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州等县域城镇建设用地面积较少、扩展较慢。

3 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的影响要素与机理分析

3.1 城镇建设用地扩展程度与各影响要素的空间耦合分析

利用城镇建设用地扩展程度与各影响要素的分级在县域尺度上进行空间耦合匹配分析,其中乌鲁木齐市和克拉玛依市 2 地级市,因缺少早期市辖区统计资料按现各市级行政区为统计单元;哈密市和吐鲁番市 2 地级市,在 2015—2016 年更设地级市前分别为哈密地区和吐鲁番地区各下辖 1 市 2 县,现以各县域行政区为统计单元。

与各类要素进行空间匹配结果如图 5 所示,城镇建设用地扩展较低的县域单元集中在和田地区、喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、阿克苏地区、博尔塔拉蒙古自治州、伊犁州直属县(市)、阿勒泰地区、巴音郭楞蒙古自治州大部分及哈密地区北部。中城镇建设用地扩展县域主要集中在昌吉回族自治州东部、塔城地区部分县域、吐鲁番市东西两翼及巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市。城镇建设用地扩展程度较高的地区集中在乌鲁

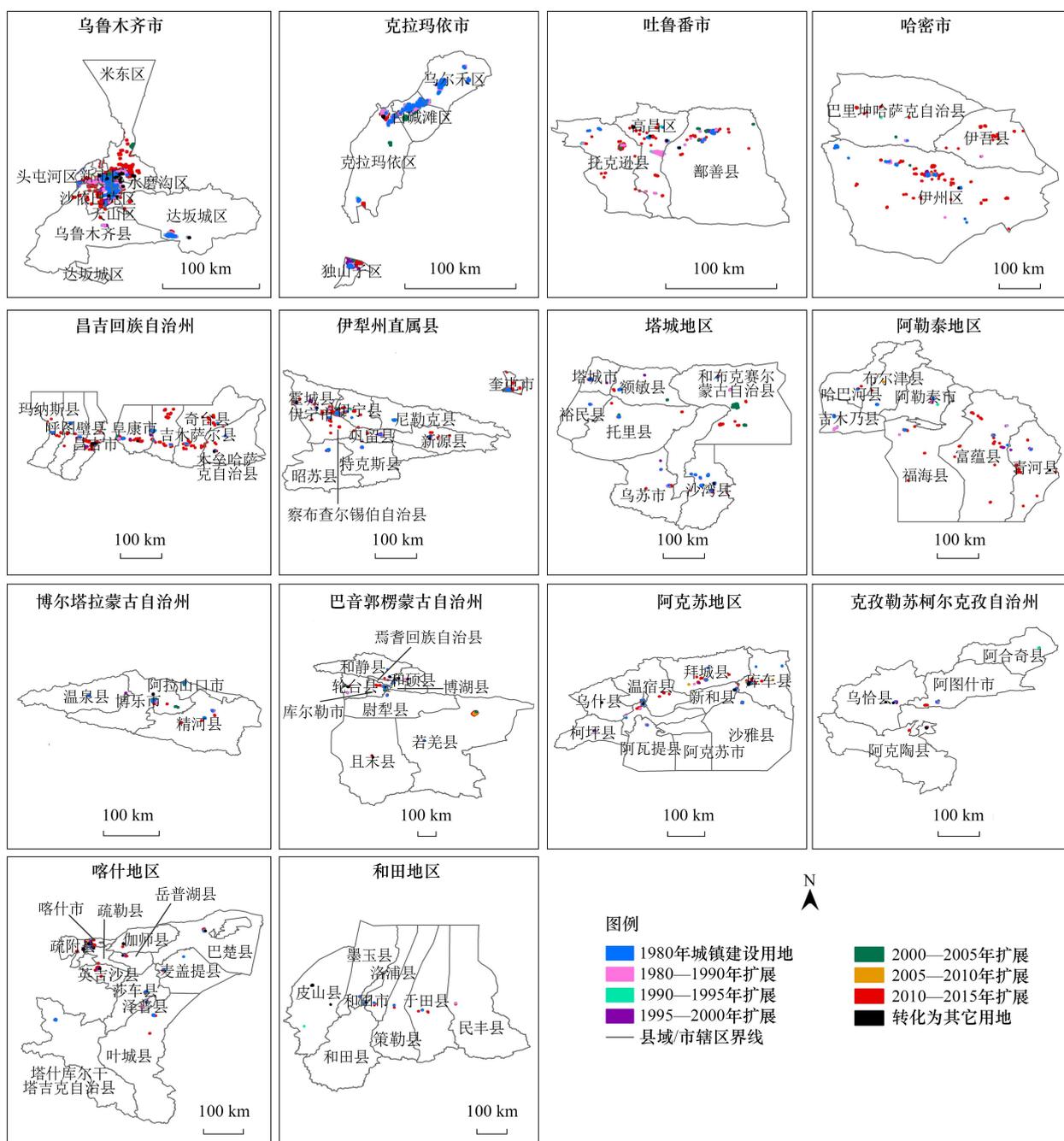


图3 1980—2015年丝绸之路经济带核心区新疆各地州市城镇建设用地扩展情况

Fig.3 The urban construction land expansion in various regions in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt (1980—2015)

木齐市和克拉玛依市2个传统的地州级城市,及巴音郭楞蒙古自治州东部的若羌县和哈密市伊州区(2016年撤地设市前为原哈密地区哈密市)。

3.2 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的主控影响要素

根据地理探测器模型因子分析模块,8项要素对城镇建设用地扩展的影响力 $q_{D,U}$ 值的探测结果(p value = 0.00)分别为X1城镇化率(0.41)、X2人口密度(0.20)、X3 GDP(0.33)、X4 二三产业比重(0.37)、X5固定资产投资(0.31)、X6地形起伏度(0.40)、X7坡度(0.37)、X8地形位(0.57)。由此可知,地形位、地形起伏度、城镇化发展水平、二三产业比重、坡度的要素影响效力较大;GDP要素、固定资产投资和人口密度要素影响较小。

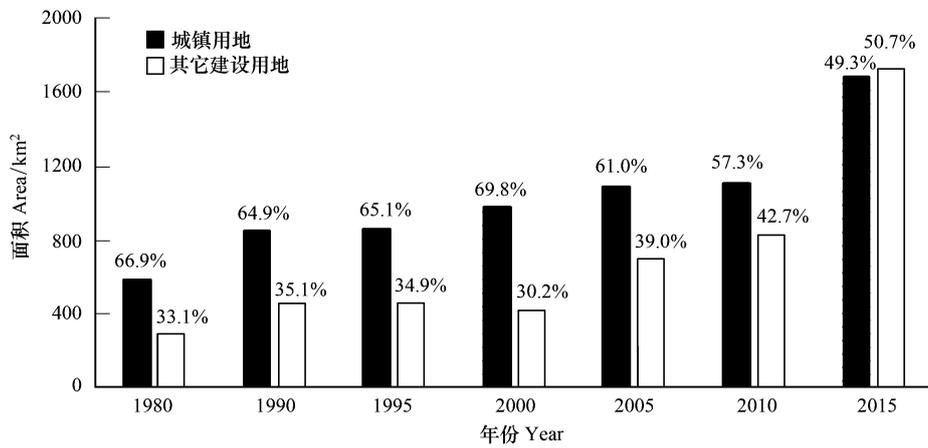


图 4 1980—2015 年丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地分类扩展情况

Fig.4 The classification of construction land urban construction land expansion in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt (1980—2015)

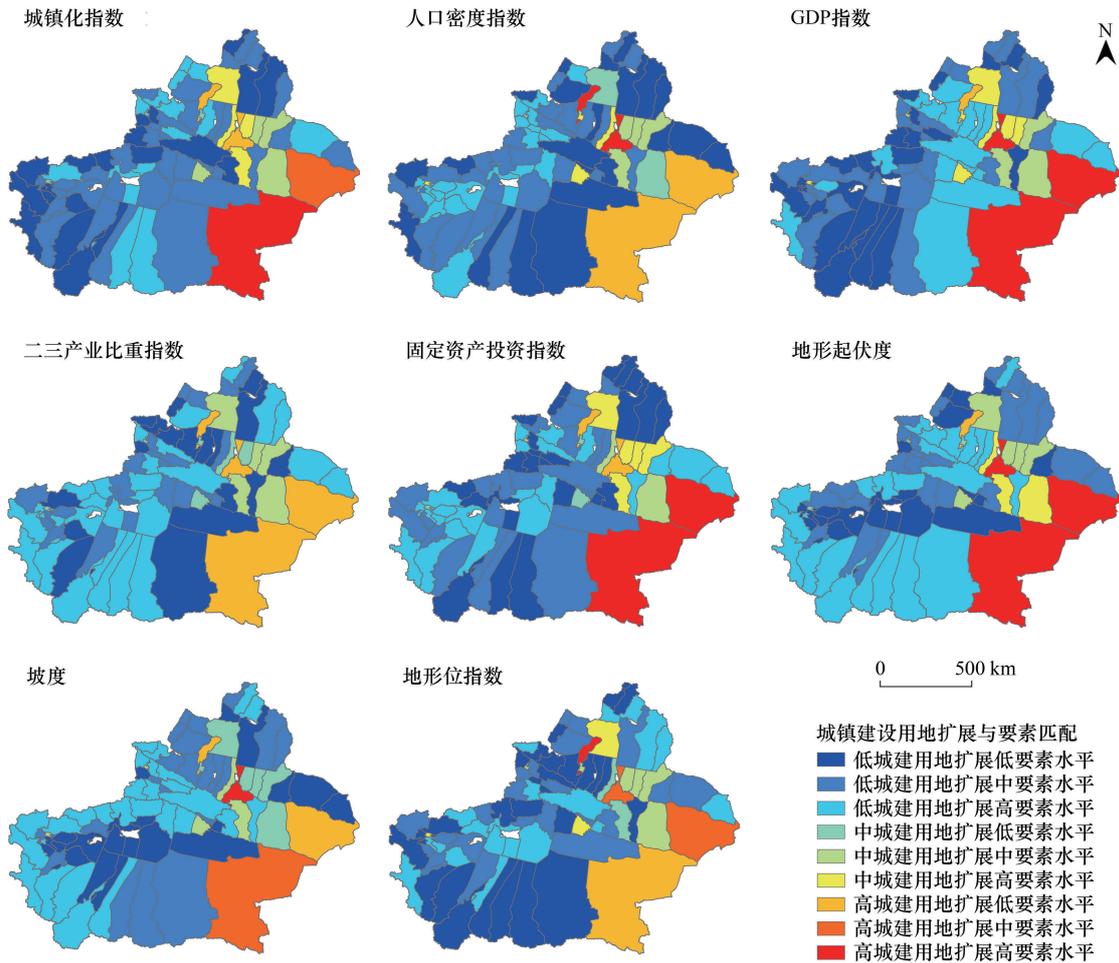


图 5 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展与要素空间匹配分布

Fig.5 Spatial matching distribution of urban construction land expansion and elements in Xinjiang, the Core Area of the Silk Road Economic Belt

交互作用探测结果显示各要素对丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的影响起到正向强化效

应,各类要素两两交互作用后的综合因子解释力显著大于各因子独立作用之和(表2)。在28对交互因子中,共计有17对交互因子综合作用的解释力超过0.990,GDP与二三产业比重、地形起伏度、地形位指数,人口密度与地形位指数、城镇化率与固定资产投资5对交互因子的影响力 $q_{D,U}=1$,说明该种组合综合影响力与城镇建设用地扩展变化在空间上有显著一致性,极强地解释了县域建设用地扩展的分异程度。各交互要素组合效果显示为非线性协同与双要素协同两类,非线性协同效果要更显著。其中,城镇化率 \cap 地形位指数的交互作用为双要素协同类型,其他所有要素交互组合为非线性协同类型。

表2 各要素交互作用对城镇建设用地扩展的影响

Table 2 Interactive impact of elements on urban construction land expansion

探测要素 Detecting elements	$A = q_{D,U}(X1) + q_{D,U}(X2)$	$C = q_{D,U}(X1 \cap X2)$	比较 Comparison	交互作用 Interaction effect
城镇化率 UR \cap GDP	0.606	0.663	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 人口密度 PD	0.737	0.980	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 二三产业比重	0.780	0.978	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 固定资产投资 FAD	0.718	1.000	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 地形起伏度 LR	0.802	0.999	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 坡度 S	0.773	0.996	$C>A$	NE
城镇化率 UR \cap 地形位指数 TN	0.981	0.991	$C>A$	BE
人口密度 PD \cap GDP	0.530	0.869	$C>A$	NE
人口密度 PD \cap 二三产业比重	0.573	0.999	$C>A$	NE
人口密度 PD \cap 固定资产投资 FAD	0.512	0.807	$C>A$	NE
人口密度 PD \cap 地形起伏度 LR	0.596	0.743	$C>A$	NE
人口密度 PD \cap 坡度 S	0.566	0.806	$C>A$	NE
人口密度 PD \cap 地形位指数 TN	0.775	1.000	$C>A$	NE
GDP \cap 二三产业比重	0.704	1.000	$C>A$	NE
GDP \cap 固定资产投资 FAD	0.642	0.996	$C>A$	NE
GDP \cap 地形起伏度 LR	0.726	1.000	$C>A$	NE
GDP \cap 坡度 S	0.697	0.995	$C>A$	NE
GDP \cap 地形位指数 TN	0.905	1.000	$C>A$	NE
二三产业比重 \cap 固定资产投资 FAD	0.686	0.990	$C>A$	NE
二三产业比重 \cap 地形起伏度 LR	0.770	0.990	$C>A$	NE
二三产业比重 \cap 坡度 S	0.740	0.999	$C>A$	NE
二三产业比重 \cap 地形位指数 TN	0.948	0.986	$C>A$	NE
固定资产投资 FAD \cap 地形起伏度 LR	0.708	0.995	$C>A$	NE
固定资产投资 FAD \cap 坡度 S	0.678	0.963	$C>A$	NE
固定资产投资 FAD \cap 地形位指数 TN	0.887	0.984	$C>A$	NE
地形起伏度 LR \cap 坡度 S	0.762	0.803	$C>A$	NE
地形起伏度 LR \cap 地形位指数 TN	0.971	0.998	$C>A$	NE
坡度 S \cap 地形位指数 TN	0.941	0.996	$C>A$	NE

UR:城镇化率,Urbanization rate index;PD:人口密度指数,Population density index;MPSP:二三产业比重指数,Manufacturing and producer services proportion;FAD:固定资产投资指数,Fixed asset investment index;LR:地形起伏度,Landform relief;S:坡度,Slope;TN:地形位指数,Terrain niche;NE(Nonlinear enhancement)表示非线性协同作用,BE(Bi-factor enhancement)表示双要素协同作用

综合地理探测器因子分析模块和交互作用模块的探测结果,判定地形位指数、城镇化率、地形起伏度、二三产业比重为影响丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的主控要素。

3.3 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的主控要素作用机理

进一步分析研究区影响城镇建设用地扩展主控要素的作用机理,为城镇因地制宜、科学规划和调控未来发展提供参考依据。

(1) 高地形位指数限制城镇建设用地场所的选择。该指数是地形与坡度的综合表征,地形位特征为用地格局提供基础,地形梯度也影响着用地结构与变化方向。该项单因子作用的解释力为 0.57,是影响丝绸之路经济带核心区新疆县域城镇建设用地分布与扩展规模的首要主控要素。受地形位指数限制较大的县域主要分布在塔里木盆地北缘、天山南麓的阿克苏地区、喀什地区、巴音郭楞蒙古自治州北部,及阿尔泰山一带阿勒泰地区。地形位指数低的区域通常交通较为便利,经济水平较为发达,信息化条件也较好,人类居住生活和从事生产活动的适宜度与便利度更高,是城镇建设用地新建的倾向性选择;而高地形梯度区限制城镇建设用地场所的选择与扩建,且高地形位区用地规模扩展对所需的水资源供给、交通道路等配套设施及建筑安全系数皆增加了难度。

(2) 城镇化率提升刺激城镇建设用地扩展。从县域尺度看,中高城镇化水平增长刺激城镇建设用地扩展集中在天山北坡城市群县域及东疆若羌县和伊州区。近 35 年以来,丝绸之路经济带核心区新疆建制市数量明显增长,城市体系以小城镇为主向大中城市规模转变,城市行政地域规模及其常住人口总量直接决定其城镇化水平的高低,进而影响其实体地域范围扩展。1980 年仅有乌鲁木齐 1 个地级市和克拉玛依等 7 个县级市,2015 年末发展至乌鲁木齐、克拉玛依、吐鲁番 3 个地级市和 22 个县级市。同期,全域城镇化水平提升 18.2%,城镇建设用地面积扩展 2535 km²,即城镇化水平每提升 1%,所新增的城镇建设用地面积为 139 km²。自治区“撤县建市”、“撤乡建镇”、小城镇试点改革、新型城镇化规划及行动计划等工作推进及全疆农业转移人口落户城镇的措施与机制制度的补全健全,农村转移和迁移人口落户城镇后的居住、从业、教育、娱乐等功能区的土地需求量对城镇建设用地扩展起正向协同促进效应。

(3) 高地形起伏度胁迫城镇建设用地扩展。平坦开阔之地,用地选址的自由度较大,且规模扩展的可操作性较强。核心区全域以中海拔梯度为主要地形地貌特征,其占比超过 1%的类型有:低海拔(<1 km)占 22.4%、中海拔(1—2 km)占 42.3%、中高海拔(2—4 km)占 14.1%、高海拔(4—6 km)占 15.78%、极高海拔(>6 km)占 2.8%及现代冰川占 1.4%。高地形起伏地势对城镇建设用地扩的开发和扩展具有相当大程度的胁迫性,连片的低城镇建设用地扩展高、中地形起伏度匹配区域集中在昆仑山和天山山脉西侧的边境城镇带及北部阿尔泰山麓的部分县域,高地形起伏度区城镇建设适宜用地占比也较低。

(4) 二三产业比重增高拉动城镇建设用地扩展。区域产业结构水平,是体现生产社会化程度与市场经济水平高低的重要标志。全域三次产业结构比由 1980 年 40.4:40.3:19.3 变动为 2015 年 16.7:38.6:44.7,实现自“一二三”以农业为主向“三二一”以服务业为主的产业结构升级;同期就业结构也由 70.0:14.8:15.2 变动为 44.1:15.2:40.8。在县域尺度单元,富蕴县(60.55%)、柯坪县(60.2%)、阿克陶县(57.0%)的二三产业比重提升幅度均实现 50%的跨越式发展。一方面,工业、建筑业、各类服务业等二三产业投入产出效率相对较高,生产要素集聚和规模发展均需以土地作为载体,并对与之配套的交通铺设、商业及公共服务空间等设施提出更高的需求,势必致使城镇建设用地扩展的刚性需求;同时,“西部大开发”战略及内地省市援疆计划引进建设项目和资金,大规模工业园区、商业园区、基础设施及民生工程设施等新建在很大程度上拉动城镇建设用地定向扩展。

3.4 丝绸之路经济带核心区“一群一圈”城镇建设用地扩展分异的影响要素及机理

天山北坡城市群,区域总面积 19.28 万 km²,城镇建设用地总面积由 1980 年的 472 km²扩展至 2015 年的 1598 km²,35 年间共扩展约 2.4 倍。喀什都市圈,区域总面积 18.46 万 km²,城镇建设用地总面积则由 1980 年的 66 km²扩展至 2015 年的 253 km²,35 年间共扩展约 2.8 倍。

根据地理探测器模型分析结果,各要素对“一群一圈”城镇建设用地扩展的影响力如下图 6。经对比可知,固定资产投资、坡度、地形位指数均是两重点发展区域共同的主控影响要素($q_{D,U}$ 均高于 0.95),GDP 指数的影响程度都较低;有明显分异性的是,天山北坡城市群二三产业比重要素影响力明显($q_{D,U}=0.86$),而喀什都市圈人口密度要素影响力明显($q_{D,U}=0.94$),说明产业结构升级与人口集聚分别是二者城镇建设用地扩展分异的显著驱动因素,这与其各自发展阶段有关。天山北坡城市群历来是全疆人口和产业最密集的区域,也

是核心区内唯一的城市群建设单元,产业结构升级的利益驱动主导着城镇建设用地扩展,即处于城市群发展的较高级阶段;而喀什都市圈尚处于区域发展的初级阶段,以人口数量的增加导致城镇建设用地的自然扩展。此外,城镇化率驱动作用天山北坡城市群强于喀什都市圈,而喀什都市圈的地形起伏度限制程度则要高于天山北坡城市群。

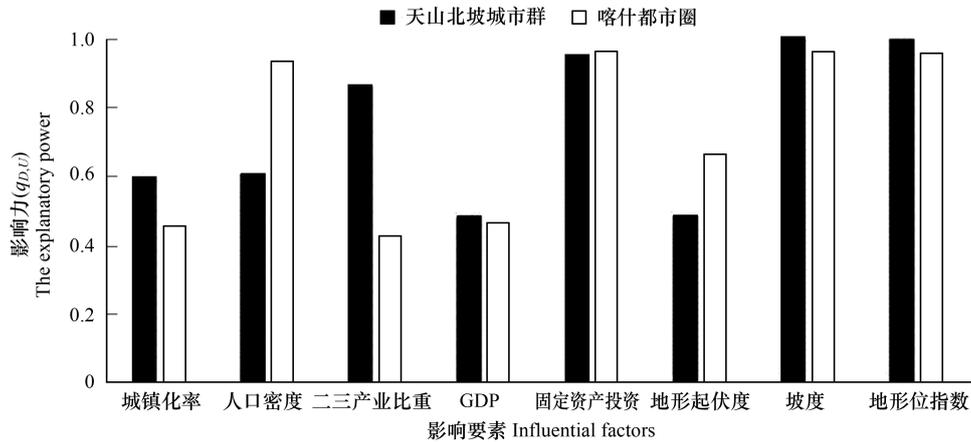


图6 天山北坡城市群和喀什都市圈城镇建设用地扩展的各要素影响力

Fig.6 The explanatory power of influential factors of urban construction land expansion in Tianshan North-slope urban agglomeration and Kashgar metropolitan region

4 结论与讨论

本文将丝绸之路经济带核心区新疆近35年以来的城镇建设用地扩展作为一个时空变化系统进行分析,提取1980—2015年七个百分点城镇建设用地演变信息,借助10 km×10 km网格单元对时间过程和空间扩展程度加以统计,从总量趋势、分地州市级区域、分用地类型及特殊性全面探析扩展的时空演变特征,采用地理探测器模型,在县域尺度定量诊断城镇建设用地扩展的人文要素和自然要素的影响程度及要素之间的交互作用,进而识别主控要素并解释其作用机理,探析天山北坡城市群和喀什都市圈两个重点发展区域的分异性。主要结论如下:

(1) 丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地总面积由1980年的881 km²扩展至2015年的3416 km²,35年间共扩展约2.9倍。在时间序列上,面积总量不断增加,但扩展并非逐年增强而呈现波动增长态势,2010—2015年全域扩展强度最大;在空间过程上,总体呈现扩展态势,斑块以小面积单元为主且极为分散。各地州市城镇建设用地的面积规模和扩展程度时空差异性显著。城镇用地与其它建设用地两类次一级用地扩展具有动态变化特征。受自然本底胁迫条件和经济社会发展过程的多重影响,丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展有其特殊性。

(2) 对城镇建设用地扩展程度与各影响要素在县域尺度进行空间耦合匹配分析,全域以城镇建设用地低水平扩展与各级影响要素水平的匹配关系为主,中高程度城镇建设用地扩展集中在北疆天山北坡城市群大部分县市及东疆部分县市和巴音郭楞蒙古自治州东部的若羌县。该结论与前人在全疆域地州尺度的研究结果基本吻合,且在速率程度、结构变化及空间分异的大体态势也趋近^[31]。

(3) 综合地理探测器因子识别和交互作用探测结果,判定地形位指数、城镇化率、地形起伏度、二三产业比重为影响丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展的主控要素。综合来看,以自然环境要素为主导,经济发展要素次之,人口集聚要素对城镇建设用地扩展的影响最小。进一步分析各主控要素的作用机理,为丝绸之路经济带核心区新疆城镇因地制宜、科学规划和调控未来发展提供参考依据。

(4) 重点发展区域天山北坡城市群和喀什都市圈城镇建设用地扩展的各类要素影响力有共性也有分异

性。两区域共同的主控影响要素为固定资产投资、坡度和地形位指数,而二三产业比重要素在天山北坡城市群影响力明显,人口密度要素在喀什都市圈影响力明显;且城镇化率驱动和地形起伏度胁迫程度在两个区域内有分异性。该结论也验证了已有研究发现因区域发展阶段不同而使城市扩展的主控驱动要素有别的客观差异,通常经济发达区域的城市扩展以经济增长为主要驱动力,而欠发达区域则以人口涌入等自然扩展驱动力为主^[45],较为发达的天山北坡城市群与尚处在初级阶段的喀什都市圈的对比结果恰验证了这一客观规律。

1980 年以来,处于西部省区的丝绸之路经济带核心区新疆与我国城市扩展集中发生地的东中部地区相比较,其城镇建设用地时空演变特征共性体现在扩展总量不断增加,且主要集中在城市群地区,得益于改革开放政策后中国城镇化与城市群建设的辉煌成就^[46]。有明显差异的是,2010 年后,国家主体功能区规划对国土空间开发格局的有效管控抑制了“摊大饼”传统扩展模式,东、中部地区建设用地扩展面积分别呈现大幅减少、略有减少态势,扩展速度放缓^[18];而该时段丝绸之路经济带核心区新疆扩展幅度为近 35 年来最强。东中部地区城市扩展的县域差异日趋缩小,中小城市发展加快,两级分化现象缓解,且新增城镇建设用地的次一级类型始终以城镇用地为主^[47-48];而新疆城市扩展以建设用地基数大的城市为主,尤其南疆及部分边境中小城市扩展仍相对缓慢,次一级类型独立工矿等其它建设用地自 2005 年后扩展明显增强,至今面积占比量已超过城镇用地。东中部湿润、半湿润地区城镇建设用地扩展主要在地形起伏度较小区域^[37, 47],而干旱区新疆自然本底基础决定了城镇发育以分散绿洲为主体依托,绿洲城镇沿三大山脉麓前盘踞,环南北疆两大盆地边缘呈串珠状展布。究其根本,丝绸之路经济带核心区新疆与东中部地区的城镇建设用地扩展差异由地域分异自然基础与社会经济发展历史进程和现状阶段差异所致。

科学地监测和认知是可持续发展系统解决方案分解步骤的第一步,本文以分析 1980—2015 年长时间序列下丝绸之路经济带核心区新疆城镇建设用地扩展时空演变特征——识别城镇建设用地扩展与各影响要素的耦合匹配关系——判定影响城镇建设用地扩展的主控要素——探究其作用机理为框架思路展开研究。将陆地表层的自然要素与人类社会经济要素结合的综合研究,是当代地理学科发展的重要方向。地理探测器模型的引入,不仅定量诊断核心区县域尺度的不同类人文经济要素和自然本底要素对城镇建设用地扩展的影响及交互作用进而识别其主控驱动要素,而且对比分析了核心区两个重点区域天山北坡城市群和喀什都市圈用地扩展的共性与差异,进一步揭示用地扩展分异主控要素及其影响机理,兼顾了城镇建设用地扩展的区域异质性与时空非平稳性的考虑。但研究仍存在一定的局限性:1) 本文仅以县域尺度时间序列完整、可量化的经济社会因素指标和自然因素指标作以实证剖析,国家及自治区层面的土地差别化宏观政策及具体指令性用地配额等行政因素^[49]未计入探测范围,一方面因其在县域尺度难以量化,另一方面已采用的固定资产投资额指标、二三产业结构优化是政策实施结果的重要表现方面。2) 局限于对近 35 年以来现有数据的探究,后续分析可运用系统耦合模型和计量经济学模型对耦合关系与状态、预测及预警方面加以深入研究。在丝绸之路经济带核心区新疆经济社会稳定发展的前提下,充分考虑自然环境本底胁迫性、经济社会的发展程度及区域特殊性,把握分区域分城市的主控要素,通过一定的政策手段引导城镇建设用地的理性扩展和总体布局,提高用地效率和协同发展水平,因地因城因类差别化地制定区域调控措施,进一步加快丝绸之路经济带国内段边疆支点和走廊门户建设。

参考文献 (References):

- [1] 美国国家科学院国家研究理事会地球与生命科学部,地球科学与资源委员会,地球科学新的研究机遇委员会. 地球科学新的研究机遇. 张志强,郑军卫,译. 北京:科学出版社,2014.
- [2] Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, Crutzen P. The new world of the anthropocene. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2228-2231.
- [3] 陆大道. “未来地球”框架文件与中国地理科学的发展——从“未来地球”框架文件看黄秉维先生论断的前瞻性. *地理学报*, 2014, 69(8): 1043-1051.
- [4] 方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望. *地理学报*, 2004, 59(7S): 21-32.

- [5] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [6] 方创琳, 鲍超, 黄金川, 李广东. 中国城镇化发展的地理学贡献与责任使命. 地理科学, 2018, 38(3): 321-331.
- [7] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [8] 李晓兵. 国际土地利用—土地覆盖变化的环境影响研究. 地球科学进展, 1999, 14(4): 395-400.
- [9] Seto K C, Fragkias M, Güneralp B, Reilly M K. A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS One*, 2011, 6(8): e23777.
- [10] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [11] Wang J, Huang B, Fu D J, Atkinson P M. Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated determinants across major Chinese cities. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 3670-3689.
- [12] Sarvestani M S, Ibrahim A L, Kanaroglou P. Three decades of urban growth in the city of Shiraz, Iran: A remote sensing and geographic information systems application. *Cities*, 2011, 28(4): 320-329.
- [13] Shahtahmassebi A R, Song J, Zheng Q, Blackburn G A, Wang K, Huang L Y, Pan Y, Moore N, Shahtahmassebi G, Haghighi R S, Deng J S. Remote sensing of impervious surface growth: A framework for quantifying urban expansion and re-densification mechanisms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 94-112.
- [14] 方创琳, 李广东, 张蕾. 中国城市建设用地的动态变化态势与调控. 自然资源学报, 2017, 32(3): 363-376.
- [15] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, Huang Q X, Yang Y. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72.
- [16] Jat M K, Garg P K, Khare D. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 26-43.
- [17] Chen J L, Gao J L, Yuan F. Growth type and functional trajectories: an empirical study of urban expansion in Nanjing, China. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0148389.
- [18] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [19] 齐建超, 刘慧平, 伊尧国. 应用自组织映射方法的北京市 2005-2013 年土地利用时空演变分析. 生态学报, 2017, 37(19): 6346-6354.
- [20] 叶高斌, 苏伟忠, 孙小祥. 基于 Dyna-CLUE 模型的太湖流域建设用地空间扩张模拟. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 725-734.
- [21] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [22] 李少英, 刘小平, 黎夏, 陈逸敏. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展. 遥感学报, 2017, 21(3): 329-340.
- [23] 毛蒋兴, 闫小培, 李志刚, 黄鹄. 快速城市化过程中深圳土地利用变化的自然及人文因素综合研究. 自然资源学报, 2009, 24(3): 523-535.
- [24] 宋蕾, 曹银贵, 周伟, 何灏, 况欣宇, 罗古拜. 基于 SD 模型的三峡库区快速城镇化地区耕地利用模拟研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 818-827.
- [25] 屈宇宏, 孙帅, 陈银蓉. 中国城市建设用地扩张趋势模拟及抑制策略. 资源科学, 2014, 36(1): 1-7.
- [26] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法. 测绘学报, 2015, 44(S1): 96-101.
- [27] 蔡芳芳, 濮励杰. 南通市城乡建设用地演变时空特征与形成机理. 资源科学, 2014, 36(4): 731-740.
- [28] 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 刘继来. 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. 地理研究, 2018, 37(1): 37-52.
- [29] 刘艳军, 于会胜, 刘德刚, 祝丽媛. 东北地区建设用地开发强度格局演变的空间分异机制. 地理学报, 2018, 73(5): 818-831.
- [30] 董雯, 杨宇, 张小雷, 陶江, 王彬武. 天山北坡绿洲城镇用地扩展及其驱动力分析. 干旱区研究, 2011, 28(6): 980-985.
- [31] 段祖亮, 张小雷, 雷军, 朱兵. 新疆建设用地变化及驱动力研究. 水土保持学报, 2009, 23(1): 193-197, 201-201.
- [32] 阿里木江·卡斯木, 唐兵, 古丽克孜·吐拉克. 基于遥感和 GIS 的新疆绿洲城市扩展时空动态变化分析. 冰川冻土, 2013, 35(4): 1056-1064.
- [33] 张小雷, 雷军, 段祖亮, 杨兆萍, 时卉, 杨德刚, 杨振. 近 20 年来新疆人文与经济地理学发展与展望. 经济地理, 2018, 38(4): 9-18.
- [34] 高倩, 阿里木江·卡斯木. “一带一路”沿线之中国新疆—中亚—西亚城市空间扩张. 经济地理, 2017, 37(5): 51-57.
- [35] 徐焕, 付碧宏, 郭强, 时丕龙, 薛国梁. 西咸一体化过程与城市扩展研究. 遥感学报, 2018, 22(2): 347-359.
- [36] 温晓金, 杨海娟, 刘焱序. 基于地形因子的千米尺度景观生态廊道布局研究. 地理科学进展, 2013, 32(2): 298-307.

- [37] 吴见,王帅帅,谭靖. 基于安徽省土地利用变化的地形梯度效应分析. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 239-248.
- [38] 李佳泓,陆大道,徐成东,李扬,陈明星. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160.
- [39] 湛东升,张文忠,余建辉,孟斌,党云晓. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966-975.
- [40] 赵映慧,郭晶鹏,毛克彪,项亚楠,李怡函,韩家琪,吴媛. 1949-2015 年中国典型自然灾害及粮食灾损特征. 地理学报, 2017, 72(7): 1261-1276.
- [41] 周磊,武建军,贾瑞静,梁念,张凤英,倪永,刘明. 京津冀 PM_{2.5} 时空分布特征及其污染风险因素. 环境科学研究, 2016, 29(4): 483-493.
- [42] 赵领娣,吴栋. 中国能源供给侧碳排放核算与空间分异格局. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 48-58.
- [43] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [44] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [45] 王楠楠,李俊明,段琳琼,陈常优,邵燕芳,樊鹏飞. 长三角和中原城市群城市扩张时空特征及驱动力比较研究. 河南大学学报:自然科学版, 2017, 47(6): 681-692, 726-726.
- [46] 方创琳. 改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望. 经济地理, 2018, 38(9): 1-9.
- [47] 瞿诗进,胡守庚,童陆亿,李全峰. 长江中游经济带城镇建设用地的时空特征. 资源科学, 2017, 39(2): 240-251.
- [48] 牟风云,张增祥,迟耀斌,刘斌,周全斌,王长有,谭文彬. 基于多源遥感数据的北京市 1973—2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析. 遥感学报, 2007, 11(2): 257-268.
- [49] 黄凌翔,范晓莉,卢静,刘戈. 基于 SVAR 模型的土地供给调控政策与宏观经济的关系研究. 土地经济研究, 2014, (1): 79-90.