

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.003.

丁雪, 邵馨, 邓瑞芳, 等. 2000—2020 年滇中城市群不透水面时空动态演变及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 364-373.

Ding Xue, Shao Xin, Deng Ruifang, et al. Spatiotemporal Dynamics and Driving Forces of Impervious Surfaces in the Central Yunnan Urban Agglomeration from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 364-373.

2000—2020 年滇中城市群不透水面 时空动态演变及驱动力分析

丁雪^{1,2,3}, 邵馨^{1,2,3}, 邓瑞芳^{2,3,4}, 彭双云^{1,2,3}, 王金亮^{1,2,3}

(1. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 昆明 650500;

3. 云南省地理空间信息工程技术研究中心, 昆明 650500; 4. 云南师范大学 信息学院, 昆明 650500)

摘要: [目的] 揭示滇中城市群不透水面时空动态演变特征及驱动力机制, 进而为制定滇中城市群规划和发展策略提供理论参考。[方法] 利用 2000—2020 年滇中城市群 GISD 30 m 不透水面数据, 运用不透水面动态度、标准差椭圆、象限分析法和地理探测器等空间分析方法揭示了不透水面时空变化规律及驱动力机制。[结果] (1) 时间演变: 近 20 年滇中城市群不透水面整体扩展速率呈现下降—上升—下降的波动趋势, 年均扩展速率为 $66.77 \text{ km}^2/\text{a}$, 年均动态度达 4.36%, 不透水面的动态度呈现不断下降趋势。近 20 年来, 滇中城市群不透水面面积扩大了 $1\,402.2 \text{ km}^2$, 增长率高达 91.5%。(2) 空间演变上: 近 20 年滇中城市群不透水面扩展各个城市空间差异较大, 其中昆明市不透水面扩展较多, 楚雄彝族自治州扩展面积较少。各城市群总体上朝南部—东南部方向扩展, 迁移重心基本稳定。(3) 近 20 年来滇中城市群不透水面的扩展具有明显的方向性, 总体向东北—西南方向扩展。其中 2005 年标准差椭圆面积最大, 不透水面开始高速扩张, 20 年来不透水面重心变化较为稳定, 整体一直保持向南迁移, 总体变化相对较小。(4) 从不透水面的驱动机制分析, 人口因素对其扩展的影响显著, 而 LAI、坡度、降水、温度以及 NDVI 等因素对不透水面扩展的影响不显著。人口和其他因素之间的交互作用强度明显强于其他因素之间的交互作用。[结论] 近 20 年以来滇中城市群不透水面不断扩展, 对城市群的资源环境承载力和国土空间格局产生巨大影响, 为此应加强不透水面空间优化布局, 为实现滇中城市群高质量跨越式发展提供有力支撑。

关键词: 不透水面; 滇中城市群; 时空演变; 驱动力分析

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0364-10

Spatiotemporal Dynamics and Driving Forces of Impervious Surfaces in the Central Yunnan Urban Agglomeration from 2000 to 2020

Ding Xue^{1,2,3}, Shao Xin^{1,2,3}, Deng Ruifang^{2,3,4}, Peng Shuangyun^{1,2,3}, Wang Jinliang^{1,2,3}

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500,

China; 3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500,

China; 4. School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving mechanisms of impervious surfaces in the central Yunnan urban agglomeration, and to provide a theoretical basis for related research and assisting government and relevant departments in formulating urban agglomeration planning and development strategies. [Methods] GISD 30-meter impervious surface data from the central Yunnan urban agglomeration for the years 2000 to 2020 were utilized. Spatial analysis methods

收稿日期: 2023-07-22

修回日期: 2023-09-21

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0184300); 云南省自然科学基金(202101AT070052); 云南省教育厅项目(2022J0139); 云南师范大学博士研究生创新基金重点项目(YJSJ21-A08)

第一作者: 丁雪(1983—), 男, 云南陆良人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为资源环境遥感、遥感智能信息处理。E-mail: dingxue_1983@163.com

通信作者: 王金亮(1963—), 男, 云南武定人, 博士, 教授, 主要从事遥感与 GIS 在资源环境方面的应用研究。E-mail: 1374349752@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

such as dynamic degree, standard deviation ellipse, quadrant analysis, and geographical detector were employed to reveal the spatiotemporal patterns of impervious surface changes and their driving mechanisms. [Results] (1) With respect to temporal scale evolution, over the past two decades, the overall expansion rate of impervious surfaces in the central Yunnan urban agglomeration exhibited a fluctuating trend characterized by decline-rise-decline, with an annual average expansion rate of 66.77 km^2 . The annual average dynamic degree reached to 4.36% , indicating a continuous decline in the dynamism of impervious surfaces. The impervious surface area in the urban agglomeration expanded by $1\,402.2 \text{ km}^2$ during this period, with a growth rate of 91.5% . (2) With respect to spatial scale evolution, the expansion of impervious surfaces within various cities of the central Yunnan urban agglomeration over the last two decades displayed significant spatial disparities. For instance, Kunming witnessed substantial expansion of impervious surfaces, while Chuxiong Prefecture exhibited comparatively minimal expansion. On the whole, the urban agglomeration expanded towards the southern and southeastern directions, with the migration center remaining relatively stable. (3) With respect to directionality, the expansion of impervious surfaces in the central Yunnan urban agglomeration over the past 20 years showed a clear directional trend, primarily expanding in the northeast to southwest direction. The largest standard deviation ellipse area in year 2005 was marked, signifying the onset of rapid impervious surface expansion. Over the 20-year period, the center of impervious surface expansion remained relatively stable, consistently shifting southward with relatively minor overall changes. (4) Analysis of driving mechanisms indicated that population factors had a significant impact on impervious surface expansion, whereas factors such as LAI, slope, precipitation, temperature, and NDVI had less significant effects. The interaction strength between population and other factors was notably stronger than that between other factors. [Conclusion] Over the past two decades, impervious surfaces in the central Yunnan urban agglomeration had continued to expand, exerting a significant influence on the resource and environmental carrying capacity of the urban agglomeration and the spatial land use pattern. To support the high-quality leapfrog development of the central Yunnan urban agglomeration, an emphasis on optimizing the spatial layout of impervious surfaces is crucial.

Keywords: impervious surfaces; central Yunnan urban agglomeration; spatiotemporal evolution; driving force analysis

进入21世纪以来,随着社会经济持续高速发展,中国进入了快速城市化和工业化阶段,2020年末,中国城镇化率为 63.89% ^[1],伴随着中国规模空前的城镇化进程^[2],城市面积呈高速扩张、指数型增长的趋势。建成区面积的大幅扩张,也影响了不透水面的扩展。不透水面是指各种不透水建筑材料所覆盖的表面^[3],包括沥青、水泥等材料建造的屋顶、道路、建筑物等^[4]。不透水面的扩展,可以促进城市基础设施的建设,加快城市化进程。但是也导致增加地表温度、地面径流无法下渗而带来大范围的城市内涝的典型问题。大量研究表明不透水面的快速扩张会产生很多城市病^[5],如城市热岛效应、气候变化等弊端^[6-7]。不透水面作为城市化水平^[8]和城市生态环境的关键衡量指标^[9],其利用效率直接影响城市的生态环境安全和可持续发展。研究不透水面的时空动态演变特征及其驱动力,可以提高城市不透水面的利用

效率,有利于土地资源优化利用,实现城市统筹科学规划发展。

不透水面的时空演变作为近年来的研究热点之一,众多学者在不同的区域做了大量研究。全球区域^[10]、湖南省^[11]、粤港澳大湾区^[12]、长三角地区^[13]等,在滇中城市群研究区内,也有李益敏^[14]、Li^[15]等研究呈贡、磨憨区域为本次研究提供了重要的借鉴与参考。国外的研究也多是集中于某一区域^[16],且研究重点为不透水面的提取,其他因素考虑较少。

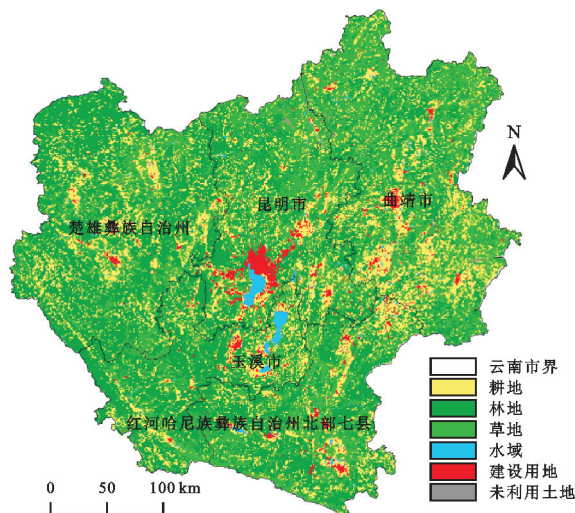
综上所述,当前不透水面研究区域主要是某一区域,而针对特定的人文或者自然区域不透水面研究较少,地理环境是一个整体的同时在其内部也有空间异质性的存在,如果仅仅考虑单一区域,会对结果的量化产生影响。同时,研究多集中于使用遥感数据提取不透水面区域,对不透水面的驱动力发展考虑不足。故本次研究以滇中城市群为研究区域,对研究区域的

不透水面面积进行统计分析,运用动态度定量分析不透水面的变化情况,利用标准差椭圆研究不透水面空间格局动态变化趋势,采用象限分析法研究城市群扩展规律,最后采用地理探测器探究不透水面扩展的驱动机制,以期为滇中城市群建设规划和城市化发展空间格局优化,提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况

滇中城市群由昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部的蒙自市、个旧市、建水县、开远市、弥勒市、泸西县、石屏县 7 个县市组成,共计 49 个县市(图 1)。位于 $100^{\circ}45' - 104^{\circ}48'E$, $23^{\circ}20' - 27^{\circ}02'N$,是中国面向南亚东南亚辐射中心的核心区。集中了全省 60% 以上的 GDP,44% 以上的人口,2/3 的坝区,地势相对平坦,土地资源丰富,随着经济社会的快速发展,城镇化率大幅提高,现如今已经成为云南省城市化发展的最核心区域。滇中城市群是全国 19 个城市群中最典型的高原城市群,发展潜力巨大,作为过去 20 年云南省城镇化发展最快速的区域,土地利用和土地覆被变化较为剧烈,尤其是大量耕地、林地、草地转化为不透水面,造成了不透水面的快速扩张,对生态环境产生了较大的负面影响,同时人地矛盾突出,该区域面临生态环境的有效保护和区域的可持续发展的挑战。因此,本文以滇中城市群为研究区,开展长时序高精度的不透水面变化监测,研究不透水面的利用效率、时空格局变化特征及其驱动力机制,对制定未来滇中城市群城市化建设不

透水面优化管控和实现可持续发展提供科学依据。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 滇中城市群区位

Fig. 1 Geographic positioning map of the central Yunnan urban agglomeration

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 不透水面数据 不透水面数据采用中国科学院刘良云研究员团队制作的 GISD 30 a 全球 30 m 不透水面数据集^[17],空间分辨率为 30 m,不透水面动态模型的总体精度为 91.5%,kappa 系数为 0.866,符合论文研究要求。对所在滇中城市群研究区进行裁剪、投影等预处理后,选取 2000—2020 年每隔 5 a 各时期的不透水面数据作为研究对象(图 2)。

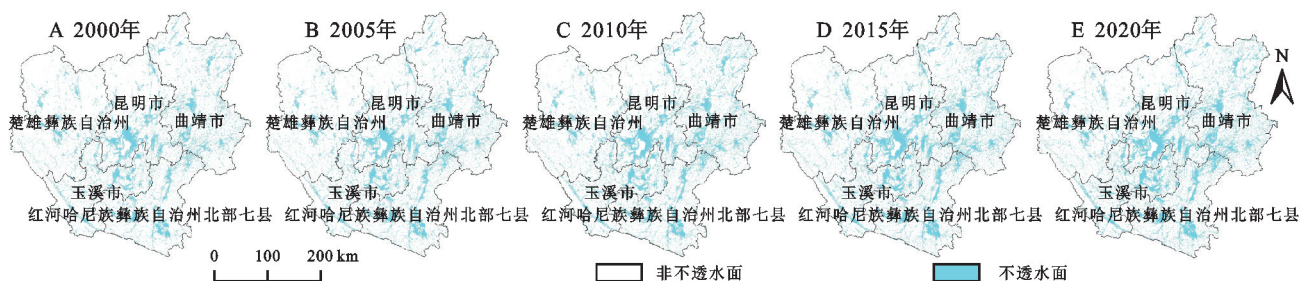


图 2 2000—2020 年滇中城市群不透水面分布情况

Fig. 2 Distribution of impervious surfaces in central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

2.1.2 驱动因子数据 驱动因子数据采用了人口数据、LAI 数据、坡度数据、降水量数据、温度数据、植被数据。除人口数据外,其他数据均使用 Google Earth Engine 平台生产,后经过重采样、重投影等相关处理,将驱动因子数据统一为空间分辨率为 1 km。相关数据见表 1。

2.2 研究方法

2.2.1 不透水面增长速率及动态度 不透水面增长

速率(S)为某时段内不透水面面积的增长情况,不透水面动态度(D)为某时段内不透水面的变化情况,计算公式为^[18]:

$$S = \frac{I_b - I_a}{T} \quad (1)$$

$$D = \frac{I_b - I_a}{I_a T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_a 和 I_b 分别为初期和末期的不透水面面积; T

为时间间隔。

2.2.2 标准差椭圆 标准差椭圆(standard deviational ellipse, SDE),是一种能够精确揭示地理要素的空间分布特征^[19],基于地理信息的 SDE 方法广泛应用于空间统计^[20],能够从多角度分析空间整体分布特征,标准差椭圆中的长轴代表不透水面空间分布的主趋势方向,长轴长度表示主趋势方向偏离重心的程度,短轴代表不透水面空间分布的次趋势方向,短轴长度表示次趋势方向偏离重心的程度。扁率表示不透水面空间分布形态,本文基于滇中城市群的区位,采用不透水面空间分布的平均重心为 SDE 的中心,以不同时间不透水面的面积为相应权重,计算不同时间滇中城市群不透水面空间分布的标准差椭圆。

表 1 驱动因子数据

Table 1 Compilation of data for driving factors

序号	数据名称	空间分辨率	数据来源
1	人口	1 km	http://www.resdc.cn/DOI
2	LAI(Leaf Area Index)	1 km	MOD15A2H 数据
3	坡度	1 km	SRTM 数据
4	气温	1 km	MOD11A1 数据
5	降水	1 km	UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY 数据集
6	植被	1 km	MOD13Q1 数据

2.2.3 象限分析 本文采用象限分析法来分析不同方向不透水面时空动态演变扩展的差异特征^[21],以滇中城市群不透水面重心为原点,东西方向为横轴,南北方向为纵轴,将不透水面分为东、东南、南、西南、西、西北、北、东北 8 个象限,分别与 2000—2020 年滇中城市群各州市不透水面扩展面积进行空间叠加统计分析后,得到各州市不同时期不透水面扩展面积雷达图。

2.2.4 地理探测器 本文在不透水面扩展中定量研究 LAI、坡度、降水、人口、温度和 NDVI 等不同驱动因子及其交互作用对不透水面扩展的驱动机制,采用地理探测器^[22]中的因子探测来探测不透水面的空间分异性,不同驱动因子对不透水面空间分异性的解释程度,用 q 值表示,公式如下^[23]:

(1) 因子探测。

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST} \tag{3}$$

$$SSW=\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i^2 \tag{4}$$

$$SST=N \sigma^2 \tag{5}$$

式中: i 为不透水面的分区; N_i 和 N 分别为第 i 分区与全区的单元数; σ_i^2 和 σ^2 分别为第 i 分区和全区 Y 值的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。值域为 0~1, q 值越大表示驱动因子 x 对不透水面 y 的解释力就越强,反之则越弱。

(2) 交互探测。交互探测主要用于识别不同驱动因子之间的交互作用,评估驱动因子 X_1 和 X_2 共同作用是否会增加或减弱对不透水面扩展 Y 的解释力或这些驱动因子对不透水面扩展的影响是否相互独立。分别计算驱动因子 X_1 和 X_2 对不透水面扩展 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 叠加驱动因子 X_1 和 X_2 的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$,将 3 个值分别比较,得到 5 种交互作用^[22]: $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$,非线性减弱。 $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$,单因子非线性减弱。 $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$,双因子增强。 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$,独立。 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$,非线性增强。

3 结果与分析

3.1 滇中城市群近 20 年不透水面变化分析

应用增长率和动态度公式得到近 20 年滇中城市群不透水面变化状况,2000—2020 年滇中城市群整体不透水面面积一直呈现不断增长趋势(图 3),滇中城市群在近 20 年中不透水面面积增加了 1 402 km²,增长率达 91.5%。在 20 年中,增长速度较快的为 2000—2005 年,该时期滇中城市群整体城市建设速度加快,不透水区域大幅增加。不透水面的年均扩展速率为 66.77 km²/a,不透水面整体扩展速率呈现下降—上升—下降趋势,不透水面的年均动态度为 4.36%,不透水面动态度呈现不断下降趋势。

从各个州市来看,不透水面面积、不透水面扩展速率和动态度变化差异明显。近 20 年昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州和红河哈尼族彝族自治州北部七县的不透水面面积分别增加 519.26,301.31,289.17,77.77,289.08 km²,不透水面的增长面积排序为昆明市、曲靖市、玉溪市、红河哈尼族彝族自治州北部 7 县市、楚雄彝族自治州。从不透水面的增长率分析,昆明市增长了 100%,曲靖市增长了 85.76%,玉溪市增长了 127.91%,楚雄彝族自治州增加了 66.56%,红河哈尼族彝族自治州北部七县市增长了 90.7%,不透水面的增长率排序为玉溪市>昆明市>红河哈尼族彝族自治州北部 7 县市>曲靖市>楚雄彝族自治州。

2000—2020年昆明市是滇中城市群不透水面增加最快速的城市,不透水面增加面积占滇中城市群不透水面增加面积的37%。楚雄彝族自治州是滇中城市群不透水面增加最慢的城市,不透水面增加面积仅占滇中城市群不透水面增加面积的5.55%。2000—2020年昆明市不透水面年均扩展速率为 $24.73\text{ km}^2/\text{a}$,年均动态度为4.76%,扩展速率呈现下降—上升—下降趋势,不透水面动态度呈现不断下降趋势。曲靖市不透水面年均扩展速率为 $14.35\text{ km}^2/\text{a}$,年均动态度为4.08%,不透水面扩展速率和动态度均呈现不断下降趋势。玉溪市不透水面年均扩展速率为 $13.77\text{ km}^2/\text{a}$,年均动态度为6.09%,不透水面扩展速率和动态度均呈现下降—上升—下降趋势。楚雄彝族自治州不透水面年均扩展速率为 $3.7\text{ km}^2/\text{a}$,年均动态度为3.17%,不透水面扩展速率呈现上升—下降—上升趋势和动态度呈现不断下降趋势。红河哈尼族彝族自治州北部七县市不透水面年均扩展速率为 $13.77\text{ km}^2/\text{a}$,年均动态度为4.32%,不透水面扩展速率呈现下降—上升趋势和动态度呈现不断下降趋势。

如图4所示,20年来滇中城市群各州市不透水面扩展显著,不透水面空间分布差异性非常明显,2000—2020年昆明市不透水面主要分布在南部和东北部区域,这主要和昆明市三面环山一面临滇池的空间格局有很大关系,不透水面分布具有明显的聚集特征,在滇池流域北部和沿岸分布最为集中,2000—2015年均保持了不透水面的快速扩展,2015—2020年不透水面扩展有较大降幅。2000—2020年曲靖市不透水面主要分布在原有各县市建成区,呈向外发散扩展分布,这主要和曲靖市大部分土地是高原山地和丘陵有关,不透水面在陆良坝子和曲沾坝子分布最为集中。2000—2010年曲靖市不透水面扩展较为迅速,2010—2020年曲靖市不透水面扩展不断减弱。2000—2020年玉溪市不透水面扩展明显,不透水面分布较为分散,其中红塔区、澄江市、江川区、华宁县、通海县相对集中,整体不透水面分布呈组团带状分布,除2005—2010年不透水面扩展稍弱外,其余年份不透水面都保持了较快扩展。2000—2020年红河哈尼族彝族自治州北部7县市不透水面保持了较为均衡的较快扩展,不透水面空间分布有明显的聚集特征,呈组团式分布。2000—2020年楚雄彝族自治州不透水面扩展较为缓慢,不透水面呈现点状分布和楚雄彝族自治州的地形地貌有关,主要原因是大部分区域是山高谷深的山

地,区域内仅有东华子午坝子较为平坦,适合不透水面扩展的盆地和平坝区域较少。

3.2 滇中城市群不透水面空间扩展分析

通过绘制2000—2020年滇中城市群不透水面的标准差椭圆进行空间分析发现(图5),标准差椭圆较椭,具有明显的方向性,所有年份的空间分布方向大致相同,长轴整体保持东北—西南的主趋势方向。整体上,滇中城市群近20年标准差椭圆基本相似,其中2005年标准差椭圆面积最大,主要原因在于2005年开始滇中城市群开始规划发展,随后城市建设进入快车道,不透水面开始高速扩展。不透水面重心基本稳定在玉溪市境内,2000—2005年和2015—2020年重心向南迁移加快,表明滇中城市群不透水面向南扩展较为迅速,2005—2010年和2010—2015年重心向东南方向迁移速度减弱,不透水面向东南方向扩展放缓。从总体上来看,2000—2020年不透水面重心较为稳定,整体一直保持向南迁移。通过标准差椭圆面积比较,总体变化程度较小。

采用象限分析法对2000—2020年滇中城市群各州市不透水面扩展的方向性进行分析(图6),整体上各州市不透水面的扩展差异较大,多集中在各个城市的南部扩展。其中昆明市2000—2010年不透水面总体向南扩展,主要是东南方向、西南方向和正南方向,2010—2020年不透水面在正南方向扩展有大幅减弱,整体依然保持向南扩展的方向不变。昆明市主城区北部区域发展已接近饱和,扩展难度大,而南部区域呈贡、晋宁、安宁城市发展较快,近20年不透水面扩展迅速。玉溪市2000—2010年不透水面主要向东扩展,主要是东北和正东方向。2010—2020年不透水面扩展有所增强,整体扩展方向保持不变。曲靖市2000—2010年不透水面主要向南扩展,主要是西南方向、正南方向和东南方向。2010—2020年不透水面扩展有所减弱,在西南方向扩展有较大降幅。曲靖市与昆明接壤的马龙区、陆良县地势平坦,发展后劲较强,近年来成为曲靖市发展的新区域。楚雄彝族自治州2000—2020年不透水面总体向南扩展,主要是东南和正南方向,2010—2020年不透水面扩展有所减弱,整体扩展方向保持不变。红河哈尼族彝族自治州北部七县市2000—2020年不透水面向东南方向扩展,2010—2020年不透水面扩展方向向东增强,向东南方向减弱。滇中城市群不透水面扩展,有助于促进滇中地区城市化加速发展,使各城市之间的联系更为紧密,基础设施不断完善。同时,各个城市的不透水面扩大,可以增强各区域之间协调发展的程度,进一步提升面向南亚东南亚桥头堡的服务能力。

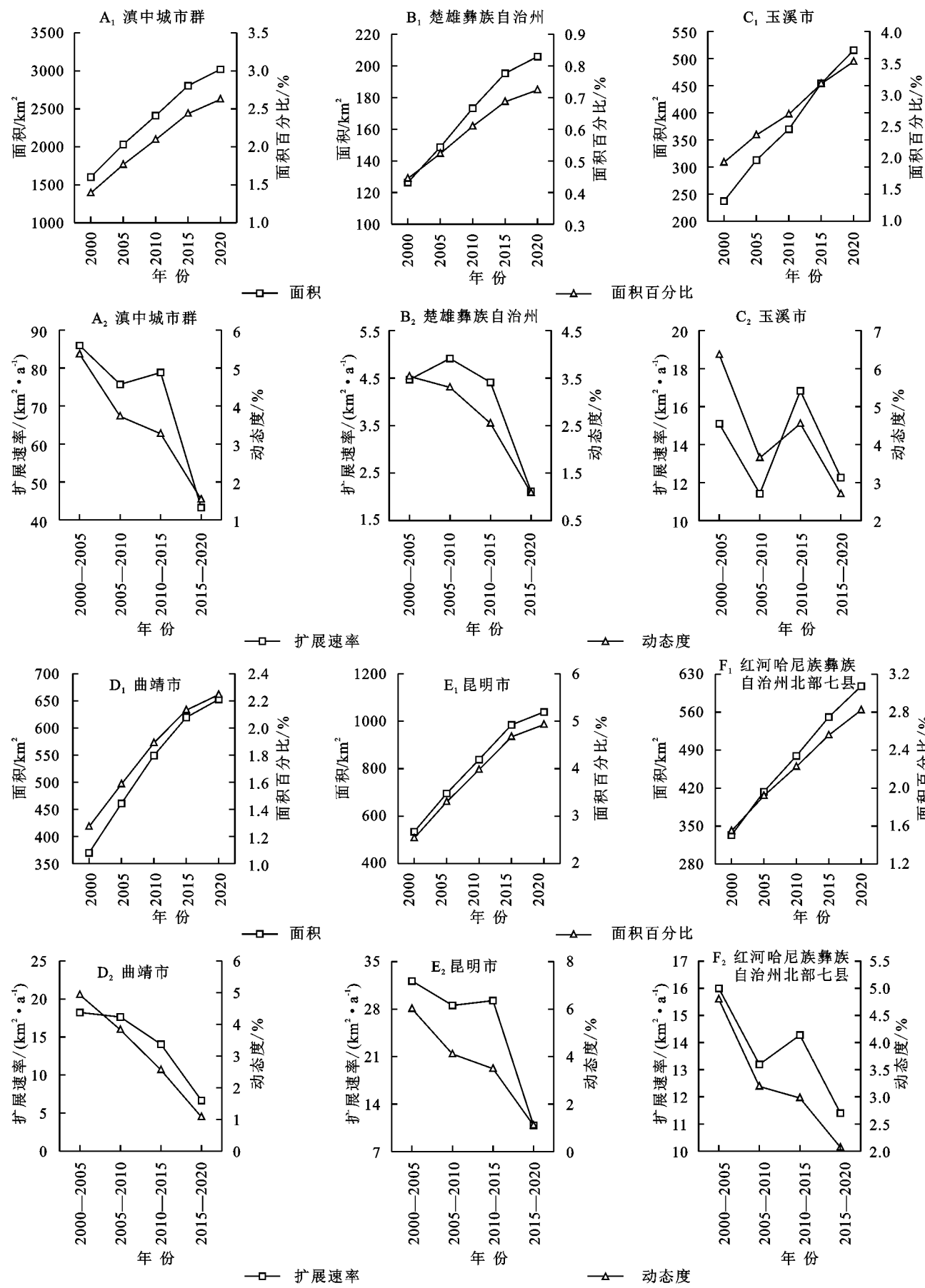


图 3 滇中城市群及各城市不透水面速率与动态度变化情况

Fig. 3 Changes in impervious surface rate and dynamics in central Yunnan urban agglomeration and its cities

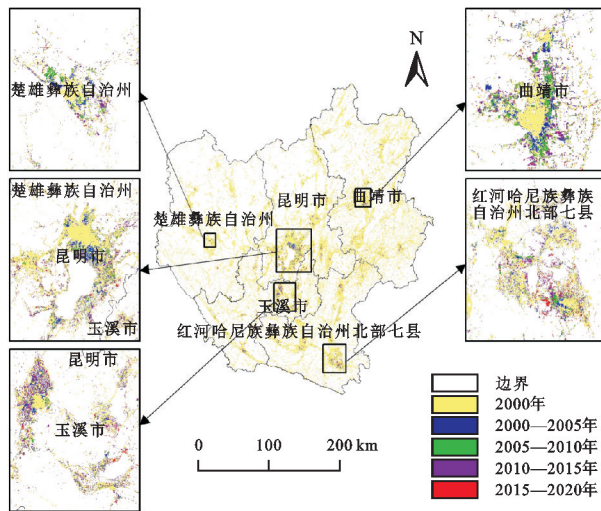


图4 滇中城市群不透水面扩展及分布情况

Fig. 4 Expansion and distribution of impervious surfaces in central Yunnan urban agglomeration

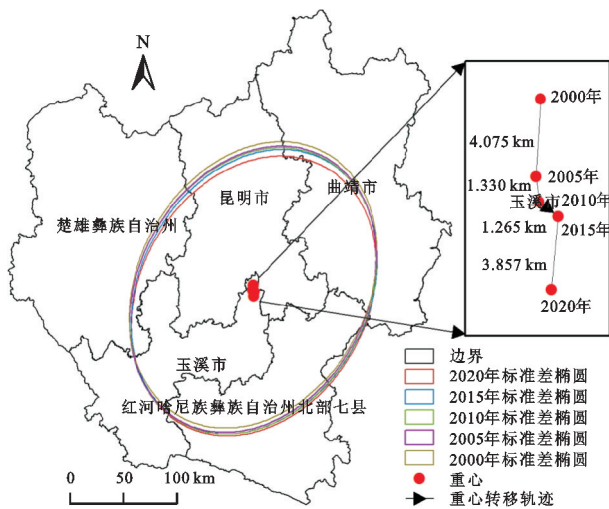


图5 2000—2020年滇中城市群不透水面标准差椭圆变化时间序列

Fig. 5 Temporal sequence of standard deviation ellipse changes in impervious surfaces for central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

3.3 滇中城市群不透水面扩展的驱动力分析

为了更深入地探究滇中城市群不透水面扩展原因,厘清不透水面扩展的驱动力机制,利用地理探测器中的交互探测器探测驱动因子之间影响不透水面扩展的相互作用关系(图7)。在驱动因子选取方面,参考了冯珊珊^[24]、吴迪^[25]等的研究,同时结合研究区实际情况,在研究中选取了坡度、降水、人口、温度、NDVI因子作为驱动因子。从结果可以看出,2000—2020年中人口对不透水面扩展的影响显著;而LAI、坡度、降水、温度以及NDVI对不透水面扩展的影响则表现不明显。人口和其他因素之间的交互作用强度明显强于其他因素之间的交互作用。

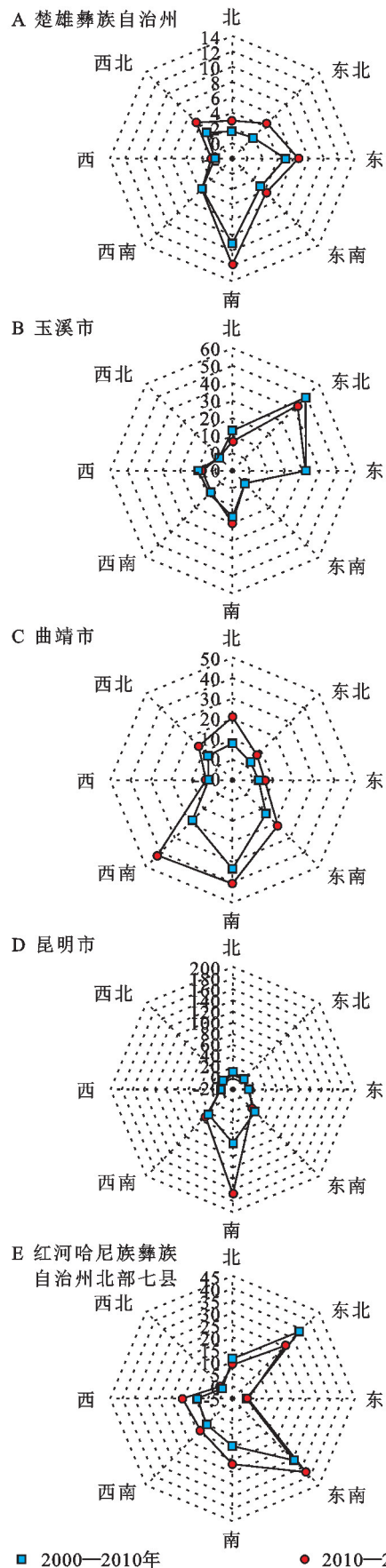


图6 2000—2020年滇中城市群不透水面扩展象限分析
Fig. 6 Analysis of impervious surface expansion quadrants in central Yunnan urban agglomeration, 2000—2020

2000 年,人口与 LAI、坡度、降水、温度、NDVI 的交互作用驱动力大小均大于 0.21,其中人口与 NDVI 的交互作用驱动力大小最高(0.243 9);2005 年,人口与其他因素的交互作用驱动力大小均大于 0.23,人口与 NDVI 的交互作用驱动力为 0.319 3,人口与坡度的交互作用驱动力次之(0.297 9);2010 年,人口与其他因子的交互作用驱动力大小均大于 0.3,其中人口与 NDVI 的交互作用驱动力最大(0.345 2),人口与 LAI 的交互作用驱动力次之(0.334 1);2015 年,人口与其他因子的交互作用驱动力均大于 0.27,其中,人口与 NDVI 的交互作用驱动力最大(0.319 3);2020 年,人口与其他因子的交互作用驱动力均大于 0.32,其中对不透水面扩展影响较大的有 LAI 与人口的交互作用驱动力(0.355 9),以及人口与坡度的交互作用驱动力(0.350 9)。上述分析表明,随着滇中城市群城市化的快速推进,人口数量不断攀升,人口作为城市扩展的推动力和背景,相对较高的人口密度也进一步促进了不透水面的扩展。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究采用的不透水面数据是 30 m 分辨率的数据,随着卫星遥感数据空间分辨率的不断提高,后续研究可以采用更高分辨率不透水面数据,更加精细和准确地掌握不透水面扩展情况。同时本文采用的长时序驱动因子数据并不全面,同时空间分辨率过粗,在部分细节区域度量驱动力不准确,后续需采用更多有研究区特色的更高分辨率的驱动因子,进一步深入探究滇中城市群不透水面扩展的驱动机制。

基于目前滇中城市群近 20 年不透水面时空演变及其驱动机制状况,提出以下决策建议:(1) 应用本文的研究不透水面扩展驱动机制的结果,重视不透水面扩展与人口的关系,根据资源环境承载能力,合理规划滇中城市群不透水面空间布局;(2) 在优化滇中城市群不透水面空间布局时,需要充分考虑洪涝区、生态保护红线区、三生空间、禁建区内的建设;(3) 积极利用好当前的不透水面区域,不断加强各城市经济体之间的相互联系,以此增强滇中城市群辐射南亚东南亚区域发展的能力。

4.2 结论

(1) 近 20 年来滇中城市群不透水面面积增加了 1 402 km²,增长率 91.5%,不透水面的年均扩展速率为 66.77 km²/a,不透水面整体扩展速率呈现下降—上升—下降趋势,不透水面动态呈现不断下降趋势。昆明市是滇中城市群不透水面增加最快速的城市,楚雄彝族自

治州滇中城市群不透水面增加最慢的城市。

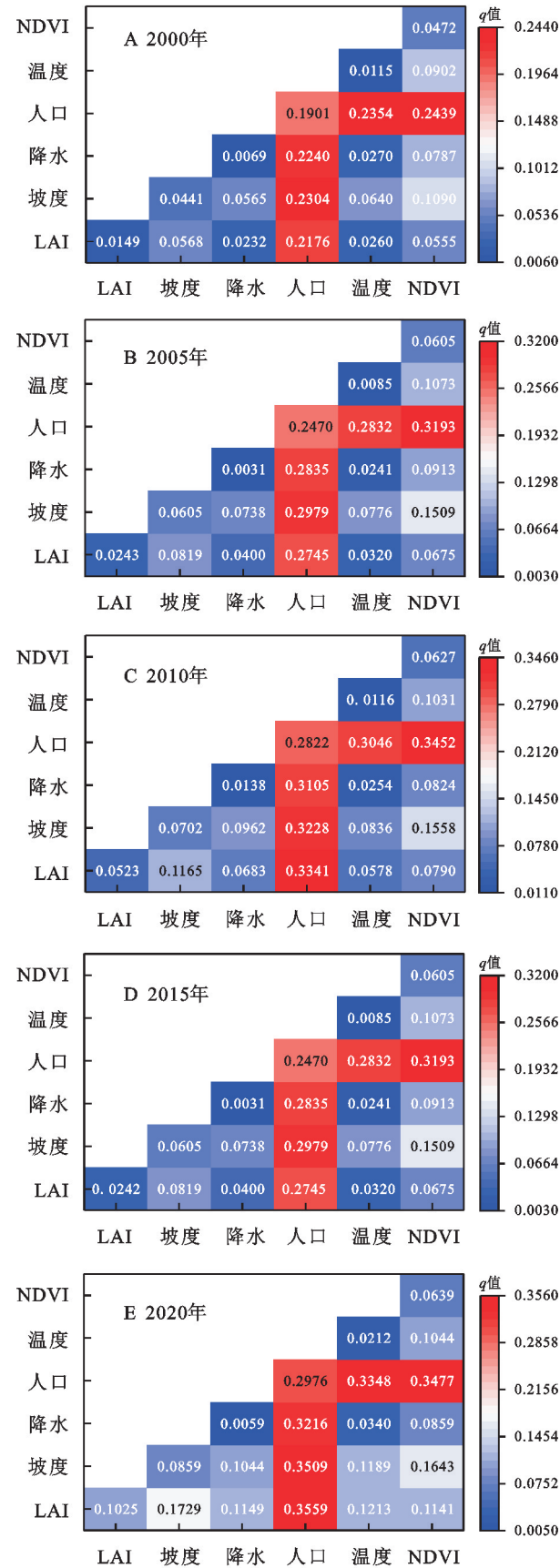


图 7 2000—2020 年滇中城市群不透水面扩展驱动力分析
Fig. 7 Analysis of impervious surface expansion drivers in central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

(2) 2000—2020年滇中城市群不透水面空间扩展显著,不透水面空间分布差异性非常明显,整体朝南部—东南部主趋势方向扩展,主要分布以各城市主城区为中心,不断向外扩展,2005年开始滇中城市群的不透水面开始高速扩展。从不透水面的空间分布来看滇中城市群的北部、西部和东部分布较少,不透水面主要集中在滇中城市群的中部、东南部和南部地区。其中昆明市的不透水面面积最多,具有明显的聚集特征,在滇池流域北部和沿岸分布最为集中。曲靖市,不透水面的分布较为分散,呈向外发散扩展分布。玉溪市的不透水面分布也呈现明显的聚集特征,整体不透水面分布呈组团带状分布,红河哈尼族彝族自治州北部七县市不透水面空间分布有明显的聚集特征,呈组团式分布。楚雄彝族自治州的不透水面分布最少且较为零散。

(3) 近20年滇中城市群不透水面驱动因素中影响最为显著的是人口因素,其他驱动因子LAI、坡度、降水、温度以及NDVI对不透水面扩展的影响不显著。人口和其他因素之间的交互作用强度明显强于其他因素之间的交互作用。

参考文献(References):

- [1] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(7):1242-1252.
- [2] 陈明星,叶超,陆大道,等.中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构[J].地理学报,2019,74(4):633-647.
Chen M X, Ye C, Lu D D, et al. Cognition and construction of the theoretical connotation for new-type urbanization with Chinese characteristics[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(4):633-647.
- [3] 林冬凤,徐涵秋.厦门城市不透水面及其热环境效应的遥感分析[J].亚热带资源与环境学报,2013,8(3):78-84.
Lin D F, Xu H Q. Urban impervious surface and its effects on thermal environments in Xiamen: An analysis based on remote sensing technology[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013,8(3):78-84.
- [4] Weng Q H. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,117:34-49.
- [5] 王李良,张修宇.基于Google Earth Engine的河南省引黄受水区不透水面时空演变[J].人民黄河,2022,44(8):76-80,86.
Wang L L, Zhang X Y. Analysis of temporal and spatial evolution of impervious surface in Yellow River diversion and receiving areas of Henan Province based on Google Earth Engine[J]. Yellow River, 2022,44(8):76-80,86.
- [6] 徐涵秋,王美雅.地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J].遥感学报,2016,20(5):1270-1289.
Xu H Q, Wang M Y. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2016,20(5):1270-1289.
- [7] Ren Q, He C Y, Huang Q X, et al. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands[J]. Nature Sustainability, 2022,5:869-878.
- [8] 李培林,刘小平,黄应淮,等.基于GEE平台的广州市主城区不透水面时间序列提取[J].地球信息科学学报,2020,22(3):638-648.
Li P L, Liu X P, Huang Y H, et al. Mapping impervious surface dynamics of Guangzhou downtown based on Google Earth Engine[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(3):638-648.
- [9] 马玉林,吴华,高丽萍,等.1988—2021年拉萨市城关区不透水面时空变化遥感监测[J].高原科学研究,2022,6(1):48-55,121.
Ma Y L, Wu H, Gao L P, et al. Study on the temporal and spatial variation of impervious area of Chengguan District during 1988—2021[J]. Plateau Science Research, 2022,6(1):48-55,121.
- [10] 黄昕,李家艺,杨杰,等.Landsat卫星观测下的30 m全球不透水面年度动态与城市扩张模式(1972—2019)[J].中国科学:地球科学,2021,51(11):1894-1906.
Huang X, Li J Y, Yang J, et al. Annual dynamics of 30 m global impervious surface and urban expansion model observed by landsat satellite (1972—2019)[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2021,51(11):1894-1906.
- [11] 唐志光,邓刚,李少为,等.基于Google Earth Engine的湖南省近30年不透水面时空变化研究[J].地理与地理信息科学,2020,36(2):41-46.
Tang Z G, Deng G, Li S W, et al. Study on the spatio-temporal variation of impervious surface in Hunan Province for nearly 30 years based on Google Earth Engine[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020,36(2):41-46.
- [12] 尹振南,周廷刚,李洪忠,等.粤港澳大湾区不透水面变化及城市扩展研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(2):106-113.
Yin Z N, Zhou T G, Li H Z, et al. Study on impervious

- surface change and urban expansion of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(2):106-113.
- [13] Gao F, de Colstoun E B, Ma R H, et al. Mapping impervious surface expansion using medium-resolution satellite image time series: A case study in the Yangtze River Delta, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(24):7609-7628.
- [14] 李益敏, 杨舒婷, 吴博闻, 等. 昆明市呈贡区不透水面时空变化及驱动力分析[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(2):136-143.
- Li Y M, Yang S T, Wu B W, et al. Spatiotemporal evolution of impervious surface and the driving factors in Chenggong District, Kunming City[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(2):136-143.
- [15] Li P, Xiao Z. Impervious surface expansion in the China-Laos border area under the context of geo-economic cooperation: A case study of the Mohan-Boten Economic Cooperation Zone [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1):2184-2201.
- [16] Lu D S, Moran E, Hetrick S. Detection of impervious surface change with multitemporal landsat images in an urban-rural frontier[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(3):298-306.
- [17] Zhang X, Liu L Y, Zhao T T, et al. GISD30: Global 30 m impervious-surface dynamic dataset from 1985 to 2020 using time-series Landsat imagery on the Google Earth Engine platform[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4):1831-1856.
- [18] 李苗, 臧淑英, 吴长山, 等. 哈尔滨市城乡结合部不透水面时空变化及驱动力分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):105-115.
- Li M, Zang S Y, Wu C S, et al. Spatial and temporal variation and its driving forces of urban impervious surface in urban-rural continuum of Harbin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):105-115.
- [19] 赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(8):979-986.
- Zhao L, Zhao Z Q. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8):979-986.
- [20] 褚艳玲, 宫之光, 杨忠振. 21世纪以来中国航空货运空间变化研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(3):335-341.
- Chu Y L, Gong Z G, Yang Z Z. The spatial pattern of China air cargo transportation in 21st century[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3):335-341.
- [21] 肖琳, 田光进. 天津城市扩展空间模式与驱动机制研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(7):1327-1335.
- Xiao L, Tian G J. Study on spatial modes and driving mechanisms of Tianjin's urban expansion [J]. *Resources Science*, 2014, 36(7):1327-1335.
- [22] 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.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [23] 祁鹏卫, 张贤. 2000—2019年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(13):5427-5436.
- Qi P W, Zhang X. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13):5427-5436.
- [24] 冯珊珊, 樊风雷. 2006—2016年粤港澳大湾区城市不透水面时空变化与驱动力分析[J]. *热带地理*, 2018, 38(4):536-545.
- Feng S S, Fan F L. Spatial-temporal changes of impervious surface in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during 2006—2016 [J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(4):536-545.
- [25] 吴迪, 李冰, 杨爱玲. 基于地理国情数据的哈尔滨市不透水面变化监测及驱动力分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(9):16-19, 23.
- Wu D, Li B, Yang A L. Driving forces analysis of impervious surface changes in Harbin based on geographical condition survey[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(9):16-19, 23.