

李安琪, 曹鑫, 崔喜红, 等. 基于GlobeLand 30的南亚各国人造地表变化时空特征分析. 世界地理研究, 2023, 32(2): 23-35. [LI Anqi, CAO Xin, CUI Xihong, et al. Spatio-temporal characteristics analysis of artificial surface evolution in South Asia based on GlobeLand 30. World Regional Studies, 2023, 32(2): 23-35.]
DOI: 10.3969/j.issn.1004-9479.2023.02.2021175

基于GlobeLand 30的南亚各国人造地表变化 时空特征分析

李安琪^{1a}, 曹鑫^{1a, 1b, 1c}, 崔喜红^{1a, 1b, 1c}, 梁涵玮², 李强^{1a},
全振先^{1a}, 张政^{1a}

(1. 北京师范大学 a. 地理科学学部遥感科学与工程研究院, b. 遥感科学国家重点实验室, c. 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875; 2. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044)

摘要:以南亚各国为例, 基于2000、2010和2020年三期GlobeLand30数据, 通过空间扫描统计法、景观扩张指数和洛伦兹曲线对2000—2010年和2010—2020年两个时段南亚各国的人造地表扩张情况进行统计分析, 研究南亚各国人造地表的时空变化和空间结构的发展特征。结果表明: (1)南亚人造地表面积持续扩张, 扩张率由2000—2010年的0.42%增长到2010—2020年的2.59%。(2)近20年来, 印度人造地表面积扩张量最大, 不丹的扩张率最快, 南亚在人造地表扩张的过程中出现了显著的空间热点区域, 并且在不同时段表现出空间热点的迁移现象。(3)巴基斯坦西部、斯里兰卡中部、孟加拉国西北部以及印度东部和南部飞地式斑块增加, 人造地表呈现出分散凌乱的扩散特点; 印度北部、斯里兰卡东部和孟加拉国东南部的新增斑块类型由飞地式转化为填充式和边缘式, 表现出从扩散式阶段发展到趋于紧凑的聚合式阶段的变化趋势。(4)南亚各国人造地表的扩张在不同规模的城市尺度上存在很大差异, 导致人造地表扩张过程表现出明显的不均衡性。

关键词:人造地表; 景观扩张指数; 时空特征; GlobeLand30; 南亚

0 引言

人造地表是人类活动对陆地表层影响的直观体现, 主要包含城乡居住、交通、工矿等用地类型^[1, 2], 其空间分布和变化反映了区域生产空间布局、基础设施建设和经济社会发展水平。研究人造地表的时空分布特征不仅有助于揭示城镇化在地表覆盖上的变化规律, 了解一个国家或区域的城市化进程, 同时也有利于分析工业、交通等经济活动的变化特征。南亚是“一带一路”倡议的重要节点区域, 近年来一直保持较高的经济增长速度^[3], 并且正处于城市化快速发展的阶段, 目前已成为世界重要的新兴市场。但逐渐加快的城镇扩张加重了南亚本身就存在的土地利用不合理和生态环境脆弱的问题, 因此, 分析其人造地表变化的时空特征具有重要意义, 然而, 目前关于南亚地区人造地表扩张特征的研究相对较少。

收稿日期: 2021-03-12; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 科技基础资源调查专项项目(2019FY202502); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910300013)。

作者简介: 李安琪(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 资源环境遥感, E-mail: xynh_xiaoliba@163.com。

通信作者: 崔喜红(1975—), 女, 副教授, 主要研究方向: 资源环境及生态遥感, E-mail: cuixihong@bnu.edu.cn。

国内外学者大多借助遥感数据获取城市扩张的动态信息,研究城市扩张的程度和时空发展特征^[4],所采用的遥感数据空间分辨率一般在0.03~1 km之间。其中,多数研究基于美国地质勘探局发布的Landsat TM/OLI影像数据,利用不同的分类方法提取城市建成区数据^[5,6],在此基础上引入测度指标或相关分析方法对城市扩张特征进行量化分析。但是由于Landsat TM/OLI数据没有统一的分类体系,各研究在对城市类别的定义和分类方法上有差异,导致分类精度和分析结果的可靠性难以保证。部分研究利用DMSP-OLS、NPP等夜间灯光数据代表城镇范围,分析夜间灯光在各类城市中的集中分布特征,研究城市区域的空间格局变化和时空演化规律^[7,8]。夜间灯光数据由于空间分辨率较低,多用于大、中型城市区域的研究,且受到溢出效应、空气质量和月光等因素影响,数据质量不能保证。近年来,也有研究利用我国2009年研制的全球高分辨率(30 m)地表覆盖数据产品GlobeLand 30开展城市变化特征方面的研究^[9,10]。例如,于溪等基于GlobeLand 30产品2000和2010年两期的数据,提取其中的人造地表类型,利用凸壳原理提取城市建成区^[11],揭示我国城市发展模式和生态用地特征。但是将该数据产品用于其他国家或区域上的相关研究多采用两期数据进行比较,缺乏不同时段差异对比。此外,从分析方法来看,已有研究大多采用简单的地统计学方法对城市扩张和变化特点进行定性或定量分析。近年来,利用景观生态学的方法来描述人造地表扩张的时空格局特征逐渐得到重视,因为借助一些景观格局指数可以更好地刻画不同类别斑块的发展演化过程。例如,刘小平等采用基于新增斑块最小包围盒的景观扩张指数(LEI)反映城市空间分布格局的变化过程,并进一步通过拓扑关系计算探讨城镇扩展空间形态变化^[12-14]。然而,多数研究主要侧重于城市或城市群尺度上用地数量或面积的扩张程度,或对扩张模式进行分类解释,少有分析城市扩张过程中在不同时间段的冷、热点转换或城市发展的均衡性问题。

本研究从全球30 m地表覆盖数据GlobeLand 30的2000年、2010年和2020年(最新)三期数据产品中,提取南亚各国的人造地表数据,利用景观生态学及经济学方法对南亚各国人造地表在两个时段内(2000—2010年、2010—2020年)的时空演化特征进行对比,研究南亚各国人造地表的时空变化,刻画人造地表的扩张模式,探测人造地表扩张的空间热点和冷点区域,分析人造地表扩张的均衡程度及主要影响因素。这有利于了解南亚城市的发展规律,为其可持续发展的研究提供理论基础。

1 数据与研究方法

1.1 研究区与数据集

1.1.1 研究区概况 南亚与我国相互毗邻,也是“一带一路”倡议建设的重要区域,位于亚洲南部的喜马拉雅山脉中、西段与印度洋之间,东临孟加拉湾,西临阿拉伯海。近年来,南亚地区一直保持较高的经济增速,已成为世界重要的新兴市场,2019年全球经济增速超7%的经济体仅三个,其中两个是南亚国家^①。南亚各国城市化进程显著,人口密度较大,除不丹外,南亚各国的人口密度都大于我国,详细信息如表1所示。

1.1.2 数据来源 全球30 m地表覆盖数据(GlobeLand 30)是我国自主研发的30 m分辨率的覆盖全球、全类型的地表覆盖数据产品,目前包括2000、2010和2020版三期。该数据产品

^①数据来源:World Bank. World bank database. <http://data.worldbank.org>.

表 1 南亚各国概况

Tab.1 Overview of South Asian countries

项目	印度	斯里兰卡	巴基斯坦	尼泊尔	不丹	马尔代夫	孟加拉国
面积/km ²	2 980 000	65 610	796 095	147 181	38 394	90 000	147 570
人口/百万人	1 324	21.44	208	28.94	0.75	0.44	164
人口密度/(人/km ²)	450	338	255	202	21	1 392	1 265

包含十个主要的地表覆盖类型,分别是耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪,具备更加丰富详尽的地表覆盖类型空间分布信息,能更好地刻画大多数人类土地利用活动及其所形成的景观格局^[15]。数据总体精度在 85% 左右,其中 2010 版精度 83.50%,2020 版精度 85.72%^[16]。本研究从中提取人造地表类型,分析它在 2000 年、2010 年、2020 年三期的时空变化。

本文使用的 DEM 高程数据来源于中科院计算机网络信息中心公开的 SRTMDEM 90 m 分辨率原始高程数据(www.gscloud.cn),行政区划矢量数据来源于全球行政区划数据库(gadm.org),行政区划及城市人口数据来源于行政区划网(www.xzqh.org)。

1.1.3 数据预处理 在分幅表的网格上查找南亚各国各期对应的 GlobeLand 30 数据编号,下载相应栅格数据。在 ArcGIS 10.2 中进行影像镶嵌、掩膜和提取,得到各国的人造地表数据。将南亚各国的二级行政单元和城市尺度的矢量图层与人造地表数据进行空间连接,便于对各国的二级行政单元和各城市的人造地表进行统计分析。

由于世界各国对城市规模的划分并无严格的标准,首先统计南亚各国各个城市的人口,计算南亚各国人口密度与我国人口密度的比值;然后将我国城市规模划分标准除以该值,使各国人口规模与我国城市规模划分标准对照,得出南亚各国的城市规模划分依据。将南亚各国的城市规模划分为大、中、小型城市,从空间角度探讨南亚人造地表扩张的发生以何种规模的城市为主。

1.2 研究方法

1.2.1 人造地表扩张量和扩张率统计 人造地表扩张量(UE)的测算使用两时期人造地表总面积的差值,反映一段时间内人造地表的变化量,用公式表示为:

$$UE = U_{end} - U_{start} \quad (1)$$

使用城市扩张强度指数(UII)测算人造地表扩张率^[17],用来表示各个统计单元的人造地表在一段时间内的年平均增长率,该指数能够反映人造地表发展的强弱快慢,计算方法为:

$$UII = \frac{U_{end} - U_{start}}{n \times U_{start}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, n 是间隔的年数, U_{start} 和 U_{end} 分别表示开始日期和结束日期的人造地表面积。

1.2.2 空间扫描统计 空间扫描统计法是疾病空间检测领域的常用方法,用于评估疾病空间聚集,目前该方法已逐渐被应用于地理学、经济学等研究中^[18,19]。本研究利用空间扫描统计法分析南亚人造地表扩张的空间聚集性特征,采用动态变化的圆形扫描窗口对研究区进行扫描,在每个扫描窗口中,假设二级行政单元内人造地表实际扩张面积服从由式(3)所表示的与原有面积有关的泊松分布,计算出人造地表扩张面积的期望值,该期望值与原有面积在南亚整体的人造地表面积占比成正比,用公式表示为式(4):

$$N_i \sim \text{Poisson}(\theta_i e_i) \quad (3)$$

$$e_i = n \frac{\delta_i}{\sum \delta_i} \quad (4)$$

式中, n 为窗口内的扩张面积, θ_i 为二级行政单元的人造地表扩张系数, e_i 和 δ_i 分别表示二级行政单元的扩张面积的期望值和原有人造地表面积。

然后根据扫描窗口内和扫描窗口外的人造地表实际扩张面积和扩张面积的期望值计算检验统计量对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR), 并通过蒙特卡罗法对聚集区进行统计学检验。LLR可以评价窗口内的人造地表实际扩张面积是否异常, 似然函数的计算公式为:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^m \left(\frac{(\theta_i e_i)^m \exp(-\theta_i e_i)}{n_i!} \right) \quad (5)$$

式中, m 为窗口内二级行政单元的个数; $L(\theta)$ 值越大, 表示该动态窗口内部所含区域为聚集区域的可能性越大, 其中一级空间聚集区域的 $L(\theta)$ 值最大, 二级空间聚集区域 $L(\theta)$ 次之, 最后一级空间聚集区域的 $L(\theta)$ 值最小。

1.2.3 景观扩张指数 景观的空间扩张类型有飞地式、边缘式和填充式。飞地式的扩张模式呈现出在原有斑块之外产生了新的增长点; 边缘式的扩张是一种沿着原有斑块外围扩张的模式; 填充式的扩张是在原有斑块内部所进行的填充, 填补了原有斑块内部的空隙。本文采用基于新增斑块最小包围盒的景观扩张指数(Landscape Expansion Index, LEI)将人造地表空间分布格局与其变化过程相结合, 分析南亚各国人造地表的扩张类型和空间结构特征。最小包围盒表示斑块的空间范围, 指包围这个斑块的矩形, 该矩形边界与坐标系平行。基于新增斑块最小包围盒的景观扩张指数(LEI)的计算方法为:

$$\begin{cases} LEI = \frac{A_0}{A_E - A_P} \times 100 & (\text{新增斑块不为矩形}) \\ LEI = \frac{A_0}{A_{LE} - A_P} \times 100 & (\text{新增斑块为矩形}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, A_0 为该新增斑块的最小包围盒中原有斑块的面积; A_E 为该最小包围盒的面积; A_P 为该新增斑块的面积; A_{LE} 表示当新增斑块为矩形时, 将其最小包围盒放大 1.2 倍的结果, 由于当新增斑块为矩形时, 其最小包围盒的面积与之相等, 导致计算结果为 0, 因此这是为了使计算结果合理所进行的修正。当 $LEI > 50$ 为填充式扩张; 当 $LEI = 0$ 时为飞地式扩张, 此时 $A_0 = 0$; 当 $0 < LEI \leq 50$ 时为边缘式扩张。

在城市增长相位理论(Urban Expansion Phases Theory)中, 认为城市的发展主要包括两种相位: 扩散和聚合^[20], 在城市发展的初期, 城市中心或周围产生新的增长中心, 相当于飞地式发展, 这个过程称之为扩散; 随后, 城市沿着已有的城市用地外围进行扩张, 相当于边缘式发展; 随着扩张过程的继续, 城市发展逐渐填充已有城市用地之间的空隙, 该过程称之为聚合。本文通过对飞地型扩张模式和其他类型(边缘型、填充型)之间相互转化的程度对人造地表空间格局形态变化的过程进行分类, 分类依据如表 2 所示。其中, $F_{i,1}$ 为 2000—2010 年二级行政单元 i 的新增斑块类型中飞地型斑块面积占比, $F_{i,2}$ 为 2010—2020 年二级行政单元 i 的新增斑块类型中飞地型斑块面积占比。对各个统计单元来说, 由于飞地型斑块占比集中在 30%~80% 之间, 因此以 10% 和 30% 作为阈值。

1.2.4 洛伦兹曲线 洛伦兹曲线在经济学中常用于描述生产要素报酬分配的平均化程度^[21, 22]。本研究利用洛伦兹曲线来衡量人造地表扩张的发生在具有不同社会经济特征的区

域是否均衡。以各国二级行政单元作为统计单元,按照人造地表扩张率由小至大的顺序分别求出各统计单元人造地表原有面积和扩张面积的累计百分比,作出洛伦兹曲线。人造地表的扩张往往遵循这样的规律:原有面积大的区域的新增面积大于原有面积小的区域,因此,该曲线越接近于 $y=x$ 曲线,则表示新增面积与原有面积越接近于正比关系,即不同城镇的面积扩张越均衡;曲线弯曲程度越大,则表示区域人造地表扩张情况越不均衡。

2 结果分析

2.1 南亚人造地表时空扩展特征

2.1.1 南亚区域整体变化情况 随着城市化的进程,南亚整体人造地表面积呈现出逐期增长的趋势(图1),在2000—2010年这一时段,人造地表总面积由74 267.45 km²增长到77 350.62 km²,扩张了3 084.17 km²,扩张率为0.42%。2010—2020年增长到97 389.28 km²,扩张了20 038.66 km²,扩张率为2.59%。对比两个时段的增长情况,2010—2020年增长更为迅速,扩张量约为2000—2010年人造地表扩张量的7倍。

图2展示了南亚在2000、2010和2020年三个时期的人造地表分布情况,由于南亚北部的喜马拉雅山地为高海拔地区,人类活动较少,因此北部山地无人造地表。从空间角度来说,印度的首都新德里出现了南亚最大的人造地表斑块,并且有数量较多的大型人造地表出现在孟买、加尔各答、班加罗尔等大城市。其他国家的大型人造地表斑块较少,在孟加拉国出现了大量人造地表斑块破碎增长的现象。在2010—2020年,南亚各国都出现了大量零星增长的斑块。

2.1.2 南亚各国人造地表变化情况 虽然南亚整体人造地表呈现扩张态势,但各个国家的变化差异较为明显,不同国家的人造地表增长强度和程度有所不同。对南亚各国的人造地表变化情况进行量化分析的结果如图3所示,印度、巴基斯坦和孟加拉国在2000—2010年出现了人造地表扩张现象,印度以1 485.72 km²的人造地表扩张量位于第一,其扩张量约占南亚整体人造地表扩张量的48%,而该时段扩张率最高的国家是孟加拉国,为0.96%。在2010—2020年这一时段,印度、巴基斯坦和孟加拉国的人造地表扩张面积和扩张率呈现出继续增长的趋势,印度仍然为人造地表扩张量最大的国家,扩张量为13 227.50 km²,约占该时段南亚整体人造地表扩张量的66%。尼泊尔、不丹、斯里兰卡和马尔代夫在2000—2010年这一

表2 基于城市增长相位理论的人造地表空间格局形态变化过程分类依据

Tab.2 Classification basis of spatial pattern evolution of artificial surface based on urban expansion phases theory

类型	取值范围
高度扩散	$F_{i,2} - F_{i,1} > 30\%$
中度扩散	$10\% < F_{i,2} - F_{i,1} \leq 30\%$
低度扩散	$0 < F_{i,2} - F_{i,1} \leq 10\%$
无扩张地区	$F_{i,2} - F_{i,1} = 0$
低度聚合	$-10\% \leq F_{i,2} - F_{i,1} < 0$
中度聚合	$-30\% \leq F_{i,2} - F_{i,1} < -10\%$
高度聚合	$F_{i,2} - F_{i,1} < -30\%$

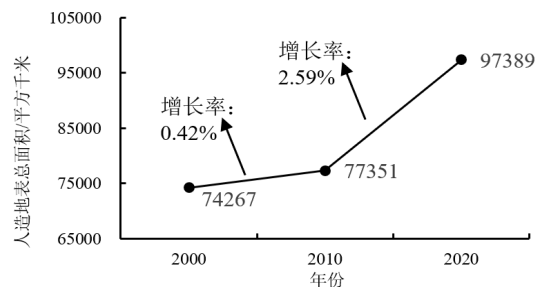


图1 2000—2020年南亚人造地表总面积和扩张率
Fig.1 Total artificial surface area and expansion rate in South Asia from 2000 to 2020

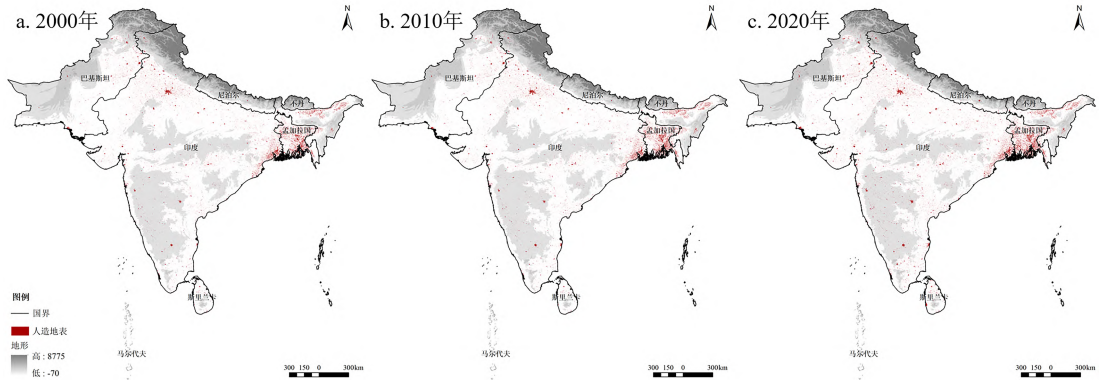


图2 南亚人造地表变化情况

Fig.2 Artificial surface changes in South Asia

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1663号的标准地图制作，底图无修改。以下各地图同。

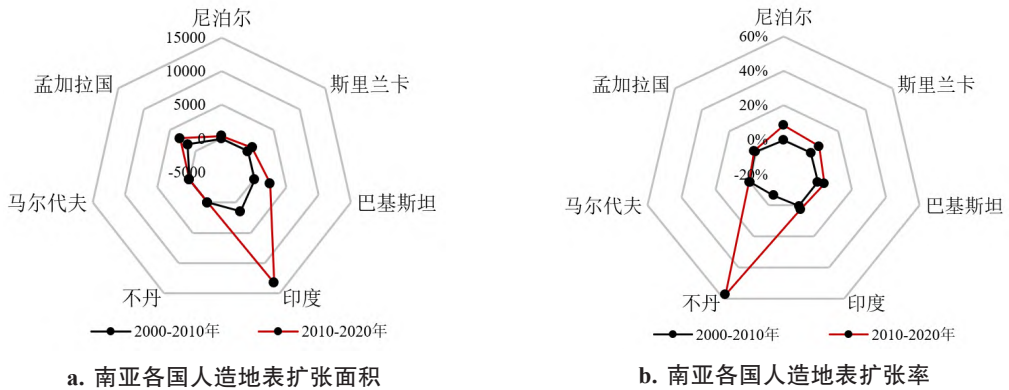


图3 各国人造地表扩张量化分析

Fig.3 Quantitative analysis of artificial surface expansion in various countries

时段出现了人造地表面积减少的情况，但在2010—2020年期间，尼泊尔、不丹和斯里兰卡的人造地表快速扩张，扩张率超过其他四个国家。特别是不丹，在2010—2020年的扩张率达到57%，成为该时段人造地表扩张速度最快的国家。

图4展示了南亚各国二级行政单元人造地表扩张率的空间扫描分析结果。在2000—2010年，一级高值聚集区出现在孟加拉国东部、印度东部和安达曼群岛(图4a)，这些地区是人工地表扩张率较大的地区，而扩张冷点出现在巴基斯坦和印度北部大部分省份。2010—2020年，人工地表扩张率在孟加拉国的库尔纳、印度中部、南部和斯里兰卡呈现出聚集现象(图4b)，出现了明显的扩张热点，而第一时段扩张速率大的地区变为低值聚集区，体现了南亚人造地表扩张重心的空间迁移。根据近20年来的空间扫描统计聚类结果，各国二级行政单元出现了明显的扩张热点和冷点，斯里兰卡、孟加拉国的库尔纳、印度的中部南部和首都新德里为区域扩张热点区域，而不丹、孟加拉国的东部、印度的北部和东部少数省份为扩张冷点区域。

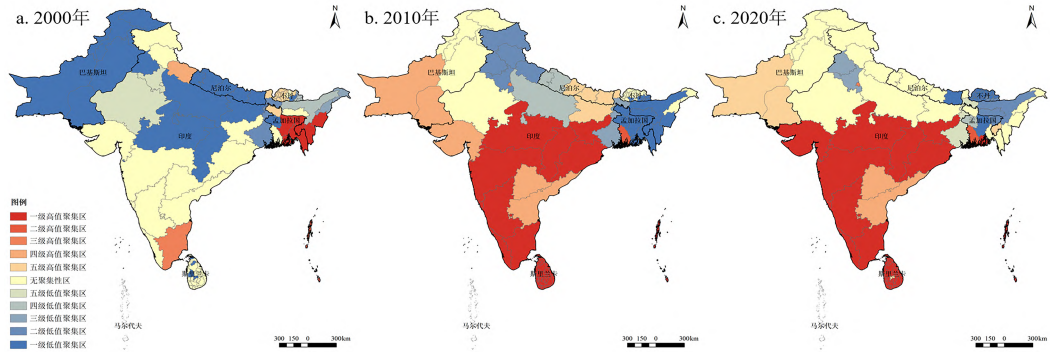


图4 南亚各国二级行政单元空间扫描统计聚类图

Fig. 4 Spatial scanning statistics clustering map of second-level administrative units in South Asian countries

2.2 南亚人造地表发展模式及空间结构格局

通过 LEI 分析得出了三种城市增长类型,可以直观反映南亚各国人造地表扩张的空间模式(图5)。从斑块数量来看,各个国家都以飞地式扩张为主(图5a、5b),但对于斑块面积而言,各国呈现出较大差异,并非都是以飞地式扩张为主(图5c、5d),这表明各国都存在大量破碎化的飞地式扩张,但主要扩张模式各不相同。斯里兰卡、印度和孟加拉国在两个时段都以边缘式扩张为主,且斯里兰卡边缘式扩张在2010—2020年有所增加,而印度和孟加拉国表现出飞地式扩张占比提升的特点。不丹和马尔代夫始终是飞地式扩张占比较大,约占90%。且在不丹,飞地式扩张持续增加,但马尔代夫在2010—2020年出现了大面积边缘式扩张的斑块。尼泊尔在2000—2010年新增斑块以填充式扩张为主,在2010—2020年变为以边

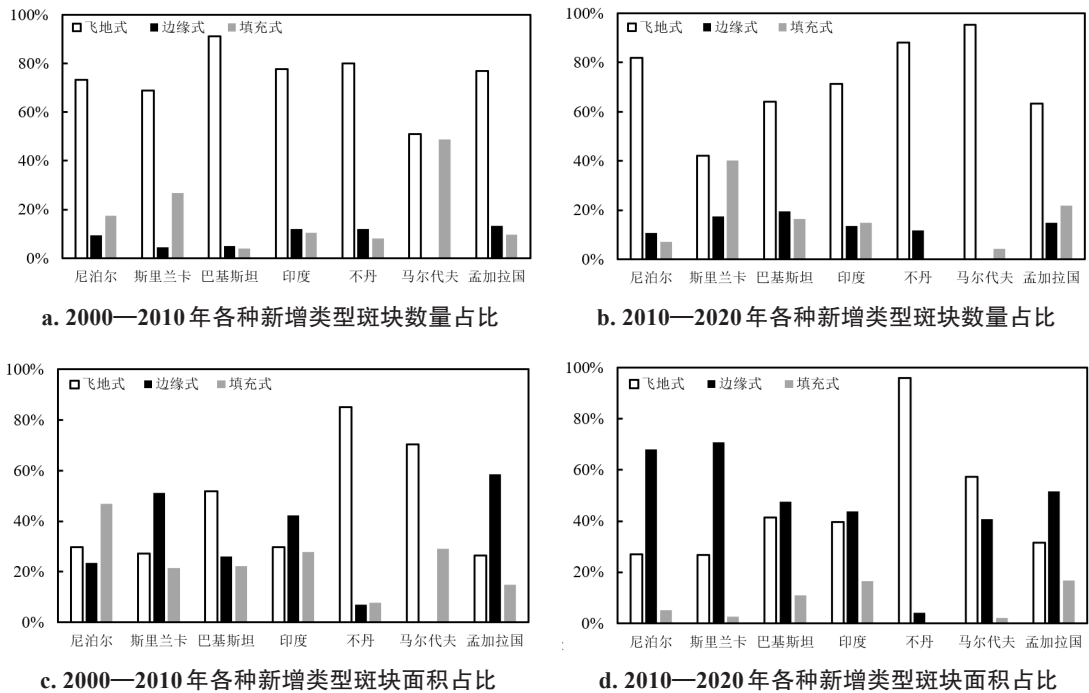


图5 各国扩张类型斑块数所占比例示意图

Fig.5 Schematic of the proportion of plaques of various expansion types in various countries

缘式扩张为主,飞地式扩张占比有所下降。巴基斯坦由飞地式扩张为主转为以边缘式扩张为主,说明其人造地表扩张由破碎的扩散式增长变为一种更为紧凑的聚合式增长模式。

各国三种扩张类型斑块的分布情况如图6所示,巴基斯坦在2000—2010年出现了大量飞地式扩张的斑块,主要聚集在东部原有城镇的周围,而到在2010—2020年,飞地式斑块明显减少,边缘式和填充式斑块均匀分布在原有城镇附近。印度2000—2010年期间的填充式和边缘式斑块集中分布在东部,飞地式主要分布在北部,在2010—2020年期间,三种类型在整个国家的分布是均匀的,北部飞地式增长转化为填充式和边缘式增长。在斯里兰卡,三种扩张类型呈现出沿海岸线分布的特点(图6c)。孟加拉国飞地式扩张类型在2000—2010年期间在整个国家零星分布(图6d),在2010—2020年表现出以填充式和边缘式扩张为主的特点,起到了连接原有城镇的作用。尼泊尔和不丹的三种扩张类型斑块都分布在原有城镇附近,其中飞地式的扩张模式在2010—2020年明显增加。

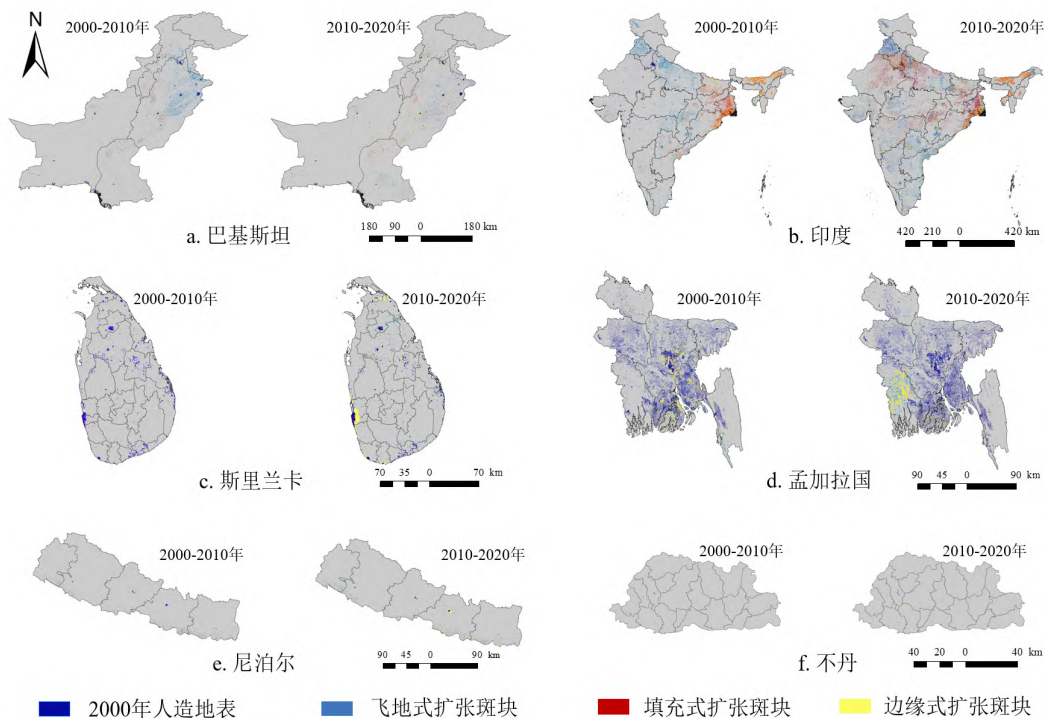


图6 各国新增斑块类型分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of new patch types in various countries

图7是基于城市增长相位理论对人造地表空间格局形态变化过程进行的分类,蓝色为扩散阶段,红色为聚合阶段。总体而言,扩散式的扩张模式存在于起始年人造地表面积较少的地区,聚合式的扩张模式存在于起始年人造地表面积较大的地区。巴基斯坦西部、斯里兰卡中部、孟加拉国西北部和印度的东部和南部处于城市发展的扩散阶段,该区域以飞地式扩张为主,且飞地式斑块增加,这表明该区域的城市扩张呈现出一种分散凌乱的扩散模式^[23]。在印度北部、斯里兰卡东部和孟加拉国东南部,飞地式斑块大量减少,填充式的斑块连接了具有空隙的原有斑块,边缘式的斑块扩大了人造地表范围,表现出趋于紧凑的聚合式的发展模式。

2.3 南亚人造地表扩张均衡性分析

以各国二级行政单元为尺度分析南亚人造地表扩张在空间上的均衡性,图8的洛伦兹曲线显示,2000—2010年和2010—2020年南亚人造地表扩张都呈现出不均衡的特点。在2000—2010年,洛伦兹曲线明显偏离 $y=x$ 曲线(图8a),80%的新增人造地表集中在不足20%的二级行政单元,呈现出个别二级行政单元出现大面积的人造地表扩张的现象。到了2010—2020年这一阶段,洛伦兹曲线较第一时段接近 $y=x$ 曲线(图8b),但仍然出现人造地表扩张不均衡的现象,此时段80%的人造地表扩张现象发生在不足35%的二级行政单元上。因此,南亚人造地表扩张存在着极度不均衡性。

为了探讨人造地表扩张不均衡的原因,本文利用城市级尺度的矢量数据,结合人口密度对南亚各国的城市规模进行划分,分析人造地表的扩张在不同规模城市上的差异。表3展示了南亚各国新增斑块面积和数量在大、中、小城市的分布情况。

从新增斑块的面积来看,在2000—2010年这一时期,尼泊尔、斯里兰卡、印度和孟加拉国的人造地表扩张主要发生在小城市,巴基斯坦以大城市扩张为主,不丹以中等城市的扩张为主;而在2010—2020年,尼泊尔、斯里兰卡和不丹的人造地表扩张的发生变为以大城市的扩张为主,巴基斯坦和孟加拉国与第一时段保持一致,但与第一时段相比,大城市的新增斑块面积占比略有下降,小城市的新增斑块面积占比增加。

从新增斑块数量来看,尼泊尔始终以中等城市扩张为主,这与新增斑块面积在大、中、小

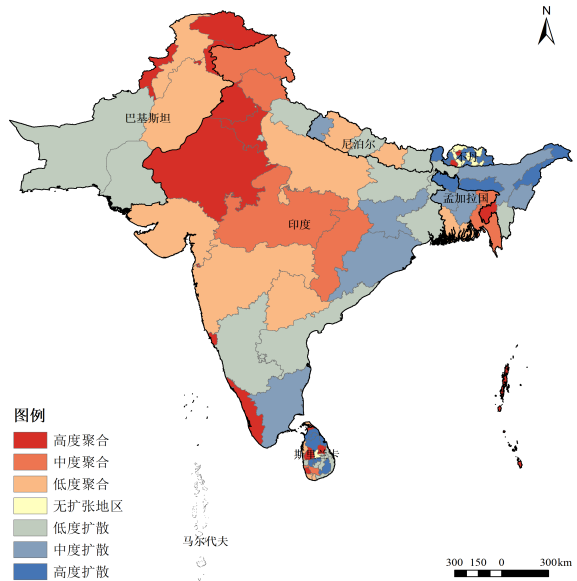


图7 基于城市增长相位理论的人造地表空间格局形态变化过程

Fig.7 Spatial pattern evolution of artificial surface based on urban expansion phases theory

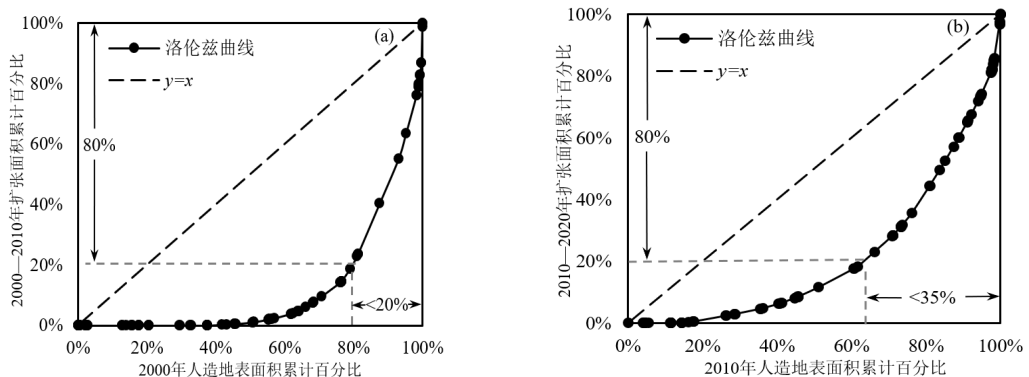


图8 2000—2010年和2010—2020年南亚各国二级行政单元尺度人造地表扩张的洛伦兹曲线

Fig.8 Lorentz curve of artificial surface expansion at second-level administrative units in Asia South countries in 2000-2010 and 2010-2020

城市的分布情况有很大差异,由此得出尼泊尔中等城市的人造地表扩张较为分散;斯里兰卡和巴基斯坦在2000—2010年分别以小城市和大城市扩张为主,到了2010—2020年,这两个国家的新增斑块数量在大、中、小三种规模城市的分布基本相同;不丹在2000—2010年以中等城市的扩张为主,而在2010—2020年,其人造地表扩张的发生变为以大城市为主,这与新增斑块面积的变化相同;孟加拉国的人造地表在这两个时段都以小城市扩张为主。无论是新增斑块面积还是数量,印度在这两个时段都呈现出小城市占比最大的特点,占比超出90%,远远超过其他国家。

可见,南亚各国人造地表的扩张在不同规模的城市尺度上存在很大差异,这是南亚人造地表扩张不均衡的重要原因。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于GlobeLand30数据提取人造地表类型,分析南亚各国2000年、2010年、2020年三期的时空变化和空间结构的发展状况;进而采用空间扫描统计法、基于新增斑块最小包围盒的景观扩张指数对2000—2010年和2010—2020年两个时段南亚各国的人造地表扩张情况进行统计分析,从静态和动态两个方面了解南亚各国人造地表变化的程度、扩张类型、时空分异性和空间结构特征;同时引入洛伦兹曲线,衡量人造地表扩张的发生在具有不同社会经济特征的区域是否具有均衡性。主要结论为:

(1)南亚整体人造地表面积呈现出逐期增长的趋势,扩张率由2000—2010年的0.42%增长到2010—2020年的2.59%。但各国人造地表变化差异明显,印度、巴基斯坦和孟加拉国在2000—2010年人造地表扩张量约占南亚整体人造地表扩张量的48%,主要是由于这三个国家自身面积大且前期经济发展相对较快。然而到了2010—2020年,尼泊尔、不丹和斯里兰卡的人造地表快速扩张,这些特征的出现主要是受到了这些国家该时段经济发展特点

表3 各种规模城市的人造地表新增情况

Fig.3 The increase of artificial surface in cities of different sizes

国家	城市规模	2000—2010	2000—2010	2010—2020	2010—2020
		年新增斑块 面积占比	年新增斑块 数量占比	年新增斑块 面积占比	年新增斑块 数量占比
尼泊尔	大城市	26%	36%	53%	31%
	中等城市	36%	45%	17%	49%
	小城市	38%	19%	30%	20%
斯里兰卡	大城市	22%	20%	52%	31%
	中等城市	22%	18%	18%	35%
	小城市	56%	62%	30%	35%
巴基斯坦	大城市	58%	64%	48%	39%
	中等城市	15%	15%	19%	27%
	小城市	27%	21%	33%	34%
印度	大城市	3%	1%	4%	3%
	中等城市	3%	5%	7%	4%
	小城市	94%	94%	89%	93%
不丹	大城市	8%	4%	64%	50%
	中等城市	90%	82%	21%	42%
	小城市	2%	14%	15%	8%
孟加拉国	大城市	28%	21%	13%	22%
	中等城市	18%	17%	28%	16%
	小城市	54%	62%	59%	62%

的影响。

(2)空间扫描统计法探测出了南亚在人造地表扩张的过程中的空间冷热点区域,在不同的时间阶段表现出了空间热点迁移现象。在 2000—2010 年,热点区域出现在孟加拉国东部、印度的东部和安达曼群岛,巴基斯坦和印度北部大部分省份为冷点区域。而第一时段扩张速率大的地区在 2010—2020 年变为低值聚集区,扩张热点变为了孟加拉国的库尔纳,印度的中部、南部和斯里兰卡,体现了南亚人造地表扩张重心的空间迁移。

(3)在人造地表扩张的过程中,南亚各国表现出了不同的扩张模式和结构变化。初期发展的地区处于城市增长相位理论的第一阶段,存在大量的新增长点即飞地式斑块,往往呈现出分散凌乱的扩散式扩张特点,主要表现在巴基斯坦西部、斯里兰卡中部、孟加拉国西北部以及印度的东部和南部;而印度北部、斯里兰卡东部和孟加拉国东南部表现为由飞地式增长转化为填充式和边缘式的增长类型,区域发展更加紧凑。

(4)南亚人造地表扩张的发生在不同等级规模的城市存在明显差异,呈现出极度不均衡的特点。尼泊尔、斯里兰卡、不丹和巴基斯坦的人造地表扩张从以中小城市为主逐渐转变为以大城市为主,而印度和孟加拉国则表现为以小城市扩张为主的特点。

3.2 讨论

南亚各国人造地表扩张模式和结构的变化主要与其经济发展和人口增长状况密切相关。伴随着“一带一路”倡议的推进,尤其是“中巴经济走廊”进入早期收获阶段,围绕着“中巴经济走廊”的巴基斯坦东部和印度北部地区与中国的贸易合作取得了实质性进展,其人造地表空间格局形态变化过程由飞地式增长转化为填充式和边缘式的增长类型,区域发展更加紧凑,印证了城市增长相位理论的聚合式的发展模式。孟加拉国东南部 21 世纪以来经济增长迅速,国际间的贸易往来促进了经济和基础设施的多样化发展,由此产生的运输网和工厂的大量建设是此地区人造地表发展紧凑的重要原因。而巴基斯坦西部、斯里兰卡中部、孟加拉国西北部以及印度东部和南部均处于工业化起步阶段,这些地区在区域发展和贸易合作方面的提升空间较大,因此人造地表扩张分散。

然而,由于南亚整体的城市化率较低,各国经济增长重心均位于大城市,且任何规模的城市中都存在着贫民窟,因此尼泊尔、斯里兰卡、不丹和巴基斯坦的人造地表都逐渐以大城市扩张为主。相对而言,印度和孟加拉国的城市化率远高于南亚其他国家,且国内经济发展相对均衡,其小城市城市化进程快于南亚其他国家,这是造成这两国人造地表扩张多发生于小城市的原因之一。这种不同国家的人造地表扩张在大、中、小三种规模的城市分布的不均衡性,也有可能是导致南亚人造地表扩张重心迁移的原因之一。

本文揭示了南亚人造地表变化的时空模式和演变规律,但仅对其过程和结果进行了多方面的分析,而人造地表的扩张是多因素共同作用的结果,本文在对其扩张驱动力的研究方面有所欠缺,在未来拟通过社会经济数据对时空扩展特征的驱动力进行详细分析。此外,本文所使用的 GlobeLand 30 数据精度在 85% 左右,研究结果与实际可能存在细微偏差。

参考文献(References):

- [1] 李然,匡文慧,陈军,等. 基于 GlobeLand30 的全球人造地表利用效率时空差异特征分析. 中国科学:地球科学,2016,46(11):1436-1445. [LI R, KUANG W, CHEN J, et al. Spatio-temporal pattern analysis of artificial surface use efficiency based on Globeland30 (in Chinese). Scientia Sinica (Terrae), 2016,46(11):1436-1445.]

- [2] FAN F, FAN W. Understanding spatial-temporal urban expansion pattern (1990-2009) using impervious surface data and landscape indexes: A case study in Guangzhou (China). *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014,8(1):083609.
- [3] 任佳,马文霞. 环印度洋南亚地区经济发展潜力分析. *南亚研究*,2015(4):33-47. [REN J, MA W. An analysis of the developmental prospects of the South Asian Region of the Indian Ocean Rim. *South Asian Studies*, 2015(4):33-47.]
- [4] 钱志友,符海月,王妍,等. 2004—2016年南京市城市扩张及形态演变特征. *国土资源遥感*,2019,31(2):149-156. [QIAN Z, FU H, WANG Y, et al. Characteristics of urban expansion and morphological evolution in Nanjing from 2004 to 2016. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019,31(2):149-156.]
- [5] YANG C, LI Q, HU Z, et al. Spatio-temporal evolution of urban agglomerations in four major bay areas of US, China and Japan from 1987 to 2017: Evidence from remote sensing images. *Science of the Total Environment*, 2019, 671(25): 232-247.
- [6] 熊瑶,潘润秋,许刚,等. 1990—2014年印度城市扩张时空特征对比分析. *地理科学进展*,2019,38(2):271-282. [XIONG Y, PAN R, XU G. A comparison of spatial and temporal characteristics of urban expansion in India during 1990-2014. *Progress in Geography*, 2019,38(2):271-282.]
- [7] 李德仁,余涵若,李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析. *武汉大学学报(信息科学版)*,2017,42(6):711-720. [LI D, YU H, LI X. The spatial-temporal pattern analysis of city development in countries along the Belt and Road Initiative based on nighttime light data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017,42(6):711-720.]
- [8] LIU Z, HE C, ZHANG Q, et al. 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.
- [9] 陈军,陈晋,宫鹏,等. 全球地表覆盖高分辨率遥感制图. *地理信息世界*,2011(2):12-14. [CHEN J, CHEN J, GONG P, et al. Higher resolution global land cover mapping. *Geomatics World*, 2011(2):12-14.]
- [10] BROVELLI M, MOLINARI M, HUSSEIN E, et al. The first comprehensive accuracy assessment of GlobeLand 30 at a national level, methodology and results. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4191-4212.
- [11] 于溪,李强,肖逸雄,等. 基于GlobeLand30的中国城市扩张模式及其对生态用地的影响. *地理与地理信息科学*,2018, 34(3):5-12. [YU X, CHEN Q, XIAO Y, et al. Urban expansion patterns of China and their impact on ecological land: A comprehensive analysis based on GlobeLand30. *Geography and Geo-Information Science*, 2018,34(3):5-12.]
- [12] 刘小平,黎夏,陈逸敏,等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. *地理学报*,2009,64(12):1430-1438. [LIU X, LI X, CHEN Y, Et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(12):1430-1438.]
- [13] LIU X, LI X, CHEN Y, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5):671-682.
- [14] 钱敏,濮励杰,张晶. 基于改进景观扩张指数苏锡常地区城镇扩展空间形态变化. *地理科学*,2015,35(3):314-321. [QIAN M, PU L, ZHANG J. Urban spatial morphology evolution in Suzhou-Wuxi-Changzhou Region based on improved landscape expansion index. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(3):314-321.]
- [15] CHEN J, CHEN J, LIAO A, et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103:7-27.
- [16] 陈学泓,曹鑫,廖安平,等. 全球30m分辨率人造地表遥感制图研究. *中国科学:地球科学*, 2016, 46(11): 1446-1458. [CHEN X, CAO X, LIAO A, et al. Global mapping of artificial surfaces at 30 m resolution. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2016, 46(11): 1446-1458.]
- [17] KANTAKUMAR L, KUMAR S, SCHNIRDER K. Spatiotemporal urban expansion in Pune metropolis, India using remote sensing. *Habitat International* , 2016, 51(2):11-22.
- [18] 张冰琦,郭静,于溪,等. 中国2000—2010年耕地低效转化的空间特征. *自然资源学报*,2018,33(7):1230-1243. [ZHANG B, GUO J, YU X, et al. Spatial pattern of low-benefit conversion of cultivated land in China from 2000 to 2010. *Journal of Natural Resources*, 2018,33(7):1230-1243.]
- [19] 靳圆圆,王微,闫慈,等. 扫描统计与空间自相关分析在新疆结核聚集性研究中的应用. *现代预防医学*,2016,43(7): 1156-1161. [JIN Y, WANG W, YAN C, et al. Application of space-time scanning in tuberculosis studies, Xinjiang. *Modern Preventive Medicine*, 2016,43(7):1156-1161.]
- [20] 李少英,黎夏,刘小平,等. 城市轴向扩展时空过程模型与测度——以东莞市城市发展为例. *城市发展研究*,2009,16 (9):73-80. [LI S, LI X, LIU X, et al. A model of axial urban spatio-temporal dynamics: A case study in Dongguan, in Guangdong Province. *Urban Development Studies*, 2009,16(9):73-80.]

- [21] ZHOU X, YAN D. Influence of load feature on the water distribution system in a centralized air-conditioning system. *Science and Technology for the Built Environment*, 2017, 23(2):277-284.
- [22] PENG J, XIE P, LIU Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173:145-155.
- [23] 张亚萍,张平,孙丹峰,等. 成渝城市群城市建设用地扩张格局及规模体系分析. *测绘通报*,2020(7):103-107. [ZHANG Y, ZHANG P, SUN D, et al. Analysis of urban construction land expansion pattern and scale system in Chengdu-Chongqing urban agglomeration. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(7):103-107.]

Spatio-temporal characteristics analysis of artificial surface evolution in South Asia based on GlobeLand 30

LI Anqi^{1a}, CAO Xin^{1a,1b,1c}, CUI Xihong^{1a,1b,1c}, LIANG Hanwei², LI Qiang^{1a},
QUAN Zhenxian^{1a}, ZHANG Zheng^{1a}

(1a. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, 1b. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, 1c. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Geographical Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the GlobeLand30 data in 2000, 2010 and 2020, the artificial surface expansion of South Asian countries during 2000-2010 and 2010-2020 was analyzed by using the spatial scanning statistics, landscape expansion index as well as Lorenz curve. By combining the spatial distribution pattern of the artificial surface with evolution process, we investigated the spatio-temporal variation and spatial structure of artificial surface in South Asia. Results showed that: 1) The overall artificial surface area of South Asia continues to expand, with the expansion rate increasing from 0.42% in 2000-2010 to 2.59% in 2010-2020. 2) India has seen the largest increase in artificial surface area over the past 20 years, with Bhutan expanding at the fastest rate. In the process of artificial surface expansion in South Asia, there are significant spatial hot spots, and the spatial hot spots migrate at different time periods. 3) In western Pakistan, central Sri Lanka, northwestern Bangladesh, and eastern and southern India, enclave type patches have increased, and the artificial surface shows the characteristics of scattered and disordered diffusion expansion. The new patch types in northern India, eastern Sri Lanka and southeastern Bangladesh shift from enclave type to infilling and edge-expansion type, showing a pattern of change from diffusion to dense aggregation type. 4) The expansion of artificial surface in South Asian countries differs greatly on the scales of cities, which leads to obvious imbalances in the expansion of artificial surface.

Key words: artificial surface; landscape expansion index; spatio-temporal characteristics; GlobeLand 30; South Asia