

基于遥感数据集的城市不透水面 识别精度比较

——以河南省为例

刘开新

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年3月14日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

近年来, 众多学者公开发布不同的遥感不透水面数据集产品, 在区域和全球范围尺度内, 其动态监测能力存在一定程度的差异, 因此, 对于不同数据集的质量比较与分析显得尤为必要。文章依据2015年Google Earth上的遥感影像数据, 通过混淆矩阵来衡量不同数据集的准确性, 并使用Kappa系数来评估数据的可靠性。结果表明: 2015年GISA数据集在河南省的总体分类精度达到93.7%, Kappa系数为0.874。GISA数据集在数据质量上, 优于GAIA和GISD数据集, 更适合河南省区域内不透水面的研究。文中通过标准差椭圆分析方法研究1985~2019年间河南省不透水面的时空演变趋势, 发现河南省不透水面发展在时空分布上呈现扩张趋势; 城市不透水面不断扩张, 主要由城市中心区域向四周扩展。研究结果可为河南省区域不透水面数据集的选取及分析提供一定的数据参考。

关键词

不透水面, 遥感, 数据集比较, 河南

Comparison of Urban Impervious Surface Identification Accuracy Based on Remote Sensing Datasets

—A Case Study of Henan Province

Kaixin Liu

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: March 14, 2026; accepted: April 14, 2026; published: April 27, 2026

Abstract

In recent years, many scholars have publicly released different remote sensing impervious surface dataset products. At the regional and global scales, there are some differences in their dynamic monitoring capabilities. Therefore, it is particularly necessary to compare and analyze the quality of different datasets. Based on the remote sensing image data on Google Earth in 2015, this paper measures the accuracy of different datasets by confusion matrix, and uses Kappa coefficient to evaluate the reliability of the data. The results show that the overall classification accuracy of the GISA dataset in Henan Province in 2015 reached 93.7%, and the Kappa coefficient was 0.874. GISA dataset is superior to GAIA and GISA datasets in data quality, and is more suitable for the study of impervious surface in Henan Province. In this paper, the spatial and temporal evolution trend of impervious surface in Henan Province from 1985 to 2019 is studied by standard deviation ellipse analysis method, and it is found that the development of impervious surface in Henan Province shows an expansion trend in spatial and temporal distribution. Urban impervious surface continues to expand, mainly from the city center to the surrounding area. The research results can provide some data reference for the selection and analysis of regional impervious surface datasets in Henan Province.

Keywords

Impervious Surface, Remote Sensing, Dataset Comparison, Henan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

不透水面是指具有不透水特性的人造地表结构, 主要包括建筑、铺面、硬化地表、道路等。在当今社会, 它已成为人们活动的主要场所, 而且它的时空动态变化也成为了解和评估人类行为给自然带来影响的关键指标[1]。随着不透水面的增加, 它能够阻挡雨水的侵蚀, 有助于维持和改善生态系统的平衡, 因此, 它成为衡量城市发展的一个重要参数。不透水面数据集能够提供精细、长时序的全球不透水面监测数据, 这有助于保护生物的多样性、改善水质和减少城市的热岛效应。随着卫星遥感技术的发展, 全球不透水面的动态产品已经从静态转变为动态。此外, 云计算如 Google earth engine (GEE) 的出现, 使得遥感数据的计算和存储能力得到了极大的提升, 同时全球不透水面的制图进入了一个高分辨率的时期, 并且生产出许多全球不透水面产品, 例如全球人居图层、1985~2015 年间的 30 米年度城市区域数据集、1985~2018 年间的全球人工不透水区域动态产品等。数据集是遥感数据的主要呈现形式。城市不透水面作为城市环境的重要基础要素, 对于开展城市研究具有极为重要的意义。因此, 对不同数据集质量比较就显得尤为重要。

随着技术的发展, 当前的全球不透水面产品的数据质量在分类、后处理、准确性评估都能够得到很好的结果。然而, 数据集制作时选择的方法不同, 导致它们在区域和全球范围内, 不透水面的动态检测能力存在一定差异。例如, 这些数据集在城市核心区表现相对一致, 在郊区或农村地区却存在相对较大的分歧[2]。因此, 文章通过不透水面遥感数据集的比较与分析来对数据质量做出评价, 选取更适合河南省实际情况的不透水面数据集, 以期为河南省主要城市不透水面数据集的选取提供参考依据。

近年来,不少学者对不透水面数据集产品进行了研发与制作,全球不透水面动态监测的主要的数据源来自卫星遥感观测。在国外,欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Centre, JRC)综合利用 SPOT4 卫星数据,研制出了空间分辨率为 1.15 km 的 2000 年全球土地覆盖产品[3],为全球不透水面的动态监测提供了重要的参考依据。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)生产了 2012 年的全球土地覆盖数据。欧洲航天局发布了 2005 年和 2009 年两个年度空间分辨率为 300 m 的全球产品,以及 1992~2018 年间的全球产品。美国国家航空航天局发布了 2001~2018 年空间分辨率为 250 m 的全球土地覆盖产品。基于 Landsat 影像,目前 JRC 发布 1975、1990、2000 和 2014 四个年份的空间分辨率为 30 米的全球人居图层(Global Human Settlement Layer, GHSL)。在过去几年里, JRC 又推出了新版 GHSL,新版 GHSL 时间序列的准确性及其变化率较低,特别是在农村地区。

在国内,我国研制了分辨率为 30 米全球地表覆盖数据集(Global Land Cover Dataset at 30-meter resolution, GlobLand30),它包含了丰富的全球地表覆盖信息[4]。宫鹏等制作了 1985~2018 年间的全球人工不透水区域动态产品 GAIA,该研究反映了区域和全球的城市化变化[5]。刘良云等发布了 1985~2020 年 30 米全球不透水面动态数据集(Global 30 m Impervious-Surface Dynamic Dataset, GISD30) [6],可以为监测区域或全球城市化提供重要支持。刘小平等生产了 1985~2015 年间的 30 米年度城市区域数据集(Global Annual Urban Dynamics, GAUD) [7],对全球过去 30 年的城市扩张规律及区域差异进行研究,并分析了城市化进程对土地系统带来的影响。该数据集不仅揭示全球城市扩张规律,还为温室气体排放、城市热岛效应、生态系统碳损失、城市可持续发展等相关领域研究提供重要的数据基础。黄昕等采用自 1972 年至 2019 年以来的超过三百万景 Landsat 影像,生产了 1972~2019 年间 30 米分辨率的全球不透水面产品(Global Impervious Surface Area, GISA) [2]。该数据集使用三种方法对数据集的质量进行精度验证:使用全球不同等级的 270 个城市的分层随机采样数据、全球 45 个典型城市的高分辨率建筑区产品[8]和全球农村-城市制图项目(Global Rural-Urban Mapping Project, GRUMP) [9]中的聚居点作为独立验证样本,在全球范围内对 GISA 数据集进行精度评价。

每一种不透水面提取算法各有特点,但不透水面数据集也存在区别,主要是由所选数据、方法、样本选取的不同所造成的,这也体现出不同数据集产品比较的重要性。研究主要针对机器学习方法在 GEE 上生产的全球不透水面数据集产品,通过进行混淆矩阵和 Kappa 系数的计算对研究区的量度和空间合理性进行比较,为河南省区域的不透水面数据集的分析使用提供一定参考,并进一步通过标准差椭圆分析研究了 1985~2019 年间河南省的不透水面时空演变趋势,为城市的高质量发展提供数据支持。

2. 数据与方法

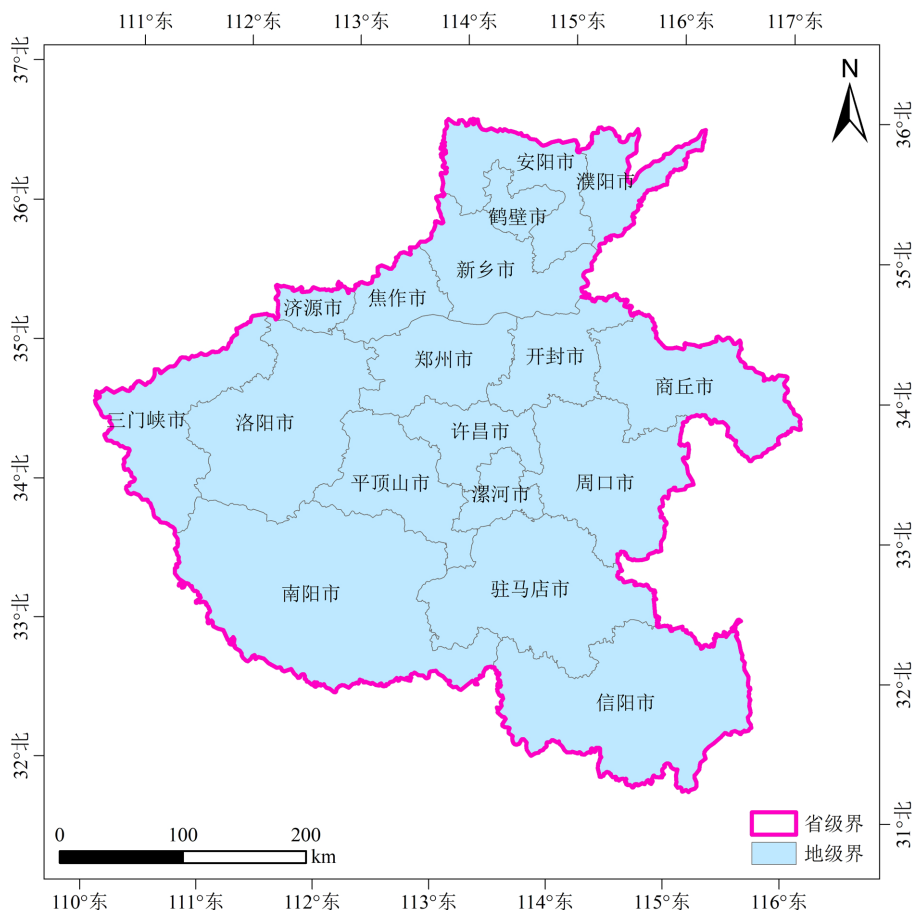
2.1. 研究区概况

河南省地处 110°21'~116°39'E, 31°23'~36°22'N,位于中国中东部、华北平原南部的黄河中下游地区,如图 1。全省总面积 16.7 万平方千米。河南是中国人口大省,通过 GAIA、GISA 和 GISD 三种数据集的数据质量比较,对河南省 1985~2019 年的不透水面时空变化情况进行研究,分析河南省不透水面变化情况。

2.2. 数据来源

研究中所用数据集包括 1985~2018 年全球 30 米逐年不透水面制图产品 GAIA、1972~2019 年全球 30 米连续时序不透水面数据集 GISA 和 1985~2020 全球 30 米不透水面数据集 GISD (表 1)。

(1) GAIA 数据集是宫鹏教授团队利用 GEE 云计算平台,创建了 GAIA 数据集,它涵盖了从 1985~2018 年间每一个时期 30 米分辨率的城市不透水面信息。基于长时序的 Landsat 影像和辅助数据集(包括夜间灯光数据和 Sentinel-1 合成孔径雷达数据),评估了 1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年



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(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。下同。

Figure 1. Study area
图 1. 研究区示意图

Table 1. Source of the dataset
表 1. 数据集来源

名称	空间分辨率	时间序列	范围	作者	数据链接
GAIA	30 米	1985~2018 年	全球	宫鹏	http://data.starcloud.pcl.ac.cn/
GISA	30 米	1972~2019 年	全球	黄昕	https://zenodo.org/record/5136330
GISD30	30 米	1985~2020 年	全球	刘良云	https://doi.org/10.5281/zenodo.5220816

和 2015 年的 GAIA 数据，平均总体精度高于 90%。

(2) GISA 数据集是黄昕团队基于 GEE 云平台 and Landsat 影像，采用随机森林分类方法，研发了 1972~2019 年间 30 米分辨率的全球不透水面产品。在全球 45 个典型城市的高分辨率建筑区产品评价中，整体精度为 90.69%。此外，还提出了一种新的全球不透水面地图绘制方法，包括半自动全局样本采集、局部自适应分类和时空后处理。

(3) GISD30 数据集是刘良云团队在 GEE 云平台上，利用 Landsat 影像生成的 1985~2020 年全球 30 米不透水面数据集。在 23322 个全球验证样本中，全球 30 米不透水面动态模型的总体精度为 90.1%，Kappa 系数为 0.865，能够较好地获取不透水面的空间分布和时空动态。

2.3. 数据预处理

不透水面数据信息的提取。首先对所获取的不透水面栅格数据进行镶嵌处理, 然后进行裁剪, 裁剪数据为河南行政范围数据, 最后提取所需年份的不透水面数据[8]。研究中, 分别提取出 GAIA、GISA、GISD 三个数据集在 2015 年的不透水面数据。

训练样本点获取与生成。在 Google Earth 上面找到河南省 2015 年的历史影像, 采用随机选点的方法, 生成 1000 个训练样本点, 包括 500 个不透水面样本点和 500 个非不透水面样本点。然后将训练样本点导入 ArcGIS 软件, 并转为矢量数据, 这些矢量数据就是进行精度评价所需的训练样本点。

不透水面数据集质量的比较。为了比较出 GAIA、GISA、GISD 三个数据集所提取不透水面的质量, 利用训练样本点进行精度评价。在 ArcGIS 软件中, 分别将三个数据集中的所涉及的样本点提取出来。然后利用栅格计算器, 将所有点数据的不透水面赋值为 1, 非不透水面赋值为 0。最后, 分别对训练样本点和三个数据集的不透水面点数据, 进行总体精度和 Kappa 系数的计算。通过这两个精度评价指标, 实现对三个数据集不透水面数据质量的比较, 从而得出精度更高的数据集。

2.4. 研究方法

2.4.1. 混淆矩阵及 Kappa 系数计算

为了定量验证 3 种数据集的分类结果精度, 采用样本点验证的方式, 利用 Google Earth 上面 2015 年的历史影像对样本点进行目视解译。在研究区内随机选取 1000 个样本点, 通过目视解译, 对照样本点和影像中的实际地类是否一致。采用了常用的精度评价指标, 总体精度和 Kappa 系数来验证 3 种数据集的分类结果精度。通过使用混淆矩阵, 我们可以对样本的分类精度进行定量评估[9], 这种矩阵可以反映出正确和错误分类的比例, 并且可以通过 Kappa 系数来衡量其准确性。总体精度来衡量不透水面分类结果的整体正确率[10], Kappa 系数可以反映出总体分类的准确性[11], 从而更好地反映出不透水面数据集的分类效果。

2.4.2. 标准差椭圆分析

标准差椭圆最早由 Lefever 于 1926 年提出, 现多用于从全局和空间角度揭示地理要素的多方面特征[12]。通过使用空间椭圆的基本参数, 如中心、方位角、长半轴、短半轴和分布范围, 我们可以定量地描述地理要素的空间分布和时空变化。研究中, 将经过数据集比较后, 数据质量较好的不透水面产品, 通过标准差椭圆方法来进行河南省不透水面时空变化分析[13][14]。

其中, 椭圆面积表示不透水面数据的空间分布范围。椭圆的中心表示在空间分布上的重心, 即所有不透水面数据的中心位置。计算公式为:

$$\begin{cases} \bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \\ \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (\bar{X}_w, \bar{Y}_w) 表示加权平均中心, w_i 为对象 i 的权重, (x_i, y_i) 为研究对象 i 的空间坐标位置。

方位角表示地理要素分布的主趋势方向, 即自正北方向顺时针到长轴方向的角度[15]。方位角的变化可以反映不透水面分布的主趋势旋转方向(顺时针或逆时针旋转)。计算公式为:

$$\tan \alpha = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2\right)^2 + 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (2)$$

式中 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 为研究区不透水面空间坐标到中心点 (\bar{X}_w, \bar{Y}_w) 的坐标偏差。

椭圆的长半轴表示不透水面数据分布的方向，短半轴表示不透水面数据分布的范围，短半轴越短，表示数据的向心力越明显；短半轴越长，表示不透水面数据的离散程度越大。长半轴与短半轴的差距越大(扁率越大)，表示不透水面数据的方向性越明显；反之，如果长半轴与短半轴越接近，表示方向性越不明显。长短半轴的计算公式为：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos \alpha - w_i \tilde{y}_i \sin \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin \alpha + w_i \tilde{y}_i \cos \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (4)$$

式中 σ_x 、 σ_y 为沿 x 轴与 y 轴的标准差[16]。

3. 结果与分析

3.1. 不透水面遥感数据集分类精度比较

基于 2015 年河南省不透水面遥感数据集验证点如图 2 所示，定量评估了 2015 年河南省不透水面的分类精度，并进行 3 个不透水面数据集分类精度对比，结果见表 2。总体来看，GISA 数据集获得最高的分类精度(93.7%)和 Kappa 系数(0.874)，其次是 GISD 数据集。相比之下，GAIA 数据集的总体精度只有 92.2%，Kappa 系数为 0.844，主要原因可能是 GAIA 数据集在提取不透水面时将制图区域约束在城市

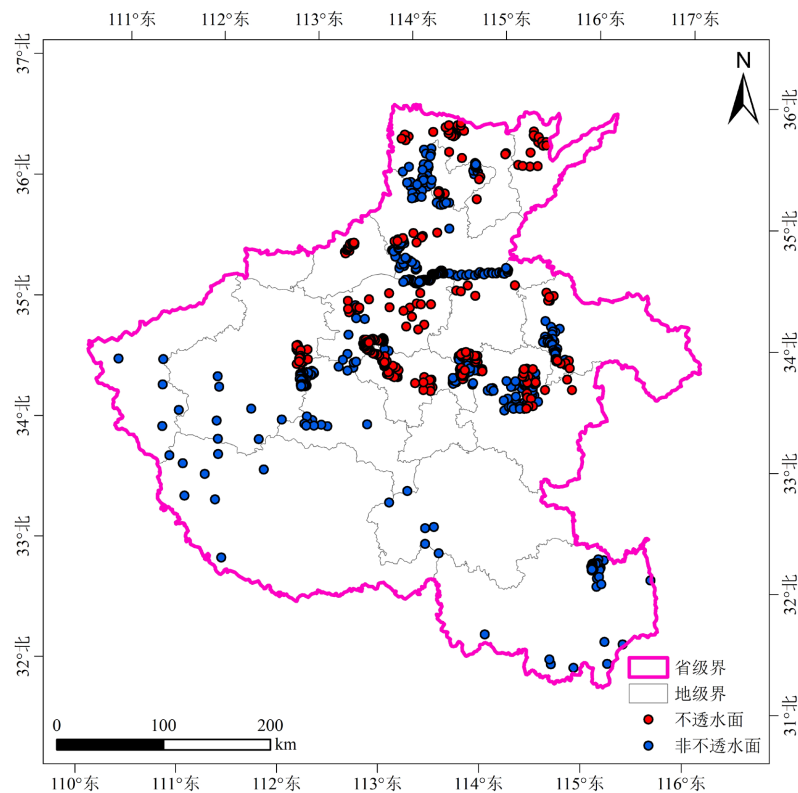


Figure 2. Distribution map of validation points for the 2015 Henan Province impervious surface remote sensing dataset
图 2. 2015 年河南省不透水面遥感数据集验证点空间分布图

Table 2. Accuracy assessment of impervious surface classification for GAIA, GISA, and GISD products in 2015
表 2. 2015 年 GAIA、GISA 和 GISD 产品不透水面分类精度评价

精度评价指标	数据集		
	GAIA	GISA	GISD
总体精度	0.922	0.937	0.932
kappa 系数	0.844	0.874	0.864

范围内, 造成小斑块不透水面的遗漏, 而 GISA 和 GISD 数据集没有进行相关限制。由此, 对比得出 GISA 数据集的分类精度是 3 种数据集中相对最优的。

3.2. 三种不透水面遥感数据集时空对比

研究中选取中原城市群中的许昌市、洛阳市、开封市和郑州市这 4 个城市分析其时空分布, 如图 3



Figure 3. Comparison of the spatiotemporal distribution of three impervious surface remote sensing datasets in different urban central areas: (a) Xuchang City, (b) Luoyang City, (c) Kaifeng City, (d) Zhengzhou City

图 3. 三种不透水面遥感数据集在不同城市中心城区的时空分布比较, (a) 许昌市, (b) 洛阳市, (c) 开封市, (d) 郑州市

所示。从整体上看,随着时间的推移,各城市不透水面区域在不断扩大。从空间分布上看,呈现从城市中心区向周围区域扩张,后期新增的不透水面像元大多围绕在原不透水面像元的周围。2005年,不透水面主要分布在城市中心区域,洛阳市主要是在老城区及河流地区。2010和2015年,不透水面继续向周边外围区域扩张。从3个数据集不透水面时空扩展分布图中,可以看出城市不透水面的发展趋势是一致的。

其中,GAIA数据集在提取不透水面时,将制图区域约束在城市范围内,从图中可以看出,GAIA数据集中不透水面的分布范围更广。但是,研究中在中心城区范围内,由于每个区发展不均衡、区域范围差异、区域地理位置等情况,会包含一些农村地带,所以应结合区域整体覆盖情况进行研究。GISA与GISD数据集在提取不透水面时,没有限制制图范围,则时空分布数据的质量会更好。将GISA和GISD数据集时空分布进行对比,可以发现GISA数据集在中心城区的分布情况相对优于GISD数据集。

综上,结合精度验证及GAIA、GISA和GISD三种数据集遥感数据集时空对比的结果表明,GISA数据集是三种数据集中质量相对较高的不透水面数据。

3.3. 河南省不透水面变化分析

通过对GAIA、GISA和GISD这三个数据集的分类精度进行比较,得出GISA数据集产品的质量相对较好,故选取此数据集进行河南省不透水面时空演变分析。其中,“椭圆大小”这个参数选择第一级标准差,范围可将约占总数68%的输入要素的质心包含在内。利用标准差椭圆进一步呈现了不透水面动态变化的趋势,1985~2019年河南省不透水面标准差椭圆的分布,如图4所示。标准差椭圆的详细参数如表3所示。标准差椭圆的方向反映了不透水面扩张的方向性趋势。从图4中可以看出标准差椭圆的方向角度比较明显,并且在不同时期的方向角是不同的。从1985年到1990年,方向角从 19.06° 变化到 16.02° ,随后又从1990年的 16.02° 下降到2000年的 14.16° 。2000年到2005年,方向角从 14.16° 变化到 12.98° 。2010年,方向角下降到 12.29° 。从2010到2019年,方位角逐渐增加到 12.72° 。总体而言,1985年到2010年间,不透水面扩张的空间方向为由东北向西南;2010年到2019年,不透水面的增长方向为由西向东。

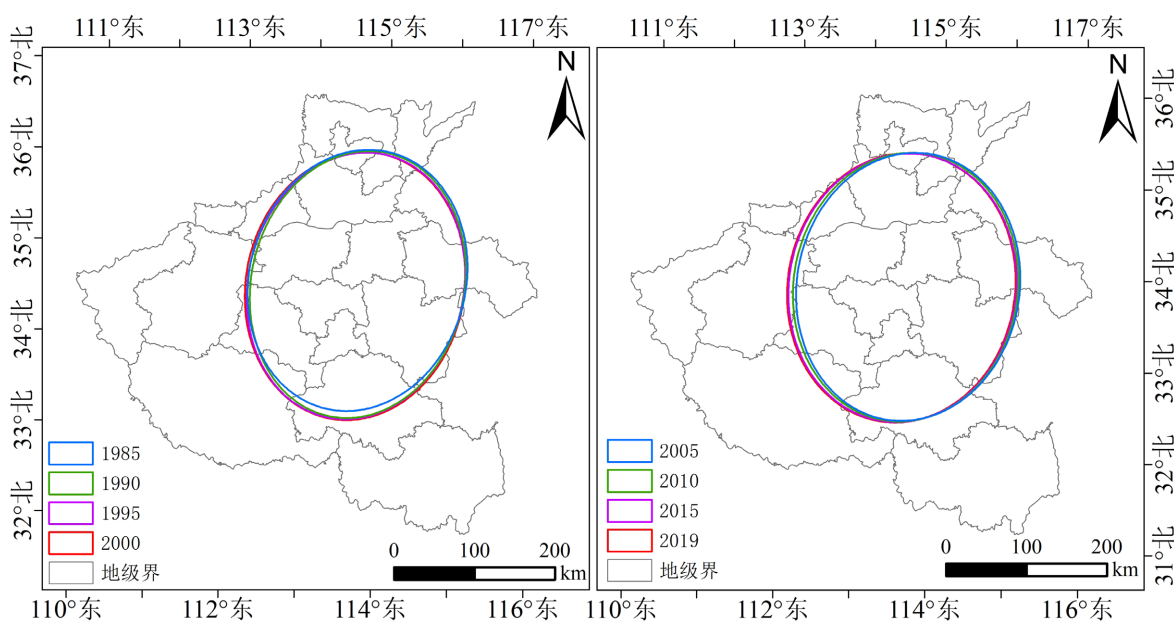


Figure 4. Standard deviational ellipse distribution of impervious surfaces in Henan Province from 1985 to 2019

图4. 1985~2019年河南省不透水面标准差椭圆分布图

标准差椭圆的长轴、短轴及其比值表示不透水面的空间分布。如果长轴与短轴的比值接近 1，则不透水面具有不确定的主扩张方向。同时，不透水面在一个区域内是离散分布的。1985 年至 2019 年，该比值在 1.15 到 1.23 之间波动。在 1985 年至 1990 年间有所上升，1990 年的比值最高为 1.23。最低的比值出现在 1985 和 2019 年，均为 1.15。在此期间，不透水面在市区周围迅速扩大。从长轴方向看，1985 至 2019 年间，长轴标准差由 163,496.8 米增加到 166,716.8 米，表明不透水面在主要方向上呈扩大趋势；从短轴方向看，短轴标准差由 1985 年的 137,401.2 米增加到 144,611.3 米，表明研究区不透水面在地理空间上呈扩大的趋势。研究结果表明，1985 年至 2019 年不透水面的扩张具有一定的方向性。此外，由于城市的快速发展，河南省不透水面的空间分布逐渐扩大。

分析不同时期不透水面规模及其空间分布是研究不透水面扩展变化的基础。图 5 是 1985 年至 2019 年河南省不透水面扩展分布图。从图中可以看出，1985 年到 2019 年河南省不透水面持续增加，中部和东部地区不透水面变化明显，西部部分地区发展缓慢，主要可能是因为伏牛山脉位于西部地区，对不透

Table 3. Parameters of the standard deviational ellipse of impervious surfaces in Henan Province from 1985 to 2019
表 3. 1985~2019 年河南省不透水面标准差椭圆参数

年份	长轴(m)	短轴(m)	长轴/短轴	方向角度(°)
1985	163496.8	137401.2	1.19	19.06
1990	166700.7	135382.4	1.23	16.02
1995	166392.4	137006.9	1.21	16.00
2000	166551.9	138987.6	1.20	14.16
2005	166168.7	141662.8	1.17	12.98
2010	166463.7	142676.4	1.17	12.29
2015	166364.5	144539.0	1.15	12.31
2019	166716.8	144611.3	1.15	12.72

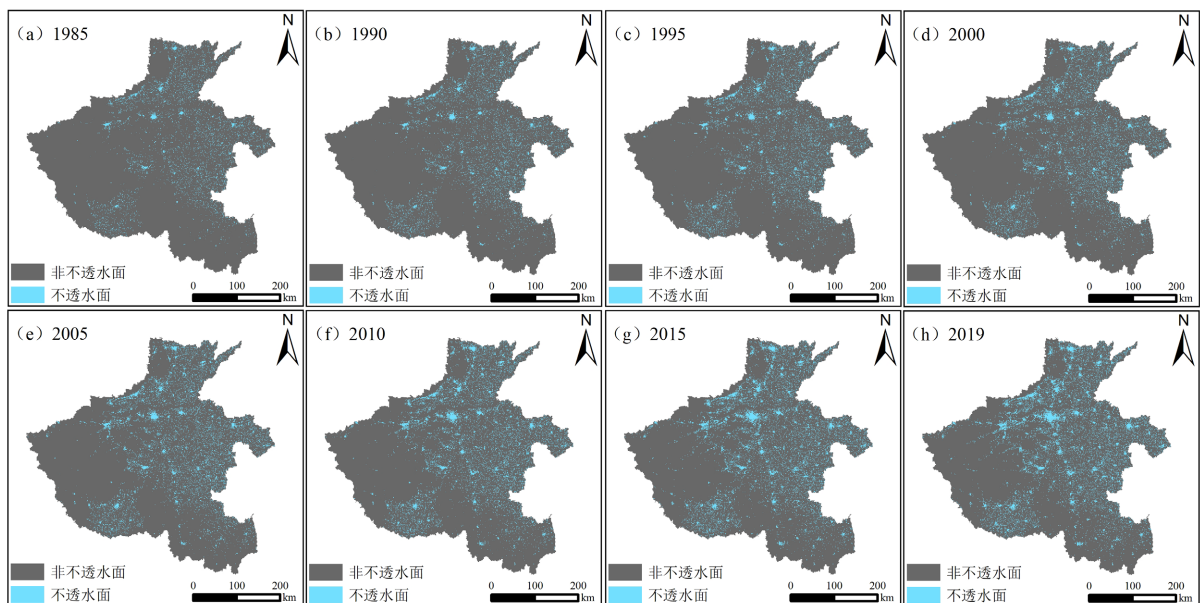


Figure 5. Distribution of impervious surface expansion in Henan Province from 1985 to 2019
图 5. 1985~2019 年河南省不透水面扩展分布图

水面的发展有一定的影响。整体来看，河南省不透水面呈现扩张趋势。

综上，在 GISA 数据集中，1985 年至 2019 年不透水面的扩张具有一定的方向性。随着时间的推移，河南省不透水面持续扩大。河南省不透水面的空间分布呈现扩张性发展。

4. 结论

文章利用 Google Earth 遥感影像数据中获取的不透水面地物真实分类信息，通过混淆矩阵中的总体分类精度和 Kappa 系数进行定量评价 2015 年 GAIA、GISA 和 GISD 三种数据集的数据精度；利用数据质量相对较好的 GISA 产品所提取的不透水面数据，通过标准差椭圆分析方法对 1985~2019 年间河南省不透水面的时空变化趋势进行分析。结果表明：GISA 数据集在数据质量上，优于 GAIA 和 GISD 数据集，更适合河南省区域内不透水面的研究；同时，河南省不透水面发展在时空分布上呈现扩张趋势；城市不透水面不断扩张，主要由城市中心区域向四周扩展。

文中通过混淆矩阵中的总体精度和 Kappa 系数进行定量评价 2015 年 GAIA、GISA 和 GISD 三种数据集的数据精度。接下来，计划查阅更多的相关数据质量比较方法，对三种不透水面遥感数据集的提取精度进行更进一步的验证。

参考文献

- [1] Seto, K.C., Güneralp, B. and Hutyrá, L.R. (2012) Global Forecasts of Urban Expansion to 2030 and Direct Impacts on Biodiversity and Carbon Pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**, 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- [2] 黄昕, 李家艺, 杨杰, 等. Landsat 卫星观测下的 30m 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.
- [3] Bartholomé, E. and Belward, A.S. (2005) GLC2000: A New Approach to Global Land Cover Mapping from Earth Observation Data. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 1959-1977. <https://doi.org/10.1080/01431160412331291297>
- [4] Liu, Y., Zhong, Y., Ma, A., Zhao, J. and Zhang, L. (2023) Cross-Resolution National-Scale Land-Cover Mapping Based on Noisy Label Learning: A Case Study of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **118**, Article ID: 103265. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103265>
- [5] Gong, P., Li, X., Wang, J., Bai, Y., Chen, B., Hu, T., et al. (2020) Annual Maps of Global Artificial Impervious Area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, **236**, Article ID: 111510. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111510>
- [6] Zhang, X., Liu, L., Zhao, T., Gao, Y., Chen, X. and Mi, J. (2022) GISD30: Global 30 m Impervious-Surface Dynamic Dataset from 1985 to 2020 Using Time-Series Landsat Imagery on the Google Earth Engine Platform. *Earth System Science Data*, **14**, 1831-1856. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1831-2022>
- [7] Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciaisi, P., et al. (2020) High-Spatiotemporal-Resolution Mapping of Global Urban Change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, **3**, 564-570. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0521-x>
- [8] Liu, C., Huang, X., Zhu, Z., Chen, H., Tang, X. and Gong, J. (2019) Automatic Extraction of Built-Up Area from ZY3 Multi-View Satellite Imagery: Analysis of 45 Global Cities. *Remote Sensing of Environment*, **226**, 51-73. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.033>
- [9] Balk, D.L., Deichmann, U., Yetman, G., Pozzi, F., Hay, S.I. and Nelson, A. (2006) Determining Global Population Distribution: Methods, Applications and Data. *Advances in Parasitology*, **62**, 119-156. [https://doi.org/10.1016/s0065-308x\(05\)62004-0](https://doi.org/10.1016/s0065-308x(05)62004-0)
- [10] 王姗姗, 蒲英霞, 李升峰, 等. 利用长时序流域不透水面数据集探索城市增长模式——以秦淮河流域为例[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 739-750.
- [11] 孙根云, 王鑫, 安娜, 等. 基于多源遥感的大尺度高分辨率不透水面深度学习提取方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(2): 272-282.
- [12] 黄鹏程, 张明明, 王新宇, 等. 基于 Landsat-8OLI 的西安市土地利用类型遥感分类研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(1): 85-88, 92.
- [13] 戴刘新, 张莹, 李正强, 等. 中国近地面 PM_{2.5} 质量浓度卫星遥感数据集比较及历史趋势分析[J]. 大气与环境光

学学报, 2022, 17(6): 613-629.

- [14] 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.
- [15] 高长春, 朱慧方, 校韩立, 等. 基于空间统计分析的湖南省区域经济空间差异动态演化[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(8): 46-51.
- [16] Lefever, D.W. (1926) Measuring Geographic Concentration by Means of the Standard Deviation Ellipse. *American Journal of Sociology*, **32**, 88-94. <https://doi.org/10.1086/214027>