引文格式：郑磊,马伟,胡潭高. 近30年杭州市主城区不透水面的演变与驱动机制分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(4):80-85. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.04.017

近30年杭州市主城区不透水面的演变与驱动机制分析

郑　磊[1]，马　伟[2]，胡潭高[1*]
（1. 杭州师范大学 信息科学与技术学院，浙江 杭州 310000；2. 正元地理信息集团股份有限公司，北京 101399）

摘　要：对杭州市主城区1990—2023年的Landsat系列和Sentinel-2遥感影像数据，采用改进型归一化不透水面指数法（modified normalized difference impervious surface Index，MNDISI）结合GIS空间分析方法，进行了不透水面时空变化特征及驱动因素的分析。结果显示：①不透水面面积显著增长，从257.92 km²增长到3 032.99 km²，年均增长率从1990—2000年的26.16%降至2017—2023年的1.99%。②加权中心发生明显移动，标准差椭圆分析表明长轴方向由西南-东北逐渐转向东-西，增长存在地域差异，不同时间段增长区域不同。③自然和社会经济多种因素共同作用于其增长，包括地形地貌、河流水系、人口增长、经济发展、政策导向、交通基础设施建设和科技进步等。

关键词：杭州市；不透水面；时空变化；驱动力；空间分析
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）04-0080-06

Evolution and Driving Mechanism Analysis of Impervious Surfaces in the Main Urban Area of Hangzhou City, Zhejiang Province over the Past 30 Years

ZHENG Lei[1], MA Wei[2], HU Tangao[1]
(1. College of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310000, China;
2. Zhengyuan Geomatics Group Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: In this study, based on Landsat series and Sentinel-2 remote sensing image data, we analyzed the spatio-temporal change characteristics and driving factors of impervious surfaces in the main urban area of Hangzhou City, Zhejiang Province from 1990 to 2023 using an improved normalized difference impervious surface index (MNDISI) combined with GIS spatial analysis methods. The results show that ①a significant increase in impervious surface area, from 257.92 km² to 3 032.99 km², with the average annual growth rate decreasing from 26.16% to 1.99%. ②A notable shift in the weighted center of impervious surfaces, with standard deviation ellipse analysis indicating that the long axis direction gradually changed from southwest-northeast to east-west. Growth patterns show regional differences, with different areas experiencing growth at different time periods. ③A variety of natural and socio-economic factors, including topography, river systems, population growth, economic development, policy guidance, transportation infrastructure, and technological progress, all contribute to the growth of impervious surfaces.

Key words: Hangzhou City, impervious surface, spatio-temporal change, driving factor, spatial analysis

杭州是国家首批低碳试点城市和生态文明建设示范区，积极响应国家政策[1-9]，制定了一系列措施优化城市空间结构，降低不透水面比例，提升生态环境质量[10]。目前已有多种不透水面提取方法应用于杭州市研究，包括归一化差值不透水面指数、增强型归一化差值不透水面指数（enhanced normalized difference impervious surface index，ENDISI）、生物物理组成指数（biophysical composition index，BCI）和建成区指数（built-up area index，BUAI）等指数法，以及最大似然分类（maximum likelihood classification，MLC）、支持向量机（support vector machine，SVM）、人工神经网络（artificial neural network，ANN）和随机森林等机器学习算法[11]。但多数研究所选取的时间区间较短或仅选取某一天的遥感影像进行方法提取精度比较分析，尚无较为完整的跨越长时间区间的多种提取方法精度比较综合不透水面时空变化特征和影响因素研究。

本文将基于Landsat系列遥感影像和哨兵2号的遥感影像，采用改进型归一化不透水面指数法（modified normalized difference impervious surface index，MNDISI）提取杭州市主城区1990—2023年的遥感影像中的不透水面信息。然后再结合多种GIS空间分析方法，对杭州市主城区近30 a的不透水面变化特征进行分析，为未来优化城市发展策略和实现可持续发展提

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42471102）。
第一作者简介：郑磊（2003—），本科，研究方向为城市内涝灾害监测与评估，E-mail：2099089018@qq.com。
通信作者：胡潭高（1983—），博士，教授，研究方向为城市水文和景观生态，E-mail：hutangao@hznu.edu.cn。

供科学依据。

1　研究区与研究数据

1.1　研究区概况

杭州坐落于中国东部浙江省的北部区域，处于长江三角洲的南端，系浙江省的省会，亦是长三角经济圈的核心关键城市之一。其地理坐标处于30°16′~ 30°47′N，120°08′~122°21′E范围内。图1呈现了杭州市主城区的地理位置状况。

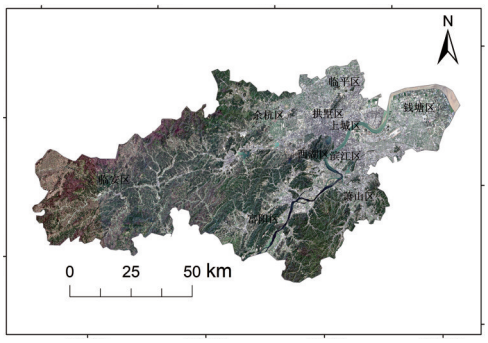


图1　研究区示意图

审图号：GS(2024)0650

1.2　研究数据

1.2.1　数据来源

研究区域具体包括临安区、富阳区、西湖区、滨江区、上城区、拱墅区、临平区、钱塘区、余杭区和萧山区共10个行政区单元。研究数据包括：

1）遥感数据：主要来自地理空间数据云平台，包括Landsat5 TM和Landsat8 OLI还有Sentinel-2三种遥感数据。其中，1990—2010年使用的Landsat5 TM遥感数据，其空间分辨率为30 m；2017年使用的Landsat8 OLI遥感数据也具有30 m的分辨率；此外，2023年还使用了Sentinel-2遥感数据，其空间分辨率达到了10 m。

2）矢量图数据：研究区有10个区的矢量图。这些矢量数据提供了研究区域的地理边界、行政划分等信息，有助于更准确地分析不透水面变化的空间分布和影响因素。

3）社会经济统计数据：《杭州统计年鉴》和《杭州市国民经济和社会发展统计公报》等。

1.2.2　数据处理

使用ENVI 5.3软件对5个时期的遥感影像进行预处理，具体步骤如下：

1）辐射定标：将原始 *DN* 值转换为辐射亮度值，消除传感器特性对影像的影响。

2）大气校正：减少大气条件干扰。

3）图像镶嵌：拼接不同时期的影像。

4）图像裁剪：提取研究区域数据。

完成这些预处理操作后，能够获得清晰、准确的遥感影像数据，为研究区域的进一步分析打下坚实基础。

2　研究方法

2.1　不透水面提取

本文采用改进型归一化不透水面指数法（MNDISI）提取研究区不透水面信息，其表达式为：

$$\mathrm{MNDISI}=\frac{R_N+R_S-2R_B}{R_N+R_S+2R_B} \tag{1}$$

MNDISI指数涉及的主要波段反射率值涵盖近红外（R_N）、短波红外（R_S）以及蓝波段（R_B）。在TM影像中，这些波段对应的是第4、5、1波段；在OLI影像中，对应的是第5、6、2波段；而在Sentinel-2影像中，则是第8、10、2波段。鉴于MNDISI指数具备归一化的特征，其数值处于-1~ 1的区间范围之内。为了准确捕捉不透水面信息，需通过设定阈值滤除干扰。本研究通过目视解译法确定阈值，并结合原始影像进行细致分析与对比。通过这种方式，能够获得研究区域的不透水面的二值化图像，从而清晰地展现出不透水面的分布情况。

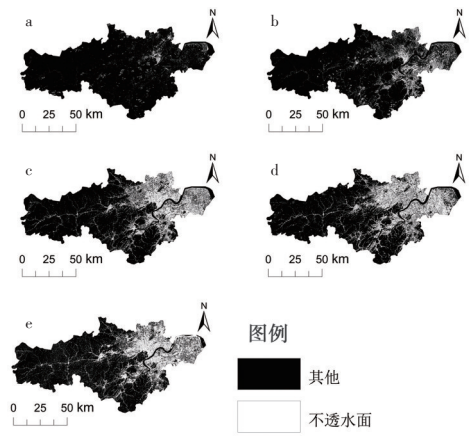


图2　研究区1990—2023年不透水面分布

审图号：GS(2024)0650

根据研究结果，图2（a~e）显示了杭州市主城区及临安区和富阳区在1990年、2000年、2010年、2017年和2023年的不透水面分布图。这些分布图清晰地展示了研究区域内不透水面面积和分布随时间的变化情况。通过这些图，可以明显看出不透水面的扩展趋势，直观地反映出城市化进程对地表覆盖类型的影响。

2.2　精度验证

利用混淆矩阵（confusion matrix）来对不透水面

比例反演参考数据的分类精准度予以验证。混淆矩阵作为一种常见的图像分类精度评估手段，凭借统计各个类别的正确分类数量与误分类数量，从而对分类结果的准确性进行评估。为了验证不透水面分类的精确程度，选取总体精度（Pall）和 Kappa 系数当作评价指标。其中，总体精度表示的是正确分类的像元数在总像元数中所占的比例，其作用在于反映分类结果的整体准确状况。而 Kappa 系数则考量了分类结果和完全随机分类结果之间的差异，以此来衡量分类结果的精度与一致性，属于一项更为全面的评价指标。具体的计算公式如下所示：

$$p_{\text{all}}=\frac{\sum_{i=1}^{r}x_{ii}}{N} \tag{2}$$

式中，r 为类别总数，表示不透水面分类中的不同类别数量。

x_{ii} 为第 i 类地物被正确分类的数目，即实际属于第 i 类且被模型正确分类的像元数量。

N 为用于精度评估的总像元数量，即参与分类评估的所有像元总和。

$$\text{Kappa}=\frac{N\sum_{i=1}^{r}x_{ii}-\sum_{i=1}^{r}(x_{i+}x_{+i})}{N^2-\sum_{i=1}^{r}(x_{i+}x_{+i})} \tag{3}$$

在混淆矩阵中，x_{i+} 为验证集中第 i 类地物的总像元数，而 x_{+i} 为实际分类结果中第 i 类地物的总像元数。通过对这些指标进行计算，我们可以客观、准确地评估对不透水面分类的精度。

2.3 不透水面加权平均中心

利用分析城市不透水面加权平均中心的方法来描述城市扩张的方向。其中这里的不透水面加权平均中心指的是城市的发展中心所在，通过历年的数据分析，能够揭示城市扩张的时空动态特征和整体演化轨迹[13]。计算公式如下：

$$\begin{cases}\bar{x}=\dfrac{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i x_i}{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i}\\ \bar{y}=\dfrac{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i y_i}{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i}\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为不透水面加权平均中心的经纬度坐标；x_i 和 y_i 为第 i 个像元的经纬度；ISP_i 为第 i 个像元的不透水面占比；m 为数据集中不透水面比例像元的总数。

通过计算研究区在1990年、2000年、2010年、2017年及2023年的不透水面平均加权中心，可以得到这些年份的不透水面中心位置。随后，通过比较不同年份的加权中心位置，可以分析研究区不透水面随时间的变化趋势和迁移方向。

2.4 标准差椭圆分析

运用标准差椭圆分析（standard deviation ellipse，SDE）方法，对城市扩张的方向特性以及时空发展态势予以评估。经由计算 SDE，我们可以更为精准地把握城市不透水面于空间上的分布情形与动态变化状况。其方位角 θ 的计算公式如下：

$$\tan\theta=\frac{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{y}_i^2+\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{y}_i^2\right)^2+4\left(\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{x}_i\tilde{y}_i\right)^2}}{2\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2\tilde{x}_i\tilde{y}_i} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\tilde{x}_i=x_i-\bar{x}\\ \tilde{y}_i=y_i-\bar{y}\end{cases} \tag{6}$$

式中，θ 为椭圆长轴与地理北方向之间的角度，用于揭示城市扩张的主导方向，而 $\tilde{x}_i$ 和 $\tilde{y}_i$ 则分别为第 i 个像元中心在 x 和 y 方向上与不透水面加权中心的偏差。椭圆的长轴和短轴分别对应 x 和 y 方向上的标准差 σ_x 和 σ_y，它们描述了数据分布的离散程度。具体的计算公式如下：

$$\sigma_x=\frac{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m}(\text{ISP}_i\tilde{x}_i\cos\theta-\text{ISP}_i\tilde{y}_i\sin\theta)^2\right]}}{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2} \tag{7}$$

$$\sigma_y=\frac{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m}(\text{ISP}_i\tilde{x}_i\sin\theta-\text{ISP}_i\tilde{y}_i\cos\theta)^2\right]}}{\sum_{i=1}^{m}\text{ISP}_i^2} \tag{8}$$

这些标准差揭示了不透水面在特定方向上的扩散程度。为了更深入地探讨城市不透水面的时空动态特征，采用了5个不同年份的不透水面面积数据集，并结合标准差椭圆进行分析。长轴与短轴的比率能够体现出不透水面的集聚或离散状态：倘若该比率大于1，意味着城市扩张具备显著的方向性特点；要是比率等于1，则显示城市不透水面在空间分布方面未呈现出明显的方向性。

3　结　果

3.1　精度验证

为了验证不透水面提取的精度，研究选取了高精度的Google Earth影像数据作为验证样本，并在ENVI分类结果中随机抽取了200个样本点进行精度评估。此外，还进行了人工判读以更准确地验证结果。最终成功获取了杭州市城市及周边区域的不透水面提取精度。除1990年的数据之外，其余5个时期的不透水面提取精度Kappa系数全都大于0.7，同时这5个时期的总体不透水面提取精度均在90%之上。为进一步验证本研究中所提取不透水面信息的精确性，特选取2023年8月武汉大学杨杰与黄昕教授团队所更新的最新全国土地利用分类：CLCD2022数据（该数据集包括1985—2022年的CLCD逐年土地利用分类数据），展开精度比较验证工作[14]。在验证过程中，所采用的方法与上文借助高精度Google Earth影像数据进行验证时保持一致。经比较验证后得出表1。最终结果表明：所验证的5个时期的不透水面提取结果，其总体精度均达95%以上。其中，除1990年数据的Kappa系数为0.50外，其余时期的提取结果Kappa系数均大于0.75。这一结果充分显示，本研究提取的数据与所比较验证的数据之间具备较高程度的一致性，有力地佐证了本研究中不透水面信息提取结果所具备的可靠性及有效性

表1　横向精度验证

年份	总体精度/%	Kappa系数
1990年	96.3	0.50
2000年	98.1	0.79
2010年	98.6	0.90
2017年	96.6	0.78
2023年	95.3	0.75

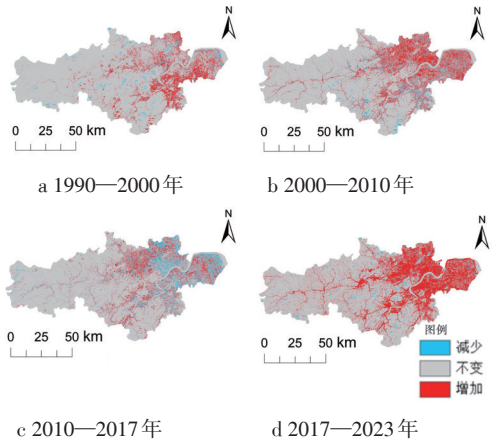
3.2　时空变化分析

通过将1990—2023年5个时期的不透水面提取结果进行差值运算，得到差值图像。图3显示了研究区在这些年份中的城市不透水面变化情况。另外利用ArcGIS 10.8计算像元数量来获得不透水面的面积。其中年均增长率反映了不透水面扩张的相对速度，而年均增长量体现绝对规模变化[15]。

研究区城市从1990—2023年间的不透水面变化特征主要表现在以下2个方面：

1）呈持续增长态势：在该时段内，研究区域城市的不透水面展现出持续递增的趋势，年均增长率达32.60%。

2）显著的地域差异：除了整体的增长趋势之外，城市不透水面的变动亦呈现出显著的地域差异性。通过对图4中不同时期的不透水面分布情况进行



a 1990—2000年　b 2000—2010年　c 2010—2017年　d 2017—2023年

图3　研究区内不透水面在各个时期的变化情况

审图号：GS(2024)0650

分析，可以观察到除临安区和富阳区外，其他区域的不透水面面积增长较为迅速。而在这2个区内，只有区中心位置的发展较为显著。这表明不同区域之间存在着明显的不透水面增加差异。此外，东西分布上的不透水面增加幅度也表现出明显地域差异。

为了能更加直观呈现近30 a来杭州市主城区的不透水面变化，选取了武汉大学杨杰与黄昕教授团队的4个时期的最新全国土地利用分类数据与本研究所提取的数据综合生成一张拥有更大时间密度的不透水面空间变化图（从上至下a~i依次为1985年、1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2014年、2017年、2023年），通过分析图2、图3和图4，研究区不透水面的空间变化特征可以总结为以下几点：

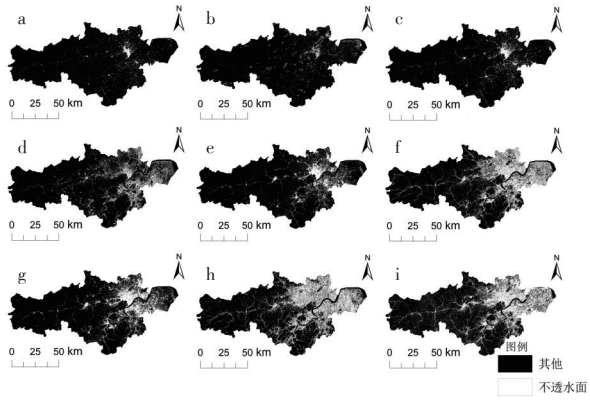


图4　1985—2023杭州市区不透水面变化

审图号：GS(2024)0650

1）单中心向双中心演进：最初，不透水面的空间形态呈现出单中心发展模式，以上城区和下城区（2021年与拱墅区合并）为中心向外扩张发展。伴随时间的演进，空间形态逐步演变为双中心模式，萧山区渐渐成为新的不透水面集聚中心，其不透水面比例增速较快。

2）阶段性扩展特征：1990—2000年：不透水面总面积增长位居第三，年均增长面积也位居第三。增

长显著区域包括拱墅区、江干区、上城区和下城区。

2000—2010年：总增长面积达934.86 km²，年均增长面积排名第二。上城区、滨江区和拱墅区的不透水面集中度显著增加，江干区、滨江区和萧山区的不透水面比例快速增长。

2010—2017年：年均增长面积120.30 km²，增速最高。主要增长出现在城市边缘城区，余杭区和萧山区表现突出。

2017—2023年：增长空间有限，主要增长向西部的临安区和富阳区转移。

3.3 不透水面加权平均中心分析

城市的发展进程持续对不透水面加权平均中心的变动予以塑造，该变动清晰地揭示出城市重心的迁移轨迹，这一现象反映了城市发展的不均衡性。通过对杭州市不透水面加权平均中心的深入分析，我们可以得出以下结论：

1）1990—2000年间，不透水面的加权中心发生了显著变化，向南偏东方向移动了2 698.77 m。这一时期的移动表明萧山区、钱塘区以及杭州市中心区域周围的不透水面发展速度较快。

2）2000—2010年间，不透水面加权中心的移动显著增长，达到了6 604.69 m，并且移动方向转变为北偏西方向。这一变化与余杭区、临平区以及临安区的中心区域不透水面明显增加有关。

3）2010—2017年间，随着余杭区和萧山区的持续发展，特别是余杭区的发展速度更快，促使不透水面加权中心向西偏南移动了7 014.32 m。

4）2017—2023年间，随着临安区和余杭区基础设施建设和产业发展的加速，不透水面面积迅速扩张，促使不透水面加权中心向西北方向移动了大约5 322.83 m。

3.4 不透水面标准差椭圆分析

运用5个年份的数据计算标准差椭圆，以此来揭示不透水面的空间分布规律。在1990—2023年这一较长的时间跨度内，不透水面展现出显著的发展方向性。

根据表2的数据，可以观察到标准差椭圆的方位角在1990年为77.492°，至2000年下降至77.433°，基本保持稳定状态。然而，自2000年以后，方位角开始呈现出上升趋势，至2023年已增至83.140°。这一变化表明杭州市不透水面发展的主要方向发生了转变，从最初的西南至东北方向逐渐转变为东向西方向。

从更宏观的角度来看，向西南—东北方向发展似乎是不透水面发展的主要趋势，这可以从标准差椭圆的总体变化中得出。在1990—2000年的初期阶段，标准差椭圆略有缩小，这可能意味着不透水面的分布在这一时期相对较为集中。然而，在随后的2000—2023年期间，标准差椭圆逐渐增大，表明不透水面的空间分布逐渐扩展。

值得注意的是，长轴和短轴的长度都在持续增长。长轴从44 144.600 m增长到60 774.299 m，这一变化表明不透水面在东西方向上的扩展尤为显著。与此同时，短轴的变化呈现出增长和减少交替的态势，这意味着南北方向上的不透水面扩展相对较慢。综合来看，可以推断不透水面在长轴方向上呈现出逐渐离散的趋势。

进一步分析1990—2010年的时间段，发现长轴与短轴的比率经历了一系列的变化。随着时间的推移，不透水面在特定（东西）方向上的扩展变得更加明显和集中。

表2 不同时期SDE参数

年份	长轴/m	短轴/m	方位角/(°)	长短轴比
1990年	50 404.257	22 816.723	77.492	2.209
2000年	44 144.600	23 533.379	77.433	1.876
2010年	52 060.196	23 371.625	80.757	2.227
2017年	53 706.734	24 021.424	82.532	2.236
2023年	60 774.299	23 133.574	83.140	2.627

3.5 不透水面增长驱动力分析

3.5.1 自然因素

1）地形地貌。杭州平原地带的低平地形为不透水面的扩展提供了理想的自然基础，显著降低了基础设施建设的技术难度与经济成本。在地势平坦的区域中，诸如道路铺设和建筑物建设等工程项目实施较为便捷，且更易于实现成本控制，因此平原地区适合大规模的城市开发。杭州市的中心城区主要为平原地形，为各类城市建设活动提供了稳定的地理基础和相对较少的地形制约，这使得不透水面增长更加集中。基于地形数据分析，研究区内平原地带的不透水面扩张尤为明显。

2）河流水系。河流水系在一定程度上限制了杭州市的城市扩展方向与规模，但城市发展对土地资源的高需求，推动了河流沿岸区域的适度开发。

3.5.2 社会经济因素

1）人口增长。1990—2023年间，杭州市人口规模持续增长，成为驱动不透水面扩展的核心社会因素之一。随着人口规模的扩充，对于住宅、商业设施以及公共服务设施的需求相应增长，由此驱动土地开发强度加大与城市建设范围拓展。杭州市历年统计年鉴的数据表明，1990年杭州市常住人口为583.2万人，到2022年末已增长至1 237.6万人，与此同时，城镇

化率自1990年的26.4%攀升至2022年的84.0%。城镇化率的提升带动了城市中心区域对土地需求的增加，促使城区建设密度提高，不透水面覆盖范围进一步扩展。

2）经济发展与产业结构调整。杭州市经济的快速增长和产业结构转型是推动不透水面扩展的重要因素。近年来，杭州逐步从传统制造业向高新技术产业和服务业转型升级，导致城市功能分区调整并增加了城市建设强度。自1990—2023年，杭州市第三产业占比从31.5%提升至68.2%，而第二产业的比重从52.3%下降至29.8%。此产业结构向服务业的显著转变直接影响了城市土地利用类型的变化，推动了商业和办公区域的不透水面扩展。

此外，杭州市的经济持续增长及较高水平的固定资产投资，为基础设施建设及房地产开发提供了坚实的经济支持。根据杭州市统计年鉴数据，杭州市地区生产总值从1990年的189.62亿元增长至2023年的20 059亿元，年均增长率达到13.64%。大规模固定资产投资，尤其在交通基础设施与房地产开发领域的投入，直接促进了不透水面扩展。

3）政策导向与城市规划战略对于杭州市的空间结构和发展方向具有至关重要的引领意义。杭州市在其不同的发展阶段所提出的诸如“城市东扩、旅游西进、沿江开发、跨江发展”以及“拥江发展”等城市规划战略，深刻地影响了城市的发展轨迹，明确了空间拓展的方向，并加速了特定区域的开发强度[15]。

另外土地利用政策的调整也对杭州市的不透水面扩展产生了深远影响。

4）交通基础设施建设。交通基础设施的不断完善是推动城市化进程的重要力量，对不透水面增长具有显著的空间引导作用。高速公路、主干道和轨道交通网络的扩展不断扩大杭州市的可达性范围，促进沿线区域产业集聚和土地开发强度的提升。自2012年地铁1号线开通以来，杭州逐步构建了覆盖主城区及周边区域的轨道交通网络，带动了沿线土地的高强度开发。例如，余杭区在地铁5号线开通后，沿线站点周边土地开发迅速增加，2017—2023年间不透水面扩展明显加快。

5）科技进步。科技进步为城市建设与土地开发提供了更高效的技术手段。建筑技术的提高使得在复杂地形或环境条件下的建设成为可能，促进了不透水面的扩展。同时，信息技术的发展为城市规划和土地管理提供了更科学的方法，提高了土地开发效率和规模，但在一定程度上也推动了不透水面的增加。

4　结　语

本文基于1990—2023年多期遥感数据，分析了杭州市区及周边区域不透水面的时空变化特征及驱动因素。主要结论如下：

1）不透水面面积增长显著，从1990年的257.92 km^2增至2023年的3 032.99 km^2，增长近12倍，其中1990—2000年年均增长率最高（26.16%），近年增速放缓但仍持续增长。

2）不透水面重心持续迁移，整体向南、西方向移动，各阶段偏移方向与距离受区域发展差异影响。

3）标准差椭圆分析表明，不透水面扩展方向由西南—东北逐渐转向东—西，东西向扩展尤为明显。

4）增长存在空间异质性：早期集中于中心城区，随后向外围余杭、萧山等地扩散，近年向西部的临安、富阳转移。

5）自然条件（地势、水系）与社会经济因素（人口增长、经济发展、政策规划、交通建设、技术进步）共同驱动不透水面扩张。

讨论指出，Sentinel-2数据相比Landsat能更精细刻画不透水面；本研究结论具地域特异性，推广至其他城市需考虑地理与政策差异；不透水面持续扩张加剧内涝、热岛效应等生态风险。今后研究应关注其生态环境效应，以支撑城市可持续发展。

参考文献

[1] 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

[2] 李伟,陈朝霞,周美玲. 耦合夜光遥感的粤港澳不透水面提取及其热岛效应研究[J]. 城市勘测,2023(6):31-37

[3] 王月香,徐芸,徐洪文,等. 淮安市不透水面时空演变及其对生态环境影响[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版),2024,23(2):121-130

[4] 张丽平,孙英君,王绪璐,等. 不透水面提取方法及应用研究综述[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(11):149-153

[5] 赵怡,许剑辉,钟凯文,等. 基于Sentinel-2A和Landsat8的城市不透水面的提取[J]. 国土资源遥感,2021,33(2):40-47

[6] 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

[7] 夏军,刘洪江,朱林富,等. 基于GEE和机器学习的不透水面提取研究:以成渝地区为例[J]. 测绘工程,2023,32(2):21-29

[8] 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

（下转第112页）