

基于Landsat遥感数据城市不透水层信息提取与分析

李巽云^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南师范大学西部资源环境地理信息技术教育部工程技术研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2024年3月1日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

不透水层作为一种典型的地表覆盖成分, 是衡量城市化水平的标准之一, 同时也是衡量城市的生态环境的重要指标。本研究以南京市为研究区, 以2013~2018年Landsat8影像为数据源, 提取不透水层并反演地表温度, 分析了2013~2018年南京市不透水层的时空变化以及不透水层与地表温度之间的相关性。研究结果表明: 1) 南京市11个行政区县中, 鼓楼区不透水层所占的面积最大, 六合区所占的面积最小。2) 南京市的不透水面积随时间的推移而增大, 越接近市中心的区县, 不透水层覆盖面积越大。3) 不透水层与地表温度的相关性较高。

关键词

不透水层, NDISI指数, 地表温度反演, 时空变化分析

Extraction and Analysis of Urban Impervious Layer Information Based on Landsat Remote Sensing Data

Xunyun Li^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²GIS Technology Research Centre of Resource and Environment in Western China of Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Mar. 1st, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

文章引用: 李巽云. 基于 Landsat 遥感数据城市不透水层信息提取与分析[J]. 地理科学研究, 2024, 13(2): 434-445.
DOI: 10.12677/gser.2024.132042

Abstract

Impervious layer, as a typical surface covering component, is one of the standards to measure the level of urbanization and an important indicator to measure the ecological environment of a city. In this study, Nanjing was taken as the study area, and Landsat8 images from 2013 to 2018 were taken as the data source to extract impermeable layer and invert surface temperature. The spatial and temporal changes of impervious layer and the correlation between impervious layer and surface temperature in Nanjing from 2013 to 2018 were analyzed. The results show that: 1) Among the 11 administrative districts and counties in Nanjing, Gulou district occupies the largest area of impervious layer, while Liuhe district occupies the smallest area. 2) The impervious layer of Nanjing increases with the passage of time. The closer to the downtown area, the greater the impervious layer coverage area. 3) Impervious layer has a high correlation with surface temperature.

Keywords

Impervious Layer, NDISI Index, Inversion of Surface Temperature, Spatio-Temporal Change Analysis

Copyright © 2024 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

随着城市的不断发展,我国城市化的水平逐渐提高,城市的范围不断扩大。在城市化的过程中,耕地不断减少、不透水层迅速扩张[1]。不透水层指的是阻止水渗入土壤的土地覆盖表面,主要包括公路、停车场、人行道、房屋顶部和城市地物中其他不具有渗透性的表面[2]。作为一种典型的地表覆盖成分,不透水层成为衡量城市化水平的标准之一,同时也可以作为城市生态环境的指标。

遥感技术的特性对于提取不透水层具有一定的优势。因此本研究将利用遥感技术的优点,研究不透水层覆盖面积变化,探讨城市不透水层和地表温度的相关性,从而为城市规划及未来发展提供依据和决策支持[3]。

遥感提取城市不透水层的方法主要有指数方法,影像和阴影信息和线性光谱的方法,还有一些学者考虑到城市不透水层和城市热环境、热岛效应之间的关系[4],尝试通过城市不透水层与地表温度的相关性来提取城市不透水层[5]。

指数方法是根据不同地物的光谱特征,提出可以真实反映该地物的特征以及明显区别于其他地物的指数,使用该指数来进行该类地物的提取研究[6]。崔秋洋等[7]应用最新发射的 Landsat8 卫星影像中陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)中波段,通过归一化差值不透水面指数(NDISI) [8]估算北京市平原区不透水面盖度。

利用影像纹理和阴影信息提取城市不透水面的研究也有很多。黄曦涛等[9]基于 2012 年咸阳市城区内资源三号 and TM 卫星影像,利用光谱信息和纹理信息对咸阳市的地表进行监督分类,使用阈值和开闭运算提取阴影,并通过 TM 影像提取 NDBI 等指数辅助归类,优化分类结果,提高提取不透水层信息的准确率,以此完成咸阳市不透水面的提取。朱爽等[10]综合利用影像光谱和纹理特征,运用软硬分类方法,选择典型的北京城市边缘区进行不透水层的提取。该研究应用的扩展支持向量机(Extended Support Vector Machines, ESVM)方法结合软、硬分类方法各自的优势,综合考虑了光谱波动性和混合像元的影响,在土

地覆盖制图应用中得到较好的识别结果。

此外, 还有一些研究基于线性光谱模型估算城市的不透水层。杨朝斌等[4]以长春市为例, 使用的是2014年 Landsat8 影像, 基于在 Ridd [11]的“植被 - 不透水面 - 土壤”理论模型, 采用多端元优化的提取方法, 依据研究区实际土地覆被特点, 利用高分辨率遥感影像高分一号对估算结果进行验证, 并对其空间分布格局进行分析。张文婷等[12]以 Landsat-TM 和 ETM+为主要数据源, 通过多端元光谱混合分析法(MESMA)提取北京建成区不透水层的时空演变信息。

还有新兴的基于 Landsat8 数据的对于城市不透水面和相应的热环境的研究。陈婉佳等[13]利用 Landsat8 数据, 以成都市为研究对象, 采用光谱混合分解模型研究估算成都市的不透水面分布信息, 利用完全约束最小二乘法混合像元分解, 来获得研究区的不透水面信息。同时, 利用 TIRS11 波段来反演研究区的地表温度, 进而分析不透水面与城市热岛之间的关系。张旻等[14]基于 QuickBird 高分辨率影像、LandsatTM 影像及夜间灯光数据, 设计了集成 CART (Classification and Regression Tree)算法和多源遥感数据估算亚像元级不透水地表盖度的技术方案, 采取适用于典型温带半干旱地区的 ISP (Impervious Surface Percentage)提取方法, 提取 2001 年和 2011 年北京城区不透水地表盖度; 同时采用单窗算法反演 2001 年和 2011 年地表温度, 对 2001~2011 年北京六环以内城区不同环路区域 ISP 发展趋势, 以及其与地表温度的相关性进行分析。

2. 研究区与数据

2.1. 研究区概况

南京位于中国东部、长江下游中部地区, 地理坐标为北纬 31°14"至 32°37", 东经 118°22"至 119°14"。南京市共包括 11 个行政区, 总面积 6587 km², 2017 年建成区面积 1398.69 km²。是长三角辐射带动中西部地区发展的国家重要门户城市, 也是“一带一路”战略与长江经济带战略交汇的节点城市, 南京都市圈核心城市, 南京经济区主席方城市[15]。

南京属宁镇扬丘陵地区, 以低山缓岗为主, 低山占土地总面积的 3.5%, 丘陵占 4.3%, 岗地占 53%, 平原、洼地及河流湖泊占 39.2%。南京的平面位置南北长、东西窄, 成正南北向; 南北直线距离 150 公里, 中部东西宽 50 至 70 公里, 南北两端东西宽约 30 公里。南面是低山、岗地、河谷平原、滨湖平原和沿江河地等地形单元构成的地貌综合体。

2.2. 数据来源

本文采用的数据是 2013~2018 年南京市的 Landsat8 OLI_TIRS 卫星遥感数据, 来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。影像的具体信息如表 1 所示, 其中, 由于 2015 年没有符合实验要求的低云量影像, 故研究中没有采用。此外, 用于影像剪裁的南京市行政边界数据来源于国家基础地理信息中心(欢迎光临国家基础地理信息中心网站(ngcc.cn))。

Table 1. Image information used in the study

表 1. 研究采用的影像信息

图像采集时间	数据标识	条代号	行编号	云量
2013-04-07	LC81200382013097LGN02	120	38	0.02
2014-04-24	LC81200382014114LGN01	120	38	9.79
2016-04-29	LC81200382016120LGN01	120	38	1.68
2017-03-15	LC81200382017074LGN00	120	38	6.56
2018-04-19	LC81200382018109LGN00	120	38	0.31

本研究使用 ENVI5.3 对软件对遥感影像进行预处理, 具体包括辐射定标、大气校正以及图像剪裁等。在此过程中, 选用 WGS_84_UTM_Zone_50N 为投影坐标系, 选用双线性内插法进行重采样, 并运用南京市行政边界图对下载的遥感影像进行裁剪。

3. 研究方法

3.1. 不透水层提取

本研究选取归一化差值不透水面指数(Normalized Difference Impervious Surface Index, NDISI) [16]提取不透水层。不透水层在热红外波段的辐射率较高, 而在近红外波段的反射率较低。根据这一特点, 使用热红外波段和近红外波段的比值进行计算, 可最大程度地突出不透水层信息。然而, 仅采用热红外与近红外波段的比值运算, 其所增强的不透水面信息中必然会混有许多沙土和水体的信息[17]。因此, 在不透水面地类原来弱反射的近红外波段的基础上, 进一步加入中红外第 1 波段和改进型归一化水体指数(MNDWI), 构成不透水面地类的弱反射组, 以区别于土壤、沙地和水体[18]。由于水体在可见光波段中的反射率要低于不透水层, 所以将 MNDWI 指数加入 NDISI 指数中的弱反射波段。为了避免出现分子太小和分母太大而造成指数偏低的情况, 特将弱反射组值(MNDWI + RNIR + RMIR)除以 3, 使不透水层信息值为正值, 植被、沙土和水体信息值均为负值, 扩大不透水层和植被、沙土、水体的反差, 抑制这些背景地物信息, 从而增强不透水面信息。这样, 不透水面信息就可以用下列复合波段组成的 NDISI 指数来增强:

$$\text{NDISI} = \frac{R_{TIR} - \frac{\text{MNDWI} + R_{MIR} + R_{NIR}}{3}}{R_{TIR} + \frac{\text{MNDWI} + R_{MIR} + R_{NIR}}{3}} \quad (3.1)$$

其中, R_{NIR} 、 R_{MIR} 和 R_{TIR} 分别为影像的近红外、中红外 1 和热红外波段 band10, MNDWI 为改进型归一化水体指数 R_{Green} , Green 为绿光波段。

$$\text{MNDWI} = \frac{R_G - R_{MIR}}{R_G + R_{MIR}} \quad (3.2)$$

NDISI 具有归一化指数的特征, 即指数值介于-1 和+1 之间; 被增强的信息大于 0, 受抑制的信息普遍小于或等于 0。这有利于所增强信息的快速自动提取。

然而, NDISI 指数只是增强不透水层信息, 为了提取不透水层范围, 还需要进行阈值化处理。通过设定阈值, 将像元分为不透水层、非不透水层以及水体三类, 并通过目视解译进行精度验证。

3.2. 地表温度反演

本研究使用大气校正法进行地表温度的反演。大气校正法反演地表温度的原理是从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去大气对地表热辐射的影响, 从而得到地表热辐射强度[19], 再将这一热辐射强度转化为相应的地表温度。由于卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由三部分组成, 即大气向上辐射亮度 L_\uparrow 、地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量、大气向下辐射到达地面后反射的能量, 卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 的表达式可写为(辐射传输方程):

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (3.3)$$

式中, ε 为地表比辐射率, $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度, T_s 为地表真实温度(K), τ 为大气在热红外波段的透过率。则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L \uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau\varepsilon \quad (3.4)$$

T_s 可以用普朗克公式的函数获取。

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (3.5)$$

对于 TIRS Band10, $K_1 = 774.89W / (m^2 \times \mu m \times sr)$, $K_2 = 1321.08 K$ 。

由上可知此类算法需要 2 个参数: 大气剖面参数和地表比辐射率。大气剖面的参数在 NASA 提供的网站(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>)中, 输入成影时间以及中心经纬度可以获取大气剖面参数。

4. 结果与分析

4.1. 不透水层提取

由 2013~2018 年 Landsat8 遥感数据计算得到的南京市 NDISI 指数分布如图 1 所示。在此基础上, 经反复试验, 选取阈值 0.467 提取各个年份南京市的不透水层, 结果如图 2 所示。

以谷歌高清影像作为参考数据对 NDISI 阈值化结果进行精度验证。在研究区生成 150 个随机点, 提取每个点的分类结果(不透水层或、非透水层或水体), 同时将这些随机点坐标导入对应年份的谷歌高清影像进行目视解译和比对判读, 得到对应位置上的真实类型, 以此来验证 2013~2018 年提取的 NDISI 指数在经过阈值化处理之后数据的精度。验证精度如表 2 所示, 总精度均达到 80% 以上。

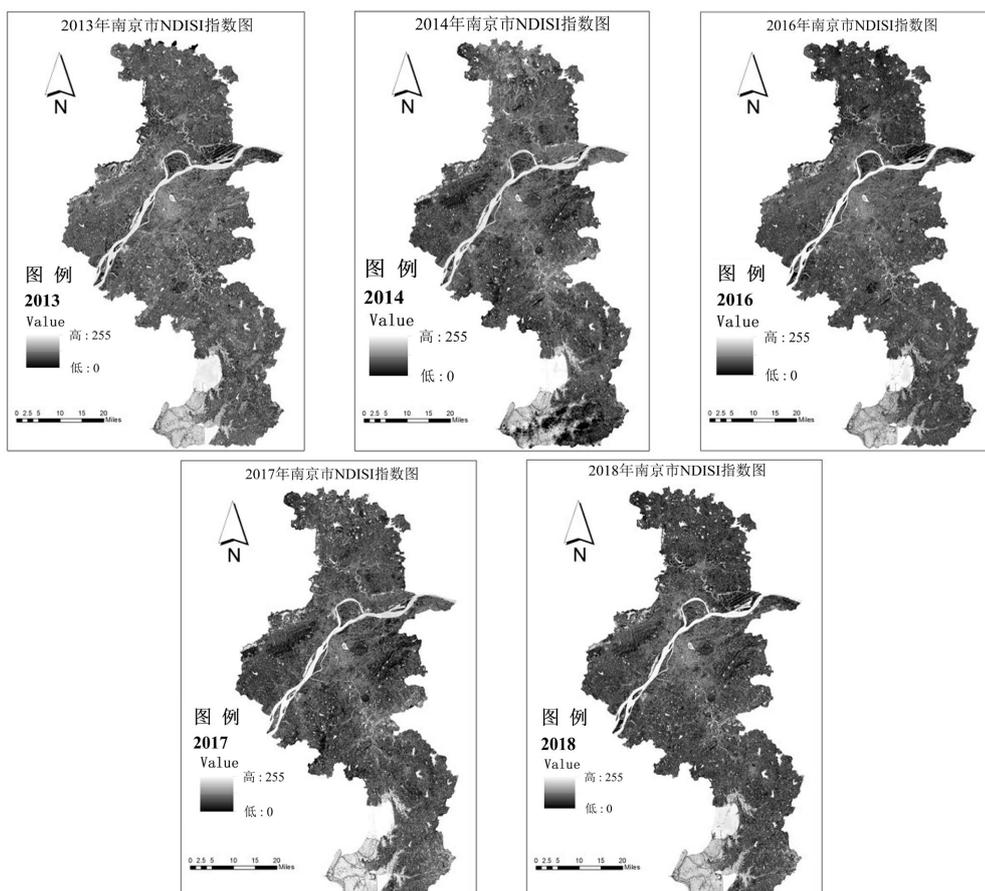


Figure 1. NDISI index map of Nanjing from 2013 to 2018
图 1. 2013~2018 年南京市 NDISI 指数图

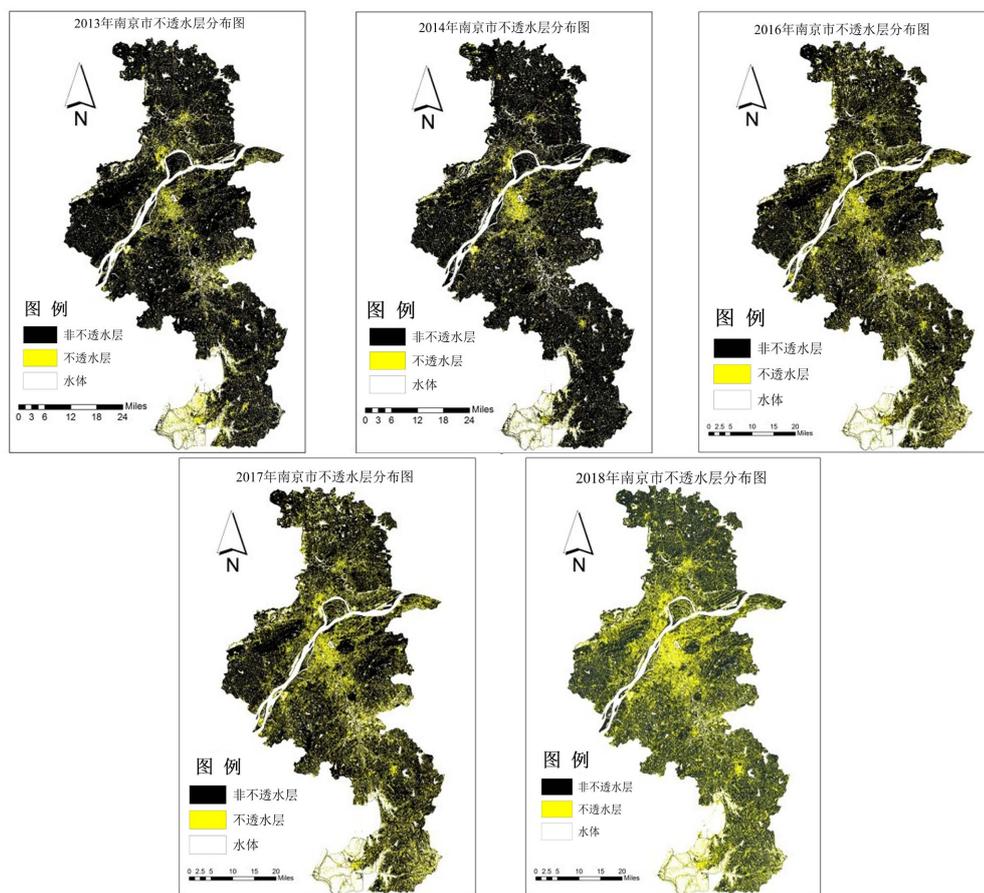


Figure 2. Distribution map of impervious layer in Nanjing, 2013~2018
图 2. 2013~2018 年南京市不透水层分布图

Table 2. Accuracy verification result
表 2. 精度验证结果

	使用者精度	生产者精度	总精度	Kappa 系数
2013	88.9%	87.0%	88.0%	0.762
2014	83.7%	86.7%	85.2%	0.689
2016	86.7%	91.5%	89.1%	0.779
2017	90.6%	95.6%	93.1%	0.833
2018	82.9%	81.1%	82.0%	0.655

4.2. 总体特征分析

为了更直观详细的观察不透水层在空间上的分布,以 2018 年为例,结合南京市行政区划矢量图,将 2018 年不透水层分布图分为南京市的 11 个行政区,将结果按不同行政区来显示,分别显示南京市区范围内各个区的不透水层面积所占的百分比,如表 3 所示。

通过表 3 可以发现,鼓楼区 and 秦淮区不透水层所占的城市土地面积明显要高于其他行政区。南京市的市中心一共由四个区组成,分别是鼓楼区、秦淮区、玄武区以及建邺区。从表中可以看出,四个组成市中心区县的不透水率均排在 11 个区县的前五。通过观察和横向比对所获得的 2018 年不透水层的比例

数据,可以发现在南京市的 11 个行政区县中,鼓楼区不透水层比例为 61.16%,所占的面积最大;六合区的不透水层比例为 20.71%,所占的面积最小。二者之间相差 40.45%,鼓楼区所占的不透水层面积是六合区的 2.95 倍。由此可以看出,例如鼓楼区这样位于集中进行社会活动发展的区域不透水层覆盖的面积最广泛,而六合区位于江苏北部,被称为是国家东部地区现代工业基地,华东地区先进制造业聚集区和科技创新基地的地区,其主要发展的是农业和工业,总面积中利用类型为耕地的土地占 43.12%,工矿用地占 17.58%,其中用于商业建设的土地利用面积远远小于位于市中心的鼓楼区。

Table 3. The percentage of impervious layer area in each district of Nanjing

表 3. 南京市各个区的不透水层面积所占的百分比

	非不透水层(m ²)	不透水层(m ²)	水体(m ²)	不透水层比例
鼓楼区	11,205,900	32,749,200	9,587,700	61.16%
秦淮区	14,519,700	28,708,200	5,283,000	59.18%
雨花台区	43,590,600	40,721,400	7,200,000	44.50%
玄武区	38,029,500	32,582,700	6,455,700	42.28%
建邺区	30,859,200	35,105,400	24,891,300	38.64%
栖霞区	178,870,500	120,994,200	72,656,100	32.48%
浦口区	545,869,800	258,844,500	99,761,400	28.62%
江宁区	1,013,364,900	446,454,000	155,887,200	27.63%
高淳区	281,908,800	207,333,900	310,994,100	25.91%
溧水区	626,411,700	260,538,300	173,397,600	24.57%
六合区	1,021,345,200	304,758,000	145,668,600	20.71%

4.3. 不透水层时空变化分析

4.3.1. 不透水层的时间变化分析

Table 4. The area and proportion of impervious layer in Nanjing from 2013 to 2018

表 4. 2013~2018 年南京市不透水层面积和所占比

年份	不透水层面积(m ²)	不透水率
2013	774,394,200	11.75%
2014	866,862,000	14.03%
2016	1,307,335,500	19.84%
2017	1,464,299,100	22.21%
2018	1,769,500,800	26.85%

依据 2013~2018 的不透水层提取结果,计算各年份城市不透水层的面积和所占比例(表 4, 图 3)。结果表明,随着时间的推移,不透水层的覆盖的面积也随之扩大。2013 年南京市的不透水层面积仅占总面积 11.75%,而 2018 年不透水层面积已经达到 26.85%。2018 年的不透水层面积是 2013 年的 2.29 倍。结合城市经济建设发展的状况可以发现,城市的飞速发展和人口迁移促使了城市的扩张,更多的土地被利用来建设成住房、金融中心或者商业建筑,城市不透水层的覆盖面积也不断扩大。

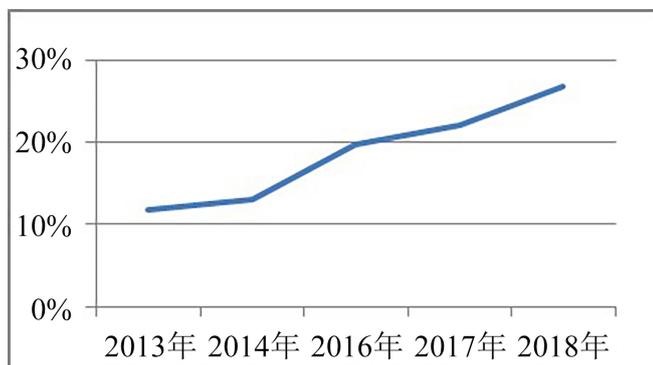


Figure 3. Change of proportion of impervious layer in Nanjing from 2013 to 2018

图 3. 2013~2018 年南京市不透水层比例变化

4.3.2. 不透水层的空间变化分析

Table 5. Ratio of impervious layer in Gulou District and Liuhe District in different years

表 5. 不同年份鼓楼区和六合区的不透水层比率

年份	鼓楼区		六合区	
	面积(m ²)	比例	面积(m ²)	比例
2013	12,231,900	22.85%	140,388,300	9.54%
2014	18,741,600	35.50%	157,131,000	12.99%
2016	24,363,000	49.63%	191,214,000	16.68%
2017	26,569,800	53.95%	297,325,800	20.20%
2018	28,885,500	61.16%	304,758,000	20.71%

为了直观地了解不透水层在南京市分布的状况以及 2013~2018 年各行政区内的变化状况, 结合对南京市 2018 年不透水层的研究状况, 确定了不透水层覆盖面积最大的行政区是位于市中心的鼓楼区, 而覆盖面积最小的是位于南京市最北部的工业基地六合区。由表 5 可知, 在研究区范围内, 鼓楼区的不透水层盖度最高, 比例达 61.16%, 六合区的不透水层盖度最低, 比例只有 20.71%。

按照时间序列纵向分析, 鼓楼区从 2013 年到 2018 年不透水层覆盖面积增长了 38.31%, 其中增长的最快的区间为 2013~2014 年, 增长了 12.65%。随着时间的推移, 不透水层增长的速度逐渐减缓, 由此证明南京市市中心由前期的飞速发展到后期的逐渐平稳建设, 是城市商业建筑、公共轨道交通逐渐发展完善的结果; 六合区从 2013 到 2018 不透水层覆盖面积增长了 11.17%, 其中增长的最快的区间为 2014~2016 年, 增长了 3.69%。六合区的不透水层覆盖面积增长速度相比于鼓楼区缓慢了许多, 而且到 2017~2018 年不透水层覆盖面积增长比例仅有 0.51%。

由此可以证明, 城市不透水层覆盖面积随时间推移而增长, 城市的建设发展就是促进不透水层覆盖面积扩大的最主要原因之一。位于南京市市中心的鼓楼区不透水面扩张速度远远大于位于南京市最北部的六合区, 说明了城市市中心是不透水层最容易扩张的区域。

4.4. 不透水层和地表温度相关性分析

为分析不透水层和地表温度的相关性, 将 NDISI 指数的计算结果归一化作为不透水层盖度, 并以 1 为一级进行重分类, 总共分为 10 级。统计每一级所对应的平均地表温度[20]其中地表温度反演结果如图 4 所示, 不透水层盖度统计结果如图 5 所示, 地表平均温度分布图如图 6 所示, 不透水面对应面积及其

对应的地表温度如表 6 所示。

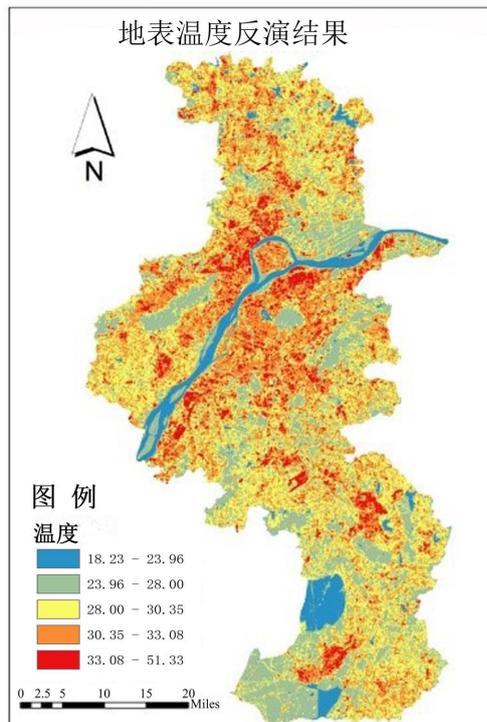


Figure 4. Surface temperature inversion results
图 4. 地表温度反演结果

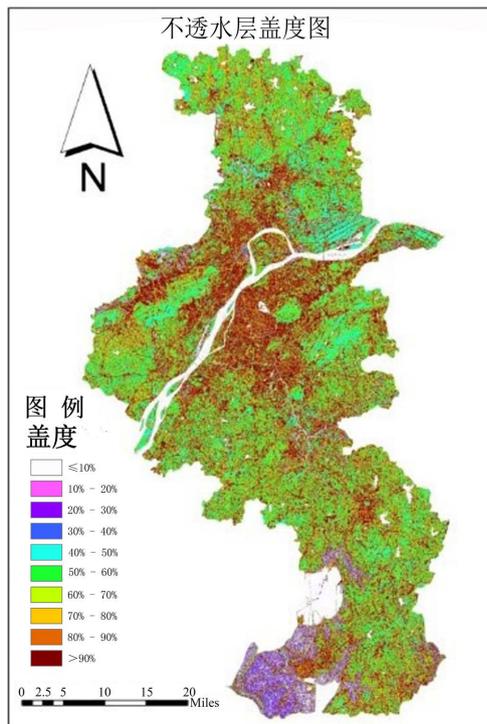


Figure 5. Impervious layer coverage classification
图 5. 不透水层盖度分级

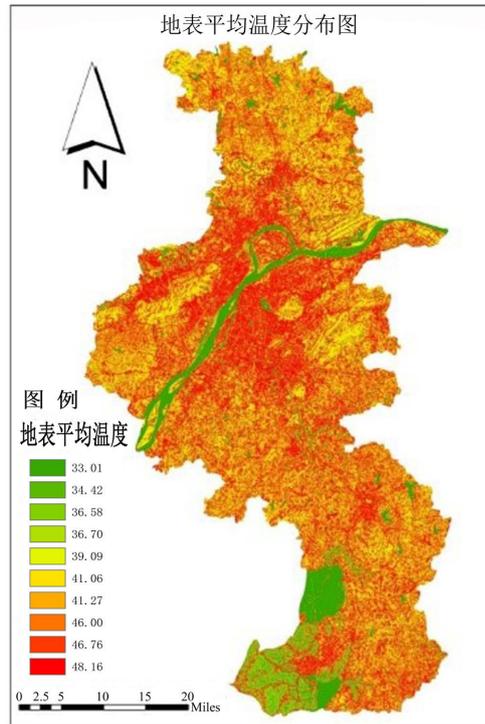


Figure 6. Map of mean surface temperature distribution
图 6. 地表平均温度分布图

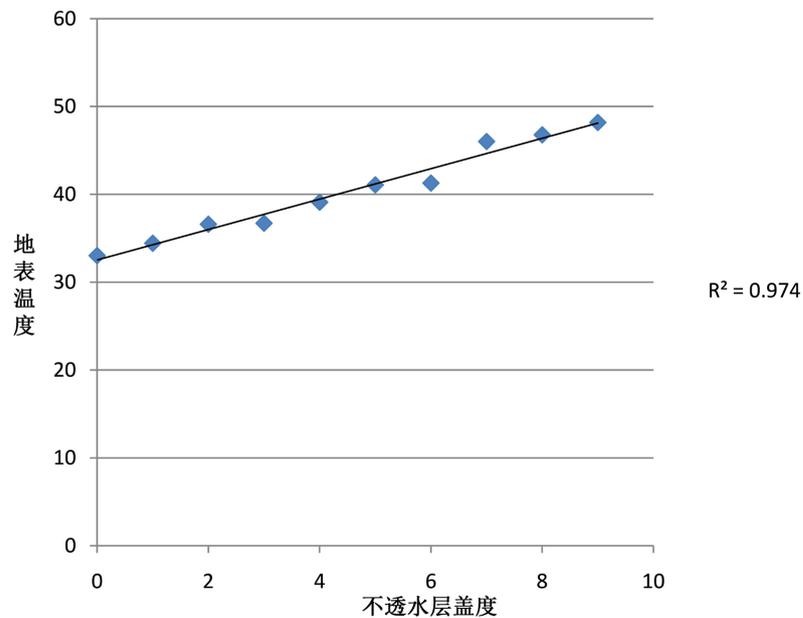


Figure 7. Correlation analysis diagram between the area occupied by impervious layer and surface temperature
图 7. 不透水层所占面积与地表温度的相关性分析图

将不透水层盖度和平均地表温度分别作为自变量和因变量进行相关性分析, 结果如图 7 所示。可以看出, $R^2 = 0.9744$, 证明线性拟合的效果较好, 不透水面与地表温度之间存在着相关性, 对地表温度的上升起着促进的作用, 且在高不透水层覆盖的地区表现得比不透水面盖度的地区更为突出。

Table 6. Impermeable surface area and its corresponding surface temperature
表 6. 不透水面对应面积及其对应的地表温度

不透水层面积分级	温度/°C
≤10%	33.01108
11%~20%	34.41853
21%~30%	36.58246
31%~40%	36.69606
41%~50%	39.08632
51%~60%	41.0614
61%~70%	41.26859
71%~80%	45.9986
81%~90%	46.76027
>90%	48.16331

5. 结论

本文通过归一化差值不透水面指数(Normalized Difference Impervious Surface Index, NDISI)提取城市不透水层方法,对南京市 2013~2018 年的城市不透水层覆盖面积进行时空变化分析及与地表温度的相关性分析,得到以下结论:

1) 对不透水层总体特征分析显示,2018 年南京市 11 个行政区县中,鼓楼区的不透水层覆盖面积最大,所占比例为 61.16%,六合区的不透水层覆盖面积最小,所占比例为 20.71%,二者相差 40.45%。

2) 对不透水层时间变化分析显示,2013~2018 年南京市的不透水层随时间的推移而逐渐扩张,2018 年的不透水层面积是 2013 年的 2.29 倍。由此可见近年来南京市城市化发展迅速,整体呈上升趋势。

3) 对不透水层空间变化分析显示,越靠近城市市中心的区县,不透水层所占面积比例越高;距离城市市中心越远的区县,不透水层所占的面积比例越低。在南京市 11 个行政区县中,组成市中心的秦淮区、鼓楼区、玄武区、建邺区均排在城市不透水层覆盖面积前五,而距离市中心最远的南京市最北部的工业中心六合区不透水层覆盖的面积最少。

4) 南京市在 2013~2018 的 6 年间,不透水层面积飞速增长,增加了近 2.29 倍。不透水面的增加主要通过大面积侵占植被和耕地来实现。根据相关性分析结果显示,不透水面与地表温度之间存在着相关性,对地表温度的上升起着促进的作用,且在高不透水层覆盖的地区表现得比低不透水面盖度的地区更为突出。

参考文献

- [1] 潘晨. 基于多源遥感数据的长三角地区不透水层提取及其不确定性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [2] 李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水层提取中的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(5): 569-577, 703.
- [3] Slonecker, E.T., Jennings, D.B. and Garofalo, D. (2001) Remote Sensing of Impervious Surfaces: A Review. *Remote Sensing Reviews*, **20**, 227-255. <https://doi.org/10.1080/02757250109532436>
- [4] 杨朝斌, 何兴元, 张树文, 等. 基于线性光谱模型的城市不透水面遥感估算[J]. 地球环境学报, 2016, 7(1): 77-86.
- [5] Yuan, F. and Bauer, M.E. (2007) Comparison of Impervious Surface Area Andnormalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **106**,

- 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- [6] 王浩, 卢善龙, 吴炳方, 等. 不透水面遥感提取及应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 327-336.
- [7] 崔秋洋, 潘云, 杨雪. 基于 Landsat 8 遥感影像的北京市平原区不透水层盖度估算[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 89-92.
- [8] 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.
- [9] 黄曦涛, 李怀恩, 张瑜, 等. 利用影像纹理和阴影信息提取城市不透水面的方法——以咸阳市为例[J]. 测绘通报, 2016(5): 80-83.
- [10] 朱爽, 崔有祯, 张锦水. 利用复合光谱纹理特征进行城市边缘区不透水层提取[J]. 测绘通报, 2016(11): 26-30.
- [11] Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. Routledge, London.
- [12] 张文婷, 金可懿, 宋开山, 等. 基于多端元混合光谱模型与 Landsat 影像的北京不透水层动态研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 321-330.
- [13] 陈婉佳, 高孝杰, 刘蓉蓉, 等. 基于 Landsat 8 数据的城市不透水面及其与热环境的关系研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(4): 92-95.
- [14] 张旸, 胡德勇, 陈姗姗. 北京城区不透水地表盖度变化及对地表温度的影响[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1504-1513.
- [15] Roy Sen, S. and Yuan, F. (2009) Trends in Extreme Temperatures in Relation to Urbanization in the Twin Cities Metropolitan Area, Minnesota. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 669-679. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1983.1>
- [16] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(11): 1150-1153, 1211.
- [17] 葛壮, 李苗. 基于 NDISI 的七台河市不透水面信息提取[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2015, 31(3): 129-131.
- [18] 高学武, 李茂林, 曹艳, 等. 基于遥感的合肥市不透水层覆盖度研究[J]. 商丘师范学院学报, 2018, 34(9): 52-55.
- [19] Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., et al. (2010) Remote Sensing of the Urban Heat Island Effect Across Biomes in the Continental USA. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- [20] 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.