

Impact of Urbanization in Angkor on the Preservation of the World Cultural Heritage

Bin Quan^{1,2*}, Xiangxiang Fu¹, Jie Chen¹, Wei He¹, Yuanhong Zeng¹, Ying Li¹, Zhi Huang¹, Songxiu Zhou¹

¹College of City and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang Hunan

²HIST Hengyang Base of UNESCO, Hengyang Normal University, Hengyang Hunan

Email: *quanbin308@aliyun.com

Received: Apr. 21st, 2020; accepted: May 13th, 2020; published: May 20th, 2020

Abstract

With the accelerating process of urbanization, rapid urban expansion and irrational development activities seriously threaten the conservation and development of World Heritage properties near cities. Against this background, this paper uses Sentinel-2A satellite remote sensing images as the data source and GIS methods to extract the land use change information of the World Heritage Angkor Heritage Site from December 31, 2015 and December 20, 2017, and analyzes the impact of various land transfer changes and urban scale expansion on the conservation of the site based on transfer matrix method and land use change mapping. The results show that the area of water, cultivated land and construction land in the study area has increased; the area of forested land has decreased and the decrease is mainly concentrated in the vicinity of settlements and monuments; the construction land around the heritage site is mainly converted from cultivated land and some of it has already posed a threat to the ecological environment around the heritage site. In 2017, the intrusion rate of construction land in the 1 km buffer zone of the heritage site has reached 10.7%, which is mainly affected by the expansion of construction land in the north-south direction; the average annual rate of construction land intrusion is 2.3 km²/year; at this rate, the heritage site will be completely destroyed within 40 years. Therefore, Angkor needs to be planned and protected in a timely manner.

Keywords

Urbanization, Cultural Heritage, Sentinel-2A, Angkor

吴哥城市化及其对其周边世界文化遗产保护的影响研究

全 斌^{1,2*}, 付翔翔¹, 陈 洁¹, 贺 伟¹, 曾远红¹, 李 颖¹, 黄 芝¹, 周松秀¹

*通讯作者。

文章引用: 全斌, 付翔翔, 陈洁, 贺伟, 曾远红, 李颖, 黄芝, 周松秀. 吴哥城市化及其对其周边世界文化遗产保护的影响研究[J]. 城镇化与集约用地, 2020, 8(2): 70-84. DOI: 10.12677/ulu.2020.82008

¹衡阳师范学院, 城市与旅游学院, 湖南 衡阳

²衡阳师范学院, HIST衡阳分中心, 湖南 衡阳

Email: quanbin308@aliyun.com

收稿日期: 2020年4月21日; 录用日期: 2020年5月13日; 发布日期: 2020年5月20日

摘要

随着城市化的进程不断加快, 城市的快速扩张和不合理开发等活动严重威胁到了城市附近世界遗产的保护与发展。在此背景下, 本文以Sentinel-2A卫星遥感影像为数据基础, 采用GIS方法, 提取世界遗产吴哥遗迹群2015年12月31日和2017年12月20日两期土地利用变化信息, 并基于转移矩阵方法和土地利用变化图谱分析各类土地转移变化和城市规模扩张对遗迹保护的影响。结果表明: 研究区内水域、耕地和建设用地面积增多; 林地面积减少, 减少的面积主要集中于居民点和遗迹附近; 遗产地周边的建设用地主要由耕地转化而来, 部分已经对遗产地周边生态环境构成威胁。2017年遗迹群1 km缓冲区内建设面积侵入率已经达到10.7%, 主要受到了南北方向建设用地扩张影响, 年均建设用地侵入速率为2.3平方千米/年, 按照这样的速度, 遗迹群将于40年内被全部侵占损毁。因此, 需要及时对吴哥遗迹进行规划保护。

关键词

城市化, 文化遗产, Sentinel-2A, 吴哥

Copyright © 2020 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

随着社会发展, 城市用地扩张日益加快, 由城市化导致的土地利用变化过程和驱动力因子成为国际上研究的热点之一[1] [2] [3]。国外关于土地利用方面的研究起步较早, 空间尺度基本为全球或是全国, 并且研究的内容更多地集中在对土地利用结构动态变化的监测、分析和模拟上[4] [5] [6]。20 世纪初, 国内开始关于土地利用的研究。20 世纪中期以土地利用的调查研究为主, 但是 20 世纪后期开始运用新的技术与方法, 土地利用研究进入了新的阶段, 对国内各个地区的土地利用变化案例进行研究, 分析土地利用/土地覆被变化的结构、速率、自然和人为因素[7] [8] [9] [10]。

柬埔寨吴哥遗迹群, 是柬埔寨吴哥王朝的都城遗址, 是世界文化遗产之一[11]。自 1993 年以来, 已有 20 多个国家加入了柬埔寨政府和 UNESCO 发起的国际计划, 对吴哥遗址进行修复和保护, 现已取得较好成效。但由于吴哥遗址知名度提高, 旅游业快速发展, 住房和道路等建设用地激增, 各种资源快速消耗, 林地减少, 生态环境受到破坏, 从而进一步影响到遗址周边环境[12] [13]。

当前国际上多以历史进程和艺术价值的角度去讨论吴哥遗址现状和保护的必要性, 以遥感技术为支撑对吴哥城市生态环境状况、文化遗产保护等方面的深入研究尚不多见[14]。孙克勤对柬埔寨吴哥遗产地存在的问题和保护对策进行了探讨, 其中包括吴哥世界遗产地的保护历史和现状问题, 并以此提出新的保护措施[15]。廖凯涛等基于转移矩阵对近 30 年的遥感影像对吴哥遗产地土地利用/土地覆盖变化进行了

分析[16]。陈富龙使用雷达干涉模型对吴哥遗址进行研究,发现地下水位的季节性变化和石料的热力学因素可能会引发和/或加剧古迹的恶化[17]。洪天华等对吴哥世界文化遗产地周边环境进行了基于空间影像分类的土地利用变化分析,综合研究了吴哥遗产地及其周边地表形变与地下水位、地质结构等因素的关系[18]。

以往的研究大多以 TM 影像为主,高分辨率影像数据使用较少,这与遥感技术的发展与数据获取的难易有关。Sentinel-2A 卫星数据空间分辨率为 10 m,一幅宽度为 290 km,重访周期为 5 天,具有高分辨率、大范围、高重访周期等优势。然而,以往在该研究区上使用哨兵 2A (Sentinel-2A)影像数据结合地理信息图谱去对土地利用变化进行研究的案例目前还没有报道。因此,本文基于 2015~2017 年 Sentinel-2A 遥感影像数据,建立土地利用的数学模型,对吴哥土地利用变化情况进行分析。旨在对吴哥遗产地土地利用变化进行更直观和准确的刻画,并分析其对吴哥遗址的环境影响,给吴哥遗址的保护提供科学的参考和依据。

2. 研究区概况

吴哥遗迹群位于首都金边西北约 310 公里处,南距暹粒市 6 公里。研究区位于柬埔寨暹粒省吴哥遗迹群北部,地理范围为 13°36'N~13°57'N、103°69'E~104°06'E,总面积 902.1 平方千米(如图 1 所示)。主要包括吴哥王城、圣剑寺、龙蟠水池以及皇家浴池等遗迹。

该区域位于低纬度地区,是典型的热带季风气候区,高温多雨,全年降雨量达 1800 mm,月均气温 30°C。11 月至 4 月为冬季,凉爽干旱,受东北季风影响,平均气温为 25°C~32°C;5 月至 10 月为夏季,酷热潮湿,受到西南季风的影响,平均气温为 33°C;其中 12 月是旱季,平均气温为 20°C~31°C,多年月均降水总量为 10 mm。研究区的土地利用类型主要包括森林、农田、建设用地和水域。

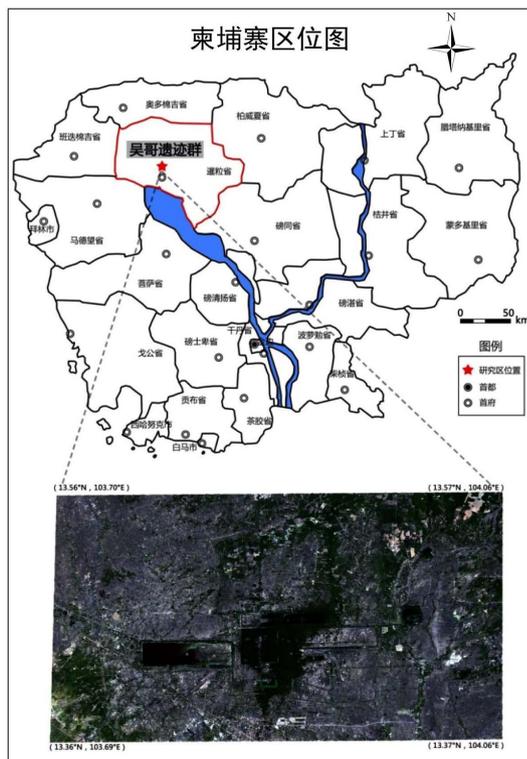


Figure 1. Map of the geographical location of the study area
图 1. 研究区地理位置图

3. 研究方法

3.1. 数据来源

本文采用 Sentinel-2A 的 2015 年 12 月 31 日和 2017 年 12 月 20 日的遥感影像，数据的空间分辨率为 10 m，坐标系为 WGS84。数据可从欧空局哨兵 2 卫星网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)注册免费获取。Sentinel-2 卫星于 2015 年 6 月 23 日发射，是“全球环境与安全监测”计划的第二颗卫星。哨兵 2A 卫星携带一枚多光谱成像仪，可覆盖 13 个光谱波段。它可用于观测地球土地覆盖变化情况。

3.2. 技术路线

本文以遥感技术处理为主，如图 2 所示，使用 ENVI 遥感图像处理平台和 ArcGIS 地理信息系统平台，以 2015 年 12 月 31 日和 2017 年 12 月 20 日两期 Sentinel-2A 影像为基础数据源，柬埔寨吴哥遗迹群为研究区。在 ENVI5.4.1 软件的支持下，先对两期影像进行预处理，主要包括辐射定标、大气校正、图像裁剪和监督分类等步骤，对吴哥遥感影像进行解译和分类提取，得到 2015 年和 2017 年转移矩阵和土地利用变化图谱。利用缓冲区分析和重心转移分析，并结合相关资料对吴哥遗迹群土地利用变化情况和城市扩张对吴哥文化遗产的影响进行深入分析，最后提出吴哥文化遗产的保护建议。

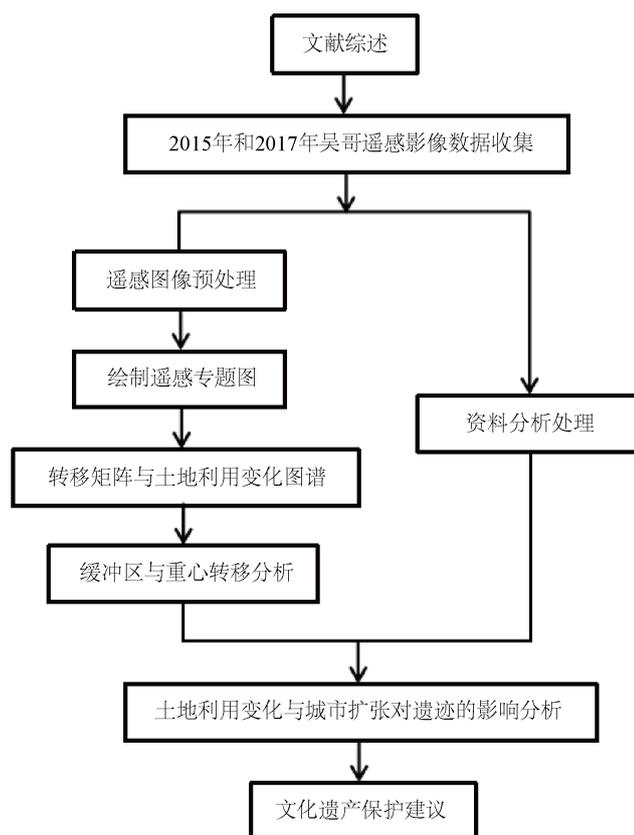


Figure 2. Technical scheme

图 2. 技术路线图

3.3. 数据处理

本文使用 ENVI5.4.1 对吴哥地区的数据进行预处理操作。由于哨兵 2 数据的特殊性，哨兵 2A 数据需

要在 SNAP 中进行相应的操作, 将其转为 ENVI 格式才能将数据加载进 ENVI 软件中进行相应的处理。ENVI5.3 版本仅能打开 2016 年 12 月之前获取的数据。而 ENVI5.4 版本可以打开所有格式的哨兵 2 数据。ENVI5.4.1 于 2017 年 8 月份正式发布, 较于以往的旧版上新版增加了一些新功能。考虑到吴哥所处热带季风气候区, 春夏季易发生洪水等自然灾害, 不利于后期影像的监督分类和土地利用现状图的制作与分析, 所以所采集的两期影像时间均为冬季的 12 月份。在进行监督分类时, 为了提高每个像元对于各类别归属概率, 提高分类精度, 每一种地物的样本数不少于 20 个。

3.3.1. 辐射定标、大气校正

Sentinel-2 L1C 是经过几何精校正的大气表观反射率产品。因为旧版本存在问题, 用 ENVI 中的 Radiometric Calibration 工具进行辐射定标结果是不正确的。ENVI5.4 版本新增 Sentinel-2 L1C 辐射率定标工具。在 ToolBox 中, 启动/Extensions/Radiance Sentinel-2 L1C 工具, Input Sentinel-2 XML: 加载影像解压后的.xml 文件, 在加载过程中会遇到文件所在的路径过长, 将文件名重新命名后即可导入。勾选 Output Four 10m Bands。Scale Factor 是缩放系数, 默认值 0.1。Resample Method 为重采样方法, 默认为 Bilinear。选择输出文件路径进行处理。

使用大气校正工具(FLAASH Atmospheric Correction)消除大气和光照等因素对地物反射的影响。启动 FLAASH Atmospheric Correctio 工具, 选择辐射定标结果数据。设置 Single scale factor 为 1。Sensor Type: 选择 UNKNOWN-MSI。Sentinel-2 数据不能进行水汽反演(Water Retrieval), 但是改变传感器可以强制进行水汽反演。Sensor Altitude 是设置影像区域的平均地面高程。Water Retrieval 默认为 No。Aerosol Retrieval 则是根据海陆类型, 选择相应气溶胶模型, 本文选择的是 2-Band (K-T)。然后进行多光谱(Multispectral Settings)设置。滤波函数文件需要手动选择光谱响应函数。K-T 反演选择默认模式。若 Aerosol Retrieval 为 None, 则不需要设置参数。Filter Function File: 若 Water Retrieval 面板未选择光谱响应函数, 此处需手动选择, 同 Water Retrieval 中 Filter Function File 一样的操作步骤, 设置好参数后进行处理。

3.3.2. 图像裁剪

本文以在柬埔寨吴哥遗迹群划定的方形边界为研究区, 需要以边界的 shp 文件对图像进行规则分幅裁剪。裁剪结果如图 3 所示。

3.3.3. 监督分类

在 ENVI5.4.1 中打开图像裁剪后得到的 2015 年和 2017 年的研究区图像, 采用最大似然法进行监督分类的操作。通过波段之间的组合成标准假彩色影像, 在此基础上建立训练样本, 通过目视不同地物之间的不同色调及其纹理特征建立解译标志, 用最大似然法对影像进行监督分类。结合吴哥地区的实际研究区域土地利用状况, 将土地利用类型分为 4 个一级地类。分别为水域、林地、耕地和建设用地。如表 1 所示。

3.4. 精度评价

分类结束后, 以目视解译获得地表真实感兴趣区域来计算混淆矩阵, 对分类结果的准确性进行评价。2015 年分类结果的总体分类精度为 Overall Accuracy = (9667/9952) 97.1363%。Kappa 系数为 0.9588。水域的漏分误差为 $2/2342 = 0.08\%$; 林地为 $1/3298 = 0.03\%$; 耕地为 $61/3548 = 1.72\%$; 建设用地为 $221/674 = 32.79\%$; 2015 年建设用地漏分错分的概率较高, 主要错分在耕地的土地类型中。2017 年分类结果的总体分类精度为 Overall Accuracy = (13105/13457) 97.3843%。Kappa 系数为 0.9624。水域的漏分误差为 $0/4927 = 0$; 林地为 $17/3474 = 0.49$; 耕地为 $134/4200 = 3.19\%$; 建设用地为 $201/856 = 23.48\%$ 。

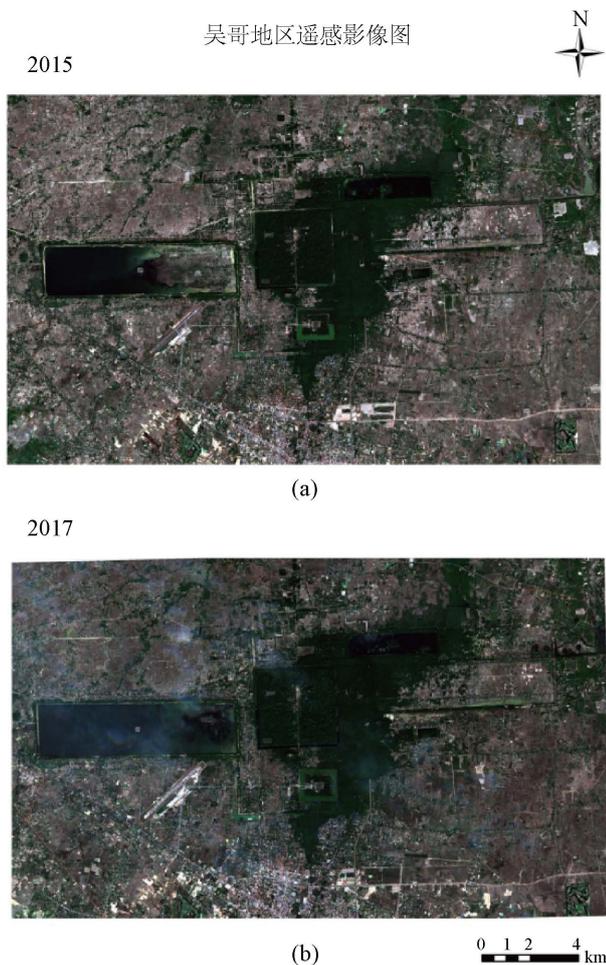


Figure 3. Remote sensing image of Angkor region. (a): Angkor region in 2015, (b): Angkor region in 2017

图 3. 吴哥地区遥感影像图。(a): 2015 年吴哥地区, (b): 2017 年吴哥地区

Table 1. Cambodian Angkor image interpretation characteristic symbol

表 1. 柬埔寨吴哥影像解译标志

| 土地类型 | 影像 | 影像解译特征(TM 8, 4, 2 假彩色合成) | 土地利用编码 |
|------|---|-------------------------------------|--------|
| 水域 |  | 墨蓝色或蓝色, 片状或线状, 形状不规则, 部分与河流相连 | 1 |
| 林地 |  | 深红色或暗红色, 粗糙, 形状不规则, 分布在山区或遗迹群附近 | 2 |
| 耕地 |  | 灰褐色或红褐色, 形状规则, 纹理清楚, 在居名点或交通线路旁大片分布 | 3 |
| 建设用地 |  | 白色或蓝紫色, 形状规则, 面积较小, 与线状交通线路相连 | 4 |

3.5. 土地利用现状图

将分类处理后的 2015~2017 年柬埔寨吴哥遥感影像加载到 ArcGIS10.2 中, 在图层属性符号中选择唯一值, 加载土地类型, 分别为其选择合适的颜色, 设置图例和指北针等要素, 导出成图, 如图 4 所示。

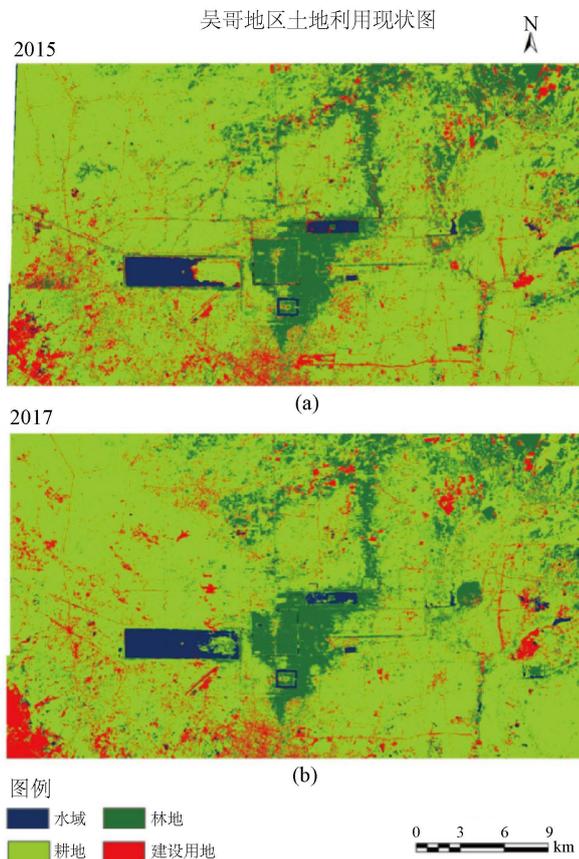


Figure 4. Land use status mapa: (a): Angkor area land use map in 2015; (b): Angkor area land use map in 2017

图 4. 土地利用现状图。(a): 2015 年吴哥地区土地利用图; (b): 2017 年吴哥地区土地利用图

3.6. 土地利用变化图谱

将执行分类后的矢量数据转换为栅格数据，格网单元为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ，格网单元的 Value 值为一位数，代表不同的土地利用类型。利用栅格计算器，对吴哥 2015 年和 2017 年的数据进行叠加分析，生成反映土地利用变化与趋势的土地利用图谱。因土地利用变化分为转入和转出，所以可以得到增势图谱系列图和减势图谱系列图。按照表 2、表 3，将映射表中的图谱单元归类编码与数据属性表相对应，赋值到数据属性表中，然后更改图层属性，最终得出吴哥 2015~2017 年土地利用变化图谱。

Table 2. Land-use change gain mapping unit representation table

表 2. 土地利用变化增势图谱单元映射表

| 土地利用变化类型 | 图谱单元 | 图谱单元归类编码 |
|----------|----------------|----------|
| 不变区域 | 11, 22, 33, 44 | 1 |
| 新增水域 | 21, 31, 41 | 2 |
| 新增林地 | 12, 32, 42 | 3 |
| 新增耕地 | 13, 23, 43 | 4 |
| 新增建设用地 | 14, 24, 34 | 5 |

Table 3. Land use change loss mapping unit representation table
表 3. 土地利用变化减势图谱单元映射表

| 土地利用变化类型 | 图谱单元 | 图谱单元归类编码 |
|----------|----------------|----------|
| 不变区域 | 11, 22, 33, 44 | 1 |
| 减少水域 | 12, 13, 14 | 2 |
| 减少林地 | 21, 23, 24 | 3 |
| 减少耕地 | 31, 32, 34 | 4 |
| 减少建设用地 | 41, 42, 43 | 5 |

3.7. 重心模型

重心模型常用于城市演变、土地利用类型变化研究，是描述地理对象空间分布的重要指标之一，能够用来反映区域地理对象的时空演化[19] [20]。

首先，根据缓冲区分析得到 16 个遗址一千米缓冲区内的建设用地面积。然后，打开 ArcGIS10.2，利用空间统计工具中的平均中心工具，计算得到遗迹群的几何中心。再利用重心转移计算公式，求出遗迹群的建设用地重心。重心转移模型为：

$$X^t = \sum(M_i^t x_i) / \sum M^t, \quad Y^t = \sum(M_i^t y_i) / \sum M^t \quad (1)$$

其中 X^t 、 Y^t 分别表示计算区域中心的经、纬度； t 为计算年份； x_i 、 y_i 分别表示次级区域中心经、纬度； M_i 表示次级区域的建设用地面积。

4. 结果

4.1. 柬埔寨吴哥土地利用变化情况

4.1.1. 吴哥 2015~2017 年土地利用现状

土地利用结构是指研究范围内各个地类面积占总面积的比重。通过这些数值分析研究区域的主要用地类型，以及各地类的总面积变化情况。表 4 表示了 2015 年到 2017 年这段时间范围内吴哥地区的土地利用结构的变化。从表中可以看出，吴哥地区以耕地为主，在 2015 年和 2017 年分别占了 72.5% 和 73.2%，林地、建设用地次之，水域面积最少。对比各类土地利用类型，林地的变化最大，两年间减少了 18.3 km²，其次是建设用地，增加了 7 km²，然后是耕地减少了 6.3 km²，变化最小的是水域，增加了 5 km²。

Table 4. Angkor legacy group land use structure in 2015-2017

表 4. 吴哥遗迹群 2015~2017 年土地利用结构

| 土地利用类型 | 2015 年 | | 2017 年 | |
|--------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | 面积(km ²) | 占面积比(%) | 面积(km ²) | 占面积比(%) |
| 水域 | 23.9 | 2.6 | 28.9 | 3.2 |
| 林地 | 134.9 | 15.0 | 116.6 | 12.9 |
| 耕地 | 653.6 | 72.5 | 659.9 | 73.2 |
| 建设用地 | 89.7 | 9.9 | 96.7 | 10.7 |

4.1.2. 土地利用变化转移矩阵分析

由表 5 转移矩阵中的各项地类的转移数据来看，吴哥地区在 2015 年到 2017 年这段时间内各个地类

之间有明显的相互转化,其中耕地和建设用地的变化量较大。从耕地的转化程度来看,87%的面积未变,变化的面积中最大的一部分转化成了建设用地,耕地转化为其他地类的面积约为 84.7 km², 占了总面积的 9%; 建设用地仅有 56.9%的面积未发生变化,转化为其他地类的面积约为 55 km², 大部分都是转换成了耕地面积,但是建设用地总体面积也增加了; 水域转化的大部分也是变成了耕地,占 16.7%; 林地有 71.2%的面积未发生变化,转化的面积中,大部分转化成了耕地,占 26.7%。总的来说,2015 年到 2017 年,吴哥地区水域面积增多,建设用地增加,林地面积减少,都主要转化为耕地; 耕地面积增多,增加的面积主要来自于林地和建设用地,耕地主要转化为建设用地。

Table 5. Angkor legacy group land use transfer matrix in 2015-2017

表 5. 吴哥遗迹群 2015~2017 年土地利用转移矩阵

| 2015 年 | 2017 年 | | | | 2015 年合计 |
|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------|
| | 水域 | 林地 | 耕地 | 建设用地 | |
| 水域 | 18.1 (75.6) | 0.4 (1.5) | 4.0 (16.7) | 1.5 (6.3) | 23.9 |
| 林地 | 0.2 (0.1) | 96.1 (71.2) | 36.1 (26.7) | 2.6 (1.9) | 134.9 |
| 耕地 | 6.9 (1.1) | 19.0 (2.9) | 568.8 (87.0) | 58.8 (9.0) | 653.6 |
| 建设用地 | 3.7 (4.1) | 1.2 (1.3) | 51.0 (56.9) | 33.8 (37.7) | 89.7 |
| 2017 年合计 | 28.9 | 116.6 | 659.9 | 96.7 | |

注: 括号外数值为 2015 年某类土地转换为 2017 年同类或其他土地类型的面积(km²), 括号内数值为该类土地转换面积与该类土地 2015 年总面积之比(%).

4.1.3. 土地利用变化图谱分析

如图 5 所示, 土地利用增势图谱中, 除大部分是不变区域外, 较为突出的是新增耕地和新增建设用地, 分别占区域总面积的 10.1%和 7.0%; 新增耕地较为分散, 主要发生在研究区的东北处和西部地区, 且分布在交通线路和居民点附近; 而新增建设用地则较为集中, 主要集中在研究区西部, 其余零星分布在道路交通线路两侧。新增水域主要集中在遗迹群附近。

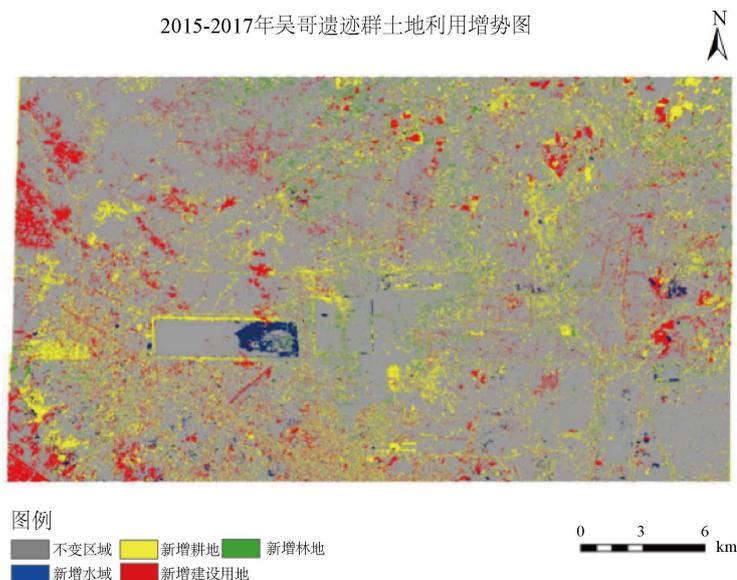


Figure 5. Land use gain map of Angkor Heritage Group, in 2015-2017

图 5. 2015~2017 年吴哥遗迹群土地利用增势图

从图 6 表示的 2015~2017 年减势图中可见, 79.5% 为不变区域, 减势较为突出的为林地、耕地和建设用地, 分别占区域总面积的 4.3%, 9.4% 和 6.2%。其中林地主要减少于居民点和古遗迹附近, 说明人类活动和当地的开发建设对林地造成了一定的影响; 耕地减少于研究区中部、西部和东北处; 建设地与耕地相互转化。

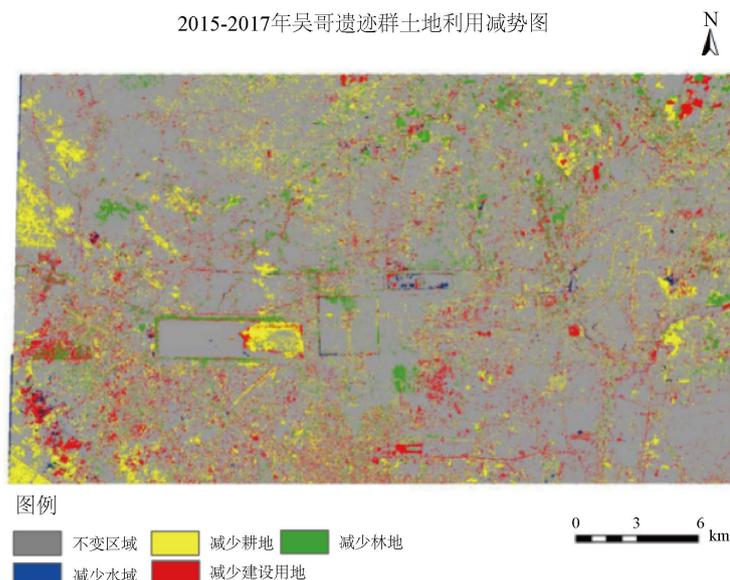


Figure 6. Land use loss map of Angkor Heritage Group, in 2015-2017

图 6. 2015~2017 年吴哥遗迹群土地利用减势图

4.2. 城市化对吴哥文化遗产的影响

4.2.1. 建设用地转移分析

集中提取吴哥遗迹群主要组成部分的遥感影像数据, 如图 7 红色虚线框所示。将 2015 年与 2017 年建设用地进行转化对比, 分析吴哥建设用地扩张趋势以及建设用地扩张对文化遗产的影响。从图 8 可见, 2015~2017 年吴哥遗迹群范围内建设用地面积变化的总体趋势为增多, 增多的方式是以村落或是城市为中心, 向外辐射式扩张, 沿着道路交通线路周边的建设用地面积增加的更为显著。增加的建设面积以包围之势向遗迹群靠近, 部分已经侵占了遗迹群的边缘, 主要受到了西北方向和东南方向建设用地扩张影响。

增加的建设面积以包围之势向遗迹群靠近, 部分已经侵占了遗迹群的边缘, 主要受到了西北方向和东南方向建设用地扩张影响。增加的建设用地面积主要由耕地转化而来, 水域和林地转化面积较少。由林地转化为建设用地的面积主要分布在遗址周边, 其余分散在原有建设用地边缘, 说明吴哥经济发展的同时在快速消耗着当地的森林资源。由耕地转化的面积主要分布在暹粒市以及各个村庄的周边, 集中在道路沿边, 说明当地人口增加, 对于道路建设, 基础设施和住房的需求也在日益上涨, 逐渐侵占了城市或村庄附近的农田。吴哥遗产地建设用地增多最主要的原因是当地旅游业的发展。受到当地经济和政策的影响, 遗迹群周边人类活动增加, 已经对遗迹群的生态环境造成了一定的影响。

4.2.2. 建设用地侵入率分析

如图 9 所示, 在 ArcGIS10.2 中以吴哥遗迹群主要的 16 个遗迹点为核心, 利用分析工具建立缓冲区, 线性单位设定为 1 千米, 执行后得到遗迹群 1 千米缓冲区矢量文件。用缓冲区矢量文件分别与 2015 年和

2017年用地分类tif文件进行裁切,得到2015年和2017年建设用地侵入情况,并以裁切得到的栅格数据为基础,计算2015年和2017年建设用地侵入率。

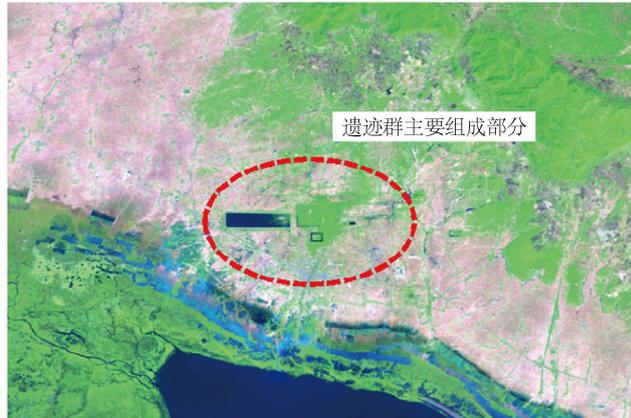


Figure 7. Location of the Angkor site group
图 7. 吴哥遗迹群位置示意图

2015-2017年吴哥遗迹群其他用地转移为建设用地图

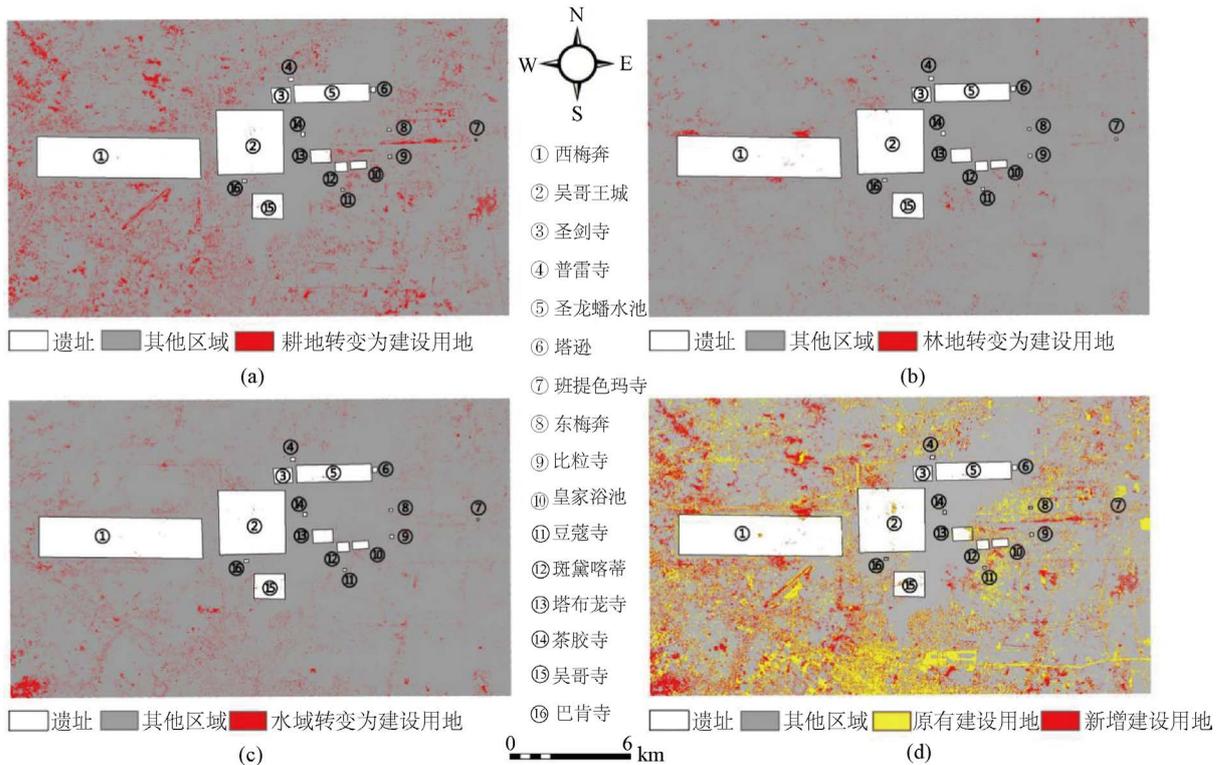


Figure 8. Map of the conversion of other sites in the Angkor Legacy Cluster to construction. (a) cultivation land to construction land; (b) forest land to construction land; (c) watershed to construction land; (d) construction land conversion map in 2015-2017

图 8. 吴哥遗迹群其他用地转移为建设用地图。(a) 耕地转变为建设用地; (b) 林地转变为建设用地; (c) 水域转变为建设用地; (d) 2015~2017 建设用地转化图

遗迹群缓冲区总面积为 103.8 km², 2015 年缓冲区内建设用地面积为 6.5 km², 2015 年建设用地侵入

率 = 2015 年缓冲区内建设用地面积/缓冲区总面积 * 100% = 6.3%; 2017 年缓冲区内建设用地面积为 11.1 km², 2017 年建设用地侵入率 = 2017 年缓冲区内建设用地面积/缓冲区总面积 * 100% = 10.7%; 年均建设用地侵入速率 = (2017 年缓冲区内建设用地面积 - 2015 年缓冲区内建设用地面积)/(2017 年 - 2015 年) = 2.3 平方千米/年。在 2015~2017 年期间, 侵入率呈上升趋势。

遗迹群周边建设用地扩张已经对其生态环境造成影响, 遗产群中部受到的影响较小, 而西部和东南部则尤为突出。在不考虑其他因素影响的情况下, 建设用地还将以每年 2.3 平方千米的速度加深对遗迹群周边其他用地的侵占, 遗迹群预计在 40 年内被侵占损毁。因此, 对吴哥文化遗产的保护已经刻不容缓。

2015-2017年吴哥遗迹群建设用地侵入情况分析图

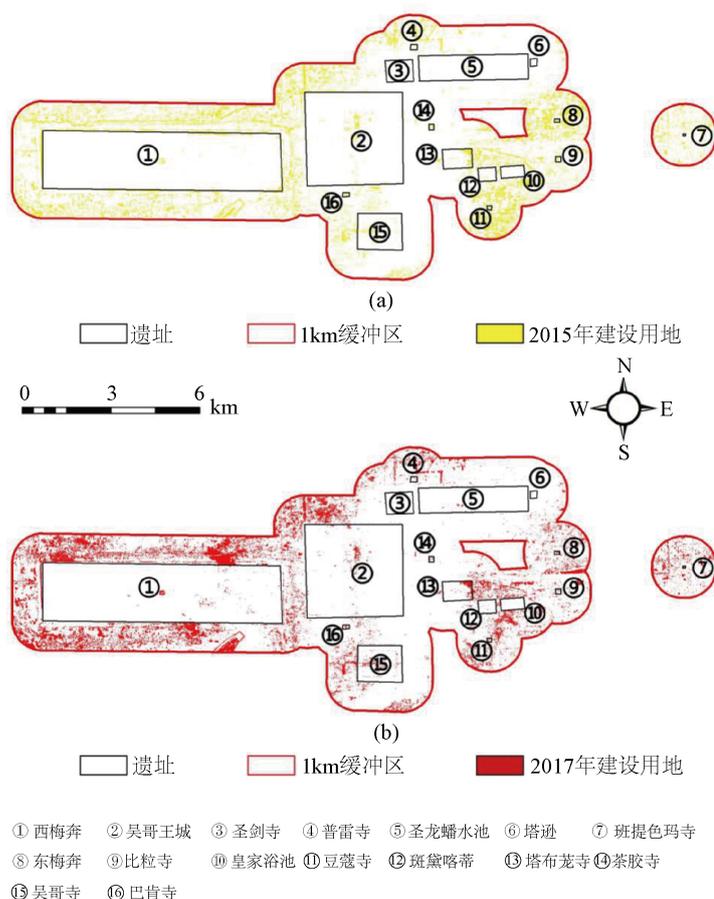


Figure 9. Analysis of construction site incursions in the Angkor Monuments Cluster, 2015-2017. (a) Construction site incursions in the buffer zone in 2015; (b) Construction site incursions in the buffer zone in 2017

图 9. 2015~2017 年吴哥遗迹群建设用地侵入情况分析图。(a) 2015 年缓冲区内建设用地侵入情况; (b) 2017 年缓冲区内建设用地侵入情况

在建立缓冲区的基础上, 选择 4 个面积较大的遗址, 对其单独进行分析, 以东、南、西、北、东北、西北、东南、西南八个方位对其一公里缓冲区进行划分, 分别计算八个区域中 2017 年和 2015 年入侵面积差额与时间之比, 在 Excel 中得到遗址的入侵速率玫瑰图(图 10)。

1) 西梅奔: 位于遗迹群的西边, 在单独分析的四个遗址中侵入速率最快, 主要受到了南北方向的建设用地扩张压力, 正南方的建设用地侵入速率最大, 为 0.4 平方千米/年, 需要及时加以控制, 否则将 40

年内完全侵占遗址用地，对遗址景观环境造成破坏；

2) 吴哥王城：吴哥王城侵入速率较为和缓，主要受到来自西北方向建设用地扩张的影响，其中北方的建设用地侵入速率为 0.09 平方千米/年；

3) 吴哥寺：位于遗迹群的南部，建设用地侵入速率最低，其中遗址东面建设用地的影响最小，其他方位的建设用地以合围的方式逐渐侵占；

4) 圣龙蟠水池：位于遗迹群的北部，西北方向上的建设用地侵入速率较高，其次还受到了东南方向上建设用地扩张的影响。

综上可知，这四个遗址都主要受到了南北方向上的建设用地扩张影响，这与遗迹群北方村落和南方暹粒市的扩张有着密不可分的关系；遗址南部有着一片面积辽阔的林地，因此受到的影响最少，这一点在玫瑰图上也得以体现。

2015-2017年遗址侵入速率玫瑰图

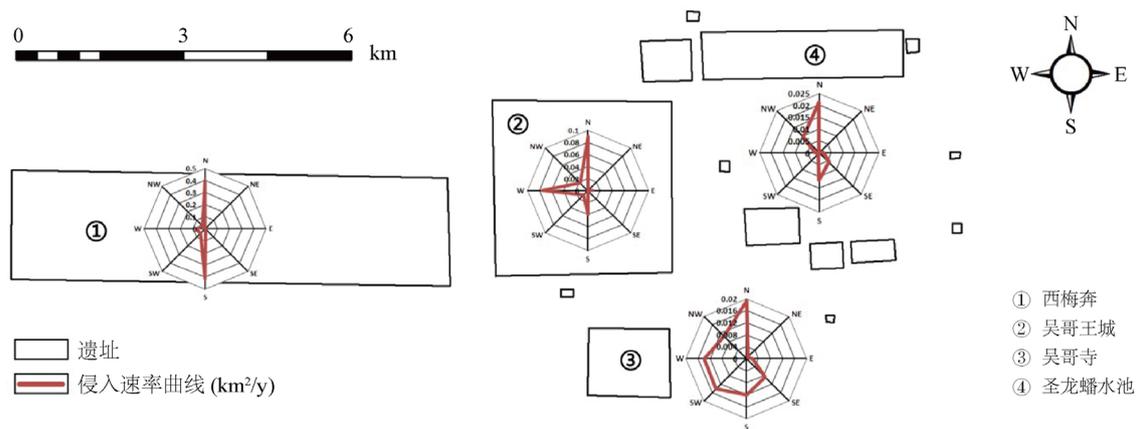


Figure 10. Legacy invasion rate rose chart in 2015-2017

图 10. 2015~2017 年遗迹侵入速率玫瑰图

4.2.3. 建设用地重心迁移分析

2015~2017 年遗迹群建设用地重心转移图如图 11 所示。从图 11 可见，吴哥遗迹群 2015 年建设用地重心坐标 $X = 376531.2$, $Y = 1485640.6$, 2017 年建设用地重心坐标为 $X = 375588.3$, $Y = 1485629.3$, 遗迹群的几何中心坐标为 $X = 379698.1$, $Y = 1486156.6$ 。2015 年建设用地重心在遗迹群中部吴哥王朝区域内，在遗迹群几何中心的西南处，说明遗迹群西部建设用地侵入情况更为突出；2017 年时建设用地重心向西南方向迁移，与遗迹群几何中心的距离比 2015 年时更远，说明 2017 年时西梅奔、吴哥王城、吴哥寺所在的文化遗产保护区域受到建设用地的影响加大，西部的建设用地侵入率相对较大，主要受到了遗迹群西南方暹粒市城市扩张影响。

5. 结论与建议

5.1. 结论

Sentinel-2A 系列卫星影像空间分辨率高，能够较好地用于分析土地利用变化规律，检测区域的地表覆被变化。2015~2017 年间，吴哥遗迹地周边林地减少，部分耕地转化为建设用地，建设用地的扩张已经威胁到了遗产地周边的生态环境，并以一定的速率逐年侵占遗产地周边用地。为了城市的可持续发展，需要对遗址进行保护，对周边用地进行合理的规划。

2015-2017年遗迹群建设用地中心转移图

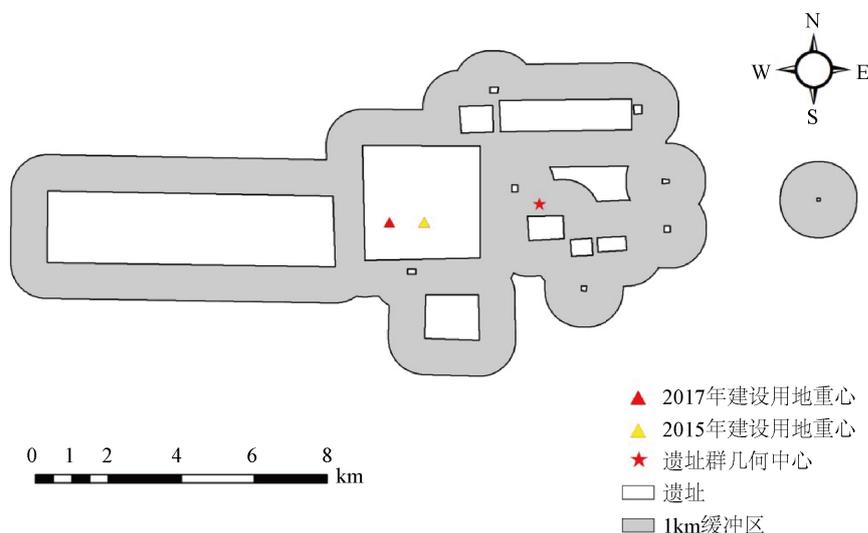


Figure 11. Relocation of gravity map for site construction at the relic complex in 2015~2017

图 11. 2015~2017 年遗迹群建设用地重心转移图

5.2. 建议

由以上影响分析可知，吴哥遗迹群的生态环境已经受到了周边建设用地扩张的影响，为了防止建设用地过度扩张和资源的过度开采，需要及时对遗迹群加以保护，除了对遗址的修复和保护外，还需要合理规划建设用地，对旅游开发加以限制。因此，根据吴哥遗迹群实际情况提出以下建议：

1) 加强国际合作，携手对现有吴哥文化遗产进行修复和保护。传播当地文化，培养遗产保护意识，加强对文化遗产的管理和保护。

2) 保护当地生态环境，减少森林砍伐，遗产周边用地退耕还林，维持城市发展与生态环境的平衡，实现生态环境的可持续发展。制定生物多样性保护和管理规范，利用地理信息系统对生态环境变化进行监测。

3) 合理规划建设用地扩张方向，位于遗迹群西南方向暹粒市的过度发展和扩张已经对吴哥遗迹群造成了威胁。政府应该完善城市规划，限制暹粒市向东北方向的扩张。同时，位于遗迹群北方的部分村庄也应该限制其向南进行扩张。

4) 根据世界遗产保护需要，划定吴哥文化遗产保护的缓冲区与核心区，实行分级保护。

基金项目

衡阳师范学院大学生创新创业训练计划项目(cx1854)、衡阳师范学院教改课题(JYKT201835)、衡阳师范学院创新平台开放基金项目(HIST18K03)、湖南省教育厅重点项目(17A067)资助。

参考文献

- [1] 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J]. 经济地理, 2001, 21(1): 95-100.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 63(6): 553-558.
- [3] 肖志坤. 区域城市土地利用/覆被变化及其驱动力研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [4] 白一君. 量化土地利用变化的时空格局[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.

- [5] Liu, J.Y., Kuang, W.H., Zhang, Z.X., *et al.* (2014) Spatiotemporal Characteristics, Patterns, and Causes of Land-Use Changes in China since the Late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, **24**, 195-210. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1082-6>
- [6] Quan, B., Bai, Y.J., Römken, M.J.M., *et al.* (2015) Urban Land Expansion in Quanzhou City, China, 1995-2010. *Habitat International*, **48**, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.03.021>
- [7] 吴文倩. 西安市土地利用/土地覆盖变化对生态环境的影响及其驱动力研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2008.
- [8] 王兵, 臧玲. 我国土地利用/土地覆被变化研究近期进展[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(2): 86-91.
- [9] 王思远, 张增祥, 周全斌, 王长有, 刘纪远. 近 10 年中国土地利用格局及其演变[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 523-530.
- [10] 雷师. 中国中部和东南部城市土地利用变化对比研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [11] 敖惠修, 黄韶玲. 柬埔寨吴哥人文和自然景观调查研究[J]. 广东园林, 2016, 38(6): 92-95.
- [12] 王心源, 刘洁, 骆磊, 李丽. “一带一路”沿线文化遗产保护与利用的观察与认知[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(5): 550-558.
- [13] 史晓明, 周志诚, 王海涛, 张田凤, 陈海鹏. 柬埔寨区域地表覆盖监测与分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(4): 82-84+11.
- [14] 刘江, 姜怀英. 吴哥古迹的保护与修复[J]. 中国文物科学研究, 2006(4): 63-68.
- [15] 孙克勤. 柬埔寨吴哥世界遗产地存在的问题和保护对策[J]. 资源与产业, 2009, 11(6): 124-130.
- [16] 廖凯涛, 王成, 刁晓环, 齐述华, Khuon Khun-neay. 吴哥遗产地土地利用/土地覆盖变化遥感分析[J]. 遥感信息, 2015, 30(1): 119-124.
- [17] Chen, F.L., Guo, H.D., Ma, P.F., *et al.* (2017) Radar Interferometry Offers New Insights into Threats to the Angkor Site. *Science Advances*, **3**, e1601284. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601284>
- [18] 洪天华, 王萌, 霍斯佳. “天眼”助力遗产保护——吴哥世界遗产环境遥感监测与研究[J]. 中国文化遗产, 2017(3): 58-62.
- [19] 孙希华. 山东省产业重心转移与可持续发展研究[J]. 地球信息科学, 2001(1): 27-31.
- [20] 王美娟. 基于城市重心转移的大连市城市内部空间结构变化分析[J]. 国土与自然资源研究, 2015, 4(1): 1-3.