

doi: 10.6046/zrzyyg.2021325

引用格式:董丽,安娜,孙根云,等.基于遥感的柬埔寨金边市湿地景观对城市扩张时空响应[J].自然资源遥感,2022,34(3):173-183.(Dong L, An N, Sun G Y, et al. Spatiotemporal response of wetland landscape to urban expansion in Phnom Penh, Cambodia determined based on remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3):173-183.)

# 基于遥感的柬埔寨金边市湿地景观对城市扩张时空响应

董丽<sup>1,2</sup>, 安娜<sup>3</sup>, 孙根云<sup>1,2</sup>, 张爱竹<sup>1,2</sup>, 矫志军<sup>1,2</sup>, 丁孙金衍<sup>1,2</sup>, 葛洁<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 4. 四川省科学技术研究院(四川省卫星应用技术中心), 成都 610045)

**摘要:**金边市是澜湄流域典型城市,在“一带一路”背景下经济迅速发展、城市范围不断扩张,对周边湿地侵占严重。为充分了解金边市湿地在城市扩张下的响应特点,基于2000—2020年共5期Landsat影像提取金边市土地利用信息,并从面积和空间分布、变化强度以及景观格局等多个维度分析了湿地景观和城市扩张用地时空变化特征,最后利用相关系数构建了两者的定量关系。结果表明,2000—2020年间金边市建设用地和裸地由中心向外扩张,面积持续增加,2001—2005年间扩张最为强烈;其空间结构更加集聚,形状更为复杂;湿地面积持续减少,沼泽和水田向建设用地和裸地转换强烈,尤其是沼泽湿地转换面积达124.06 km<sup>2</sup>,导致约1/3的沼泽消失;湿地景观格局趋于破碎化、规则化,连通度下降,其降温增湿、调节蓄洪等生态功能被削弱。金边市湿地变化与城市扩张显著相关,湿地与城市扩张用地在面积上的相关性高于0.97 ( $p < 0.01$ ),扩张强度和景观格局方面也有较强相关性。为促进城市可持续发展,城市扩张应当合理规划空间布局,以集约型发展为主,必要时优先利用水田,尽可能减少对沼泽湿地的侵占和破坏。

**关键词:**湿地;城市扩张;景观格局;柬埔寨金边

**中图法分类号:** P 237; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0173-11

## 0 引言

湿地是水陆交互作用形成的独特生态系统<sup>[1]</sup>,在涵养水源、保护生物多样性、维护区域生态平衡等方面发挥着不可替代的作用<sup>[2-3]</sup>。尤其是沼泽湿地,因其土壤透水力强,植被蒸腾作用旺盛且生产力高,在调节蓄洪、缓解城市热岛、维持生物多样性等方面具有重要生态功能<sup>[4-5]</sup>。20世纪以来,全球城市化发展迅速<sup>[6]</sup>。澜湄流域国家在“一带一路”倡议、东盟经济共同体等区域合作下,获得重大发展机遇<sup>[7-9]</sup>。城市扩张引发了热岛、洪水泛滥、生物多样性减少等一系列生态环境问题<sup>[10-12]</sup>,严重威胁当地的生态系统健康。柬埔寨自2000年开始经济迅速

发展,城市化水平大幅提升<sup>[13]</sup>,首都金边市城市加速扩张,对其周边的湿地侵占破坏活动频繁。掌握湿地景观在城市扩张背景下的时空动态演变,对于当地湿地保护及城市可持续发展具有重要意义。

遥感技术具有观测范围广、观测时间长、快速高效的特点<sup>[14]</sup>,众多学者基于多源遥感数据提取湿地变化信息,并从不同空间尺度上分析湿地在城市扩张下的响应<sup>[15-18]</sup>。Mao等<sup>[19]</sup>利用中国土地覆盖数据库分析了整个中国1990—2010年间城市化导致的湿地损失数量和模式;娄艺涵等<sup>[20]</sup>利用高空间分辨率影像数据,采用面向对象和人工目视解译相结合的方法提取杭州主城区西部湿地信息,并结合景观指数分析了湿地景观格局变化。Landsat卫星数据由于其影像时间跨度长、幅宽较大且波谱信息

收稿日期:2021-10-11;修订日期:2022-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目“高异质性滨海湿地盐沼植被环境响应机理与优化分类方法研究”(编号:41801275)、“复杂城市地表不透水面多源高分遥感成像机理与分层优化提取方法”(编号:41971292)、科技部国家重点研发计划项目“亚太热点区域生态系统遥感综合监测”(编号:2019YFE0126700)、国家自然科学基金项目“饮用水源地保护区环境风险源变化多尺度遥感探测机制与不确定性研究”(编号:41871270)、广东省省级科技计划项目(编号:2018B020207002)和广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(编号:GDNRC[2020]051)共同资助。

第一作者:董丽(1996-),女,硕士研究生,研究方向为湿地遥感。Email: dxywy1020@126.com。

通信作者:张爱竹(1988-),女,博士,讲师,研究方向为滨海湿地遥感和遥感影像智能解译。Email: zhangzhu789@163.com。

丰富受到更多学者青睐<sup>[21-22]</sup>。宫兆宁等<sup>[23]</sup>利用 TM 数据,基于单波段阈值和谱间关系,结合人工目视解译提取北京市湿地信息,分析了气候变化和城市扩张等因素影响下湿地面积和结构组成变化;李婧贤等<sup>[24]</sup>利用 4 期 Landsat 影像,采用监督分类和目视解译相结合的方法提取了珠江三角洲滨海湿地信息,并结合相关政策分析了湿地变化特征及驱动因素。

近年来,部分学者针对东南亚、“一带一路”沿线城市扩张及其生态效应问题开展了相关研究。禹丝思等<sup>[9]</sup>提取了海上丝绸之路沿线的 11 个超大城市不透水层,结合景观格局指数分析了超大城市的发展模式;海凯等<sup>[8]</sup>结合全球土地覆盖数据集、夜间灯光数据和 LandScan 人口数据等分析了“一带一路”沿线国家的城市扩张形态及土地覆盖变化空间格局;谷雨<sup>[25]</sup>研究了海上丝绸之路港口城市扩张,并通过土地利用变化分析了城市扩张对农田、森林、湿地等的生态效益;韩瑞丹等<sup>[10]</sup>利用 Landsat 和 MODIS NDVI 数据分析了曼谷 1990—2015 年城市扩张及其在绿地和城市热岛方面的生态效益。现有研究多注重“一带一路”沿线国家的城市扩张形态及模式等,涉及城市扩张对生态效益,尤其是湿地的影响研究较少,且仅通过土地覆盖变化表示,不能准确全面地表现湿地变化特征及影响机制。

因此,为探究金边市湿地景观对城市扩张的时空响应,利用 2000—2020 年共 5 期 Landsat 影像数据,综合考虑其光谱特征、指数特征、空间特征提取湿地信息,并从数量及空间分布、变化强度和景观格局等多个维度全面分析湿地景观和城市扩张用地的时空演变特征,建立湿地变化与城市扩张之间的定量关系,最后给出该地区城市发展的合理化建议,以期平衡经济发展与生态保护提供依据,促进城市可持续发展。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

澜湄流域国家包括中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南 6 个国家。柬埔寨位于澜湄流域南部,毗邻泰国、老挝、越南,发展较晚,工业落后,经济以农业为主,水稻是其主要粮食作物。柬埔寨属热带季风气候,年平均气温为 29~30℃,雨量丰富。金边地处湄公河、洞里萨河与巴萨克河交汇处,是典型的柬埔寨洪泛平原区,湿地资源丰富,沼泽、湖泊分布众多(图 1)。同时,金边作为柬埔寨首都,还是政治、经济、文化和交通中心,外资投入大,经济发展迅速。

近 15 a 来,金边市人口和面积翻倍增长,截至 2020 年,金边市总面积为 692.46 km<sup>2</sup>,人口约 228 万人。随着人口增长以及城市加速扩张,湿地被大量填平、吞噬,依靠湖泊与沼泽湿地种植稻米和捕鱼为生的“水边人家”生计和生活空间受到严重威胁。

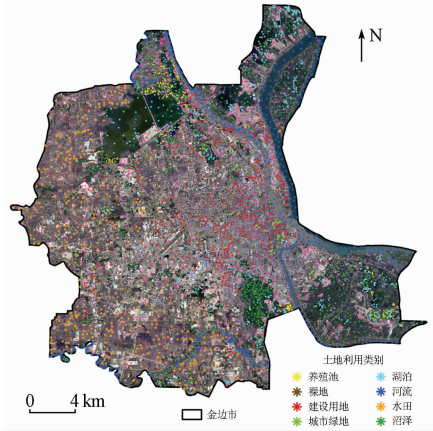


图 1 研究区影像

Fig. 1 Image of the study area

### 1.2 数据源及其预处理

研究表明柬埔寨自 2000 年开始经济经历了快速增长<sup>[26]</sup>,因此本研究时期设定为 2000—2020 年。所用数据为 Landsat 遥感影像数据。Landsat Collection2 L2 级产品影像数据由美国地质勘探局 USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 提供。柬埔寨 5—10 月为雨季,容易形成洪泛灾害,淹没水田、沼泽等。为保证研究时期间隔均匀,云量较少,影像质量较好,物候差异较小,因此选取 2005 年、2011 年、2015 年和 2020 年 1 月份影像,2001 年选取 6 月份影像作为研究区初期数据。影像数据详细信息如表 1 所示。影像预处理通过 ENVI 5.3 软件完成,原始影像数据即为地表反射率数据,因此无需进行大气校正,为保证空间分辨率一致,所有时期影像均保持原始空间分辨率 30 m,最后,利用 ArcGIS online 提供的金边市矢量图裁剪得到研究区影像。

表 1 Landsat 影像数据

Tab. 1 Landsat datasets

| 影像时间       | 传感器 | 空间分辨率/m |
|------------|-----|---------|
| 2001.06.01 | TM  | 30      |
| 2005.01.19 | TM  | 30      |
| 2011.01.20 | TM  | 30      |
| 2015.01.15 | OLI | 30      |
| 2020.01.13 | OLI | 30      |

根据 1971 年在拉姆萨尔制定的《湿地公约》,基于金边湿地特征与相关研究中的分类体系<sup>[27]</sup>,通过综合分析,建立了金边湿地土地利用分类体系,将研究区景观分为自然湿地、人工湿地和非湿地 3 个

一级类。每个一级类又分为若干二级类,如表 2 所示。非湿地二级类中裸地主要为对湿地进行填埋、平整但尚未进行工程建设的平滑、光亮斑块,是城市扩张影响湿地的一种典型表现。建设用地和裸地为主要的城市扩张用地类型。城市绿地主要为城市内部非湿地植被,包括公园绿地、草坪等。由于实地勘察样本不易采集,为保证精度,采用分层随机抽样算法,借助 Google Earth 高分辨率影像并结合 Landsat 影像均匀选取样本,2020 年训练样本空间分布如图 1 所示。训练样本和验证样本比例为 7:3。

表 2 金边市景观分类体系

Tab.2 Classification system of landscapes in Phnom Penh

| 一级类别 | 二级类别 | 训练样本数量 |
|------|------|--------|
| 自然湿地 | 河流   | 754    |
|      | 湖泊   | 939    |
|      | 沼泽   | 2 445  |
| 人工湿地 | 养殖池  | 293    |
|      | 水田   | 1 132  |
| 非湿地  | 建设用地 | 869    |
|      | 裸地   | 1 260  |
|      | 城市绿地 | 404    |

## 2 研究方法

首先,基于 Landsat 影像,利用光谱信息、归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、纹理特征和形态学属性剖面表征的空间信息提取金边市景观类型分布;在此基础上,从面积和空间分布变化、变化强度、景观格局 3 个方面分析湿地景观和城市扩张用地时空变化特点;最后,利用 Pearson 相关系数分析金边市湿地景观变化与城市扩张用地相关性。具体流程如图 2 所示。

### 2.1 金边市景观类型信息提取

多种特征变量结合可以有效提高提取精度<sup>[28]</sup>。光谱特征是遥感影像最基本的特征,其在植被、水体、建设用地、裸地等地物中差异明显。此外,根据不同地类在不同波段中的波谱特点,利用比值计算构造的指数可以增强地类信息,抑制无关背景信息,提高解译精度<sup>[29]</sup>。因此本文加入 NDVI 和 MNDWI<sup>[30]</sup>以提高景观提取精度。金边市水体湿地类型包括河流、湖泊、养殖池 3 类,其在光谱特征上无明显差异,异物同谱现象突出,但在空间特征上差异较大。灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)<sup>[31]</sup>提取的纹理特征和形态学属性剖面特征(morphological attribute profiles, MAPs)<sup>[32-33]</sup>可以提高解译精度。因此将获得的 NDVI、光谱特征、MNDWI、纹理特征及形态学属性剖面特征进行叠加,利用随机森林分类器对研究区进行分类,各年份总体精度分别为 89.12%、91.27%、89.18%、90.94%、88.96%,满足后续研究需要。

面积和空间分布变化是景观变化最直观的表现,转移矩阵可以表现景观类型间的转换程度和方向。因此通过湿地景观面积变化、空间分布变化和转移矩阵 3 个方面表征金边湿地数量上变化特点。转移矩阵利用 2001 年和 2020 年湿地提取结果进行构造,其数学表达式为:

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & P_{xy} & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $M$  为景观类型转移矩阵;  $P$  为研究区各景观类型的转换面积;  $n$  为研究区景观类型的总数;  $P_{xy}$  为研究初期第  $x$  类景观类型转换为研究末期第  $y$  类景观类型的面积。

### 2.2 景观变化强度分析

为进一步了解金边市湿地与城市扩张用地不同时间不同方向的变化差异,引入了变化强度指数。变化强度是指某一时间段内景观面积相对于基期面积的变化比例,表示单位时间内景观变化的相比强度差异。具体计算公式为:

$$E = \frac{A_{s+1} - A_s}{tA_s} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $E$  为研究时段内的景观变化强度;  $A_{s+1}$  和  $A_s$  分别为研究末期和研究初期的景观类型面积;  $t$  为研究初期和研究末期相隔的年份。

为探究城市扩张和湿地景观在不同方向上的变化强度差异,以金边市城区环路中心为圆心,按照 8 象限划分方向,计算各方向的变化强度。方向示意图如图 3 所示。

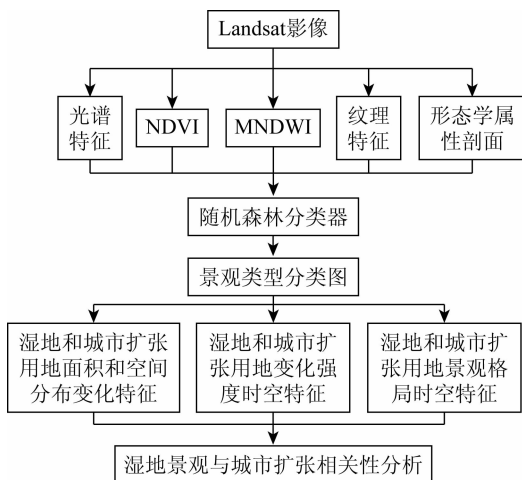


图 2 技术流程  
Fig.2 Flowchart

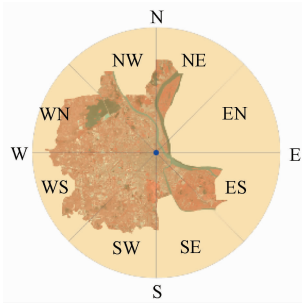


图 3 方向示意图

Fig. 3 Direction map

### 2.3 景观格局变化分析

景观格局是指景观的空间结构特征,包括景观

组成单元的多样性和空间配置<sup>[34]</sup>。景观指数能够高度浓缩景观格局信息,计算简单但能够反映其结构组成和空间配置。利用 Fragstats 软件从类型水平计算景观指数,分析金边市景观类型内部结构变化特点。为避免冗余且能够全面表达景观内部结构特点,在类型水平上选取面积加权平均分维数( area-weighted mean fractal dimension index, AWMFD)、边缘密度( edge density, ED)、聚集度指数( aggregation index, AI) 分别表征各景观类型的形状、破碎度和聚集度。3 个景观指数计算公式及生态含义分别如表 3 所示。

表 3 景观指数计算公式及生态含义

Tab. 3 Formulas and ecological meanings of landscape metrics

| 景观指数  | 表达式   | 数学解释  | 生态含义  |
|-------|---|---|---|
| AWMFD | $AWMFD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \left[ \frac{2 \ln(0.25 C_{ij})}{\ln(a_{ij})} \cdot \left( \frac{a_{ij}}{O} \right) \right]$ | $i$ 为斑块类型; $m$ 为景观中所有斑块类型的总数目; $j$ 为斑块数目; $k$ 为某一斑块类型中斑块的总数目; $C_{ij}$ 为斑块的周长; $a_{ij}$ 为斑块的面积; $O$ 为景观的总面积 | $1 \leq AWMFD \leq 2$ , AWMFD 越大, 缀块形状越复杂             |
| ED    | $ED = \frac{\sum_{i=1}^k e_{ij}}{O} (10\ 000)$  | $e_{ij}$ 为斑块的边缘长度   | $ED \geq 0$ , 反映了破碎化程度和生境缀块之间的隔离程度, ED 越大, 湿地景观破碎化越严重 |
| AI    | $AI = \left[ \frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] (100)$  | $g_{ii}$ 为斑块类型 $i$ 的像素之间的相似邻接数; $\max \rightarrow g_{ii}$ 为最大相似邻接数  | $0 \leq AI \leq 100$ , AI 越大, 同一类型的湿地越聚合              |

### 2.4 湿地与城市扩张相关性分析

Pearson 相关系数可以用指标定量表示变量之间的相关性,基于 SPSS 软件,利用 Pearson 系数计算湿地景观与城市扩张用地在面积、变化强度、景观指数 3 个方面的相关性,探究金边市湿地变化对城市扩张的响应。

## 3 结果与分析

### 3.1 湿地与城市扩张用地面积和空间分布变化分析

2001—2020 年内不同时期金边市景观面积如图 4 所示。在 20 a 间,湿地总面积呈现持续减少的趋势,由 2001 年的 631.59 km<sup>2</sup> 减少为 2020 年的 425.04 km<sup>2</sup>。水田和沼泽作为金边市优势湿地景观,面积在 2001—2020 年间持续减少,2015—2020 年间下降速度最快。水田在 20 a 内共减少了 127.67 km<sup>2</sup>, 2020 年的水田面积仅为 2001 年的 49.68%。沼泽面积在 2020 年仅为 211.24 km<sup>2</sup>, 约 1/3 的沼泽消失。湖泊和养殖池面积呈上升趋势。湖泊面积在 2011 年前逐渐增加,由 26.85 km<sup>2</sup> 增加到 47.41 km<sup>2</sup>, 2011 年之后轻微波动,无较大变化。养殖池面积较小,2020 年面积仅为 3.98 km<sup>2</sup>,但在过去 20 a 内其面积增幅接近 200%。河流在过去 20 a 内无明显变

化。沼泽湿地是最主要的湿地类型之一,随着沼泽湿地面积的大幅减少,其调节蓄洪、降温增湿、维持生物多样性等生态功能也会下降。同期建设用地和裸地等城市扩张用地面积在 2001—2020 年内持续增加,共增加约 200 km<sup>2</sup>。建设用地面积增加最多,20 a 内共增加了 156.86 km<sup>2</sup>,裸地次之,增加了 45.82 km<sup>2</sup>。建设用地和裸地在 2015—2020 年内扩张最快。可能是由于 2015 年之后国外对金边市的投资加大,城市化进程加快,最直接的表现是不透水面的扩张。

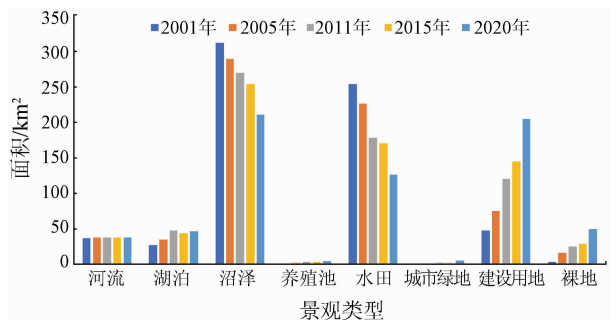


图 4 金边市景观 2001—2020 年面积变化

Fig. 4 Area change of landscape in the Phnom Penh from 2001 to 2020

金边市景观类型的空间分布如图 5 所示。从图 5 中可知各景观类型在 20 a 的城市化进程中空间分

布变化剧烈。建设用地聚集于洞里萨河与湄公河交汇处,位于研究区的中心地带。由图5(a)可知,2001年建设用地面积较小,分布于河流交汇处以西的平原地带。随后不断向外围扩张,并在外围伴随有大量裸地分布。2005—2011年间城市扩张以西南方向的楔形扩展最为明显(图5(b)—(c)),2011年之后建设用地由中心以圆形方式向各方扩张,至2020年已成为金边市最大的优势景观。随着城市用地的扩张,湿地逐渐退化到城市边缘地带。2001年水田和沼泽分别为研究区中心以西和以东的优势

景观(图5(a)),后逐渐被建设用地和裸地侵占,2020年仅存留城市边缘地带的水田和沼泽,且原有的大片水田和沼泽被不断切割,趋于破碎(图5(e))。金边市中心的湖泊被填埋,转变为建设用地或裸地。研究区北部的湖泊由于工事修筑得以保留并扩大面积。此外,有众多人工或自然形成的小型湖泊零散分布于研究区内。养殖池在2011年之前分布于大型湖泊的东南方向,并逐渐扩张,2011年之后由于城市扩张用地的侵占,转移到湖泊东北方向,并大面积扩张。

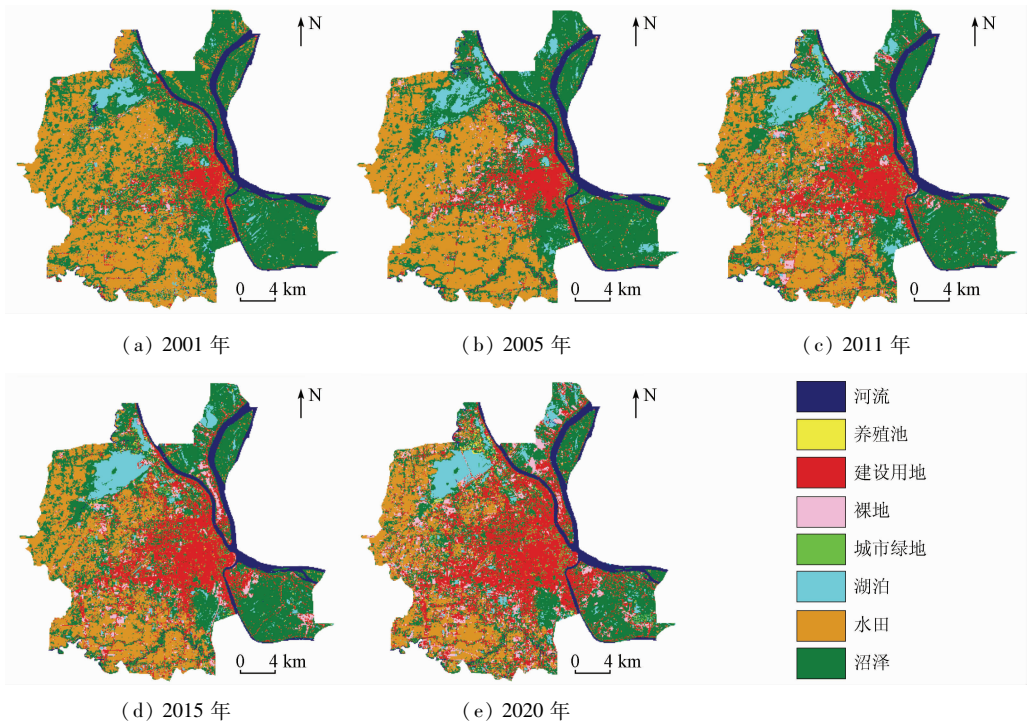


图5 2001—2020年景观类型分布

Fig. 5 Spatial distributions of landscapes in Phnom Penh from 2001 to 2020

2001—2020年金边市各景观类型之间的转换面积及方向如表4所示。从表4中可知,景观类型间转换剧烈,且主要是湿地类型向城市扩张用地转换。沼泽向城市扩张用地的转换面积最大,共有121.213 2 km<sup>2</sup>,其中向建设用地转换为98.894 1 km<sup>2</sup>,

向裸地转换了22.319 1 km<sup>2</sup>。水田向城市扩张用地的转换面积紧随其后,共转换88.011 1 km<sup>2</sup>,其中向建设用地转换63.586 8 km<sup>2</sup>,向裸地转换24.424 3 km<sup>2</sup>。湖泊向城市扩张用地转换5.966 1 km<sup>2</sup>,养殖池向城市扩张用地转换0.658 8 km<sup>2</sup>。不同湿地类型之间

表4 金边市2001—2020年景观类型转移矩阵

Tab. 4 Transfer matrix between the different landscape types in Phnom Penh from 2001 to 2020 (km<sup>2</sup>)

| 景观类型 | 2001年    |         |          |         |         |          |           |           |
|------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
|      | 河流       | 养殖池     | 建设用地     | 裸地      | 城市绿地    | 湖泊       | 水田        | 沼泽        |
| 河流   | 32.508 0 | 0.006 3 | 0.436 5  | 0.018 0 | 0.000 9 | 0.103 5  | 1.211 4   | 3.045 6   |
| 养殖池  | 0.738 0  | 0.242 1 | 0.346 5  | 0.387 0 | 0.004 5 | 0.338 4  | 1.019 7   | 1.915 2   |
| 建设用地 | 0.988 2  | 0.549 0 | 36.578 7 | 2.075 4 | 0.527 4 | 4.511 7  | 63.586 8  | 98.894 1  |
| 裸地   | 0.287 1  | 0.109 8 | 1.544 4  | 0.454 5 | 0.020 7 | 1.454 4  | 24.424 3  | 22.319 1  |
| 城市绿地 | 0.378 0  | 0.009 9 | 0.848 7  | 0.009 9 | 0.408 6 | 0.954 0  | 0.889 2   | 2.844 0   |
| 湖泊   | 0.954 0  | 0.132 3 | 0.603 0  | 0.083 7 | 0.009 0 | 13.747 5 | 8.441 1   | 22.423 5  |
| 水田   | 0.288 9  | 0.531 0 | 2.364 3  | 0.585 0 | 0.037 8 | 0.925 2  | 101.132 1 | 20.703 6  |
| 沼泽   | 2.089 8  | 0.267 3 | 5.124 6  | 0.529 2 | 0.264 6 | 5.675 4  | 54.060 3  | 143.232 3 |

也有转换,湖泊和养殖池面积的增加主要是由于水田和沼泽的转入。此外,水田和沼泽之间也有大面积的相互转换,这是因为金边市常年受洪水侵扰,洪水淹没、消失等可能会影响水田、沼泽之间的识别,导致2001—2020年间沼泽和水田之间有较大转换。城市扩张用地之间的转换主要体现在裸地向建设用地的转换。但由于2001年裸地本身面积较小,向建设用地转换较少。实际上每个时期裸地向建设用地均有转换,且转换率分别为 $0.27 \text{ km}^2/\text{a}$ ,  $1.18 \text{ km}^2/\text{a}$ ,  $2.51 \text{ km}^2/\text{a}$ ,  $2.85 \text{ km}^2/\text{a}$ ,转换逐渐加快。

### 3.2 湿地与城市扩张用地变化强度分析

#### 3.2.1 湿地与城市扩张用地总体变化强度分析

金边市城市扩张用地(建设用地、裸地)和湿地(湖泊、养殖池、水田和沼泽)在不同时期的变化强度如图6所示。河流几乎无变化,因此不再讨论。由图6可知,建设用地和裸地等城市用地扩张强度在2001—2005年间最大,尤其是裸地,明显高于其他3个时段,说明金边市在21世纪初经历了快速城市化进程。建设用地的扩张强度呈下降趋势,裸地的扩张强度先下降后上升。两者的扩张强度均在2011—2015年间最小,说明2011—2015年间城市扩张放缓。裸地在2015—2020年间扩张强度达新高。金边市湿地景观中,水田和沼泽的变化强度为负值,因此将其定义为衰减强度。水田的衰减强度整体呈上升趋势,2001—2005年间衰减强度较小,

随后升高,2015—2020年间衰减强度最大,但与城市用地扩张强度相对应,水田的衰减强度也在2011—2015年时段最低。沼泽的衰减强度呈先下降后上升的趋势,在2005—2011年间衰减强度最小,而后增大,在2015—2020年间衰减强度最大。湖泊和养殖池的面积虽小,但扩张强度较大。与城市扩张强度相对应,养殖池和湖泊同样在2001—2005年间扩张强度最大,在2011—2015年间扩张强度最小,甚至湖泊呈衰减态势。

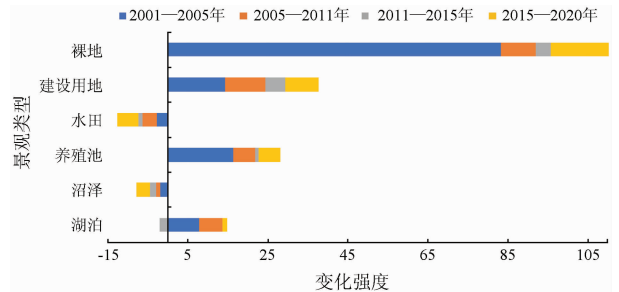


图6 金边市景观变化强度

Fig. 6 Change intensity of landscape in the Phnom Penh

#### 3.2.2 湿地与城市扩张用地不同方向变化强度分析

金边市湿地和城市扩张用地在不同方向上的变化强度如图7所示,图7(a)—(b)为城市用地扩张强度,图7(c)—(e)为湿地变化强度,金边市养殖池主要集中在北偏西方向(图5),因此不再讨论养殖池在不同方向上的变化强度。

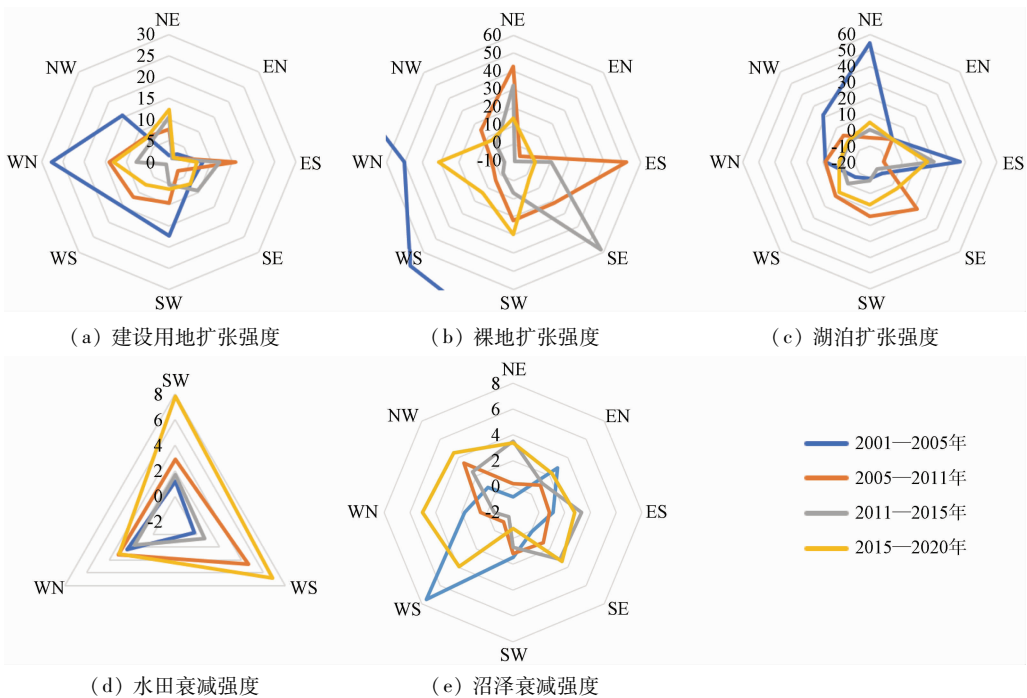


图7 金边市景观不同方向变化强度

Fig. 7 Change intensity of landscape in different direction

如图7(a)所示,建设用地的扩张强度存在空间差异性。2001—2005年间,建设用地在SW—NW

方向明显扩张,但各方向扩张强度存在差异。WN方向扩张强度最大,为27.65,SW方向次之,为17.42。

2005—2011年间建设用地在SW—WN方向扩张强度仍较大。此外,在ES方向也有明显扩张,扩张强度为15.73,超过SW—WN方向。2011—2015年间扩张强度较小,但在NE和ES方向有明显扩张,扩张强度分别为10.62和11.92。2015—2020年间在NE和WN方向扩张明显,扩张强度分别为12.36和13.03。由图7(b)可知,裸地的扩张主要发生在NE和SW方向,各年份均有扩张。裸地在2001—2005年间各方向扩张强度范围在50.163 7~484.375 0之间,明显高于其他时段,为突出其他时段扩张强度的空间差异性,图中显示的扩张强范围仅为-10~60。裸地在2001—2005年间在SE方向扩张强度最大,WN方向扩张强度最小。这可能是由于SE方向在2001年几乎没有裸地,基数极小。2005—2011年间裸地在ES方向扩张最为强烈,其次是NE方向,SW,SE和NW方向也有明显扩张。2011—2015年间在SE方向扩张最为强烈,其次是NE方向。2015—2020年间裸地在WN方向扩张最为强烈,其次是SW方向,NE方向也有明显扩张。

金边市湿地景观中湖泊在ES方向扩张强烈(图7(c)),除2005—2011年外其余时段扩张强度均较大,此外,湖泊在SW,WS和WN方向在2005—2011年间和2015—2020年间也有明显扩张,2001—2005年间在NE方向扩张极为强烈。由于水田主要分布在研究区西侧SW,WS和WN方向(图5),因此本节只讨论水田在这3个方向上的衰减强度差异。由图7(d)可知,水田衰减强度在SW方向最大,尤其在2015—2020年间,衰减强度为6.8,WS方向次之。这与建设用地和裸地在2005—2011年间和2015—2020年间在SW方向和WS方向的扩张相对应。水田在WN方向总体衰减强度较小,但在2001—2005年间衰减强度高于其他2个方向。由图7(e)可知,沼泽在各方向均有衰减,尤其是在2015—2020年间,除SW方向外,各方向衰减强度均

较高。其他时段内,沼泽在各方向的衰减强度存在空间差异性。2001—2005年间,沼泽在WS方向衰减强度最大,为7.51。2005—2011年间沼泽在NW方向衰减强度最大,为3.40。此外,2005—2011年间沼泽在EN—SW和EN—WN方向也有较强衰减。沼泽在2011—2015年间在NE,ES,SE,SW和NW方向衰减强烈。2011年之后沼泽在NE方向上的强烈衰减与建设用地和裸地在该时段内在NE方向上的扩张相对应。2015—2020年间沼泽在WN方向上的衰减也与该时期建设用地和裸地在WN方向上的扩张相对应。综上所述,水田受城市扩张的影响范围基本分布在研究区西部,沼泽各方向均受城市扩张的影响。自2011年开始,金边市东部,即洞里萨河以东的沼泽湿地受城市扩张侵占明显。

### 3.3 湿地与城市扩张用地景观格局变化分析

#### 3.3.1 城市扩张用地景观格局变化分析

各时期景观类型的格局指数如图8所示。由图8(a)可知,城市扩张用地的ED均呈现上升趋势,且建设用地上升幅度最大,其次是裸地。结合前面的分析,城市用地ED增大可能是由于城市用地面积急剧增加导致。图8(b)中表示了城市扩张用地的AI特征,建设用地和裸地的AI值较高,说明两者斑块间连通度较高,分布较为集聚。且两者的AI指数在过去20a间呈缓慢上升趋势,说明随着城市扩张,建设用地和裸地更加集聚。城市绿地的AI指数先上升后下降,可能是由于前期城市绿地面积增加导致AI上升,后期新增加的城市绿地相对分散,导致AI下降。建设用地的形状复杂度明显高于裸土和城市绿地(图8(c)),2001—2020年间建设用地和裸地的AWMFD呈上升趋势,建设用地上升幅度较大,说明建设用地和裸地的斑块形状越来越复杂。城市扩张用地更加集聚、斑块形状更加复杂,可能会加速城市斑块间的热量传输,加剧热岛效应。

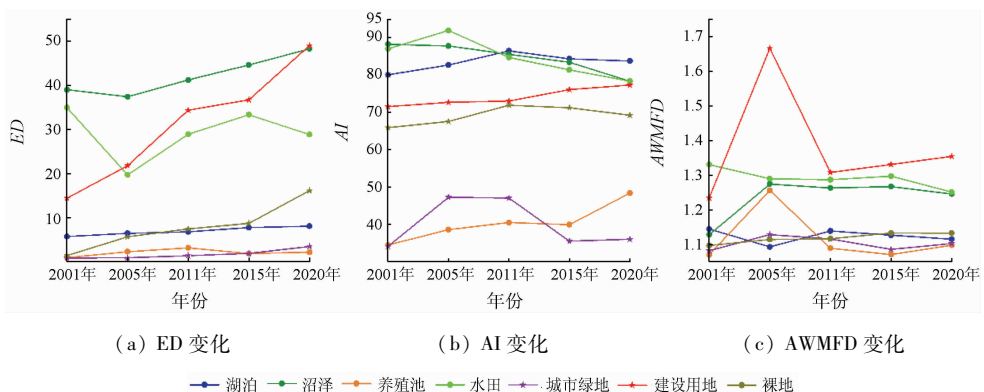


图8 2000—2020年金边市类型水平上景观格局指数变化

Fig. 8 Changes in class-level metrics of landscape types in the Phnom Penh from 2000 to 2020

### 3.3.2 湿地景观格局变化分析

由图8(a)可以看出,沼泽的ED最大,其次是水田,养殖池的ED最小。湿地的ED均呈现上升趋势,其中沼泽的ED上升最大,水田的ED在2001—2005年间大幅下降,但在2005—2020年间ED大幅上升。与水田相比,沼泽破碎化程度更大,在城市扩张中破碎化趋势更为明显。湿地景观具有蓄洪防涝、降温增湿的作用,研究表明大斑块的绿地和水体降温增湿效果更明显,湿地景观破碎化将会导致其降温效应、保水蓄水功能被削弱<sup>[35-36]</sup>。图8(b)表示了景观类型AI,水田、沼泽、湖泊的斑块AI较高,养殖池AI较低。就变化趋势而言,沼泽和水田的AI呈下降趋势,湖泊和养殖池AI呈上升趋势,说明过去20a间水田和沼泽斑块间的连通度降低,空间分布更为分散。景观组分之间的连接,是维护和增强区域生态功能的主要途径<sup>[37]</sup>,沼泽、水田等源地景观分散不利于湿地生态功能的发挥和生物多样性

维持。AWMFD表现了湿地类型的形状特征,图8(c)中,水田的AWMFD最高,其次是沼泽,湖泊和养殖池的AWMFD最低。说明湖泊和养殖池斑块更加规则,沼泽较水田斑块规则程度更高。水田的AWMFD在2001—2020年间逐渐下降,沼泽AWMFD虽在2001—2005年间上升,但2005—2020年间下降,这说明在过去20a间沼泽和水田的斑块形状趋于规则化,受人为干扰更为明显。研究表明斑块边界的复杂程度影响了能量向周边地区的扩散能力,边界复杂的斑块对周围的降温效果更高<sup>[38-39]</sup>。沼泽湿地斑块形状趋于规则化影响了其对周边地物的降温增湿效果,加剧城市热岛效应。

### 3.4 湿地与城市扩张用地相关性分析

为探究湿地变化与城市扩张之间的关系,基于SPSS软件计算了各年份湿地景观与城市扩张用地之间在面积、变化强度、ED、AI和AWMFD方面的Pearson相关系数,结果如表5所示。

表5 湿地与城市扩张用地相关性

Tab.5 Correlation between wetland and urban expansion land

| 湿地类型 | 面积          |           | 变化强度    |         | ED      |         | AI       |         | AWMFD    |        |
|------|-------------|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|--------|
|      | 建设用地        | 裸地        | 建设用地    | 裸地      | 建设用地    | 裸地      | 建设用地     | 裸地      | 建设用地     | 裸地     |
| 湖泊   | 0.841       | 0.830     | 0.961 * | 0.730   | 0.952 * | 0.923 * | 0.408    | 0.954 * | -0.937 * | 0.352  |
| 沼泽   | -0.995 ** ① | -0.996 ** | -0.043  | 0.032   | 0.918 * | 0.889 * | -0.946 * | -0.428  | 0.562    | 0.741  |
| 养殖池  | 0.977 **    | 0.980 **  | 0.964 * | 0.969 * | 0.491   | 0.412   | 0.853    | 0.435   | 0.978 ** | -0.090 |
| 水田   | -0.991 **   | 0.978 **  | 0.239   | -0.064  | 0.026   | 0.122   | -0.845   | -0.507  | -0.269   | -0.776 |

① \*\*表示在0.01水平上显著相关,\*表示在0.05水平上显著相关。

由表5可知,湿地景观面积与城市扩张用地面积之间强相关性,沼泽、养殖池和水田与建设用地和裸地的各时期面积在0.01水平上显著相关,其中沼泽和水田与城市扩张用地面积变化呈负相关,沼泽较水田相关性更高。

在变化方面,养殖池的变化强度与建设用地和裸地的变化强度相关性较高,在0.05水平上显著相关,湖泊的变化强度与建设用地的变化强度在0.05水平上显著相关。沼泽和水田的变化强度与城市扩张用地的变化强度相关性较低,可能是由于沼泽和水田面积衰减,建设用地和裸地面积扩张,面积基数差异较大。

沼泽和湖泊的ED与城市扩张用地的ED在0.05水平上显著相关,就AI而言,湖泊与裸地的AI在0.05水平上呈显著负相关,沼泽与建设用地的AI在0.05水平上呈显著负相关,养殖池和水田的AI与建设用地AI的相关系数也高于0.8。湿地景观与城市扩张用地之间的AWMFD相关性较ED和AI较低,建设用地与养殖池和湖泊的AWMFD显著相关,沼泽和水田的AWMFD与建设用地相关性较低,与裸地有较高相关性,相关系数高于0.7。由此

可见湿地景观格局的变化受城市扩张用地影响,且沼泽与城市扩张用地景观格局相关性较水田更高,说明沼泽湿地景观格局受城市扩张的影响更为明显。

## 4 结论

本研究针对金边市城市扩张对湿地景观产生威胁的问题,基于2000—2020年共5期Landsat系列卫星遥感影像,从数量、变化强度和景观格局3个方面分析了金边市湿地景观和城市扩张用地时空变化特征,并利用Pearson相关系数探讨了湿地景观变化与城市扩张之间的关系。主要结论如下:

1) 2000—2020年间金边市湿地面积持续减少,水田和沼泽作为优势景观面积下降最大,两者面积分别减少了128.197 0 km<sup>2</sup>和104.133 9 km<sup>2</sup>,湖泊和养殖池面积增加,河流几乎无变化。建设用地和裸地等城市扩张用地面积持续增加,2011年前城市扩张以西南方向的楔形扩张为主,2011年之后以城市中心为圆心向各方扩张。湿地向城市扩张用地转换强烈,沼泽向建设用地转化最多,水田次之。随着



城市用地扩张,湿地退化到城市边缘。

2) 金边市城市扩张用地在 2001—2005 年间扩张强度最大,2011—2015 年间扩张强度最小。养殖池和湖泊的扩张强度同样在 2001—2005 年间最大,2011—2015 年间最小。水田的衰减强度呈上升趋势,沼泽的衰减强度先下降后上升。景观类型的变化强度存在空间差异,建设用地和裸地在 NE 和 ES 方向扩张强烈,沼泽在这 2 个方向上强烈衰减,尤其是在 2011 年之后。建设用地和裸地在 SW 方向和 WS 方向上的扩张与水田在该方向上的衰减相一致。

3) 金边市城市扩张用地 ED, AI 和 AWMFD 均呈上升趋势,其空间结构更加集聚,形状更加复杂。湿地景观破碎化程度加重,空间分布更为分散,斑块形状趋于规则化。沼泽较水田破碎化程度更大,破碎化趋势更为明显,斑块更加规则。沼泽湿地景观格局变化可能会导致其增湿降温、保水蓄洪等生态功能下降。

4) 金边市湿地变化与城市扩张显著相关,尤其是在面积方面,沼泽、水田和养殖池与城市扩张用地的相关系数均高于 0.97 ( $p < 0.01$ ),其中沼泽与城市扩张用地面积相关性最高。湖泊和养殖池的扩张强度与城市用地的扩展强度显著相关,与建设用地相关系数高于 0.96 ( $p < 0.05$ )。沼泽与建设用地的 ED 和 AI 指数在 0.05 水平上显著相关。沼泽受城市扩张用地影响更为明显。

5) 城市扩张应寻求集约化发展,尽量减少对湿地的侵占和破坏,必要时优先利用水田,保持沼泽湿地面积不变和景观完整性,维持湿地生态功能。可通过建立保护区开发湿地旅游资源平衡经济发展和生态保护。

此外,金边市景观格局变化在澜湄流域具有一定的典型性,本研究结论具有一定的推广性。例如,胡志明、曼谷、万象和仰光等城市周边都围绕着大面积沼泽和水田,与金边市景观格局类似,城市扩张必然以沼泽和水田的破坏为代价。但澜湄流域范围广阔,不同城市间湿地变化空间差异性仍需进一步探讨。未来将在此工作的基础上将研究内容拓展到整个澜湄流域,深入探讨不同城市湿地景观对城市扩张响应的一致性和空间差异性。

## 参考文献 (References):

[1] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120.  
Yang Y X. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research[J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 111-120.

[2] 张月,张 飞,王 娟,等. 近 40 年艾比湖湿地自然保护区生态干扰度时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7082-7097.  
Zhang Y, Zhang F, Wang J, et al. Analysis of the temporal and spatial dynamics of landscape patterns and hemeroby index of the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, over the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7082-7097.

[3] Turner R K, van den Bergh J C J M, Söderqvist T, et al. Ecological-economic analysis of wetlands: Scientific integration for management and policy[J]. Ecological Economics, 2000, 35(1): 7-23.

[4] 赵欣胜,崔丽娟,李 伟,等. 吉林省湿地调蓄洪水功能分析及其价值评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 27-33, 66.  
Zhao X S, Cui L J, Li W, et al. Flood storage function analysis and value assessment of wetlands in Jilin Province [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 27-33, 66.

[5] 王延吉,神祥金,吕宪国. 1980—2015 年东北沼泽湿地景观格局及气候变化特征[J]. 地球与环境, 2020, 48(3): 348-357.  
Wang Y J, Shen X J, Lyu X G. Change characteristics of landscape pattern and climate in marsh areas of northeast China during 1980—2015 [J]. Earth and Environment, 2020, 48(3): 348-357.

[6] The UN Department of Economic and Social Affairs. 2018 of revision word urbanization prospects[R]. UN: New York, 2018.

[7] 谷 雨,闫 敏,李 通,等. 东南亚港口城市土地利用变化分析. 遥感信息[J], 2021, 36(2): 81-88.  
Gu Y, Yan M, Li T, et al. Analysis of land use change in southeast Asian port cities[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(2): 81-88.

[8] 海 凯,王思远,马元旭,等. “一带一路”沿线地区城市扩张和形态变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(10): 2092-2108.  
Hai K, Wang S Y, Ma Y X, et al. Urban expansion and form changes along the Belt and Road Initiative[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(10): 2092-2108.

[9] 禹丝思,孙中昶,郭华东,等. 海上丝绸之路超大城市空间扩展遥感监测与分析[J]. 遥感学报, 2017, 21(2): 169-181.  
Yu S S, Sun Z C, Guo H D, et al. Monitoring and analyzing the spatial dynamics and patterns of megacities along the Maritime Silk Road[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(2): 169-181.

[10] 韩瑞丹,张 丽,郑 艺,等. 曼谷城市扩张生态环境效应[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6322-6334.  
Han R D, Zhang L, Zheng Y, et al. Urban expansion and its ecological environmental effects in Bangkok, Thailand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6322-6334.

[11] 石小倩,赵筱青, Jakariya M D, 等. 1980—2017 年孟加拉国城市扩张的景观格局变化特征及其模式[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 275-283.  
Shi X Q, Zhao X Q, Jakariya M D, et al. Characteristics and models of landscape pattern changes in urban expansion in Bangladesh during 1980—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 275-283.

[12] 柳钦火,吴俊君,李 丽,等. “一带一路”区域可持续发展生态环境遥感监测[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 686-708.  
Liu Q H, Wu J J, Li L, et al. Ecological environment monitoring for sustainable development goals in the Belt and Road region [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4): 686-708.

- [13] 刘秋皇. 柬埔寨城市化发展战略研究[D]. 南京:东南大学, 2016.  
Liu Q H. Research on the urbanization development strategy of Cambodia[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] Mulder V L, Bruin S, Schaepman M E, et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review [J]. *Geoderma*, 2010, 162(1-2): 1-19.
- [15] 梁铭哲. 1990—2018年京津冀城市群滨海湿地演变规律与利用程度评估[D]. 北京:北京林业大学, 2020.  
Liang M Z. Evolution rule and utilization assessment of coastal wetland in Beijing - Tianjin - Hebei urban agglomeration during 1990—2018[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [16] 张 蕾, 鹿海峰, 赵文慧, 等. 2016—2018年北京城市湿地遥感监测分析[J]. *环境监测与预警*, 2019, 11(5): 91-95.  
Zhang Q, Lu H F, Zhao W H, et al. Remote sensing monitoring and analysis of urban wetland in Beijing from 2016 to 2018[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, 11(5): 91-95.
- [17] 张树苗, 白加德, 李夷平, 等. 城市化进程下北京市湿地面积变化研究[J]. *湿地科学*, 2018, 16(1): 30-32.  
Zhang S M, Bai J D, Li Y P, et al. Change of wetlands' area in Beijing under urbanization process[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(1): 30-32.
- [18] 鞠永婧. 多尺度下快速城市化与湿地变化关系研究—以长三角城市群为例[D]. 上海:华东师范大学, 2015.  
Ju Y J. Exploring the relationship between rapid urbanization and wetland change: A case study of Yangtze River Delta[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [19] Mao D H, Wang Z M, Wu J G, et al. China's wetlands loss to urban expansion[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(8): 2644-2657.
- [20] 娄艺涵, 张力小, 潘晓骏, 等. 1984年以来8个时期杭州主城区西部湿地格局研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(2): 247-254.  
Lou Y H, Zhang L X, Pan X J, et al. Pattern of wetlands in the west of main city zone of Hangzhou for 8 periods since 1984[J]. *Wetland Science*, 2021, 19(2): 247-254.
- [21] Basu T, Das A, Pham Q B, et al. Development of an integrated peri-urban wetland degradation assessment approach for the Chatra Wetland in eastern India[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4470.
- [22] 吴思佳, 林金煌, 陈文惠, 等. 2000年以来4个时期闽三角城市群中的湿地格局及变化[J]. *湿地科学*, 2018, 16(6): 717-722.  
Wu S J, Lin J H, Chen W H, et al. Patterns and changes of wetlands in the urban agglomeration of Min Delta in 2000, 2005, 2010 and 2015[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(6): 717-722.
- [23] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 77-88.  
Gong Z N, Zhang Y R, Gong H L, et al. Evolution of wetland landscape pattern and its driving factors in Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 77-88.
- [24] 李婧贤, 王 钧, 杜依杭, 等. 快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征[J]. *湿地科学*, 2019, 17(3): 267-276.  
Li J X, Wang J, Du Y H, et al. Change characteristics of coastal wetlands in the Pearl River Delta under rapid urbanization[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(3): 267-276.
- [25] 谷 雨. 海上丝绸之路沿线港口城市扩张和生态效益评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.  
Gu Y. Research on port city expansion and ecological benefit evaluation along the Maritime Silk Road[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [26] San V, Spoann V, Schmidt J. Industrial pollution load assessment in Phnom Penh, Cambodia using an industrial pollution projection system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 990-999.
- [27] Mialhe F, Gunnell Y, Navratil O, et al. Spatial growth of Phnom Penh, Cambodia (1973—2015): Patterns, rates, and socio-ecological consequences[J]. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104061.
- [28] 张 磊, 宫兆宁, 王启为, 等. Sentinel-2影像多特征优选的黄河三角洲湿地信息提取[J]. *遥感学报*, 2019, 23(2): 313-326.  
Zhang L, Gong Z N, Wang Q W, et al. Wetland mapping of Yellow River Delta wetlands based on multi-feature optimization of Sentinel-2 images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(2): 313-326.
- [29] 王正兴, 刘 闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.  
Wang Z X, Liu C, Huete A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987.
- [30] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.  
Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.
- [31] 刘 丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(4): 622-635.  
Liu L, Kuang G Y. Overview of image textural feature extraction methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(4): 622-635.
- [32] Zhang A Z, Sun G Y, Ma P, et al. Coastal wetland mapping with Sentinel-2 MSI imagery based on gravitational optimized multilayer perceptron and morphological attribute profiles [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 952.
- [33] 鲍 蕊, 夏俊士, 薛朝辉, 等. 基于形态学属性剖面的高光谱影像集成分类[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4): 731-738.  
Bao R, Xia J S, Xue Z H, et al. Ensemble classification for hyperspectral imagery based on morphological attribute profiles[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4): 731-738.
- [34] 郭建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
Wu J G. Landscape ecological: Pattern, process, scale and hierarchy [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [35] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 35-41.  
Xie M M, Wang Y L, Fu M C. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 35-41.
- [36] 黄 硕, 郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3142-3150.  
Huang S, Guo Q H. Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*,

2014,34(12):3142-3150.

[37] 王伟武,胡洁洁,徐婷立,等. 城市湿地空间社会—生态韧性规划策略研究[C]//中国城市规划学会. 面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2021:218-231.

Wang W W, Hu Z Z, Xu T L, et al. Urban wetland spatial society – ecological resilience planning strategy research[C]// Urban Planning Society of China. Spatial governance for high – quality develop-

ment; Proceedings of Annual National Planning Conference 2020. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021: 218 – 231.

[38] Cao X, Onishi A, Chen J, et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4): 224 – 231.

[39] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool – island intensity of Taipei City parks[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 80(4): 386 – 395.

## Spatiotemporal response of wetland landscape to urban expansion in Phnom Penh, Cambodia determined based on remote sensing

DONG Li<sup>1,2</sup>, AN Na<sup>3</sup>, SUN Genyun<sup>1,2</sup>, ZHANG Aizhu<sup>1,2</sup>, JIAO Zhijun<sup>1,2</sup>, DING Sunjinyan<sup>1,2</sup>, GE Jie<sup>4</sup>

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao 266237, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural

Resources, Beijing 100083, China; 4. Sichuan Institute of Land Science and Technology,

Sichuan Center of Satellite Application Technology, Chengdu 610045, China)

**Abstract:** Phnom Penh is a typical city in the Lancang – Mekong River basin. It has rapidly developed and expanded under the Belt and Road Initiative and has continuously invaded its surrounding wetlands. To fully understand the response of the wetland landscape to the urban expansion in Phnom Penh, this study extracted the 2000—2020 land use data of this city from five phases of Landsat images, then analyzed the spatiotemporal characteristics of the changes in wetland landscapes and the land use for urban expansion from the aspects of area change, spatial distribution, change intensity, and landscape pattern, and finally established the quantitative relationships between the wetland landscape and the land use for urban expansion using the correlation coefficient. The results are as follows. The construction land and bare land in Phnom Penh had expanded outwards from the center, and their sizes had constantly increased during 2000—2020, especially during 2001—2005. Their spatial structures were increasingly concentrated, and the shapes were more complex. The wetland area continuously decreased, and the swamps and paddy fields were converted to construction land and bare land intensively. In particular, swamps with an area of 124.06 km<sup>2</sup> were converted to construction land and bare land. In other words, about one – third of the swamps disappeared. The wetland landscape tended to be distributed in a fragmented and regularized manner. Its connectivity degree decreased and its ecological functions such as lowering the temperature, increasing the humidity, and regulating and storing floodwater were weakened. These changes in the wetland in Phnom Penh are significantly related to urban expansion, with a correlation coefficient in terms of area greater than 0.97 ( $p < 0.01$ ). There is also a strong correlation between the intensity of the urban expansion and the wetland landscape pattern. To maintain the sustainable development of the city, it is necessary to reasonably plan the spatial layout in the process of urban expansion. The urban expansion should be conducted mainly through intensive development, paddy fields should be utilized first if necessary, and the occupation and destruction of swamps and wetlands should be avoided as much as possible.

**Keywords:** wetland; urban expansion; landscape pattern; Phnom Penh, Cambodia

(责任编辑: 陈 理)