

马来西亚吉隆坡市土地利用变化特征分析与预测

王甜, 闫金凤, 乔海燕

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: [目的] 揭示快速城市化过程中港口城市土地利用景观格局变化规律, 为当地编制土地利用规划提供科学依据。[方法] 以马来西亚吉隆坡市 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 期遥感影像为基础数据, 基于交互式数据语言 (IDL), 采用指数分类法提取土地利用信息, 并应用 RS, GIS 技术和景观生态学方法对吉隆坡市 2000—2020 年土地利用景观格局变化进行研究, 最后采用灰色预测模型预测 2025 年吉隆坡市土地利用数据。[结果] 2000—2020 年吉隆坡市种植园和林地大幅减少, 建设用地迅速增加, 港口与城市圈中部区域种植园主要转化为建设用地; 土地利用景观形状趋于复杂化、不规则化, 景观类型空间连通性降低, 景观异质性增强; 2025 年吉隆坡市建设用地和种植园面积分别为 1 624.12 km² 和 2 216.99 km², 与往年相比, 建设用地增加, 种植园减少。[结论] 2025 年吉隆坡市土地利用类型仍主要以种植园为主。宏观来看, 随着城市的快速发展, 种植园的数量持续减少。未来发展规划需进一步合理规划土地利用方式, 提高土地利用效率, 加大对种植园的保护力度。

关键词: 土地利用; 景观格局; 城市化; 港口城市; 交互式数据语言 (IDL); 灰色预测模型; 吉隆坡市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0268-08

中图分类号: TP79, U412.1⁺4

文献参数: 王甜, 闫金凤, 乔海燕. 马来西亚吉隆坡市土地利用变化特征分析与预测[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 268-275. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.039; Wang Tian, Yan Jinfeng, Qiao Haiyan. Analysis and prediction of land-use change characteristics in Kuala Lumpur, Malaysia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 268-275.

Analysis and Prediction of Land-Use Change Characteristics in Kuala Lumpur, Malaysia

Wang Tian, Yan Jinfeng, Qiao Haiyan

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: [Objective] The change trend in land-use patterns of a port city during rapid urbanization was studied to provide a scientific basis for local land-use planning. [Methods] This research used five remote sensing images of Kuala Lumpur, Malaysia (for 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020) as the source data. The index classification method was used to extract land-use information based on the interactive data language (IDL), and RS and GIS technology along with landscape ecology methods were used to study the change of the land-use landscape pattern of Kuala Lumpur from 2000 to 2020. Finally, the grey prediction model was used to predict land-use data for Kuala Lumpur in 2025. [Results] From 2000 to 2020, Kuala Lumpur's plantation and forest land decreased significantly, whereas construction land increased rapidly; plantations in the central part of the port and in the city circle were mainly converted into construction lands. The landscape shape of land use tended to be complex and irregular, the spatial connectivity of landscape types was reduced, and the landscape heterogeneity was enhanced. The estimated areas of construction land and plantation in Kuala Lumpur in 2025 were 1624.12 km² and 2216.99 km², respectively. Compared with previous years, the area of construction land will increase and the area of plantations will decrease. [Conclusion] In 2025, the main land-use type in Kuala Lumpur will still be plantation. From a macro perspective, with the rapid development of cities, the number of plantations will continue to decrease. Future development plans need to rationally plan land-use patterns, improve land-use efficiency, and strengthen the protection of plantations.

收稿日期: 2020-04-13

修回日期: 2020-06-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“高强度扰动下大湾区海陆场景功能优化与综合调控”(41890854)

第一作者: 王甜(1994—), 女(汉族), 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为海岸带遥感。Email: 1476373100@qq.com。

通讯作者: 闫金凤(1974—), 女(汉族), 江苏宿迁人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事海岸带遥感研究。Email: 501905850@qq.com。

Keywords: land-use; landscape pattern; urbanization; port city; interactive data language (IDL); grey prediction model; Kuala Lumpur

港口城市是港口货源、运输及港口基础设施的供应者,是港口发展的重要依托^[1]。港口城市多位于海岸线沿线或河流入海口处,即海岸带区域^[2],随着港口发展及城市快速扩张不可避免得给海岸带土地资源和生态环境带来沉重负担。当前,马来西亚吉隆坡市处于快速城市化发展阶段,分析其土地利用变化特征对城市可持续发展具有重要意义。

土地利用/覆被变化(LUCC)是一个受自然和人文因素驱动的动态过程,过程和机理非常复杂^[3],且对区域景观的组成和结构具有强烈的影响^[4]。景观格局由相互作用的斑块以一定的规律组成,具有高度空间异质性,景观格局及其变化和发展受自然、生物和社会因素相互作用^[5],研究区域景观格局有助于揭示区域生态状况和空间变异特征^[6]。而将土地利用变化与土地景观格局变化相结合进行土地利用景观格局研究,有助于揭示土地利用变化与景观生态过程间的相互关系^[7]。刘斌寅等^[8]从景观水平对淮北市土地利用景观格局变化进行分析;陈铸等^[9]对福州市土地利用景观格局变化进行定量分析,并探讨了土地利用格局变化驱动机制;田鹏等^[10]基于遥感影像对东海区大陆海岸带景观格局变化及生态风险进行研究;周然等^[11]研究了港口建设对滨海湿地景观格局影响及生态效应;郭子坚等^[12]探讨了港口时空演化对区域景观格局的影响规律。中国学者已对内陆城市,土地利用变化特征分析及预测进行较为全面的研究,但针对港口城市,研究多集中于土地利用景观格局及生态方面,对未来土地利用变化特征的预测相对较少,且针对“一带一路”沿线重要港口城市,土地利用研究时间多截止于 2015 年,2015—2020 年土地利用特征的研究尚存空白。

港口城市归根结底也是城市,具有城市发展的规律和特征,但又区别于一般的内陆城市,受沿海地形、港口位置及岸线资源分布,土地利用有着自身的特色。在港口带动城市发展过程中,优质耕地被持续占用,建设用地快速增加,造成城市土地利用结构发生显著变化^[13]。吉隆坡市地处马六甲海峡东岸,地理位置优越,其港口巴生港,由于毗邻设有自由贸易区,腹地广阔,产业发达,已成为远东至欧洲贸易航线的理想停靠港和区域性配发中心。随着 2010 年“大吉隆坡市计划”的提出,城市化速度不断加快,土地利用变化显著,而 2013 年中国“一带一路”倡议的提出,为吉隆坡市发展带来新的机遇,推动吉隆坡市新一轮发展,土地作为支撑港口及城市发展的基础自然资源,

其利用必将发生新的变化。因此,本文以吉隆坡市 2000—2020 年间 5 期遥感影像为数据源,借助 ENVI5.3 软件、ArcGIS 10.2 软件和 Fragistas 4.2 软件对研究区 20 a 间土地利用及景观格局进行动态变化分析,并利用 GM(1,1)灰度模型对研究区 2025 年土地利用情况进行预测,以期当地政府制定土地利用规划提供重要参考。

1 研究区概况

吉隆坡市位于巴生河流域,地处马来西亚雪兰莪州中心,东有蒂迪旺沙山脉,北方及南方有丘陵环绕,西临马六甲海峡。2018 年吉隆坡市总人口为 1.80×10^6 ,含 2.46×10^5 外籍人士(马来西亚统计局)。吉隆坡市经济呈多方面发展,制造业和农业都非常发达,农业主要为发展橡胶,橡胶业为国内一种重要产业。属热带海洋性气候,年均温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $2\ 000\sim 2\ 500\text{ mm}$ 。地势东北高、西南低,平均海拔 21.95 m 。巴生港为马来西亚海上门户,也是该国最大港口,位于吉隆坡市西南方约 38 km 处,为适应集装箱运输发展需要,巴港当局除在北港建设第 2 个集装箱码头外,还在卢梅特(LUMUT)建设西港,新的集装箱码头可以停靠 6.00×10^4 吨级的船舶,届时巴生港将进一步发展为亚洲的主要转口港之一。本文选取包含港口和城市面积约为 $6\ 077.8\text{ km}^2$ 的区域进行研究。

2 数据来源及方法

2.1 数据来源

本研究所用遥感影像来源于美国地质勘探局官方网站(<http://glovis.usgs.gov/>),其中 2000,2005,2010 年遥感影像为 Landsat TM 影像,2015 年和 2020 年遥感影像为 Landsat OLI 影像,分辨率均为 30 m ,此外还有研究区 DEM 数据及其他文字资料。

2.2 遥感影像分类方法

首先对遥感影像进行预处理,然后基于交互式数据语言 IDL(interactive data language)使用指数分类法编写程序进行地物提取。结合项目组对吉隆坡市进行的实地考察,以现状特征和地域性为基本原则,建立土地覆被分类体系,将研究区土地利用类型分为 6 类:林地、种植园、耕地、建设用地、水体及其他用地,具体地物类型提取过程如下所示:

(1) 水体的识别与提取。首先利用 DEM 等于 0 提

取海洋,然后利用改进归一化差异水体指数 MNDWI (modified normalized difference water index)^[14] 提取内陆水体区域,将提取出的海洋和内陆水体区域合并即为研究区水体。

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{MIR}) / (\text{Green} + \text{MIR}) \quad (1)$$

(2) 植被和耕地的识别与提取。对去除水体部分先使用归一化植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index)^[15] 提取影像中的植被区域,然后利用缨帽变换湿度指数 WI(tasselled cap transformation water index)^[16] 提取红树林湿地 ($\text{WI} > 0.9$),对去除红树林湿地区域将 $\text{DEM} > 28$ 部分归为天然林,剩余区域结合谷歌地图目视提取耕地信息,最后将红树林湿地和天然林合并为林地,去除林地和耕地部分的植被部分即为种植园。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{WI} = & 0.144 \text{Blue} + 0.176 \text{Green} + \\ & 0.332 \text{2Red} + 0.339 \text{6NIR} - \\ & 0.621 \text{0SWIR}_1 - 0.418 \text{9SWIR}_2 \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 建设用地及其他用地的识别与提取。对去除水体和植被部分,首先利用 NDBI(normalized difference build-up index)^[17] 进行地物提取,对提取的地物结合裸土指数 BSI(bare soil index)^[18] 区分建设用地和裸地,剩余部分通过目视解译提取建设用地中混有的旱地,并将裸地归为其他用地,旱地归为耕地。

$$\text{NDBI} = (\text{MIR} - \text{NIR}) / (\text{MIR} + \text{NIR}) \quad (4)$$

$$\text{BSI} = [(\text{LWIR} + \text{NIR}) - (\text{SWIR} + \text{Green})] / [(\text{LWIR} + \text{NIR}) + (\text{SWIR} + \text{Green})] \quad (5)$$

最后对提取出的地物结合谷歌地图进行目视修订,最终分类结果如附图 17 所示(见封 3)。结合项目组实际野外考察采样和 Google Earth 高分辨率影像,在充分考虑样本数量和空间分布特征的前提下,使所选样本覆盖整个研究区及分类体系中的所有土地类型,以此分别建立 2000,2005,2010,2015,2020 共 5 期检验样本,将检验样本作为真实地类分别对 5 期分类结果进行精度验证,经验证分类精度达到 90% 以上,能够满足本研究的需要。

2.3 研究方法

2.3.1 单一土地利用动态度 单一土地利用动态度表征某一土地利用类型在时间序列内的数量变化情况。其公式为^[19]:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中: K 为某种地类在研究期内的单一土地利用动态度; U_a 、 U_b 分别为某种地类在研究期初和期末的

面积; T 为研究时长,当 T 的时段设定为年时, K 的值就是该研究区某种土地利用类型年变化率。

2.3.2 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵不仅可以反映研究期间各类土地利用的数量变化情况,同时也可以反映各类土地的转移变化情况^[20]。

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: S 代表面积; n 代表土地利用类型总数; S_{ij} 表示由 i 地类转移到 j 地类的面积^[21]。

2.3.3 景观指数 景观指数高度集中景观格局信息,可反映景观结构组成和空间配置,目前已广泛应用到景观格局研究中^[22]。本文综合考虑各景观指数实际内涵和研究区实况,参考已有的研究成果^[2,23-26],运用 Fragstats 4.2 软件,从景观水平选择景观形状指数(LSI)、蔓延度指数(CONTAG)、景观分割指数(DIVISION)、香农多样性指数(SHDI)对吉隆坡市土地利用景观格局进行分析。

(1) 景观形状指数(LSI):反映景观形状的复杂度, $\text{LSI} \geq 1$,当 $\text{LSI} = 1$,为标准正方形,当 $\text{LSI} > 1$ 表示景观形状偏离正方形,且值越大偏离越严重,形状越不规则。

(2) 蔓延度指数(CONTAG):描述不同景观类型的延展趋势,值越大,表示优势景观类型的连接性越高,反之景观的破碎化程度较高。

(3) 景观分割指数(DIVISION):描述景观破碎度,取值范围为 0~1,越接近 0,表示景观整体度越高;越接近 1,表示景观破碎化程度越严重。

(4) 香农多样性指数(SHDI):表示景观整体的复杂程度, $\text{SHDI} \geq 0$, $\text{SHDI} = 0$ 表示整个景观由一个斑块组成, SHDI 增大,表示斑块类型增加或各斑块类型在景观中均衡化分布。

2.3.4 灰色预测模型 科学有效地对土地利用进行预测能够为研究区可持续发展提供相应技术支持^[27]。灰色预测模型 GM(1, 1)以时间序列性资料为基础,通过关联分析鉴别含有不确定因素系统中各因素之间发展趋势的相异程度,然后生成一组具有较强规律性的数据序列,最后建立相应微分方程模型来预测事物未来的发展状况^[28],微分方程如公式(8)所示。

$$X(t+1) = [X(1) - \frac{b}{a}]e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

式中: $X(t+1)$ 表示预测 $t+1$ 年的预测结果; a 为发展系数,表示行为序列估计值的发展态势; b 为灰色作用量,反映数据变化的关系。模型预测精度标准为

均方差比值 C 和小误差概率 P , 具体评价指标及对应精度预测等级如表 1 所示。

表 1 评价指标精度预测等级

精度评价指标	好	良	合格	不合格
C	<0.35	<0.50	<0.65	≥ 0.65
P	>0.95	>0.80	>0.70	≤ 0.70

3 结果与分析

3.1 土地利用面积变化

根据 5 期土地利用分类结果, 借助 ENVI 统计工具, 吉隆坡市 2000—2020 年 5 个时期土地利用类型数据及单一土地利用动态度如表 2 所示。分析表 2 可知, 种植园为吉隆坡市土地的主导类型, 在五个时期占比分别为 40.66%, 40.47%, 40.14%, 39.49%, 36.85%, 占据绝对优势, 这与东南亚国家以种植热带经济作物为主导的种植园农业结构相符。其次是林地、建设用地和水体, 各研究时段 4 种土地类型面积之和分别占研究区土地总面积的 97.14%, 98.09%, 98.38%, 99.14%, 99.14%。这种土地利用结构在一定程度上反映了港口城市吉隆坡市自然资源及社会经济发展状况。在土地利用数量变化方面, 建设用地持续增加, 2020 年面积达到 1482.98 km²; 林地在

2015 年前减少显著, 占比由 20.99% 降为 18.98%, 2015 年后减少相对较少, 主要与 2015 年前研究区中北部山脉垦殖为种植园及马来西亚政府加大对沿岸红树林保护力度有关; 该区种植园一直处于减少状态, 其面积从 2 471.53 km² 减少至 2 239.95 km², 与城市快速化发展关系密切; 其他用地在 2000—2015 年间面积减少较多, 2015—2020 年间面积略有增加; 耕地和水体变化不大, 相对比较稳定。

土地利用动态度结果显示, 2000—2020 年间吉隆坡市土地利用类型变化最快的为其他用地和建设用地, 其中建设用地动态度不断增大, 表明研究期间吉隆坡市一直处于快速城市化状态, 城市扩张显著, 同时 GDP 有明显提高, 第二和第三产业增加, 城市人口增加, 土地利用变化显著。然而在港口带动城市发展过程中, 造成林地和种植园大面积减少, 由于二者研究初期面积较大, 研究时段内单一土地利用动态度相对较小。其他用地在前 3 个研究时段一直处于减少状态, 且动态度最大, 2015—2020 年间略有增加, 动态度为 0.46%。耕地在研究期间内变化速度仅次于其他用地和建设用地, 且一直处于减少状态, 主要由种植园侵占造成。水体变化速度较低但变化合理, 表明吉隆坡市生态保护力度显著和沿海养殖业发展稳定, 这对今后吉隆坡市土地的可持续发展意义重大。

表 2 2000—2020 年吉隆坡市土地利用类型变化

年份	项目	耕地	种植园	林地	水体	建设用地	其他用地
2000	面积/km ²	28.37	2 471.53	1 275.83	1 136.42	1 020.45	145.20
	占比/%	0.47	40.66	20.99	18.70	16.79	2.39
2005	面积/km ²	25.40	2 459.66	1 251.21	1 141.86	1 108.64	91.04
	占比/%	0.42	40.47	20.59	18.79	18.24	1.50
2010	面积/km ²	24.47	2 439.44	1 182.60	1 142.25	1 214.74	74.30
	占比/%	0.40	40.14	19.46	18.79	19.99	1.22
2015	面积/km ²	20.52	2 400.00	1 153.59	1 143.57	1 327.91	32.23
	占比/%	0.34	39.49	18.98	18.82	21.85	0.53
2020	面积/km ²	18.90	2 239.95	1 150.36	1 152.64	1 482.98	32.97
	占比/%	0.31	36.85	18.93	18.96	24.40	0.54
2000—2005	动态度/%	-2.09	-0.10	-0.39	0.10	1.73	-7.46
2005—2010	动态度/%	-0.73	-0.16	-1.10	0.01	1.91	-3.68
2010—2015	动态度/%	-3.23	-0.32	-0.49	0.02	1.87	-11.32
2015—2020	动态度/%	-1.58	-1.33	-0.06	0.16	2.34	0.46
2000—2020	动态度/%	-1.67	-0.47	-0.49	0.07	2.27	-3.86

3.2 土地利用类型转移

本文通过建立土地利用转移矩阵分析其土地利用转化趋势, 吉隆坡市土地利用类型转化主要是种植园和建设用地、种植园和林地之间的相互转化, 主要特征为种植园的转出和建设用地的转入(见表 3)。

建设用地主要分布于研究区中部, 除中部外, 建设用地位于北部和南部也有零星分布, 研究期间沿原有城市圈向西北及西南方向扩张。增加部分主要来源于种植园, 各时段内种植园转化为建设用地面积分别为 207.55, 211.38, 232.06, 233.60 km²。林地 2000—

2005 和 2010—2015 年转化为建设用地的面积分别为 43.25, 44.72 km², 此外还有水体、耕地和其他用地转为建设用地, 但与种植园相比, 转化面积较小。

种植园主要分布于研究区西北部、中南部及东南部, 研究期间港口与城市中部区域减少最为显著。减少部分主要转换为建设用地, 此外还有林地和其他用地, 转换为耕地和水体的数量较少。2005—2010 年, 206.87 km² 林地转换为种植园, 林地转化为种植园面积明显大于种植园转化为林地, 而其他时段林地和种植园间相互转化面积相差不大, 且种植园转化为林地面积略大, 这主要与 2005—2010 年间山脉垦殖有关。各研究时段内均有较多种植园转换为其他用地, 而其他用地作为建设用地面积增加的重要来源之一, 在前 3 个研究时段内呈减少趋势, 2015—2020 时段面积略有增加。

2000 年建设用地主要位于研究区中部, “港”“城”分离明显, 期间随着巴生港扩建、发展的带动作用及“大吉隆坡市计划”和“一带一路”等政策的促进, 吉隆坡市城市化进程加快, 建设用地沿原有城市圈向西北及西南方向扩张, 与此同时加剧了种植园开发规模和程度, 建设用地与港口空间上的联系则越来越密切, 向“港”“城”融合方向靠近, 种植园则不断转移为建设用地。原因主要为: ①吉隆坡市背靠蒂迪旺沙山脉, 地势较高, 开发难度较大, 建设用地扩张受到一定程度的限制; ②随着港口的发展及扩张, 带动区域附近与其配套的交通运输、物流仓储、公共管理等建设用地增加, 主要来源于周边于红树林和种植园; ③由于港口距城市圈较远且中间分布有大面积种植园, 港口发展与城市发展关联程度较弱, 城市扩张沿原有城市圈向西北及西南方向扩张, 加剧了种植园开发规模和程度。

表 3 2000—2020 年吉隆坡市土地利用转移矩阵

km²

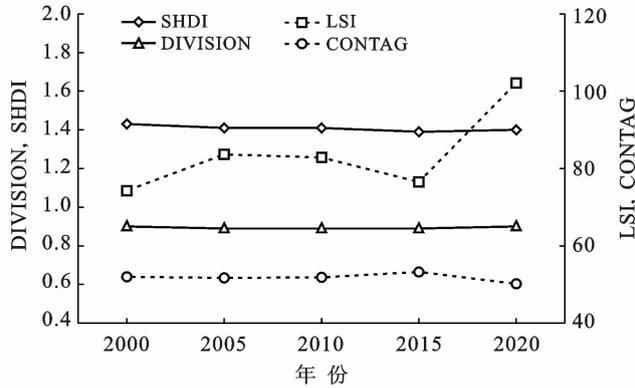
年份	土地利用类型	耕地	种植园	林地	水体	建设用地	其他用地
2000—2005	耕地	14.91	12.55	0.70	0	0.21	0
	种植园	8.57	2 030.74	166.80	6.69	207.55	51.18
	林地	1.89	161.10	1 045.15	11.86	43.25	12.58
	水体	0	5.39	7.08	1 109.41	13.94	0.61
	建设用地	0.03	217.98	25.51	8.55	762.62	5.76
	其他用地	0	31.90	5.96	5.35	81.08	20.92
2005—2010	耕地	17.58	6.96	0.85	0	0	0
	种植园	3.43	2 061.12	152.02	6.12	211.38	25.59
	林地	3.41	206.87	995.83	5.60	30.22	9.27
	水体	0	3.76	12.05	1 115.87	9.49	0.68
	建设用地	0.05	138.00	17.87	12.57	928.26	11.88
	其他用地	0	22.73	3.97	2.08	35.38	26.87
2010—2015	耕地	14.73	8.75	0.15	0	0.39	0.46
	种植园	2.23	2 022.36	159.85	7.34	232.06	15.60
	林地	3.56	158.28	961.03	10.24	44.72	4.78
	水体	0	6.82	8.91	1 115.78	10.26	0.49
	建设用地	0	176.37	17.27	9.56	1008.49	3.05
	其他用地	0	27.42	6.37	0.66	32.00	7.85
2015—2020	耕地	16.24	2.06	2.22	0	0	0
	种植园	2.25	1 991.51	146.87	4.84	233.60	20.93
	林地	0.07	130.13	975.11	11.44	32.04	4.79
	水体	0	5.06	5.76	1 118.72	13.83	0.21
	建设用地	0.34	104.94	17.39	16.91	1 184.92	3.41
	其他用地	0	6.26	3.02	0.74	18.58	3.63

3.3 景观格局变化

图 1 为吉隆坡市 2000—2020 年景观水平上各景观指数变化特征。在景观水平上, 近 20 年 LSI 整体上呈上升趋势, 在 2020 年达到最大值, 其值为 102.12, 表明研究区景观形状复杂程度提高, 这与吉隆坡市经济

高速发展, 城市不断扩张有密切关系。CONTAG 反映的是景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度, 蔓延度指数先减小后增大然后再减小, 整体呈下降趋势, 由 2000 年的 51.98 减少至 2020 年的 50.20, 共减少 1.78, 说明各景观类型空间连通性降低, 景观由聚

集状向分散状转移,主要景观优势度下降,整体景观类型空间更加分散,主要与港口发展建设带动城市沿原有城市圈向港口所在方向扩张及港区与港口配套的交通运输、物流仓储、公共管理等建设用地增加有密切关系。DIVISION 变化不显著,表明吉隆坡市景观破碎程度相对稳定。SHDI 先减少后增加,在 2015 年达到最小值,其值为 1.39,表明吉隆坡市景观异质程度先降低后增强,2015 年后景观向多样化趋势发展,由于港口带动城市向港口所在位置扩张,种植园被大量占用,种植园优势度有所降低,但仍是研究区主要景观类型。



注:SHDI 为香农多样指数; DIVISION 为景观分割指数; LSI 为景观形状指数; CONTAG 为蔓延度指数。

图 1 2000—2020 年吉隆坡市景观指数变化特征

3.4 土地利用预测

3.4.1 模型验证 本文使用 GM(1,1)模型,首先利用 2000,2005,2010,2015 年 4 期分类数据对研究区 2020 年的建设用地面积进行预测并与实际分类数据进行对比,模型评价效果达到要求后,再利用 2000,2005,2010,2015,2020 年 5 期数据对吉隆坡市 2025 年建设用地和种植园面积进行预测。

将吉隆坡市 2000,2005,2010,2015 年 4 期建设用地面积带入 GM(1,1)模型中,得到:

$$X(t+1) = 11\,754.96\,992e^{0.090\,105t} - 10\,734.51\,992 \quad (9)$$

式中:参数 $a = -0.090\,105$; $b = 967.233\,917$ 。

根据 GM(1,1)模型得到的公式(9)对 2005,2010,2015 年建设用地拟合结果如表 4 所示。

表 4 2005,2010,2015 年吉隆坡市建设用地拟合结果

年份	实际值/ km ²	拟合值/ km ²	绝对 误差	相对误差/ %
2005	1 108.64	1 108.37	0.27	0.02
2010	1 214.74	1 212.87	1.87	0.15
2015	1 327.91	1 327.23	0.68	0.05

评价结果: $C = 0.006\,2$, $P = 1.000$,表明当前模型评价效果很好。根据公式(9)计算得出 2020 年建设用地面积预测值为 1 452.38 km²,而实际面积为 1 482.98 km²,相差 30.60 km²,仅占总面积的 0.50%,误差很小,表明此模型能够满足本研究精度要求。

3.4.2 土地利用预测 将吉隆坡市 5 期建设用地和种植园面积数值分别带入 GM(1,1)模型中,得到:

$$X(t+1) = 10\,837.540\,87e^{0.096\,872t} - 9\,817.090\,872 \quad (10)$$

$$X(t+1) = -87\,237.772\,09e^{-0.028\,948t} + 89\,709.302\,09 \quad (11)$$

式(10)中:参数 $a = -0.096\,872$; $b = 951.001\,227$,式(11)中:参数 $a = 0.028\,948$; $b = 2\,596.904\,877$ 。

根据 GM(1,1)模型得到的公式(10)和公式(11)对 2005,2010,2015,2020 年建设用地和种植园拟合结果如表 5 所示。

表 5 2005,2010,2015,2020 年吉隆坡市建设用地拟合结果

土地 类型	年份	实际值/ km ²	拟合值/ km ²	绝对 误差	相对 误差/%
建设 用地	2005	1 108.64	1 102.39	6.25	0.56
	2010	1 214.74	1 214.52	0.22	0.02
	2015	1 327.91	1 338.06	10.15	0.76
	2020	1 482.98	1 474.17	8.81	0.59
种植 园	2005	2 459.66	2 489.16	29.50	1.20
	2010	2 439.44	2 418.13	21.31	0.87
	2015	2 400.00	2 349.14	50.86	2.12
	2020	2 239.95	2 282.11	42.16	1.88

评价结果:建设用地 $C = 0.040\,2$, $P = 1.000\,0$,种植园 $C = 0.398\,5$, $P = 1.000\,0$,表明当前模型评价效果很好,能够满足本研究需要。根据公式(10)和公式(11)计算得出 2025 年建设用地和种植园面积的预测值分别为 1 624.12, 2 216.99 km²,建设用地和种植园面积分别保持增加和减少的趋势不变。由于“大吉隆坡市计划”、“一带一路”政策、港口带动作用、移民增加及地形限制等因素,吉隆坡市处于快速城市化状态,建设用地增加明显,城市向港口所在方向扩张,港口与城市间分布有大面积种植园,加剧了种植园开发规模和程度,但仍为研究区主要土地利用类型。

4 结论与讨论

4.1 讨论

本文从土地利用类型面积变化、转移矩阵及景观格局对吉隆坡市 2000—2020 年土地利用变化特征进

行分析,在此基础上使用灰色预测模型,对吉隆坡市 2025 年土地利用情况进行预测。

(1) 建设用地面积持续增加,且向港口所在位置扩张,这与韩瑞丹研究得出,吉隆坡市沿城市中心与港口的连线方向扩张相一致^[1],港口与城市圈中间分布有大面积种植园,由于港口带动城市向港口所在方向扩张,进一步加剧了种植园的开发规模和程度,造成种植园持续减少。

(2) 景观形状趋于复杂化和不规则化,这与王恒在海上丝绸之路沿线港口城市扩张遥感分析研究中,吉隆坡市景观形状指数呈上升趋势相一致^[2];受港口带动城市扩张及港区配套设施的健全,城市蔓延度指数整体呈下降趋势,表明各景观类型空间连通性降低,景观由聚集状向分散状转移;由于港口带动城市向港口所在位置扩张,种植园被持续占用,种植园景观优势度有所降低,景观异质程度增强,土地利用类型开始朝多样化方向发展;研究期间吉隆坡市主要以边缘式和填充式相结合的模式进行扩张^[1],景观破碎度变化量相比其他景观指数较小,这与王恒研究得出,吉隆坡市 1990—2015 年景观破碎度变化量接近^[2]。

(3) 本文在利用灰色预测模型对吉隆坡市土地利用情况进行预测前,首先对模型进行验证,验证模型有效性后,对 2025 年吉隆坡市土地利用情况进行预测,且桑潇等^[28]基于灰色预测模型对山西省潞城市土地利用进行预测,也验证了灰色预测模型进行土地利用预测的有效性。

通过分析吉隆坡市 2025 年土地利用情况预测结果可知,吉隆坡市仍处于快速城市化发展状态,这也在提示我们,在满足建设用地持续增长的同时,还需加大对种植园的保护力度,划定种植园红线,进一步强化海岸带生态环境和资源保护,合理布局产业空间,优化景观空间格局,以实现港口与城市和谐发展。然而,灰色预测模型结果仅能代表现行发展策略下相应的土地利用变化情况,与未来实际土地利用变化结构存在一定的差异。尤其在不同的发展模式和政策下,土地利用类型及景观格局演变会有不同。此外,灰色预测模型依赖数据的逐年数量变化特征,因此,为进一步提高模拟预测的精度,在下一步模型预测时,可将灰色预测模型与其他土地利用模型相结合,从而为吉隆坡市土地用相关政策的制定提供参考。由于本文所用 5 期遥感影像分辨率均为 30 m,在港口发展对城市内部空间结构影响方面存在不足,在今后的研究中应适当使用分辨率较高的影像,对吉隆坡市土地利用变化特征进行细致、准确的研究。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年,吉隆坡市整体土地利用变化呈现种植园和林地持续减少,建设用地面积迅速增加,其他用地先减少后增加,耕地和水体变化较小。建设用地主要通过占用港口与城市圈中部区域种植园向港口所在方向扩张。

(2) 港口带动、城市扩张等使吉隆坡市土地利用景观格局发生较大变化,主要表现为:景观形状趋于复杂化、不规则化,各景观类型空间连通性降低,景观异质程度增强,2015 年后土地利用类型开始朝多样化方向发展,景观破碎度变化较小。

(3) GM(1,1)模型适用于土地利用变化预测,2025 年吉隆坡市建设用地和种植园预测面积分别为 1 624.12 km² 和 2 216.99 km²,预计城市仍将向港口所在方向扩张,应加强对种植园保护力度。

[参 考 文 献]

- [1] 韩瑞丹. 港口城市扩张及其生态环境效应研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.
- [2] 王恒. 海上丝绸之路沿线港口城市扩张遥感分析研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [3] Xu Quanli, Yang Kun, Wang Guilin, et al. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony optimization: A case study of the Erhai Lake Basin, China [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(1): 95-118.
- [4] 孙倩, 阿丽亚·拜都热拉, 依力亚斯江·努尔麦提. 新疆艾比湖湿地 LUCC 对景观格局演变的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(3): 583-592.
- [5] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析[J]. *生态学报*, 1995, 15(2): 113-120.
- [6] Hladnik D. Spatial structure of disturbed landscapes in Slovenia [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(1): 17-27.
- [7] 陈文波, 郑蕉, 鄢帮有. 鄱阳湖区土地利用景观格局特征研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 79-83.
- [8] 刘斌寅, 赵明松, 卢宏亮, 等. 1985—2015 年淮北市土地利用变化特征及其预测研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 807-814.
- [9] 陈铸, 傅伟聪, 黄钰麟, 等. 福州市土地利用景观格局变化及驱动力研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(1): 99-107.
- [10] 田鹏, 龚虹波, 叶梦姚, 等. 东海区大陆海岸带景观格局变化及生态风险评价[J]. *海洋通报*, 2018, 37(6): 695-706.
- [11] 周然, 彭士涛, 覃雪波, 等. 港口建设对滨海湿地景观格局的影响及其生态效应[J]. *水道港口*, 2012, 33(3):

- 245-250.
- [12] 郭子坚,刘俊舒,王文渊,等.港口时空演化对区域景观格局影响研究[J].港工技术,2016,53(5):60-63.
- [13] 王丽萍,周寅康,金晓斌.港口城市土地利用变化特征分析:以江苏省连云港市中心城区为例[J].生态经济,2014,30(12):133-136.
- [14] 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.
- [15] Lyon J G, Yuan Ding, Lunetta R S, et al. A change detection experiment using vegetation indices [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998, 64(2):143-150.
- [16] Kauth R J, Thomas G S. The tasselled cap: A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT [EB/OL]. 1976.
- [17] 查勇,倪绍祥,杨山.一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J].遥感学报,2003,7(1):37-40.
- [18] Rikimaru A. Landsat TM data processing guide for forest canopy density mapping and monitoring model [C]//ITTO workshop on utilization of Remote Sensing in site assessment and planning for rehabilitation of logged-over forest. Bangkok, Thailand, 1996:1-8.
- [19] 王思远,刘纪远,张增祥,等.中国土地利用时空特征分析[J].地理学报,2001,56(6):631-639.
- [20] 吴婷婷.基于遥感和 GIS 的土地利用/覆盖变化分析[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [21] 宋伟东,杨冬,李恩宝,等.盘锦市湿地信息提取与动态变化监测[J].测绘科学,2016,41(9):60-65.
- [22] 马泉来,高凤杰,张志民,等.东北农林交错区土地利用景观及生态服务价值变化[J].水土保持通报,2016,36(1):265-271.
- [23] 范丽娟,田广星.1995—2015年上海市土地利用及其景观格局变化[J].水土保持通报,2018,38(1):287-292.
- [24] 郑新奇,付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [25] 李翠漫.钦州湾海岸带景观格局时空演变及生态系统健康评价[D].广西南宁:南宁师范大学,2019.
- [26] 付刚,肖能文,乔梦萍,等.北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J].生态学报,2017,37(8):2551-2562.
- [27] 宗玮.上海海岸带土地利用/覆盖格局变化及驱动机制研究[D].上海:华东师范大学,2012.
- [28] 桑潇,国巧真,潘应阳,等.基于 TM 和 OLI 数据山西省潞城市土地利用动态变化分析与预测[J].国土资源遥感,2018,30(2):125-131.

(上接第 256 页)

- [23] 谭剑波,李爱农,雷光斌.青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J].高原气象,2016,35(4):875-886.
- [24] 周梦甜,李军,朱康文.近 15a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理,2015,38(4):779-787.
- [25] 何宝忠,丁建丽,张喆,等.新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J].地理学报,2016,71(11):1948-1966.
- [26] 王倩,杨太保,杨雪梅.新疆伊犁河流域植被变化动态监测与评价[J].干旱区资源与环境,2015,29(8):126-131.
- [27] 何航,张勃,侯启,等.1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J].生态与农村环境学报,2020,36(1):70-80.
- [28] 杨光华,包安明,陈曦,等.1998—2007年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J].冰川冻土,2009,31(3):436-445.
- [29] 李佳秀,陈亚宁,刘志辉.新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响[J].中国科学院大学学报,2018,35(3):370-381.
- [30] 王计平,郭仲军,黄继红,等.北疆不同生态功能区近 30 年来植被盖度时空变化[J].林业资源管理,2015(6):64-70.
- [31] 祝稳.西北干旱区植被覆盖动态及其对极端气温和降水过程的响应[D].甘肃兰州:西北师范大学,2015.
- [32] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I):水文效应[J].冰川冻土,2013,35(3):513-527.
- [33] 张扬,楚新正,杨少敏,等.近 56a 新疆北部地区气候变化特征[J].干旱区研究,2019,36(1):212-219.
- [34] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等.1961—2015年新疆降水及干旱特征分析[J].干旱区地理,2017,40(2):332-339.