

南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测

陈竹安^{1,2} 刘子强¹ 张立亭¹ 危小建^{1,2} 洪志强³

(1. 东华理工大学测绘工程学院, 南昌 330013; 2. 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013;
3. 南昌工学院人居环境学院, 南昌 330108)

摘要: 人类活动和气候影响土地利用变化,而土地利用变化是影响生境质量变化最基本因素之一,探究不同气候情景下生境质量对区域土地资源可持续利用和生态保护具有重要意义。本文以南昌市为例,基于耦合 SD (System dynamics)-PLUS (Patch-generating land use simulation) 模型模拟预测共享社会经济发展路径 (Shared socioeconomic pathways, SSPs) 与典型浓度路径 (Representative concentration pathways, RCPs) 组合情景下南昌市 2035 年土地利用格局,InVEST (Integrated valuation of ecosystem services and trade-offs) 模型评估 2000—2020 年以及 3 种不同气候情景下南昌市 2035 年生境质量并进行时空变化分析,结果表明:3 种情景下,2035 年南昌市耕地、林地、草地面积下降,建设用地扩张迅速,水域和未利用地变化幅度较小。2000—2020 年生境质量持续下降且空间分布差异较大,优等生境质量分布于山地丘陵以及湖泊水域,中、差等则分布于耕作区和城镇地区。3 种气候情景下,2035 年南昌市生境质量呈减速下降趋势,主要表现出中等向差等生境转换,退化程度由大到小依次为 SSP585、SSP245、SSP119。研究结果可为南昌市高质量发展和生物多样性保护提供科学依据。

关键词: 生境质量; SD 模型; PLUS 模型; InVEST 模型; SSP-RCP 情景; 南昌市

中图分类号: F301.24; X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)05-0170-11

OSID:



Multi-scenario Simulation of LUCC and Spatio-temporal Evolution and Prediction of Habitat Quality in Nanchang City

CHEN Zhu'an^{1,2} LIU Ziqiang¹ ZHANG Liting¹ WEI Xiaojian^{1,2} HONG Zhiqiang³

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake,
Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China

3. School of Architectural Engineering, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China)

Abstract: Human activities and climate affect land use change, and land use change is one of the most fundamental factors influencing habitat quality change. It is important to investigate habitat quality under different climate scenarios for sustainable use of regional land resources and ecological conservation. Taking Nanchang City as an example, and the shared socioeconomic pathways (SSPs) and representative concentration pathways (RCPs) were predicted based on coupled system dynamics (SD)-patch-generating land use simulation (PLUS) model simulations. The integrated valuation of ecosystem services and trade-offs (InVEST) model evaluated the land use pattern of Nanchang City in 2035 under combination of SSPs and RCPs. The results showed that under the three scenarios, the area of arable land, forest land and grassland in Nanchang City was decreased in 2035, the land for construction was expanded rapidly, and the change in water and unused land was small. Under the three climate scenarios, the habitat quality of Nanchang City in 2035 showed a decelerating trend of decline, mainly showing a shift from medium to low habitats, and the degradation degree from large to small was SSP585, SSP245, and SSP119. The research results can provide scientific reference for high-quality development and biodiversity conservation in Nanchang City, and it can also provide scientific reference for high-quality development and biodiversity conservation in Nanchang City.

Key words: habitat quality; SD model; PLUS model; InVEST model; SSP-RCP scenario; Nanchang City

收稿日期: 2022-08-16 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708098、52168010)

作者简介: 陈竹安(1978—),男,副教授,主要从事土地信息技术和测绘技术研究,E-mail: cza53@qq.com

通信作者: 张立亭(1966—),男,教授,主要从事土地信息技术和空间数据处理研究,E-mail: ltzhang@ecut.edu.cn

0 引言

生境质量是指在一定区域范围内自然环境可持续为个体或种群提供生存发展必要适宜条件的能力,是维护自然生态系统生物多样性稳定以及人类福祉的重要一环^[1-2]。近年来,随着城镇化进程推进,人口激增和建设用地不断扩张,加剧了人与自然环境的矛盾,以及在全球气候变化下极端天气频繁出现,引起生境退化、水土流失等一系列生态问题^[3-4]。人类活动和气候变化影响土地利用变化,而影响生境质量的最基本因素之一是土地利用变化^[5-7]。城市的不断扩张改变了土地利用布局,进而改变栖息地的生境分布格局,使得生境斑块景观连通性日益降低和愈发破碎化,改变了生境的组成和结构,最终影响到不同生境斑块间的能量流动以及物质循环^[8-9]。因此,研究土地利用变化对生境的影响,对于制定相关政策保护生物多样性以及解决人类与生态协调发展具有重要意义。

近年来,随着 3S 技术的不断成熟,形成了众多的生态系统评估模型,如 Maxent 模型^[10]、ARIES (Artificial intelligence for ecosystem services) 模型^[11]、SoLVES (Social values for ecosystem services) 模型^[12]、HSI (Habitat suitability index) 模型^[13]以及 InVEST 模型等,其中 InVEST 模型具有操作简单、数据需求小、空间表达能力强等特点而广泛应用于生境质量评估^[14],已成功应用于国^[15]、省^[16]、市^[17]、县^[18]级等不同尺度的生境质量研究。

气候变化和土地利用变化是引起生境质量变化的主要驱动因素,然而土地利用受气候变化和社会经济发展的影响^[19]。第六个耦合模型相互比较项目 (Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 是基于新一代气候模型的预期未来气候变化的最新更新^[20],该模型结合了共享社会经济路径和代表性浓度途径^[21],为研究者提供未来全球气候变化背景下社会的不同发展情景。SSP-RCP 情景也逐渐被学者应用于探索全球气候背景下未来土地利用变化。如 TIAN 等^[22]模拟预测 SSP-RCP 情景下 2030—2060 年广东省土地利用并对碳储量进行评估预测;范泽孟^[23]基于 SSP-RCP 情景对京津冀土地利用进行模拟;李福香等^[24]首次将共享经济路径运用在县域尺度。

土地利用模拟中主要分为数量结构和空间分布格局模拟两部分,在土地利用数量需求预测方面,由于土地的利用变化主要与社会经济有关,基于转移概率模拟土地利用的马尔科夫 (Markov) 模型缺乏人类活动与土地系统之间耦合关系的探讨^[25-26],然

而,系统动力学模型是自上而下的改进模型,可以充分考虑到社会因素和自然因素共同对土地利用变化的影响^[27]。对于土地利用空间分布模拟,基于栅格斑块生成的土地利用模拟 PLUS 模型^[28],在空间分布模拟方面精度均优于 CLUE-S (Conversion of land use and its effects at small regional extent) 和 FLUS (Future land-use simulation) 模型^[29-30]。土地利用的复杂程度难以用单一模型来预估,因此耦合 SD 模型和 PLUS 模型可以充分模拟出自然和社会因素作用下未来不同发展情景下土地利用情况^[31]。

南昌市是长江中下游和鄱阳湖生态经济区中心城市,目前南昌市经济高速发展、城市化建设快速推进,生态环境受到巨大挑战。因此,本文以南昌市 2000—2020 年土地利用数据为基础,通过耦合 SD-PLUS 模型模拟 2035 年 SSP119、SSP245、SSP585 情景下土地利用,并结合 InVEST 模型对其历史阶段和未来不同情景下生境质量时空演变进行分析,为城市生态系统服务,并为南昌市经济发展和城市发展中土地资源分配与生态环境保护提供参考依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

南昌市 (28°10'~29°11'N, 115°27'~116°35'E) 位于江西省中部偏北,鄱阳湖西南岸 (图 1),全市下辖 6 区 3 县,总面积为 7 386.32 km²,海拔 -8~827 m 之间,地貌以丘陵和平原为主,地处亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和湿润,多年平均气温 18.8℃,1 月平均气温 6.4℃,7 月平均气温 29.3℃,全年无霜期约 300 d,全年日照时长为 1 700~1 900 h,年均降雨量为 1 800 mm 左右,降水时空分布不均,呈东高西低态势,且降水多集中于夏季。2021 年末常住人口 643.75 万人,其中城镇人口 506.23 万人,全市常住人口城镇化率达 78.64%,正处于快速城镇化进程。

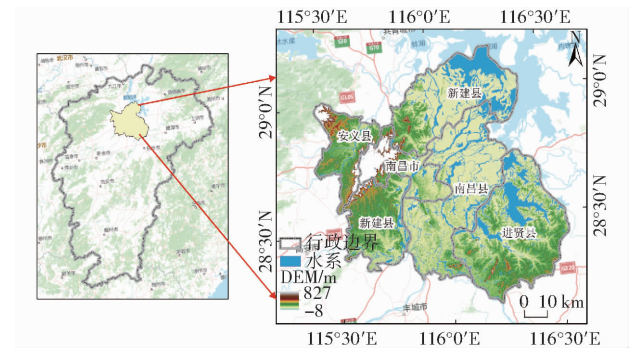


图 1 研究区位图

Fig. 1 Location map of study area

1.2 研究数据

SD 模型所需的经济、人口等社会数据以及

2010—2020 年年均降水量和温度数据来自《江西统计年鉴》和《南昌统计年鉴》;2000—2020 年土地利用数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心,基于 2010、2015、2020 年 3 期土地利用数据,通过线性插值获取 2010—2020 年其他年份数据;CMIP6 气候数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://loess.geodata.cn>)。PLUS 模型所需数据包括土地利用数据和驱动因子数据,其中土地利用数据与 SD 模型相同,驱动因子数据见表 1。所有数据通过 GIS 克里金插值、裁剪、重采样等操作统一投影坐标和空间分辨率(30 m)。

2 研究方法

首先构建 SD 模型,采用共享社会经济发展路径(SSPs)与典型浓度路径(RCPs)组合情景,从多种情景组合中选用 SSP119、SSP245、SSP585 共 3 种情景。根据不同情景下社会经济和气候变化预测数据,设置情景模拟参数,在 SD 模型预测未来土地利用需求;通过 PLUS 模型模拟出 2035 年南昌市不同情景下土地空间格局分布;其次利用 InVEST 模型对南昌市 2000—2020 年生境质量进行时空演变分析,并评估不同发展情景条件下 2035 年南昌市生境质量(图 2)。

2.1 SSP - RCP 情景

CMIP6 中的情景是不同的共享社会经济路径与典型浓度路径组合情景,强调了不同社会经济发展模式对气候变化的驱动作用,包含未来社会经济发展含义。SSPs 和 RCPs 情景框架已经广泛使用,本文选取其中可能性较大的 SSP119(可持续性发展道路)、SSP245(延续当前发展道路)、SSP585(经济高速发展道路)3 种情景进行研究。SSP119 情景是

表 1 PLUS 模型驱动因子		
Tab.1 PLUS model drivers		
驱动因子类型	参数	来源
自然因素	DEM	地理空间数据云网站,空间分辨率为 30 m
	坡度	根据 DEM 计算获得
	温度	国家地球系统科学数据中心 (http://loess.geodata.cn),分辨率为 1 km
	降水量	中国科学院资源与环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn),分辨率为 1 km
	土壤类型	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
社会因素	与水域距离	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
	GDP	中国科学院资源与环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn),分辨率为 1 km
	人口数	依据 2020 年土地利用数据,通过 GIS 属性提取和欧氏距离处理获得
	与城镇距离	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
	与工矿距离	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org)
	与居民点距离	与高速公路距离
	与铁路距离	与一级道路距离
	与高速公路距离	与二级道路距离
	与一级道路距离	与三级道路距离

SSP1 和 RCP1.9 的组合,以低水平的温室气体排放呈现社会经济可持续发展,该情景下土地受到严格监管,草地和林地保存完好,是目前最低辐射排放可持续发展情景;SSP245 情景是 SSP2 和 RCP4.5 的结合,为中等辐射强迫情景,土地受到较为严格监管,社会经济延续当前发展;SSP585 为 SSP5 和 RCP8.5 的组合,为高等辐射强迫情景,土地受到中等水平监

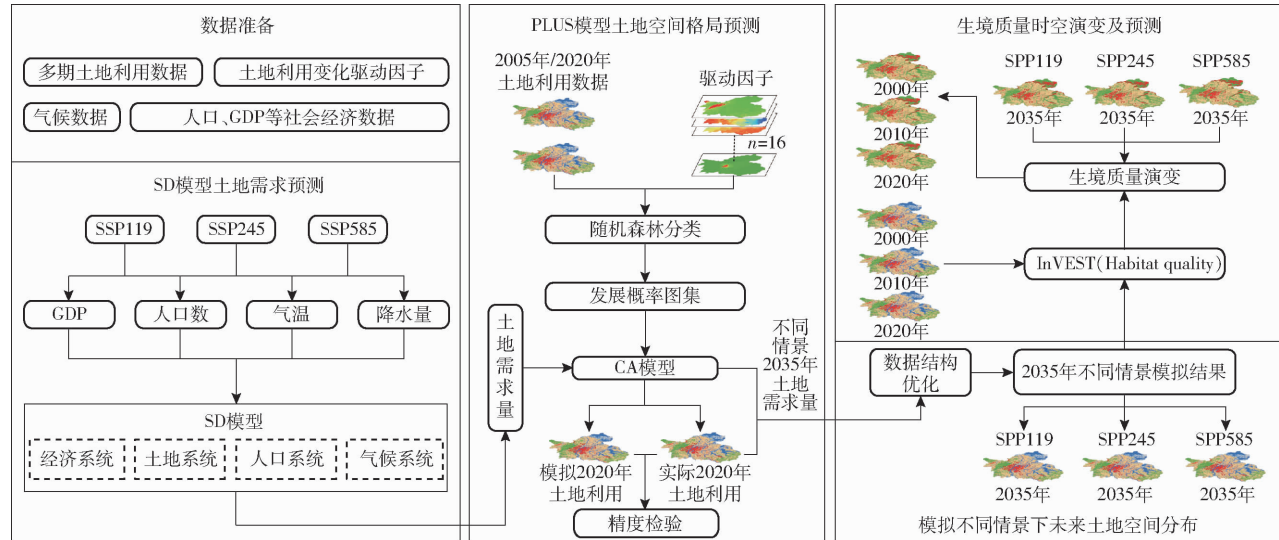


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

管,大量使用化石能源,高水平的温室气体排放推动社会经济高速发展。

2.2 系统动力学

2.2.1 SD 模型构建

构建南昌市土地利用 SD 模型,以社会经济和人口以及 CMIP6 气候数据为驱动因素分析未来南昌市土地需求变化,因此可将模型分为 4 部分,分别为经济子系统、人口子系统、土地子系统和气候子系统,其中,经济发展会加大固定资产的投入,促进农林渔牧以及建筑行业的发展,使得建设用地和农业

用地面积增加;人口子系统反映农村人口和城镇人口变化,人口的增长加大农产品需求,进而影响到地类变化;气候子系统则反映温度、降水对耕地、林地、草地、水域的影响;土地子系统考虑各地类变化,使用表函数和回归函数确定经济、人口和气候因素与土地之间的定量关系。模型模拟时间界限为 2010—2035 年,步长为 1 年,其中 2010—2020 年为模型检验和历史仿真阶段,2021—2035 年为预测阶段。经过反复调试和不断优化,确定不同变量之间关系,使用 Vensim 软件构建南昌市土地利用 SD 模型(图 3)。

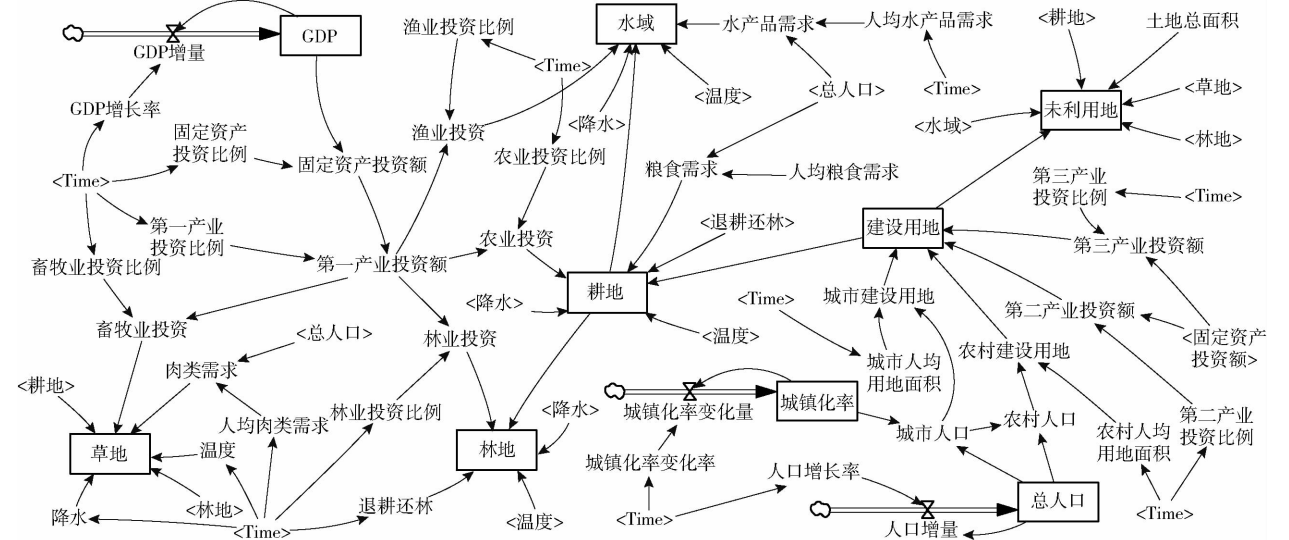


图 3 南昌市土地利用 SD 存量流量图

Fig. 3 Land use SD stock flow map in Nanchang City

2.2.2 情景参数设置

结合南昌市土地利用 SD 模型,影响南昌市未来土地利用结构变化的主要驱动因素有人口、GDP、温度、降水量、城镇化率、固定资产投资比例以及各产业投资比例等变量,本文选取 GDP 增长率、人口增长率、温度、降水量、城镇化率作为情景参数进行调节。人口数据采用 2010—2100 年社会共享经济路径下中国人口公里尺度栅格数据^[32];GDP 数据是基于 MURAKAMI 等^[33]发

布的 SSP1-5 全球 1/12°网格化 GDP 预测数据,并结合南昌市“十四五”发展规划进行设置;未来降水量和温度数据基于 CMIP6 气候数据集,通过 Delta 空间降尺度生成中国分辨率 1 km 网格数据,裁剪计算出南昌市 2021—2035 年年平均温度和降水量变化量;城镇化率则根据 2010—2100 中国省级城镇化率预测数据^[34],计算出不同情景城镇化率增长率,以此为参考并结合南昌市实际城镇化率变化情形进行设置(表 2)。

表 2 情景参数设置
Tab.2 Scenario parameter settings

情景参数	2020—2030 年			2030—2035 年		
	SSP119	SSP245	SSP585	SSP119	SSP245	SSP585
GDP 增长率/%	9.0	7.5	11.0	6.5	5.0	8.5
人口增长率/%	1.27	1.71	1.53	0.85	1.32	1.12
温度变化量/℃	0.033	0.074	0.093	0.033	0.074	0.093
降水量变化量/mm	16.90	9.29	-4.07	16.90	9.29	-4.07
城镇化率变化率/%	1.58	1.41	1.41	1.00	0.85	0.85

2.3 PLUS 模型

PLUS 是一种基于栅格数据生成土地利用变化模拟模型,该模型由土地扩张分析策略(Land

expansion analysis strategy, LEAS)和基于多类型随机种子的元胞自动机模型(CA mode based on multiple random seeds, CARS)组成。LEAS 结合了

过渡分析策略 (Transition analysis strategy, TAS) 和模式分析策略 (Pattern analysis strategy, PAS) 的优点,模块需要叠加两期土地利用数据,提取出发生变化的土地单元格,采用随机森林算法逐一对各种土地利用类型扩张和驱动力的因素进行挖掘,从而得到各个地类的发展概率及各驱动因素对该时期内各地类扩张的贡献^[28,35]。本文以 2005 年和 2020 年土地利用数据为基础,对 2005—2020 年土地利用进行土地扩张提取;其次通过 LEAS 模块对选取的 16 个驱动因子(自然因素:DEM、坡度、温度、降水量、土壤类型、与水域距离;社会因素:GDP、人口数、与城镇距离、与工矿距离、与居民点距离、与铁路距离、与高速公路距离、与一级道路距离、与二级道路距离、与三级道路距离)进行土地利用扩张分析,获得各地类发展概率。

CARS 模块是一个 CA (Cellular automata) 模型,包括基于土地利用的多类型随机种子的补丁生成机制。CA 模型是一种情景驱动的土地利用模拟模型。在模拟过程中,使土地利用总量根据适应系数、邻域效应和发展概率,在宏观尺度上满足未来需求。邻域权重为土地利用模拟中的重要指标,取值范围为 0~1,值越大表明该地类扩张能力越强,可根据各用地类型扩张面积的占比来计算。土地利用转移矩阵表示不同地类相互间是否可以发生转换,0 表示不可以向其他地类转换,1 则表示可以向其他地类转换,根据研究区情况,土地转移矩阵见表 3。模型也可根据土地政策和限制设置禁止开发区,例如生态红线、永久基本农田红线以及城镇开发边界等“三区三线”阶段性成果,考虑到数据获取情况,本文选取了国家森林公园和国家自然保护区为限制开发区。利用 CARS 模块模拟得到 2020 年土地利用数据并进行精度检验,在精度符合要求下将 SD 模型得到的 2035 年不同情景土地需求输入 PLUS 模型,模拟得到南昌市未来土地利用数据。

表 3 土地利用转移矩阵
Tab.3 Land use transfer matrix

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水域	1	1	1	1	1	1
建设用地	0	0	0	0	1	0
未利用地	1	1	1	1	1	1

2.4 InVEST 模型

基于 InVEST 模型中生境质量子模块 (Habitat quality) 计算研究区生境质量,生境质量指数取值范

围 0~1,值越大,表明生境质量越好,计算公式为

$$Q_{xj} = H_{xj} \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right)$$

式中 Q_{xj} ——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数

H_{xj} ——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适宜度

D_{xj} ——土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度

k ——半饱和参数

z ——模型默认常数

参考文献[36-37],在其他学者研究基础上并结合南昌市实际情况,选择建设用地、耕地、未利用地、铁路和高速公路作为胁迫因子,胁迫因子权重、最大影响距离以及各地类生境适宜度和对胁迫因子的敏感程度等参数设置见表 4、5。

表 4 威胁因子影响距离及权重
Tab.4 Influence distance and weight of threat factors

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减类型
耕地	2.5	0.6	线性
建设用地	8.0	0.8	指数
未利用地	4.0	0.5	线性
高速公路	6.0	0.6	线性
铁路	5.0	0.5	线性

表 5 各地类生境适宜度及对不同威胁因子敏感度
Tab.5 Habitat suitability of each species and sensitivity to different threat factors

地类	生境适宜度	敏感度				
		耕地	建设用地	未利用地	高速公路	铁路
耕地	0.4	0	0.80	0.40	0.50	0.50
林地	1.0	0.80	0.90	0.20	0.90	0.80
草地	0.6	0.50	0.60	0.60	0.70	0.70
水域	1.0	0.30	0.50	0.30	0.75	0.70
建设用地	0	0	0	0	0	0
未利用地	0.1	0.20	0.10	0	0.15	0.10

3 结果与分析

3.1 SD 模型土地需求预测

以 2010 年为起始预测年份,利用 SD 模型预测 2010—2020 年各地类需求面积。将 2020 年进行独立检验,通过图 4 可看出 2020 年模拟面积与实际面积差异较小。由于未利用地作为控制土地总面积不变的调节器,误差略高于其他地类,其中未利用地相对误差最大,为 -0.83%,但六大地类相对误差均小于 1%,说明模型模拟精度符合研究需求。

将设置好的 3 种气候情景参数分别输入 SD 模型进行预测,得到 2020—2035 年南昌市各地类用地

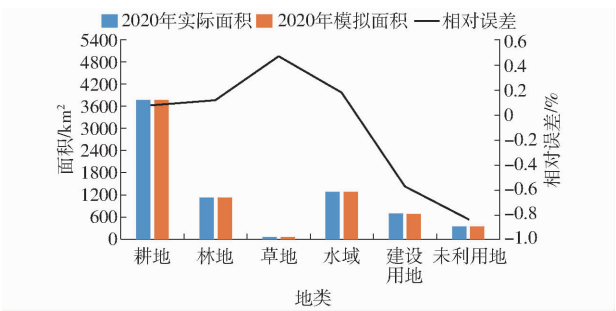


图 4 2020 年实际面积与模拟面积对比及误差
Fig. 4 Comparison and error between actual area and simulated area in 2020

需求面积(图 5)。3 种不同气候情景下,2035 年耕地、林地和草地需求面积都呈下降趋势,其中 SSP585 情景面积减少最多,SSP119 情景下面积减少最少。引起耕地、林地和草地面积减少的原因是 3 种情景下南昌市 GDP 和人口不断增加,城市化进程加快推进,城镇扩张侵占周边地类。3 种情景下建设用地需求面积呈增加趋势,建设用地面积在 SSP585 情景下面积增量最多,相比于 2020 年,建设用地增幅达 38.4%,其次是 SSP245 和 SSP119 情景。相同情景下,水域面积变化和未利用地面积变化相反,其中 SSP119 和 SSP585 情景下水域面积减少,变化幅度较小,SSP245 情景下水域面积增加,同情景下水域面积变化量与未利用地面积变化量几乎一致,研究区未利用地大部分分布于北部鄱阳湖以及河流之中,因此未利用地主要向水域进行转换。

3.2 PLUS 模型未来土地利用模拟

基于 2005 年土地利用数据和 16 个驱动因子以及 SD 模型仿真得到的地类需求面积,输入 PLUS 模型模拟研究区 2020 年土地利用空间分布图,并与 2020 年实际土地利用图进行检验, Kappa 系数为 0.88,整体精度为 92%, FOM (Figure of merit) 指数为 0.27,其中耕地、林地和水域精度较高,分别为

95%、94%、90%,建设用地精度为 85%,而模拟精度相对较低的地类为草地和未利用地,分别为 79%和 76%,所有地类 Kappa 系数均大于 0.75,说明模拟精度较高,能够满足研究需要。

以 2020 年土地利用数据为仿真起始年份,将 3 种不同气候情景下 2035 年用地需求按要求输入 PLUS 模型,模拟得到 2035 年南昌市 SSP119、SSP245、SSP585 情景下的土地利用空间分布(图 6)。选取 4 个区域放大进行地类变换分析,区域 A 为安义县,通过与 2020 年对比,可以明显看出 3 种情景下市区建设用地不同程度扩张,大量侵占周边耕地,SSP585 情景扩张更为明显;区域 B 为梅岭地区,林地占用草地而引起草地面积减少,3 种不同情景下,草地面积都呈减少趋势,但之间差异不大;区域 C 为南昌市北部鄱阳湖,用于展示水域和未利用地间的变换,SSP119 情景与 SSP585 情景相似,未利用地侵占水域,水域面积减少,SSP245 情景则相反,水域面积增加,3 种情景下水域面积变化幅度较小;区域 D 为东南部丘陵地带,3 种情景下林地面积均受到不同程度的耕地侵占,林地面积减少程度由大到小依次为 SSP119、SSP245、SSP585。

3.3 南昌市生境质量演变及预测

结合南昌市生境质量整体情况,利用自然断点法,将南昌市生境质量指数分成 4 个区间:0~0.3、0.3~0.5、0.5~0.8 和 0.8~1.0,分别对应差、中、良和优 4 个等级(图 7、表 6)。从时间尺度上看,南昌市 2000、2010、2020 年生境质量指数均值分别为 0.578 1、0.555 0、0.543 9,呈持续下降态势,2000—2010 年下降 0.023 1,2010—2020 年下降 0.011 1,表明其下降态势有所减缓。从空间格局来看,优等生境质量区域大约占南昌市总面积的 1/3,大致分布在西部梅岭国家森林公园、东北部鄱阳湖和东南部军山湖等水域,其主要原因是这些区域为山地丘陵地区,人口稀少,植被覆盖率高,以及“十四五”划

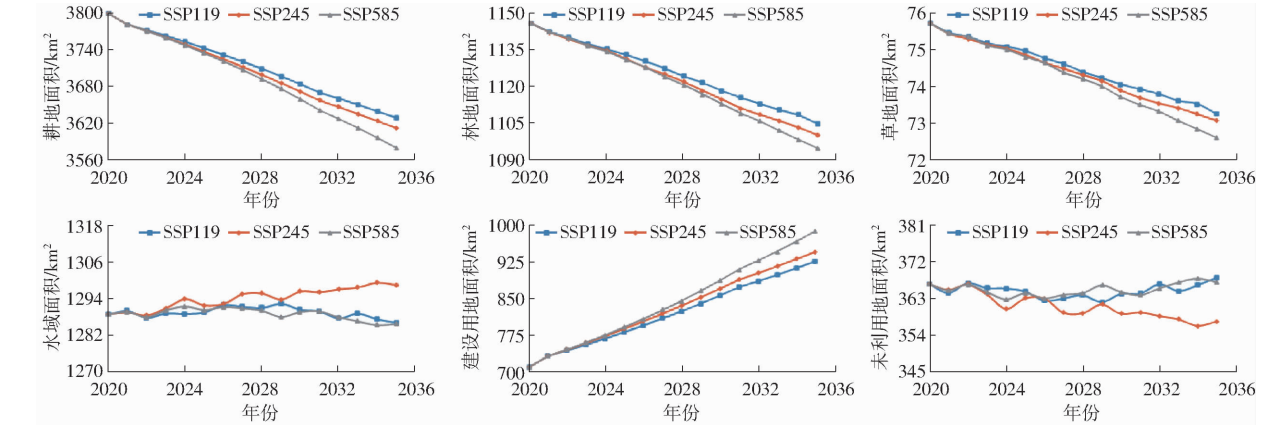


图 5 2021—2035 年地类需求情景模拟结果
Fig. 5 Simulation results of landscape demand scenario in 2021—2035

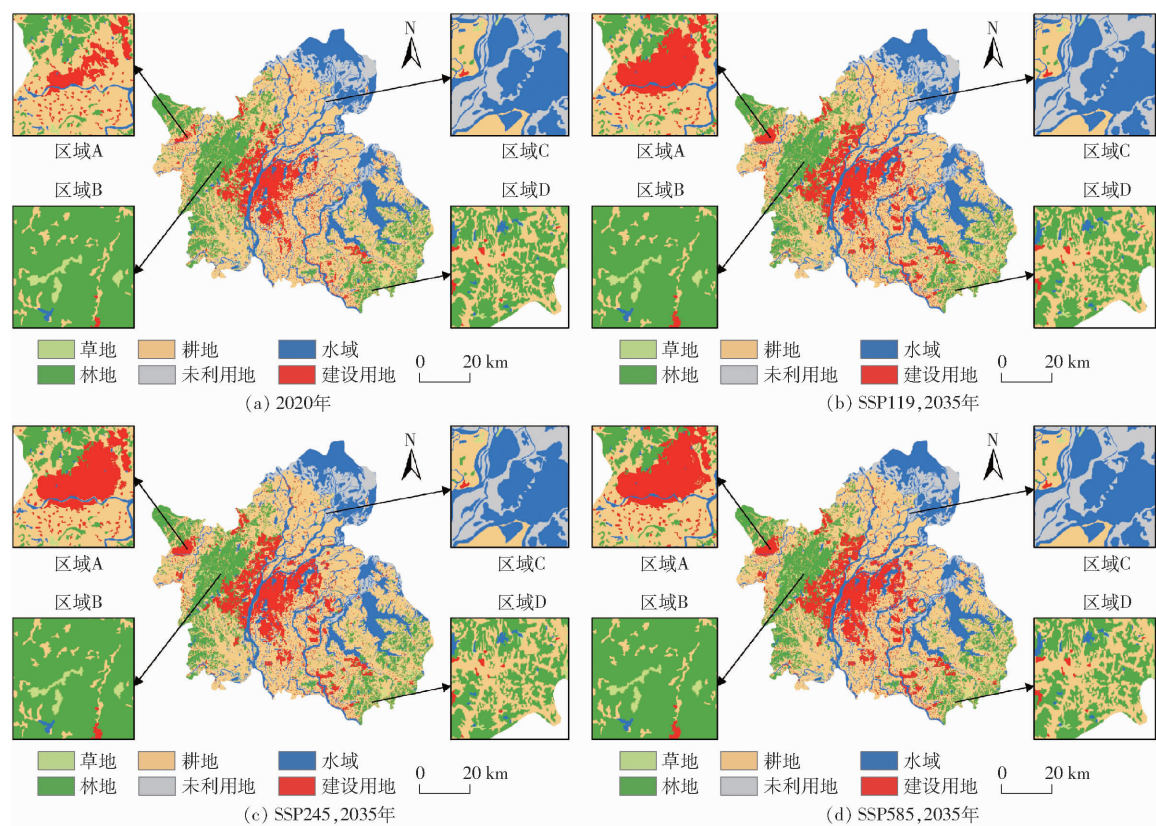


图 6 2020 年土地利用分布和 2035 年不同情景下土地利用分布

Fig. 6 Land use distribution in 2020 and land use distribution under different scenarios in 2035

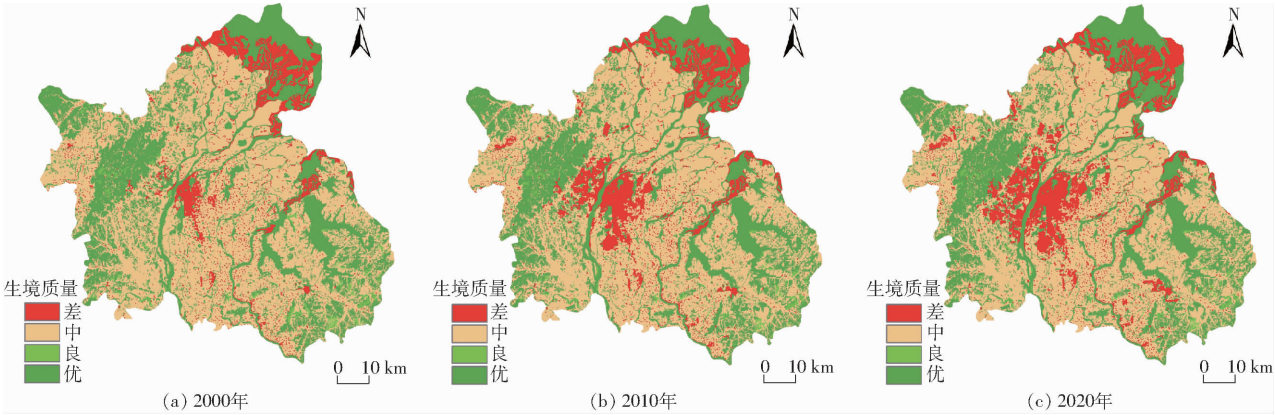


图 7 2000—2020 年南昌市生境质量空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of habitat quality in Nanchang City from 2000 to 2020

表 6 各等级生境质量面积占比						
Tab. 6 Proportion of habitat quality area of each grade						
等 级	生 境 质 量 指 数 区 间	2000 年		2010 年		2020 年
		比例/ %	生 境 质 量 指 数 平 均 值	比例/ %	生 境 质 量 指 数 平 均 值	比例/ %
差	0 ~ 0.3	9.03		12.47		14.66
中	0.3 ~ 0.5	54.86	0.578 1	53.18	0.555 0	51.34
良	0.5 ~ 0.8	1.31		1.04		1.02
优	0.8 ~ 1.0	34.80		33.31		32.98

定的生态红线等各项生态政策实施,使得该区域生境质量高,鄱阳湖等水域生物多样性高,同样生境质量也处于较高水平。良等生境质量占比最小,不足

总面积的 2%,零散分布于梅岭国家森林公园和东南部山地丘陵区。中等生境质量面积占比最大,大约占总面积 1/2,主要分布于鄱阳湖平原农业耕作区,地类以耕地为主,植被单一,生态脆弱。差等生境集中分布在人口密集的城镇地区和东北部未利用地区域,地类以建设用地和滩涂为主,不宜植被生长,生物多样性低。由以上分析可知,生境质量空间分布具有一定的规律,与地类分布具有较高的一致性。

利用 SD-PLUS 模型预测 2035 年 3 种不同气候情景土地利用图,并使用 InVEST 模型评估 SSP119、SSP245、SSP585 情景下的生境质量(图 8),

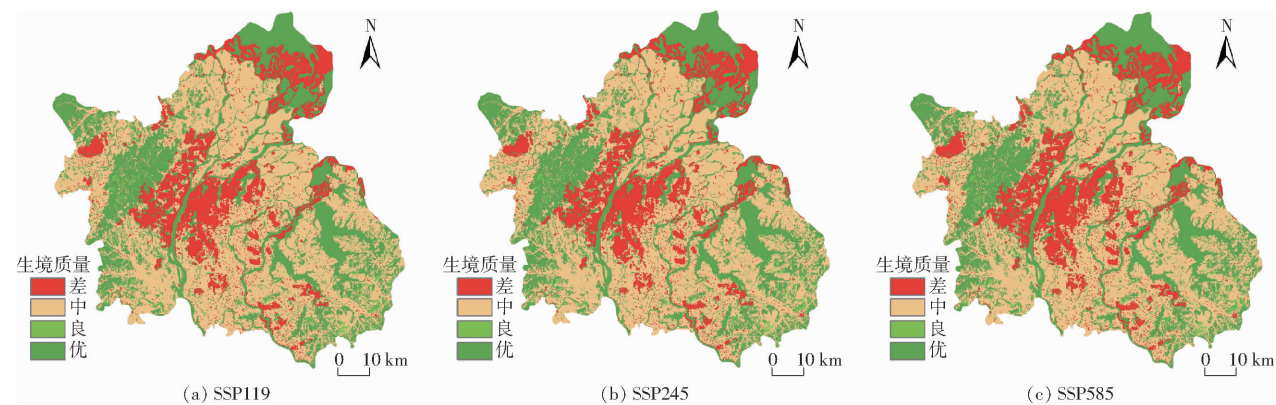


图 8 2035 年南昌市不同情景生境质量空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of habitat quality in different scenarios in Nanchang City in 2035

生境质量指数分别为 0.528 6、0.528 4、0.524 3,不同 SSP 情景下,各等级生境质量在空间分布一致。由于城镇扩张,生境质量退化区域分布在城镇边缘,其中 SSP585 建设用地扩张程度高于 SSP245 和 SSP119,生境退化相比其他两种情景更为明显,生境质量改良区域分布在东北部鄱阳湖区域,原因是耕地和未利用地转换成水域。未来 3 种情景下南昌市生境质量指数持续下降,SSP585 情景下生境质量下降最快,相比 SSP585 情景,SP119 与 SSP245 情景下生境质量下降则较为缓慢,差异不明显(图 9a)。2035 年 3 种情景下各等级生境质量面积占比与 2020 年相比(图 9b),优和良等生境质量面积占比略微下降,变化不大,优等分别下降 0.59、0.50、0.75 个百分点,SSP245 下降最少,原因是该情景下水域面积增多,而水域对生境有着较高的贡献度。中等和差等生境质量面积占比变化幅度较大,其中在 SSP585 情景下中等和差等面积占比变化最大,分别从 2020 年的 51.34% 和 14.66% 变化为 2035 年的 48.45%、18.34%,3 种气候情景下 2035 年南昌市城市扩张不断侵占周围耕地,不同级别生境质量

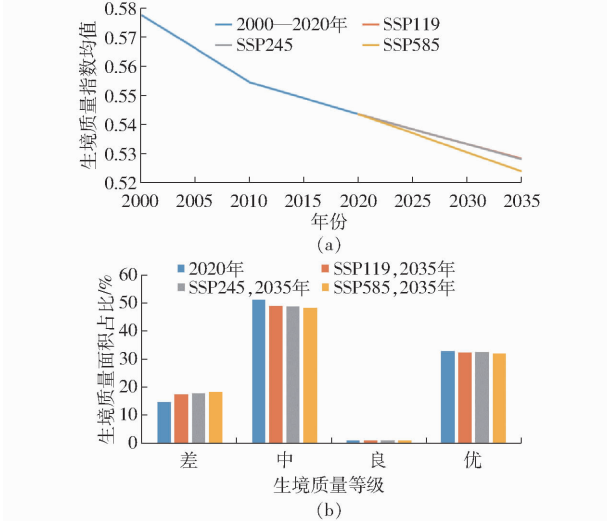


图 9 生境质量指数均值和不同等级生境质量面积占比

Fig. 9 Mean value of habitat quality index and proportion of habitat quality area of different classes

间变换以中等向差等转换为主(图 10)。

4 讨论

4.1 模型分析

本研究将自上而下的 SD 模型与自下而上的

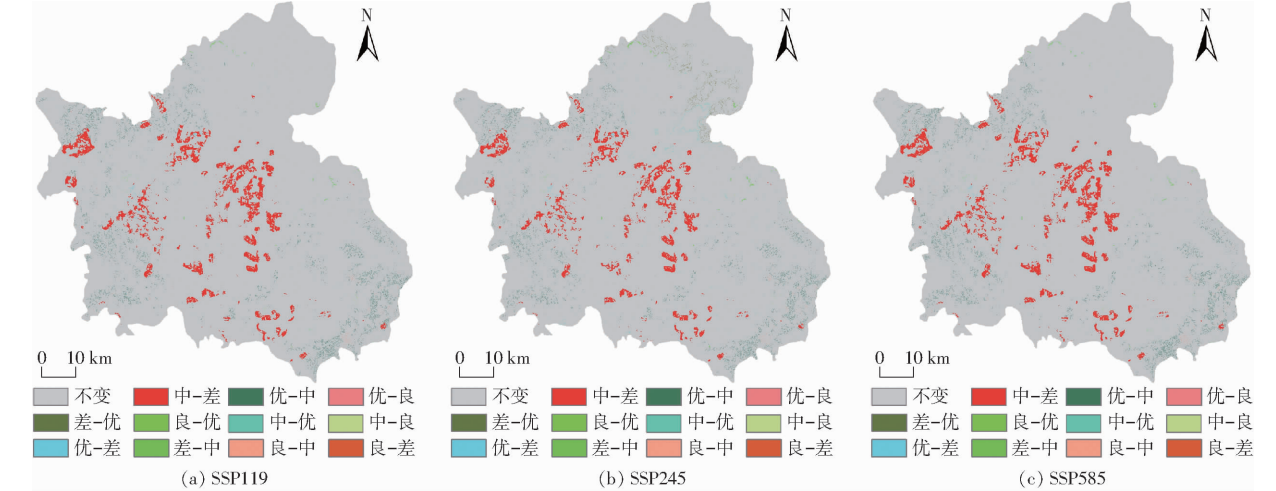


图 10 2020—2035 年南昌市不同气候情景下生境质量等级转移格局

Fig. 10 Habitat quality grade transfer pattern under different climate scenarios in Nanchang City from 2020 to 2035

PLUS 模型结合,不仅可以更好地反映土地利用变化过程的非线性、动态和系统特征,并在模型中引入了 SSP-RCP 情景,还可以更准确地模拟未来不同气候变化情景下土地利用空间分布。从社会和自然气候两个角度考虑,以 SSP-RCP 情景下社会经济、人口、城镇率以及温度和降水气候数据作为 SD 模型参数,SD 模型自上而下预测土地需求,而 PLUS 模型自下而上模拟土地空间分布,两者结合可以更好地预测模拟在社会和自然影响下未来土地变化趋势,其次是运用 InVEST 模型评估 2000—2020 年以及 3 种不同情景下生境质量。对于不同情景下未来不同土地类型面积需求以及不同土地利用的反馈关系不够明确情况,可通过系统内校正好的反馈机制去耦合不同发展情景,SD 模型考虑到社会、经济、气候环境变化以及政策因素等复杂因素,可以降低土地利用预测面积的不确定性,从而可以更加科学地预测未来发展模式下土地需求。模型也存在局限,一方面 SD 模型参数是基于 CMIP6 提供的各种 SSP-RCP 情景参数,该数据多为全球和国家尺度,并无市县级尺度数据,因此 SSP-RCP 情景下土地变化研究多为大尺度,对于市级尺度研究较少,本文依据 SSP-RCP 情景参数并结合当地社会发展需要进行设置;另一方面 InVEST 模型评估生境质量时,参数设置一般是在前人研究基础上进行修改设置,没有形成统一的参数设置体系,存在主观性,在今后的研究中需要对模型参数的设置进一步改进。

4.2 土地利用变化对生境质量的影响

生境质量指数空间分布与土地利用类型的空间分布高度一致,未来南昌市 3 种不同气候情景下生境质量发生较大变化,其与土地利用变化高度相似,因此未来生境质量评估的准确度与土地利用模拟精度密切相关。生境质量退化的区域有所增加,其增加区域与城市建设用地扩张区域相吻合,分布在城市周围,建设用地蚕食耕地是生境质量下降的主要原因。SSP119 情景较为可取,其保持较高经济、高

城镇化和低人口发展水平下,生境质量退化得到有效缓解;SSP245 视为延续当前发展状况,经济放缓增长,人口和城镇化率处于中等水平,建设用地扩张,生境质量持续降低;SSP585 情景下经济高速发展,加快城市扩张速度,生态用地急剧减少,忽视生态可持续性,造成生境严重退化。因此,在今后发展中,在保障经济高质量发展的同时也要重视生态发展的可持续性。

5 结论

(1)2035 年南昌市耕地、林地、草地在 3 种情景下其面积均有所下降,下降趋势由大到小依次为 SSP585、SSP245、SSP119;SSP245 情景下水域面积略有增加,在其他两种情景下略有减少,水域面积整体变化幅度不大;未利用地变化则和水域相反;建设用地均得到大幅度增加,相比于 2020 年,SSP585 情景下建设用地面积增幅达到 38.4%,表明城镇化进程快速推进,建设用地大肆扩张,不断吞并四周地类,使得生态环境受到严重威胁。

(2)2000—2020 年南昌市生境质量持续下降,形成中部和东北部地区中低等生境质量空间分异特征,生境质量与地类分布密切相关,优、良等生境质量主要分布在梅岭国家森林公园等森林覆盖的山地丘陵地区以及鄱阳湖等众多湖泊水域地区,中、差等生境质量则分布在鄱阳湖平原农业耕作区和人口聚集的城镇地区。

(3)3 种气候情景下,2035 年南昌市生境质量指数分别为 0.528 6 (SSP119)、0.528 4 (SSP245)、0.524 3 (SSP585),相比于 2000—2020 年生境质量变化,未来 15 年生境质量指数均值均呈减速下降趋势。优、良等生境质量面积占比略微下降,变化幅度不大;中等和差等生境质量面积占比变化较大,主要表现为中等向差等转换,城镇扩张建设用地侵占周围地类是造成这一现象主要原因,因此生境质量退化区域也主要围绕在城市四周。

参 考 文 献

[1] TONRA C M, MARRA P P, HOLBERTON R L. Migration phenology and winter habitat quality are related to circulating androgen in a long-distance migratory bird[J]. Journal of Avian Biology, 2011, 42(5): 397-404.

[2] 吴林霖,王思远,杨瑞霞,等.斯里兰卡亚洲象栖息地生境质量时空变化及分异特征[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2472-2487.

WU Linlin, WANG Siyuan, YANG Ruixia, et al. Spatio-temporal patterns and differentiations of habitat quality for Asian elephant (*Elephas maximus*) habitat of Sri Lanka[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(12): 2472-2487. (in Chinese)

[3] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.

ZHANG Xueru, ZHOU Jie, LI Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 160-178. (in Chinese)

[4] 白立敏,冯兴华,孙瑞丰,等.生境质量对城镇化的时空响应——以长春市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1267-1277.

- BAI Limin, FENG Xinghua, SUN Ruifeng, et al. Spatial and temporal responses of habitat quality to urbanization: a case study of Changchun City, Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1267–1277. (in Chinese)
- [5] NEMATOLLAHI S, FAKHERAN S, KIENAST F, et al. Application of InVEST habitat quality module in spatially vulnerability assessment of natural habitats (case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(8): 1–17.
- [6] BERTA ANESEYEE A, NOSZCZYK T, SOROMESSA T, et al. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: a qualitative case study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia [J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1103.
- [7] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6134–6145.
- ZHOU Ting, CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6134–6145. (in Chinese)
- [8] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250–255.
- ZHONG Li'na, WANG Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 250–255. (in Chinese)
- [9] 刘汉仪, 林媚珍, 周汝波, 等. 基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析[J]. 生态科学, 2021, 40(3): 82–91.
- LIU Hanyi, LIN Meizhen, ZHOU Rubo, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area based on InVEST model [J]. Ecological Science, 2021, 40(3): 82–91. (in Chinese)
- [10] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 等. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3758–3764.
- WU Qingming, WANG Lei, ZHU Ruiping, et al. Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MAXENT modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3758–3764. (in Chinese)
- [11] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2403–2409.
- [12] 王玉, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估——以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1767–1774.
- WANG Yu, FU Bitian, LÜ Yongpeng, et al. Assessment of the social values of ecosystem services based on SolVES model: a case study of Wusong Paotaiwan Wetland Forest Park, Shanghai, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1767–1774. (in Chinese)
- [13] 王志强, 陈志超, 郝成元. 基于 HSI 模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价[J]. 湿地科学, 2009, 7(3): 197–201.
- WANG Zhiqiang, CHEN Zhichao, HAO Chengyuan. Breeding habitat suitability evaluation of red-crown crane in Zhalong national nature reserve by the method of habitat suitability index [J]. Wetland Science, 2009, 7(3): 197–201. (in Chinese)
- [14] 黄康, 戴文远, 黄万里, 等. 基于 CA–Markov 和 InVEST 模型的土地利用变化对生境影响评价——以福建省福州新区为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 155–162.
- HUANG Kang, DAI Wenyuan, HUANG Wanli, et al. Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA–Markov and InVEST models—taking Fuzhou New District of Fujian Province as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 155–162. (in Chinese)
- [15] KARIMI A, JONES K. Assessing national human footprint and implications for biodiversity conservation in Iran [J]. Ambio, 2020, 49(9): 1506–1518.
- [16] 吴楠, 陈红枫, 冯朝阳, 等. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1119–1127.
- WU Nan, CHEN Hongfeng, FENG Chaoyang, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1119–1127. (in Chinese)
- [17] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 呼和浩特市生境质量对城市用地扩展的时空响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1014–1022.
- FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, MA Chenyang. Spatiotemporal response of habitat quality to urban expansion in Huhhot City [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1014–1022. (in Chinese)
- [18] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7300–7311.
- LIU Chunfang, WANG Chuan. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the Loess Hilly Region based on land use change: a case study in Yuzhong County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7300–7311. (in Chinese)
- [19] PHAM H V, SPEROTTO A, TORRESAN S, et al. Coupling scenarios of climate and land-use change with assessments of potential ecosystem services at the river basin scale [J]. Ecosystem Services, 2019, 40: 101045.
- [20] BRUNNER L, PENDERGRASS A G, LEHNER F, et al. Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence [J]. Earth System Dynamics, 2020, 11(4): 995–1012.

- [21] 姜彤,吕嫣冉,黄金龙,等. CMIP6 模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用[J]. 气象科技进展,2020, 10(5): 102-109.
JIANG Tong, LÜ Yanran, HUANG Jinlong, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(5): 102-109. (in Chinese)
- [22] TIAN L, TAO Y, FU W, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330.
- [23] 范泽孟. 基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J]. 地理学报,2022, 77(1): 228-244.
FAN Zemeng. Simulation of land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei region under different SSP-RCP scenarios[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1): 228-244. (in Chinese)
- [24] 李福香,刘殿锋,孔雪松,等. 基于动态模拟视角与共享社会经济路径的多情景县域可持续发展潜力评价[J]. 地球信息科学学报,2022, 24(4): 684-697.
LI Fuxiang, LIU Dianfeng, KONG Xuesong, et al. Multi-scenario evaluation of county-scale development potential based on shared socioeconomic pathways and dynamic simulation approach[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(4): 684-697. (in Chinese)
- [25] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. 自然资源学报,2020, 35(4): 826-844.
DENG Yuanjie, YAO Shunbo, HOU Mengyang, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: a case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 826-844. (in Chinese)
- [26] 赵冬玲,杜萌,杨建宇,等. 基于 CA-Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):278-285.
ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):278-285. (in Chinese)
- [27] WANG Z, LI X, MAO Y, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: a case study of Bortala, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499.
- [28] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [29] 王佳楠,张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 139-148, 179.
WANG Jia'nan, ZHANG Zhi. Land use change and simulation analysis in the Northern Margin of the Qaidam Basin based on Markov-PLUS model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 139-148, 179. (in Chinese)
- [30] 赵明松,徐少杰,邓良,等. 基于 CLUE-S 模型的煤矿城市土地利用变化模拟[J]. 农业机械学报,2022,53(5):158-168.
ZHAO Mingsong, XU Shaojie, DENG Liang, et al. Simulation of land use change in typical coal mining city based on CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):158-168. (in Chinese)
- [31] 齐麟,许东,朱琪,等. 基于 GeoSOS-FLUS 平台的东北森林屏障带生态格局优化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3448-3462.
QI Lin, XU Dong, ZHU Qi, et al. Ecological pattern optimization of forest barrier belt in Northeast China based on GeoSOS-FLUS[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3448-3462. (in Chinese)
- [32] CHEN Y, GUO F, WANG J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-13.
- [33] MURAKAMI D, YOSHIDA T, YAMAGATA Y. Gridded GDP projections compatible with the five SSPs (shared socioeconomic pathways)[J]. Frontiers in Built Environment, 2021, 7: 760306.
- [34] WANG K, WANG C, CAI W, et al. Projected provincial urbanization rate for China[EB/OL]. <https://doi.org/10.6084/mg.figshare.9229841.v1>.
- [35] ZHAO B, LI S, LIU Z. Multi-scenario simulation and prediction of regional habitat quality based on a system dynamic and patch-generating land-use simulation coupling model—a case study of Jilin Province[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5303.
- [36] 李亚楠,多玲花,张明. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测——以江西省南昌市为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 345-354.
LI Ya'nan, DU Linhua, ZHANG Ming. Evolution and prediction of land use pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model—a case study of Nanchang City in Jiangxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 345-354. (in Chinese)
- [37] 刘园,周勇,杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境,2019, 28(10): 2429-2440.
LIU Yuan, ZHOU Yong, DU Yuetian. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River Economic Belt based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2429-2440. (in Chinese)