

蔚芳, 蒋雨薇. 基于SD-PLUS耦合模型的杭州市土地利用多情景模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(1): 44–56.

WEI F, JIANG Y W. Multi-scenario simulation analysis of land use change in Hangzhou using the SD-PLUS model [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(1): 44–56.



开放科学 OSID

# 基于SD-PLUS耦合模型的杭州市土地利用多情景模拟

蔚芳<sup>1,2</sup>, 蒋雨薇<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心, 杭州 310058)

**摘要:**气候变化威胁全球粮食安全并造成土地退化和荒漠化,反之土地系统问题又成为气候变化的驱动因素。为探讨在气候变化背景下如何合理配置土地资源,本研究基于2020年IPCC(政府间气候变化专门委员会)发布的共享经济路径(SSPs)与典型浓度路径(RCPs)耦合的SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5气候情景,构建并验证了综合考虑社会经济因素及气候变化因素的SD-PLUS耦合模型,以2000—2020年为历史数据,模拟了2030年杭州市三种气候情景下的土地利用变化。结果表明:SD模型预测误差在5%以内,PLUS模型模拟结果Kappa系数为0.84,总体精度为0.93,SD-PLUS耦合模型能够较为精确地反映土地利用变化情况。三种情景下土地利用变化整体上呈现生态用地向耕地和建设用地转移,但仍存在差异性:SSP2-4.5和SSP5-8.5情景生态用地在临安区、富阳等中心城区周边地区转移为建设用地,SSP5-8.5情景变化最为激烈,建设用地大幅扩张了608.94 km<sup>2</sup>;只有SSP1-2.6情景下建设用地在各市区中心周边有序扩张,生态用地减少得到控制。SSP1-2.6情景下,保护生态用地能够有效避免建设用地无序扩张,提升土地利用效率,实现区域均衡发展。研究表明,基于气候变化背景的SD-PLUS耦合模型能够有效模拟不同气候情景下杭州市土地利用空间格局的变化趋势,研究结果可为杭州市未来经济发展与生态保护区域协同提供科学支撑。

**关键词:**气候变化;SD-PLUS耦合模型;土地利用;SSP-RCP情景;多情景模拟;杭州市

中图分类号:X321;F301.24;F224 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2025)01-0044-13 doi: 10.13254/j.jare.2023.0818

## Multi-scenario simulation analysis of land use change in Hangzhou using the SD-PLUS model

WEI Fang<sup>1,2</sup>, JIANG Yuwei<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Climate change poses a significant threat to global food security and contributes to land degradation and desertification. Concurrently, land system issues emerge as one of the drivers of climate change. This study aims to investigate strategies for optimizing the allocation of land resources in the context of climate change. Utilizing climate scenario data from SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, coupled with the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) and Representative Concentration Pathways (RCPs) released by the IPCC in 2020, we have developed and validated the SD-PLUS coupled model. This model integrates socio-economic and climate change factors, and simulates three climate scenarios in Hangzhou for 2030, utilizing historical data from 2000 to 2020. The results demonstrated that the SD model prediction error was within 5%, the Kappa of the PLUS model was 0.84, and overall accuracy was 0.93, indicating that the SD-PLUS coupled model provides a more precise reflection of land use changes. Land use changes under the three scenarios exhibited distinct characteristics. Ecological land decreased under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, with forest and grassland transitioning to construction land, particularly in Lin'an District, Fuyang District, and areas bordering the central urban area. The most significant change was observed in the SSP5-8.5 scenario, marked by a substantial expansion of construction land by 608.94 km<sup>2</sup>. Only the SSP1-2.6 scenario demonstrated a systematic expansion of construction land around city centers, with a moderate decrease in ecological land. In the SSP1-2.6 scenario, the protection of ecological land effectively mitigated the uncontrolled expansion of construction land, enhanced land use efficiency, and

收稿日期:2023-12-15 录用日期:2024-02-22

作者简介:蔚芳(1974—),女,山西太原人,博士,副教授,主要从事区域与城市发展研究。E-mail:weif@zju.edu.cn

基金项目:浙江大学平衡建筑研究中心资助项目(A2221044a)

Project supported: Center for Balance Architecture, Zhejiang University (A2221044a)

fostered balanced ecological and economic development. In conclusion, the SD-PLUS coupled model skillfully simulated the spatial pattern of land use change in Hangzhou under different climate scenarios. The study findings offer valuable scientific insights to support the harmonization of future economic development and ecological preservation in Hangzhou.

**Keywords:** climate change; SD-PLUS model; land use; SSP-RCP scenario; multi-scenario simulation; Hangzhou

21世纪以来,气候变化已成为人类面临的最严峻的环境问题之一,全球气候变化和极端天气/气候事件已经对人类经济社会有序发展产生了严重威胁<sup>[1-2]</sup>。土地是承载水、能源、粮食等资源的重要基础<sup>[3]</sup>,绝大部分社会经济活动都要依托土地这一载体<sup>[4]</sup>。自IPCC(政府间气候变化专门委员会)于1990年开展气候变化研究开始,已有诸多研究<sup>[5-7]</sup>表明气候变化会加重各类土地间的竞争,造成土地退化和荒漠化等问题,对全球粮食安全产生严重威胁。同时,以人为主导的土地开发行为所导致的地表特征转变会影响陆地与大气间的水热循环,土地退化和荒漠化使得耕作开发加剧,土地系统变动所造成的生物多样性下降和温室气体额外排放又成为加剧气候变化的驱动力<sup>[8-9]</sup>。20世纪80年代以来,世界气候研究计划(WCRP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)的实施使得对土地利用/覆盖变化(Land Use/Cover Change, LUCC)的研究逐渐成为全球变化研究的核心之一<sup>[10]</sup>。随着气候变化问题和人类经济社会发展之间的冲突愈演愈烈,探究如何在气候变化背景下对土地资源进行合理规划和可持续管控,对于促进土地资源可持续利用、应对并缓解气候变化问题具有重要现实意义。

土地资源配置是基于时空双尺度的研究,建立模型是研究LUCC的一种量化手段<sup>[11]</sup>。自20世纪以来,国内外学者构建了诸多研究模型,主要包括土地数量预测模型和土地空间模拟模型。前者侧重于自上而下从时间尺度研究土地数量结构变化,包括马尔科夫(Markov)模型<sup>[12]</sup>、线性规划模型<sup>[13]</sup>、系统动力学(System Dynamics, SD)模型<sup>[14]</sup>等。Markov模型和线性规划模型作为静态模型,难以反映LUCC各影响因子间的作用关系<sup>[15]</sup>,而SD模型利用计算机仿真技术能够有效模拟LUCC与驱动因子间的动态因果关系<sup>[16]</sup>,被广泛应用于不同尺度的LUCC研究中<sup>[17]</sup>。如顾茉莉等<sup>[18]</sup>利用SD模型预测江西省不同社会经济发展情景下的土地需求,为江西省国土空间规划多方案模拟提供科学支撑。Hosseinzadeh等<sup>[19]</sup>利用SD模型构建了伊朗农业生态系统模拟模型,探究其在不同政策下的变化并选出最优发展方案。土地利

用空间模拟模型侧重于自下而上从空间尺度对土地利用分布格局特征进行研究,包括元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型<sup>[20]</sup>、CLUE-S(Conversion of Land Use and Its Effects at Small Regional Extent)模型<sup>[21]</sup>、FLUS(Future Land Use Simulation Model)模型<sup>[22]</sup>、PLUS(Patch Generating Land Use Simulation Model)模型<sup>[23]</sup>等。PLUS模型能够动态模拟多种土地利用类型斑块级别的演变<sup>[24]</sup>,有效解决社会经济与自然环境共同作用下LUCC发展具有不确定性的问题<sup>[25]</sup>。蒋小芳等<sup>[26]</sup>对比了PLUS、FLUS和CLUE-S模型在黑河流域中游甘临高地区土地模拟精度,发现PLUS模型的拟合效果最优。Nie等<sup>[27]</sup>建立ESP-MS-PLUS耦合模型研究生态安全约束下安吉县土地利用变化,为生态保护导向的土地利用优化提供了新的技术方法。

单一模型进行土地利用模拟具有局限性,耦合模型则可以结合时空模型的优势。利用SD-PLUS耦合模型能够同时对LUCC在数量结构和空间配置上进行研究,弥补了传统模型的缺陷。在模拟时能够综合考虑人类社会经济活动和自然环境变化对LUCC的驱动力,提高模拟预测精度,为研究提供更为全面科学的保障<sup>[28-29]</sup>。此外,全球气候变化背景下,除了人类活动的影响,气候变化对LUCC的影响也需受到重视<sup>[30-31]</sup>。目前的研究多使用社会经济因素作为土地变化的驱动因素<sup>[11,18]</sup>,忽略了气候变化对土地格局的影响。因此,有必要构建耦合模型在气候变化背景下进行土地利用模拟研究,定量模拟不同气候情景下土地资源变化状况,实现区域经济发展与生态环境保护的均衡优化。

鉴于此,本研究以杭州市为研究区域,基于2020年IPCC发布的共享经济路径(SSPs)与典型浓度路径(RCPs)耦合的SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5三类气候情景数据,构建并验证了综合考虑各类社会经济因素及气候变化因素的SD-PLUS耦合预测模型,以2000—2020年为历史期,模拟预测了2030年杭州市各情景下的土地利用时空变化趋势,分析不同气候变化情景下土地利用空间格局变化,以期为研究区实现土地资源和生态环境优化配置、经济生态均衡发展提

供科学支撑。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

杭州市地处我国华东地区,浙江省北部,位于东经 $118^{\circ}21' \sim 120^{\circ}30'$ 、北纬 $29^{\circ}11' \sim 30^{\circ}33'$ 之间,市域总面积 $16\,850\text{ km}^2$ ,西部为浙西丘陵区,东部为浙北平原,属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,水网密布,物产丰富(图1)。

杭州市作为长江三角洲的重要中心城市,人口、经济及产业资源高度聚集。伴随着高速城镇化发展进程,区域内资源环境约束越发紧张、人地关系冲突越发显著,气候变化和人类活动对土地资源配置产生了深刻影响。土地功能退化、土地无法实现集约化发

展等问题亟待解决。因此,需对土地资源配置进行动态化调控,在确保耕地供给和生态环境可持续的同时实现区域均衡发展。

### 1.2 数据来源与处理

本研究所需数据包括用于构建SD模型的非空间数据和用于构建PLUS模型的空间数据。前者包括历年社会经济数据,后者包括土地利用数据、自然环境数据、基础地理信息数据等。数据来源及属性如表1所示。

根据需要将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地6种类型,所有空间数据都在ArcGIS中转换为WGS-1984-UTM-Zone-50N投影坐标系,分辨率经重采样后为 $30\text{ m}$ 。对数据进行统一处理,像元与驱动因子的距离由欧氏距离计

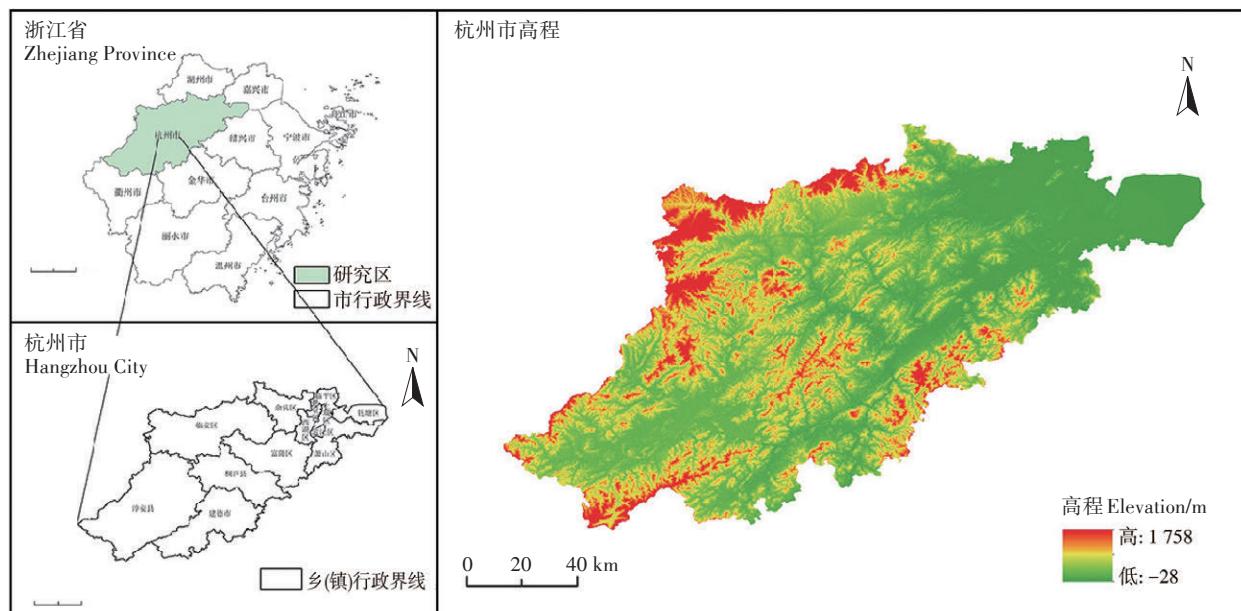


图1 杭州市地理位置及高程  
Figure 1 Geographical location and altitude of Hangzhou City

表1 主要数据及数据来源

Table 1 Main data and data sources

类别 Category	数据名称 Data name	数据来源 Data source
非空间数据	人口(2000—2020年)、经济(2000—2020年) 粮食、畜牧业、水需求量	杭州市统计年鉴 国家统计局( <a href="https://www.stats.gov.cn/">https://www.stats.gov.cn/</a> )
空间数据	基础数据 土地利用数据(2000、2005、2010、2020年) 自然驱动因子 DEM、坡度、坡向、年均气温、年均降雨、土壤类型、到水域距离	Globeland 30( <a href="http://www.globallandcover.com/">http://www.globallandcover.com/</a> ) 地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )、 资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
	经济驱动因子 人口密度、GDP密度、到政府驻地距离	资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )、 规划云( <a href="http://guihuayun.com/">http://guihuayun.com/</a> )
社会驱动因子	到高速、一级道路、二级道路、三级道路以及铁路距离	Open Street Map( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
限制因子	生态保护范围、永久基本农田、水域	相关规划文件

算得到。

### 1.3 研究方法

SD模型能预测土地利用需求,PLUS模型可以在空间尺度上模拟土地利用格局。因此本研究采用SD-PLUS耦合模型对杭州市不同气候变化情景下LUCC进行模拟与分析。首先根据IPCC发布的气候变化路径设置未来不同气候情景,利用SD模型预测土地利用需求,再利用PLUS模型构建土地利用模拟模型,通过迭代运算获取最合理的土地利用空间分布。具体流程如图2所示。

#### 1.3.1 多情景设置

本研究所设置的气候变化情景采用IPCC发布的情景模式,该模式由不同共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways,SSPs)和代表浓度路径(Representative Concentration Pathways,RCPs)耦合构成<sup>[32]</sup>。其中SSPs定量描述了不同情景下社会经济发展路径;RCPs描述了未来人口、经济、土地利用发生变化时,空气污染物浓度和温室气体排放的不同路径<sup>[33]</sup>。根据研究区实际情况采取SSP2-4.5、SSP5-8.5及SSP1-2.6组合作为研究场景。

#### (1)SSP2-4.5情景

SSP2-4.5情景为惯性发展情景,基于历年社会经济数据发展趋势设置。该情景下社会经济发展和温室气体排放处于中间水平,设定没有出台新的经济发展或环境保护政策,研究区社会经济及气候变化保持历年发展趋势。此情景设置较慢的人口和GDP增长率,气候变化保持现状且选择技术进步缓慢的参数。

#### (2)SSP5-8.5情景

SSP5-8.5情景为高速发展情景,以高经济增长和高排放为主要特征。该情景下人口及经济高速发展导致资源消耗水平提升,同时农业的投资提升也会提高生产力。该情景设置较高的人口和GDP增长率,气候变化采用高排放情景且选择技术进步较快的参数。

#### (3)SSP1-2.6情景

SSP1-2.6情景为均衡发展情景,以可持续发展和低排放为主要特征。该情景权衡了社会经济发展速率、生态环境质量等因素,同时也考虑到环境保护相关政策对气候变化产生的积极影响。此情景设置中等的人口和GDP增长率,气候变化采取中等排放情景且选择技术水平稳定增长的参数。

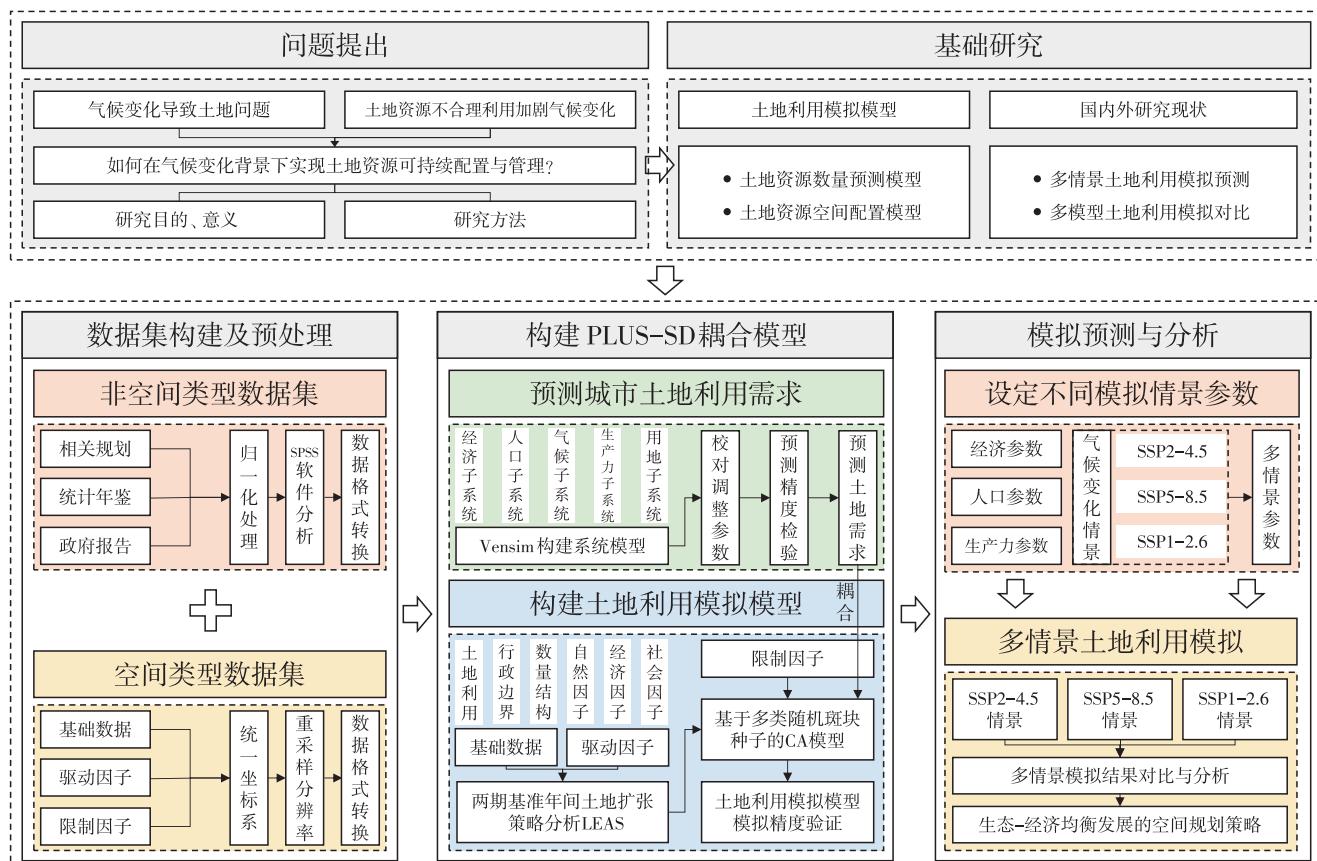


图2 技术路线图

Figure 2 Technology flowchart

分析研究区历年社会经济数据,参考前人研究<sup>[17,22]</sup>并分析LUCC关键驱动因素,本研究选取人口增长率、GDP增长率、年均气温变化、年均降水变化和技术进步水平作为情景设定的关键参数,设定3种情景下未来可能的发展状况。其中GDP和人口增长率参考《杭州市“十四五”规划》发展目标设定,年均气温、年均降水等参数参考前人研究<sup>[34-35]</sup>设定(表2)。

### 1.3.2 基于SD模型的土地利用需求预测与验证

系统动力学认为复杂系统是由各子系统间进行多重信息反馈机制构成,通过计算机可以进行仿真模拟<sup>[37]</sup>。构建土地利用模拟系统需要综合考虑LUCC驱动因素,参考前人研究<sup>[38]</sup>,本研究将杭州市土地利用需求系统划分为人口、经济、生产力、气候、土地利用

5个子系统。

本研究的空间边界为杭州市行政边界;时间边界为2000—2030年(历史数据为2000—2020年,模拟预测为2021—2030年),时间步长为1 a。利用Vensim软件反复调试,明确各变量相互作用关系,最终得到杭州市土地利用变化SD模型(图3),不同变量间的数量关系通过SPSS 26软件获取。

SD模型检验包括历史误差检验及灵敏度检验。前者通过对比模拟结果与真实数据,观察拟合度,判断模型可靠性。历史误差检验公式见公式(1):

$$\text{相对误差} = \frac{| \text{模拟值} - \text{历史值} |}{\text{历史值}} \times 100\% \quad (1)$$

灵敏度检验是将关键参数进行调整,通过比对模

表2 不同气候情景相关参数设置

Table 2 Parameter settings for different climate scenarios

情景 Scenario	人口增长率 Population growth rate	GDP增长率 GDP growth rate	年均气温变化 Average temperature change	年均降水变化 Average precipitation change	技术进步系数 Technological progress
SSP2-4.5	$r(x) = r(1 - \frac{x}{x_{\max}})$	13%线性下降至8%	$0.025 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$	$4.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$	—
SSP5-8.5	3.5%	保持13%	$0.055 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$	$7.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$	0.5‰
SSP1-2.6	1.2%线性下降至0.8%	13%线性下降至5%	$0.010 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$	$2.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$	0.3‰

注: $r(x) = r(1 - \frac{x}{x_{\max}})$ 为阻滞人口增长模型,式中 $r(x)$ 是总人口为 $x$ 时的人口增长率, $r$ 为固有人口增长, $x$ 为总人口, $x_{\max}$ 是可容纳的最大人口数量,当总人口达到 $x_{\max}$ 时,人口将停止增长<sup>[36]</sup>。

Note: $r(x) = r(1 - \frac{x}{x_{\max}})$ ,  $r(x)$  is the population growth rate when the total population is  $x$ ,  $r$  is the inherent population growth,  $x$  is the current total population,  $x_{\max}$  is the maximum number of people that the area can accommodate, when the total population reaches  $x_{\max}$ , the population will stop growing<sup>[36]</sup>.

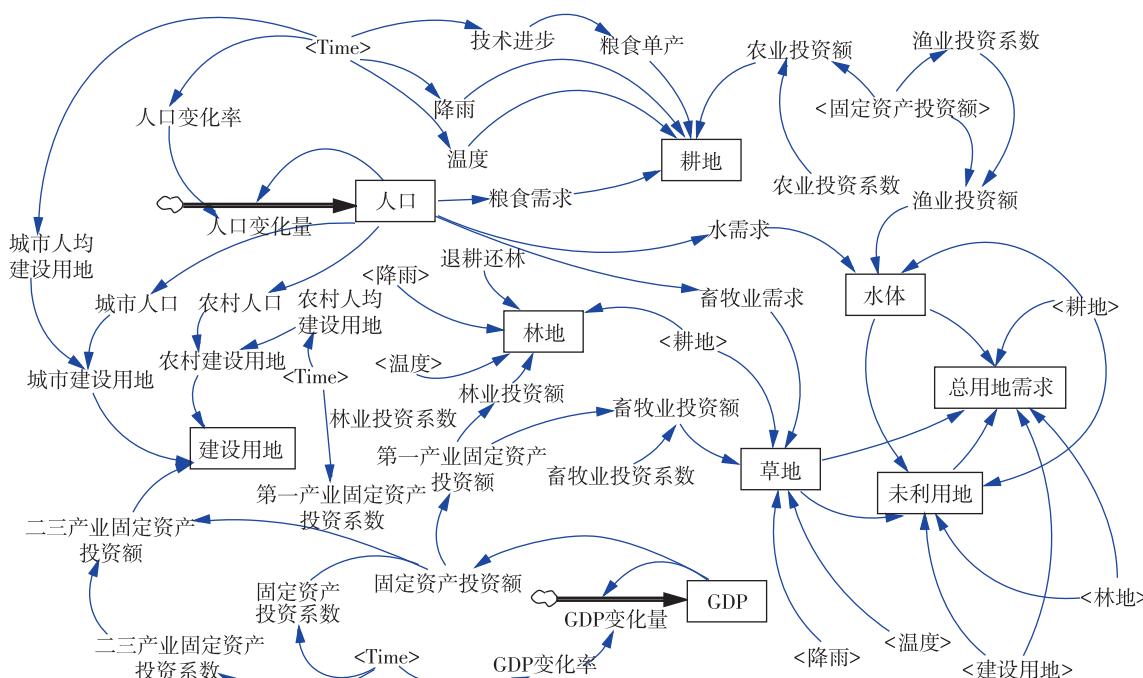


图3 杭州市土地利用变化SD模型

Figure 3 SD model of land use change in Hangzhou

拟结果观察参数变化是否会对最终预测结果产生较大影响<sup>[39]</sup>。灵敏度计算公式见公式(2):

$$S_{(t)} = \left| \frac{\Delta Y \times Y_{(t)}}{\Delta X \times X_{(t)}} \right| \quad (2)$$

式中: $S_{(t)}$ 为 $t$ 时间内变量 $Y$ 对参数 $X$ 的灵敏度数值; $\Delta Y$ 和 $\Delta X$ 为 $t$ 时间内参数变化值。当 $S_{(t)} < 1$ 时,表明该参数为非敏感性因子,模型较稳定。

### 1.3.3 基于PLUS模型的土地利用模拟与验证

PLUS模型是基于CA提出的斑块生成土地利用模拟模型,由用地扩张策略分析(LEAS)和基于多类随机斑块种子的CA模型(CARS)两大模块组成<sup>[24]</sup>。LEAS是提取两个时间节点间各类用地扩张的部分,采用随机森林算法挖掘各类用地变化的驱动因素,从而获取其发展概率。参考前人研究<sup>[40-41]</sup>并综合考虑《杭州市国土空间总体规划(2021—2035年)》等相关规划,本研究选取了三大类共15种LUCC驱动因子(图4)。

CARS是基于各类用地发展概率,输入限制因子,结合土地数量预测结果、各类用地邻域权重以及土地利用成本转移矩阵等参数,模拟未来土地利用空

间分布状态。本研究选取生态保护范围、水域与永久基本农田作为限制因子(图5)。

对于PLUS模型模拟结果采用Kappa系数和FoM值进行检验。Kappa系数可以用来描述预测结果的准确度,通常认为Kappa系数大于0.75,即可证明模型具有较高的模拟精度<sup>[11]</sup>。FoM值是由Pontius等<sup>[42]</sup>提出的模拟精度评价方法,通常认为FoM值大于0.21时模型模拟精度较高<sup>[43]</sup>。FoM值计算公式见公式(3):

$$FoM = \frac{B}{A + B + C + D} \quad (3)$$

式中: $A$ 表示实际变化但模拟未变的像元; $B$ 表示实际与模拟都变的像元; $C$ 表示变化但方向不一致的像元; $D$ 表示实际未变但模拟变化的像元。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型精度检验

#### 2.1.1 SD模型精度检验

##### (1)历史误差检验

本研究以2010年和2020年作为样本年进行历史

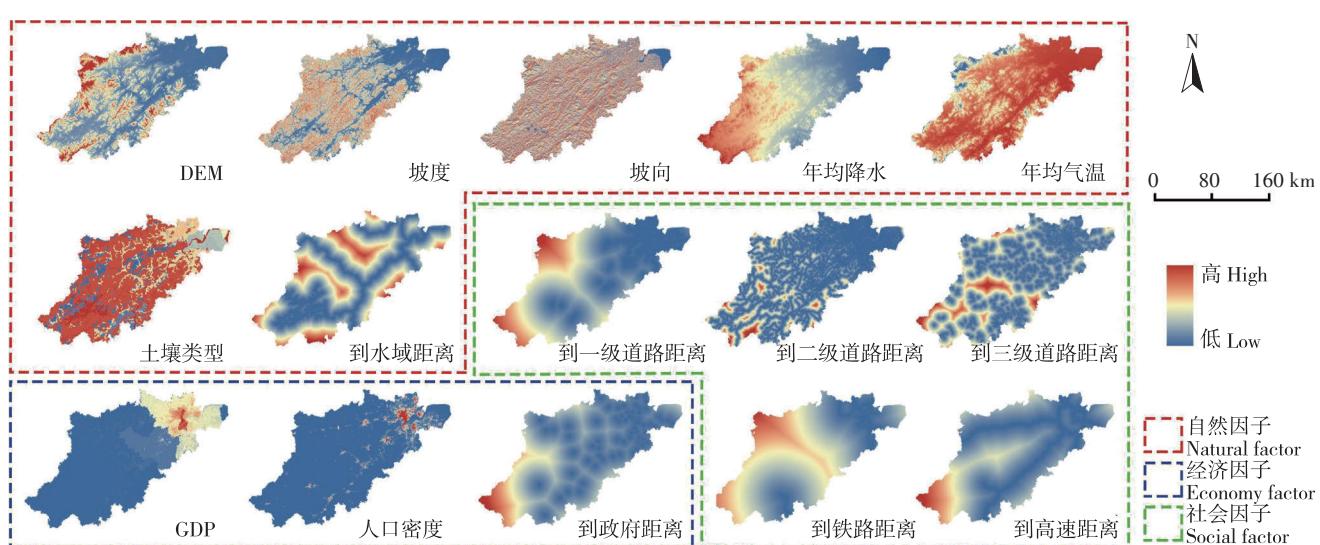


图4 PLUS模型驱动因子数据集

Figure 4 Data set of driving factors for the PLUS model

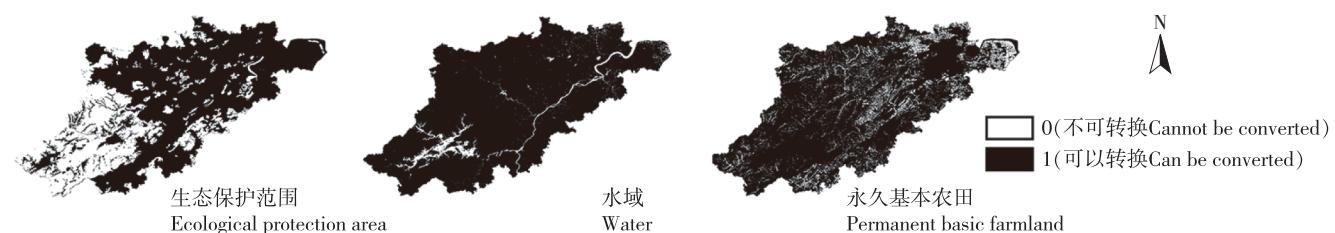


图5 PLUS模型限制因子数据集

Figure 5 Data set of limiting factors for the PLUS model

误差检验,结果如表3所示。从表3可以得出,多数变量历史误差都在 $\pm 5\%$ 以内,一般认为误差在 $\pm 10\%$ 以内即可证明模型拟合度较好,因此可以认为本研究的SD模型具有较好的准确性。

## (2)参数灵敏度检验

为检验SD模型能否稳定运行,本研究选取10个关键参数进行灵敏度分析,将各参数分别逐年进行 $\pm 10\%$ 的调整,观察数据变化对预测结果的影响<sup>[44]</sup>,结果如表4所示。选取的10个参数灵敏度均小于1,证明本研究构建的SD模型较为稳定。

通过上述检验可以认为本研究构建的SD模型具有较好的稳定性与可靠性,可以用来预测研究区未来土地利用数量需求。

### 2.1.2 PLUS模型精度检验

为评价PLUS模型模拟精度,基于2000年和2010年的土地利用数据进行用地扩张策略分析,再结合选定的驱动因子和限制因子数据集,模拟2020年土地利用空间格局,将得到模拟图与实际图进行对比(图6),预测精度结果如表5所示。结果表明,模拟结果与现状总体结构较为吻合,模拟数据的Kappa系数为0.84,FoM值为0.35,总体精度为0.93。证明本研究构建的PLUS模型能够较为精确地反映用地变化趋势,适用于未来LUCC模拟。

表3 SD模型历史误差检验结果( $\text{km}^2$ )  
Table 3 Historical error test results of SD model ( $\text{km}^2$ )

项目 Item	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
2010年历史值	2 574.79	12 281.84	4.28	879.61	1 115.99	13.32
2010年模拟值	2 706.58	12 262.43	4.41	861.49	1 127.09	12.04
2010年相对误差	0.051 2	0.001 6	0.030 4	0.020 6	0.009 9	0.095 9
2020年历史值	2 674.25	11 896.98	1.59	785.86	1 497.70	25.74
2020年模拟值	2 564.70	11 875.37	1.64	814.15	1 509.83	26.78
2020年相对误差	0.041 0	0.001 8	0.031 2	0.036 0	0.008 1	0.040 4

(a)土地利用模拟图 Simulated land use      (b)实际土地利用图 Actual land use

图6 杭州市2020年土地利用模拟结果与实际对比图

Figure 6 Comparison of simulated land use and actual land use in Hangzhou in 2020

表4 SD模型参数灵敏度检验结果

Table 4 Parameter sensitivity test results of SD model

参数 Parameter	参数减少10%的灵敏度 Parameter sensitivity reduced by 10%	参数增加10%的灵敏度 Parameter sensitivity increased by 10%
人口增长率	0.247 3	0.480 5
GDP增长率	0.149 6	0.178 7
固定资产投资系数	0.066 8	0.061 0
第一产业投资系数	0.007 4	0.008 0
农业投资系数	0.007 4	0.008 0
林业投资系数	0.000 1	0.000 1
畜牧业投资系数	0.032 7	0.233 8
渔业投资系数	0.000 1	0.000 1
粮食单产	0.043 1	0.034 2
技术进步系数	0.031 0	0.030 6

考虑到土地利用变化是长时间周期的动态变化,为探究不同时间步长对模拟精度的影响,本研究以2005—2010、2000—2010两个时间周期为基准,提取各周期内土地扩展趋势与发展潜力,分别模拟2020年土地利用,探究5年、10年时间步长的模拟精度差异,模拟对比结果如图7、表6所示。

对比发现10年时间步长模拟结果Kappa系数为0.84,FoM值为0.35;5年时间步长模拟结果Kappa系数为0.86,FoM值为0.39。模拟差异主要体现在耕

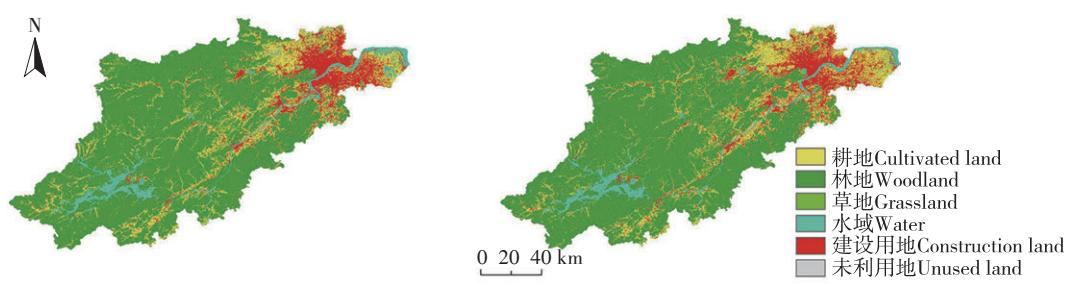


表5 2020年土地利用预测精度对比

Table 5 Comparison of land use prediction accuracy in 2020

土地利用类型 Land use type	实际栅格数 Actual raster	模拟栅格数 Simulation raster	对比一致栅格数 Same raster	正确率 Accuracy/%	Kappa	FoM值 Figure of merit
耕地	280 983	273 503	211 740	77.42	0.84	0.35
林地	1 341 522	1 298 635	1 277 438	98.37		
草地	486	179	179	100.00		
水域	96 043	103 879	96 043	92.46		
建设用地	121 924	164 770	121 924	73.99		
未利用地	15	7	7	100.00		

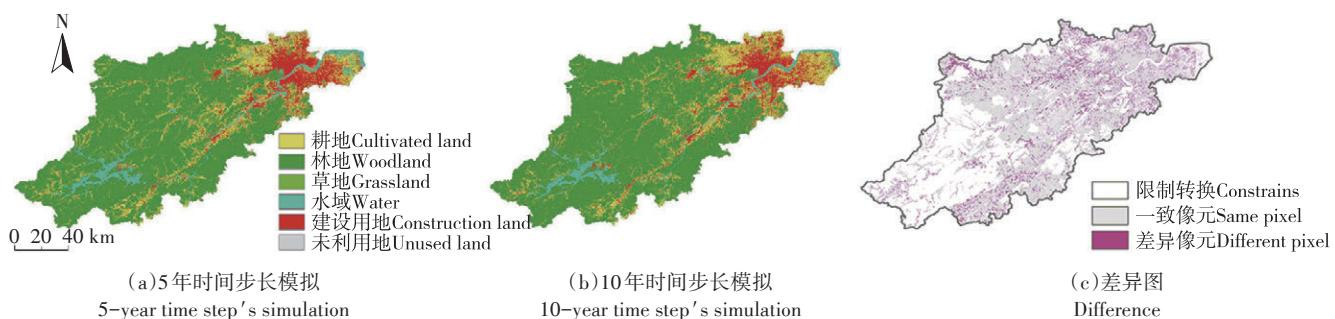


图7 不同时间步长土地利用模拟对比

Figure 7 Difference between different time steps' simulation

表6 不同时间步长下模拟精度对比

Table 6 Comparison of simulation accuracy in 2020 at different time steps

时间步长 Time step	实际栅格数 Actual raster	模拟栅格数 Simulation raster	对比一致栅格数 Same raster	正确率 Accuracy/%	Kappa	FoM值 Figure of merit
5年步长	1 840 973	1 840 973	1 727 136	93.81	0.86	0.39
10年步长	1 840 973	1 840 973	1 707 331	92.74	0.84	0.35

地、建设用地和林地的交界地带。

## 2.2 多情景预测结果

### 2.2.1 多情景土地利用需求预测

根据三种情景的相关设定,运用SD模型计算得到2030年研究区各类土地利用需求预测结果(表7)。对比2020年土地利用现状数据(表3),2030年三种情景下耕地及建设用地均增加,SSP2-4.5情景耕地增加了6.35%,SSP5-8.5情景增加了15.81%,而SSP1-2.6情景下耕地发展相对稳定,仅增加了3.86%;三种情景下建设用地分别增加了17.40%、40.66%和12.36%。

而林地、草地以及水域面积则减少,其中林地相比2020年分别减少了3.12%、7.08%和2.16%,只有SSP1-2.6情景下生态用地得到合理保护。

### 2.2.2 多情景土地利用空间格局模拟

将研究区2020年土地利用数据作为初始值,设定符合各情景发展特征的土地转换成本矩阵(表8)以及限制发展区域。利用PLUS模型进行2030年多情景土地利用空间格局模拟(图8)。

2030年不同气候情景下土地利用空间格局变动呈现差异性特征:SSP2-4.5情景土地利用变化较为平

表7 2030年杭州市用地需求预测(km<sup>2</sup>)Table 7 Forecast of land demand in Hangzhou in 2030(km<sup>2</sup>)

情景 Scenario	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
SSP2-4.5	2 844.02	11 526.35	0.58	689.95	1 758.35	0.18
SSP5-8.5	3 097.09	11 054.51	0	527.39	2 106.64	0.15
SSP1-2.6	2 777.57	11 639.61	0.99	726.81	1 682.87	0.23

表8 各情景土地利用转换成本矩阵

Table 8 Land use conversion cost matrix by scenarios

土地利用类型 Land use type	SSP2-4.5情景 SSP2-4.5 scenario						SSP5-8.5情景 SSP5-8.5 scenario						SSP1-2.6情景 SSP1-2.6 scenario					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
d	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a,b,c,d,e,f分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;其中0表示不允许转化,1表示允许转化;矩阵内行表示转出,列表示转入。

Note:a,b,c,d,e,f represent cultivated land, woodland, grassland, water, construction land and unused land ; where 0 means no conversion allowed and 1 means allowed; Row represent roll-out, column represent roll-in.

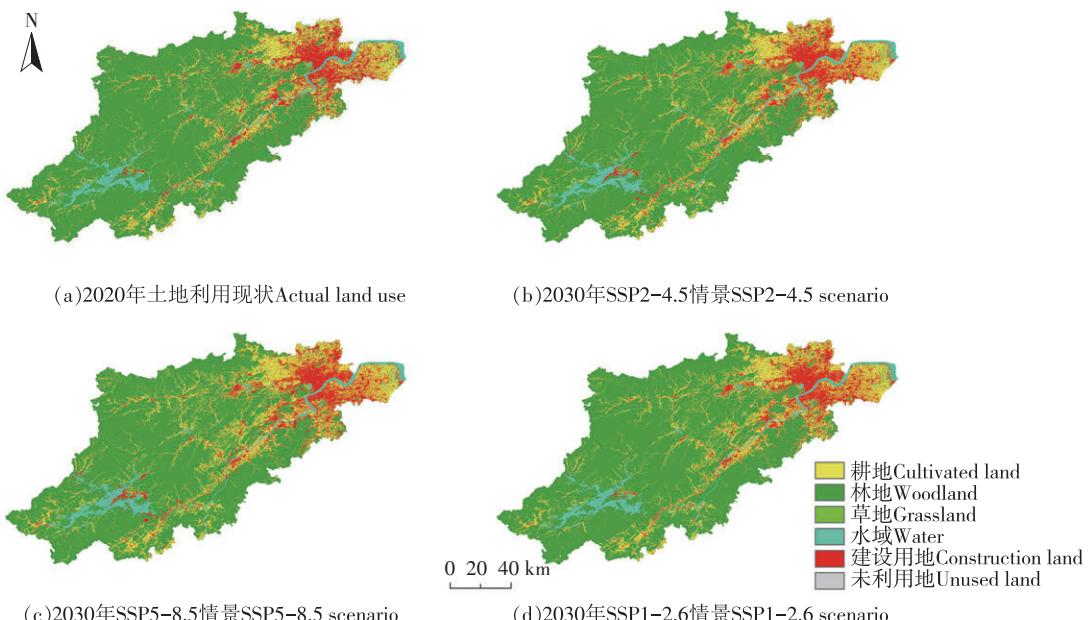


图8 杭州市2020年土地利用现状与2030年各情景模拟结果

Figure 8 Land use status in Hangzhou in 2020 and simulation results of various scenarios in 2030

稳,顺延历史趋势自然发展,但生态用地逐步被侵占;SSP5-8.5情景下土地利用变化最为激烈,经济的快速发展以生态环境遭受破坏为代价,建设用地无序扩张,侵占大量生态和生产用地;SSP1-2.6情景变化最为稳定可持续,林地和草地等生态用地得到合理保护,生产用地也稳步增长,一定程度抑制了建设用地的野蛮扩张。

在SSP2-4.5情景下,研究区各类用地的变化延续历年发展趋势。人口和经济的增长使得建设用地增加了260.65 km<sup>2</sup>。由于主城区用地较饱和,建设用地主要在主城区周边向西南方向蔓延,集中在临安区东部、富阳区西北部以及萧山区南部。这些区域经济发展状况较好,基础设施完善,能够吸引人口和资源

聚集。此外,人口数量增长使得粮食需求量递增,耕地增长了169.77 km<sup>2</sup>,主要增长在西南部地势平坦地区。增长的耕地多由龙门山和千里岗山脉的生态用地转换,导致林地、草地等用地减少至11 526.93 km<sup>2</sup>,水域减少至689.95 km<sup>2</sup>。此情景下建设用地和耕地平稳增加,逐渐侵占生态用地,不利于环境保护。

在SSP5-8.5情景下,经济和人口的高速发展导致建设用地大幅增加至2 106.64 km<sup>2</sup>,相较于2020年增加了40.66%。除中心城区和临安区、萧山区等中心城区周边地区建设用地显著增加外,淳安县、桐庐市和建德市的建设用地也显著增加,这样的发展趋势符合《杭州市国土空间总体规划(2021—2035年)》提出的“一核九星”组团式空间格局。但建设用地未加

限制的无序蔓延,大量侵占昱岭山脉、龙门山山脉及天目山山脉周边的生态用地,导致林地减少至11 054.51 km<sup>2</sup>,草地更是完全消失。耕地虽然在增长,但空间分布破碎化显著。此情景下不加限制的高速发展导致建设用地大幅增加,严重威胁耕地保护及生态建设。

在SSP1-2.6情景下,注重经济发展的同时也考虑到生态保护。研究区2030年生态用地面积为11 640.60 km<sup>2</sup>,虽然与2020年相比仍减少了2.16%,但相较于其他情景生态用地大幅减少的趋势得到有效控制。同时在该情景下部分草地转化为林地,林地恢复现象较为明显。建设用地并未无序增长,相比2020年仅增长12.36%,且呈现紧凑、组团的增长趋势。此外,耕地和水域也得到了合理的保护,到2030年耕地增长至2 777.57 km<sup>2</sup>,水域面积为726.81 km<sup>2</sup>,这也与《杭州市绿地系统规划(2021—2035)》等相关规划中生态保护和绿色发展的目标较为契合。该情景下既避免了生态用地大面积流失,也保障了耕地保有量,实现了均衡发展的良好格局。

### 2.2.3 多情景土地利用转移特征

为明确2030年多情景下各类用地的转移特征,对比2020、2030年土地利用数据,得到各地类转移情况(图9)。土地利用主要转移趋势为林地、草地等生态用地向耕地和建设用地转移,在SSP2-4.5、SSP5-8.5情景下,林地和草地在临安区、富阳区等中心城区周边地区转移为建设用地。特别是在SSP5-8.5情景下,原有林地还在淳安县和建德市接壤地区转移,但较为破碎,未能实现紧凑发展。在SSP1-2.6情景下,

建设用地扩张区域主要集中在现有各市区中心周边,促进城市用地紧凑发展。三种情景下耕地主要在西南地区地势平坦、水网丰富的原耕地周边集中转入,保障了粮食安全。

## 3 讨论

本研究在气候变化背景下,构建并验证了综合考虑各类社会经济因素及气候变化因素的SD-PLUS耦合模型,预测了研究区2030年各气候变化情景下的土地利用时空变化结果。模拟结果证明,土地变化与气候变化息息相关,不同气候情景下土地格局变动呈现差异性。SSP2-4.5情景气候变化较为温和,土地利用变化较为平稳;SSP5-8.5情景下高排放的发展方式导致气候变化激烈,土地利用变化也最为激烈,建设用地无序扩张侵占大量生态生产用地;SSP1-2.6情景下可持续的气候变化使得LUCC最为稳定,生态生产用地得到合理保护。此外,气候变化与土地退化也有密切关系,在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景中,生态用地面积分别减少了3.12%和7.08%。气温变化带来的高温和极端天气事件导致土地退化、生态系统服务功能下降,而土地退化又会增加温室气体排放、降低土壤固碳能力,进一步驱动气候变化。只有在SSP1-2.6情景下,生态用地得到了可持续的管理与保护,减缓了气候变化程度。

同时,气候变化带来的粮食安全问题也不容忽视。三种情景耕地都呈增长趋势,气候变化减少了粮食的适宜种植区域,气候变暖和降雨模式的改变

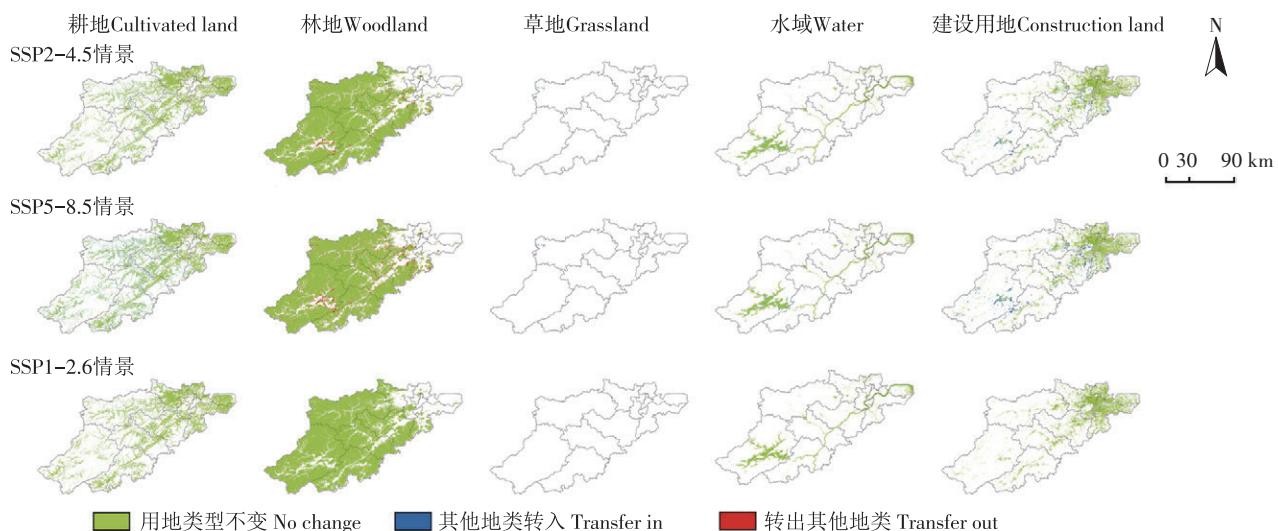


图9 各情景土地利用转换情况  
Figure 9 Land use conversion in different scenarios

导致农作物减产、牲畜死亡率上升等问题<sup>[9]</sup>。这些粮食安全问题导致未来对于生产空间的需求增加,然而LUCC会受到经济发展水平和人类活动的影响,未来GDP、人口总量、城镇化水平的高速提升导致在缺乏宏观调控的情况下建设用地扩张显著,进而使城区周边耕地破碎化,阻碍其他地类转变为耕地。

随着杭州都市圈的持续发展,杭州市进入高速城镇化发展进程。为实现杭州市社会经济高速发展与生态环境协同保护,未来土地资源开发首先应做到坚持绿色发展理念,建立有序管理,扭转和减缓生态用地退化,保护自然资源可持续发展,减缓气候变化带来的土地压力。其次应通过提升技术创新能力,因地制宜发展现代化农业,提升耕地利用效率,严格管控建设用地对生产用地的侵占。最后应建立多部门协同机制,加强基于土地资源利用减缓气候变化相关政策的研究,通过协同合作提升土地利用效率,降低土地压力造成的生态环境问题,积极应对气候变化风险,保障粮食安全。

本研究通过构建SD-PLUS耦合模型对土地利用进行模拟,取得了较为理想的结果,但仍存在不足之处:虽在构建模型时已考虑到经济、社会、自然等15个驱动因子,但囿于LUCC的复杂性和数据的可获取性,未将气候灾害等影响因素考虑在内;并且SD-PLUS耦合模型构建时涉及大量参数设定,具有一定主观性,未来还需探讨更为科学客观的参数设定方式。

## 4 结论

(1) SD-PLUS耦合模型能够较好地进行土地利用变化模拟,利用SD模型预测土地利用数量需求误差<5%,利用PLUS模型进行土地利用空间模拟,Kappa系数为0.84,总体精度为0.93,说明模型能够较真实地反映土地利用变化情况。

(2) SSP2-4.5、SSP5-8.5 和 SSP1-2.6 三种情景下杭州市土地利用均呈现耕地和建设用地增加、林地减少的发展趋势,但仍存在差异性。三种情景建设用地扩张强度不同,SSP2-4.5情景下增加了260.05 km<sup>2</sup>,SSP1-2.6情景下增加了185.17 km<sup>2</sup>,而SSP5-8.5情景下扩张了608.94 km<sup>2</sup>,扩张速度远高于其他情景。同时三种情景下生态用地均减少,只有SSP1-2.6情景减少得到控制,能够实现绿色发展。

(3) 空间变化方面,杭州市土地转移趋势为林地、草地等生态用地向耕地和建设用地转移,SSP2-4.5、

SSP5-8.5情景生态用地在临安区、富阳区等中心城区周边地区转移为建设用地,SSP1-2.6情景建设用地主要在现有各市区中心周边有序扩张,避免耕地破碎化的同时保护了生态用地。

(4) 杭州市未来仍处于城镇化推进阶段,建设用地通过侵占耕地和林地进行扩张。而SSP1-2.6情景对于生态用地的保护能够有效减缓建设用地无序扩张速度,可见对于生态和气候环境的保护能够促进城市呈现有序、紧凑的发展趋势。

## 参考文献:

- [1] TURNER B L I, SKOLE D L, SANDERSON S, et al. Land-use and land-cover change: science / research plan[J]. *Global Change Report*, 1995, 43:669-679.
- [2] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去2000年中国气候变化研究的新进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9):1248-1258. GE Q S, ZHENG J Y, HAO Z X, et al. State-of-the-arts in the study of climate changes over China for the past 2000 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9):1248-1258.
- [3] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3):582-599. WANG Y, SUN R X. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(3):582-599.
- [4] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于Markov-FLUS模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10):3947-3958. CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi - scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10):947-3958.
- [5] SPINONI J, VOGT J, NAUMANN G, et al. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(9):2210-2222.
- [6] 苏芳, 刘钰, 汪三贵, 等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(8):140-152. SU F, LIU Y, WANG S G, et al. Impact of climate change on food security in different grain producing areas in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(8):140-152.
- [7] 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 等. 气候变化、土地退化和粮食安全问题:关联机制与解决途径[J]. 生态学报, 2021, 41(7):2918-2929. CHEN R S, GUO X N, XIONG B, et al. Climate change, land degradation and food insecurity: linkages and potential solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7):2918-2929.
- [8] 武利阳, 左洪超, 冯锦明, 等. 中国土地利用和植被覆盖度变化对区域气候影响的数值模拟[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2018, 54(3):334-344. WU L Y, ZUO H C, FENG J M, et al. Numerical simulation of the impact of land use and green vegetation fraction changes on regional climate in China[J]. *Journal of Lanzhou University*:

- Natural Sciences, 2018, 54(3):334–344.
- [9] 贾根锁,IPCC《气候变化与土地特别报告》对陆气相互作用的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 9–16. JIA G S. New understanding of land–climate interactions from IPCC special report on climate change and land[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1):9–16.
- [10] 刘纪远, 邓祥征. LUCC时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3251–3258. LIU J Y, DENG X Z. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(21):3251–3258.
- [11] 胡烨婷, 李天宏. 基于SD-CA模型的快速城市化地区土地利用空间格局变化预测[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 372–382. HU Y T, LI T H. Forecasting spatial pattern of land use change in rapidly urbanized regions based on SD-CA model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(2): 372–382.
- [12] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于CA-Markov和InVEST模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106–4118. CHU L, ZHANG X R, WANG T W, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12):4106–4118.
- [13] 韩帅,甄江红. 基于灰色多目标线性规划的土地利用结构优化研究:以呼和浩特市区为例[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2019, 19(5): 33–37. HAN S, ZHEN J H. Research on optimization of land use structure based on grey multiple goals linear programming [J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2019, 19(5):33–37.
- [14] 耿思筱, 杨志, 党小虎, 等. 基于SD-FLUS模型的宁夏土地利用多情景模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 806–818. GENG S X, YANG Z, DANG X H, et al. Multi-scenarios simulation of Ningxia land use in China based on SD-FLUS model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4):806–818.
- [15] 王新军, 颜安, 曹月娥. 系统动力学和灰色多目标动态模型相结合在博乐市土地利用总体规划中的应用[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(1):87–92. WANG X J, YAN A, CAO Y E. Application of combining systematic dynamics with grey multi target dynamic model in overall planning of land use in Bole City in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(1):87–92.
- [16] IANDOLO F, BARILE S, ARMENIA S, et al. A system dynamics perspective on a viable systems approach definition for sustainable value[J]. Sustainability Science, 2018, 13(5):1245–1263.
- [17] 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 F X, LIU D F, KONG X S, 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.
- [18] 顾茉莉, 叶长盛, 李鑫, 等. 基于SD模型的江西省土地利用变化情景模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(4):95–103. GU M L, YE C S, LI X, et al. Scenario simulation of land use change in Jiangxi Province based on SD model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(4):95–103.
- [19] HOSSEINZADEH M, SAMAOI FOROUSHANI M, SADRAEI R. Dynamic performance development of entrepreneurial ecosystem in the agricultural sector[J]. British Food Journal, 2022, 124(7):2361–2395.
- [20] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010–1019. SHI M J, WU H Q, JIA H T, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6):1010–1019.
- [21] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于CLUE-S模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288–296. GU H L, MA T J, QIAN F K, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9):288–296.
- [22] 俞钦平, 吴振华, 王亚蓓. 一种耦合进化算法与FLUS模型的土地利用变化模拟模型[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(3):510–528. YU Q P, WU Z H, WANG Y B. A land use change simulation model: coupling of evolutionary algorithm and FLUS model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(3):510–528.
- [23] 林素丽, 王楓. 基于PLUS模型并顾及交通规划的广州市土地利用情景模拟与分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3):557–569. LIN S L, WANG F. Simulation and analysis of land use scenarios in Guangzhou based on the PLUS model and traffic planning scenario[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40 (3) : 557–569.
- [24] LIANG X, GUAN Q F, 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.
- [25] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及预测:以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4827–4839. LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: a case study in Guangdong Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10):4827–4839.
- [26] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于PLUS-SD耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4):1246–1258. JIANG X F, DUAN H C, LIAO J, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS – SD coupling model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (4) : 1246–1258.
- [27] NIE W B, XU B, YANG F, et al. Simulating future land use by coupling ecological security patterns and multiple scenarios[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859(P1):160262.
- [28] CAMACHO OLMEDO M T, PONTIUS R G, PAEGELOW M, et al. Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69: 214–221.

- [29] 刘耀林, 全照民, 刘岁, 等. 土地利用优化配置建模研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1598–1614.
- LIU Y L, TONG Z M, LIU S, et al. Progress and prospects of research on optimal land – use allocation modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1598–1614.
- [30] HUANG Q X, HE C Y, LIU Z F, et al. Modeling the impacts of drying trend scenarios on land systems in northern China using an integrated SD and CA model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(4): 839–854.
- [31] DALE V H. The relationship between land-use change and climate change[J]. *Inferential Studies of Climate Change*, 1997, 7(3): 753–769.
- [32] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *Nature*, 2010, 463(7282): 747–756.
- [33] LI J Y, CHEN X, KURBAN A, et al. Coupled SSPs–RCPs scenarios to project the future dynamic variations of water–soil–carbon biodiversity services in Central Asia[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107936.
- [34] GUO H, HE S F, LI M, et al. Future changes of drought characteristics in Coupled Model Intercomparison Project phase 6 Shared Socioeconomic Pathway scenarios over Central Asia[J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(7): 3888–3908.
- [35] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57(1/2): 17–35.
- [36] 李世锋, 洪增林, 薛旭平, 等. 基于 Logistic–CA–Markov 耦合模型的彬州市LUCC多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 292–299.
- LI S F, HONG Z L, XUE X P, et al. Multi-scenario simulation of LUCC in Binzhou City based on Logistic–CA – Markov coupling model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 292–299.
- [37] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062–1084.
- CAO Q W, GU C L, GUAN W H, et al. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 1062–1084.
- [38] 李丹, 周嘉, 战大庆. 黑龙江省耕地时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学, 2021, 41(7): 1266–1275.
- LI D, ZHOU J, ZHAN D Q. Spatial and temporal changes and driving factors of cultivated land in Heilongjiang Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1266–1275.
- [39] 齐露鹭, 李秀霞, 李辉. 基于约束性SD模型的城市建设用地规模预测研究:以吉林省四平市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(1): 234–241.
- QI L L, LI X X, LI H. Research on the scale prediction of urban construction land based on constrained SD model: taking Siping City, Jilin as an example[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(1): 234–241.
- [40] 张波, 潘佩佩, 王新云, 等. 基于GMOP–PLUS耦合模型的京津冀土地利用变化多情景模拟及功能关系分析[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(5): 8–16.
- ZHANG B, PAN P P, WANG X Y, et al. Multi-scenario simulation and functional relationship analysis of land use change in the Beijing–Tianjin – Hebei region based on GMOP–PLUS coupling model[J]. *Geography and Geo – Information Science*, 2023, 39(5): 8–16.
- [41] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于PLUS模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 86–92.
- XIE X D, LIN X S, WANG Y, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District of Chongqing based on PLUS model[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(6): 86–92.
- [42] PONTIUS R G, Jr MILLONES M. Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(15): 4407–4429.
- [43] 孙毅中, 杨静, 宋书颖, 等. 多层次矢量元胞自动机建模及土地利用变化模拟[J]. 地理学报, 2020, 75(10): 2164–2179.
- SUN Y Z, YANG J, SONG S Y, et al. Modeling of multilevel vector cellular automata and its simulation of land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2164–2179.
- [44] 顾朝林, 管卫华, 刘合林. 中国城镇化2050:SD模型与过程模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 818–832.
- GU C L, GUAN W H, LIU H L. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation[J]. *Scientia Sinica(Terra)*, 2017, 47(7): 818–832.