

# 耦合PLUS-InVEST模型的杭州市土地利用多情景模拟及碳储量效应研究

白玉岩

浙江农林大学, 中国·浙江 杭州 311300

**摘要:** 杭州作为长三角中心城市, 城市化进程中土地利用变化显著, 本研究为协同推进国土空间优化与生态系统增汇提供科学依据。PLUS 模型因能模拟斑块级变化被广泛应用, InVEST 模型则以数据需求低、参数灵活等优势成为碳储量评估重要工具, 二者结合可精细刻画土地利用与碳储量的关联。杭州历史土地利用变化以耕地转向建设用地为主导, 碳储量分布与土地利用空间分布较为一致; PLUS 模型模拟显示, 2030 年经济建设情景下建设用地扩张较自然发展情景增加约 10%, 碳储量下降明显; 生态保护情景耕地面积增幅较自然发展情景增加约 4%。

**关键词:** 土地利用动态变化; PLUS 模型; 多情景模拟; InVEST 模型; 碳储量; 杭州

## Study on Multi-scenario Simulation of Land Use and Carbon Storage Effects in Hangzhou Based on Coupled PLUS-InVEST Model

Bai Yuyan

Zhejiang A&F University, China Zhejiang Hangzhou 311300

**Abstract:** As a central city in the Yangtze River Delta, Hangzhou has experienced significant land use changes in the process of urbanization. This study provides a scientific basis for the coordinated promotion of territorial space optimization and ecosystem carbon sink enhancement. The PLUS model is widely used for its capability to simulate patch-level changes, while the InVEST model has become an important tool for carbon storage assessment due to its advantages of low data demand and flexible parameters. The combination of the two models can finely characterize the relationship between land use and carbon storage. Historical land use change in Hangzhou is dominated by the conversion of cultivated land to construction land, and the spatial distribution of carbon storage is generally consistent with that of land use. Simulations by the PLUS model show that under the economic development scenario in 2030, the expansion of construction land will increase by about 10% compared with the natural development scenario, resulting in an obvious decline in carbon storage. Under the ecological protection scenario, the increase in cultivated land area will be about 4% higher than that under the natural development scenario.

**Keywords:** Land use dynamic change; PLUS model; Multi-scenario simulation; InVEST model; Carbon storage; Hangzhou

## 0 引言

土地利用 / 覆被变化作为全球碳循环的关键驱动因子之一, 其通过影响植被固碳、土壤碳库、湿地碳汇等过程, 对区域碳收支具有显著调控作用<sup>[1]</sup>。近年来, 土地利用 / 覆被变化对碳排放效应研究已成为学术界日益关注的议题, 国内外学者从不同角度、利用不同方法对土地利用碳排放量进行测算, 如张余等<sup>[2]</sup>和程程等<sup>[3]</sup>通过遥感数据、地理信息系统 (GIS) 和碳排放因子模型来量化不同土地利用类型的碳排放和碳吸收, 郑永超等<sup>[4]</sup>和刘军等<sup>[5]</sup>研究土地利用与碳排放的空间异质性。土地利用转型是进行土地利用 / 覆被变化综合研究的新途径<sup>[6]</sup>, 通过探讨土地利用转

型与碳收支的相互作用, 结合未来土地利用变化模拟, 对于优化土地利用结构、提高碳汇能力具有重要作用。

当前, 杭州市土地整治正逐步向生态修复与保护导向转型, 土地利用开发模式从粗放扩张转向提质调控, 由此引发的区域碳储量时空演变特征及驱动机制问题亟待深入探讨, 这也是当前生态保护与土地利用优化工作中亟需解决的关键议题, 同时为长三角同类城市 LUCC 与碳储量协同调控提供参考。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

杭州位于浙江省北部 (29° 11' — 30° 34' N,

118° 20' —120° 37' E)，地形以“七山一水二分田”为特征，山地丘陵占 65.6%，平原占 25.3%，水域占 9.1%，是长三角南翼中心城市。2000—2020 年，常住人口从 687 万增至 1194 万，GDP 从 1383 亿元增至 16106 亿元，城市化率从 58.3% 升至 83.3%。

## 1.2 数据来源 (见表 1)

### 1.3 数据处理

利用 GIS 软件处理土地利用数据，处理后的数据要求如：

(1) 统一坐标系：土地利用及驱动因子数据都转换为 TIF 格式，并确保投影坐标系一致，将投影统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N。

(2) 数据精度一致：为保证驱动因子的空间分辨率一致，所有数据的分辨率都为 30m\*30m。

(3) 行列数一致：土地利用数据和驱动因素数据的行列号需完全一致。以杭州市历史土地利用栅格数据的行列数作为基准，处理后的数据行列数统一为行数 5256，列数 7795。

## 2 研究方法

### 2.1 基于 PLUS 模型的未来土地利用格局模拟

基于 PLUS 模型的未来土地利用变化模拟 PLUS 模型是由中国地质大学 HPSCIL@CUG 实验室研发的一种斑块生成土地利用变化模拟的模型，该模型内置马尔可夫链模型，通过分析潜在 LULC 随时间转移矩阵的可能性来衡量不同条件下的土地利用需求。PLUS 模型采用用地扩张分析策略 (LEAS) 和基于多类随机斑块种子的元胞自动机模型 (CARS)。与其他模型相比，PLUS 模型的优势在于可以确

定土地扩张和景观动态的驱动因素，以预测不同土地利用类型情景下的斑块演变。

#### 2.1.1 多情景设置

(1) 自然发展情景：以 2010 和 2020 年土地利用数据为基准，利用 Markov 生成 2030 年自然情景下的土地利用需求和发展概率。

(2) 经济建设情景：在 2010—2020 年转移概率的基础上，经济发展需要大量建设用地作为支撑，因此该情景下优先保障建设用地的规模。建设用地向耕地、林地、水域转化的概率较少 40%，耕地、林地、草地、水域和未利用地转移到建设用地的概率分别增加了 40%、10%、20%、10%、50%。

(3) 生态保护情景：在 2010—2020 年转移概率的基础上，通过修改 2010—2020 年的马尔科夫转换概率矩阵，使林地、草地和水域向建设用地转化的概率减少 60%，耕地相比林地生态能力较弱，设定耕地向建设用地转化的概率减少 50%，将减少的部分增加到耕地向林地转化的概率之中。

#### 2.1.2 精度验证

为检验 PLUS 模型模拟的精度，基于 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。

Kappa 系数是一种验证精度的常用方法，其计算公式如下：

表1 数据类型及来源

| 数据类型   | 数据       | 年份             | 数据来源          |
|--------|----------|----------------|---------------|
| 土地利用数据 | 土地利用数据   | 2000、2010、2020 | 资源环境科学与数据中心   |
| 社会经济因子 | 人口密度     | 2020           | 资源环境科学与数据中心   |
|        | GDP      |                |               |
| 距离因子   | 距高速公路距离  | 2020           | Openstreetmap |
|        | 距主干道距离   |                |               |
|        | 距次干道距离   |                |               |
|        | 距河流距离    |                |               |
|        | 距铁路距离    |                |               |
|        | 距农村居民点距离 |                |               |
|        | 距县政府距离   |                | 国家基础地理信息中心    |
| 自然因子   | 土壤类型     | 1995           | 资源环境科学与数据中心   |
|        | DEM      | 2020           | 地理空间数据云       |
|        | 坡度       |                | 由DEM生成        |
|        | 年均温      |                | 国家地球系统科学数据中心  |
|        | 年降水      |                |               |

$$Kappa = \frac{P_a - P_b}{1 - P_b}$$

式中,  $P_a$  代表模拟正确的栅格比重;  $P_b$  代表预设模拟正确的栅格比重。1 表示模拟理想情况下正确栅格的比重。Kappa 系数赋值区间为 0 到 1, 数值越大代表模拟的准确性越大。模拟 2020 年的土地情况, 再用 Kappa 系数将模拟结果与 2020 年实际情况进行对比, 设置采样率 5%, 通过对混淆矩阵分析, 依据公式得出 Kappa 系数的值是 0.92, 整体精度为 0.96, 可见  $Kappa > 0.8$ , 表明此次模拟效果良好且精度高。

### 2.1.3 杭州市土地利用模拟结果 (见表 2)

基于 PLUS 模拟的三种情景总面积均为 16870.75km<sup>2</sup> (守恒), 验证了 PLUS 模型“无新增/灭失土地”的模拟假设。结合杭州行政区划矢量数据, 将杭州市划分为主城区 (上城区、西湖区、拱墅区、滨江区)、近郊扩展区和远郊生态区。通过 GIS 软件分析分析得到: (1) 经济建设情景建设用地近郊扩张最显著, 高于主城区和远郊变化率。(2) 生态保护情景林地增长明显, 主要集中在西湖区、近郊和远郊地区。(3) 主城区耕地变化降幅高但绝对量小, 近郊降幅低但绝对量大, 远郊基本稳定, 无大规模开发挤占。

## 2.2 基于 InVEST 模型的碳储量变化效应分析

InVEST 模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 碳储量模块将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库: 地上生物碳 (土壤以上所有存活的植物中的碳)、地下生物碳 (存在于植物活根系统中的碳)、

土壤碳 (分布在有机土壤和矿质土壤中的有机碳)、死亡有机碳 (凋落物、倒立或站立的已死亡树木中的碳)。其计算公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$

式中,  $C_{total}$  为流域总碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ ),  $C_{above}$  为地上部分碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ );  $C_{below}$  为地下部分碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ );  $C_{soil}$  为土壤碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ );  $C_{dead}$  为死亡有机碳储量 ( $t \cdot hm^{-2}$ )。

InVEST 模型碳储存模块的基本假设是: 将某一地类的碳密度视为常量, 用不同地类的碳密度乘以对应的面积来计算各地类的碳储量。不同土地利用类型的碳密度值见表 3。

### 2.2.1 历史地类转移碳储量效应研究

为精确量化杭州市 2000-2020 年土地利用变化对碳储量的影响, 识别碳汇功能变化的关键区域与主导过程, 并为后续 PLUS 模型多情景预测的储量碳效应评估提供基准与验证, 本研究采用 InVEST 模型的“碳储量与固碳”模块, 对三期历史年份的生态系统碳储量进行了数值测算。

2000-2020 年杭州市土地利用类型转变引起的碳储量变化情况如表格所示, 研究区域内耕地和林地面积的转出对碳储量影响最大, 造成碳损失约  $297 \times 10^4$  吨, 占整体碳损失的 99%, 水域向耕地的转换对碳储量的提升作用最大, 约为  $35.16 \times 10^4$  吨, 但由于转换面积较小, 难以弥补碳储量的减少量。

通过 GIS 软件分析可知, 杭州市 2000-2020 年碳储量变化和土地利用变化高度相关, 主要变化集中在杭州东北

表2 2030年不同情景模拟面积

|      | 自然发展     | 经济建设     | 生态保护     |
|------|----------|----------|----------|
| 耕地   | 2666.56  | 2532.13  | 2765.83  |
| 林地   | 11371.53 | 11355.98 | 11452.78 |
| 草地   | 394.11   | 393.16   | 396.89   |
| 水域   | 877.02   | 873.38   | 884.55   |
| 建设用地 | 1555.62  | 1710.27  | 1364.78  |
| 未利用地 | 5.92     | 5.82     | 5.92     |
| 总计   | 16870.75 | 16870.75 | 16870.75 |

表3 杭州市碳密度数据

| 地类   | 地上碳密度 | 地下碳密度 | 土壤碳密度  | 死亡有机物碳密度 |
|------|-------|-------|--------|----------|
| 耕地   | 20.18 | 13.35 | 89.96  | 2.56     |
| 林地   | 38.76 | 7.8   | 132.36 | 3.62     |
| 草地   | 18.58 | 22.21 | 118.05 | 3.09     |
| 水域   | 0     | 0     | 85.33  | 0        |
| 建设用地 | 17.3  | 3.42  | 76.8   | 0        |
| 未利用地 | 25.95 | 5.23  | 78.49  | 2.34     |

表4 2000-2020年杭州市碳储量变化

| 地类转换 |      | 转换面积 (公顷) |          | 碳储量变化(104t) | 合计碳储量变化(104t) |
|------|------|-----------|----------|-------------|---------------|
| 转出   | 转入   | 转出        | 转入       |             |               |
| 耕地   | 林地   | 73518.03  | 7686.36  | 43.42       | -148.09       |
|      | 草地   |           | 292.95   | 1.05        |               |
|      | 水域   |           | 4585.14  | -18.67      |               |
|      | 建设用地 |           | 60949.89 | -173.89     |               |
|      | 未利用地 |           | 3.69     | -0.01       |               |
| 林地   | 耕地   | 22790.16  | 8895.15  | -50.25      | -149.30       |
|      | 草地   |           | 3180.78  | -6.56       |               |
|      | 水域   |           | 1320.84  | -12.84      |               |
|      | 建设用地 |           | 9250.65  | -78.65      |               |
|      | 未利用地 |           | 142.74   | -1.01       |               |
| 草地   | 耕地   | 3239.64   | 363.51   | -1.30       | -3.63         |
|      | 林地   |           | 1911.42  | 3.94        |               |
|      | 水域   |           | 207      | -1.59       |               |
|      | 建设用地 |           | 616.68   | -3.97       |               |
|      | 未利用地 |           | 141.03   | -0.70       |               |
| 水域   | 耕地   | 12576.06  | 8634.33  | 35.16       | 51.20         |
|      | 林地   |           | 1098.27  | 10.68       |               |
|      | 草地   |           | 295.2    | 2.26        |               |
|      | 建设用地 |           | 2547.99  | 3.11        |               |
|      | 未利用地 |           | 0.27     | 0.00        |               |
| 建设用地 | 耕地   | 2177.37   | 1557.63  | 4.44        | 8.14          |
|      | 林地   |           | 336.15   | 2.86        |               |
|      | 草地   |           | 153.72   | 0.99        |               |
|      | 水域   |           | 128.34   | -0.16       |               |
|      | 未利用地 |           | 1.53     | 0.00        |               |
| 未利用地 | 耕地   | 39.24     | 0.9      | 0.00        | 0.11          |
|      | 林地   |           | 19.35    | 0.14        |               |
|      | 草地   |           | 0.72     | 0.00        |               |
|      | 水域   |           | 0        | 0.00        |               |
|      | 建设用地 |           | 18.27    | -0.03       |               |

部地区。分析可知，土地利用转移的碳储量效应，本质是强 / 弱碳汇用地与碳源用地之间的结构转换：①林地等强碳汇用地被占用，会造成碳汇能力大幅下降，碳储量显著减少；② 耕地、草地等中等碳汇用地转为建设用地，会使区域整体碳汇由中变弱，产生明显碳流失；③ 未利用地等弱碳汇用地转为生态用地，可小幅提升碳汇；④ 建设用地扩张是区域碳汇弱化、碳源增强的最主要原因，见表 4。

2.2.2 未来碳储量空间效应模拟

未来三种情景下杭州市碳储量均呈现下降趋势，但下降幅度呈现经济建设情景>自然发展情景>生态保护情景的显著差异，空间上均集中于东北部近郊与西湖区南部，这一变化规律并非单纯的碳储量数值波动，而是不同土地利用情景下，强 / 中等 / 弱碳汇用地与碳源用地之间转换

强度不同，所引发的碳汇能力分异与碳储量效应差异化的直接结果。

此外，三种情景空间变化高度一致（集中于东北部近郊与西湖区南部），是因为这些区域是杭州城市扩张、产业升级、战略转型的集中承载区，如钱塘新区的设立、萧山科技城、临平新城等的建设；而主城区因开发饱和、远郊因生态保护，碳储量基本稳定。

3 结语

(1) 2000-2020 年间，杭州市土地利用变化以耕地向建设用地转换为主导，转换方式又无序分散转向精准集中。前期以“开发优先”为驱动，是快速城市化粗放扩张期，土地利用变化最剧烈；后期生态保护政策发挥作用，进入城市发展转型调控期，扩张放缓、生态趋稳。

(2) 2000-2020 年期间, 杭州市碳储量总体呈减少趋势, 共损失约  $242 \times 10^4$  吨。耕地和林地面积的转出对碳储量影响最大, 造成碳损失  $297 \times 10^4$  吨, 水域向耕地的转换对碳储量的提升作用最大, 约为  $35 \times 10^4$  吨。

(3) 2030 杭州市碳储量变化主要集中在东北部近郊地区和西湖区南部, 主城区变化量小, 远郊几乎不变。变化原因主要是政策驱动、产业转型、人口流动和生态保护与文旅融合发展等多因素。

(4) 自然发展情景可作为“底线参考”, 警示无干预下的不可逆变化, 对比自然发展情景下, 经济建设造成碳损失约  $51 \times 10^4$  吨, 生态保护情景对比自然发展约提升碳储量  $98 \times 10^4$  吨。强化生态保护建议通过“存量挖潜”, 如通过对低效的建设用地重新整治, 达到平衡发展与保护的效果。

#### 参考文献:

[1] 田多松, 傅碧天, 吕永鹏等. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J]. 长

江流域资源与环境, 2016, 25(4): 613-620.

[2] 张余, 姜博, 赵映慧等. 东北三省土地利用碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(4): 150-156.

[3] 程程. 基于 SWAT 模型的土地利用和土地覆被变化及气候变化对元江流域径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 52-59.

[4] 郑永超, 文琦. 宁夏回族自治区土地利用变化及碳排放效应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 207-212.

[5] 刘军, 问鼎, 童昀等. 基于碳排放核算的中国区域旅游业生态效率测度及比较研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1979-1992.

[6] 龙花楼. 土地利用转型: 土地利用/覆被变化综合研究的新途径[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 87-90.

作者简介: 白玉岩(1998.12-), 女, 汉族, 河北邯郸人, 硕士在读, 研究方向: 农业信息化。