

四川省土地系统及碳储量预测数据集（2030）研发

高怡凡¹, 宋长青², 黄佳芮², 王元慧², 叶思菁², 高培超^{1,2*}

1. 北京师范大学地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心, 北京 100875

摘要: 作者在顾及土地利用强度和生态-经济权衡情景基础上, 应用 CLUMondo 模型预测了四川省 2020 年至 2030 年的土地系统变化, 并估算了四川省 2030 年的碳储量。预测得到的土地系统和碳储量数据构成了《2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集》。该数据集包括: (1) 四川省 2010 年、2020 年土地系统栅格数据, 以及 9 种情景下的 2030 年土地系统预测栅格数据; (2) 9 种情景下预测的 2030 年四川省碳储量; (3) 碳密度。土地系统栅格数据的空间分辨率为 1 km, 数据存储为.tif 格式。陆地生态系统碳储量估算数据以四川省为单元, 数据存储为.xlsx 格式。数据集由 18 数据文件组成, 数据量为 51.4 MB (压缩为 1 个文件, 1.84 MB)。

关键词: 土地系统数据; CLUMondo; 碳储量评估; 四川省

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.01.09>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.09>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.04.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.04.V1>。

1 前言

控制全球气温持续升高已经成为气候议题中的核心目标。2015 年, 在巴黎召开的第 21 届缔约方会议上提出要将本世纪全球气温升幅控制在远低于工业化前水平 2 °C 以内, 并努力将升温限制在 1.5 °C 以内^[1]。2021 年, 在格拉斯哥召开的第二十六次缔约方会议上, 154 个缔约国成员更新或者提交了新的气候主张, 并重申了 1.5 °C 的气候目标^[2]。为了缓解气候变化, 中国提出要在 2060 年实现碳中和^[3], 该目标已经成为我国重要的发展方向与时代要求^[4]。气温升高的主要原因是人类活动向大气中排放的二氧化碳持续增多。常见的导致碳排放增加的人类活动有化石燃料燃烧和土地利用变化。其中, 自工业革命以来, 土地利用的碳排放占到了人类活动引起的碳排放的三分之一, 是影响气温升高的因素之一^[5]。

四川省是中国碳中和过程中的关键区域。四川省拥有丰富的林地资源, 森林面积约占

收稿日期: 2024-12-11; 修订日期: 2025-02-13; 出版日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(42230106, 42271418)

*通讯作者: 高培超, 北京师范大学地理科学学部, gaopc@bnu.edu.cn

数据引用方式: [1] 高怡凡, 宋长青, 黄佳芮等. 四川省土地系统及碳储量预测数据集(2030)研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(1): 71–86. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.01.09>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.09>.

[2] 高怡凡, 宋长青, 黄佳芮等. 2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.04.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.04.V1>.

全省面积的 40%，是我国主要的林区之一^[6]。需要注意的是，林地是所有陆地生态系统中最大的“碳汇”（从空气中清除二氧化碳的过程）^[7]。同时，四川省未来的土地需求存在明显的生态-经济权衡。例如，《四川省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中指出，到 2035 年，四川省需要实现“经济实力大幅提升”。但是从土地类型的角度来说，任何土地类型都难以同时实现较高的生态效益和经济效益。

基于上述背景，为了从土地管理的角度为四川省平衡经济效益和生态效益提供数据支持，需要一套面向未来的土地数据并估算未来的碳储量。本研究使用 CLUMondo 模型，在顾及生态-经济权衡和土地利用强度的基础上，预测得到了四川省 2030 年的土地系统数据，并估算其碳储量。

2 数据集元数据简介

《2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集》^[8]的名称、作者、地理区域、数据年代、空间分辨率、数据格式、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集
数据集短名	LandSystem&CarbonStorage
作者信息	高怡凡, 北京师范大学地表过程与水土风沙灾害险防控全国重点实验室, gaoyifan@mail.bnu.edu.cn 宋长青, 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心, songcq@bnu.edu.cn 黄佳芮, 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心, 202311998223@mail.bnu.edu.cn 王元慧, 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心, yuanhuiwang@bnu.edu.cn 叶思菁, 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心, yesj@bnu.edu.cn 高培超, 北京师范大学地理学部地理数据与应用分析中心/北京师范大学地表过程与水土风沙灾害险防控全国重点实验室, gaopc@bnu.edu.cn
地理区域	四川省
数据年代	2010 年、2020 年、2030 年
空间分辨率	土地系统数据为 1 km, 碳储量预测数据为省级尺度
数据格式	.tif、.xlsx
数据量	51.4 MB
数据集组成	土地系统数据, 碳储量预测数据, 碳密度数据
基金项目	国家自然科学基金(42230106、42271418); 北京师范大学(2022-ZD-04、2023-WT-02)
数据计算环境	CLUMondo, Matlab
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可;(4)摘取

续表 1

条 目	描 述
数据共享政策	“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中抽取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对抽取的数据记录标注数据来源 ^[9]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

3 数据研发方法

3.1 基础数据

本研究采用的基础数据包括土地覆盖数据、驱动因子数据、计算供给能力所需数据和碳密度空间分布数据。土地覆盖数据用于生成土地系统数据。驱动因子数据是土地变化模拟所必须的输入数据，用于计算位置适宜性（每种土地类型在社会、自然、经济因素驱动下成为某种土地类型的可能性）。供给能力是使用 CLUMondo 模型进行土地变化模拟的必要参数，表示了每种土地类型提供不同土地系统服务的能力。碳密度数据用于计算每种土地系统类型的碳密度系数。详细的数据信息及来源情况见表 2。

表 2 基础数据信息及来源统计表

类型	子类型	名称	年份	分辨率	来源
土地覆盖数据		Globeland30 ^[10,11]	2010、2020	30 m	国家基础地理信息中心 http://www.globeland30.org/
驱动因子数据	土壤	堆积密度 (kg/m ³) 阳离子交换能力 (cmolc/kg) 黏土含量 (%) 粗碎石体积含量 (%) 有效土壤水容量 (%) 有机碳密度 (kg/m ³ ×10) 水中 pH 值 砂含量 (%) 淤泥含量 (%) 质地含量 (%)	2017	250 m	ISRIC-World Soil Information https://data.isric.org/geonet-work/srv/chi/catalog.search
	社会经济	市场可达性指数 市场影响力指数 (\$/person) 市场密度指数	2011	5 arc-min	Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM) http://environmentalgeography.nl/files/data/public/marketinfluence
	社会经济	夜间灯光指数 GDP (\$)	2010 2015	30 arc-sec	NOAA https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html Dryad https://datadryad.org/stash/data-set/doi:10.5061/dryad.dk1j0
		人口密度 (%)	2010		EARTHDATA https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11/data-download

续表 2

类型	名称	年份	分辨率	来源
可达性	到达最近城市的距离 (m)	2015	30 arc-sec	Malaria Atlas Project https://malariaatlas.org/research-project/accessibility-to-cities/
	到达最近河流的距离 (m)	N/A	1 km	Nature Earth http://www.natureearthdata.com
	到达最近道路的距离 (m)			
	到达最近铁路的距离 (m)			
	机动车旅行时间 (minutes)	2019	30 arc-sec	Malaria Atlas Project https://malariaatlas.org/explorer/#/
	步行旅行时间 (minutes)			
	到达最近医疗设施的机动车行驶时间 (minutes)			
农业和植被	到达最近医疗设施的步行时间 (minutes)			
	175 种主要作物每公顷产量 (t/hm ²)	2000	5 arc-min	EarthStat http://www.earthstat.org/harvested-area-yield-175-crops/
	总初级生产力 (3 月) (gC/(m ² ·d))	2010	0.05 degree	国家青藏高原科学数据中心 https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/d6dff40f-5dbd-4f2d-ac96-55827ab93cc5/?q=GPP
	总初级生产力 (6 月) (gC/(m ² ·d))			
	总初级生产力 (9 月) (gC/(m ² ·d))			
	总初级生产力 (12 月) (gC/(m ² ·d))			
	归一化植被指数 (3 月)	2010	1 km	The Copernicus Land Monitoring Service https://land.copernicus.eu/global/
	归一化植被指数 (6 月)			
地形	归一化植被指数 (9 月)			
	归一化植被指数 (12 月)			
	高程 (m)	N/A	30 arc-sec	WorldClim https://worldclim.org/data/worldclim21.html
	高程的方差 (m ²)		990 m	由高程计算
	坡度 (°)		1 km	
	坡向			
气候	年均降水 (mm)	2007–2018 平均	30 arc-sec	Zenodo https://zenodo.org/record/3256275#.YGQzHWgzaUk DOI:10.5281/zenodo.3256275
	平均降水 (3 月) (mm)			
	平均降水 (6 月) (mm)			
	平均降水 (9 月) (mm)			
	平均降水 (12 月) (mm)			
	年均气温 (°C)	2000–2017 平均		Zenodo https://zenodo.org/record/1435938#.YGQyyWgzaUk DOI:10.5281/zenodo.1435938
	平均气温 (3 月) (°C)			
	平均气温 (6 月) (°C)			
	平均气温 (9 月) (°C)			
	平均气温 (12 月) (°C)			

续表 2

类型	名称	年份	分辨率	来源
牲畜	水牛数量（头）	2010	5 arc-min	Harvard Dataverse https://dataverse.harvard.edu/
	牛数量（头）			
	鸡数量（只）			
	鸭数量（只）			
	山羊数量（头）			
	马数量（匹）			
	猪数量（头）			
	绵羊数量（只）			
	土地覆被密度	耕地密度（%）	2010	990 m
林地密度（%）				
草地密度（%）				
灌木密度（%）				
湿地密度（%）				
水体密度（%）				
人造地表密度（%）				
裸地密度（%）				
冰川和永久积雪密度（%）				
计算供给能力所需数据		GDP（栅格）（万元/km ² ）	2020	1 km
	GDP 总量（亿元）		N/A	中国统计年鉴 2020 ^[12]
	生态系统价值栅格（万元/km ² ）		1 km	资源环境科学数据平台 https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=48
碳密度数据	土壤碳密度空间分布 ^[13] （MgC/hm ² ）	N/A	250 m	ISRIC - World Soil Information SoilGrids250m 2.0
	地上生物碳密度空间分布 ^[14] （MgC/hm ² ）	2010	1 km	ORNL DAAC https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsview.er.pl?ds_id=1763
	地下生物碳密度空间分布 ^[14] （MgC/hm ² ）	2010	1 km	

3.2 算法原理

3.2.1 顾及土地利用强度的土地系统建模

土地系统数据是借助能够反映地表自然状态、社会经济现象或土地覆被/利用类型密度的数据，对土地覆被/利用类型进行再分类而生成的一种土地数据。土地系统数据最早由 P. H. Verburg 提出并使用^[15]，目前这类数据已经广泛应用于土地变化模拟中^[16,17]。相比于土地覆被/利用数据，土地系统数据在反映类型的同时还能反映土地覆盖/利用的密度或其他社会、自然、经济因素。

本研究使用了 Globeland30 数据^[10,11]，通过升尺度的方式^[16,18]构建了 1-km 分辨率的土地系统，制作完成的土地系统可以反映 1-km 范围内占优类型的密度。土地系统的制作思路如图 1 所示。具体而言，土地系统的制作分为 3 步。首先，确定滑动窗口的大小，使用滑

动窗口不重叠且不遗漏的滑动土地覆盖数据。接着,对于每一个滑动窗口,确定滑动窗口内面积最大的土地覆盖类型。该类型确定了升尺度后像元的系统类型。例如,若滑动窗口内面积最大的土地覆盖类型为耕地,那么升尺度后像元的系统类型为“耕地系统”。第三,依据预先计算好的自然间断点,确定升尺度后像元的密度类型。自然间断点的计算结果是划分密度类型的阈值。计算的方法是采用 33×33 像元的滑动窗口遍历全球的GlobeLand30数据。统计每个滑动窗口内的占优的土地覆盖类型,并计算占优比例,再将每种土地类型的占优比例构成的数组计算自然间断点,从而得到每种土地覆盖类型的阈值。

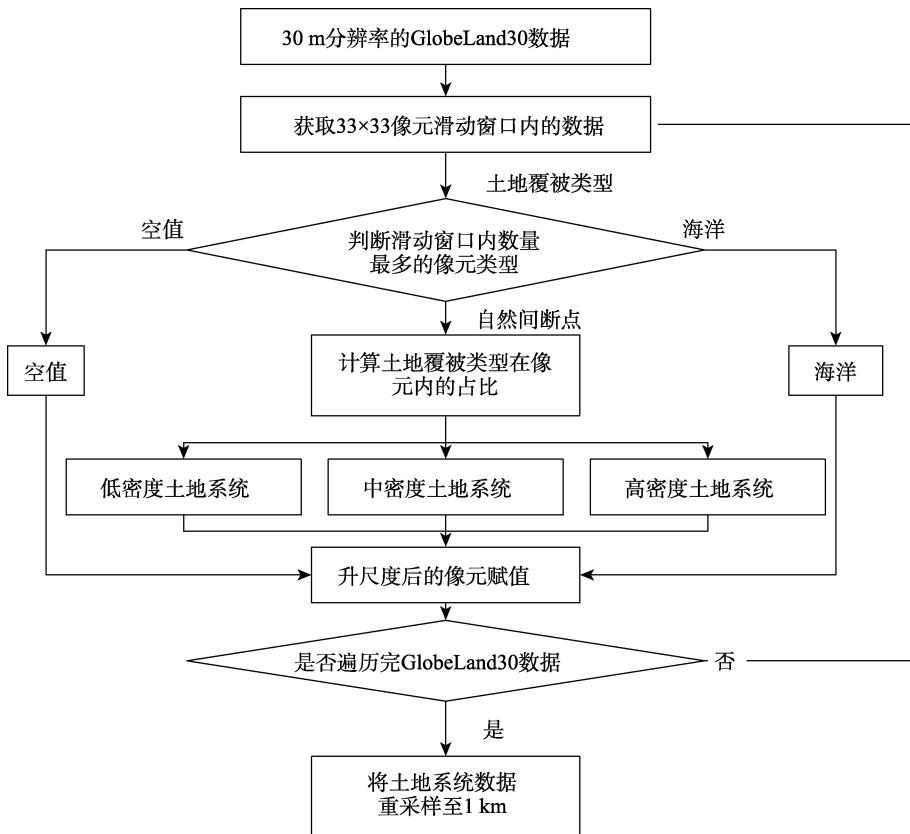


图1 土地系统研发流程图

3.2.2 考虑生态-经济权衡的土地系统服务与情景设计

情景设计包括设置模拟土地系统服务并确定土地系统服务在2030年的数值。本研究共设置了两种土地系统服务:地区生产总值(Gross Domestic Product, GDP)和生态系统价值(Gross Ecosystem Product, GEP)。地区生产总值表示经济效益,生态系统价值表示生态效益。其中,2020年的GDP总量由统计年鉴获得;2020年的GEP通过计算四川省范围内的GEP栅格数据的总量获得。GEP栅格数据分为四个大类:供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[19]。本研究中为了更强调生态功能,GEP的计算仅考虑调节服务、支持服务和文化服务。本研究共设计了9种情景,由3个不同的等级的GDP年增速和3个不同等

级的 GEP 年增速组合而成。GDP 年增速分别设置为 3.00%、4.00%、5.00%，GEP 年增速分别设置为 0.05%、0.50%、1.00%。各情景下四川省 2030 年的 GDP 和 GEP 总量见表 3。

表 3 各情景下四川省 2030 年的 GDP 和 GEP 总量统计表

情景	GDP 年增速 (%)	经济生产总值 (万元)	GEP 年增速 (%)	生态系统价值 (万元)
S1	3.00	600,642,920.2	0.05	335,241,496.7
S2	3.00	600,642,920.2	0.50	350,628,697.8
S3	3.00	600,642,920.2	1.00	368,468,680.4
S4	4.00	661,572,597.5	0.05	335,241,496.7
S5	4.00	661,572,597.5	0.50	350,628,697.8
S6	4.00	661,572,597.5	1.00	368,468,680.4
S7	5.00	728,009,599.6	0.05	335,241,496.7
S8	5.00	728,009,599.6	0.50	350,628,697.8
S9	5.00	728,009,599.6	1.00	368,468,680.4

3.2.3 基于 CLUMondo 模型的土地系统变化模拟

CLUMondo 模型的原始版本由 van Asselen 和 P. H. Verburg 于 2012 年开发^[15]。CLUMondo 模型自提出以来，被使用或提及的次数不断增加，并广泛应用于全球或区域的土地变化模拟中^[20-23]。CLUMondo 模型模拟的原理是通过土地类型转换规则多次迭代改变土地类型，以响应所有土地系统服务的变化^[18,24]，其核心特征是建立土地类型和需求之间的多对多关系^[24]。具体而言，CLUMondo 中的每种土地类型提供多种需求，而每种需求可以由多种土地类型满足。CLUMondo 模型的基本原理如图 2 所示。

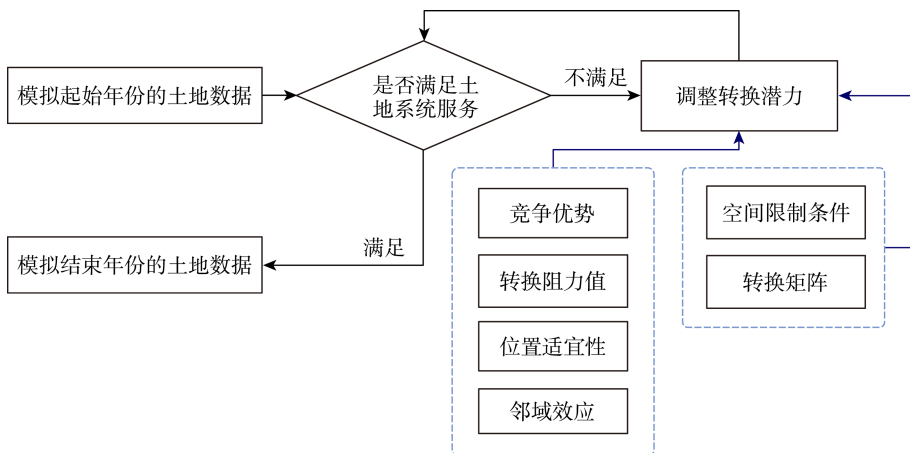


图 2 CLUMondo 模型的基本原理结构图

通过 CLUMondo 模拟土地系统变化还需要计算位置适宜性、供给能力、转换顺序、转换阻力值和转换矩阵。其中，位置适宜性反映了某种土地类型受到各种自然、社会、经济驱动因子的影响下成为某种土地类型的可能性。转换阻力值反映了某种土地类型转换为其他土地类型的难易程度。转换矩阵限制了一些土地类型之间不允许发生转换。具体的计算

方法如下。

(1) 位置适宜性

本研究在计算位置适宜性之前，对驱动因子进行了归一化处理并去除了驱动因子之间的相关性。判断驱动因子之间的相关性采用的是斯皮尔曼相关系数，选择斯皮尔曼相关系数的原因是该系数不要求变量呈现正态分布。在本次实验中，依据相关性剔除驱动因子的规则为：对全部的驱动因子计算两两之间的斯皮尔曼相关系数，找出相关系数大于 0.8 的两个驱动因子，分别计算这两个驱动因子与其他所有驱动因子之间的相关系数之和，剔除其中相关系数之和较大的驱动因子。

在 CLUMondo 模型中，位置适宜性的计算通过 Logistic 回归来完成，具体的计算见式 1。本研究使用 SPSS 对每种土地系统的位置适应性进行 Logistic 回归。回归时选取的样本比例为 100%。选择的回归方法为“向前：有条件”。

$$\ln\left(\frac{P_loc_{c,j}}{1-P_loc_{c,j}}\right) = \beta_{0,j} + \beta_{1,j}X_{1,c} + \beta_{2,j}X_{2,c} + \dots + \beta_{m,j}X_{m,c} \quad (1)$$

式中， $X_{1,c}, X_{2,c}, \dots, X_{m,c}$ 是像元 c 位置的驱动因子的数值， $\beta_{1,j}, \beta_{2,j}, \dots, \beta_{m,j}$ 是驱动因子的系数， $\beta_{0,j}$ 是常数项。 $P_loc_{c,j}$ 为像元 c 成为土地类型 j 的位置适宜性，其数值范围在 $[0,1]$ 之间，数值越高表明具有更高的适宜性。

(2) 供给能力

供给能力表达了每种土地类型能够提供的需求的数量。本研究中的需求为 GDP 和 GEP。供给能力的计算方法为将 2020 年的土地系统数据分别与 2020 年的 GDP 栅格数据和 GEP 栅格数据进行叠加。叠加分析计算得到每种土地类型单位像元的平均 GDP 和 GEP，作为供给能力。对于 GDP，由于栅格数据统计得到的四川省总量与统计年鉴存在差异，本研究通过乘以系数的方式校准了栅格数据的 GDP 总量。系数的计算方法见式 2。本研究计算得到的四川省每种土地系统服务的供给能力见表 4。

$$\omega = GDP_r / GDP_y \quad (2)$$

式中， ω 为系数， GDP_r 为四川省通过 GDP 栅格数据统计得到的 GDP 总量， GDP_y 为统计年鉴中四川省 GDP 总量。

(3) 转换顺序

转换顺序表达了每种土地类型在满足某种需求时的能力。转换顺序值用“-1”与非负整数来表示。其中，“-1”表示土地系统无法提供该种土地系统服务。非负整数表达了能够提供该种服务的土地系统的供给能力强弱，该值越大，表示提供土地系统服务的能力越强。在本文中，转换顺序的赋值依据为土地系统的供给能力^[18]。具体而言，对土地系统的供给能力值进行排序，对于无法提供该服务的土地系统转换顺序值设为“-1”，其余土地系统的转换顺序依据供给能力大小从“0”开始赋值。若两种土地系统的供给能力相同，则转换顺序值也相同。此外，为了使得模拟结果更加合理，本研究将低、中、高密度水体对于 GEP 的转换顺序设置为 0，减少其他类型向水体的大面积转换。本研究设置的转换顺序见表 4。

表 4 供给能力和转换顺序统计表

土地类型	平均 GDP (万元/像元)	转换顺序	平均 GEP (万元/像元)	转换顺序
低密度耕地	1,504.659	19	657.359	15
中密度耕地	1,994.615	22	464.612	10
高密度耕地	2,779.222	23	301.898	7
低密度林地	541.916	17	804.412	18
中密度林地	383.603	15	945.425	21
高密度林地	272.148	11	1,062.804	22
低密度草地	370.031	12	627.427	14
中密度草地	105.327	9	527.786	12
高密度草地	30.327	4	426.093	9
低密度灌木	379.804	14	606.815	13
中密度灌木	161.127	10	489.881	11
高密度灌木	514.605	16	738.328	17
低密度湿地	378.390	13	921.447	20
中密度湿地	60.424	8	892.840	19
高密度湿地	18.622	0	1,204.451	23
低密度水体	1,910.401	21	2545.100	0
中密度水体	1,771.468	20	3,528.336	0
高密度水体	1,058.833	18	5,112.363	0
低密度人造地表	7,271.027	24	672.572	16
中密度人造地表	11,811.820	25	376.183	8
高密度人造地表	42,754.030	26	149.705	0
低密度裸地	23.295	3	246.358	6
中密度裸地	19.503	1	205.191	2
高密度裸地	22.014	2	200.158	1
低密度冰川和永久积雪	38.580	5	231.343	5
中密度冰川和永久积雪	39.055	6	209.031	3
高密度冰川和永久积雪	39.790	7	215.367	4

(4) 转换阻力值

本研究的转换阻力值计算依据历史土地系统变化情况确定。如果某种土地类型在某一历史时期内越容易转变为其他土地类型，转换阻力值越小；反之，则转换阻力值越大。依据转换阻力值的含义，该研究计算转换阻力值的具体方法见式 3。转换阻力值的计算结果见表 5。

$$P_res_j = N_j^{h1,h2} / N_j^{h1} \quad (3)$$

式中， P_res_j 表示土地类型 j 的转换阻力值。 $h1$ 和 $h2$ 表示两个历史年份，且 $h1 < h2$ 。

$N_j^{h1,h2}$ 表示在 $h1$ 和 $h2$ 年份土地类型不变且都为类型 j 的像元个数， N_j^{h1} 表示 $h1$ 年份土地类型为 j 的像元个数。

表5 转换阻力值统计计算结果统计表

土地类型	转换阻力值	土地类型	转换阻力值
低密度耕地	0.876,9	高密度湿地	0.973,6
中密度耕地	0.871,5	低密度水体	0.771,3
高密度耕地	0.895,7	中密度水体	0.880,0
低密度林地	0.893,5	高密度水体	0.897,1
中密度林地	0.906,5	低密度人造地表	0.367,0
高密度林地	0.964,5	中密度人造地表	0.433,5
低密度草地	0.866,2	高密度人造地表	0.951,2
中密度草地	0.873,2	低密度裸地	0.627,7
高密度草地	0.944,8	中密度裸地	0.721,1
低密度灌木	0.873,1	高密度裸地	0.784,4
中密度灌木	0.911,3	低密度冰川和永久积雪	0.128,4
高密度灌木	0.901,1	中密度冰川和永久积雪	0.152,4
低密度湿地	0.832,6	高密度冰川和永久积雪	0.546,2
中密度湿地	0.895,2		

(5) 转换矩阵

转换限制条件同样参考历史土地系统变化情况确定。如果土地类型 i 在历史变化中曾转换为土地类型 j ，则允许土地类型 i 转换为土地类型 j 。

3.2.4 基于土地系统类型碳密度的碳储量估算

基于土地系统类型碳密度的碳储量估算方法的基本原理是将各类土地系统类型的面积乘以对应的碳密度系数，然后求其总和。该方法的关键在于计算每种土地系统类型的碳密度系数^[25]。计算碳储量 (C) 时，我们考虑 4 个碳库：地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤碳储量和死亡有机质碳储量^[26]。由于死亡有机质碳储量数据难以获得，本研究碳储量的计算参考已有文献的做法，忽略死亡有机质碳储量。本研究中碳储量的计算如式 4 所示。每种土地系统类型碳密度系数通过将土地系统数据和碳密度空间分布数据叠加来计算。每种土地系统类型的碳密度系数是每种土地系统类型对应碳密度的平均值，具体的计算方法见式 5 至式 7，碳密度系数的计算结果见《2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集》^[8]。

$$C = \sum_k A_k \times (D_{\text{above}}^k + D_{\text{below}}^k + D_{\text{soil}}^k) \quad (4)$$

$$D_{\text{above}}^k = \frac{\sum n_{k,i}^a \times B_{k,i}}{A_k} \quad (5)$$

$$D_{\text{below}}^k = \frac{\sum n_{k,i}^b \times B_{k,i}}{A_k} \quad (6)$$

$$D_{\text{soil}}^k = \frac{\sum n_{k,i}^s \times B_{k,i}}{A_k} \quad (7)$$

式中， A_k 表示第 k 种土地系统类型的面积 (hm^2)， D_{above}^k 表示第 k 种土地系统类型的地上生物碳密度 (MgC/hm^2)， D_{below}^k 表示第 k 种土地系统类型的地下生物碳密度 (MgC/hm^2)， D_{soil}^k

表示第 k 种土地系统类型的土壤碳密度 (MgC/hm^2)。 $n_{k,i}^a$, $n_{k,i}^b$, $n_{k,i}^s$ 是第 k 种土地系统类型的第 i 个像元的地上生物碳密度、地下生物碳密度和土壤碳密度； $B_{k,i}$ 是第 k 种土地系统类型的第 i 个像元的面积。

3.3 技术路线

本研究的技术路线如图 3 所示。技术路线包含 5 部分：其一，制作四川省 2010 年和 2020 年的土地系统数据；其二，参数计算，需要计算的参数包括转换阻力值、转换矩阵、位置适宜性、供给能力和转换顺序；其三，情景设置，本研究选择 GDP 反映经济效益、GEP 反映生态效益，通过设置不同的年增长率得到了 2030 年四川省的 GDP 和 GEP；其四，预测四川省 2020 年至 2030 年的土地系统变化；其五，计算土地系统类型的碳密度系数并预测 2030 年的碳储量。

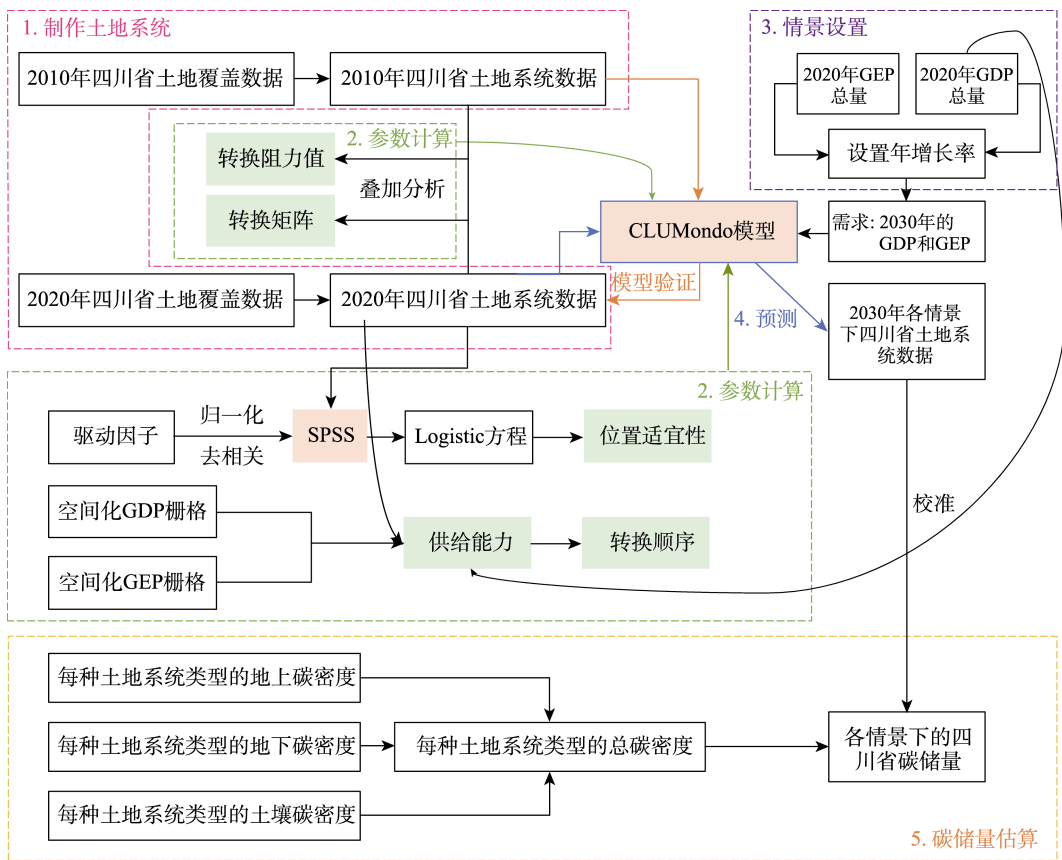


图 3 2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集的内容包括两部分，分别是土地系统数据和碳储量数据。土地系统数据的时间

包括 2010 年、2020 年和 2030 年，数据格式为.tif，其空间分辨率为 1 km。碳储量数据集的时间包括 2020 年和 2030 年，存储为.xlsx 格式。数据集组成见表 6。

表 6 数据集组成表

数据集	条目	描述
土地系统数据	时间	2010、2020、2030
	空间分辨率	1 km
	数据格式	.tif
	数据命名方式	Sichuan_年份(_情景).tif
碳储量数据	时间	2020、2030
	数据格式	.xlsx
	数据命名方式	CarbonStorage&Density.xlsx

4.2 数据结果

4.2.1 土地系统预测结果

本研究制作了四川省 2010 年和 2020 年的土地系统图，并通过 CLUMondo 模型预测了四川省 2020 年至 2030 年的土地系统变化。2010 年和 2020 年的土地系统图如图 4 所示。2030 年各情景的土地系统图如图 5 所示。从图 5 中可以看出，随着 GDP 的增长，四川省东南部存在不同程度的耕地密度提升和侵占耕地导致的城市扩张。GDP 的年增速越高，对于以成都为中心的城市群的扩张需求就更大。随着 GEP 的增长，要求四川省西北部的林地和草地进一步提升种植密度并扩张，并促进四川省北部的湿地保护和修复。

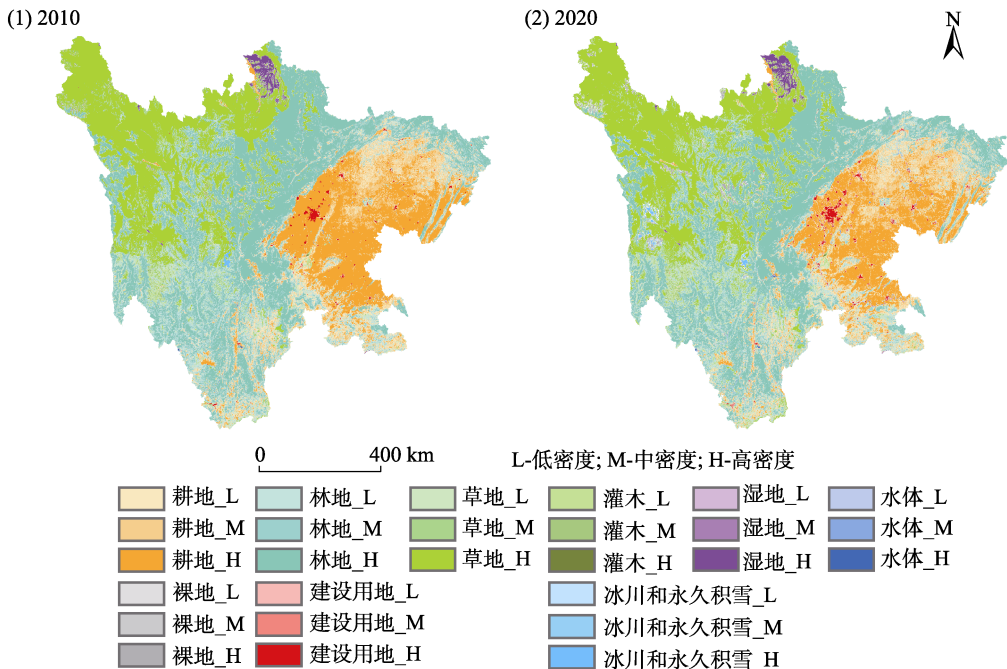


图 4 四川省土地系统类型分布图 (2010、2020)

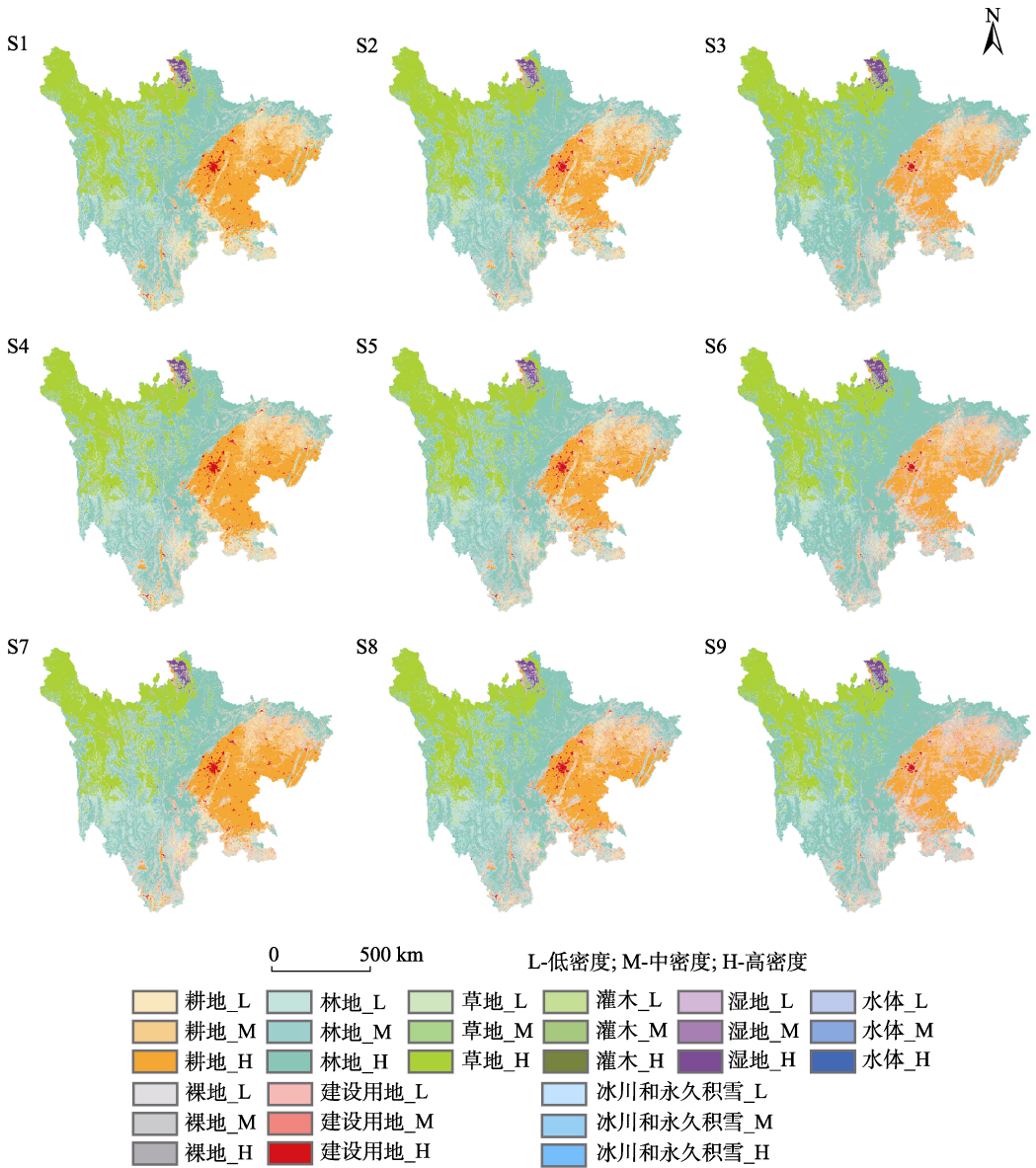


图 5 不同情景下的四川省土地系统类型分布图（2030）

4.2.2 碳储量预测结果

四川省各情景下的碳储量预测结果见《2030 年四川省土地系统及碳储量预测数据集》^[8]。从结果中可以看出, S3 情景下 2030 年的碳储量增加比例在各情景中是最高的。相比于 2020 年, S3 情景下的碳储量增长了 2.89%。从碳储量的组成来看, S3 情景碳储量的增长来源于地上生物碳储量和地下生物碳储量, 分别增长 13.67%和 7.37%。从土地类型来看, 碳储量的增长主要是由于高密度林地增加导致的, 增长的林地主要来源于中、高密度的草地和低、中密度的林地。S7 情景下 2030 年的碳储量在各情景中碳储量减少比例最高。相比于 2020 年, S7 情景下 2030 年碳储量减少 3.23%。从碳储量的组分来看, S7 情景下碳储量减少主

要源于地下生物碳储量和土壤碳储量的减少,分别减少 2.29%和 4.83%。

4.3 数据结果验证

本研究数据验证的基本假设是 CLUMondo 模型如果能够良好地刻画历史土地系统变化,则也能可靠地预测未来的土地系统变化。基于该假设,本研究模拟了四川省 2010 年至 2020 年的土地系统变化,并通过定量化的方法比较 2020 年模拟得到的土地系统和 2020 年真实的土地系统。

本研究选择了 Kappa 系数和 Figure of merit (FoM) 来评估土地变化模拟的精度。Kappa 系数和 FoM 可以从不同的角度来评估模型的精度。Kappa 系数评估模拟结果与实际土地系统地图之间的一致性^[27], FoM 计算正确变化的像元占实际正确变化像元总数的比例,以评估变化的准确性^[28]。Kappa 系数的计算方法如式 8 所示, Kappa 系数的数值范围在[-1,1]之间,数值越大表示模拟精度越高。FoM 的计算方法如式 9 所示, FoM 的数值范围在[0,1],数值越大,表示模拟精度越高。

$$\text{Kappa} = \frac{P_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (8)$$

$$\text{FoM} = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{Miss} + \text{False alarm} + \text{Wrong hits}} \quad (9)$$

式中, p_0 是总体精度,表示土地类型模拟正确的像元的占比, p_e 表示随机情况下模拟正确像元数量的百分比。Hits 表示在实际的土地变化模拟过程中发生改变且在模拟过程中正确变化的像元个数; Miss 表示在实际的土地变化模拟过程中发生改变但在模拟过程中没有变化的像元个数; False alarm 表示在实际的土地变化模拟过程中不发生改变但在模拟过程中变化的像元个数; Wrong hits 表示在实际的土地变化模拟过程中发生改变但在模拟过程中变化错误的像元个数。

Kappa 系数和 FoM 的结果均证明了本文的土地变化模拟效果优异(表 7)。从表 7 中来看, Kappa 系数在 27 种土地类型下达 83.4%, 将 27 种土地类型合并为 9 种土地类型后, Kappa 系数达 89.0%。FoM 指标虽然在 27 种土地类型的情况下较低,但是土地类型合并为 9 种后, FoM 数值提高了 109.0%。与类似研究相比,本研究的土地变化模拟精度较好。例如,在文献^[29]中,5 种土地类型的 FoM 达到 7.0%左右;在文献^[30]中, FoM 虽然达到了 50.0%左右,但其土地类型只有 2 种,且 FoM 在计算时没有考虑 Miss,使得 FoM 计算结果偏高。

表 7 数据验证结果表

土地类型数量	Kappa 系数 (%)	FoM (%)
27	83.4	2.1
9	89.0	4.4

5 讨论和总结

本研究在权衡生态效益和经济效益和顾及土地利用强度的基础上,通过 CLUMondo 模型预测了四川省 2020 年至 2030 年的土地系统变化,并基于预测得到的土地系统数据估算

了四川省 2030 年陆地生态系统的碳储量。本文预测得到的土地系统数据相比于类似研究拥有更高的土地系统主题分辨率，更精细地刻画了四川省未来的土地变化。此外，通过叠加分析更加准确地计算了各种土地系统类型的碳密度系数，更加精确地预测了四川省未来的碳储量变化。

本研究生产的数据有两方面意义。其一，本研究预测得到的土地系统数据和碳储量估算数据可以在土地管理方面为四川省实现生态-经济协调发展提供数据支持。其二，本研究生产的数据能为多个科学领域提供基础，存在溢出效应。例如，预测得到的土地系统数据可以为生物多样性评估、洪水风险分析、水循环等其他研究提供基础数据支持。

作者分工：高培超、宋长青对数据集的开发做了总体设计；高怡凡收集和整理了数据，进行了数据验证并撰写了数据论文；王元慧、叶思菁、黄佳芮指导了本文的写作。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Schleussner, C. F., Rogelj, J., Schaeffer, M., *et al.* Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(9): 827–835. DOI: 10.1038/nclimate3096.
- [2] Meinshausen, M., Lewis, J., Mcglade, C., *et al.* Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C [J]. *Nature*, 2022, 604(7905): 304–309. DOI: 10.1038/s41586-022-04553-z.
- [3] 高培超, 宋长青. 评《气候经济与人类未来》[J]. *经济地理*, 2021, 41(10): 41.
- [4] Mallapaty, S. How China could be carbon neutral by mid-century [J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 482–484. DOI: 10.1038/d41586-020-02927-9.
- [5] Brovkin, V., Sitch, S., Von Bloh, W., *et al.* Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(8): 1253–1266. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2004.00812.x.
- [6] 胡峻嵒, 黄访, 铁烈华等. 四川省森林植被固碳经济价值动态[J]. *生态学报*, 2019, 39(1): 158–163. DOI: 10.5846/stxb201809292123.
- [7] 黄从德, 张健, 杨万勤等. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 5115–5121.
- [8] 高怡凡, 宋长青, 黄佳芮等. 2030年四川省土地系统及碳储量预测数据集[J/DB/OL]. *全球变化数据仓储电子杂志*, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.04.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.04.V1>.
- [9] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [10] Chen, J., Ban, Y. F., Li, S. N. China: open access to Earth land-cover map [J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434–434. DOI: 10.1038/514434c.
- [11] Chen, J., Chen, J., Liao, A. P., *et al.* Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7–27. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002.
- [12] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [13] Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., *et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty [J]. *Soil*, 2021, 7(1): 217–240. DOI: 10.5194/soil-7-217-2021.
- [14] Spawn, S. A., Sullivan, C. C., Lark, T. J., *et al.* Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010 [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1–22. DOI: 10.1038/s41597-020-0444-4.

- [15] van Asselen, S., Verburg, P. H. A land system representation for global assessments and land-use modeling [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(10): 3125–3148. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02759.x.
- [16] Gao, P. C., Gao, Y. F., Ou, Y., *et al.* Fulfilling global climate pledges can lead to major increase in forest land on Tibetan Plateau [J]. *iScience*, 2023, 26(4): 106364. DOI: 10.1016/j.isci.2023.106364.
- [17] Jin, X. L., Jiang, P. H., Ma, D. X., *et al.* Land system evolution of Qinghai-Tibetan Plateau under various development strategies [J]. *Applied Geography*, 2019, 104: 1–9. DOI: 10.1016/j.apgeog.2019.01.007.
- [18] Gao, P. C., Gao, Y. F., Zhang, X. D., *et al.* CLUMondo-BNU for simulating land system changes based on many-to-many demand–supply relationships with adaptive conversion orders [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 5559. DOI: 10.1038/s41598-023-31001-3.
- [19] 谢高地, 张彩霞, 张雷明等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243–1254. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001.
- [20] van Asselen, S., Verburg, P. H. Land cover change or land-use intensification: simulating land system change with a global-scale land change model [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(12): 3648–3667. DOI: 10.1111/gcb.12331.
- [21] Domingo, D., Palka, G., Hersperger, A. M. Effect of zoning plans on urban land-use change: a multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102833. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102833.
- [22] Malek, Ž., Verburg, P. H., Geijzendorffer, I. R., *et al.* Global change effects on land management in the Mediterranean region [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 238–254. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2018.04.007.
- [23] Wang, Y., van Vliet, J., Pu, L. J., *et al.* Modeling different urban change trajectories and their trade-offs with food production in Jiangsu Province, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 77: 101355. DOI: 10.1016/j.compenurbsys.2019.101355.
- [24] van Vliet, J., Verburg, P. H. A short presentation of CLUMondo [M]//María Teresa Camacho Olmedo, Paegelow, M., Mas, J. F., *et al.* *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 485–492.
- [25] 高怡凡, 宋长青, 王元慧等. 顾及土地利用强度和生态-经济权衡的四川省陆地生态系统碳储量预测与热点分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 1–12. DOI: 10.20103/j.stxb.202211113250.
- [26] 邵壮, 陈然, 赵晶等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 1–14. DOI: 10.5846/stxb202201100094.
- [27] van Vliet, J., Bregt, A. K., Hagen-Zanker, A. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1367–1375. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017.
- [28] Zhang, T. Y., Cheng, C. X., Wu, X. D. Mapping the spatial heterogeneity of global land use and land cover from 2020 to 2100 at a 1 km resolution [J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 748. DOI: 10.1038/s41597-023-02637-7.
- [29] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧等. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 531–542. DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190359.
- [30] 王鹤, 曾永年. 城市扩展极限学习机模型[J]. *测绘学报*, 2018, 47(12): 1680–1690. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170586.