

# 耦合 GCAM 和 GlobeLand30 的 CLUMondo 模型及其适用性评估\*

高怡凡<sup>1,2)</sup> 王元慧<sup>2)</sup> 谢一茹<sup>2)</sup> 叶思菁<sup>2)</sup> 宋长青<sup>2)</sup> 高培超<sup>2)†</sup>

(1)北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 100875, 北京;

(2)北京师范大学地理科学学部, 地理数据与应用分析中心, 100875, 北京)

**摘要** 本文在 CLUMondo 模型中耦合了全球变化评估模型(global change assessment model, GCAM)和 GlobeLand30 数据. 其中: GCAM 为土地变化预测提供科学的土地系统服务数值; GlobeLand30 用于制备可赋予多重土地系统服务供给能力的土地系统数据. 为验证模型的有效性, 本文选择了 GCAM 中的“青藏高原内部区”进行验证. 结果表明: 1)GCAM 可以有效解决 CLUMondo 模型在土地变化模拟时设置土地系统服务的困境; 2)对 GlobeLand30 数据升尺度建立土地系统, 为 CLUMondo 模型量化多重土地系统服务供给能力提供了一种简单高效的方法; 3)耦合 GCAM 和 GlobeLand30 数据后的 CLUMondo 模型在“GCAM 青藏高原内部区”具有良好的适用性.

**关键词** CLUMondo 模型; 土地变化模拟; GlobeLand30; 土地系统; 青藏高原

中图分类号 TP79

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022265

## 0 引言

土地变化模型是研究土地变化的一种有效工具, 可用于分析不同情景下一定时期内土地变化的原因和结果<sup>[1]</sup>, 是土地利用与土地覆被变化研究领域的核心内容<sup>[2]</sup>. 土地系统服务是指该区域内土地可以提供的商品或服务的需求, 可以是面积类的需求, 也可以是非面积类的需求(如粮食产量)<sup>[3-4]</sup>. CLUMondo 模型是目前唯一能在模拟土地变化时, 考虑土地系统服务多对多供需关系的模型, 这种多对多的供需关系是 CLUMondo 模型的特点.

CLUMondo 模型在模拟时存在 2 大困境: 1)该模型中的土地系统服务是人为设置的, 如何科学、合理地设置土地系统服务成为该模型模拟的难题; 2)难以量化每种土地系统类型的多重土地系统服务供给能力, 该模型需要人为规定每种土地类型提供多少土地系统服务, 这是模型模拟的关键和反映土地类型与土地系统服务之间多对多关系的直接体现. 目前并没有一种合理量化方法. 为解决上述 2 大困境, 本文提出在 CLUMondo 模型中耦合 GCAM(global change assessment model)和 GlobeLand30, 耦合后的模型为土地变化模拟时科学地确定土地系统服务提供了新思

路, 并为确定土地数据与土地系统服务之间的定量关系提供了新方法.

## 1 耦合 GCAM 和 GlobeLand30 的 CLUMondo 模型

**1.1 CLUMondo 模型的原理** CLUMondo 模型的原理是通过多次迭代实现土地系统服务供需平衡<sup>[5-6]</sup>(图 1-c). CLUMondo 模型中土地类型的转换取决于不同位置上土地系统类型转换潜力和限制条件. 转换潜力由土地系统类型的竞争优势、转换阻力、邻域效应和位置适宜性共同决定. 其中, 位置适宜性在 CLUMondo 模型中由 Logistic 回归模型来计算. CLUMondo 模型在模拟时常用土地系统数据<sup>[7]</sup>. 土地系统是根据土地覆被及其土地利用或管理强度来定义的, 是指土地覆被及其土地利用或管理强度的组合, 也可能包含有关土地系统组成部分的时空配置的信息<sup>[5, 8]</sup>.

**1.2 耦合 GCAM 用于设计土地系统服务** 土地系统服务利用 GCAM<sup>[6]</sup>来设计. GCAM 是探索人地耦合系统动态及全球变化响应的综合工具. 本文设计了自然类型的土地系统服务(草地服务、耕地服务、灌木

\* 国家自然科学基金重点资助项目(42230106);国家自然科学基金面上资助项目(42271418, 42171088);地表过程与资源生态国家重点实验室自主课题资助项目(2022-ZD-04)

† 通信作者: 高培超(1991—), 男, 博士, 副教授. 研究方向: 地理信息科学. E-mail: gaopc@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-23

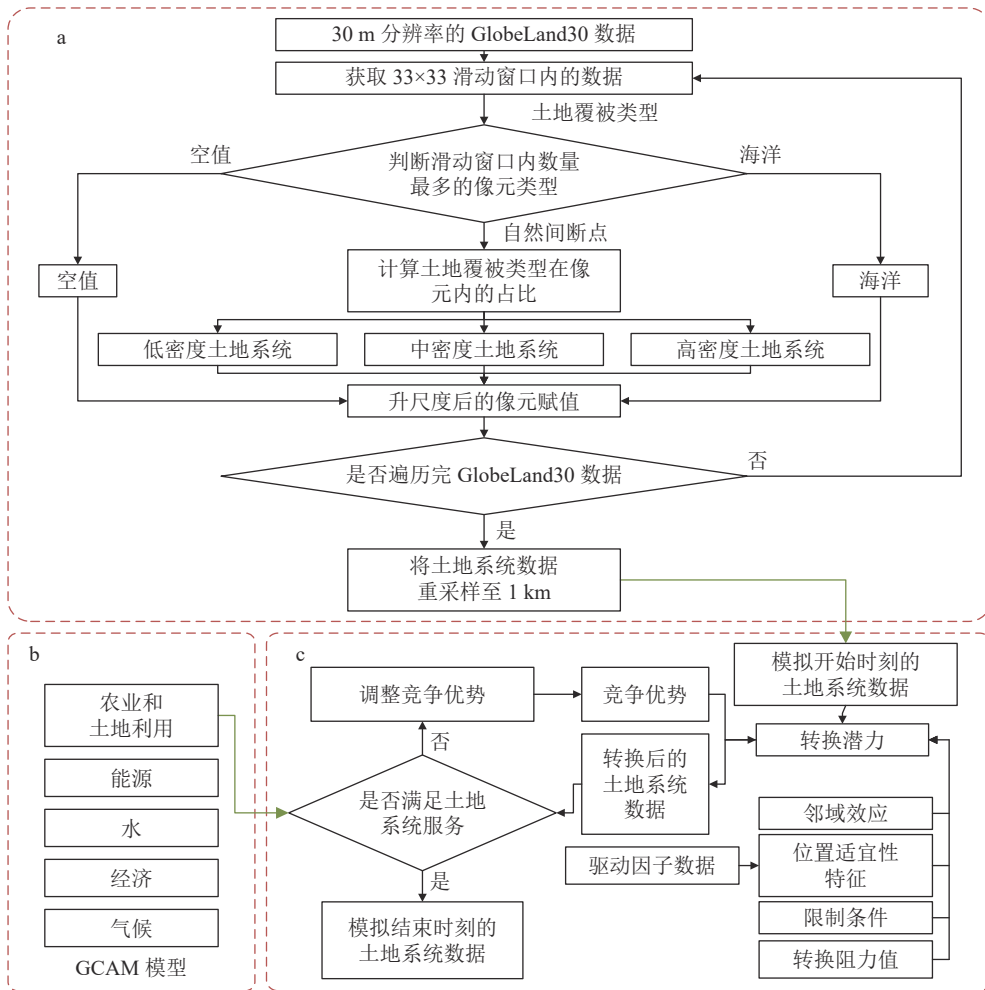


图 1 土地系统制作流程

地服务、林地服务)和非自然类型的土地系统服务(人口承载服务)。

自然类型土地系统服务的设计原则在贴合各流域实际土地覆被情况下,尽可能地利用 GCAM 的运行结果。GCAM 将土地类型划分为 21 种<sup>[9-10]</sup>。1990—2100 年,GCAM 可每 5 年输出全球 235 个流域每种土地类型的面积(除 2000 年)。设计土地系统服

务时,不考虑 GCAM 中面积保持不变的苔原、城市、岩石-冰雪-荒漠,将剩余的 18 种土地类型对应至 4 种土地系统服务(表 1)。各流域人口承载服务的量化思路是基于 GCAM 的全球人口数和栅格人口数据进行量化。本文采用的栅格人口数据为全球 1 km 分辨率的人口密度数据(gridded population of the world v4, GPW)<sup>[11]</sup>。

表 1 GCAM 土地类型与土地系统服务的对应关系

土地系统服务	GCAM 土地类型
草地	草地、未管理牧场、管理牧场
耕地	玉米、纤维作物、饲料草、油料作物、水稻、块根作物、棕榈果、其他谷物、糖料作物、生物质、杂粮作物、其他
灌木	灌木
林地	管理林地、未管理林地

**1.3 耦合 GlobeLand30 数据用于建立土地系统** GlobeLand30 用于通过升尺度的方式制备可赋予多重土地系统服务供给能力的土地系统数据。本文选择 GlobeLand30 数据的原因有 2 点: 1) 由于土地系统使用升尺度的方式制作, 所选数据的分辨率应 < 1 km;

2) 完成模型的适用性评估, 所选数据应有多期。

建立土地系统的思路为通过 33×33 的滑动窗口遍历 GlobeLand30 数据, 将 GlobeLand30 数据升尺度为 990 m 分辨率的土地系统数据, 再重采样至 1 km。在升尺度时, 990 m 分辨率的土地系统数据类型依据

滑动窗口内数量最多的像元类型及其在滑动窗口内的占比来确定. 土地系统的制备流程如图 1-a 所示. 通过上述制备规则, 共得到 32 种土地系统类型.

**1.4 量化土地系统的多重供给能力** 供给能力描述了每个土地系统像元能够提供多少土地系统服务. 对于自然类型的土地系统服务的量化, 假设草地服务、耕地服务、灌木服务、林地服务分别是由

GlobeLand30 数据中 30 m 分辨率的“草地”“耕地”“灌木”“林地”像元所提供的, 对于每种土地系统服务, 单位土地系统像元中包含的对应 30 m 分辨率像元面积平均值为其供给能力.

## 2 适用性评估的实验设计

实验设计的整体思路如图 2 所示.

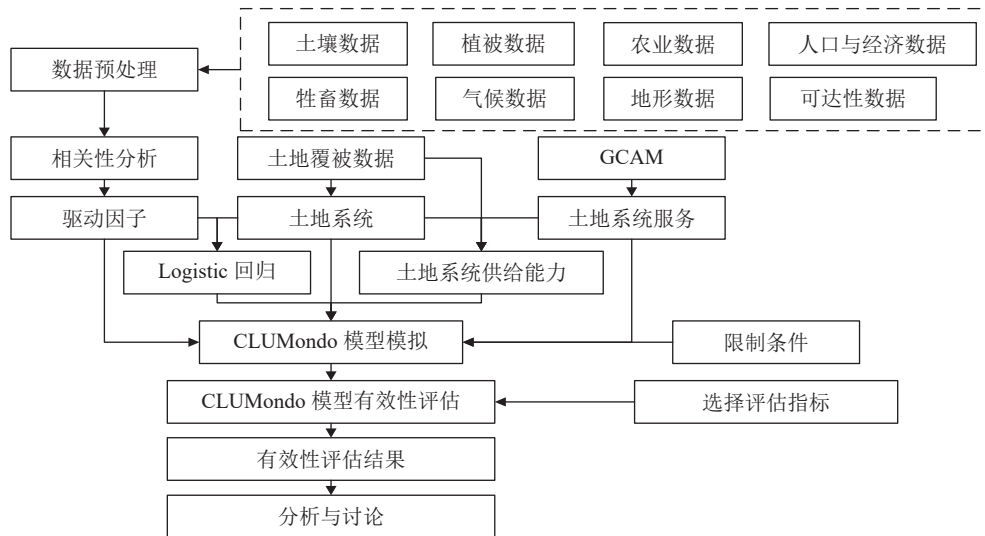


图 2 技术路线

**2.1 研究区域的选择** 本文选择 GCAM 中名为 Plateau of Tibet Interior 的区域(记为“GCAM 青藏高原内部区”)作为研究区, 评估上述耦合模型的适用性. 研究区“GCAM 青藏高原内部区”范围覆盖西藏自治区的拉萨市、阿里地区、那曲地区、日喀则地区以及青海省的海西蒙古族藏族自治州. 总面积约 404 712 km<sup>2</sup>.

**2.2 实验数据** 在评估实验中, 运用耦合模型模拟 2010—2020 年“GCAM 青藏高原内部区”的土地系统变化. 需要使用到的数据包括驱动因子数据、土地数据. 本文选择的土地数据为 GlobeLand30 数据, 驱动因子数据见表 2. 土地系统类型的变化受到了各种自然和社会经济因素的驱动. 自然和社会经济因素在空间上量化表达后被称为驱动因子. 在本实验中, 共选取了土壤、植被、气候、地形、人口与经济因素、可达性、农业和牲畜 8 类驱动因子.

**2.3 CLUMondo 模拟的关键设置** CLUMondo 模拟的关键设置包括对每种土地系统构建 Logistic 回归方程和设置限制区域, Logistic 回归方程描述了驱动因子和某种土地系统类型发生概率之间的关系, 在构建回归方程之前, 需要对相关性>0.8 的驱动因子进行剔除. 为了保证回归方程的有效性, 对于面积

<10 km<sup>2</sup> 的土地系统不进行逻辑回归. 模拟时限制保护区内的土地类型发生改变, 保护区数据来源于世界保护区数据库<sup>[12]</sup>.

**2.4 适用性评估指标的选取** 回归方程的精度使用 AUC (area under the curve of roc) 值来评估. AUC 值的范围为 0~1, 其中: >0.9, 回归效果优秀; >0.8~0.9, 回归效果良好; >0.7~0.8, 回归效果中等; >0.6~0.7, 回归效果低; ≤0.6, 回归效果差.

模型的适用性从总体、数量和位置 3 个方面进行评估, 具体选择了随机 Kappa 系数(Kappa for no ability,  $K_{no}$ )<sup>[13-14]</sup>、位置 Kappa 系数(Kappa for location,  $K_{lo}$ )<sup>[13]</sup>和直方图 Kappa 系数(Kappa for histogram,  $K_{hi}$ )<sup>[14]</sup>.  $K_{no}$  它反映了 2 张土地利用图一致性<sup>[13, 15]</sup>.  $K_{lo}$  是在一定的数量误差下, 评估模型模拟位置分配正确一致性的指标.  $K_{hi}$  是评估土地变化模拟中数量分配正确一致性的指标<sup>[14]</sup>.  $K_{no}$ 、 $K_{lo}$  和  $K_{hi}$  指标的数值范围均为 -1~1, 指标的值越大, 认为模型模拟精度越高, 计算式分别为

$$K_{no} = \frac{p_0 - L_{NQN}}{1 - L_{NQN}}, \quad (1)$$

$$K_{lo} = \frac{p_0 - L_{MQN}}{L_{MQP} - L_{MQN}}, \quad (2)$$

$$K_{hi} = \frac{L_{MQP} - L_{MQN}}{1 - L_{MQN}}, \quad (3)$$

其中

$$p_0 = \sum_{i=1}^n p(a = i \wedge s = i), \quad (4)$$

$$L_{NQN} = \frac{1}{n}, \quad (5)$$

$$L_{MQN} = \sum_{i=1}^n (p(s = i) \times p(a = i)), \quad (6)$$

$$L_{MQP} = \sum_{i=1}^n \min(p(s = i), p(a = i)), \quad (7)$$

式中： $p_0$ 为真实的土地系统图(用 $a$ 表示)和模拟得到的土地系统图(用 $s$ 表示)之间的总体精度； $i$ 为土地系统类型； $n$ 为土地系统类型的总数； $L_{NQN}$ 为完全随机的情况下，模拟正确分类的概率； $L_{MQN}$ 为指定数量时的随机一致性； $L_{MQP}$ 为模型在没有位置误差的情况下，能够达到的最大一致性。

表 2 土地数据和驱动因子数据

数据类别	数据名称	数据类别	数据名称	
土地覆被	GlobeLand30	人口与经济	市场可达性指数	
	堆积密度		市场影响指数	
	阳离子交换量		市场密度指数	
土壤	黏土含量		夜间灯光数据	
	土壤粗碎屑		人均GDP	
	可用土壤水容量		GDP	
	土壤有机质		人类发展指数	
	pH		人口密度数据	
	砂土含量		水牛数量	
	淤泥含量		牛数量	
质地类别	鸡数量			
可达性	到达最近城市的距离	牲畜	鸭数量	
	到达最近河流的距离		山羊数量	
	到达最近道路的距离		马数量	
	到达最近铁路的距离		猪数量	
	1 km旅行时间		绵羊数量	
	1 km机动车旅行时间		植被	初级生产总值
	1 km步行时间			NDVI
农业	175种粮食作物产量	地形	DEM	
气候	多年平均降水		坡度	
	多年平均气温		DEM方差	

### 3 结果分析与讨论

**3.1 回归精度评价** 每种土地系统回归方程的精度如表 3 所示。由表 3 可知，逻辑回归的精度均>0.8，Logistic 回归的效果良好，结果方程精度高，可以用于位置适应性的计算。

表 3 每种土地系统回归方程的精度

序号	类型	AUC值	序号	类型	AUC值
0	低密度林地	—	11	中密度水体	0.947
1	低密度草地	0.802	12	高密度水体	0.998
2	中密度草地	0.814	13	低密度人造地表	—
3	高密度草地	0.965	14	中密度人造地表	—
4	低密度灌木	0.943	15	低密度裸地	0.869
5	中密度灌木	0.961	16	中密度裸地	0.899
6	高密度灌木	0.964	17	高密度裸地	0.982
7	低密度湿地	0.957	18	低密度冰川与永久积雪	0.989
8	中密度湿地	0.968	19	中密度冰川与永久积雪	0.993
9	高密度湿地	0.983	20	高密度冰川与永久积雪	0.998
10	低密度水体	0.921			

**3.2 模拟精度评价** 模拟得到的 2020 年的青藏高原地区的土地系统如图 3 所示。指标评估的结果为  $K_{no} = 0.784 62$ ,  $K_{ni} = 0.793 19$ ,  $K_{io} = 0.747 26$ 。说明耦合 GCAM 和 GlobeLand30 的 CLUMondo 模型模拟效果好，且适用于“GCAM 青藏高原内部区”。

**3.3 讨论** 本文土地系统的初步制作是将 30 m 分辨率的土地覆被数据升尺度为 990 m 分辨率的土地系统数据，再将初步制作的土地系统重采样至 1 km 得到最终的土地系统数据。检验土地系统是否合理的方法为分析每个 990 m 分辨率下的 30 m 分辨率的土地覆被数据中包括的土地覆被类型及其分布。表 4 中罗列了“GCAM 青藏高原内部区”部分土地系统数据 990 m 分辨率的大像元对应的 30 m 分辨率的土地覆被数据。

从表 4 中的结果来看，对于同一种土地覆被类型的不同密度的土地系统，由低密度的土地系统类型变为高密度时，对应土地覆被类型的密度上升，像元也更加均质。因此，土地系统的分类方法是合理的。

### 4 结论与展望

本文将 CLUMondo 模型与 GCAM 和 GlobeLand30 数据进行耦合，并评估了耦合后的 CLUMondo 模型在“GCAM 青藏高原内部区”的适用性。基于评估结果得到以下结论：

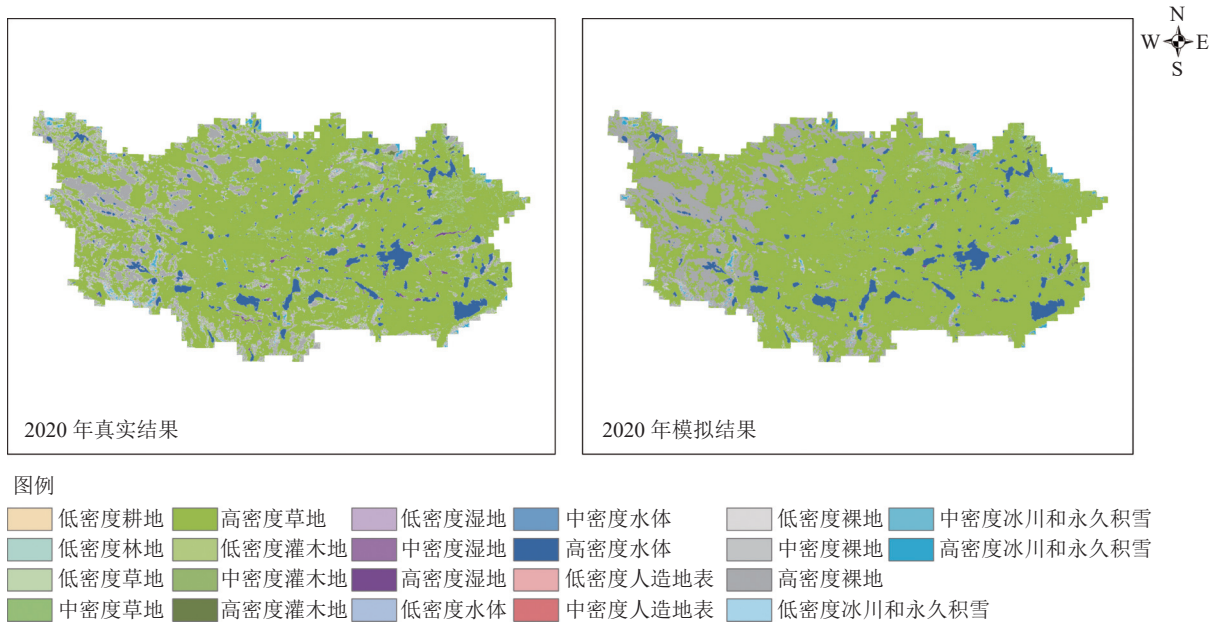


图 3 2020 年“GCAM 青藏高原内部区”的土地系统

表 4 33×33 滑动窗口大小 30 m 分辨率的土地覆被数据

土地系统类型	土地覆被数据	土地系统类型	土地覆被数据
低密度林地		高密度草地	
中密度灌木		高密度湿地	
中密度水体		低密度人造地表	
高密度裸地		高密度冰川与永久积雪	

1)GCAM 可以为土地系统服务的设计提供有效的帮助,将 GCAM 与 CLUMondo 模型进行耦合,可以有效解决 CLUMondo 模型在土地变化模拟时在设置土地系统服务时的困境;

2)将 GlobeLand30 数据通过升尺度的方式制作土地系统,为 CLUMondo 模型量化土地系统与土地系统服务之间的关系提供了一种行之有效的方法;

3)同时耦合 GCAM 和 GlobeLand30 数据的土地变化模拟在“GCAM 青藏高原内部区”具有良好的适用性。

本研究仍存在一定的不足:虽然“GCAM 青藏高原内部区”所设计的土地系统服务充分考虑了自然类型的土地系统服务和非自然类型的土地系统服务,所设定的耕地服务、林地服务、草地服务和灌木服务涵盖了承载生态系统服务功能的主要土地类型,是基于区域内部需求设定的,但是暂未考虑青藏高原区域生态系统服务的溢出效应。

在未来的研究中,建议考虑生态系统服务的溢出效应,进一步探索区域内外需求协同牵引下青藏高原

区域土地系统的未来演化.在后续的研究工作中,可以直接使用“GCAM 青藏高原内部区”的生态系统服务来牵引土地系统的变化。

### 5 参考文献

[1] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94

[2] 戴尔阜, 马良. 土地变化模型方法综述[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 152

[3] 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

[4] ASSELEN S, VERBURG P H. A land system representation for global assessments and land-use modeling[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(10): 3125

[5] VAN VLIET J, VERBURG P H. A short presentation of CLUMondo[M]//*Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Cham: Springer International

- Publishing, 2017: 485
- [6] LIU Z F, VERBURG P H, WU J G, et al. Understanding land system change through scenario-based simulations: a case study from the drylands in Northern China[J]. *Environmental Management*, 2017, 59(3): 440
- [7] 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
- [8] SCHMID M, HEINIMANN A, ZAEHRINGER J G. Patterns of land system change in a Southeast Asian biodiversity hotspot[J]. *Applied Geography*, 2021, 126: 102380
- [9] DONG N, YOU L, CAI W J, et al. Land use projections in China under global socioeconomic and emission scenarios: utilizing a scenario-based land-use change assessment framework[J]. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 164
- [10] KYLE G P, LUCKOW P, CALVIN K V, et al. GCAM 3.0 agriculture and land use: data sources and methods [R]. Richland, WA (United States): Pacific Northwest National Lab (PNNL), 2011
- [11] CENTER FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK - CIESIN - COLUMBIA UNIVERSITY. Gridded population of the world, version 4 (GPWv4): population density adjusted to match 2015 revision UN WPP country totals, revision 11 [M]. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC); Palisades NY, 2018
- [12] UNEP-WCMC and IUCN. Protected planet: the world database on protected areas (WDPA) [M]// Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN, 2021
- [13] PONTIUS R. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66: 1011
- [14] HAGEN A. Multi-method assessment of map similarity[C]//Proceedings of the 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. Palma, Spain; Universitat de les Illes Balears, 2002: 171
- [15] ZHANG J, ZHOU Y K, LI R Q, et al. Accuracy assessments and uncertainty analysis of spatially explicit modeling for land use/cover change and urbanization: a case in Beijing metropolitan area[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(2): 173

## Coupled GCAM and GlobeLand30 to CLUMondo model and its applicability assessment

GAO Yifan<sup>1,2)</sup> WANG Yuanhui<sup>2)</sup> XIE Yiru<sup>2)</sup> YE Sijing<sup>2)</sup> SONG Changqing<sup>2)</sup> GAO Peichao<sup>2)</sup>

(1) State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Center for GeoData and Analysis, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** We coupled global change assessment model (GCAM) and GlobeLand30 to CLUMondo model to address two difficulties when using CLUMondo model. First, GCAM is used to address the difficulty to set land system service and determine its demand scientifically. Second, GlobeLand30 data are used to address difficulty to quantify supply capacity of each land system type for multiple land system services. Applicability of the coupled model is tested with ‘Plateau of Tibet Interior’ region. The coupled GCAM is found to effectively set land system services. To establish a land system by upscaling Globeland30 is an effective method for CLUMondo model to quantify multiple land system service supply capabilities. CLUMondo model coupled with GCAM and GlobeLand30 is applicable to ‘Plateau of Tibet Interior’ region.

**Keywords** CLUMondo model; land change simulation; Globeland30; land system; the Qinghai-Tibet Plateau

【责任编辑:刘先勤】