引文格式：余佳美,曹良中,朱士华,等. 耦合PLUS-InVEST模型的重庆市碳储量评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):60-64. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.013

耦合PLUS-InVEST模型的重庆市碳储量评估

余佳美[1,2]，曹良中[1,2]，朱士华[3]，涂作莹[1,2]，林雅睿[1,2]，方　霞[4*]
（1. 九江学院，江西 九江 332005；2. 九江市国土测绘与3S技术应用重点实验室，江西 九江 332005；
3. 江苏省气候中心，江苏 南京 210023；4. 新疆工程学院，新疆 乌鲁木齐 830023）

摘　要：土地利用变化是陆地生态系统碳储量变化的重要驱动因素，研究土地利用变化与碳储量的关系对于土地开发和优化国土空间结构具有重要意义。选取高程、温度、GDP等15个驱动因子，利用PLUS和InVEST模型对重庆市近20 a土地利用格局进行分析并预测未来10 a的土地变化特征，评估不同情景下区域碳储量分布趋势。结果表明：①重庆市2000—2020年建设用地和耕地变化幅度最大，碳储量整体呈下降趋势。②重庆市碳储量空间上呈现“东高西低”的特征，与土地利用类型的转换紧密相连。城市化过程中土地从高碳密度转变为低碳密度，导致了碳储量亏损。③未来土地利用规划应以耕地为重点，严格控制建设用地，增加地区的固碳能力。

关键词：PLUS模型；土地利用变化；碳储量；InVEST模型；情景预测
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0060-05

Carbon Storage Assessment in Chongqing Through the Coupled PLUS-InVEST Model

YU Jiamei[1,2], CAO Liangzhong[1,2], ZHU Shihua[3], TU Zuoying[1,2], LIN Yarui[1,2], FANG Xia[4*]
(1. Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;
2. Jiujiang Key Laboratory of Land Surveying and Mapping and 3S Technology Application, Jiujiang 332005, China;
3. Jiangsu Provincial Climate Center, Nanjing 210023, China;
4. Xinjiang University of Technology, Urumqi 830023, China)

Abstract: Land-use change is an important driving factor of carbon stockage change in terrestrial ecosystem. It is of great significance to study the relationship between land-use change and carbon stockage for land development and optimization of territorial spatial structure. We used 15 driving factors such as elevation, temperature and GDP, PLUS and InVEST models to analyze the land-use pattern of Chongqing in the past 20 years, predicted the land-use change characteristics in the next 10 years, and evaluated the distribution trend of regional carbon storage under different scenarios. The results showed that ①the changes of construction land and cultivated land in Chongqing from 2000 to 2020 were the largest, and the carbon storage showed a downward trend. ② The spatial characteristics of carbon storage in Chongqing are high in the east and low in the west, which is closely related to the conversion of land-use types. In the process of urbanization, land changes from high carbon density to low carbon density, resulting in loss of carbon storage. ③In the future land-use planning should focus on cultivated land, strictly control construction land, and increase regional carbon sequestration capacity.

Key words: PLUS model, land-use change, carbon storage, InVEST model, scenario prediction

随着全球气候变化的加剧，陆地生态系统碳储量的研究日益增多[1]，实地调查和模型模拟是最主要的两种方法。其中野外实地调查最为有效，但测量过程繁琐、试验成本较高，仅适合小范围的精细分析[2]。为了弥补实地调查法的不足，涡度协方差通量观测法[3]、同位素示踪剂法[4]等被提出用于碳储量的估算。近年来，不少学者利用InVEST（integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs）模型评估某一地区上特定时间点的碳储量，该模型能够直接估算不同时段土地利用变化下的碳储量空间分布，从而探索土地利用状况与碳储量的时空变化关系，评价土地利用变化对固碳潜力的影响。鉴于InVEST模型参数少、计算快捷、在碳储量的估算上具有良好的性能，目前得到了广泛的应用[5-7]。

本文以重庆市作为研究区，耦合PLUS模型和InVEST模型，对重庆市当前用地现状进行分析，预测未来土地利用空间格局，以探讨不同情境下陆地生态系统中碳储量空间变化特点，基于此分析，评估碳储

项目来源：土沙漠科学数据中心资助项目（E01Z790201）；江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ21183）；江西省“十四五“哲学社会科学规划项目（22JL14D）；江苏省气象局青年基金资助项目（KQ202217）。
第一作者简介：余佳美（2003—），本科，研究方向为土地资源可持续利用、碳储存变化，E-mail：yujiamei012@163.com。
通信作者：方霞（1988—），博士，教授，研究方向为生态模拟、干旱区碳动态的时空演变机理，E-mail：xiafangxi@163.com。

量对生态系统碳库的贡献，进而为重庆市的生态环境保护、生态系统碳汇等提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

重庆市（28°10′~32°13′N，105°17′~110°11′E）位于我国西南内陆腹地且处于长江上游，总面积约8.24万km²。地处亚热带季风区，地势东高西低；地形以丘陵和山地为主，囊括了包括阔叶林、针叶林、针阔混交林、草甸、草丛及灌木等多种植被形态，景观多样性丰富。重庆市耕地面积众多，约占区域总面积的74.85%，城市经济快速增长，城市化率高达70.96%。重庆市直辖市成立后，城市建成区面积拓展到900 km²，涵盖38个区县，显示出城市疆界逐年扩张，社会发展成绩显著。

1.2　数据来源与处理

本文拟用国家基础地理信息中心（http://globeland30.org/）的3期（2000年、2010年、2020年）土地利用数据，将研究区划分为6个基本类型，即耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。数据集采用的坐标基准为GCS_WGS_1984，投影为Albers等面积投影，栅格空间分辨率为30 m×30 m。根据数据源和影响因子的可获取性、时效性以及显著性[8]，选择15个影响土地利用变化的驱动因子（包括气温、海拔、GDP等）模拟未来土地利用及不同情景的变化。

1.3　研究方法

1.3.1　利用PLUS模型预测土地变化

PLUS模型结合元胞自动机（CA），将土地变化特征与多源随机种子机理相结合，实现对其时空演变特征的挖掘与预测。与其他的土地利用仿真模型不同，PLUS模型利用随机森林法挖掘土地利用及其驱动因子，从而获得各种类型的用地开发概率及贡献率，并能够保持特定时期内对土地利用演变的解析能力[9]。重庆市的土地利用演变可按三步分析：①利用PLUS模型Markov规则预测2030年各类土地利用需求；继而根据2000年、2010年、2020年土地利用数据与15个驱动因子数据在LEAS模块得到各用地发展概率；②结合土地利用数据与发展概率模拟2020年、2030年土地利用变化特征，并用ArcGIS等软件统计分析，对模拟结果精准度对比验证，Kappa系数高于0.75则视为高一致性；③精度结果较好时，进行自然发展、经济发展和生态保护3种情景下重庆市2030年土地利用分布预测分析。

1.3.2　InVEST模型碳储量计算

InVEST模型用于对未来不同情景下的生态系统服务进行量化分析，为制定合理的生态系统服务价值评价方案提供基础[10]。本文采用InVEST模型的Carbon模块，其中生态系统碳储量库包括地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物四大部分。根据土地利用类型对四大碳库的平均碳密度分别统计，计算各地类面积与其碳密度之积，得出总碳储量，其计算公式如下：

$$C_i = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{1}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i S_i \tag{2}$$

式中，i为土地利用类型；C_i为土地利用i类型的碳密度，单位为t/hm²；C_{above}、C_{below}、C_{soil}、C_{dead}分别为该地类的地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度；C_{total}为陆地生态系统碳存储总量，单位为t；i为土地利用类型的数量；S_i为土地利用类型i的面积[11]。本文碳库数据主要参考研究区同为中国中西部，特别是四川省重庆地区的前人研究成果，以更准确地表示该区域内的碳密度波动。首先地下生物量碳密度值、土壤碳密度值根据万其林[12-13]对川渝地区的修正结果获得，同时可知死亡有机物碳密度值指枯萎、坠落、死亡的有机物碳库，数值较小，城市建设用地和未利用地可赋值为0；其次参考刘晓娟[14-15]等对全国不同气候带的各用地碳密度值进行实测与估算，整合热带、暖温带的地上生物量和死亡有机物碳密度值并将其求平均值，获得重庆市不同地类碳密度值（表1）。

表1　重庆市土地利用类型碳密度值/(t/hm²)

土地利用类型	地上生物量	地下生物量	土壤	死亡有机物
耕地	27.15	13.64	41.02	0.35
林地	32.83	12.09	89.58	3.28
草地	18.37	21.43	76.56	0.25
水体	0	0	0	0.21
建设用地	22.34	1.34	33.99	0
未利用地	19.87	1.82	34.08	0

1.3.3　多情景设置

在构建2030年土地利用空间格局的模拟模型时设置3种情景：①自然发展情景：在不考虑开发政策和规划需求的情况下，按照2000—2020年间土地使用结构的演变规律，耕地、林地、建设用地和未利用地难以转为水体，因此将其设为0，其他用地维持原来邻近地区的比重不变，使之符合自然发展。②生态保护情景：该情景依据《重庆市国土空间规划（2020—2035年）》中对森林、草地、水域进行严格监管，协

助加强山水林湖田草一体化系统性综合保护和恢复，限制生态用地向其他用地的转移，鼓励其他用地的转入，如退耕还林还草，推动生态可持续性发展。③经济发展情景：考虑重庆市作为中西部地区唯一直辖市，是国家重点中心城市，正处于快速发展的黄金时期，城市化进程不断推进，对于建设用地的需求尤为迫切，因此限制建设用地的转移，而对于其他用地的转换不作限制，保持相对宽松的环境以适应多样化的城市发展需要。

2 结果与分析

2.1 土地利用空间变化分析

2.1.1 PLUS模型精度验证

为验证PLUS模型在未来土地使用情况下的准确性，本文选取了2000年、2010年的土地利用数据，对2020年土地利用类型模拟结果并与实际数据对比。研究结果得出模拟总体精度（overall accuracy，OA）系数高达89.1%；Kappa系数为0.82，精度符合研究要求（表2）。

表2 2020年实际与模拟土地利用变化精度检验混淆矩阵

预测栅格	实际栅格						
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	总计
耕地	1 942 691	85 435	23 527	7 633	62 203	177	2 121 666
林地	76 331	1 784 601	53 110	4 551	7 982	13	1 926 588
草地	45 540	54 733	195 227	3 288	4 627	54	303 469
水体	12 140	1 335	1 738	54 746	1 007	300	71 266
建设用地	44 835	375	781	394	70 633	11	117 029
未利用地	34	81	42	677	57	277	1 168
总计	2 121 571	1 926 560	274 425	71 289	146 509	832	4 541 186
生产者精度/%	91.6	92.6	71.1	76.8	48.2	33.3	–
用户精度/%	91.6	92.6	64.3	76.8	60.4	23.3	–
–	总体精度/%	89.1	–	Kappa系数	0.82	–	–

2.1.2 2000—2020年重庆市土地利用空间变化分析

从用地空间格局来看(图2)，重庆市2000—2020年的用地类型以耕地和林地为主。其中，2020年耕地占总面积的46.7%，林地占42.4%，水域占1.6%，建设用地占6%。2000—2020年来，建设用地、水域和林地呈现增长态势，其中，建设用地增长258.5%，未利用地减少291.3%，耕地面积下降最为显著，减少了1 968.79 km^2，相当于2000年的4.9%。

2000—2020年土地利用转移面积为10 403.81 km^2，占比为12.73%。其中，耕地是主要的转出项，建设用地是主要的转入项，并且建设用地的快速增加得益于耕地的转出（1 845.79 km^2）。林地与草地总体面积变化较小，其中林地主要转出为耕地和草地，分别为1719.11 km^{2}和769.01 km^2；草地多转为林地，转入1 837.21 km^2，这与《重庆市土地利用规划》相契合。因此，耕地、草地、林地和建设用地的相互转换是重庆市土地利用变化的主要部分。

2.1.3 三种情景下土地利用分布预测

以2020年土地利用为基础，采用PLUS模型预测2030年3种情景下的土地利用格局（表3）。在自然发展情景下，建设用地大幅度增加，其余地类的面积及变化均较小。从转移方向看，耕地是主要转出者，转出1 612.11 km^2，转入建设用地1 600.87 km^2。水域转出109.89 km^2，其中有75.6%转为耕地，而转入林地和草地的面积较小。

在生态保护情景下，主要体现在抑制林地、草地、水域转为人工用地。与自然发展情景相比，建设用地

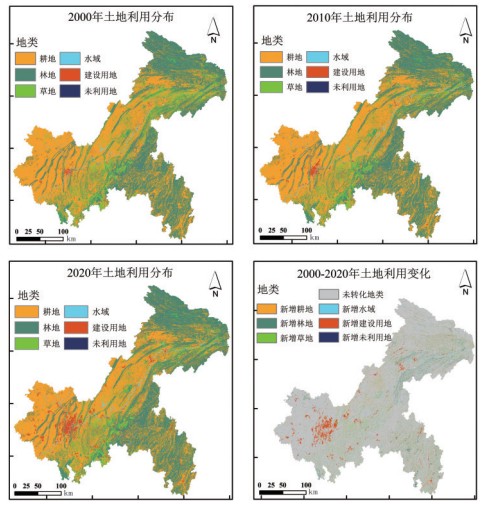


图2 重庆市2000、2010和2020年土地利用分布及变化

审图号：GS(2024)0650号

面积增幅降低，但耕地转出依旧居高，并没有限制对耕地的占用。耕地、林地、未利用地分别减少1 782.44 、61.57 、4.52 km^2，而草地、水域、建设用地分别增加283.83 、253.29 、4.52 km^2。其中，林地转变为草地的面积为69.3 km^2，耕地转为草地和水域的面积分别为270.11 、179.21 km^2，这表明生态保护情境下，生态用地的面积比例增加，整体生态环境得到一定的提升。

在经济发展情景下，2030年重庆市建设用地大幅增加至63.7%，而耕地、林地、草地面积均有减少，分别为1 780.04 、61.57 、82.65 km^2。其中1 587.21 km^{2}由耕地转出的林地和草地分别为36.42 、21.37 km^2，未利用地面积下降4.52 km^2，表明土地利用程度提高。因此，经济发展情景下建设用地面积大幅度增加，而

表3　2030年不同发展情景下土地利用类型面积/km²

类型	2020年	2030年自然发展情景	2030年生态保护情景	2030年经济发展情景
耕地	38 198.07	36 778.64	36 415.63	36 418.03
林地	34 654.71	34 593.14	34 593.14	34 593.14
草地	4 936.63	4 853.98	5 220.46	4 853.98
水体	1 281.49	1 171.60	1 534.78	1 534.78
建设用地	2 640.36	4 323.09	3 959.00	4 323.09
未利用地	14.37	12.41	9.85	9.85

生态用地面积减少。

2.2　碳储量变化的时空演变特征

2.2.1　2000—2020年碳储量的变化特征

根据InVEST模型估算重庆市2000、2010年和2020年的碳储量分别为9.682×10^{8} t、9.683×10^{8} t和9.603×10^{8} t，2000—2020年碳储量共减少7.835×10^{6} t，降幅0.8%，整体上呈缓慢下降趋势。

从固碳能力看，不同土壤类型的固碳能力从低到高依次为水域、未利用地、建设用地、草地、耕地、林地，其中林地碳储量最大，占总碳库的一半以上（表4）。重庆市碳储量的空间分布具有“东部高、西部低”的特点，其中高值区位于巫山、七曜山、北部大巴山、南部大娄山、武陵山，是林地的主要分布区；低值主要分布在四川盆地和嘉陵江、长江、乌江等水域地区，水域固碳能力低。耕地、林地、草地、未利用地的碳储量均在减少，也是面积减少的土地利用类型。其中，耕地为主要减少部分，减少了179.54×10^{5} t；建设用地为碳储量主要增加部分，增加了152.29×10^{5} t，总碳储量呈减少趋势。城市化进程中，碳密度较高的林地、耕地和草地被严重侵蚀。而在大巴山和武陵山区，由于其城镇建设相对滞后，林地和草地占比较高，其区域碳储量水平也相对较高。

表4　2000—2030年重庆市不同土地利用类型碳储量/(10^{5} t)

类型	2000年	2010年	2020年	2030年自然发展情景	2030年生态保护情景	2030年经济发展情景
耕地	3 666.79	3 673.23	3 487.25	3 357.48	3 324.34	3 324.56
林地	5 150.49	5 302.19	5 305.92	5 295.83	5 295.83	5 295.83
草地	823.71	653.54	639.69	628.91	676.40	628.91
水体	0.22	0.23	0.30	0.27	0.36	0.36
建设用地	36.9	51.11	169.19	277.01	253.68	277.01
未利用地	3.48	2.41	0.89	0.77	0.61	0.61
总计	9 681.59	9 682.71	9 603.24	9 560.28	9 551.22	9 527.28

2.2.2　不同情景下的碳储量变化预测

采用InVEST模型预测不同规划方案下重庆市碳储量变化。结果表明，自然发展、生态保护和经济发展情景下重庆市的碳储量分别为$9\,560.28\times10^{5}$ t、$9\,551.22\times10^{5}$ t和$9\,527.28\times10^{5}$ t。2030年模拟情景下的碳储量与2020年碳储量相比均为下降趋势，其中经济发展下的碳储量损失最多，耕地大量减少而建设用地扩张导致土壤碳库均呈现减少态势。自然发展情景下的耕地碳储量减少最少，其中总碳储量总体下降42.97×10^{5} t，城市用地大量占用耕地，地下生物量、土壤碳储量损失分别下降21.91×10^{5} t、14.95×10^{5} t，占总下降量的50.99%和34.79%。生态保护情景下草地和水域的碳储量有所增加，然而林地损失10.09×10^{5} t，建设用地碳储量增长幅度仅为253.68×10^{5} t。但由于没有对耕地的转出限制，耕地的碳储量依旧下降较多。该情景下的地上、地下生物和土壤碳库碳储量减少量相近，分别为17.83×10^{5} t、19.23×10^{5} t和14.17×10^{5} t，占总损失量的98.47%。经济发展情景下，2030年总碳储量下降幅度最大（-75.96×10^{5} t），表明经济发展情景下不利于碳储量的增加，建设用地的扩张使区域整体碳储量大幅度减少，其中土壤碳库碳储量变化为-31.49×10^{5} t，占总碳储量损失的41.45%。

2.3　土地利用变化引起的碳储量变化

由于2000—2020年间的经济持续增长，重庆市大量耕地与草地转换为建设用地。从土地使用分布情况看（图2），对照不同土地类型的碳储量（图5），可知2000—2020年间地下生物量和土壤碳库分别减少46.99×10^{5} t、33.02×10^{5} t，总碳储量减少78.35×10^{5} t。其中，不同地类对重庆市碳储量的贡献依次为耕地>林地>草地>建设用地>水域>未利用土地。耕地、草地的大量转出，导致碳储量减少。而林地和建设用地的碳储量明显增加。

自然变化情景下，耕地转用建设用地为主，草地多转为耕地，导致碳储量分别减少102.58×10^{5} t、5.83×10^{5} t。建设用地转出多为耕地，其碳储量提升1.52×10^{5} t。生态保护情景下，退耕还草使碳储量增加34.99×10^{5} t，退耕还林碳储量提高了5.12×10^{5} t。但耕地仍然大量转为建设用地，碳储量损失86.41×10^{5} t。经济保护情景下耕地主要转为建设用地，其次是林地、草地。由于建设用地限制转为其他用地，加重了碳储量的损失。自然发展情景下的碳储量下降相对较少，平均下降47.49×10^{5} t。生态土地转化受限，但仍然有相当数量的耕地转化为建设用地，固碳能力较高的耕地、林地、草地等类型土地转为建设用地，碳储量下降。

3　讨　论

秦岭陕西段传统村落空间分布不均衡，91.11%集中在安康、商洛和汉中三市，呈现“大集聚、小分散”特征，在安康东南部和汉中北部形成2个高密度区。影响因素中经济发展（0.110）作用最显著，其次是地形（0.027）和河流水系（0.013）。建议对高密度区实施集中连片保护，统筹基础设施和产业布局，并

处理好经济发展与村落保护的关系，通过经济发展促进传统建筑及生产生活方式的保护。未来需扩大研究样本，深化形成机制研究。

4 结 语

本文利用PLUS模型通过耦合土地利用扩张分析策略与多类随机点的元胞自动机相结合，构建了一种新的元胞自动机模型，通过对空间、数量等的优化配置，提高模拟的准确性。对土地利用类型进行的模拟分析，结果表明每一种影响因素的拟合效果也达到了预期的水平。本研究并未分析生态保护红线、永久基本农田等限制条件。InVEST模型计算了单一土地类单元的碳密度，忽视了不同土地类型之间的差异，今后的研究将进一步区分细化不同地物类型以及植被生长状态格局，并加入实地调查数据进行验证。

参考文献

[1] 张晓光,张赢心,李士美,等. 基于土地利用的青岛市碳排放变化特征与预测[J]. 地理空间信息,2022,20(5):1-5

[2] 张乡城. 神农架乔木林碳储量变化及增汇潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022

[3] 祁亚辉,王小丹. 陆地生态系统碳通量面临的挑战与机遇:基于涡度协方差测定[J]. 生态学报,2023,43(8):2 979-2 994

[4] 梁文悦,余甜甜,董良,等. 海洋沉积物中深古菌的固碳潜能:基于DNA的稳定性同位素示踪研究[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(4):897-905

[5] 孙一帆,徐梦菲,汪霞. 基于InVEST-PLUS模型的郑州市碳储量时空演变及空间自相关分析[J]. 水土保持通报,2023,43 (5):374-384

[6] 谢耕,吴莉萍,陈敏. 基于土地利用变化的成都市碳储量时空格局演变特征分析[J].环境影响评价,2023,45(6):104-112

[7] Hu F, Zhang Y, Guo Y, et al. Spatial and Temporal Changes in Land Use and Habitat Quality in the Weihe River Basin Based on the PLUS and in Vest Models and Predictions[J]. Arid Land Geogr,2022(45):1 125-1 136

[8] 雒舒琪,胡晓萌,孙媛,等. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):300-314

[9] Juncong L, Bangyu L, Lin J W, et al. Prediction of Land Use for the Next 30 Years Using the Plus Model's Multi-scenario Simulation in Guizhou Province, China[J]. Scientific Reports,2024,14(1):13 143

[10] Yu H R, Wang Y Z, Liang Z, et al. The Construction of Regional Ecological Security Pattern Based on a Multi-factor Comprehensive Model and Circuit Theory [J].Nature Environment and Pollution Technology,2021,20(3):1 115-1 126

[11] 王子昊,王冰,张宇飞,等. 基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(2):292-304

[12] 万其林,邵景安. 2000—2020年三峡库区重庆段土地利用及碳储量估算[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2023,40(6):52-64

[13] 王超越. 基于PLUS-InVEST成渝城市群国土空间及其碳储量时空变化模拟研究[D]. 重庆:重庆三峡学院,2023

[14] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等. 基于FluS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理,2019,39(3):397-409

[15] 徐丽,何念鹏,于贵瑞. 2010年中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. Science Data Bank,2019,4(1):90-96

(上接第32页)

法[J].测绘科学,2023,48(1):16-22

[4] 高为广,隋叶叶,李敏,等. 北斗系统RNSS服务下行导航信号应用模式及使用建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(9):1 444-1 454

[5] 罗亚荣,郭文飞,齐书峰,等. 不变RTS平滑算法及其在5G/SINS组合导航中的应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):747-755

[6] 陈惟杰,朱锋,郭斐,等. 不同水深层的GNSS信号特征分析及其导航场景聚类划分[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(1):139-145

[7] 褚金奎,关乐,李世奇,等. 大气偏振模式图分布及仿生偏振导航技术[J]. 遥感学报,2018,22(6):969-979

[8] 刘亦博,吴传文,周宗锟,等. 融合SuperGlue方法的深度单目视觉惯性导航算法[J]. 测绘通报,2024(2):113-117

[9] 穆梦雪,赵龙. 车载GNSS/SINS/里程计分布式弹性融合导航方法[J]. 测绘学报,2024,53(3):425-434

[10] 唐卫明,戚克培,邓辰龙,等. 因子图框架下里程计辅助GNSS/INS组合导航算法[J]. 测绘通报,2024(3):63-68

[11] 肖云,张锦柏,曹杰,等. 多属性决策理论的重力匹配导航适配性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1 089-1 099

[12] 尤政,赵开春. 仿生偏振特征感知与导航信息融合的空间态势感知系统[J]. 遥感学报,2018,22(6):917-925

[13] 邱权,胡青含,樊正强,等. 基于自适应系数卡尔曼滤波的农业移动机器人组合定位[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊):36-43

[14] Ali U, Muhammad W, Irshad J M S. Multi-sensor Fusion for Underwater Robot Self-localization Using PC/BC-DIM Neural Network[J]. Sensor Review,2021,41(5):449-457