
碳
效
应
研
究

不同碳排放情景下中国土地利用变化的空间分异与动态分析

刘靖^{1,2,3}, 毋冰龙^{1,2,3}, 王红雷^{1,2,4}, 韦革宏⁵

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 生命科学学院, 作物抗逆与高效生产全国重点实验室, 陕西农业与环境微生物重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 系统分析不同碳排放情景下中国及各省的土地利用时空变化特征, 旨在为制定区域性土地利用规划和应对气候变化政策及中国未来土地利用规划和可持续发展提供数据支持和理论依据。[方法] 基于 2015—2100 年的土地利用数据, 结合土地利用转移矩阵和动态度指标, 分析中国土地利用的时空变化特征。[结果] ①在 SSP126(低碳排放)和 SSP245(中等碳排放)情景下, 耕地、建设用地和未利用地总体呈增加趋势, 草地和林地减少, 其中草地减少最为显著; SSP585(高碳排放)情景下, 耕地、草地和建设用地增加, 林地和未利用地大幅减少。土地利用转移方面, 林地转为耕地和草地, 未利用地与草地转化最为频繁。②2015—2030 年, 土地利用变化最为剧烈, SSP585 情景下动态度最高, 主要表现为草地和未利用地转为耕地与建设用地。③2030—2060 年, 变化幅度减小, 西部地区变化较平稳, SSP245 情景下四川、甘肃和黑龙江等省份的变化趋于稳定。④2060—2100 年, 气候变化影响减弱, 变化总面积显著减少, 特别是在 SSP585 情景下, 西部省份变化仍较为明显, 而东部省份变化趋缓。[结论] 中国的土地利用变化将受到碳排放情景、区域经济发展与城市化进程的影响, 呈现显著的时空异质性和区域差异性。

关键词: 土地利用变化; 动态度; 转移矩阵; 时空特征; 中国

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0233-11

中图分类号: F301.24

文献参数: 刘靖, 毋冰龙, 王红雷, 等. 不同碳排放情景下中国土地利用变化的空间分异与动态分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 233-243. Liu Jing, Wu Binglong, Wang Honglei, et al. Spatial differentiation and dynamic analysis of land use change in China under different carbon emission scenarios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 233-243. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.006; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.006.

Spatial differentiation and dynamic analysis of land use change in China under different carbon emission scenarios

Liu Jing^{1,2,3}, Wu Binglong^{1,2,3}, Wang Honglei^{1,2,4}, Wei Gehong⁵

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of

Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

5. College of Life Sciences, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Crop Stress Resistance and High-Efficiency

Production, Shaanxi Key Laboratory of Agricultural and Environmental Microorganism, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal change characteristics of land use in China and each province under different carbon emission scenarios were systematically analyzed, in order to provide data support and theoretical

收稿日期: 2024-12-08

修回日期: 2025-03-24

采用日期: 2025-03-24

资助项目: 国家重点研发计划重点专项青年科学家项目“西北旱区中低产田土壤质量提升的功能微生物组挖掘与产品设计”(2021YFD1900500)

第一作者: 刘靖(1998—), 女(汉族), 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为作物产能与土壤健康。Email: liujing221@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 王红雷(1983—), 男(汉族), 河南省永城市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤地力提升与生态修复的研究。Email: wanghonglei@nwsuaf.edu.cn。

basis for formulating regional land use planning and policies to cope with climate change, as well as future land use planning and sustainable development in China. [Methods] Based on land use data from 2015 to 2100, combined with land use transfer matrix and dynamic attitude index, this paper analyzed the temporal and spatial characteristics of land use change in China. [Results] ① Under SSP126 (low carbon emission) and SSP245 (medium carbon emission) scenarios, cultivated land, construction land and unused land showed an overall increase trend, while grassland and forest land decreased, and grassland decreased most significantly. Under the SSP585 (high carbon emission) scenario, cultivated land, grassland and construction land increase, while forest land and unused land decrease significantly. In terms of land use transfer, forest land was converted into cultivated land and grassland, and unused land and grassland were converted most frequently. ② From 2015 to 2030, the land use change is the most drastic, and the dynamic attitude under the SSP585 scenario is the highest, which is mainly manifested as the conversion of grassland and unused land into cultivated land and construction land. ③ From 2030 to 2060, the change amplitude decreases, and the change in the western region is relatively stable, and the change in Sichuan, Gansu and Heilongjiang provinces tends to be stable under the SSP245 scenario. ④ From 2060 to 2100, the impact of climate change will weaken, and the total change area will decrease significantly. Especially under the SSP585 scenario, the change of western provinces is still more obvious, while the change of eastern regions will slow down. [Conclusion] China's land use change would be affected by carbon emission scenario, regional economic development and urbanization process, showing significant spatiotemporal heterogeneity and regional differences.

Keywords: land use change; dynamic degree; transfer matrix; spatiotemporal characteristics; China

21 世纪以来,随着城市化进程的加快,大规模的人类活动导致了土地利用的剧烈变化,进而影响了全球气候变化、物种多样性及生态环境,对全球生态系统和人类生存发展产生了显著的负面效应^[1-2]。土地利用/覆被变化是一个国家或者区域生态环境变化与经济主要表现和重要驱动力,对实现碳中和至关重要^[3]。因此,为了实现人类与环境的可持续发展,多个研究计划应运而生,如土地利用/覆被变化科学研究计划、全球土地计划(global land project, GLP)和未来地球(Future Earth)计划等,土地利用变化问题愈发受到重视^[2,4-5]。在全球气候变化和社会经济发展的双重影响下,深入研究不同碳排放情景下土地利用的时空演变特征,不仅有助于理解土地利用动态及其驱动机制,也为制定科学合理的土地利用规划、优化资源配置和应对气候变化提供重要的理论支持,为土地利用变化研究提供了重要的数据支撑^[6-7]。

随着全球气候变化的加剧,土地利用格局的演变不仅影响生态系统稳定性,还对碳循环、粮食安全和区域可持续发展产生深远影响。Yin Chuanbin 等研究发现土地利用结构变化引起碳排放的空间差异主要受人口密度、碳排放强度和技术创新的影响^[8]。Zhang Tianhai 等^[9]发现厦门市的快速城市化带来的耕地减少和人口增加,导致 2018 年人均农作物产量下降到 6 kg,仅为中国平均水平的 1%。欧阳晓等^[10]

研究发现长株潭城市群耕地、林地和建设用地为影响生态系统健康的关键土地利用类型。关键土地利用类型对生态系统健康的影响存在阈值,当耕地所占比例 $\geq 1.98\%$,林地所占比例 $\geq 7.58\%$,建设用地所占比例 $\leq 19.80\%$ 时,生态系统健康能达到中等水平。这些研究主要分析土地利用变化对生态、经济和粮食安全的影响,缺乏对未来土地利用变化的研究。

随着第六次耦合模式比较计划(CMIP6)的推出,越来越多的学者对未来不同情景下的土地利用变化进行了模拟。例如,Zhang Shengqing 等^[11]通过 GEE 平台和 PLUS 模型对长江流域中游未来情景的土地利用变化进行了模拟。王子尧等^[12]结合 SD 模型和 PLUS 模型,动态模拟了城市尺度的土地利用变化。Chen Min 等^[13]使用 GCAM 模型模拟了不同气候情景下全球主要国家和地区的土地利用变化。Zhang Shihe 等^[14]基于 2000—2020 年福建三角洲地区土地利用数据预测 2050 年不同情景下的土地利用变化,结果表明 2050 年城镇用地继续向西、向北扩展,东部地区将有大量耕地转化为城镇用地。Wei Yali 等^[15]通过 PLUS 模型的 Markov 模块和 Matlab 软件模拟成都平原各情景下的未来土地利用变化,发现成都平原耕地、建设用地和林地不同情景下的空间分布特征和变化趋势显著,主要体现在耕地和建设用地的变化较为剧烈及林地的生态保护型情景下的增长。然而当前的土地利用模拟研究主要聚焦于城市群、流域和

生态保护区等特定区域^[16-17],尚未开展针对中国及各省的全面系统性分析。

综上所述,本文利用2015—2100年1 km²分辨率的中国土地利用模拟数据,结合土地利用转移矩阵和动态度指标,系统分析不同碳排放情景下中国及各省的土地利用时空演变特征。研究结果可为优化区域土地利用规划、制定应对气候变化的政策以及推动中国未来土地利用可持续发展提供数据支持和理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

2015—2100年土地利用数据来源于黎夏团队在2022年发布的共享社会经济路径和代表性浓度路径(SSP-RCP)情景下1 km²分辨率的全球土地利用与土地覆盖变化(LUCC)模拟产品(<http://www.geosimulation.cn/GlobalSSPsUrbanProduct.html>),该产品基于IGBP全球植被分类方案,将土地覆盖类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地、湿地和冰川等8类土地利用类型。本文选择了SSP126, SSP245和SSP585三个具有代表性的情景进行分析。其中SSP126代表低碳排放情景,SSP245代表中等碳排放情景,SSP585代表高碳排放情景。该数据集结合了CMIP6官方数据集提供的自上而下土地需求约束与元胞自动机(CA)执行的自下而上空间模拟。通过结合官方数据源的土地需求,确保了不同SSP—RCP情景下土地轨迹的权威性,并能更好地反映空间细节,相比现有的全球SSP—RCPs数据集,减少了空间不确定性。

此外,该数据的拟合精度已经得到了验证,2000—2010年全球土地利用模拟的17个地区的FoM平均值为19%^[18],表明该模拟产品能捕捉大部分土地利用的实际情况。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用转移矩阵

本研究通过ENVI软件制作2015—2100年中国不同情景下的土地利用转移矩阵,用来分析土地利用类型的动态变化^[19]。计算公式为:

$$T = (T_{ij}) = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & \dots & T_{1(n-1)} & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & \dots & T_{2(n-1)} & T_{2n} \\ \vdots & & & & & \\ T_{n1} & T_{n2} & T_{n3} & \dots & T_{n(n-1)} & T_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: T 表示土地利用转移矩阵, n 表示土地利用类型的总数, i 和 j 表示研究时期开始和结束的土地利用类

型, T_{ij} 表示从类型 i 到 j 的土地利用转变。

1.2.2 综合土地利用动态度

综合土地利用动态度用来描述整个区域土地利用变化的总体速度^[16,20],其计算公式为:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n |U_i - U_j|}{\sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L 为区域综合土地利用动态度; U_i, U_j 分别为研究初期及末期某种土地类型的面积; n 为土地类型数($n=1, 2, 3, \dots$); T 为研究时段。

1.2.3 自然间断点法

自然断点法是一种数据分类方法,旨在根据数据本身的分布特征,将数据划分为若干类别,使得类别内部的差异最小化,而类别之间的差异最大化。因此,本研究通过该方法对土地利用动态度数据进行分类。

2 结果与分析

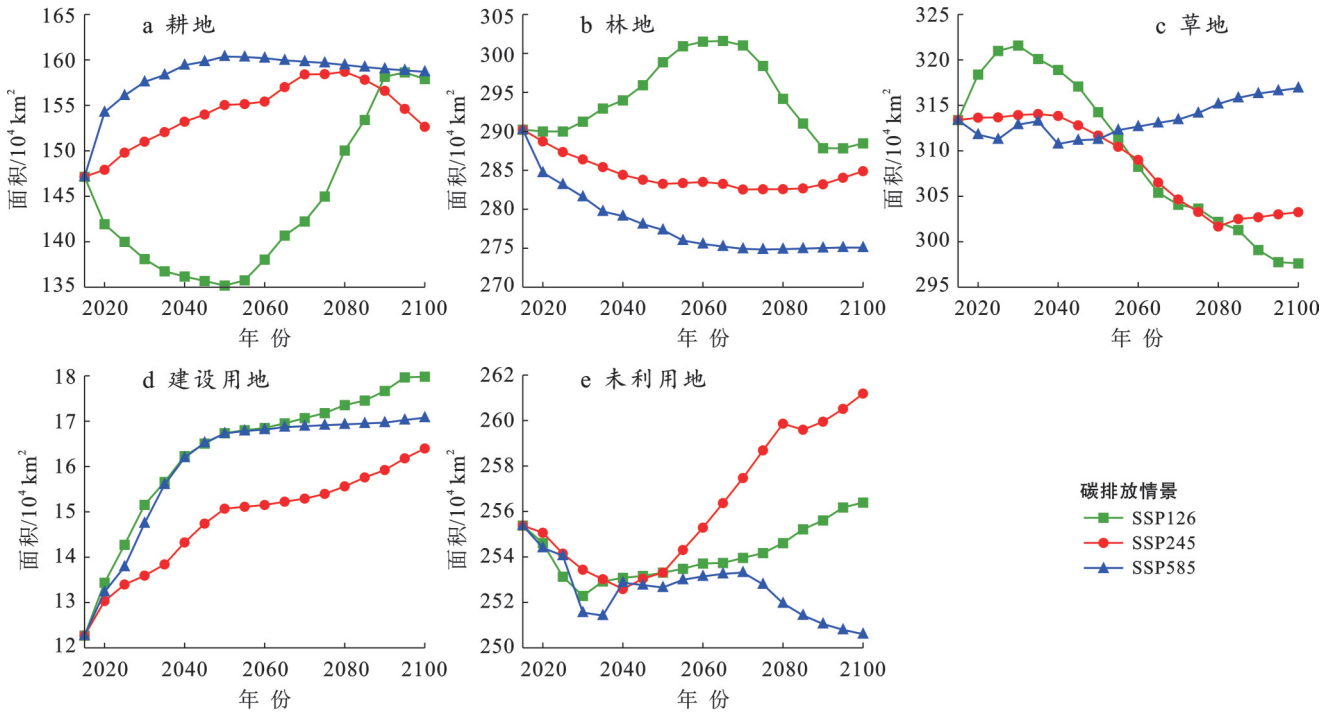
2.1 2015—2100年中国土地利用变化的总体特征

中国在2015—2100年期间不同情景下的土地利用类型面积变化如图1所示。中国土地利用变化在不同情景下呈现显著差异。耕地面积变化呈现情景依赖性,2015—2050年减少 8.97×10^5 km², 2050—2100年增加 2.27×10^5 km², 总体增加 1.07×10^5 km²; 而SSP245和SSP585情景分别减少 5.34×10^4 km²和 1.51×10^5 km²。林地面积普遍缩减,SSP126情景减少 1.31×10^5 km², SSP245和SSP585分别减少 5.34×10^4 km²和 1.51×10^5 km²,表明高排放情景加速林地流失。草地变化呈现两极分化,SSP126和SSP245分别减少 1.58×10^5 km²和 1.02×10^5 km², 而SSP585增加 3.54×10^4 km²,反映出气候条件对草地演变的双向调节作用。建设用地持续扩张且增幅梯度明显,SSP126增幅最大,SSP585次之,SSP245最小,表明可持续发展路径更需关注土地开发管控。未利用地演变呈现情景逆转特征,SSP126和SSP245分别增加 1.02×10^4 km²和 5.81×10^4 km², 而SSP585减少 4.78×10^4 km²,揭示不同气候情景对土地恢复潜力的差异化影响。

中国土地利用呈现明显的空间分异特征(图2)。耕地主要集中在中国的东北三省、东部地区的河北、山东和江苏省,中部地区的河南和湖北省,西部的四川、陕西和甘肃省;林地主要分布在东北的大小兴安岭和长白山,东部的福建、台湾、广东和浙江,西部的四川、西藏、陕西、贵州、云南和广西,中部的湖北、湖南、江西和安徽;草地则主要分布在西部的内蒙古、

宁夏、甘肃、青海、四川和西藏,中部的山西和河北。建设用地则集中在主要城市群的周边,如京津冀、粤

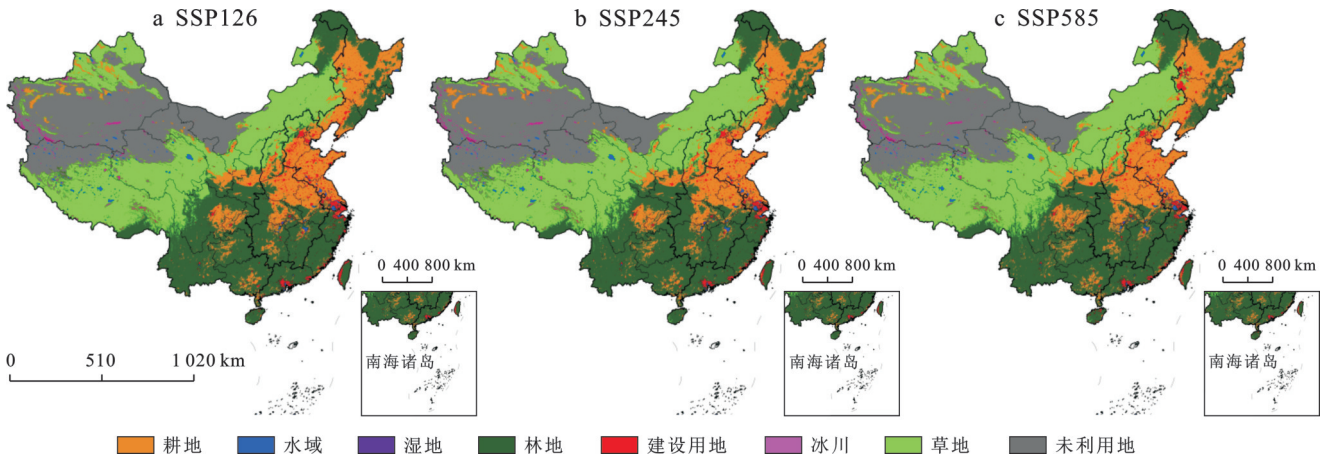
港澳大湾区和长三角城市群等;未利用地则主要分布在西部地区的新疆、内蒙古、甘肃、青海和西藏。



注:图中 SSP126 为低碳排放; SSP245 为中碳排放 SSP585 为高碳排放。下同。

图 1 2015—2100 年中国不同碳排放情景下的不同土地利用面积变化

Fig.1 Change of land use area under different carbon emission scenarios in China from 2015 to 2100



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图(审图号为GS(2024)0650号)绘制,底图无修改,下同。

图 2 2100 年中国不同碳排放情景下的土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in China in 2015 and 2100 under different carbon emission scenarios

从土地利用转移矩阵图和空间分布(图3—5)可见,2015—2030年间,不同情景下土地利用变化呈现不同特点。SSP126情景下,耕地流转面积最大,占36%,主要流转为草地、林地和建设用地,流转地区集中在内蒙古自治区、甘肃省、山西省等省份。未利用地和草地流转分别占27%和24%,未利用地主要流转为草地,草地主要流转为未利用地、耕地和林

地,集中在西藏自治区、新疆维吾尔自治区和甘肃省。SSP245情景中,草地流转面积最大,占37%,主要流转为耕地、未利用地和林地,草地流转为耕地的热点地区为新疆维吾尔自治区、黑龙江省和辽宁省。SSP585情景下,林地和草地流转分别占38%和35%,流转主要为耕地和草地,热点区域包括黑龙江省、广西壮族自治区和四川省。2030—2060年间,

SSP126, SSP245, SSP585 情景下, 草地流转面积始终居首, 所占比例分别为 56%, 45% 和 39%, 主要流转为林地、未利用地和耕地, 热点地区包括四川省、云南省、新疆维吾尔自治区等地。2060—2100 年间, SSP126 情景下草地流转为耕地和未利用地, 流转地区为甘肃省、山西省等地, 林地流转为耕地的热点集

中在四川省、广西壮族自治区等地。SSP245 草地流转最多, 占 48%, 主要流转为未利用地和耕地, 流转地区为新疆维吾尔自治区、西藏自治区、甘肃省等地。SSP585 情景下, 未利用地和草地的流转面积所占比例分别为 41% 和 30%, 主要发生在新疆维吾尔自治区和西藏自治区。

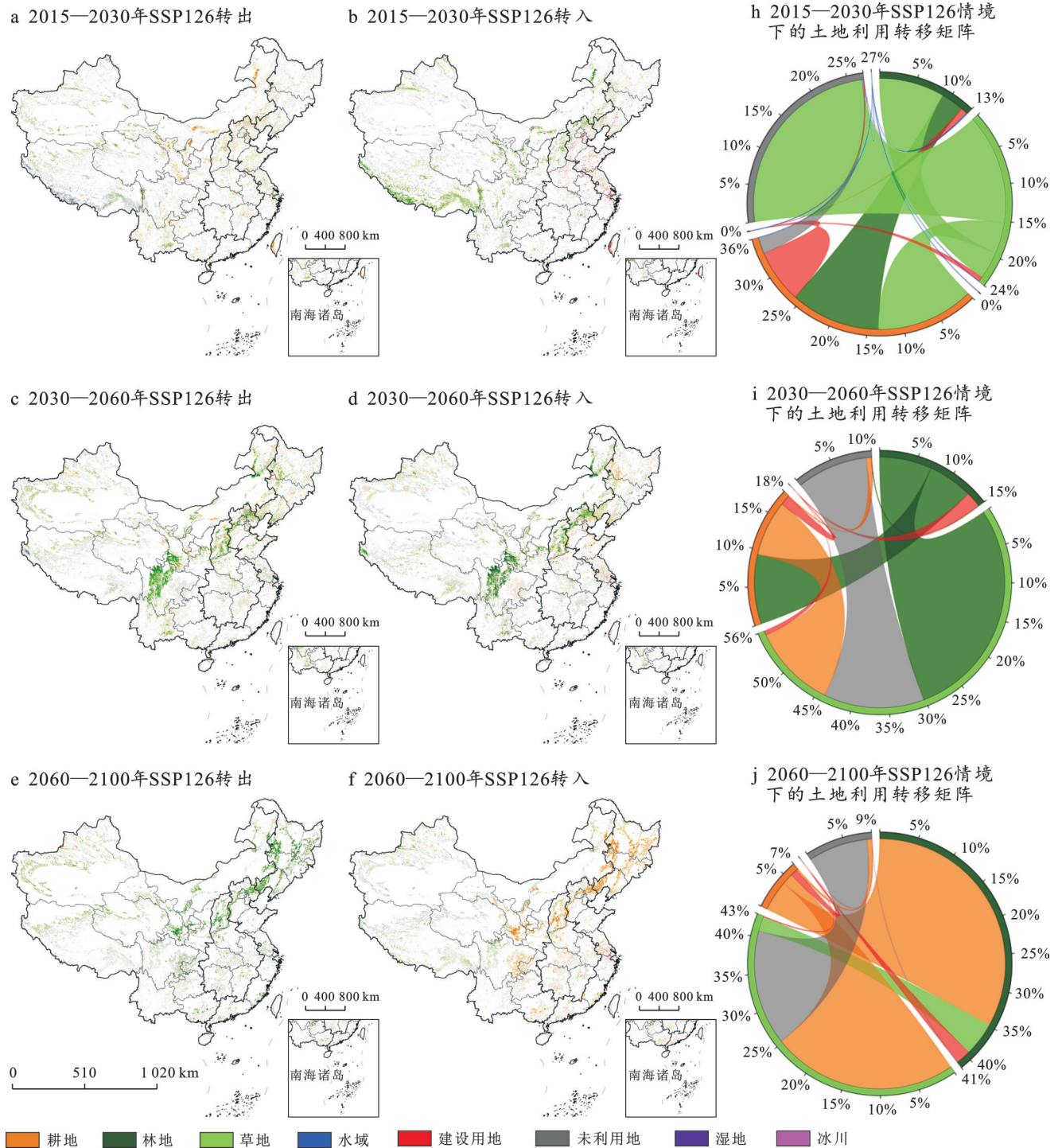


图3 2015—2100年 SSP126情景下中国的土地利用空间变化
 Fig.3 Spatial changes of land use in China under SSP126 scenarios from 2015 to 2100

2.2 2015—2100年中国土地利用动态变化特征

通过方差分析对 SSP126, SSP245 和 SSP585 在 2015—2030 年, 2030—2060 年和 2060—2100 年 3 个时期的土地利用动态度进行显著性检验, 在 SSP126,

SSP245 和 SSP585 这 3 个情景下, 土地利用动态度的 F 值分别为 7.98, 22.97, 37.12, 且 p 值均小于 0.05, 表明 3 个情景下的不同时期土地利用动态度变化均表现出显著差异。

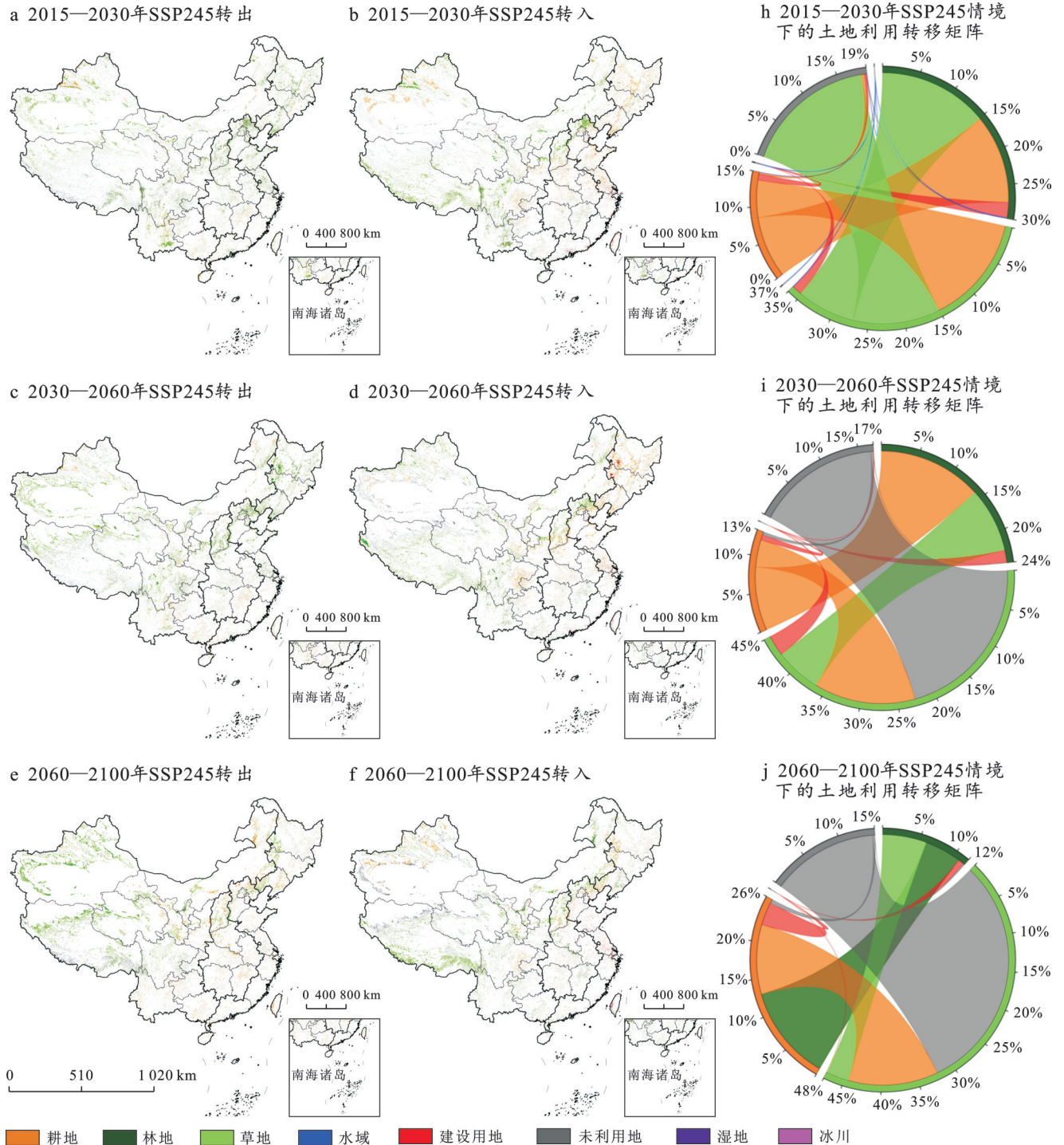


图 4 2015—2100年 SSP245 情景下中国的土地利用空间变化

Fig.4 Spatial changes of land use in China under SSP245 scenarios from 2015 to 2100

本研究通过自然间断点法将土地利用动态度分为 $<0.06\%$, $[0.06\%, 0.20\%)$ 和 $\geq 0.20\%$ 这 3 类。在 2015—2100 年的 3 个阶段, 土地利用动态度表现出显

著的变化(图 6)。2015—2030 年是土地利用动态度最强的时期, SSP126, SSP245 和 SSP585 情景下高强度的省份数量分别为 20, 21, 23 个, 中强度省份分别

为12,10,8个,低强度省份分别为2,3,3个。多个省份如内蒙古自治区、山西省、湖北省、福建省等在3个情景下均为高强度地区。

中国的其他省份,如辽宁省、河北省、宁夏回族自

治区等为中强度地区,山东省则为低强度地区。河南省和新疆维吾尔自治区的动态在不同情景下有不同表现,部分地区如重庆市和浙江省在不同情景下分别表现为中高或低强度。

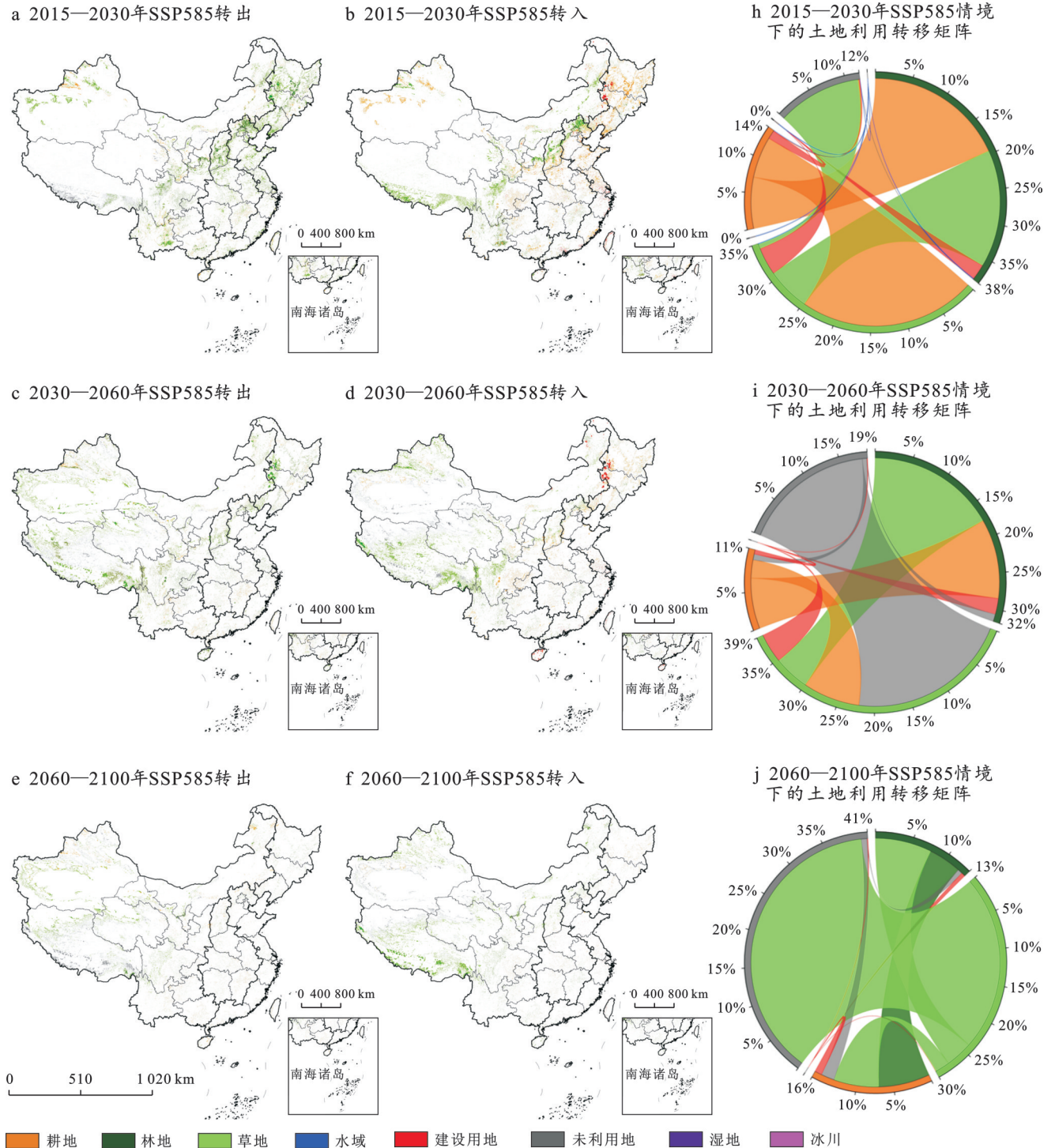


图5 2015—2100年 SSP585情景下中国的土地利用空间变化

Fig.5 Spatial changes of land use in China under SSP585 scenarios from 2015 to 2100

在2030—2060年,高强度地区大幅减少, SSP126, SSP245和 SSP585情景下的高强度省份分别为10,12,4个,中强度省份分别为16,16,13个,低

强度省份分别为8,6,17个。此阶段,云南省依旧为高强度地区,而其他省份如海南省、台湾省和天津市则转为中强度,部分地区如香港特别行政区、河南

省、河北省和福建省转为低强度。此时,多个省份如江苏省、四川省、吉林省、贵州省等在高排放情景下的动态度逐渐减弱,成为低强度区。在2060—2100年,土地利用动态度进一步减弱,高强度省份区显著减少,分别为10,2,0个,中强度省份分别为12,12,4个,低强度省份则大幅增加,分别为12,20,30个。江

西省、湖南省、湖北省等省份在3个情景下均为低强度地区。部分省份如黑龙江省、辽宁省、香港特别行政区和青海省在SSP126下为高强度,但在SSP245和SSP585下变为低强度。总体来看,随着时间的推移,各省份的土地利用动态度逐步降低,高强度地区的数量大幅减少,低强度地区的比例显著上升。

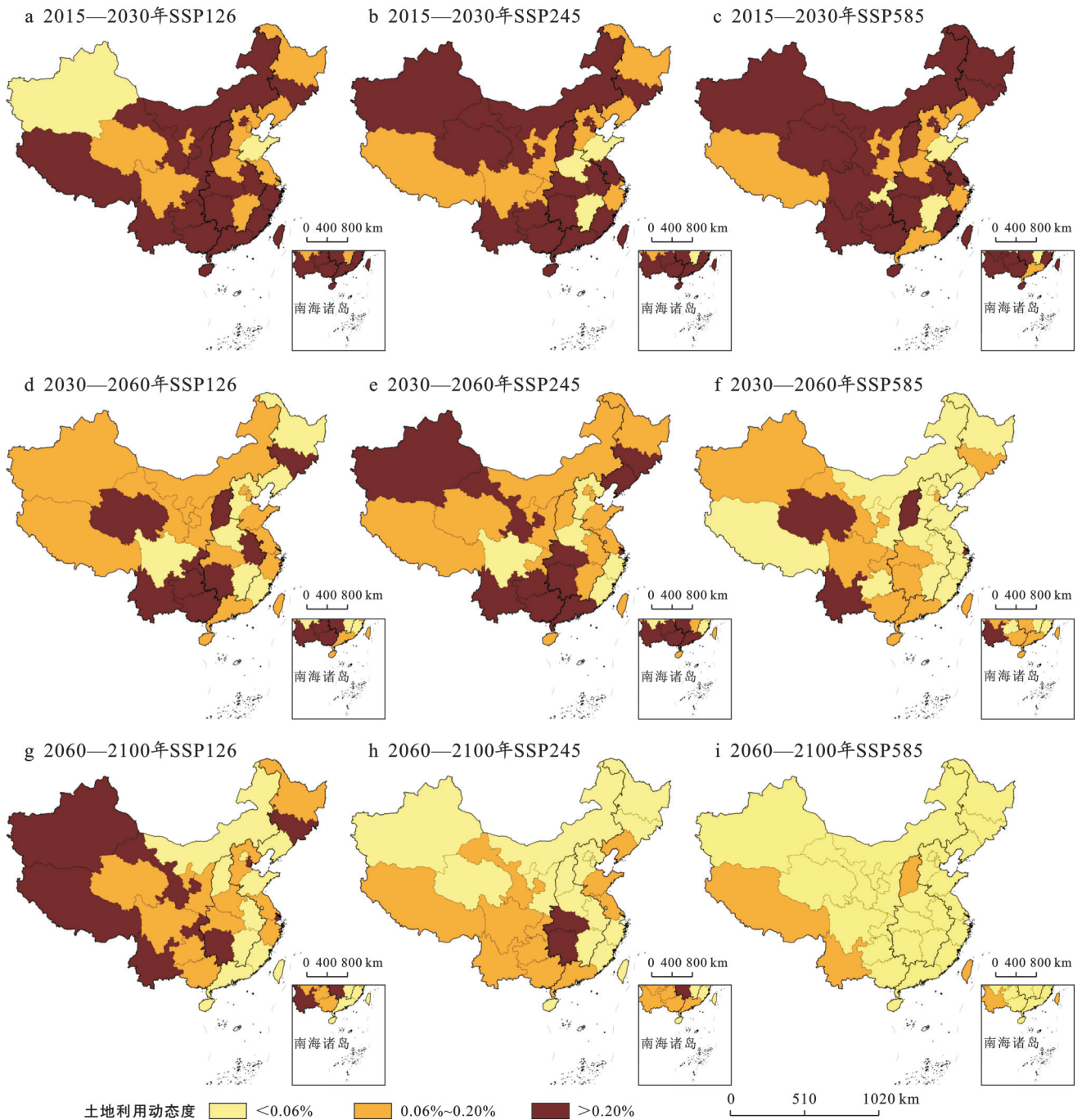


图 6 2015—2100年中国各省份不同情景下的土地利用动态度

Fig.6 Land use dynamics in various provinces in China from 2015 to 2100 under different scenarios

3 讨论

本研究基于2015—2100年不同情景下的土地利

用变化数据,系统分析了中国各省土地利用类型的时空分布特征和转移过程,并探讨了不同情景下土地利用变化的区域差异与趋势。研究结果表明,未

来中国的土地利用变化将受到碳排放情景、区域经济发展以及城市化进程的共同影响,表现出明显的时空异质性和区域差异性。

3.1 土地利用类型的变化趋势

从全国和省级层面来看,耕地、建设用地和未利用地在未来将呈现不同程度的增加趋势,尤其是在低碳排放情景(SSP126)下,耕地和建设用地的面积增加更加显著。耕地的增加,主要来源于林地和草地的转化,这与我国农业生产结构调整^[22]和土地资源开发^[23]密切相关,同时也与低碳排放情景时耕地面积增加、草地面积减少^[19]的约束条件相关。SSP126情景下,政府的低碳政策和生态保护机制可能导致农业用地的增加,并影响森林和草地的利用方式。然而,SSP126情景下的这一趋势并非简单的“土地交换”,而是与区域经济发展、政策调控、气候变化等^[3,24]多重因素交织。低碳情景下的土地资源开发受到严格限制,且生态补偿机制的加强,可能引导土地利用向可持续发展方向转变。这种转变不仅仅是资源的转移,更是政策调控与区域发展策略之间的博弈。

林地面积在大多数情景下呈减少趋势,尤其是在SSP585情景下,林地减少尤为显著。这与高碳排放情景下林地面积显著减少的约束条件密切相关^[19],同时,这一现象背后是全球气候变化^[25]的影响加剧以及国内森林资源管理政策的调整^[26]。全球气候变暖导致的生态环境恶化,尤其是极端天气事件的增加,显著加速了林地的减少^[27]。此外,国家对林地保护和恢复的政策变化,也影响了土地的利用格局。高排放情景对林地和其他生态系统的压力更大^[19],加剧了生态系统的脆弱性。

未利用地的变化则呈现较大的空间差异。低碳排放情景下,未利用地的面积逐渐增加,这反映了土地利用逐步向生态保护和自然恢复的方向转变。这一现象并非单纯的“土地闲置”,而是生态恢复政策和环保法规逐步生效的结果。然而,在高碳排放情景下,建设用地显著增加的约束条件^[19]可能导致了未利用地面积大幅减少,城市化进程和经济发展带来的土地开发需求大大超出了生态恢复的速度,导致生态系统的负担加重^[28]。城市化的加剧^[29]和经济活动的扩大导致了未利用地转化为建设用地和农业用地的趋势,这一转化也引发了对生态平衡的进一步挑战。

3.2 土地利用转移模式的空间差异

在土地利用转移模式的空间差异中,西部和北部地区,尤其是新疆、甘肃、内蒙古和西藏的草地和未利用地转化为耕地、建设用地的趋势较为显著,这

种趋势在不同情景下具有不同的表现形式。在低碳排放情景下,由于政策对生态保护和土地复合利用的偏向,西部地区的土地转化更为注重可持续发展,草地转化为耕地的情况较为温和。而在高碳排放情景下,区域发展压力增大,土地资源的过度开发更加突出^[30],草地和未利用地的转化速度也显著加快。在这一过程中,气候变化对土地利用的影响尤为显著,极端气候事件可能加剧草地退化^[31],迫使这些区域的土地快速转化为农业用地和建设用地,甚至加剧了土地沙漠化和荒漠化的过程。相反,东部和南部地区土地利用的变化较为稳定,主要表现为农业用地向林地或建设用地的转化,这种变化反映了该地区的高城市化水平以及土地资源紧张。特别是在长三角、珠三角等城市群周边,城市化进程^[29,32]和基础设施建设的扩展推动了建设用地的增加。在这一过程中,土地流转主要集中在土地复合利用、城乡一体化等方向,而非单纯的农业扩张或生态恢复。这种差异的背后,除了区域经济发展速度、政策引导外,也与各地气候变化对农业生产模式的影响^[33]相关。在高碳排放情景下,东部和南部的土地利用变化虽然较为平缓,但仍受到经济发展和城市化的推动,特别是在建设用地和城市扩张的推动下,土地变化仍具有显著的空间和时间差异。

3.3 研究局限与展望

尽管本研究采用了情景分析方法,为理解未来土地利用变化提供了有价值的框架,但也存在一些局限性。首先,情景分析依赖于假设设定,这些设定无法全面涵盖所有可能的社会经济变化与政策调控。例如,全球经济危机、技术进步或社会政策的重大变动,可能会对土地利用产生突发且非线性的影响^[34],而这类突发事件难以在情景模型中精确模拟。其次,本研究主要聚焦于宏观层面的土地利用变化,忽略了不同地区的社会经济差异和地方性政策的多样性,未能考虑这些地方性因素对土地利用变化的具体驱动作用。例如,人口迁移、地方性政策调整、产业结构变化等都会对土地利用产生不同程度的影响,但这些因素在本研究中未被充分探讨。未来的研究应更加注重区域差异性,结合具体地区的社会经济、政策导向和人口变动等因素,提升模型的精确度和预测的实用性。

4 结论

(1) 在SSP126和SSP245情景下,草地和林地面积显著减少,耕地、建设用地和未利用地面积增加。SSP585情景下,耕地、建设用地和草地大幅增加,林

地和未利用地面积显著减少,显示高碳排放情景下土地利用变化加剧,特别是建设用地和耕地扩张。

(2) 土地利用转移表现出明显的区域差异,西北和西部地区草地与未利用地转为耕地和建设用地趋势明显,尤其在高排放情景下更为显著;东南部地区则主要表现为农业用地转化为建设用地或林地。未利用地主要分布在西北和西南地区。

(3) 2015—2030年间,土地利用动态度最大,尤其在高排放情景下。2030—2060年,动态度下降,部分省份进入低强度区。2060—2100年,动态度进一步减弱,西部地区变化逐渐缩小,而东部地区土地利用变化主要集中在建设用地扩展,变化速率减缓。

参考文献(References)

- [1] Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez R, Kraxner F, et al. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 12-23.
- [2] Alexandru A, Sushama L. Impact of land-use and land-cover changes on CRCM5 climate projections over north America for the twenty-first century [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(3): 1197-1209.
- [3] Chen Jiandong, Liu Miaomiao, Chen Xingyu, et al. Spatio-temporal evolution, driving mechanisms, and simulation of land use and cover in China from 2000 to 2060 [J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2024, 17(4): 1631-1652.
- [4] Jing Qiaoqiao, He Jianjun, Li Yarong, et al. Analysis of the spatiotemporal changes in global land cover from 2001 to 2020 [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 908: 168354.
- [5] Xing Lu, Hu Mingsheng, Wang Yi. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: A case study of Hubei Province, Central China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 740: 140126.
- [6] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6/7): 1303-1330.
- [7] 陈军,陈晋,廖安平,等.全球30m地表覆盖遥感制图的总体技术[J].测绘学报,2014,43(6):551-557.
Chen Jun, Chen Jin, Liao Anping, et al. Concepts and key techniques for 30 m global land cover mapping [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6): 551-557.
- [8] Yin Chuanbin, Zeng Si, Liu Dan. Carbon emission effects of land use structure changes and their driving factors: A case study of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2025, 16(1): 132-147.
- [9] Zhang Tianhai, Sun Wenqing, Xiao Jiangtao, et al. The impact of land use change on food security under the background of rapid urbanization: A case study of Xiamen City [J]. *Environmental Research Communications*, 2024, 6(10): 105006.
- [10] 欧阳晓,陈键,魏晓,等.长株潭城市群土地利用变化对生态系统健康影响的关键类型及阈值效应[J].地理科学,2024,44(11):1946-1954.
Ouyang Xiao, Chen Jian, Wei Xiao, et al. Exploring key types and threshold effects of land use change impact on ecosystem health in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(11): 1946-1954.
- [11] Zhang Shengqing, Yang Peng, Xia Jun, et al. Land use/land cover prediction and analysis of the middle reaches of the Yangtze River under different scenarios [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 833: 155238.
- [12] Wang Ziyao, Li Xin, Mao Yueting, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108499.
- [13] Chen Min, Vernon C R, Graham N T, et al. Global land use for 2015—2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios [J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 320.
- [14] Zhang Shihe, Zhong Quanlin, Cheng Dongliang, et al. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108642.
- [15] Wei Yali, Zhou Peiyun, Zhang Luoqi, et al. Spatio-temporal evolution analysis of land use change and landscape ecological risks in rapidly urbanizing areas based on multi-situation simulation: A case study of Chengdu Plain [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112245.
- [16] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.
- [17] 史培军,陈晋,潘耀忠.深圳市土地利用变化机制分析[J].地理学报,2000,55(2):151-160.
Shi Peijun, Chen Jin, Pan Yaozhong. Landuse change

- mechanism in Shenzhen City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000,55(2):151-160.
- [18] Li Xia, Chen Guangzhao, Liu Xiaoping, et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1 km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017,107(5):1040-1059.
- [19] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].*地理学报*,2003,58(5):643-650.
Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003,58(5):643-650.
- [20] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].*地理科学进展*,1999,18(1):81-87.
Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. *Progress in Geography*, 1999,18(1):81-87.
- [21] 申雅娜.粮食安全视角下的农业产业结构调整与优化策略[J].*中国种业*,2024(6):42-43.
Shen Yana. Optimization strategies for agricultural industry structure adjustment from the perspective of food security [J]. *China Seed Industry*, 2024(6):42-43.
- [22] 赵威,薛领.区域开发策略对农业土地利用格局影响的动态模拟:以云南省为例[J].*开发研究*,2022(5):58-71.
Zhao Wei, Xue Ling. Dynamic simulation of the impact of regional development strategy on agricultural land use pattern: A case study of Yunnan Province [J]. *Research on Development*, 2022(5):58-71.
- [23] Wang Jing, Chen Yongqi, Shao Xiaomei, et al. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future [J]. *Land Use Policy*, 2012,29(4):737-749.
- [24] Esperon-Rodriguez M, Tjoelker M G, Lenoir J, et al. Climate change increases global risk to urban forests [J]. *Nature Climate Change*, 2022,12(10):950-955.
- [25] 郑瑀豪,杨超,杜德斌,等.1949年以来中国林业政策的主题演进及变迁逻辑[J].*世界林业研究*,2024,37(2):110-116.
Zheng Yuhao, Yang Chao, Du Debin, et al. Thematic evolution and transition logic of China's forestry policy since 1949 [J]. *World Forestry Research*, 2024,37(2):110-116.
- [26] Shi Han, Peng Xi, Zhou Yongjiao, et al. Resilience and response: Unveiling the impacts of extreme droughts on forests through integrated dendrochronological and remote sensing analyses [J]. *Forest Ecosystems*, 2024,11:100209.
- [27] Chen Wanxu, Gu Tianci, Xiang Jingwei, et al. Ecological restoration zoning of territorial space in China: An ecosystem health perspective [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,364:121371.
- [28] Hu Yi'na, Connor D S, Stuhlmacher M, et al. More urbanization, more polarization: Evidence from two decades of urban expansion in China [J]. *NPJ Urban Sustainability*, 2024,4:33.
- [29] Wu Hao, Yang Yi, Li Wen. Spatial optimization of land use and carbon storage prediction in urban agglomerations under climate change: Different scenarios and multiscale perspectives of CMIP6 [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024,116:105920.
- [30] Liu Peipei, Lv Wangwang, Sun Jianping, et al. Increased frequency of extreme climatic events weakens the community stability of grassland under directional climate changes by reducing resilience [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2024,33(6):e13824.
- [31] Li Hongye, Hu Yutian, Li Hao, et al. Assessing the impact of spatiotemporal evolution of urbanization on carbon storage in the mega-urban agglomeration area: Case study of Yangtze River delta urban agglomeration, China [J]. *Sustainability*, 2023,15(19):14548.
- [32] Zong Xuezheng, Liu Xiaojie, Chen Gang, et al. A deep-understanding framework and assessment indicator system for climate-resilient agriculture [J]. *Ecological Indicators*, 2022,136:108597.
- [33] Zeng Liangen, Yang Le, Su Lixin, et al. The impact of policies on land use and land cover changes in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025,110:107676.