

引用格式: 李天润, 陈爽. 1990年以来卢旺达森林转型路径及趋势模拟[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 494-507. [Li T R, Chen S. Forest transition paths in Rwanda since 1990 and trend prediction[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 494-507.] DOI: 10.18402/resci.2022.03.06

1990年以来卢旺达森林转型路径及趋势模拟

李天润, 陈爽

(南京信息工程大学地理科学学院/“一带一路”城市可持续发展研究院, 南京 210044)

摘要: 社会经济发展过程中一个国家(地区)森林面积由减少转为增加的“森林转型”内在驱动机制, 是资源环境研究关注的热点。以4期卢旺达土地覆盖数据为主要信息源, 分析1990—2015年该地区森林变化的趋势和时空特征。结合社会经济数据, 借助森林转型的路径分析法, 探究卢旺达森林面积变化的影响因素及其所遵循的转型路径。在此基础上, 利用PLUS模型对卢旺达2030年的森林空间动态分布进行模拟预测, 对如何继续保持良好转型态势提出相关建议。结果表明: ①卢旺达森林面积在2010年开始出现净增长, 由2010年的197383.2 hm²增加到2015年的213087.8 hm², 年增加率0.8%; ②国家公园和保护区是森林增长主要地区, 且主要来源于稀树草原和耕地, 分别占森林净增加总面积的87.8%和8.8%; ③转型的内在驱动机制主要是国家政策引导下发生的“国家森林政策路径”和“森林稀缺路径”, 全球化路径体现在植树技术与资金支持; ④对卢旺达2030年森林模拟预测显示, 森林转型仍将继续, 预计到2030年森林面积将净增加34065.2 hm²。为进一步提高研究区森林覆盖率, 卢旺达政府部门应改善森林恢复的薄弱环节, 加快农业集约化推广; 通过为农村社区创造场外就业机会, 引导经济和就业发生转型, 从而推动基于“经济发展路径”与“农村集约化路径”的森林增加。

关键词: 森林转型; 国家政策路径; 驱动机制; PLUS模型; 卢旺达

DOI: 10.18402/resci.2022.03.06

1 引言

毁林和森林退化一直是地球生态保护面临的一个主要挑战。自可持续发展目标提出以来, 人们更加意识到森林等自然资源所具有的生态功能的重要性, 并积极采取措施, 大幅开展植树造林活动, 以期恢复退化的森林, 实现森林的可持续管理。一个国家(地区)的森林在长期的经济发展中可能遵循从衰退到再生的规律性变化, 而国家政策可能推迟或加速逆转点的出现。Mather^[1]对发达国家长期土地利用变化研究后, 发现其森林面积普遍存在先减少后增加的规律, 并与国家社会经济发展变化相联系, 在1992年对此规律进行解释, 首先提出“森林转型”概念。

初期森林转型研究主要集中在欧美等发达国

家, 近年来, 发展中国家是否发生森林转型不断得到关注^[2,3]。Duan等^[2]对全球发展中国家的森林时空分布特征研究中, 以及Imai等^[3]对发展中国家森林砍伐和森林退化驱动力的评估研究中, 都发现一些热带发展中国家已经开始经历森林转型。其中卢旺达2020年森林资源评估报告^[4]显示, 其从2010年森林面积开始呈现净增长趋势, 是中非和西非国家中实现森林覆盖率发生趋势重大逆转的3个国家之一。Arakwiye等^[5]研究了1986—2019年卢旺达西部森林覆盖变化, 指出由于武装冲突、林产品过度开发等导致1986-2006年间大面积森林破坏, 之后国家强化森林保护引导政策, 在保护区周围和农业用地中建立人工林, 森林面积出现增长趋势, 到2019年森林覆盖率较1986年增长了17%。但是关于卢

收稿日期: 2021-07-06 修订日期: 2021-10-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0105900); 国家自然科学基金项目(41771140)。

作者简介: 李天润, 男, 河北沧州人, 硕士生, 研究方向为土地利用变化与资源可持续利用。E-mail: 20201210011@nuist.edu.cn

通讯作者: 陈爽, 女, 湖南湘潭人, 教授, 主要研究方向为城市生态及人居环境, 城市与区域可持续发展。E-mail: schens@nuist.ac.cn

2022年3月

旺达森林转型空间分布及驱动因素的相关研究还很少。通用的转型路径是否在卢旺达已起到强大推动作用?未来森林转型是否会继续?这些问题有待深入分析。因此,本文在前人研究的基础上,借助森林转型理论和路径假说分析,发掘卢旺达1990年以来森林变化的内在驱动机制,检验几种转型路径是否在该地区发生。利用土地利用/覆盖变化模拟模型,基于历史发展情景对卢旺达2030年土地覆盖情况进行模拟研究,以期对森林资源数量及空间分布进行合理预测;同时模拟结果可为区域土地可持续规划和自然资源的保护提供参考。

2 “森林转型”路径假说

“森林转型”(Forest Transition, FT)指一个国家(地区)森林面积由减少趋势逆转为增加趋势,其研究的主要问题是发生趋势逆转的影响因素与内在驱动机制^[6]。随着森林转型研究的不断发展,学者从森林资源的历史变化规律、与社会学-经济学系统间的联系、生态景观以及制度与政策的变迁等宏观和微观的多个角度^[6],在国家或省市级层面不断丰富“森林转型”的研究。目前因考虑多种转型类型和影响因素,转型路径的综合分析是发展较充分的一种方法。Rudel等^[7]根据一些国家的经验,分析确定了森林转型共同的发生机制,提出“路径假说”,其中“经济发展路径”可以在发达国家中普遍观察到^[8];而“森林稀缺路径”则主要发生于森林覆盖率急剧下降导致林产品价格上涨或应对森林砍伐造成的消极影响而引起的森林面积增加。此后,Lambin等^[9]和Meyfroidt等^[10]进一步将森林转型路径从2个完善到5个:提出“全球化路径”,国家经济和管理日益融入全球化市场并受其影响,便会出现

该路径;“国家森林政策路径”,也被称为政府主导路径,国家出台相关政策会对森林变化产生重大影响^[11];还提出另外一种“农业集约化路径”,与农林复合系统的发展以及废弃休耕地的次生演替有关,主要通过小农、土地利用集约化等途径增加森林覆盖率。路径分析框架已形成上述5种转型路径在内的分析方法,为后来研究各地区的森林转型提供了主要思路。每个国家(地区)社会经济发展条件背景不同,森林发生转型的过程和驱动因素具有差异性,每种路径具有不同的表现特征(表1),对转型的贡献程度也各不相同,因此需要对特定区域进行针对性分析。

3 研究思路、研究区、数据来源与研究方法

3.1 研究思路

本文首先将前人提出的5种森林转型路径的特征用作卢旺达社会经济数据分类的指南,对来自不同数据源的数据进行了汇总,在数据基础上采用开放式方法来分析转型路径。其次,借助1990—2015年土地覆盖数据,观察卢旺达森林面积时空变化,探究是否已经发生森林转型,处于转型的哪一阶段。利用森林转型的路径分析方法追踪该国森林资源退化与恢复的整个过程,探究其发生转型的内在驱动机制。最后,研究森林转型在卢旺达是否会继续保持良好的态势,引入PLUS模型实现该地区的森林空间分布动态模拟。

3.2 研究区概况

卢旺达共和国位于非洲东部,属于维多利亚湖流域,面积26338 km²。东部卡盖拉河是与坦桑尼亚的天然边界,北部与乌干达相邻,南部与布隆迪接

表1 森林转型路径特征

Table 1 Characteristics of forest transition pathways

转型路径	路径基本特征解释
经济发展路径	工业化与服务业增长吸引乡村劳动力;农业经济活动效益下降;边际化土地上乡村人口与耕地的减少;废弃耕地转化为森林
国家森林政策路径	国家愿意实现经济现代化;整合边缘较贫困社会群体;通过绿化国家形象促进旅游业,实施修复种植树木和植树项目;间接地提供农业补贴等激励措施加大森林恢复力度
全球化路径	林产品国际进出口;执行与林业实践有关的国际环境协定;国际间合作资助;森林管理全球化实践
森林稀缺路径	森林减少造成林产品价格激增;刺激农牧业向树木种植转型;政府应对森林稀缺引起的环境恶化,实施森林恢复和种植措施
农业集约化路径	放弃不适于耕种的土地;改良土地和实施集约化耕作;农林业系统的扩张;废弃休耕地发生演替

壤,西部与刚果民主共和国的边界主要由基伍湖构成^[12]。该国山峦叠嶂,因此拥有“千丘之国”的美称,其海拔900~4500 m,由西部火山群向东部大片的丘陵和沼泽递减,属温带和热带高原气候,年平均气温低于典型赤道地区国家(图1)。在全国范围内不同地区的温差也较大,多山的西部和北部平均气温要低于东部平原低洼地区。卢旺达全年有2个雨季,第一次为3—5月,第二次为9—12月;同时经历2个旱季,主要的旱季是6—8月,持续时间较长,而1—2月的旱季较短且不那么严重^[13]。年均降雨量800 mm左右,但因地域而不同,每年西部和西北部山区的降雨量通常比东部和东南部热带稀树草原要多,也因此造成了植被生长环境的地域差别。卢旺达全国划分为东部省、北部省、西部省、南部省以及首都基加利市。茂密的天然植被主要存在于3个国家公园内,即阿卡盖拉国家公园、维龙加火山国家公园、纽恩威国家公园,其中纽恩威国家公园拥有卢旺达最大面积的天然林,也是非洲生物资源最丰富的山地热带雨林之一,包含多样的生态系统,从沼泽、竹林到茂密的森林,树木种类高达200多种,以常绿、落叶混交林为主;火山国家公园以竹林为主,剩下大部分是高沼地,还有小面积的树木;阿卡盖拉国家公园属热带草原生态系统,植被多为常

绿、半常绿灌草丛,其中以金合欢灌木为主。21世纪以来,卢旺达经济增长迅速,2019年人均GDP为2444美元,目前农业仍是主要产业,有约65%人口从事农业劳动,农产品多样,咖啡、茶叶和棉花为主要的经济作物。该国到2019年已拥有超过1260万人口,成为人口最稠密的非洲内陆国家。景观上,大量坡耕地与森林交错分布,农村居民点及其耕作区与稀树草原景观相互参杂的现象比较突出。随着人口不断增加和建设用地迅速扩张,对当地自然资源和环造成严重威胁,目前该国正在积极通过景观恢复工作(包括大规模重新造林和当地农林业实践等)来应对木材短缺和环境退化等挑战。

3.3 数据来源

土地覆盖数据来源于资源发展区域制图中心(RCMRD)基于LandSat影像5、7、8波段生成的30 m分辨率数据集。其中用于分类的图像首选旱季(7—8月)云量较少影像。该数据集的精度评估,平均准确率为78.1%,卡帕系数为0.73,达到可使用标准。社会经济数据来源于卢旺达国家统计局^[14]、卢旺达自然资源局、土地管理局、水和林业局、世界银行(The World Bank)及联合国粮食及农业组织(The Food and Agriculture Organization, FAO)官网公布的1990—2015年度统计信息(表2)。同时通过查阅相关研究文章,以历史文献中的数据资料作为参考补充。

3.4 土地覆盖数据处理

RCMRD的土地覆盖数据将树木分为茂密林(郁闭度>0.7),中度茂密林(郁闭度0.4~0.7)和稀疏林(郁闭度<0.4);灌木也根据其树冠郁闭度分为封闭灌木林(郁闭度≥0.4)和开放灌木丛(郁闭度<0.4)。考虑到稀疏林的生态效益和经济效益与茂密林地相比有很大差距,将树冠郁闭度达到0.4的树木和封闭灌木林统称为森林,着重分析较茂密林地的变化特征;树冠郁闭度未达到0.4的稀疏林和开放灌木丛与草地资源统称为稀树草原,即混合林地-草地生态系统。借助ArcGIS软件对原土地覆盖数据进行重分类,最终获得包括森林、稀树草原、耕地、湿地、水体、建设用地及其他用地在内的7类土地覆盖数据(图2)。并利用动态度指数计算森林变化

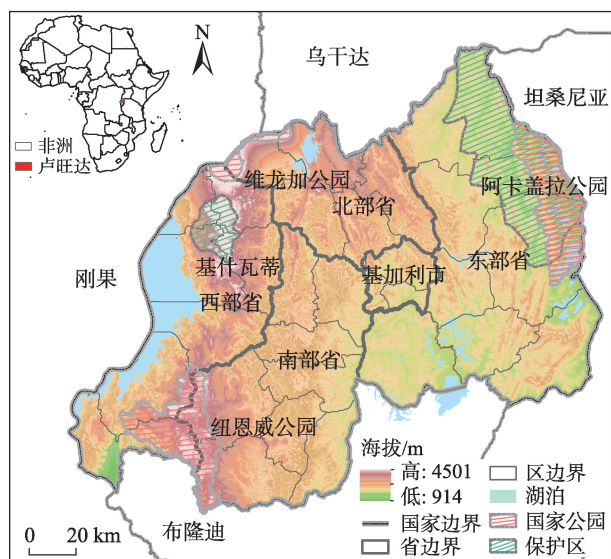


图1 研究区位置与范围

Figure 1 Location and scope of the study area

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4391号标准地图制作,底图边界无修改。下同。

表2 数据来源

Table 2 Data sources

数据类型	来源	年份
土地覆盖数据	RCMRD(http://geoportal.rcmr.org/)	1990、2000、2010、2015
种植林面积	FAO(https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/)	1990、2000、2010、2015
GDP	卢旺达国家统计局网站(https://www.statistics.gov.rw/)	1990—2015
城乡人口	卢旺达国家统计局网站(https://www.statistics.gov.rw/)	1990—2015
城乡就业	世界银行(https://data.worldbank.org.cn/indicator/)	1990—2015
难民人口	世界银行(https://data.worldbank.org.cn/indicator/)	1990—2015
国际援助	FAO数据库(http://www.fao.org/aid-monitor/en/)	2001—2015
合作项目	FAO数据库(http://www.fao.org/home/en/)	2000—2015
林产品贸易	FAO数据库(http://www.fao.org/home/en/)	1990—2015
谷物产量	FAO数据库(http://www.fao.org/home/en/)	1990—2015
国家林业政策	卢旺达水和林业局;卢旺达自然资源局(https://www.minagri.gov.rw/)FAOLEX数据库(http://www.fao.org/faolex/zh/)	—

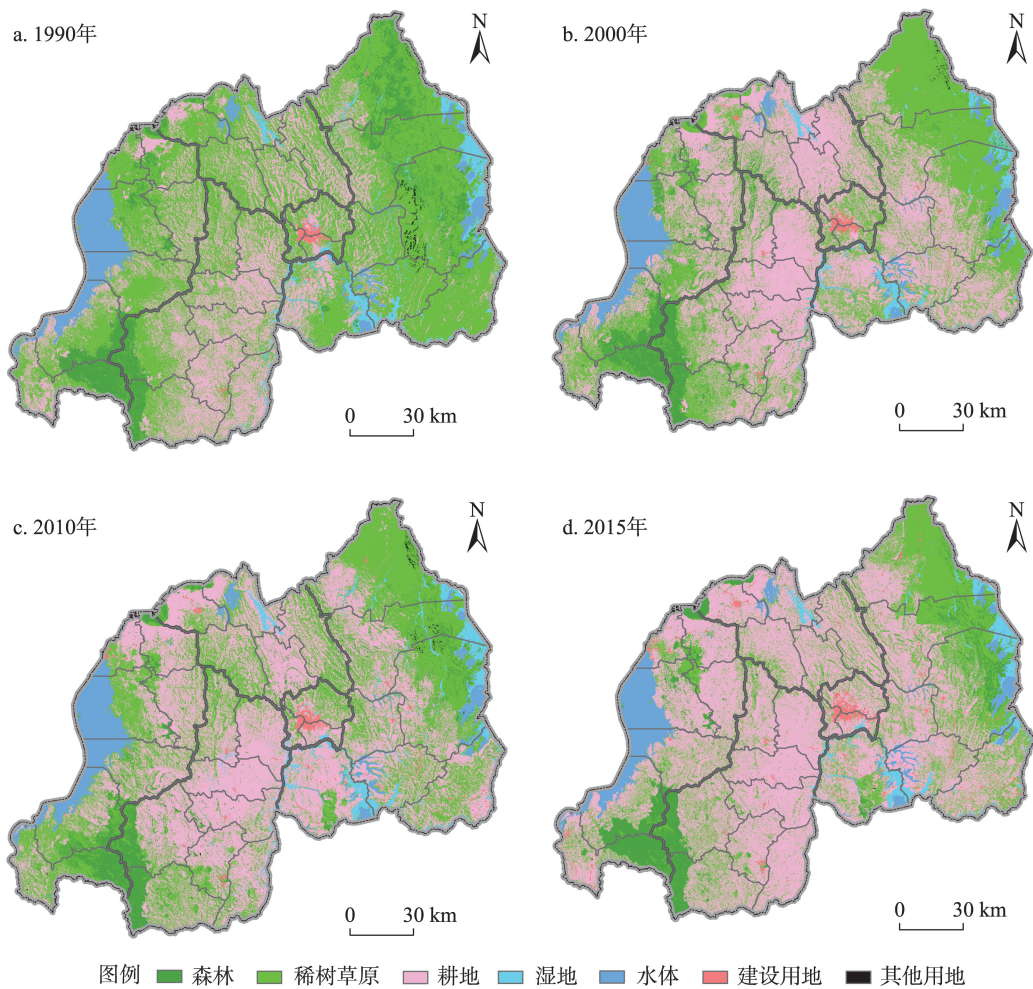


图2 1990、2000、2010和2015年卢旺达土地覆盖分布

Figure 2 Land cover in Rwanda, 1990, 2000, 2010 and 2015

率^[15],公式如下:

$$K=\frac{U_2-U_1}{U_1}\times\frac{1}{T_2-T_1}\times100\%,\tag{1}$$

式中: K 为 T 时间段(T_2-T_1)内各地类的变化率指数,当时间单位为年时, K 表示年变化率指数; T_1 、 T_2 分别代表研究期初、期末年份; U_1 、 U_2 代表在相应时间的森林面积。

3.5 PLUS 模型方法

斑块生成土地利用变化模拟模型^[16](Patch-generating Land Use Simulation, PLUS)是中国地质大学研究团队开发的一种基于栅格数据的改进模型。该模型通过提取两期土地利用/覆盖变化间各类用地的扩张部分并从中采样,采用随机森林算法逐一对各地类扩张部分进行挖掘,从而获得各类用地的发展概率。同时包含一种多类随机斑块种子模块(CARS),该模块结合随机种子生成和阈值递减机制,模拟多地类斑块级的变化。由此可在各类用地发展概率的约束下,以马尔科夫链模型预测的目标年份各类用地面积为最终需求量,动态地模拟出各地类斑块的时空变化^[16]。本文以卢旺达 2015 年各地类面积为模拟用地转换的数量目标,基于

2010 年土地覆盖栅格数据模拟出 2015 年土地覆盖栅格数据后,与 2015 年真实土地覆盖栅格数据进行模型精度验证并校准。经过参数调整以及精度评价。借助校准后的 PLUS 模型,以卢旺达 2015 年土地覆盖栅格数据作为土地利用/覆盖变化预测的基年,其他条件、参数设置与精度验证阶段保持一致。以马尔科夫链模型预测的 2030 年各地类面积作为目标年份用地转换的需求值,据此模拟 2030 年各地类变化情况。

4 结果与分析

4.1 1990—2015 年卢旺达森林的时空演变

卢旺达森林资源主要分布在 3 个国家公园及森林保护区内,发现 1990 年以来卢旺达的森林面积在不同阶段和空间上表现出不同变化特征。1990—2000 年森林面积处于减少阶段。此期间,卢旺达森林以 0.7% 的年变化率由 1990 年 230507.3 hm² 减少至 2000 年 213930.5 hm²,呈现退化趋势,而耕地和建设用地分别以 8.1% 和 1.9% 的变化率保持迅速扩张(表 3)。从空间分布上看,该阶段森林减少主要发生在东部省的阿卡盖拉国家公园内(图 3)。在 20 世纪 90 年代前期,阿卡盖拉国家公园受到国家内乱的

表 3 1990—2015 年卢旺达主要土地覆盖类型的面积变化情况
Table 3 Area changes of main land cover types in Rwanda, 1990-2015

类型	主要地类面积/hm ²				1990—2000 年		2000—2010 年		2010—2015 年	
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	面积变化/hm ²	变化率/%	面积变化/hm ²	变化率/%	面积变化/hm ²	变化率/%
森林	230507.3	213930.5	197383.2	213087.8	-16576.8	-0.7	-16547.3	-0.8	15704.6	0.8
稀树草原	1403258.2	946770.5	941126.9	701336.5	-456487.7	-3.3	-5643.6	-0.1	-239790.4	-2.6
耕地	624221.5	1126239.5	1116723.6	1344952.2	502018.0	8.1	-9515.9	-0.1	228228.6	2.1
建设用地	11632.6	13843.1	20945.3	36343.7	2210.5	1.9	7102.2	5.1	15398.4	7.4

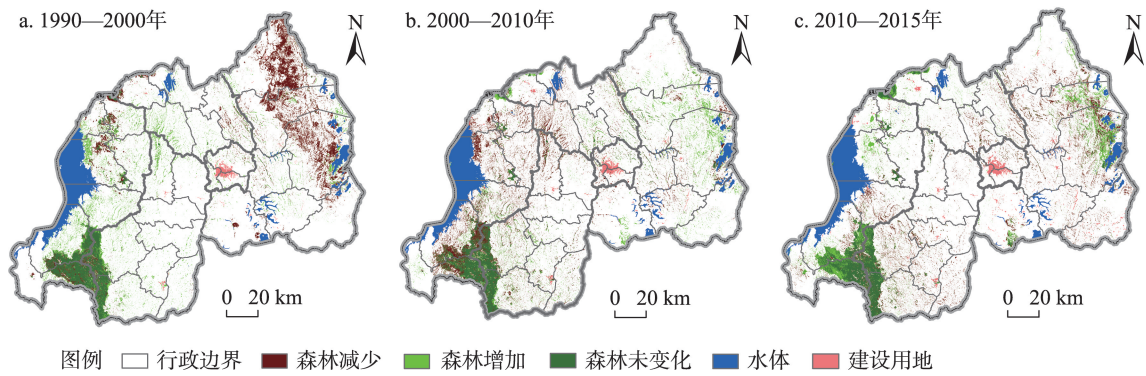


图 3 1990—2015 年卢旺达森林增减变化分布图

Figure 3 Spatial pattern of forest change in Rwanda, 1990-2015

2022年3月

波及,大片森林成为战场,树木被砍伐以提供战斗人员的燃料,公园环境遭到严重破坏^[5]。内乱结束后,战事平息,大量难民返回卢旺达并占据公园,砍伐森林以获取木材,这一时期卢旺达将木材用作燃料的总量增加了60%^[17]。同时政府为了向重返卢旺达的难民提供住房和土地,取缔了部分国家公园和森林保护区,开始分割公共土地^[18],大面积森林被用来提供建筑用木材或直接被农民用作耕地,造成阿卡盖拉国家公园面积减少一半多,带来巨大的森林资源损失。

2000—2010年森林面积继续保持减少趋势。此期间,建设用地面积扩张速度加快,年增加率提高到5.1%,主要发生在其首都基加利市,森林继续以0.8%的变化率减少(表3),主要发生在西部省纽恩威国家公园以及基什瓦蒂森林保护区附近,而在东部省开始出现森林恢复情况(图3)。21世纪初期,卢旺达建设用地迅猛发展,造成了对木材等自然资源的集中需求,原木工业采伐量有所增加。而纽恩威国家公园拥有卢旺达最丰富的茂密天然林资源,因此成为原木产品的主要供应场地。同时随着公园附近人口数量增加,生计不足以及耕种新土地的压力迫使农民开垦边际土地和陡峭的山坡林地^[19],造成公园周边森林面积急剧减少和土壤退化。

2010—2015年森林面积呈现净增加态势。此期间,耕地和建设用地年变化率分别提升至2.1%和7.4%继续保持扩张,而森林面积开始以0.8%的年变化率呈现出净增长,5年间由197383.2 hm²增长至213087.8 hm²(表3)。稀树草原的退化速度与20世纪90年代相比也有所缓和,可能得益于卢旺达政府采取的“森林可持续管理”和“还林还草”等生态措施。虽然仍然有地区存在森林退化现象(图3),但与1990—2010年间相比,在全国范围内有所缓和,森林已由大面积集中消失转变为小面积零散消失。森林扩张主要发生在西部纽恩威国家公园、东部阿卡盖拉公园和基什瓦蒂森林保护区,这与国家颁布保护国家公园、植树造林、建立保护区、恢复过度开垦的土地等政策相呼应。国家更关注于西部地区森林面积的恢复,是因为与东部和中部地区相比,西部地区具有坡度陡峭,降雨量多的特点。当没有足够的植被覆盖时,崎岖的地形和高降水使该地

区极易因土壤侵蚀而退化,带来极大的自然灾害^[20]。综上所述,卢旺达森林面积由1990—2010年的减少趋势转变为2010—2015年的净增加趋势,森林转型特征明显,处于净增长的初期阶段。

4.2 森林与其他地类的转换

根据森林、稀树草原、湿地、耕地和建设用地间流转分析,稀树草原是森林增加和减少的主要来源和去向,其次是耕地(图4)。在1990—2000年间虽然也存在其他土地类型不断转变为森林,但森林仍处于净减少状态,其中森林流失转换为稀树草原和耕地的面积分别为109793.6 hm²、19350.1 hm²,占森林转为其他地类总面积的82.8%和14.6%;稀树草原流失转换为其他地类的总面积中,有很大部分直接被占用转为耕地。2000—2010年,森林继续净减少,转换成稀树草原和耕地的面积分别为82214.5 hm²、21122.4 hm²,占森林转为其他地类总面积的74.5%和19.2%;森林转为稀树草原量呈现减少的趋势,稀树草原转变为耕地也得到缓和。由于大面积连片森林主要位于较偏远山区,农民更愿意选择距离近的稀树草原进行开垦耕种作物,从而造成稀树草原资源被耕地占用和草地退化现象一直存在,给卢旺达整体生态环境带来严重破坏。

2010—2015年,公园和保护区周边稀树草原成为森林净增长的主要来源,其次为斜坡耕地。稀树草原转变为森林的面积为85859.1 hm²,占其他地类转为森林总面积的87.8%,耕地占8.8%。但在此阶段,为了满足人口不断增多带来的耕地需求压力,仍有森林和稀树草原被开垦为农用地,造成国家生

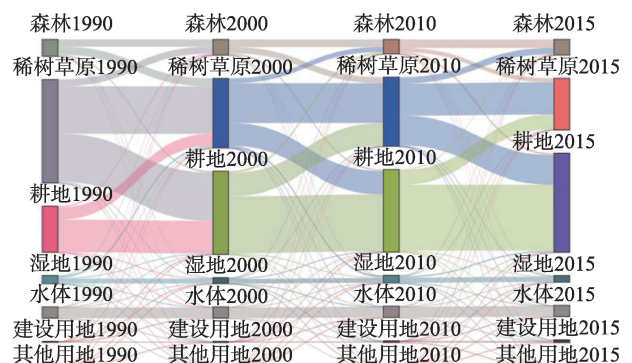


图4 1990—2015年卢旺达各地类流转图

Figure 4 A Sankey diagram showing land use transition in Rwanda, 1990-2015

态绿地面积的减少。建设用地在3个阶段内一直保持快速扩张,直接占用森林的部分极少,但其建造所需的大量木材产品间接地会对茂密森林的减少产生很大的影响,砍伐森林获得的木材产品用作燃料或者建筑材料加快了城市建设发展步伐。

4.3 森林转型路径分析

对于2010—2015年卢旺达呈现出的森林面积净增长现象,遵循路径分析框架,讨论5种通用路径是否在卢旺达发生,探究森林转型的内在驱动机制。

4.3.1 全球化路径

在全球化合作趋势下,卢旺达通过与国际伙伴签署协议共同管理国家公园,促进森林恢复。2005年卢旺达政府与刚果、布隆迪等9个国家正式签署非洲中部森林生态系统保护和可持续管理条约,确保区县森林管理的一致性,共同实现非洲中部森林的保护^[21]。2010年开始,卢旺达发展委员会(RDB)与非洲公园组织(African Parks)成功建立合作伙伴关系,正确引导了纽恩威国家公园和东部阿卡盖拉国家公园等地区的生态和经济复兴^[22]。另一方面,国际林产品贸易满足了国内需求。FAO数据显示^[23],2008—2015年卢旺达林产品产量有所下降,而林产品进口量在2008年迅速增长,与之前相比提高了近2.6倍,意味着卢旺达越来越依赖国外进口满足林产品需求。随着卢旺达人口的快速增长,对林产品的需求越来越大,进口林产品有效缓解了因木材供应造成的砍伐,为森林恢复提供了良好的环境。此外,经济恢复也吸引越来越多的国际援助项目在卢旺达开展^[24],带来林业知识、创新的农林业技术和志愿者团队等,总体提升林产业发展建设和植树造林效率。2010—2015年国际资助卢旺达林业部门发展的总金额与2001—2009年相比增长了6倍^[25],为卢旺达提供了强大的资金支持。由此可以看出,在卢旺达森林转型的全球化路径已经发生。而国际合作伙伴通过提供森林可持续管理经验、供应林产品、新型树种以及技术资金等,有效推动了该国的森林恢复。

4.3.2 森林稀缺路径

2010年以前卢旺达茂密森林面积一直减少,尤其在战争时期林产品进口量大幅衰减,国内难以实

现自给自足。林产品的供需严重不平衡导致其市场上木材产品价格成倍增长^[26]。因此激励卢旺达政府在内战结束后重新开始造林活动,包括修复受损的种植园,在农村地区传播速生树种,以满足对薪材和建筑材料日益增长的需求^[27]。另外,大规模的森林砍伐造成当地环境破坏,使得过去的20年中,自然灾害明显增加。由于侵蚀造成的数百万吨土壤流失,洪水和山体滑坡在该国北部和西部地区具有重大风险,导致了严重的伤亡和经济损失^[28]。为应对森林退化带来的环境挑战,政府、学者与国际组织多方面合作采取积极措施,取得一定成效。包括:

(1)政府颁布了限制森林开发和促进薪柴替代的政策,减少森林资源破坏。自2003年以来,基于砍伐森林的事实和已有森林法,政府意识到了限制木材产品使用和森林砍伐的重要性。颁布法令要求禁止在树木未成熟之前砍伐,且所有木制品都需要具备砍伐、运输以及销售许可证;禁止一切在沼泽地的砍伐木材活动等^[29]。在薪柴替代方面,在联合国环境署和卢旺达环境管理局的帮助下,公园社区成立合作社帮助当地人们建立替代伐木和动物饲养的生计,提供技术人员和加工设备并进行蜜蜂养殖以及蜂蜜收集的管理培训,使当地家庭的收入增加了3~4倍,以至邻近地区的人们将注意力从森林转移到养蜂业^[30]。与此同时,当地投资者也着力生产出更实惠环保的烹饪用能源,目标是减少依赖木柴和木炭做饭的家庭数量,并提出到2024年对木材燃料的依赖从80%减少到40%^[31]。

(2)制定可持续农林业行动方案。在指定地区重新造林^[4],种植过程中加强种质和技术实践,改善土壤因植被过度破坏而退化地区,以达到土壤保护和木材生产的双重目的。自2011年以来,从阿卡盖拉国家公园附近的东部半干旱地区到包括基什瓦蒂森林保护区在内的西部地区,全国共实施了80个修复项目^[20],山坡耕地成为退耕还林和实施农林业的主要对象。

(3)制定区域森林管理计划(DFMP)^[33]。采用改良的森林管理措施,以区为第一指导单位,在各级制定和执行综合森林管理计划保护脆弱的土地资源。重点关注森林资源匮乏地区,将森林景观恢

2022年3月

复作为国家森林管理计划的核心。总而言之,在卢旺达可以找到与森林稀缺路径相关的特征。

4.3.3 国家森林政策路径

卢旺达政府自身对森林资源的保护与恢复做出了巨大的努力,为森林面积的增加提供制度保障。尤其在最近10年的发展中,卢旺达政府一直秉持增加森林覆盖率的立场,制定了一系列政策文件解决与森林非法砍伐、经济发展有关的突出问题,例如修订的国家林业政策(NFP)、国家树木种子战略(NTSS)、森林投资计划(FIP)、国家森林研究战略等^[4]。虽然这些政策可能部分是由森林稀缺路径的因素引发的,但国家森林政策路径因其内在动机而有所不同,这些动机往往是林业部门以外的因素,例如愿意实现经济现代化、通过建立自然保护区或管理国家森林来控制土地、通过绿化国家形象促进旅游业发展、整合边缘社会群体等^[6,34]。具体实施措施包括:

(1)建立国家公园和森林保护区。2005年纽恩威森林保护区升级为国家公园,在该公园近6000 hm²的退化森林中开展“Trillion Trees”项目,清除蕨类植物并重新造林,旨在吸引更多的资金支持^[35]。同时伴随着国家重建,卢旺达政府提出在公园和保护区内发挥生态旅游的潜力,将采取措施恢复阿卡盖拉国家公园^[36],改善公园生态系统,积极以可持续的方式发展国家公园旅游业。在2008年划定基什瓦蒂森林保护区官方边界,并提出要努力提高其保护水平,将其从森林保护区改造成一个国家公园。在基什瓦蒂保护计划提出后培育和种植6700万株幼苗,仅在该保护区内就有至少3020 hm²的土地重新种植,全国范围内的植树活动也在顺利进行,加快了森林恢复步伐^[20]。

(2)政府鼓励私人投资林业。专门召开会议讨论如何开展合作使各利益相关者充分利用卢旺达的木材资源,在公私合作安排下以长期承包方式可持续管理森林和木材加工厂等^[37],提升木材工业水平以推动经济发生转型。

(3)加强种植技术教育和执法力度。自2009年以来,卢旺达政府便向全国各地派出农业专家,对农民如何通过政府的育苗和植树造林计划来改善土地利用方式进行培训,确保全国范围内的植树造

林活动有效开展^[38]。另外,2010年起,卢旺达发展委员会和非营利性保护组织开始共同管理公园,对公园进行每天的日常报告和年度规章制度评估,并调整公园执法队伍。在包括纽恩威在内的国家公园设置了优秀的研究和监护团队^[22],对本国公民采取“carrot and stick”^[17]的方法,即激励和惩罚措施并存。若公民能够保护森林则进行年度奖励,毁林则进行罚款、监禁、拘留等惩罚,有效减少了乱砍乱伐和非法放牧的发生,同时也稳定了公园和保护区边界。

(4)加强多部门间综合治理,整合边缘贫困社会群体。为了减少森林保护区周边居民对林产品的依赖,实行了多项支持农业战略,例如农业转型战略计划支持项目(PAPSTA)、经济发展和减贫战略(EDPRS)、农村部门支援项目(RSSP)等,以期通过加快农村地区经济发展,改善贫困社区生活,促进边际土地的森林恢复。

以上可以看出卢旺达政府在森林恢复方面投入很大力度,FAO发布的2020年卢旺达森林资源报告^[4]显示,人工种植林面积在逐年增长,并且在整个国家森林面积中的占比越来越大。无论“森林稀缺路径”还是“国家森林政策路径”相关的一系列举措已经取得了非常可观的成绩,这也更加明确政策指引下的植树造林和恢复对于森林面积趋势性逆转的出现发挥着核心作用。

4.3.4 经济发展路径与农业集约化路径

随着国家经济的发展,卢旺达的人均GDP有所提升。在2007年农作物集约化计划(The Crop Intensification Program, CIP)的实施下,粮食生产力水平得到改善^[39],但是农业扩张并没有停止,耕地面积在2007—2015年间已从国土面积的24%增长到53%^[23,25]。由于该国的城镇化水平依然较低且近几年发展平缓,当前就业仍然以农业为主,农业就业比例高达67%,农业劳动力也并不稀缺,从事农业活动的劳动力仍是农村地区农业生产的重要投入^[40],同时CIP在实施的过程中还存在参与性不强^[41]等问题,限制该计划全面有效地开展。因此在卢旺达因大量农民向城市迁移或生产力水平显著提高导致边际耕地及不适合耕种的土地被弃置,从而引起的森林面积增长的现象并不显著。这2种路径对卢旺达的森林转型而言,尚未发挥出强大的驱动作用。

4.4 PLUS模型预测

森林转型是一个国家土地利用/覆盖系统在长时间序列上复杂变化的结果,从卢旺达森林变化时空特征分析可知,稀树草原、耕地是森林增加的主要来源,森林变化与其他地类有着密切的关系^[43]。目前卢旺达森林转型处于逆转后的初期,森林净增长速度较慢。在未来的发展中,这种森林面积净增长的趋势是否会一直持续下去,以及森林如何分布是值得关注的问题。因此,通过利用PLUS模型模拟卢旺达未来土地覆盖格局,观察森林面积变化从而达到对该国未来森林转型态势预测的目的。

4.4.1 模型验证

以2010年卢旺达土地覆盖数据为基础,借助LEAS模块提取的各地类变化部分以及随机森林算法获取的各类用地的发展概率,在PLUS模型的CARS模块中进行运算得到2015年卢旺达土地覆盖模拟图。对比分析2015年卢旺达实际土地覆盖图与模拟图,利用数量精度和Kappa系数来进行模拟结果的精度验证。经验证,模拟精度为77.2%。因此该模型精度达到要求,可进行未来森林面积变化模拟预测。

4.4.2 预测结果

根据2010—2015年土地利用/覆盖历史变化、假定当前的发展状况会继续保持,以2030年为目标年,使用马尔科夫链模型进行自然演变情境下的预测,得到目标年份各地类的面积需求量(表4),运用

PLUS模型实现森林空间动态分布模拟。模拟结果显示,2015—2030年卢旺达土地覆盖类型变化保持了森林、建筑用地和耕地增加趋势,卢旺达的森林转型将继续保持(图5)。预计到2030年森林面积将增加到247153 hm²,净增长34065.2 hm²。从图5模拟空间分布来看,扩张部分主要发生在西部省、东部省和北部省的国家公园或森林保护区周边,主要来源于稀树草原。其中西部省森林扩张最为明显,增加31245.9 hm²;北部省和东部省分别增加4080.4 hm²、1261.6 hm²,这与各区域的林地发育条件密切相关。而在基加利市和南部省则呈现出森林面积继续减少的现象,基加利市作为国家首都,承担着发展工业与服务业的重任,预测建设用地面积将在2030年扩张到2.4万hm²,增长80%。稀树草原作为转化为森林的主要来源,仍有部分会继续转变为耕地,但耕地扩张的速度与过去相比已经明显减缓。

5 讨论与结论

5.1 讨论

卢旺达作为非洲东中部欠发达国家,其森林面积在经历快速下降后转为增长的现象,符合森林转型的特征,转型发生的机制遵循部分通用转型路径,同时留有深刻的社会历史印记。对5个主要转型路径的分析中,有大量事实表明全球化路径、森林稀缺路径和国家森林政策路径在卢旺达森林转型过程中发挥了重要作用。这些路径有一个共同特点,就是自上而下的作用机制明显,主要体现为

表4 2015—2030年Markov链模型预测地类面积(hm²)

Table 4 Land use predicted by the Markov model, 2015-2030 (hm²)

类型	全国			东部省			西部省		
	2015年	2030年	2015—2030年	2015年	2030年	2015—2030年	2015年	2030年	2015—2030年
森林	213087.8	247153.0	34065.2	47727.6	48989.2	1261.6	89858.5	121104.4	31245.9
稀树草原	701336.5	660383.1	-40953.4	397828.9	445987.2	48158.3	113901.1	81972.7	-31928.4
耕地	1344952.2	1345735.0	782.8	377379.2	342377.5	-35001.7	278251.8	276992.2	-1259.6
建设用地	36343.7	77224.3	40880.6	11514.6	23315.4	11800.8	5562.2	14780.9	9218.7
类型	南部省			北部省			基加利市		
	2015年	2030年	2015—2030年	2015年	2030年	2015—2030年	2015年	2030年	2015—2030年
森林	56777.9	54739.7	-2038.2	17941.5	22021.9	4080.4	782.3	297.9	-484.4
稀树草原	112838.4	82847.8	-29990.6	62814.7	40454.2	-22360.5	13953.4	9121.1	-4832.3
耕地	419288.1	450486.5	31198.4	228345.9	240542.5	12196.6	41687.2	35336.3	-6350.9
建设用地	3977.8	6969.1	2991.3	2526.9	7924.4	5397.5	12762.3	24234.5	11472.2

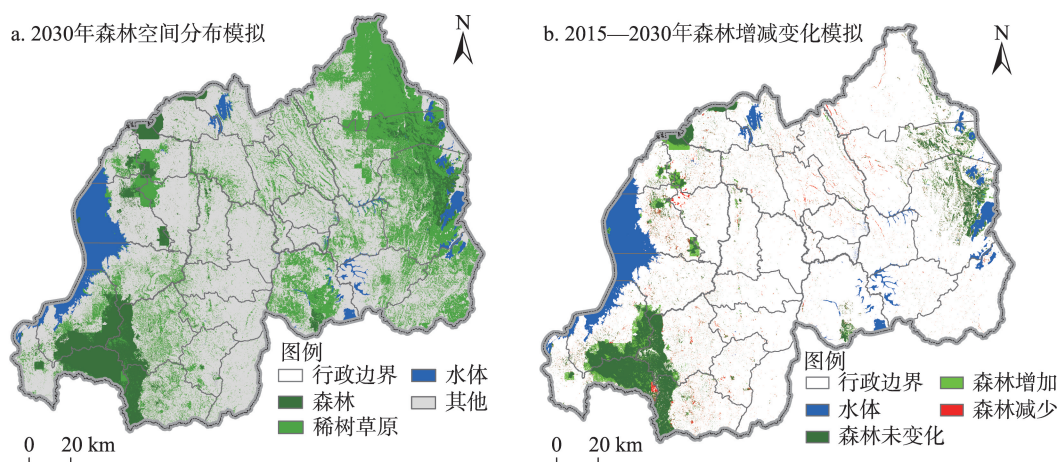


图5 2030年林地分布与变化模拟图

Figure 5 Prediction of forest distribution and changes, 2030

通过政府政策干预、国际贸易、国际结盟和引入国际合作伙伴的资金及技术投入,促进植树造林,并控制和减少森林砍伐,达到森林恢复的目的。而且,土地利用/覆盖时空变化数据的分析也印证了这些策略对于森林恢复的效果。比如2010年后森林增长面积中87.7%来自于稀树草原,这种流转主要分布在位于东、西部的国家公园和保护区周边,说明了政府推动下以保护区为核心的系列政策行为的积极作用。研究结果与Tradal等^[11]、赵宇鸾等^[44]、王宏等^[45]对发展水平较低的国家或贫困地区的结果一致,表明森林覆盖率变化并不一定总是发生在经济高度发达地区,也不一定遵循标准的森林转型框架,政府采取的森林保护和恢复措施(如实施植树造林项目)在欠发达国家的森林转型中起到了核心推动作用。另一方面,以市场调节为主的经济发展路径、农业集约化转型发展路径的表现则不那么明显。由于缺乏相应的资金、技术和组织能力,如灌溉和机械化设施不足,缺乏保险机制或仓储设施等问题阻碍了农民的参与度^[46],从事农林复合经营的农民在全国的整体比例仍然较低^[47]。

然而,随着人口增长对粮食和建设用地的需求不断增加,未来“经济发展路径”和“农业集约化路径”的作用将越来越大。根据PLUS模型对2030年卢旺达土地利用/覆盖变化的模拟表明,森林将保持增长趋势,面积达到并超过1990年时水平,耕地的面积基本不变,维持在2015年时水平,建设用地面积则显著增加(表4)。预示着人口向城市集聚及提

高农业集约化程度是继续保持森林增长的必然要求。首先,应改变卢旺达国内目前仍然以农业就业为主,城市的就业率远低于农村地区的状况^[48],通过同发展水平较高国家保持合作,引进先进技术提升国内工业与服务业经济,促进经济转型,从而为年轻人创造更多多样化的非农经济就业机会。同时重点建设制砖、木工、生态旅游等非传统农业领域的职业培训,鼓励引导年轻人选择非农就业,推动劳动力发生城乡转型。同时呼吁当地社区积极参与到生态旅游发展当中,通过调整生态旅游收入共享计划改善当地社区的生活,从而达到公园生物多样性保护和边际农村减贫的双重作用^[49]。其次,应自下而上地解决农民参与农业集约化计划的消极性,加强政府推广服务,加强农民、地方领导人、推广人员和农业服务提供者之间更紧密的合作^[41],以此来加快农业集约化计划在全国范围内顺利有效地开展。

综上所述,卢旺达森林转型说明了政府在欠发达地区森林转型中具有的核心作用,本文结果可以为同类地区研究提供借鉴。同时也应指出,还需要更多案例证据来深化该观点,此外,在方法上也存在一些局限性。例如当地农、林业用地混杂的实际情况可能造成森林面积低估;对于国家森林政策路径与森林稀缺路径等的判别则需要更多案例数据的定量分析,目前只能结合宏观社会经济数据以及相关调查给出定性分析;森林面积的模拟预测需要考虑多种驱动因素变化的综合作用,而目前采用的

PLUS模型主要基于当前现状推演,且历史数据的时间间隔较短,对结果的准确性有影响。特别是森林转型几种路径间的过程耦合以及复杂的综合交叉作用难以解释^[51],后续可以尝试诸如BP(神经网络)、DEMATEL(决策实验和评价实验法)以及设定不同情景模拟土地利用/覆盖变化方法^[52],以更好区分每种路径对转型的贡献差异。

5.2 结论

本文在“森林转型”理论和已有路径分析框架的基础上,根据土地利用/覆盖变化分析和社会经济数据,探究了1990年以来卢旺达森林面积的时空变化特征及其发生转型的驱动机制,明确了政府在欠发达地区森林转型中具有的核心作用。具体结论如下:

(1)根据土地覆盖和森林清查统计数据表明,卢旺达正在经历森林转型。1990—2010年卢旺达森林面积持续减少,由230507.3 hm²减少至213930.5 hm²,主要发生在国家公园和保护区周边。近年来森林退化现象虽一直存在,已经得到有效缓和,造林超过毁林的速度和程度。从2010年森林面积开始保持增长,2010—2015年的5年间净增长15704.6 hm²,主要来源于稀树草原和耕地,分别占其他地类转为森林总面积的87.8%和8.8%。

(2)在卢旺达森林转型的内在驱动机制中,政府发挥了重要作用。国家针对木材供需不足、森林稀缺、环境退化等问题出台的一系列植树造林政策以及国际间合作,取得了良好的效果,为森林转型的发生创造了良好的国际、国内条件。多个路径叠加作用最终促使“森林转型”的发生。在发展水平较低的卢旺达,森林转型路径表现为“森林稀缺”“国家森林政策”和“全球化”3种路径并存的现象,而“经济发展路径”和“农业集约化路径”发挥的作用相对比较有限。

(3)PLUS模型模拟表明,按照当前社会经济状况发展,卢旺达森林转型会继续保持。到2030年森林面积将净增长34065.2 hm²达到247153 hm²。分区域来看,森林扩张最多的地区仍然是西部省保护区等地,预计增加31245.9 hm²;首都基加利市与南部省森林面积保持减少。

参考文献(References):

- [1] Mather A S. The forest transition[J]. *Area*, 1992, 24(4): 367–379.
- [2] Duan Q W, Tan M H. Spatial and temporal variations of forest cover in developing countries[J]. *Sustainability*, 2019, DOI: 10.3390/su11061517.
- [3] Imai N, Furukawa T, Tsujino R, et al. Factors affecting forest area change in Southeast Asia during 1980–2010[J]. *PloS one*, 2018, DOI: 10.1371/journal.pone.0197391.
- [4] The Food and Agriculture Organization. Forest Resources Assessment Office Report, Rwanda 2020[R/OL]. (2020–08–05) [2021–10–01]. <https://www.fao.org/3/ca9878fr/ca9878fr.pdf>.
- [5] Arakwiye B, Rogan J, Eastman J R. Thirty years of forest–cover change in Western Rwanda during periods of wars and environmental policy shifts[J]. *Regional Environmental Change*, 2021, DOI: 10.1007/s10113–020–01744–0.
- [6] 卢龙辉, 许月卿, 黄安, 等. “森林转型”研究进展与展望[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2): 373–384. [Lu L H, Xu Y Q, Huang A, et al. Reviews and prospects for forest transition[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(2): 373–84.]
- [7] Rudel T K, Coomes O T, Moran E, et al. Forest transitions: Towards a global understanding of land use change[J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 23–31.
- [8] Moretti V, Salvati L, Cecchini M, et al. A long-term analysis of demographic processes, socioeconomic “Modernization” and forest expansion in a European Country[J]. *Sustainability*, 2019, DOI: 10.3390/su11020388.
- [9] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio–ecological feedback versus socio–economic change[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108–118.
- [10] Meyfroidt P, Lambin E F. Global forest transition: Prospects for an end to deforestation[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2011, 36(1): 343–371.
- [11] Tradal L T, Angelsen A. Policies drive Sub–National forest transitions in Vietnam[J]. *Forests*, 2020, DOI: 10.3390/f11101038.
- [12] Ngarukiyimana J P, Fu Y, Sindikubwabo C, et al. Climate change in Rwanda: The observed changes in daily maximum and minimum surface air temperatures during 1961–2014[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, DOI: 10.3389/feart.2021.619512.
- [13] Jonah K, Wen W, Shahid S, et al. Spatiotemporal variability of rainfall trends and influencing factors in Rwanda[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2021, DOI:10.1016/j.jastp.2021.105631.
- [14] National Institute of Statistics of Rwanda. Statistical Yearbook 2020[M/OL]. (2021–06) [2021–10–01]. <https://www.statistics.gov.rw/publication/statistical-yearbook-2020>.
- [15] 刘丹, 李琳娜. 1995–2015年中国北方边境样带土地利用时空

2022年3月

- 格局演变及驱动因素[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1208–1221.
- [Liu D, Li L N. Spatiotemporal change and driving factors of land use in the northern border transect of China, 1995–2015[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1208–1221.]
- [16] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, DOI: 10.1016/J.COM-PENVURBSYS.2020.101569.
- [17] International Tree Foundation. Forest conservation in Rwanda[N/OL]. (2011–11–08) [2021–10–01]. <https://internationaltreefoundation.org/forest-conservation-rwanda/>.
- [18] Clay N. Fixing the ecosystem: Conservation, crisis and capital in Rwanda's Gishwati Forest[J]. Environment and Planning E: Nature and Space, 2019, 2(1): 23–46.
- [19] Glorioso U. People's Perceptions of Community Participation in Conservation of Natural Resources in Rwanda: The Case of Nyungwe National Park[D]. Bamberg: Otto Friedrich University, 2021.
- [20] International Union for Conservation of Nature(IUCN). How Rwanda Became a Restoration Leader[N/OL]. (2020–03–31) [2021–06–25]. <https://www.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=0c40be7f83c64bb9b7c8f372358c6f9>.
- [21] Koyo J P, Foteo R. Harmonization of Forest Policies and Programmes in Central Africa[R/OL]. (2006–12) [2021–10–01]. <https://www.fao.org/3/a0970e/a0970e11.htm>.
- [22] African Parks. Rwanda, African Parks Commit to Long-Term Protection of Nyungwe National Park[N/OL]. (2020–10–07) [2021–06–25]. <https://www.cms.int/en/news/rwanda-african-parks-commit-long-term-protection-nyungwe-national-park>.
- [23] The Food and Agriculture Organization. Country Investment Statistics Profile & Forestry Production and Trade & Crops and livestock products[DB/OL]. (2019–06–19) [2021–10–01]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>; <https://www.fao.org/aid-monitor/identify/project-analysis/en/>.
- [24] 顾亚丽, 陆文明, 余跃, 等. “一带一路”倡议下林业援外的机遇与挑战[J]. 林业资源管理, 2018, (6): 1–6. [Gu Y L, Lu W M, Yu Y, et al. Challenges and opportunities of China's forestry foreign aid programs under the belt and road initiative[J]. Forest Resources Management, 2018, (6): 1–6.]
- [25] The World Bank. Agricultural land & Employment & Net Official Development Assistance & Refugee Population[DB/OL]. (2019–12–25) [2021–10–01]. <https://data.worldbank.org.cn/indicator>.
- [26] 中华商务网. 卢旺达木材市场价格攀升[N/OL]. (2006–02–13) [2021–10–01]. <https://business.sohu.com/20060213/n241802666.shtml>. [Chain Commodity Marketplace. Rwanda's Timber Product Prices are Rising[N/OL]. (2006–02–13) [2021–10–01]. <https://business.sohu.com/20060213/n241802666.shtml>.]
- [27] Kuyah S, Sileshi G W, Luedeling E, et al. Potential of Agroforestry to Enhance Livelihood Security in Africa[A]. Dagar J C, Gupta S R, Teketay D. Agroforestry for Degraded Landscapes[M]. Singapore: Springer, 2020.
- [28] Umutohi A. Using ArcGIS to analyze land availability for Rwanda's forest area expansion[J]. American Journal of Environmental and Resource Economics, 2018, DOI: 10.11648/J.AJERE.20180303.11.
- [29] Mazimpaka E. Woodfuel in Rwanda: Impact on energy, poverty, environment and policy instruments analysis[J]. International Journal of Renewable Energy Development, 2014, 3(1): 21–32.
- [30] United Nations Environment Programme(UNEP). In Rwanda, a Sweet Alternative to Deforestation[N/OL]. (2018–05–02) [2021–06–25]. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/rwanda-sweet-alternative-deforestation>.
- [31] AllAfrica. Rwanda: Environment Wins as Local Investor Produces Affordable Cooking Energy[N/OL]. (2021–09–03) [2021–10–01]. <https://allafrica.com/stories/202109130176.html#:~:text=A%20Rwandan%20company%2C%20OAK%20Investments,use%20of%20charcoal%20and%20firewood>.
- [32] 王晓青, 濮励杰. 国内外自然资源分类体系研究综述[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2203–2214. [Wang X Q, Pu L J. A review of the classification of natural resources[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2203–2214.]
- [33] Rurangwa F, Kinyanjui M J, Bazimaziki F, et al. Developing a Forest Management Plan (DFMP) for gatsibo district in the eastern province of Rwanda[J]. Open Journal of Forestry. 2018, 8(2): 247–265.
- [34] Hernández-Aguilar J A, Durán E, de Jong W, et al. Understanding drivers of local forest transition in community forests in Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico[J]. Forest Policy and Economics, 2021, DOI: 10.1016/j.forpol.2021.102542.
- [35] Wcs News Release. Reforesting Project In Rwanda Sees Regrowth Within a Year: Despite Lockdown Interruptions[N/OL]. (2021–02–23) [2021–10–01]. <https://newsroom.wcs.org/News-Releases/articleType/ArticleView/articleId/15833/Reforesting-project-in-Rwanda-sees-regrowth-within-a-year-despite-lockdown-interruptions.aspx>.
- [36] Nyirarwasa A, Han F, Pan X, et al. Evaluating the relationship between national park management and local communities' perceptions based on survey, a case of Nyungwe National Park, Rwanda [J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2020, (12): 108–126.
- [37] 廖世容. 卢旺达政府呼吁私人投资林业[N]. 国际新闻, 2016–08–24(3). [Lu S R. The Rwandan Government Calls for Private In-

- vestment in Forestry[N]. The International News, 2016-08-24(3).]
- [38] Inter Press Service. Rwanda: Forest Conservation Calls for Carrot and Stick[N/OL]. (2011-01-21) [2021-10-01]. <http://www.ip-snews.net/2011/01/rwanda-forest-conservation-calls-for-carrot-and-stick/>.
- [39] Ansoms A, Cioffo G, Dawson N, et al. The Rwandan agrarian and land sector modernisation: Confronting macro performance with lived experiences on the ground[J]. Review of African Political Economy, 2018, 45(157): 408-431.
- [40] Mutandwa E, Taremwa N K, Uwimana P, et al. An analysis of the determinants of rural to urban migration among rural youths in northern and western provinces of Rwanda[J]. Rwanda Journal, 2011, 22(1): 55-95.
- [41] Nahayo A, Omondi M O, Zhang X H, et al. Factors influencing farmers participation in crop intensification program in Rwanda[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(6): 1406-1416.
- [42] 刘晶, 刘璨, 杨红强, 等. 林地细碎化程度对农户营林积极性的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(10): 2029-2038. [Liu J, Liu C, Yang H Q, et al. The impact of forestland fragmentation on farmers' investment incentives on forestland[J]. Resources Science, 2018, 40(10): 2029-2038.]
- [43] Wang J Y, Xin L J, Wang Y H. Economic growth, government policies, and forest transition in China[J]. Regional Environmental Change, 2019, 19(4): 1023-1033.
- [44] 赵宇鸾, 葛玉娟, 旷成华, 等. 乡村振兴战略下贵州山区森林转型路径研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 1-7. [Zhao Y L, Ge Y J, Kuang C H, et al. The path of forest transformation in mountainous areas in Guizhou Province under the strategy of rural revitalization[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018, 36(1): 1-7.]
- [45] 王宏, 阎建忠, 李惠莲. 中国14个连片特困地区的森林转型及其解释[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1253-1267. [Wang H, Yan J Z, Li H L. Forest transition and its explanation in contiguous destitute areas in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1253-1267.]
- [46] Bizoza A R. Investigating the effectiveness of land use consolidation: A component of the crop intensification programme in Rwanda[J]. Journal of Rural Studies, 2021, 87: 213-225.
- [47] Kiyani P, Andoh J, Lee Y, et al. Benefits and challenges of agroforestry adoption: A case of Musebeya sector, Nyamagabe District in southern province of Rwanda[J]. Forest Science and Technology, 2017, 13(4): 174-180.
- [48] Tull K. Links Between Urbanisation and Employment in Rwanda [R]. UK: Institute of Development Studies, 2019.
- [49] Imanishimwe A, Nsengimana V, Nsengumuremyi C. Contribution of ecotourism to the conservation of Nyungwe National Park in Rwanda[J]. Journal of Tourism & Hospitality, 2018, DOI: 10.4172/2167-0269.1000348.
- [50] Munanura I, Backman K, Hallo J, et al. Understanding the relationship between livelihood constraints of poor forest-adjacent residents, and illegal forest Use, at Volcanoes National Park, Rwanda [J]. Conservation and Society, 2018, 16(3): 291-304.
- [51] 黄萍, 卢远, 王丹媛, 等. 广西森林转型与森林扰动遥感监测研究[J]. 山地学报, 2019, 37(1): 118-128. [Huang P, Lu Y, Wang D Y, et al. Remote sensing monitoring of forest transition and forest disturbance in Guangxi, China[J]. Mountain Research, 2019, 37(1): 118-128.]
- [52] 杨小艳, 凌宇, 李龙, 等. 基于最坏情景理论的连云港土地利用变化情景模拟[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1082-1092. [Yang X Y, Ling Y, Li L, et al. Worst case scenario-based methodology for simulating land-use change in coastal city in China: A case study of Lianyungang[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1082-1092.]
- [53] 田明华, 万莉. 经济发展、林产品贸易对木材消耗的影响研究[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 522-533. [Tian M H, Wan L. Effects of economic development and forest product trade on wood consumption[J]. Resources Science, 2015, 37(3): 522-533.]
- [54] Stanturf J A, Kleine M, Mansourian S, et al. Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach[J]. Annals of Forest Science, 2019, DOI: 10.1007/s13595-019-0833-z.
- [55] 金芳芳, 辛良杰. 中国闲置耕地的区域分布及影响因素研究[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 719-728. [Jin F F, Xin L J. Spatial distribution and impact factors of farmland abandonment[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 719-728.]
- [56] Liu J C, Liang M, Li L C, et al. Comparative study of the forest transition pathways of nine Asia-Pacific countries[J]. Forest Policy and Economics, 2017, 76: 25-34.
- [57] 杨子生, 杨诗琴, 杨人懿, 等. 基于利用视角的土地资源分类方法探讨[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2173-2191. [Yang Z S, Yang S Q, Yang R Y, et al. Classification method of land resources based on land use perspective[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2173-2191.]
- [58] Lu L, Marcos-Martinez R, Xu Y, et al. The spatiotemporal patterns and pathways of forest transition in China[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(18): 5378-5392.
- [59] Cardoso A W, Oliveras I, Abernethy K A, et al. A distinct ecotonal tree community exists at central African forest-savanna transitions [J]. Journal of Ecology, 2020, 109(3): 1170-1183.
- [60] 李凌超, 刘金龙, 程宝栋, 等. 中国劳动力转移对森林转型的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1526-1538. [Li L C, Liu J L, Cheng B D, et al. Influence of labor transfer on China's forest transition [J]. Resources Science, 2018, 40(8): 1526-1538.]

Forest transition paths in Rwanda since 1990 and trend prediction

LI Tianrun, CHEN Shuang

(1. School of Geographical Sciences / Research Centre of Urban Sustainable Development, Nanjing University of information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In the process of socioeconomic development, the internal driving mechanism of the “forest transition” in which the forest area of a country (region) changes from decreasing to increasing is a hotspot in resources and environment research. This study used Rwanda’s land cover data as the main source of information to analyze the trends and temporal and spatial characteristics of forest changes in the country from 1990 to 2015. Using socioeconomic data and the path analysis method of forest transition, this study explored the influencing factors of the change in forest area in Rwanda and the transition paths that it followed. On this basis, the patch-generating land use simulation (PLUS) model was used to simulate and predict the spatial dynamics of Rwanda’s forest distribution in 2030, and relevant policy recommendations on healthy forest transition was made. The results indicate that: (1) The forest area of Rwanda began to show a net increase in 2010, from 197383.2 hm² to 213087.8 hm², with an annual change rate of 0.8%. (2) The National parks and protected areas were the main areas of forest growth, and the growth were mainly from savanna and cropland, accounting for 87.8% and 8.8% of the total forest net increase respectively. (3) The internal driving mechanism was mainly the “national forest policy path” and the “forest scarcity path” under the guidance of national policies. The path of globalization was reflected in tree planting technology and financial assistance. (4) The simulation result shows that forest transition will continue in Rwanda by 2030. The forest area is expected to increase by 34065.2 hm². To increase the forest coverage rate, the state should improve the weak links of forest restoration and accelerate the promotion of agricultural intensification. By creating employment opportunities for rural communities, the government can guide the transformation of the economy and employment. The state can promote the “economic development path” and “agricultural intensification path” through the above measures.

Key words: forest transition; national policy path; driving mechanism; PLUS model; Rwanda