

老挝北部刀耕火种农业变化及植被恢复效应

廖 谡 嫫^{1,2}, 封 志 明¹, 李 鹏¹, 张 景 华¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于“3S”技术研究了老挝北部 1990-2011 年刀耕火种农业时空变化的总体特征及其不同阶段土地利用变化、刀耕火种农业土地利用强度(利用频率、轮歇周期)及其对休耕期次生林自然恢复过程的影响。结果表明:① 1990-2011 年,刀耕火种农业总体上呈增加趋势,由 15.38 万 hm^2 增加到了 23.84 万 hm^2 ,增幅为 54.98%;刀耕火种农业的增加主要发生在波乔省南部和琅勃拉邦省,减少主要发生在丰沙里省。② 刀耕火种农业主要分布在海拔高度 500~1500 m、坡度 10°~30°的地区,增加主要发生在海拔高度 500~800 m、300~500 m 和 800~1000 m 的地区,以及坡度 10°~20°和 20°~30°的地区。刀耕火种农业的地类转变方向主要是有林地,转入和转出率均高达 80%。③ 2000-2011 年,老挝北部刀耕火种农业的利用频率约为 2~3 次,时间间隔 1~7 年不等;轮歇周期有所缩短,变化幅度不大。④ 老挝北部刀耕火种农业的休耕期次生林自然恢复状况与轮歇周期关系显著,二者相关系数为 0.9698。当轮歇周期长达 10 年时,次生林能够恢复到该区域有林地 NDVI 的平均水平。

关键词: 刀耕火种农业;时空变化;轮歇周期;利用频率;植被恢复;老挝北部

DOI: 10.11821/dlxb201504007

1 引言

刀耕火种农业,是一个复杂的农林复合系统,大体包括土地清理(林木砍伐、曝晒与焚烧)、农业种植、土地休耕(植被—土壤恢复)三个阶段^[1-2]。据估算,全球有 40~50 个国家约 3~5 亿人群直接或间接从事刀耕火种农业,主要分布在拉丁美洲、非洲和东南亚的广大山区^[3]。随着联合国“减少森林砍伐和退化造成的碳排放”行动框架(REDD+)的实施,热带山区刀耕火种农业可持续性及其环境效应再次引起了国际学界广泛关注。在热带雨林丰富的东南亚山区,刀耕火种农业作为传统农业耕作方式而广泛存在,但其环境效应一直备受争议^[4]。长期以来,刀耕火种农业被认为是热带地区毁林的主要原因^[5],近年来,学界开始关注刀耕火种农业的积极效应,认为休耕期的次生林自然恢复是未来热带森林的希望^[6]。

迄今,刀耕火种农业土地利用研究主要面临两大挑战:一是准确监测刀耕火种农业系统不同阶段的土地利用^[7],二是定量研究刀耕火种农业土地利用强度,即休耕周期的长

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301090, 41271117, 41401625); 中国科学院战略科技重点项目(2012SJ008, 2014SJC006) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301090, No.41271117, No.41401625; Key Program for Strategic Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, No.2012SJ008, No.2014SJC006]

作者简介: 廖谡嫫(1987-), 女, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事资源开发与区域发展研究。

E-mail: liaoch.12b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 封志明(1963-), 男, 河北平山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事资源开发与区域可持续发展研究。

E-mail: fengzm@igsnr.ac.cn

短及其对森林覆被的影响效应^[8-9]。由于刀耕火种农业不同阶段（清理、种植和休耕）的土地利用不能与传统土地利用分类系统相对应，使得许多国家或地区的土地利用现状图和土地覆被图都没有一个确切的类别来界定刀耕火种农业的空间范围^[10]。此外，由于刀耕火种农业的小农土地利用形式，使中低分辨率的MODIS影像难以准确监测刀耕火种农业^[11]，而Landsat影像用于监测刀耕火种农业亦需要长时序连续年份的数据作支撑，因此区域尺度上刀耕火种农业遥感监测及时空变化的定量研究尚为少见^[3-4]。刀耕火种农业利用频率、休耕周期等利用强度问题至关重要，直接关系到对森林植被和生态系统的影响，但现有研究主要是基于小尺度（样地尺度、村庄尺度）的连续观测^[12-13]或农户调研^[14-15]分析局部变化及效应^[16]。区域尺度上刀耕火种农业利用强度及其对休耕期次生林自然恢复的影响研究尚处于起步阶段。

鉴于此，本文以刀耕火种农业分布的典型地区老挝北部为研究区域，遥感数据为支撑，“3S”技术为手段，开展刀耕火种农业动态变化及其休耕期自然植被恢复过程研究，旨在揭示老挝北部刀耕火种农业时空变化格局、地域分布特征、土地利用强度和次生林自然恢复过程，为理解和实施REDD+计划、减缓气候变化和保护生物多样性提供科学依据。

2 研究数据和方法

2.1 研究区域

老挝北部（图1）地势高低起伏，地貌类型多丘陵山地。海拔范围为196~2266 m，坡度在40°以内范围，属热带季风气候，年平均温度高于20℃。区内主要河流为湄公河，贯穿老挝北部的琅南塔省、波乔省和乌多姆赛省。该地区森林资源丰富，主要包括热带雨林、季雨林和山地雨林等，此外，土地利用/覆被类型主要包括刀耕火种农业用地、长期性农地、建设用地和水域。该地区人口密度低（18人/km²），经济发展水平落后，是一个多民族集聚的发展中地区。刀耕火种农业是老挝北部山区古老而广泛存在的农业耕作形式，其土地利用主要包括土地清理阶段和农业耕作阶段，之后进入休耕阶段用于植被恢复。

2.2 数据资料及预处理

研究主要采用美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）提供的1989年和2000-2011年逐年旱季（2-4月）的Landsat Thematic Mapper（TM）和Enhanced Thematic Mapper plus（ETM+）遥感影像。2008年研究区Landsat TM/ETM+由于云量过大而未被利用。上述影像具体信息见表1。由于2003年5月31日后的Landsat-7 ETM+影像由于机载扫描行校正器（SLC）故障导致数据条带丢失，应用影像自适应局部回归模型，对SLC-OFF影像进行条带修复处理。对影像进行裁剪、拼接和彩色增强等处理，得到研究区范围内的影像。以2011年的影像为基准，将其他年份的遥感影像均配准到基准

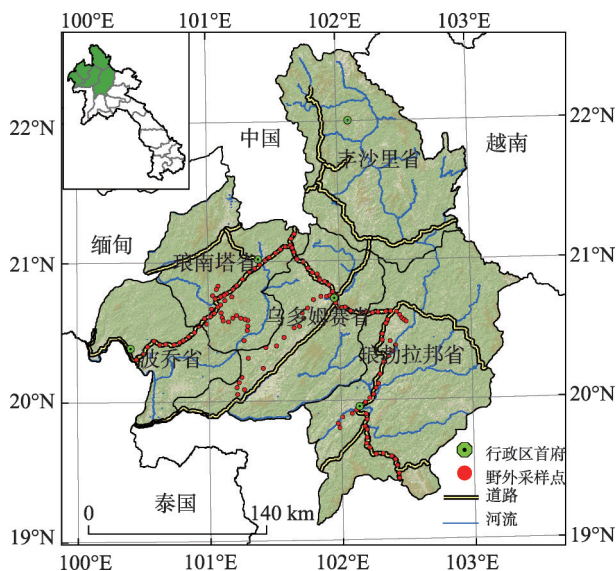


图1 老挝北部地理位置图

Fig. 1 Geographic location of northern Laos

表1 本文利用的 Landsat TM/ETM+影像信息
Tab. 1 Details of the Landsat TM/ETM+ imagery used in this study

轨道号/行号	日期	传感器	云盖 (%)	轨道号/行号	日期	传感器	云盖 (%)
128/46	1989-03-02	TM	10	129/45	1989-03-25	TM	10
	2000-04-01	ETM+	0		2000-03-23	ETM+	3
	2001-04-20	ETM+	1		2001-04-19	TM	0
	2002-04-07	ETM+	0		2002-04-30	ETM+	0
	2003-03-01	TM	0		2003-02-28	ETM+	2
	2004-03-11	ETM+	0		2004-03-10	TM	4
	2004-03-19	TM	10		2004-04-11	TM	9
	2005-03-06	TM	8		2005-02-25	TM	1
	2006-03-17	ETM+	4		2006-03-08	ETM+	0
	2006-04-02	ETM+	0		2006-03-24	ETM+	0
	2007-03-04	ETM+	0		2007-02-23	ETM+	0
	2007-05-07	ETM+	20		2007-03-11	ETM+	1
	2009-02-13	TM	0		2009-02-12	ETM+	2
	2010-02-16	TM	63		2009-02-28	ETM+	36
129/46	2011-02-11	ETM+	7	129/47	2010-02-15	ETM+	0
	1988-03-30	TM	1		2010-03-03	ETM+	0
	1989-03-25	TM	0		2011-04-15	TM	30
	2000-03-07	ETM+	0		1988-03-30	TM	0
	2001-02-06	ETM+	2		2000-03-07	ETM+	0
	2002-02-09	ETM+	2		2001-01-05	ETM+	6
	2003-02-28	ETM+	4		2002-02-09	ETM+	0
	2004-01-30	ETM+	6		2003-02-12	ETM+	8
	2004-03-02	ETM+	0		2004-01-30	ETM+	3
	2005-02-25	TM	0		2004-03-02	ETM+	0
	2006-02-28	TM	0		2005-02-09	TM	0
	2007-02-23	ETM+	0		2006-02-28	TM	0
	2007-03-11	ETM+	0		2007-03-11	ETM+	1
	2009-01-19	TM	6		2007-03-27	ETM+	0
130/46	2010-04-04	ETM+	6	130/45	2009-01-19	TM	0
	2011-04-15	TM	0		2010-03-03	ETM+	0
	1989-01-11	TM	0		2011-04-15	TM	2
	2000-03-14	ETM+	0		1989-01-11	TM	5
	2001-04-18	ETM+	0		1989-01-27	TM	20
	2002-04-21	ETM+	0		2000-03-14	ETM+	2
	2003-04-18	ETM+	0		2001-04-10	TM	0
	2004-03-25	ETM+	0		2002-04-21	ETM+	0
	2004-04-26	ETM+	3		2003-04-08	ETM+	0
	2005-02-16	TM	0		2004-03-01	TM	0
	2006-11-10	ETM+	9		2005-02-16	TM	0
	2006-11-26	ETM+	2		2007-03-26	TM	0
	2007-03-26	TM	0		2009-03-07	ETM+	0
	2009-03-07	ETM+	0		2009-03-23	ETM+	0
	2009-04-24	ETM+	0		2010-02-14	TM	0
	2010-04-11	ETM+	0		2011-02-25	ETM+	0
	2011-04-22	TM	3		2011-04-22	TM	10

年份影像上。此外,利用中国科学院计算机网络信息中心提供的30 m分辨率的全球数字高程模型(Global digital elevation model, GDEM)作为辅助数据。利用ArcGIS 10.0对GDEM数据中的异常值和空值进行处理,并生成海拔、坡度和坡向3个图层。利用野外采样数据(考察时间:2013/02/24-2013/03/18)、欧洲航空局(European Space Agency, ESA)提供的2009年全球土地覆被数据集(300 m分辨率)、谷歌地球(Google Earth™, GE)提供的高分辨率Quickbird数据进行遥感解译和分类精度验证。

2.3 研究方法

2.3.1 刀耕火种农业和其他土地利用信息的遥感提取 为了监测刀耕火种农业时空变化,并分析其土地利用变化过程,利用遥感手段提取研究区刀耕火种农业和其他土地利用类型的空间分布信息。参照《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》标准,结合研究区土地利用/覆被野外调查数据,将研究区土地利用/覆被分为6大类(10个子类),分别为刀耕火种农业(新火烧土地和耕作期土地)、永久性农地(水田和旱地)、有林地、灌木林(草地)(灌木林地、草地、火烧迹地)、水域和建设用地。按土地利用阶段不同,刀耕火种农业的新火烧土地为土地清理阶段土地,耕作期土地农业耕作阶段土地。利用野外调查数据、Google Earth高清影像等建立土地利用/覆被遥感分类样本,应用决策树分类模型实现分类(图2)。遥感分类参数包括Landsat TM/ETM+影像非热能波段、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、穗帽变换(Tassel Cap Transformation, T-C变换)得到的土壤亮度指数(Soil Brightness, SB)和土壤湿度指数(Soil Wetness, SW),以及主要的纹理特征(同质性、相关性、熵、角二阶距)。其中,NDVI和T-C变换在ENVI 5.0中实现,计算公式如下:

$$\text{NDVI} = (\text{TM}_4 - \text{TM}_3) / (\text{TM}_4 + \text{TM}_3) \quad (1)$$

$$\text{Bright} = \text{TM}_1 \times 0.3037 + \text{TM}_2 \times 0.2793 + \text{TM}_3 \times 0.4343 \\ + \text{TM}_4 \times 0.5585 + \text{TM}_5 \times 0.5082 + \text{TM}_7 \times 0.1863 \quad (2)$$

$$\text{Moist} = \text{TM}_1 \times 0.1509 + \text{TM}_2 \times 0.1793 + \text{TM}_3 \times 0.3299 \\ + \text{TM}_4 \times 0.3406 + \text{TM}_5 \times (-0.7112) + \text{TM}_7 \times (-0.4572) \quad (3)$$

式中:NDVI为归一化植被指数;Red代表红波段;NIR为近红外波段;TM₁~TM₅分别代

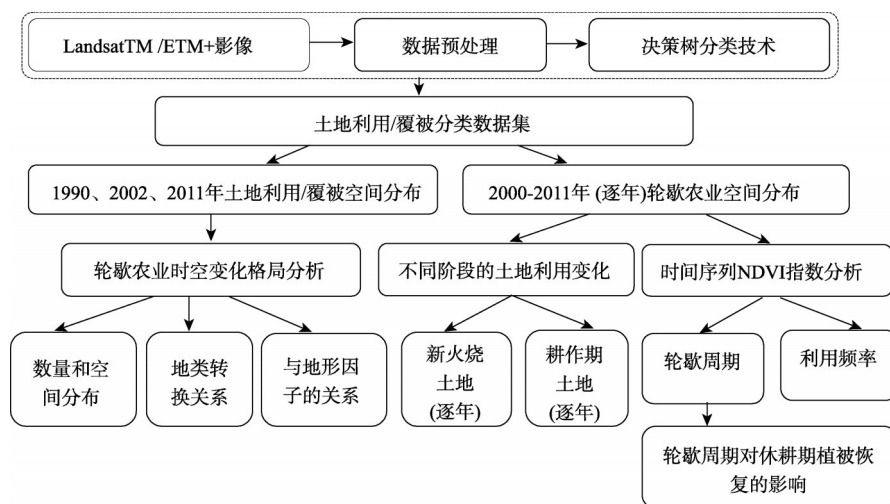


图2 刀耕火种农业时空变化及次生林恢复效应研究技术路线

Fig. 2 The workflow for monitoring the spatio-temporal dynamics of swidden agriculture and effects on fallow vegetation recovery

表蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、中红外波段1, TM₇代表中红外波段2。

2.3.2 精度验证 利用野外采样数据、Google Earth提供的高分辨率Quickbird影像、2~4月时间窗口的Landsat TM/ETM+建立精度验证样本集。由于野外采样数据主要为历史年份提供遥感解译标志, Google Earth提供的高分辨率影像也只能获取到部分年份的数据, 因此, 对于大部分历史年份的分类精度验证, 利用人工目视判断2~4月(刀耕火种农业土地清理时期)的Landsat TM/ETM+影像, 挑选足量、空间分布均匀的样本点作为精度验证样本集。由于刀耕火种农业土地清理阶段像元在Landsat TM第5、4、3波段组合下, 其色彩与其他土地利用类型形成鲜明反差, 且刀耕火种农业斑块面积一般小于0.01 km², 因此运用人工目视判读挑选验证点是可行的。刀耕火种农业都要经历土地清理阶段(新火烧土地阶段), 在随后1~3年进入耕作期阶段, 因此本文利用前期刀耕火种农业新火烧土地/像元验证后期耕作期土地/像元。

2.3.3 计算刀耕火种农业的轮歇周期 本文提出一种基于ArcGIS10.0空间分析功能计算刀耕火种农业轮歇周期的新方法:

$$L_n = k_i + (k+n)_i - \sum_{j=1}^{n-1} L_j \quad (4)$$

式中: L_n 为轮歇周期为 n 年的新火烧土地栅格数据; K 为常数, 代表年份, 如计算2000年新火烧土地(即新利用的刀耕火种农业)的轮歇周期, 则 K 取值2000。 k_i 为 k 年新火烧土地栅格数据。 n 表示轮歇周期, 以年为单位计算(取值1至 n)。 $(k+n)_i$ 为 $k+n$ 年新火烧土地栅格数据。 k_i 和 $(k+n)_i$ 之间的“+”号表示空间叠加取交集。 $(k+n)_i$ 后面的“-”号表示空间扣除后者, 即依次扣除 L_1, L_2 至 L_{n-1} 栅格图层。

因此, 2000年新火烧土地中, 轮歇周期为5年的土地栅格图层提取方法即为:

$$L_5 = 2000_i + 2005_i - 2004_i - 2003_i - 2002_i - 2001_i \quad (5)$$

式中: 2000_{*i*}、2001_{*i*}、2002_{*i*}、2003_{*i*}、2004_{*i*}、2005_{*i*}分别表示2000-2005年新火烧土地栅格数据。其他年份新火烧土地中不同轮歇周期的土地栅格层获取以此类推。

2.3.4 计算刀耕火种农业的利用频率 基于遥感获取2000年新火烧土地像元, 在ArcGIS 10.0中依次与随后各年份(2001-2011)新火烧像元叠加, 得到2000年新火烧像元与随后各年份新火烧像元重叠部分, 即为2000年新火烧土地被2000-2011年各年份重新利用的情况。依次以上述各年份和2000年新火烧重叠像元为对象, 基于Landsat-NDVI数据绘制2000-2011年时间序列曲线。一般而言, 刀耕火种农业利用初期为土地清理阶段, 林木砍伐和焚烧使新火烧像元NDVI值由土地清理前的较高水平骤然下降到在土地清理后的较低水平(0或负值), 本文通过统计NDVI从中高水平降低至零值或负值的次数, 来判断刀耕火种农业在2000-2011年的利用频率。

3 结果分析

3.1 刀耕火种农业总体变化特征

1990、2002、2011年土地利用/覆被分类结果总体精度依次为87.62%、85.75%和88.36%, 1990年和2000-2011年逐年刀耕火种农业分类精度均在90%以上, 能够满足研究需求。1990-2011年, 老挝北部刀耕火种农业面积呈增加趋势(图4a), 由15.38万hm²增加到了23.84万hm², 增幅为54.98%。1990-2002年和2002-2011年, 老挝北部刀耕火种农业面积分别增加了23.94%和25.05%。其中波乔省是刀耕火种农业面积持续增加的唯一省份, 总体增幅近6倍, 空间扩张主要在东部与乌多姆塞省和琅南塔省的接壤地区, 后

期扩张到整个南部,尤其是该省西边的湄公河附近。丰沙里省是刀耕火种农业面积明显减少的唯一省份,总体减幅为61.60%,减少主要发生在南部。琅勃拉邦省刀耕火种农业经历了一个先小幅减少后大幅增加的过程,总体增幅约1.5倍,主要原因是前一时期大部分处于火烧迹地状态的土地上次生林没有恢复,无法用于刀耕火种农业,直到2009年这一情况才得以转变,因此后期该省刀耕火种农业出现全省性扩张。乌多姆塞省刀耕火种农业经历了一个先减少后增加的过程,总体增幅为29.12%,前一时期变化由于刀耕火种农业进入休耕阶段,后一时期变化由于休耕期结束,刀耕火种农业开始重新利用,空间变化主要发生在该省西部与琅南塔省和波乔省交界区附近。琅南塔省刀耕火种农业经历了一个先增加后减少的过程,总体增幅为52.45%,空间扩张主要分布在该省北部和中

部,面积减少发生在各个区域上(图3)。

老挝北部刀耕火种农业主要分布在海拔高度500~800 m的地区,其次分布在海拔高

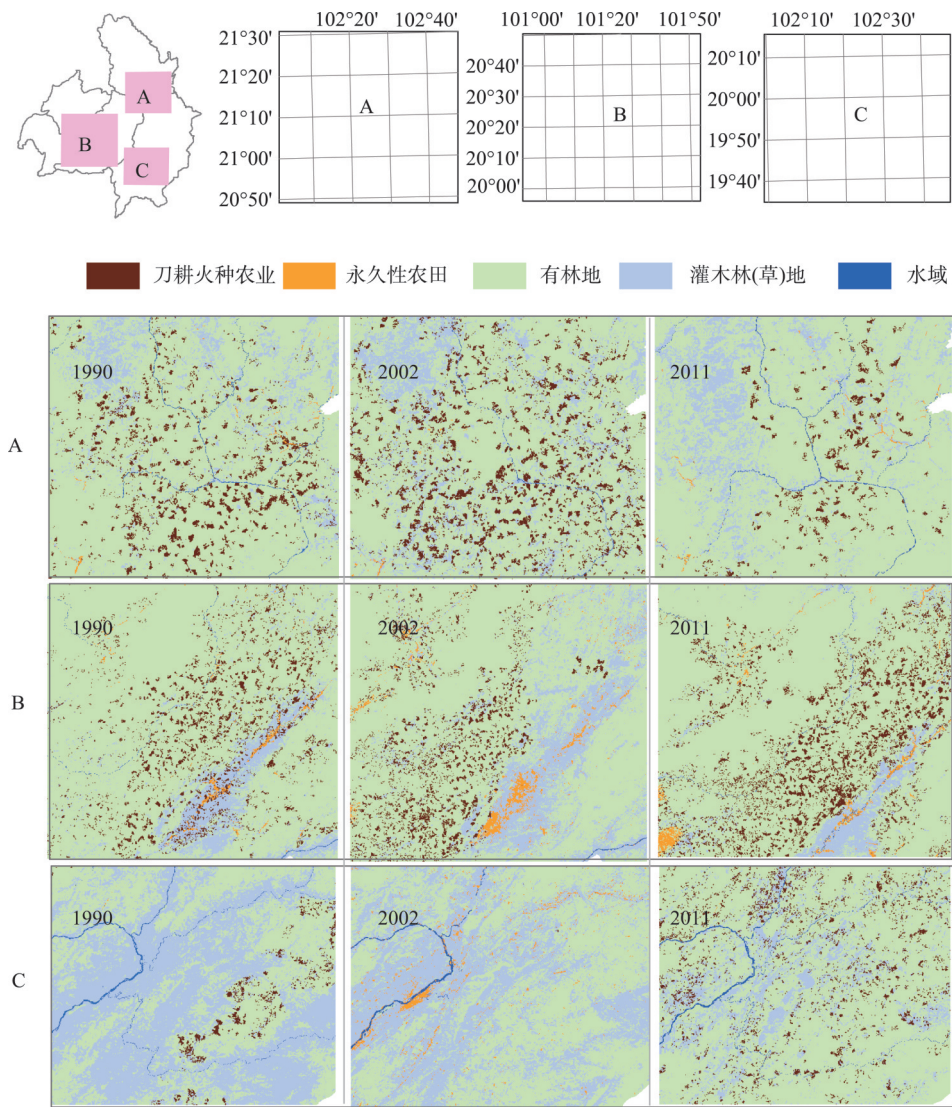


图3 老挝北部主要地区(A、B、C)刀耕火种农业和其他土地利用类型空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of swidden agriculture and other land use types in A, B and C regions of northern Laos

度800~1000 m和1000~1500 m的地区。1990-2011年,刀耕火种农业增加主要发生在海拔高度500~800 m、300~500 m和800~1000 m的地区,增幅分别为60.87%、25.20%和19.43%,减少主要发生在海拔高度1000 m以上地区。刀耕火种农业主要分布在坡度为10°~20°和20°~30°的地区,增加主要发生在坡度10°~20°和20°~30°的地区,增幅分别为45.16%和29.70%。刀耕火种农业在各个坡向上均有分布,且分布的比例差别不大。

老挝北部刀耕火种农业的地类转移方向主要是有林地,其次是灌木林(图4e、4f)。1990-2011年,新增的刀耕火种农业中,有林地的贡献约为4/5,而减少的刀耕火种农业有84.19%转变为有林地。刀耕火种农业与灌木林(草地)的相互转变,占刀耕火种农业变化面积的15%~20%左右。1990-2002年和2002-2011年,分别有16.14万 hm^2 和14.62万 hm^2 有林地转变为刀耕火种农业,占转入刀耕火种农业面积的89.32%和65.99%;同期,分别有9.85万 hm^2 和14.16万 hm^2 刀耕火种农业转变为有林地,占转出刀耕火种农业面积的68.47%和81.47%。

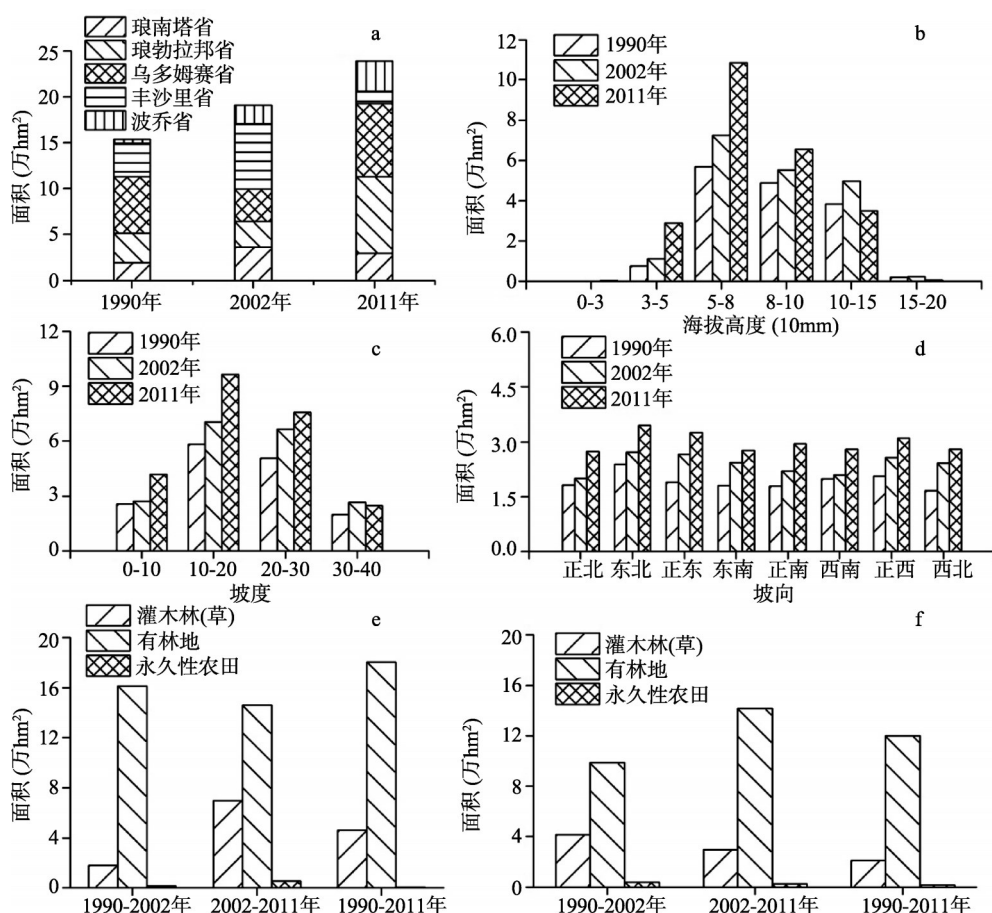


图4 1990-2011年老挝北部刀耕火种农业的时空变化特征

- a. 刀耕火种农业面积变化; b. 空间分布与海拔高度的关系; c. 空间分布与坡度的关系; d. 空间分布与坡向的关系; e. 刀耕火种农业转入地类面积; f. 刀耕火种农业转出地类面积

Fig. 4 Characteristics of the spatio-temporal dynamics of swidden agriculture in northern Laos from 1990 to 2011
a. The area of swidden cultivation; b. Swidden cultivations distributed in different elevations; c. Swidden cultivations distributed in different slopes; d. Swidden cultivations distributed in different aspects; e. Other land use/cover types transformed to swidden agriculture; f. Swidden agriculture transformed to other land use/cover types

3.2 刀耕火种农业不同阶段土地利用变化

老挝北部2000-2011年刀耕火种农业新火烧土地和耕作期土地空间分布如图5所示。2000-2011年,新火烧土地面积呈波动变化(图6a)。新火烧土地面积在2002、2004、2007、2011年达到最大值,分别为12.99万hm²、10.01万hm²、7.06万hm²和17.96万hm²。新火烧土地面积达到最大值的相邻年份相隔1~3年。新火烧土地面积在2003、2005、2008年达到最小值,分别为5.31万hm²、2.98万hm²和3.72万hm²。新火烧土地面积达到最小值的相邻年份相隔1~3年。

2000-2011年,老挝北部耕作期土地面积呈波动变化(图6b)。耕作期土地面积在2003、2005、2008年达到最大值,这些年份新火烧土地面积正好处于最低值,这说明2003、2005、2008年刀耕火种农业面积总体上保持稳定。2002、2007、2011年新火烧土地面积达到最大值,而耕作期土地面积也处于最大值或呈上升趋势,这说明2002、2007、2011年刀耕火种农业面积总体上有所增加。耕作期土地面积在2004、2006、2009

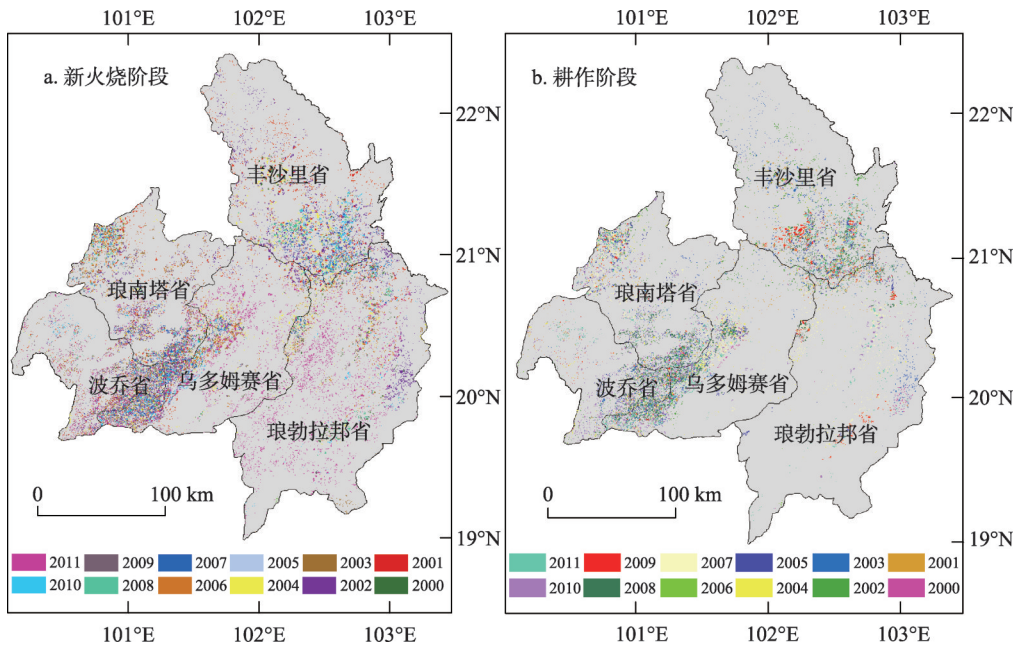


图5 2000-2011年老挝北部新火烧土地和耕作期土地空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of swidden cultivation in the burning and cropping phrase in northern Laos from 2000 to 2011

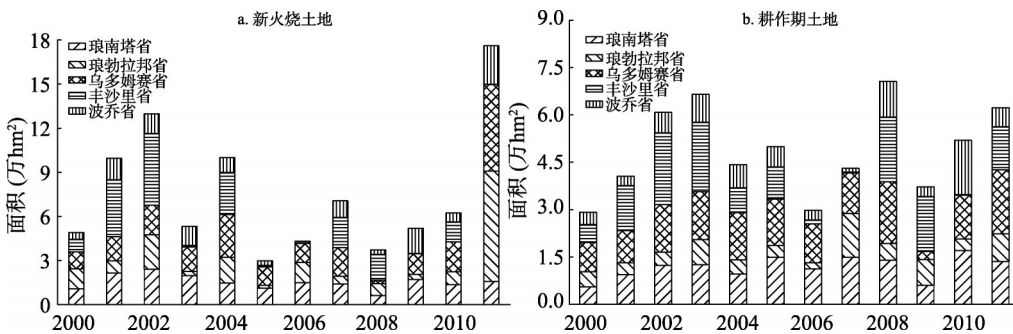


图6 2000-2011年老挝北部新火烧土地和耕作期土地面积

Fig. 6 Area of swidden cultivation in the burning and cropping phrase in northern Laos from 2000 to 2011

年达到最小值,这些年份新火烧土地面积处于最大值或呈上升趋势,这说明2004、2006、2009年刀耕火种农业面积总体上保持稳定。耕作期土地面积达到最小值的年份(2004、2006、2009年)比新火烧土地达到最小值的年份(2003、2005、2008年)正好滞后一年,这和刀耕火种农业新火烧土地和耕作期土地利用的时间先后顺序正好对应。

3.3 刀耕火种农业土地利用强度变化

3.3.1 利用频率 图7为2000年新火烧土地被2001-2011年各年份重新利用像元的NDVI时间序列曲线。由于2008年数据源缺失,本文利用2009年和2010年耕作期土地来推断2008年新火烧土地,利用2006年和2007年新火烧土地来推断2008年耕作期土地。结果表明,2000年新火烧的刀耕火种农业在2001年被重新利用的部分,在2004、2007和2009年被再次利用了,这期间间隔分别为1年、3年和3年;2000年新火烧的刀耕火种农业在2002年被重新利用的部分,在2004、2010年被再次利用了,这期间间隔分别为2年、2年和6年;2000年新火烧的刀耕火种农业在2003年被重新利用的部分,在2010年被再次利用了,这期间间隔分别为3年和7年;2000年新火烧的刀耕火种农业在2004年被重新利用的部分,在2007年和2009年被再次利用了,这期间间隔分别为4年、3年和2年。同理可分析2005、2006、2007、2008、2009、2010年重新利用的刀耕火种农业在2000-2011年期间被利用的情况。结合图7和以

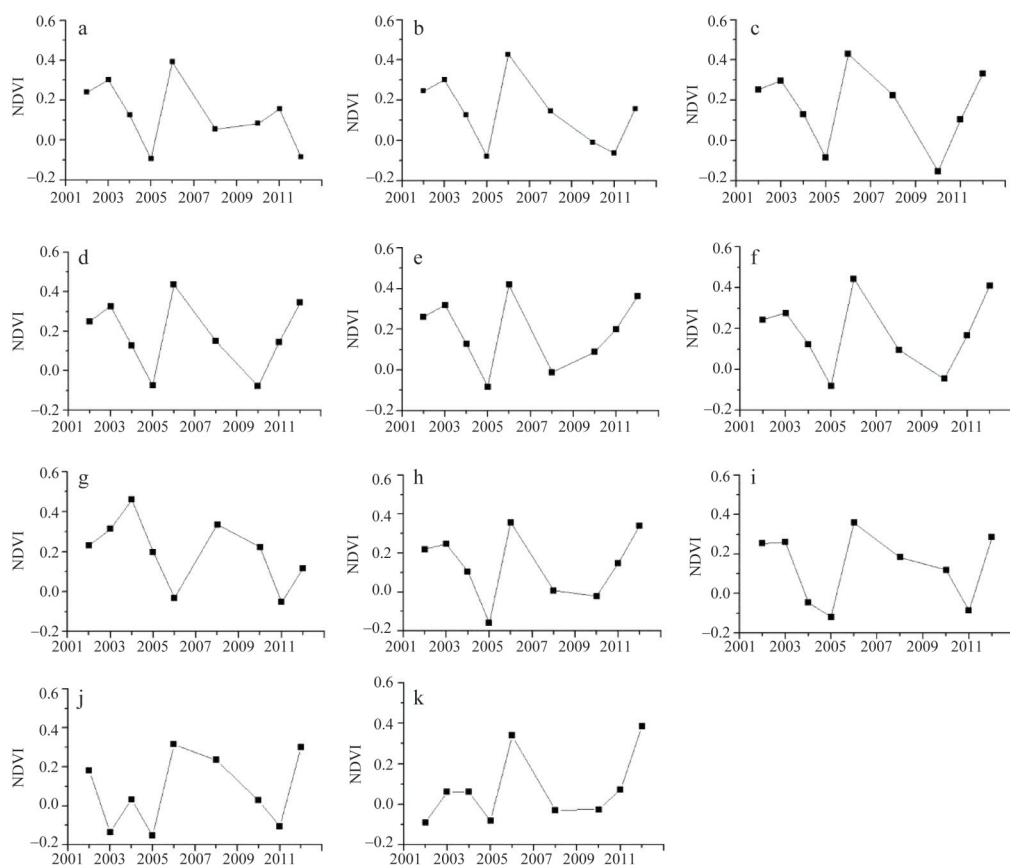


图7 2000年老挝北部新火烧的刀耕火种农业在2001-2011年被重新利用的NDVI时序变化

Fig. 7 Temporal profiles of Landsat-derived NDVI during 2001-2011 based on the burned pixels detected in 2000

上分析可知, 2000-2011年刀耕火种农业的利用频率一般为2~3次, 时间间隔为1~7年不等, 在2004年和2009年重复利用的情况居多。

3.3.2 轮歇周期 由于轮歇周期计算需要一定的时长作为分析前提, 而本研究的数据为2000-2011年, 时长最多为11年, 因此, 对于2000年新火种的刀耕火种农业, 计算到2011年可以得到轮歇周期为1~11年的土地面积, 剩余部分为轮歇周期12年及以上的土地; 对于2003年新火种的刀耕火种农业, 计算到2011年可以得到轮歇周期为1~8年的土地面积, 剩余部分为轮歇周期9年及以上的土地; 同理, 对于2007年新火种的刀耕火种农业, 计算到2011年可以得到轮歇周期为1~4年的土地面积, 剩余部分为轮歇周期5年及以上的土地。据此, 研究分析了2000、2003和2007年新火种刀耕火种农业的利用周期以及相应的土地面积比例 (图8)。

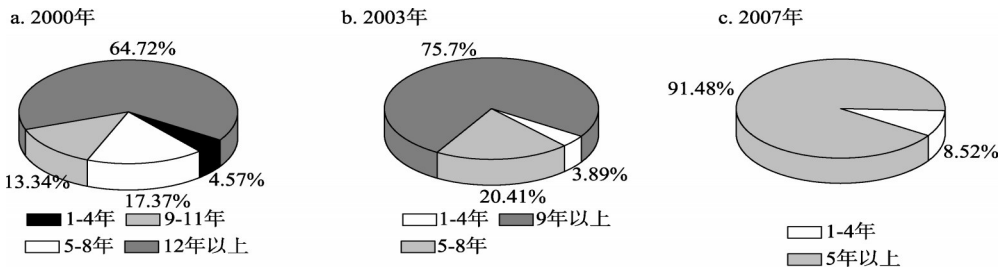


图8 老挝北部刀耕火种农业的轮歇周期及面积比例

Fig. 8 Swidden cycles and the related proportion of swidden farming in northern Laos

研究表明, 2000年新火种土地中, 有4.90%的土地具有1~4年的轮歇周期, 17.37%的土地具有5~8年的轮歇周期, 13.34%的土地具有9~11年的轮歇周期, 64.72%的土地轮歇周期达到12年及以上。由此可见, 2000年有一半以上的刀耕火种农业休耕期较长。2003年新火种土地中, 轮歇周期为1~4年的土地面积比例为3.89%, 与2000年相比略有减少; 轮歇周期为5~8年的土地面积比例为20.41%, 相比2000年增加了3.04%; 轮歇周期为9年及以上的土地面积比例为75.70%, 相比2000年减少了2.36%。可见, 2003年刀耕火种农业的利用周期相比2000年有所缩短, 有1/4的土地轮歇周期在9年以下。2007年新火种的刀耕火种农业中, 轮歇周期为1~4年的土地面积比例增加至8.52%, 相比2003年增加了4.63%。可见, 2000年以后, 老挝北部刀耕火种农业轮歇周期有所缩短, 变化幅度不大。

3.4 刀耕火种农业土地利用变化的植被恢复效应

研究分析了2000年新火种的刀耕火种农业在不同轮歇周期下的次生林植被恢复状况, 以NDVI值来表征 (表2)。绿色格子中的数值表示轮歇周期为 N 年的土地, 在第 $N-1$ 年的次生林自然恢复的NDVI值。黄色格子中的数值表示轮歇周期为 N 年的土地被重新利用 (火烧清理后) 的NDVI值。次生林自然恢复的NDVI值与轮歇周期的关系如图9所示。研究表明, 老挝北部刀耕火种农业的轮歇周期与休耕期次生林恢复状况的关系

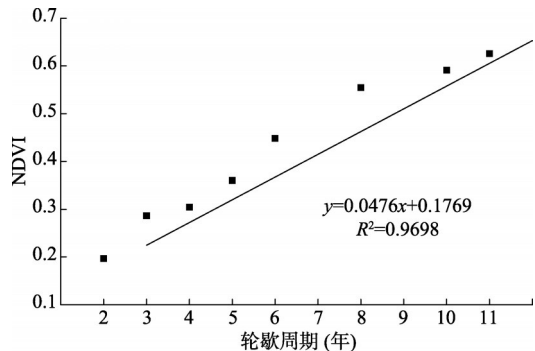


图9 老挝北部刀耕火种农业休耕期植被恢复与轮歇周期的关系

Fig. 9 The relationship of fallow vegetation recovery and swidden cycles in northern Laos

表2 基于时间序列NDVI的不同轮歇周期下植被恢复过程

Tab. 2 Fallow vegetation recovery processes as the swidden cycle increased based on time series Landsat-NDVI

轮歇周期	休耕期地表覆被的NDVI										
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
11年	0.2453	0.3042	0.3252	0.3561	0.3903	***	0.4734	***	0.5482	0.6257	0.0604
10年	0.2495	0.3228	0.3241	0.3786	0.4176	***	0.5216	***	0.5913	-0.6381	
9年	0.2539	0.3030	0.3332	0.3807	0.4322	***	0.5326	***	-0.5542		
8年	0.2499	0.3319	0.3285	0.3734	0.4386	***	0.5546	***			
7年	0.2567	0.3210	0.3463	0.3612	0.4165	***	-0.2751				
6年	0.2479	0.2845	0.3247	0.3766	0.4484	***					
5年	0.2470	0.2816	0.3202	0.3603	-0.0726						
4年	0.2380	0.2484	0.3045	-0.1569							
3年	0.2745	0.2863	-0.0445								
2年	0.1968	-0.1268									
1年	-0.0905										

显著。当轮歇周期较长时，次生林恢复状况越好，NDVI值越大，两者相关性的线性表达为： $Y = 0.0476X + 0.1769$ ，相关系数高达0.9698。此外，通过计算研究区有林地的NDVI平均值（0.56），并将这一数值与表2中的次生林自然恢复NDVI数值相比较，发现当刀耕火种农业的轮歇周期长达10年时，次生林能够恢复到该区域有林地NDVI的平均水平。

4 结论与讨论

基于“3S”技术研究了老挝北部1990-2011年刀耕火种农业时空变化的总体特征及其不同阶段土地利用变化、刀耕火种农业利用强度（利用频率、轮歇周期）及其对休耕期次生林自然恢复过程的影响。主要结论如下：

（1）1990-2002年和2002-2011年老挝北部刀耕火种农业均呈增加趋势，总体增幅为54.98%。1990-2002年刀耕火种农业增加主要发生在波乔省东南部、琅南塔省中部、丰沙里省北部和中部，减少主要发生在乌多姆塞省；2002-2011年刀耕火种农业增加主要发生在波乔省南部、琅勃拉邦省、乌多姆塞省，减少主要发生在丰沙里省。

（2）老挝北部刀耕火种农业主要分布在海拔高度500~1500 m、坡度10°~30°的地区，增加首先发生在海拔高度500~800 m、坡度10°~20°的地区，其次发生在海拔高度300~500 m和800~1000 m、坡度20°~30°的地区；刀耕火种农业在各个坡向上均有分布，分布比例差别不大。

（3）老挝北部刀耕火种农业的地类转移方向主要是有林地。1990-2011年新增的刀耕火种农业中，有林地的贡献达4/5，减少的刀耕火种农业有84.19%转变为有林地。

（4）2000年以后（2001-2011年），老挝北部刀耕火种农业的利用频率一般为2~3次，时间间隔1~7年不等，在2004年和2009年再次利用的情况居多。2000年、2003年和2007年相比，轮歇周期有所缩短，变化幅度不大。

（5）老挝北部刀耕火种农业休耕期植被恢复状况与轮歇周期关系显著，二者相关系数为0.9698。当轮歇周期长达10年时，次生林能够恢复到该区域有林地NDVI的平均水平。

本研究基于长时间序列的刀耕火种农业遥感分类结果,动态分析了老挝北部刀耕火种农业的时空变化格局、土地利用强度和休耕期次生林自然恢复,对于深入理解热带山区刀耕火种农业的土地利用变化、科学实施联合国REDD+计划、减缓气候变化和保护生态环境都具有重要意义。由于遥感影像的可获取性,本文对老挝北部刀耕火种农业利用强度的研究只限于2000-2011年连续年份的数据。未来将进一步补充2012-2020年的数据,从而分析2011年以后刀耕火种农业的土地利用方式和强度,进一步挖掘规律性、延伸动态性和加强对比性。并通过进一步野外科学考察,收集实地资料,定量研究刀耕火种农业时空变化的驱动因素。

参考文献(References)

- [1] Kleinman P J A, Pimentel D, Bryant R B. The ecological sustainability of swidden agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 52 (2/3): 235-249.
- [2] Rossi J P, Celini L, Mora P, et al. Decreasing fallow duration in tropical swidden agriculture alters soil macro-invertebrate diversity: A case study in southern French Guiana. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 148-154.
- [3] Mertz O. Trends in shifting cultivation and the REDD mechanism. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2009, 1(2): 156-160.
- [4] Li P, Feng Z, Jiang L, et al. A review of swidden agriculture in Southeast Asia. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1654-1683.
- [5] Achard F, Eva H D, Stibig H J, et al. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science*, 2002, 297(5583): 999-1002.
- [6] Rerkasem K, Lawrence D, Padoch C, et al. Consequences of swidden transitions for crop and fallow biodiversity in Southeast Asia. *Human Ecology*, 2009, 37(3): 347-360.
- [7] Hurni K, Hett C, Heinimann A, et al. Dynamics of shifting cultivation landscapes in northern Lao PDR between 2000 and 2009 based on an analysis of MODIS time series and Landsat images. *Human Ecology*, 2013, 41(1): 21-36.
- [8] Fox J. How blaming 'slash and burn' farmers is deforesting mainland Southeast Asia. *Asia Pacific Issues*, 2000, 47: 1-8. <http://hdl.handle.net/10125/3832>.
- [9] Metzger J P. Landscape dynamics and equilibrium in areas of swidden agriculture with short and long fallow period (Bragantina region, NE Brazilian Amazon). *Landscape Ecology*, 2002, 17(5): 419-431.
- [10] Schmidt-Vogt D, Leisz S J, Mertz O, et al. An assessment of trends in the extent of swidden in Southeast Asia. *Human Ecology*, 2009, 37(3): 269-280.
- [11] Siren A H, Brondizio E S. Detecting subtle land use change in tropical forests. *Applied Geography*, 2009, 29(2): 201-211.
- [12] Nakano K. An ecological study of swidden agriculture at a village in Northern Thailand. *Southeast Asian Studies*, 1978, 16(3): 411-446.
- [13] Padoch C, Coffey K, Mertz O, et al. The demise of swidden in Southeast Asia? Local realities and regional ambiguities. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 2007, 107(1): 29-41.
- [14] Schuck E C, Nganje W, Yantio D. The role of land tenure and extension education in the adoption of slash and burn agriculture. *Ecological Economics*, 2002, 43(1): 61-70.
- [15] Rasul G, Thapa G B. Shifting cultivation in the mountains of South and Southeast Asia: Regional patterns and factors influencing the change. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(5): 495-508.
- [16] Ziegler A D, Bruun T B, Guardiola-Claramonte M, et al. Environmental consequences of the demise in swidden cultivation in montane mainland Southeast Asia: Hydrology and geomorphology. *Human Ecology*, 2009, 37(3): 361-373.

Monitoring the spatio-temporal dynamics of swidden agriculture and fallow vegetation recovery using Landsat imagery in northern Laos

LIAO Chenhua^{1,2}, FENG Zhiming¹, LI Peng¹, ZHANG Jinghua¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Swidden agriculture is an age-old, prevailing but controversial farming practice in Montane Mainland Southeast Asia (MMSEA). In the uplands of northern Laos, swidden agriculture has become the predominant land use type for centuries. The swidden system has undergone dramatic transformations since the mid-1990s. The debate on the change of swidden cultivation is linked to global critical issues of land use/cover change, biodiversity and climate change. Since the implementation of Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD) by the United Nations, an increasing attention has been given to swidden agriculture in the humid tropics nationally and internationally. However, very little is known or reported about the explicit spatial information of swidden agriculture and the consequences of the transitions at macroscopic scale. For the purpose of understanding the spatial and temporal dynamics of swidden system, the intensity of swidden use and fallow forest recovery in northern Laos, in this study, the swidden agriculture in 1990, 2002, and 2011 were mapped and delineated with Landsat Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) imagery (30 m) with a decision tree classification method, followed by the analysis of spatio-temporal changes of swidden agriculture. Then, annual successive TM/ETM+ images during the period 2000-2010 were used to delineate the dynamics of burning phase and cropping phase. Subsequently, the burned pixels derived in 2000 were compared with those in the following years (2001-2011) under ArcGIS 10.0 to investigate the temporal development, land use frequency and swidden cycle with time-series Landsat-based NDVI data. Finally, as the swidden cycle changed from 1 to 11 years, the fallow vegetation recovery process was studied. The results showed that: (1) From 1990-2011, the area of swidden agriculture increased by 54.98%, from 153,800 to 238,400 ha. The increased swidden cultivation were mainly found in Luang Prabang and southern Bokeo; while the decreased parts were mainly in Phongsali. (2) The swidden agriculture mainly increased at the elevations of 500-800 m, 300-500 m and 800-1000 m and on the slopes of 10°-20° and 20°-30°. More than 80% of swidden farming land was transformed from forests. (3) During the period 2000-2011, the frequency of swidden use in northern Laos was about 2 or 3 times. The intervals of any two swidden use phases ranged from 1 to 7 years. In comparison with swidden cycles and the related proportion of swidden farming in the years of 2000, 2003 and 2007, swidden cycles in most parts were shortened. (4) There was a significant correlation between fallow vegetation recovery and swidden cycle, with a correlation coefficient of 0.9698. The NDVI of regenerated vegetation could be equal to the average NDVI value of forest when the swidden cycle reaches 10 years.

Keywords: swidden agriculture; spatio-temporal changes; swidden cycle; frequency of swidden use; fallow vegetation recovery; Landsat; Laos