

基于多源遥感数据的纳板河国家级自然保护区人类活动用地监测

刘晓龙¹, 徐 瑞¹, 付 卓^{2*}, 史正涛¹, 高书鹏¹

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘 要: 人类活动对自然保护区内的珍稀及濒危野生动植物资源产生威胁。以自然保护区土地利用及其变化作为保护区内人类活动的代表。针对在低纬度热带地区多云雾天气对光学遥感成像产生严重干扰的条件下, 如何实现基于多源遥感数据构建高时间、高空间分辨率遥感数据, 监测复杂地形及气候环境下的热带雨林环境自然保护区土地利用变化监测, 进而分析保护区人类活动这一问题展开研究。采用时空数据融合技术实现了 2000 年、2004 年、2010 年和 2015 年纳板河国家级自然保护区内人类活动(主要为人类活动用地: 橡胶林、耕地、建筑用地)和自然地表(水体和自然林)分类识别, 结果表明: 1) 时空数据融合技术能够实现复杂地形以及多云雾天气条件下的高时空分辨率遥感数据, 实现基于该时间序列数据的人类活动用地较高精度识别(2000 年、2004 年、2010 年、2015 年的总体分类精度分别为 88.13%、86.88%、89.38%、90.63%, Kappa 系数分别为 0.834 0、0.817 6、0.853 3、0.871 1); 2) 纳板河国家级自然保护区内 2000 年至 2015 年期间, 自然林的面积持续减少, 橡胶林、耕地及建筑的面积持续增加; 3) 保护区内人类活动随地形的变化特征是: 橡胶林及耕地范围在向坡度较大的地区扩张, 大部分橡胶林种植在坡度为 13°~24°之间, 耕地也在向坡度较大的地区逐步扩张。该研究可为自然保护区监管部门及环境保护研究领域提供技术支持。

关键词: 遥感; 土地利用; 监测; 纳板河国家级自然保护区; 时空数据融合; 时间序列; 土地利用变化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.034

中图分类号: S127; S794.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0266-10

刘晓龙, 徐 瑞, 付 卓, 史正涛, 高书鹏. 基于多源遥感数据的纳板河国家级自然保护区人类活动用地监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 266—275. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.034 http://www.tcsae.org
Liu Xiaolong, Xu Rui, Fu Zhuo, Shi Zhengtao, Gao Shupeng. Monitoring land use for human activities in Nabanhe National Nature Reserve based on multi-source remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 266 — 275. (in Chinese with English abstract) doi : 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.034 http://www.tcsae.org

0 引 言

自然保护区是指对具有代表性的自然生态系统、珍稀濒危野生动植物物种的天然集中分布区、有特殊意义的自然遗迹等保护对象所在的陆地、陆地水体或者海域, 依法划出一定面积予以特殊保护和管理的区域^[1]。自然保护区的建立对生物的多样性、生态平衡、构建和谐的人与自然关系具有重大作用。然而自然灾害以及人类活动对自然保护区造成了严重的影响, 其中人类活动是导致自然保护区生态平衡遭受破坏的重要原因^[2-3]。2016 年, 原环境保护部用遥感技术对全国 446 个国家级自然保护区进行了监测, 监测结果发现, 2016 年全国国家级自然保护区均存在不同程度的人类活动^[4]。自然保护区人类活动遥感监测可为及时发现违法违规行提供线索, 为保护区监管提供技术支持。

随着遥感技术的快速发展, 遥感技术为自然保护区监测提供了新手段。传统的以光谱分析特征为基础的监督分类和非监督分类在自然保护区识别人类活动中应用比较广泛, 但基于监督分类和非监督分类的传统分类方法的分类精度在很大程度上取决于影像质量和时相选取^[5]。因此, 基于监督分类和非监督分类的传统分类方法得到的分类结果存在很大的不确定性^[6-7]。而时间序列分析方法则强调在一段时间内对同一区域进行连续遥感监测, 提取地物随时相变化的有关特征, 并分析地物变化特性, 诸如, 可以通过分析经济作物的多时相特征(NDVI 时间序列)来识别人工林、人工作物。目前有很多通过构建 NDVI 时间序列来提取地物的研究, 如刘晓娜等^[8]曾用时间序列 MODIS-NDVI 提取西双版纳橡胶林; 王红说等^[9]利用 MODIS-NDVI 时间序列谱匹配的方法提取季相相似的耕地。然而, 针对低纬地区多云多雾、地形复杂等特征, 采用单一遥感数据源进行地物精细识别具有局限性, 如空间分辨率不足, 或时间分辨率较低。为此, 许多研究者利用多源遥感数据基于时间序列进行地物的提取, 如刘晓娜等^[10]利用 Landsat 和 MODIS-NDVI 数据采用决策树分类方法提取中老缅边界处的橡胶林; 梁守真等^[11]利用 MODIS 时间序列的 NDVI 数据与多时相的 Landsat TM 数据用面向对象的方法提取海南省松涛水库

收稿日期: 2018-06-20 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501404); 云南省青年基金“基于多源遥感数据的植被类型精细分类方法研究”(2016FD021); 高分对地观测重大专项(30-Y20A37-9003-15/17)

作者简介: 刘晓龙, 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 主要从事高分热带植被遥感的理论和应用研究。Email: LiuXL@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 付卓, 女, 湖北省武汉人, 高级工程师, 主要从事自然保护区变化遥感监测研究。Email: fuzhuo@126.com

周边的橡胶林。上述研究结果表明, 基于时间序列遥感数据可以获取地物时相信息, 进而有效地实现地物识别精度的提高。然而基于多源可见光遥感数据的复杂天气及地形条件下自然保护区人类活动及其变化特征分析研究不多见^[12], 目前基于时间序列遥感观测的自然保护区变化监测多采用高时间、低空间分辨率数据^[13-15], 或高空间、低时间分辨率遥感观测数据^[16-18]。这两者在保护区土地利用或保护区人类活动监测上均有不足: 前者有利于保护区内人类活动的动态变化识别, 但是低空间分辨率数据存在大量混合像元, 不利于对地表覆被变化的精细分析, 无法实现面积较小的人类活动提取; 后者能够更精细地捕捉地物空间纹理及结构特征, 但是中国西南热带地区植被覆盖度高、地形复杂, 导致不同类型植被的空间纹理及结构特征存在混淆, 因此单一时相高空间分辨率数据的空间结构及光谱特征, 在不同类型植被分类识别中存在困难。如何兼具遥感影像观测中地物的时间、空间特征, 获取高时空分辨率数据, 是实现基于可见光遥感数据的热带地区复杂环境下高精度地物分类识别的重要途径。

本文针对低纬度热带地区多云雾天气对光学遥感成像产生严重干扰的条件下, 实现基于多源遥感数据构建高时间、高空间分辨率遥感数据, 监测复杂地形及气候环境下的热带雨林环境自然保护区土地利用变化, 进而

分析保护区人类活动, 对自然保护区监管和时间序列遥感观测技术在自然保护区人类活动动态监测应用中具有重要价值。

1 研究区数据

1.1 研究区概况

纳板河国家级自然保护区位于中国云南省西双版纳傣族自治州境内, 该保护区是由 1991 年建立的省级自然保护区, 于 2000 年 4 月晋升为国家级自然保护区。保护区距离景洪市大约 40 km, 其地理坐标为: 北纬 22°04′~22°17′, 东经 100°32′~100°44′ (图 1)。保护区内热量充足、气候湿润, 年平均气温 18~22 °C, 年降雨量 1 100~1 600 mm, 充沛的降雨和充足的热量条件造就了该保护区内丰富的生物多样性。纳板河保护区自然林覆盖率为 67.74%, 属于自然生态系统中的森林生态系统^[19]。纳板河自然保护区的主要保护对象是热带雨林以及珍贵的动植物, 但是随着橡胶市场的价格抬升, 加上西双版纳得天独厚的气候条件使得村民在自然保护区内大面积种植橡胶林, 许多轮歇地变成了橡胶林种植地, 甚至砍伐大面积的热带雨林后种植橡胶林, 严重威胁保护区内的生物多样性, 受到人们的广泛关注。

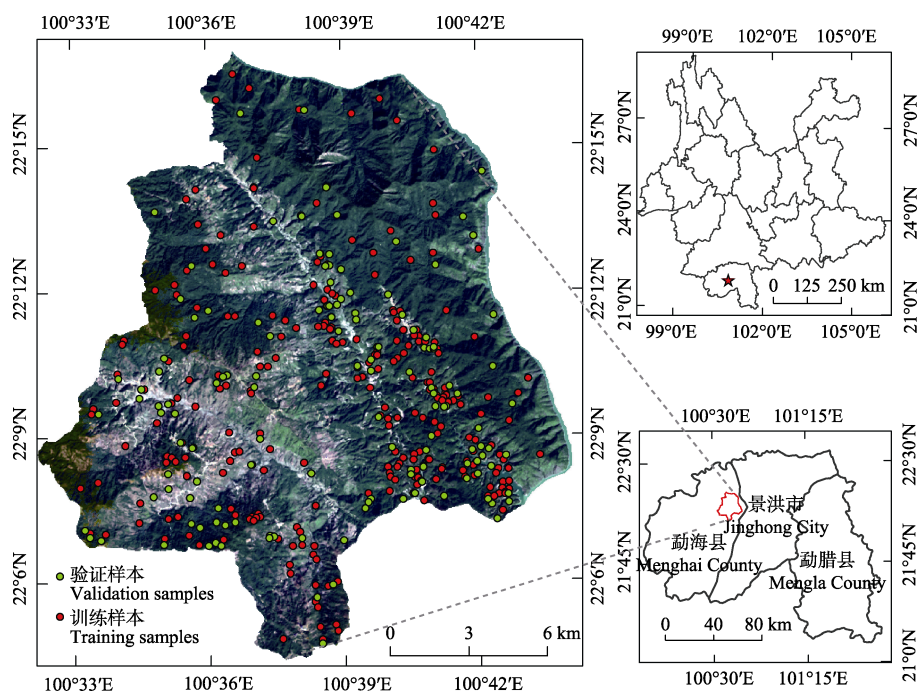


图 1 研究区位置 (纳板河国家级自然保护区位于西双版纳傣族自治州景洪市以北约 40 km)

Fig.1 Nabanhe National Nature Reserve study area that located about 40 km north of Jinghong City, Xishuangbanna thai prefecture

1.2 数据与方法

1.2.1 数据及其预处理

由于研究区的气候为热带季风气候, 分干季和湿季, 湿季云雨天气较多, 可见光数据可用性差, 因此用于本文的 MODIS 与 Landsat 数据均选自这一地区干季 (当年 11 月初至次年 3 月中旬, 地面调查结果表明, 期间耕地、

自然林、橡胶林植被覆盖度及其变化特征各不相同: 耕地与自然林植被覆盖度不变, 但是耕地处于休耕期, 植被覆盖度明显低于自然林; 橡胶林出现落叶及返青现象, 植被覆盖度先减小, 后回升), 数据近一个季度的时间跨度保证了研究区内地物具有相近的时相。本文使用的数据有 4 种:

1) Landsat 数据。Landsat 数据 1 级产品下载自美国地质调查局 (USGS) (<https://glovis.usgs.gov/>), 数据成像周期为 16 d。选取在研究区内无云的 2000 年、2004 年、2010 年、2015 年 4 个年份的 Landsat TM/ETM+/OLI 数据, 如表 1 所示。各年份内所用 MODIS 与 Landsat 数据具有相同的时相, 但由于不同年份之间可用的 Landsat 数据和成像时间不同, 所以各年份之间的数据时相存在差别, 但是每个时期内, 都具有前文所述的不同类型植被覆盖度的变化特征。美国地质调查局在发布 Landsat 数据之前已经对其进行系统校正, 属于一级产品, 研究需要用到地表反射率数据, 因此本文使用 LEDAPS 大气校正模型对其进行大气校正。LEDAPS 是基于 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型的大气校正软件, 由 NASA GSFC (Goddard Space Flight Center) 提供相应的参数数据^[20]。由于 Landsat 7 Enhanced Thermal Mapper Plus (ETM+) 传感器的扫描线校正器 (scan line corrector, SLC) 出现故障, 导致大约 22% 的像素未被扫描, 存在数据缺失。因此, 在使用 Landsat 7 ETM+数据之前要对其进行条带填充, 本文使用 GNSPI 算法对 ETM+数据进行条带填充处理^[21]。

2) MODIS 数据: 采用与 Landsat 数据同一时期的 MOD09GQ 数据 (MODIS 地表反射率产品, 属于陆地标准数据, 地面分辨率为 250 m, 重访周期为 1 d)。MODIS 数据源自 NASA 数据共享平台 (<http://reverb.echo.nasa.gov/>)。MODIS 发布产品为 HDF 格式, 投影类型为正弦曲线投影 (等面积伪圆柱投影), 与 Landsat 数据不同, 所以本文选用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具对其进行投影转换批处理, 将 MODIS 数据投影转换为基于 WGS-84 椭球体的 UTM 投影, 与 Landsat 数据坐标系保持一致。

3) SPOT 数据和 4) Google Earth 数据: SPOT 数据和 Google Earth 数据用于地物识别的精度验证, 研究区 2000 年的分类结果使用 SPOT 数据 (空间分辨率 10 m) 进行精度评定, 2004 年、2010 年、2015 年的分类结果分别采用 Google Earth 数据 (空间分辨率 4 m) 进行精度验证。

1.2.2 研究方法

Landsat 数据的空间分辨率为 30 m, 能够以较高的精度识别地物, 但时间分辨率较低 (重访周期 16 d), 且易受到云雾天气的影响, 导致部分数据缺失, 限制了 Landsat 数据对地表植被覆盖变化的监测能力。MODIS 数据的空间分辨率较低, 可应用于种植面积较大, 结构单一的作物识别和监测^[22-23], 但不适用于地表覆盖类型破碎、空间异质性强烈的复杂地物识别。受限于传感器技术, 当前尚不存在高时间、高空间分辨率的卫星遥感数据。但是通过多源数据融合技术, 能够获取可见光波段的地表反射率融合数据, 可以融合得到每日的 30 m 空间分辨率的地表反射率数据, 综合 Landsat 数据和 MODIS 数据的优点, 能够有效监测不同植被随时间的生长变化情况^[24]。Zhu 等^[25]提出的时空数据融合算法 ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model), 该算法通过指定大小窗口内前后 2 个时期的低分辨率和高分辨率像元对, 及待融合时相的低分辨率影像像元, 建立待融合像元与前后时期像元之间的空间关系, 估算当前高分辨率像元值。因该模型应用普遍、可靠程度高, 容易实现等原因, 本文采用时空数据融合算法 ESTARFM, 融合获得高时空分辨率数据。

获取融合数据后, 对融合的结果进行精度验证。本文用融合得到的数据与当日卫星观测数据进行相关性分析, 例如验证 2015 年第 35 天 (DOY035) 的融合精度, 是用融合得到的数据 (DOY035 红光和近红外波段反射率) 计算 NDVI, 建立该 NDVI 与当日 Landsat 数据计算所得 NDVI 之间的相关系数, 根据该相关系数分析融合精度^[26]。运用此方法分别验证 2000、2004、2010 和 2015 年融合的 NDVI 数据, 相关性 R^2 分别为: 0.821 3、0.818 1、0.942 0 和 0.901 2。决定系数 R^2 均高于 0.8 ($P<0.01$), 融合结果与观测结果显著相关, 表明融合产品的精度可靠, 可在一定程度上代表同时相观测影像的光谱信息。

在基于融合得到的高时空分辨率数据的研究区地类分类中, 首先用融合得到的数据构建 NDVI 时间序列, 由于 NDVI 时间序列上存在噪声, 因此本文使用 S-G (Savitzky-Golay) 滤波对其进行滤波处理^[27], 如图 2 所示。获取的 NDVI 时间序列数据集属于高维数据, 含有大量的植被变化信息, 而过高的数据维度会造成数据冗余及分类精度下降问题^[28-29]。因此, 本文提取 NDVI 时间序列曲线上对分类贡献较大的 6 个分类特征: 每年 12 月至次年 3 月期间的 NDVI 的最大值、最小值、时间序列曲线导数取值最小时对应的 NDVI 值 (不同类型植被 NDVI 的这 3 个值不同, 区分度高)、总体时间序列 NDVI 曲线积分 (曲线积分表达不同类型植被生长情况的不同)、每年第 1 天与每年第 43 天之间的 NDVI 曲线积分 (这一时期曲线积分表达橡胶林生长的累积量, 提高橡胶分类精度)、NDVI 最大值与 NDVI 曲线积分的比值 (使用不同特征的比值, 提高特征的区分度)^[30-31]。

分类中运用随机森林 (RF, Random Forest) 分类器并利用上述 6 个分类特征对保护区内建筑用地、耕地、橡胶林、水体和自然林进行分类识别。分类中, 训练样

表 1 所采用遥感影像
Table 1 Remote sensing images used

数据 Data	MOD09GQ	TM/ETM+/OLI
空间分辨率 Spatial resolution/m	250	30
影像获取时间 (儒略日) Image acquire date (DOY: day of year)	2000 年 DOY 306— 2001 年 DOY 052	2000 年 DOY 306 2001 年 DOY 012 2001 年 DOY 052
	2003 年 DOY 322— 2004 年 DOY 069	2004 年 DOY 005 2004 年 DOY 029 2004 年 DOY 069
	2009 年 DOY 314— 2010 年 DOY 045	2009 年 DOY 314 2010 年 DOY 021 2010 年 DOY 045
		2015 年 DOY 003 2015 年 DOY 027 2015 年 DOY 035 2015 年 DOY 059 2015 年 DOY 067
	2015 年 DOY 003— 2015 年 DOY 067	

本的选取直接关系到分类结果，为了保证选取样本的代表性以及随机性，本文根据 2000 年 10 m 分辨率的 SPOT 数据和 2004—2015 年的 Google Earth 高清影像，大致估算各地类的面积比例，然后根据各年份各地类比例选取相应的样本点。样本选取中，各年份的样本总数均为 400 个。分类中随机选取 200 个样本作为训练样本，用于训练分类器，其余的 200 个 (1/2) 用于分类结果的精度评价。本研究采用分类误差矩阵进行精度评价^[32]。研究区土地利用变化分析中，采用转移矩阵分析各年份间土地利用变化。整体方法流程见图 3 所示。

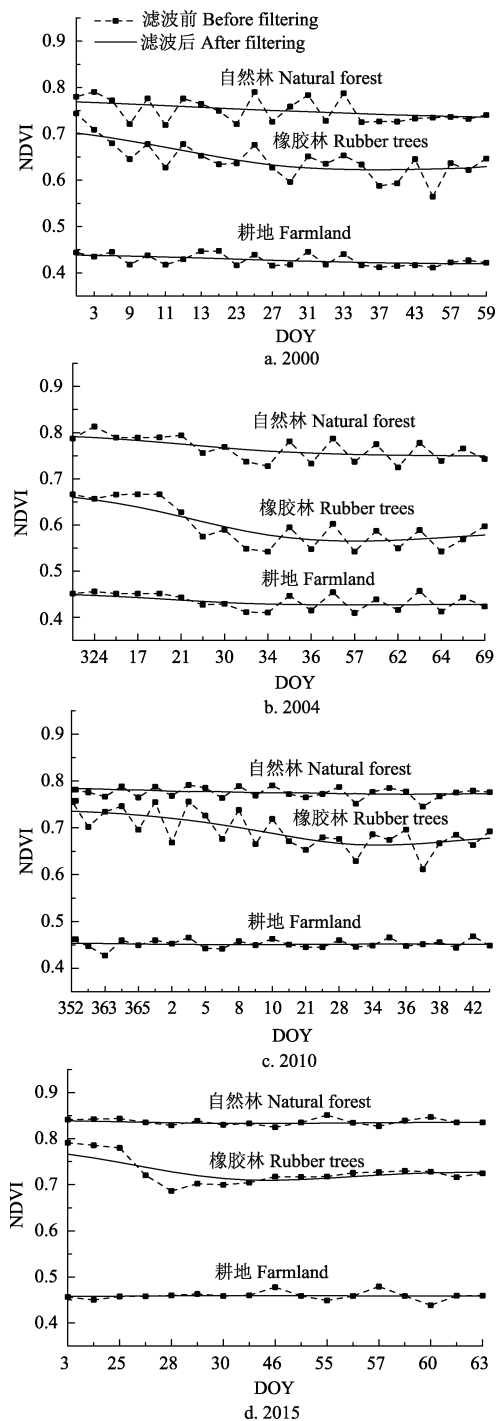


图 2 各时期时间序列 NDVI 数据去噪及不同植被曲线特征
Fig. 2 Time-series NDVI smooth and features of different vegetation in the study area at each period

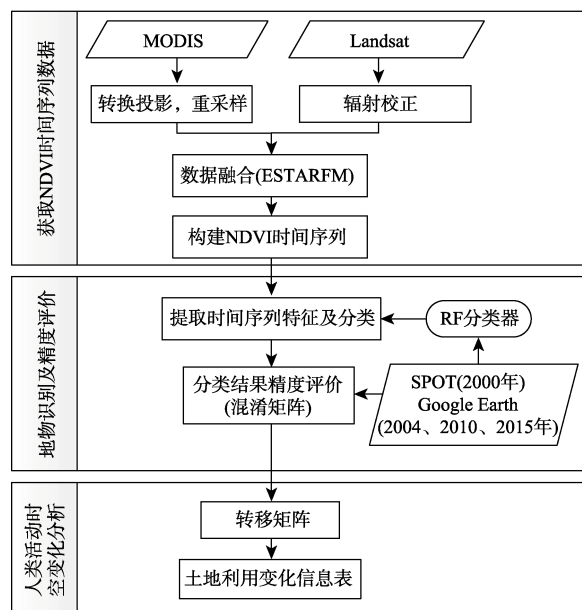


图 3 纳板河自然保护区人类活动用地监测方法流程图
Fig.3 Workflow of Nabanhe National Nature Reserve land use for human activities monitoring

2 地物分类及精度评价

本研究采用随机森林分类器实现分类，随机森林采用集成分类器的思想将若干弱分类器集成在一起，采用训练样本运用 bootstrap sample (随机且有放回地抽取) 抽样方法生成每个弱分类器的训练样本并得到相应的分类结果，各个弱分类器的分类结果共同构成了每个类别的一次“投票”，票数最多的那个类别即为分类结果，以此得到所有类别的分类结果。在弱分类器的使用中，Breiman^[16]采用 CART (classification and regression trees) 分类器作为构成随机森林分类器的弱分类器，在 CART 中的类别决策中使用 Gini 指数和信息熵作为决策依据。本文使用 Breiman 的随机森林分类器模型(<https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cchome.htm#papers>)，分类中分别设置随机森林中生长树为 100，节点分裂变量数为 3，分类特征为前文选取的 6 个分类特征。采用随机森林分类器的分类结果如图 4 所示。

结合分类结果 (见图 4) 和分类精度 (见表 2)，研究区 4 个不同年份的总体分类精度均在 86% 以上，Kappa 系数大于 0.817，分类精度较高。各年份分类结果中，极少部分耕地错分为橡胶林，这是由于在当年 12 月至翌年 3 月橡胶林处于落叶期，耕地处于农闲时期，橡胶林与农作物在影像上呈现相似的光谱特征，导致误分。在建筑物周围橡胶林被误分为自然林，因为在建筑物周围橡胶林与自然林之间没有明显的界限，自然林中混有橡胶林。当自然林的覆盖度较低时，自然林和耕地会出现小部分误分的现象。另一个导致分类精度评价结果较低的原因是分类样本，研究区内样本的选取是按各地物比例选取，而纳板河国家自然保护区内部分用地 (如建筑用地) 占比很小，导致这类地物的错分、漏分比例被夸大。

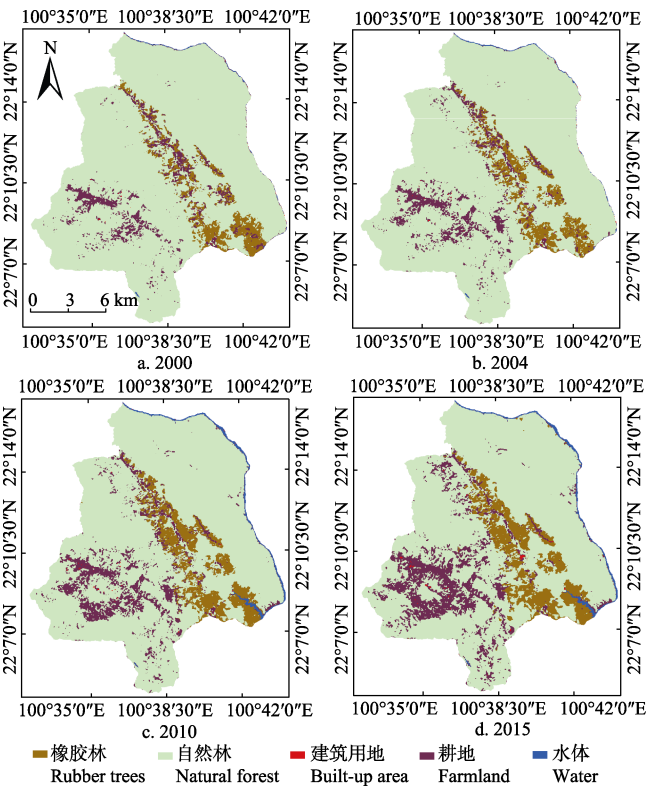


图4 纳板河自然保护区2000、2004、2010、2015年地物分类结果

Fig.4 Land cover classification results of Nabanhe National Nature Reserve in 2000, 2004, 2010, 2015

表2 纳板河自然保护区2000、2004、2010、2015年分类精度
Table 2 Land cover classification accuracies for Nabanhe National Nature Reserve in 2000, 2004, 2010, 2015

地类 Land cover	2000 年		2004 年		2010 年		2015 年	
	PA/%	UA/%	PA/%	UA/%	PA/%	UA/%	PA/%	UA/%
耕地 Farmland	82.50	89.19	75.00	78.95	80.00	94.12	90.00	87.50
建筑用地 Built-up area	70.00	87.50	60.00	85.71	70.00	87.50	70.00	87.50
水体 Water	90.00	100.00	90.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
橡胶林 Rubber trees	82.50	91.67	90.00	83.72	97.50	81.25	95.00	86.36
自然林 Natural forest	98.33	84.29	96.67	92.06	91.67	91.67	90.00	96.43
Kappa	0.834 0		0.817 6		0.853 3		0.871 1	
总体精度 Overall accuracy/%	88.13		86.88		89.38		90.63	

注：PA 表示生产者精度，UA 表示用户精度。
Note: PA represents producer's accuracy and UA represents user's accuracy.

3 结果与分析

为分析纳板河国家自然保护区用地在2000—2015年期间的变化特征，本文分别从2000—2015年保护区内各地类之间的相互转换和每种土地利用的时间变化趋势进行分析。另外本文又对2000—2015年期间该地区人工用地在地形上的变化趋势进行了分析，以揭示保护区人工用地变化的空间特征。

3.1 土地利用变化分析

土地利用转移矩阵可以很好地描述并分析研究区内的土地利用类型的面积变化情况，被广泛应用于土地利

用变化分析中。本文利用土地利用变化分析中比较常用的相对变化量、总变化量、转移矩阵来进行土地利用变化分析。

以2000、2004、2010和2015年的纳板河自然保护区土地利用分类结果为输入数据，利用ENVI 5.3软件计算得到西双版纳纳板河国家级自然保护区3个时间段的土地利用转移矩阵（见表3）。根据表3，计算得到2000—2015年间3个时间段各地类的变化情况（见表4）。对2000—2015年纳板河流域自然保护区的土地利用情况进行分析可以看出：

2000—2004年保护区内各地类变化中：

- 1) 保护区内增加的水体面积主要来源于耕地和建筑用地，转变成水体的耕地和建筑用地分别占研究区面积的0.06%和0.01%；
- 2) 扩张的耕地大部分由自然林转变而来（占整个研究区1.75%的自然林转变成耕地），其次是橡胶林（占整个研究区面积0.62%的橡胶林转变成耕地）；
- 3) 自然林和耕地对建筑用地的贡献率分别达到了0.01%和0.04%，耕地成为建筑用地的主要来源；
- 4) 橡胶林的种植范围在快速扩张，扩张的橡胶林主要来源于自然林和耕地（占整个研究区面积1.28%的自然林转变成橡胶林，占研究区面积1.75%的耕地变为橡胶林）。

2004—2010年保护区内各地类变化中：

- 1) 增加的水体面积主要来源于自然林和橡胶林，分别为研究区总面积的0.62%和0.17%；
- 2) 增加的建筑用地主要由耕地转变而来（占整个研究区面积0.05%的耕地成为了建筑用地），而增加的耕地面积主要来源于自然林，有整个研究区面积3.47%的自然林转变成耕地；

3) 扩张的橡胶林主要由自然林转变而来，转变成橡胶林的自然林面积占整个研究区面积的1.74%，其次是耕地，占研究区面积的0.58%。

2010—2015年保护区内各地类变化中：

- 1) 增加的水体面积主要来源于耕地，占整个研究区面积0.04%的耕地转变成水体，其次分别是橡胶林、自然林和建筑用地，对水体的贡献率均为0.01%；
- 2) 自然林对耕地的贡献率最大，增加的耕地面积中有96.47%来自于自然林（2010—2015年转变成耕地的自然林占整个研究区面积的比值为4.10%，2010—2015年新增的耕地面积占整个研究区面积的比值为4.25%， $4.10/4.25 \times 100\% = 96.47\%$ ）；

3) 扩张的建筑用地面积有76.92%来自耕地和橡胶林（2010—2015年转变为建筑用地的耕地与橡胶林的面积占整个研究区面积的百分比均为0.05%，0.13%是2010—2015年新增的建筑用地面积占整个研究区面积的比值， $(0.05\% + 0.05\%) \div 0.13\% = 76.92\%$ ）；占整个研究区总面积0.94%和0.60%的耕地和自然林用地转变成橡胶林种植地。

综上所述，研究区内2000—2015年减少的自然林用地主要转变成耕地、建筑用地、橡胶林种植地。扩张的建筑用地主要来源于耕地，其次是自然林和橡胶林；扩张的耕地主要由自然林和橡胶林转变而来。2000—2004年、2004—2010年、2010—2015年，每个时间段都有超过0.60%的自然林用地转变成橡胶林。

表 3 纳板河流域自然保护区 2000—2015 年土地利用转移矩阵
Table 3 Land use transfer matrix of Nabanhe National Nature Reserve from 2000 to 2015 (in percentage) %

年份 Year	地类 Land cover	2004					总计 Total	减少 Decrease
		橡胶林 Rubber trees	自然林 Natural forest	建筑用地 Built-up area	耕地 Farmland	水体 Water		
2000	橡胶林	3.92	1.00	0.00	0.62	0.00	5.54	1.62
	自然林	1.28	85.24	0.01	1.75	0.00	88.28	3.04
	建筑用地	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.07	0.04
	耕地	1.33	0.00	0.04	4.43	0.06	5.86	1.43
	水体	0.00	0.00	0.00	0.01	0.25	0.26	0.01
	总计 Total	6.53	86.25	0.08	6.82	0.32	100.00	
	新增 Increase	2.61	1.01	0.05	2.40	0.07		
2004	2010							
		橡胶林	自然林	建筑用地	耕地	水体	总计 Total	减少 Decrease
	橡胶林	6.35	0.00	0.01	0.00	0.17	6.53	0.18
	自然林	1.74	80.40	0.01	3.47	0.62	86.25	5.84
	建筑用地	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.08	0.05
	耕地	0.58	0.18	0.05	5.87	0.14	6.82	0.95
	水体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.31	0.00
2010	总计 Total	8.67	80.60	0.11	9.37	1.25	100.00	
	新增 Increase	2.32	0.20	0.07	3.49	0.94		
2010	2015							
		橡胶林	自然林	建筑用地	耕地	水体	总计 Total	减少 Decrease
	橡胶林	8.53	0.00	0.05	0.08	0.01	8.68	0.15
	自然林	0.60	75.87	0.01	4.10	0.01	80.60	4.73
	建筑用地	0.01	0.00	0.03	0.06	0.01	0.11	0.07
	耕地	0.94	0.00	0.05	8.33	0.04	9.37	1.04
	水体	0.00	0.01	0.01	0.01	1.22	1.25	0.03
	总计 Total	10.09	75.88	0.17	12.59	1.28	100.00	
	新增 Increase	1.56	0.01	0.13	4.25	0.06		

根据表 4 对纳板河国家级自然保护区进行 2000—2015 年土地利用变化统计分析，分析结果如下：

1) 2000—2004 年纳板河国家级自然保护区内橡胶林的总变化量最大，占研究区土地总面积的 4.23%，其次是自然林和耕地，分别占 4.05%和 3.83%，建筑用地和水体相对较小，分别占 0.09%和 0.08%。自然林的相对变化量达到-2.03%，其次是橡胶林和耕地，为 0.99%和 0.97%。

2) 2004—2010 年纳板河国家级自然保护区内自然林的总变化量最大（6.04%），其次是耕地和橡胶林，总变化量分别为 4.44%和 2.50%。但是橡胶林和自然林的相对变化量刚好相反，自然林的相对变化量为-5.64%，占总变化量的 93.38%，橡胶林的相对变化量为+2.14%，占总变化量的 85.60%。建筑用地的相对变化量为+0.02%，占总变化量的 16.67%，耕地的相对变化量为+2.54%，水体的相对变化量为+0.94%。从表 4 可以看出橡胶林、耕地、建筑用地和水体面积在增加，自然林的范围在逐渐缩小。

3) 2010—2015 年耕地的总变化量最大（5.29%），其次是自然林和橡胶林，总变化量分别为 4.74%和 1.71%，相对变化量较大的是自然林和耕地，分别为-4.72%和 +3.21%。橡胶林的总变化量和相对变化量相对较小（分别为 1.71%和+1.41%），建筑用地和水体的总变化量和相对变化量较小（建筑用地分别为 0.20%和+0.06%，水体分别为 0.09%和+0.03%）。水体、耕地、建筑用地、橡胶林、自然林的相对变化量占总变化量的比值分别为 33.33%、60.68%、30.00%、82.46%、99.58%。

综上所述，2000—2015 年期间，该自然保护区内水体、耕地、建筑用地、橡胶林面积在增加，自然林的面积在减少。

表 4 纳板河流域自然保护区 2000—2015 年土地利用变化统计

Table 4 Land use statistics of Nabanhe National Nature Reserve from 2000 to 2015 (In percentage) %

时间段 Range	地类 Land cover	新增量 Increase	减少量 Decrease	总变化量 Total change	相对变化量 Relative change
2000—2004	橡胶林 Rubber trees	2.61	1.62	4.23	+0.99
	自然林 Natural forest	1.01	3.04	4.05	-2.03
	建筑用地 Built-up area	0.05	0.04	0.09	+0.01
	耕地 Farmland	2.40	1.43	3.83	+0.97
	水体 Water	0.07	0.01	0.08	+0.06
2004—2010	橡胶林	2.32	0.18	2.50	+2.14
	自然林	0.20	5.84	6.04	-5.64
	建筑用地	0.07	0.05	0.12	+0.02
	耕地	3.49	0.95	4.44	+2.54
	水体	0.94	0.00	0.94	+0.94
2010—2015	橡胶林	1.56	0.15	1.71	+1.41
	自然林	0.01	4.73	4.74	-4.72
	建筑用地	0.13	0.07	0.20	+0.06
	耕地	4.25	1.04	5.29	+3.21
	水体	0.06	0.03	0.09	+0.03

2000、2004、2010 和 2015 年保护区内各地类分类结果获取的各个地类面积及其变化如图 5 所示, 不难发现纳板河流域自然保护区内各地类变化明显:

1) 2000—2015 年期间水体面积整体在增加, 但是 2004—2010 年水体面积增加较大, 这是由于华能景洪水电厂的建立使得河道变宽 (华能景洪水电厂于 2003 年 7 月开始筹建, 2008 年 6 月正式投入使用) [33]。

2) 2000—2015 年期间耕地面积逐渐增加。2000—2004 年、2004—2010 年、2010—2015 年, 各时间段的耕地增长率分别为 16.40%、37.43%、34.35%。研究区内耕地面积整体在增加, 对比 3 个时间段内耕地的面积增长率, 可知 2004—2010 年的增长率最大。

3) 根据图 5 结果, 建筑用地和水体的面积都在增加, 但相对于橡胶林和耕地而言建筑用地和水体的面积变化较小。

4) 图 5 表明保护区内橡胶林种植面积在 2000—2015 年期间持续增加, 并且 2004—2015 年间增长最迅速 (增长率为 32.81%)。

5) 2000—2015 年间, 保护区内自然林面积在持续减少。2000—2004 年、2004—2010 年、2010—2015 年, 各时间段的自然林减少率分别为 2.30%、6.56%、5.86%。对比 3 个时间段内自然林减少率, 可知 2004—2010 年的减少率最大。结合表 3 结果可知减少的自然林用地转变成水体、建筑用地、耕地和橡胶林, 其中减少的自然林大部分转变成了橡胶林和耕地, 有 2.62% 的自然林转变成橡胶林 ($1.28\% + 1.74\% + 0.6\% - 1\% = 2.62\%$, 1.28%、1.74%、0.6% 分别为 2000—2004 年、2004—2010 年、2010—2015 年转变为橡胶林的自然林面积与整个研究区面积的比值, 1% 为 2000—2004 年转变成自然林的橡胶林面积与整个研究区面积的比值), 有 9.14% 的自然林转变成耕地。总的来看, 2000—2015 年期间减少的橡胶林主要转变为耕地。

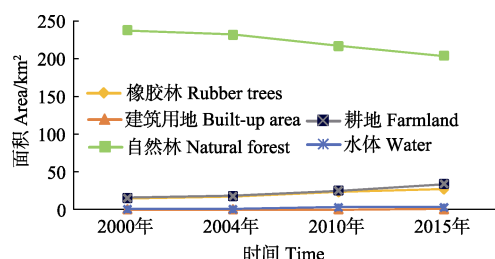


图 5 2000—2015 年各地类变化趋势
Fig.5 Land cover change trend from 2000 to 2015

3.2 自然保护区人类活动随地形分布特征

结合西双版纳纳板河自然保护区的坡度图对橡胶林、耕地、建筑用地的变化情况进行分析, 如图 6、7 所示。

根据图 6 的结果, 建筑用地的分布位置总体上没发生变化, 但是面积增加, 建筑用地的变化趋势不如耕地和橡胶林明显; 可以看出 2000—2015 年橡胶林的种植范围在扩大, 橡胶林的种植范围主要在地势平缓地区, 种植区比较集中, 如图 7a 所示。橡胶林首先在坡度 $0^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 之间扩张, 随后从坡度 $0^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 递增到 $13^{\circ} \sim 24^{\circ}$, 再逐渐

扩大到坡度为 $25^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 之间, 坡度 $37^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 之间极少橡胶林分布, 且各年份间的变化微小, 在坡度为 $25^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 之间的橡胶林较少, 坡度在 $0^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 之间的橡胶林比较多, 大部分橡胶林种植在坡度为 $13^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 之间。

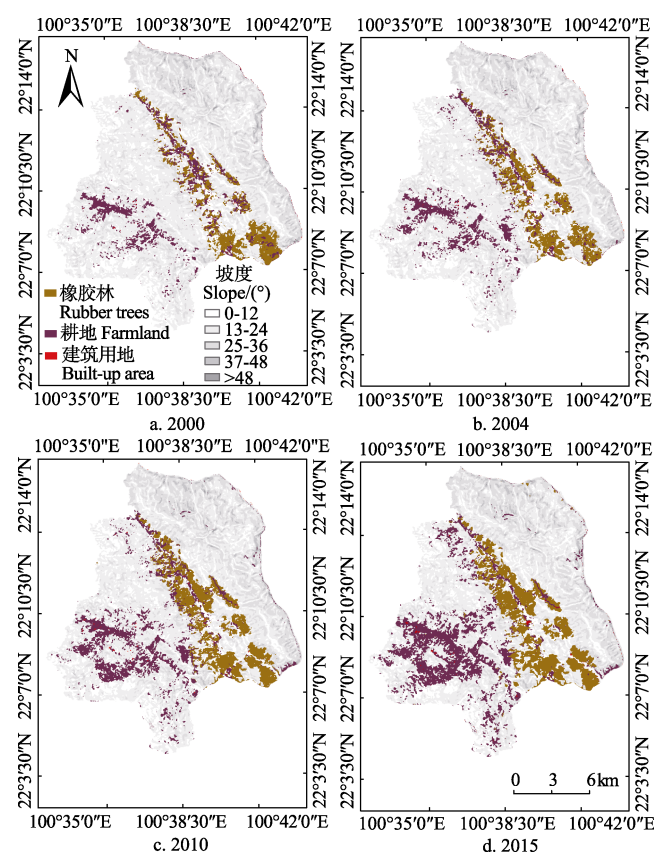


图 6 2000—2015 年橡胶林、耕地、
建筑用地随地形分布情况

Fig.6 Distribution of rubber trees, farmland and built-up area with terrain from 2000 to 2015

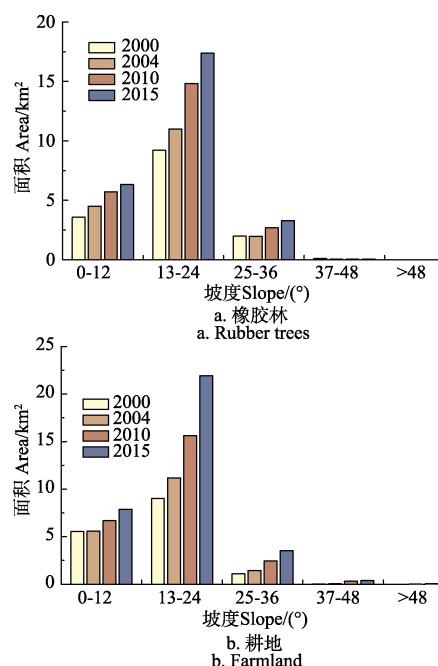


图 7 2000—2015 年橡胶林、耕地种植范围随坡度变化情况
Fig.7 Rubber trees and farmland crop planting range with slope change from 2000 to 2015

根据图 6、7b 的结果,可以看出耕地的面积在增大,首先在坡度 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 之间扩张,随后从坡度 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 递增到 $13^{\circ}\sim 24^{\circ}$,再逐渐扩大到坡度为 $37^{\circ}\sim 48^{\circ}$ 之间。坡度大于 48° 的地区不存在耕地,较少的耕地分布在坡度为 $37^{\circ}\sim 48^{\circ}$ 之间,一部分耕地分布在坡度为 $25^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 之间,分布在坡度为 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 之间的耕地比较多,大部分耕地分布在坡度为 $13^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间。耕地变化最明显的地区位于研究区的西南部,在这一片区,耕地大面积地扩张。

总体上,2000—2015 年期间纳板河流域自然保护区内建筑物面积变化最小,面积变化较大的是橡胶林、耕地、自然林。橡胶林的种植范围在逐渐扩大,耕地的面积也在增加,而自然林的面积持续减少,减少的自然林以转换为橡胶林和耕地为主。纳板河流域自然保护区内人工用地变化较大,人类活动的增加必然导致自然保护区内的自然林面积的减少。

4 结论与讨论

针对受天气条件干扰严重致使卫星观测数据不足的低纬热带地区,本文利用时空数据融合算法获取了西双版纳地区纳板河国家级自然保护区的高时空分辨率数据,并基于该数据对研究区内代表人类活动强度的土地利用进行分类识别,基于识别结果分析了该区域内 2000—2015 年人类活动的时空变化规律。主要结论如下:

1) 时空数据融合技术能够实现复杂地形以及多云多雾天气条件下的时间序列数据构建,实现基于时间序列数据的土地利用高精度识别;

2) 基于时间序列数据的分类结果,对研究区人类生产活动用地变化分析表明:2000—2015 自然林的面积在持续减少,橡胶林、耕地及建筑用地的面积在持续增加;

3) 橡胶林及耕地范围在向坡度较大的地区扩张,大部分橡胶林种植在坡度为 $13^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间,耕地也在向坡度较大的地区逐步扩张。

综合分析可知在纳板河国家自然保护区内人类的种植活动活跃,对区域内用地类型影响最大,导致自然保护区内自然林的面积在持续减少。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国自然保护区条例. 铁路环保法规汇编[C]. 北京:中国铁道协会, 2013.
- [2] 魏建兵, 肖笃宁, 解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则[J]. 地理科学进展, 2006(2): 36—45.
Wei Jianbing, Xiao Duning, Xie Fujun. Evaluation and regulation principles for the effects of human activities on ecology and environment[J]. Progress in Geography, 2006(2): 36—45. (in Chinese with English abstract)
- [3] Xu H, Tang X, Liu J, et al. China's progress toward the significant reduction of the rate of biodiversity loss[J]. Bioscience, 2009, 59(10): 843—852.
- [4] 2016 年国家级自然保护区人类活动遥感监测报告[N]. 中国环境报, 2016-12-06(004).
- [5] Hansen A J, Defries R S. Land Use Intensification around Nature Reserves in Mountains: Implications for Biodiversity[M]// Global Change and Mountain Regions. Springer Netherlands, 2005:563—571.
- [6] 余凌翔, 朱勇, 鲁韦坤, 等. 基于 HJ-1 CCD 遥感影像的西双版纳橡胶种植区提取[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 493—497.
Yu Lingxiang, Zhu Yong, Lu Weikun, et al. Rubber planting area extraction in Xishuangbanna region based on HJ-1CCD remote sensing image[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(4): 493—497. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李亚飞, 刘高焕, 黄翀. 基于 HJ-1CCD 数据的西双版纳地区橡胶林分布特征[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(S1):166—176.
Li Yafei, Liu Gaohuan, Huang Chong. Analysis of distribution characteristics of Hevea brasiliensis in the Xishuangbanna area based on HJ-1 satellite data[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2011, 41(S1): 166—176. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光, 等. 2012. 西双版纳橡胶林地的遥感识别与数字制图[J]. 资源学报, 2012, 34(9): 1769—1780.
Liu Xiaona, Feng Zhiming, Jiang Luguang, et al. Rubber plantations in Xishuangbanna: Remote sensing identification and digital mapping[J]. Resources Science, 2012, 34(9): 1769—1780. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王红说, 黄敬峰, 徐俊峰, 等. 基于 MODIS NDVI 时间序列谱匹配的耕地信息提取研究——以浙中地区为例[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 34(3): 334—340.
Wang Hongshuo, Huang Jingfeng, Xu Junfeng, et al. Research on cultivated land extraction based on MODIS NDVI time series matching analysis: A case in middle part of Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci, 2008, 34(3): 334—340. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光. 基于决策树分类的橡胶林地遥感识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 163—172.
Liu Xiaona, Feng Zhiming, Jiang Luguang. Application of decision tree classification to rubber plantations extraction with remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 163—172. (in Chinese with English abstract)
- [11] 梁守真, 陈劲松, 吴炳方, 等. 应用面向对象的决策树模型提取橡胶林信息[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 485—494.
Liang Shouzhen, Chen Jinsong, Wu Bingfang, et al. Extracting rubber plantation with decision tree model based on object-oriented method[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 485—494. (in Chinese with English abstract)

- [12] 朱俊凤, 钱峻屏, 张运英, 等. 自然保护区遥感研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10828—10831.
Zhu Junfeng, Qian Junping, Zhang Yunying, et al. Research progress of nature reserve using remote sensing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(20): 10828—10831. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘旭颖, 关燕宁, 郭杉, 等. 基于时间序列谐波分析的鄱阳湖湿地植被分布与水位变化响应[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 195—206.
Liu Xuying, Guan Yanning, Guo Shan, et al. Response on wetland vegetation distribution to hydrology regularity based on harmonictime series analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 195—206. (in Chinese with English abstract)
- [14] 朴英超, 关燕宁, 张春燕, 等. 基于小波变换的卧龙国家级自然保护区植被时空变化分析[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2656—2668.
Piao Yingchao, Guan Yanning, Zhang Chunyan, et al. Analysis of temporal and spatial changes in vegetation cover using wavelet transform method in Wolong Natural Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2656—2668. (in Chinese with English abstract)
- [15] 聂勇, 刘林山, 张镡铨, 等. 1982-2009 年珠穆朗玛峰自然保护区植被指数变化[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 895—903.
Nie Yong, Liu Linshan, Zhang Yili, et al. NDVI Change Analysis in the Mount Qomolangma (Everest) National Nature Preserve during 1982-2009[J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 895—903. (in Chinese with English abstract)
- [16] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5—32.
- [17] Zhang F, Kung H, Johnson V C. Assessment of land-cover/land-use change and landscape patterns in the two national nature reserves of Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China[J]. Sustainability, 2017, 9(5): 724.
- [18] Yan G, Lou H, Liang K, et al. Dynamics and driving forces of bojiang lake area in erdos larus relictus national nature reserve, china[J]. Quaternary International, 2018, 475: 16—27.
- [19] 晁增华. 纳板河流域国家级自然保护区森林资源现状及发展对策[J]. 山东林业科技, 2010, 40(3): 104—106.
- [20] Masek J G, Vermote E F, Saleous N E, et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990-2000[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 68—72.
- [21] Zhu X, Liu D, Chen J. A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 49—60.
- [22] Xiao X, Boles S, Froking S, et al. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 95—113.
- [23] 庄喜阳. 基于 Landsat 8 OLI 与 MODIS 的时空数据融合方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
Zhuang Xiyang. A Spatial-Temporal Data Fusion Method Based on Landsat 8 OLI and MODIS data[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘建波, 马勇, 武易天, 等. 遥感高时空融合方法的研究进展及应用现状[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1038—1049.
Liu Jianbo, Ma Yong, Wu Yitian, et al. Review of methods and ap-plications of high spatiotemporal fusion of remote sensing data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1038—1049. (in Chinese with English abstract)
- [25] Zhu X, Chen J, Gao F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610—2623.
- [26] Huang B, Song H. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3707—3716.
- [27] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627—1639.
- [28] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824—1832.
- [29] Hughes G. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, 14(1): 55—63.
- [30] Liu X, Bo Y, Zhang J, et al. Classification of C3 and C4 vegetation types using MODIS and ETM+ blended high spatio-temporal resolution data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15244—15268.
- [31] 高书鹏, 史正涛, 刘晓龙, 等. 基于高时空分辨率可见光遥感数据的热带山地橡胶林识别[J]. 遥感技术与应用 (录用待刊)
Gao Shupeng, Shi Zhengtao, Liu Xiaolong, et al. Identification of rubber plantations in tropical mountainous region based on high Spatio-Temporal resolution visible remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application (in press)
- [32] Congalton R G, Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989. IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing. 1989 International. IEEE, 1998: 1847—1850.
- [33] 华能景洪水电厂日发电超过 3000 万 kW·h[J]. 水力发电, 2009, 35(9): 4.

Monitoring land use for human activities in Nabanhe National Nature Reserve based on multi-source remote sensing data

Liu Xiaolong¹, Xu Rui¹, Fu Zhuo^{2*}, Shi Zhengtao¹, Gao Shupeng¹

(1. College of Tourism & Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: Human activities within the Nature Reserves are considered a threat to the endangered species. This study takes the land cover/land use as the representative of human activities within the Nabanhe National Nature Reserve. As optical remote sensing images are frequently contaminated by cloud and fog, which will restrict its practicality in monitoring human activities in Nabanhe National Nature Reserve, this study aimed to fuse the multi-resources of optical remote sensing images to build a high spatio-temporal resolution data (30 m daily surface reflectance) for the year 2000, 2004, 2010 and 2015 using the ESTARFM (Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model). The fused data was assessed during the data fusing procedure, and in a correlation of greater than 0.8 (with $P < 0.01$) with the reference image for each period of time. The fused data was then used to generate the time-series NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which would be used to differentiate each of the 5 land covers (namely natural forest, rubber trees, water, farmland and built-up area) to be classified. Previous to the extraction of the time-series features, denoising of the time-series NDVI was conducted using the double S-G (Savitzky-Golay) filter. 6 features were generated using the denoised NDVI time-series data, and used to classify the 5 land covers above. The Random Forest classifier was used during the classification, and the RF classifier was trained using the reference samples that were selected from high spatial resolution Google Earth images. The overall accuracies of the final classification results were greater than 86.88%, with Kappa values greater than 0.817 6 (the overall classification accuracies for the year 2000, 2004, 2010 and 2015 were 88.13%, 86.88%, 89.38% and 90.63% respectively, and the corresponding Kappa values were 0.834 0, 0.817 6, 0.853 3 and 0.871 1, respectively). This accuracy guaranteed the availability of the classification results in monitoring human activities in Nabanhe National Nature Reserve. The land cover/land use changing trend was analyzed based on the classification results for each period of time, of which the results were as follows: from 2000 to 2004, water area increased mainly due to the conversion of farmland and built-up area, which occupied 0.06% and 0.01% respectively of the entire area of the Nabanhe National Nature Reserve. Farmland area increased, and the increased area was mainly from natural forest and rubber trees. Built-up area increased, and the increased area was from natural forest and farmland. The area of the increased rubber trees is the largest, and the increased rubber trees occupied natural forest and farmland. The only decreased land cover/land use was the natural forest during this period of time. From 2004 to 2010, water areas increased mainly due to the conversion of natural forest and rubber trees, because there was a hydropower station built during this period of time. Increased farmland area was mainly from forest, while increased built-up area was mainly from farmland. Rubber area was increasing due to the conversion of forest, the area of which was decreasing constantly during this period of time. From 2010 to 2015, increased water occupied farmland and the forest was changed to farmland with the largest area (96.47% of all land converted to farmland was forest). Expanded built-up area was from rubber farmland (occupied 76.92% of all land changed to built-up). It was during this time that the farmland changed the most, it was 5.29% of the area of the Nabanhe National Nature Reserve. Obvious land use changing trend corresponding to terrain was found from 2000 to 2015. Built-up distribution changed less, but the corresponding area increased. The rubber was distributed in areas with slopes ranging from 0 to 36 degrees, and it was first expanded from 0 to 12 degrees, and then to 24 degrees and now is distributed to near 36 degrees. The expansion of rubber is pushing the rubber planting to the limit in the Nabanhe National Nature Reserve. Same changing trend was found to the farmland from 2000 to 2015. Both of these land covers are expanding to steeper terrain and larger areas in the Nabanhe National Nature Reserve. The method provided by this study may support the governmental departments in monitoring human activities within Nature Reserves.

Keywords: remote sensing; land use; monitoring; Nabanhe National Nature Reserve; spatio-temporal data fusion; time-series; land cover/land use change