

# 天水市近 30 年林地动态变化遥感监测研究\*

任冲, 鞠洪波\*\*, 张怀清, 黄建文

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的]以甘肃省天水市为例,基于遥感影像变化监测技术,探讨黄土高原丘陵沟壑与小陇山-西秦岭山地交接过渡区域近 30 年来森林(林地)资源空间分布规律、时间变化趋势及变化影响因素。[方法]以 1988—2015 年 5 期夏季 Landsat TM/OLI 遥感影像为主要数据源,结合辅助数据和外业实地样本点,以光谱特征和指数特征为特征变量,分别利用随机森林(RF)和参数优化支持向量机(POSVM)分类器对土地覆盖类型进行分类,然后基于分类后比较法进行森林资源动态变化监测。[结果]分类结果表明,两种分类器的分类效果均较好,且随机森林分类器在分类精度、效率和稳定性方面明显优于参数优化支持向量机分类器。变化监测结果表明,近 30 年来森林资源总体变化趋势为林地面积先减少后增加。1990—1996 年,林地面积减少 0.74%;1996—2002 年,林地面积减少 2.74%;2002—2008 年,林地面积增加 1.06%;2008—2015 年,林地面积增加 8.89%。[结论]本研究采用的基于非参数分类器分类后比较法的变化监测技术是复杂地形地貌过渡区森林资源动态变化监测的一种有效途径,在分类结果分析统计的基础上,得出研究区森林资源变化的总体趋势:以 2002 年(2002 年影像)为界,林地总体趋势为先减少后增加,2002 年后林地面积增加显著。

**关键词:** 遥感;森林资源;变化监测;随机森林

中图分类号:771.8

文献标识码:A

文章编号:1001-1498(2017)01-0025-09

## Research on Remote Sensing Monitoring Technology of Forest Land Dynamic Change in Tianshui in Recent 30 Years

REN Chong, JU Hong-bo, ZHANG Huai-qing, HUANG Jian-wen

(Research Institute of Forestry Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] Taking Tianshui of Gansu province as a case study, the spatial distribution law, time changing trends and influence factors of forest resource had been researched in the transition region of typical Loess Plateau and Xiaolongshan-western Qinling Mountains in the past 30 years. [Method] The main data sources are Landsat TM/OLI remote sensing images with 5 series in summer from 1988 to 2015, combined with auxiliary data and field survey data. Image spectral features and indices characteristics were selected as the input characteristic variables. The land cover types were classified based on the random forest classifier and the optimal parameter SVM classifier. Subsequently, the forest resources dynamic change monitoring was implemented by the post-classification comparison method. [Result] The results show that the classification performance based on two classifiers are good, and the random forest classifier is better than that of optimal parameter SVM classifier, especially in the classifica-

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)“数字化森林资源监测技术”项目(2012AA102001)。

作者简介: 任冲(1987—),男,陕西汉中,人,博士研究生,研究方向:森林资源监测技术。电话:010-62889191, E-mail: renchongrs@163.com  
地址:中国林业科学研究院资源信息研究所 100091。

\* 感谢国家林业科学数据平台提供的天水市 1998 年森林资源分布图、小陇山林业局 1995 年森林资源分布图;感谢甘肃省小陇山林业调查规划院提供的 2008 年小陇山林区森林资源二类调查数据,以及在外业数据采集方面给予的大力支持。

\*\* 通讯作者:鞠洪波(1956—),男,黑龙江牡丹江人,研究员,博士生导师,研究方向:林业信息技术。电话:010-62889160, E-mail: ju@caf.ac.cn.

tion accuracy, algorithm efficiency and stability. The change detection results show that over the past 30 years the overall change trend of forest area was first decreased and then increased. From 1990 to 1996, the forest land area decreased by 0.74%, and from 1996 to 2002, forest land area decreased by 2.74%. However, forest land area increased by 1.06% from 2002 to 2008, and more significantly, forest land area increased by 8.89% from 2008 to 2015. [Conclusion] The forest change detection method based on post-classification comparison of non-parametric classifiers classification result proposed in this paper is an effective approach for monitoring of forest resources dynamic change and information extraction in complex terrain landform transition region, which could provide valuable reference for quantitative analysis of vegetation change and comprehensive evaluation, reasonable spatial allocation and optimization adjustment of forest resources, forest management and assistant decision making and dynamic monitoring of forestry major project and ecological environment evaluation.

**Keywords:** remote sensing; forest resources; change detection; random forest

传统以地面调查为主的森林资源调查方法成本高,周期长,工作量大,时效性差,准确性不足,且在偏远地区和复杂地形区域根本无法进行实地地面调查,不利于森林资源信息提取及动态变化监测研究的大范围开展。遥感技术为森林资源变化监测研究提供了有力的探测手段,大大提升了森林资源监测水平,已成为监测、评价大区域森林资源变化最为有效的工具<sup>[1-4]</sup>。

近年来,利用遥感影像开展森林植被变化监测研究方面已有较多尝试,主要集中在土地覆盖/植被变化<sup>[5]</sup>、景观格局<sup>[6]</sup>、林冠状态<sup>[7]</sup>、森林覆盖(率)变化<sup>[8-9]</sup>、森林增加/减少<sup>[10]</sup>、森林病虫害<sup>[11]</sup>、造林成活率<sup>[12]</sup>、林业重点工程和生态工程实施监测<sup>[13-16]</sup>等方面。

基于遥感影像变化监测方法大致可分为3类:目视解译法、直接信息提取法、分类后比较法<sup>[17]</sup>。目视解译法效率较低,且年际间稳定性和可比性较差,解译精度取决于数据质量和解译人员经验。直接信息提取法简单易行、易于解译,结果取决于敏感波段及有效特征选取、多源数据融合和影像变换方法、代数合成运算和模型阈值设置等因素,大多难以提供变化类型信息,且精度不高。分类后比较法效率较高,适用性强,结果在年际间稳定性和可比性较好,且能够提供变化类型信息,并可集成多源数据与特征<sup>[18-19]</sup>、专家知识<sup>[20-21]</sup>、辅助数据及已有成果<sup>[22]</sup>等提高分类精度、提升综合分析能力。具体而言,根据不同数据源、试验区状况、应用目的和信息需求,现已发展了诸多森林植被定性或定量变化监测方法,如代数运算法、变换法、变化矢量分析法、分类后比较法、GIS方法、空间相关分析、面向对象方法<sup>[23]</sup>、模型法<sup>[24]</sup>、时间序列统计特性分析<sup>[25]</sup>、邻近

相关分析<sup>[26]</sup>等。

甘肃省天水市位于嘉陵江上游、黄土高原丘陵沟壑区与小陇山-西秦岭山地交接地带,属于典型过渡区和生态脆弱区域,提取该区域林地资源动态变化信息有助于理解森林资源空间分布规律、时间变化趋势及变化影响因素<sup>[27-28]</sup>。目前,利用长时间序列 Landsat TM/OLI 影像对该区域进行森林资源动态变化信息提取、定量分析及综合评价等方面的应用研究鲜有报道,本研究以 1988—2015 年 5 期夏季 Landsat TM/OLI 遥感影像为主要数据源,结合森林资源分布图、林相图等辅助数据和外业实测样本点,采用基于两种非参数分类器(随机森林和参数优化支持向量机)分类后比较法的森林资源动态变化监测技术,以期为该区域植被变化分析与生态环境评价、森林资源配置与优化调整、经营管理与辅助决策、林业工程(天然林保护工程、退耕还林工程等)实施与进展监测、森林保护措施制定与辅助决策等提供一定的参考。

## 1 实验区与数据

### 1.1 实验区概况

天水市位于甘肃省东南部,六盘山山地、陇中黄土高原与西秦岭山地交接地带,地理坐标 104°35′~106°44′E, 34°05′~35°10′N,东西长 197 km,南北宽 122 km,总面积 14 392 km<sup>2</sup>,辖麦积区、秦州区、甘谷县、武山县、清水县、张家川回族自治县、秦州区。地理位置如图 1 所示。

研究区地跨长江、黄河两大流域,地势西北高东南低、南北地形差异较大,山地、黄土丘陵和渭河河谷地貌区域分异明显。海拔约 740~3 120 m,平均 1 725 m,属暖温带半湿润、半干旱气候过渡区,年平

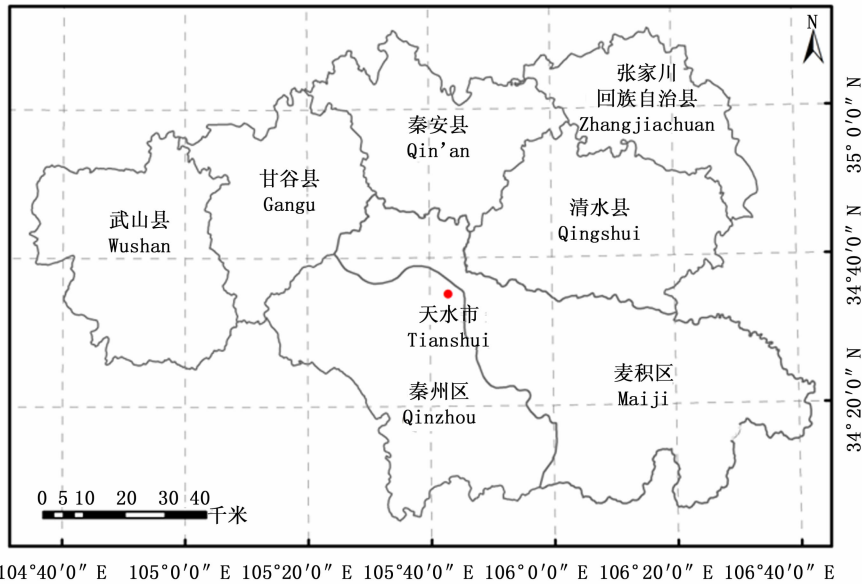


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

均气温  $7 \sim 11^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量在  $480 \sim 610 \text{ mm}$  间, 年际差异显著、区域分布不平衡。森林植被组成复杂, 过渡性明显、交汇性显著。天水市现有森林总面积  $5.13 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 森林覆盖率约为  $36\%$ , 主要分布在陇山、西秦岭和关山林区。森林植被类型主要有针叶林、落叶阔叶林及针阔混交林。

## 1.2 数据及预处理

获取完全覆盖研究区的 1988—2015 年 5 期夏季 Landsat TM/OLI 遥感影像序列, 数据来源于 USGS (<http://glovis.usgs.gov/>), 共 16 景影像, 影像时间分别为 1990 年、1996 年、2002 年、2008 年和 2015 年, 主要集中在 5—8 月, 级别产品 L1T。对缺失数据以相邻年份补全, 时间差异尽量不超过 1 年。遥感影像预处理包括正射校正、镶嵌拼接、配准、裁剪等。其中, 逐期影像相对配准同名点不少于 25 个, 东西向最大误差 (Error X)  $0.682$ , 南北向最大误差 (Error Y)  $0.742$ , 最大误差 (RMS)  $0.755$ , 最大总体均方根误差 (Total RMS Error)  $0.468$ , 保证 5 期夏季影像间相对配准精度在半个像元之内。Landsat 时序影像数据集如图 2 所示。

辅助数据包括甘肃省天水市 1998 年森林资源分布图、小陇山林区 2008 年森林资源“二类调查”数据、地形图及其矢量化数据、各县区矢量边界及其他专题成果。在不同季节通过两次外业调查获得研究区地类与森林类型实地样本点, 外业时间分别为 2014 年 9 月和 2015 年 12 月, 共计获取覆盖整个研究区有代表性的典型地类和主要森林类型样本点

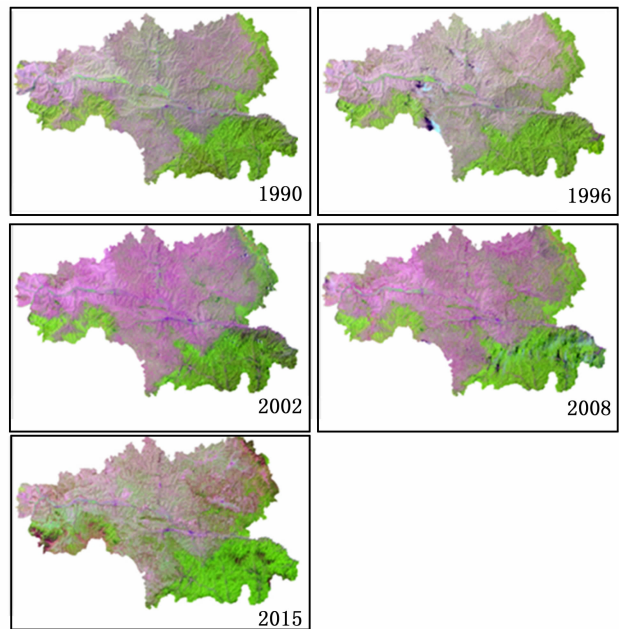


图2 Landsat 时序影像数据集

Fig. 2 Dataset of Landsat time-series images

1 006 个, 如图 3 所示。

## 2 研究方法

### 2.1 分类系统

根据《国家森林资源连续清查技术规定》地类划分标准<sup>[29]</sup>, 依据研究区覆盖状况、遥感影像特点与信息提取能力, 确定本研究分类类别, 包括一级地类 2 个: 林地和非林地; 非林地划分为耕地、草地、建设用地和水域 4 个二级类, 林地则不再细分。其中, 林地包括有林地、灌木林地、其他林地等; 耕地主要

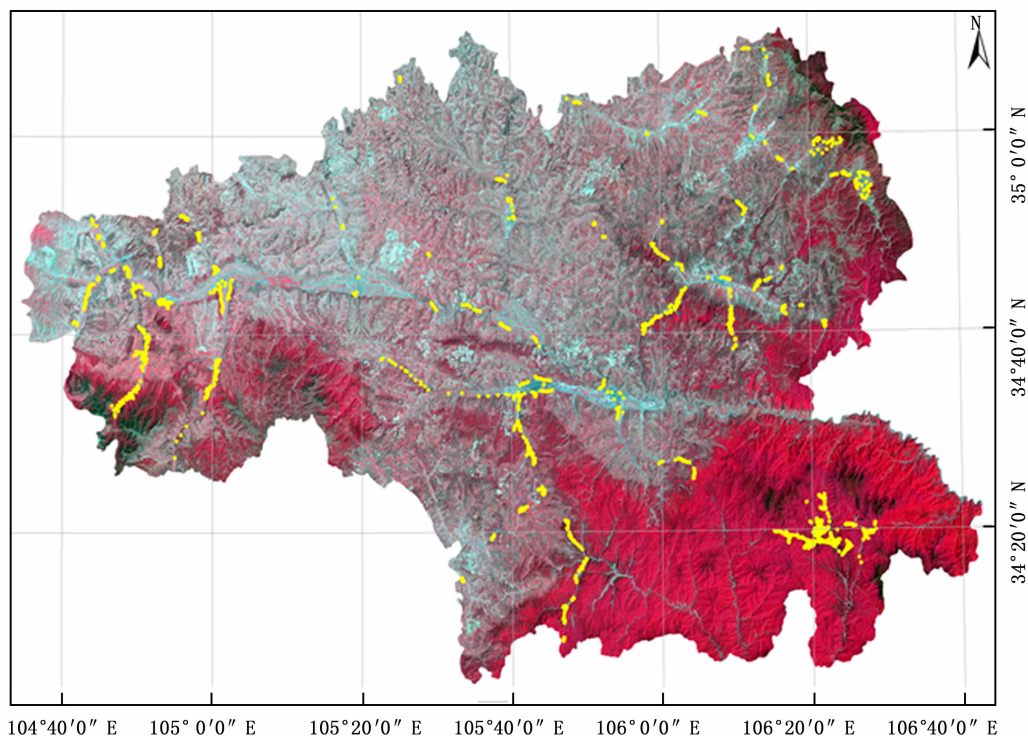


图3 外业样本点与2015年Landsat8 OLI影像(RGB\_432)叠加显示

Fig. 3 Overlapping display of field sample points and Landsat8 OLI images in 2015 (RGB\_432)

有旱地、灌溉水田、水浇地等；草地包括高、中、低覆盖度的天然草地及人工草地；建设用地包括交通、城镇、工矿等；水域包括河流、水库、池塘等。本研究分类系统如下表1所示。

表1 分类系统

Table 1 Classification system

一级类型 The first level category	二级类型 The second level category
林地 Forest land	耕地 Cultivated land
	牧草地 Grass land
非林地 Non-forest land	水域 Water
	建设用地 Construction land

## 2.2 分类特征

选用 Landsat5 TM Band 1~5 和 Band 7 六个波段, Landsat8 OLI Band 2~7 六个波段作为光谱特征变量, 归一化植被指数 (NDVI)、归一化差分水体指数 (NDWI) 和归一化差异指数 (NDI) 3 个特征指数<sup>[30-31]</sup> 作为变量参与分类, 旨在以最少的、显著特征对待类别进行分类。

## 2.3 分类方法

随机森林 (RF) 算法是对决策树算法的一种改进<sup>[32]</sup>, 通过自助法重采样技术随机选择样本和特征, 用于多个决策树的随机构建, 针对每一个待分类

元素, 所建立的每一个决策树都要对其所属类别进行判断, 随机森林的最终输出结果为所有决策树分类结果中最多的类别。与传统决策树方法相比, 随机森林具有预测准确率高、泛化能力强、模型简洁、快速高效、实用性强、并行化、不易过度拟合等诸多优点, 在处理高维海量数据、克服数据缺失与噪音、解决类别不平衡问题等方面具有显著优势。

支持向量机 (SVM) 以 VC 维理论和结构风险最小原理为基础, 通过构造函数子集序列的方式使风险达到最小化, 既降低了建模复杂性, 又提高了学习能力, 在解决小样本、非线性、高维数据分类方面有显著优势<sup>[33]</sup>。核函数选择与惩罚参数设置会显著影响其分类效果。参数优化支持向量机 (POSVM) 通过参数空间自动寻优搜索或非线性最优化、智能优化算法等, 选取训练集验证精度最高的参数组合作为最优参数参与模型分类<sup>[34-36]</sup>。虽然参数优化方法、泛化能力和结果精度仍有待验证与评估, 且往往在搜索或优化阶段计算量大、耗时较长; 但相比其他方法 (如最大似然法等), 参数优化支持向量机方法分类方法的分类精度仍得到较大程度的提高。故本研究以参数寻优搜索法寻找核函数与惩罚参数的优化参数组合, 以优化参数进行遥感影像土地覆盖分类研究。

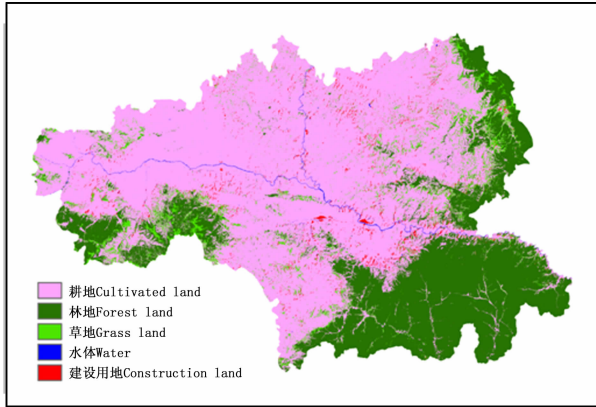
## 2.4 变化监测

对上述方法的分类结果进行逐期精度评价和对比分析,选择最优的分类结果。基于分类后逐期比较法进行森林资源动态变化监测研究,探讨典型黄土高原丘陵沟壑与小陇山-西秦岭山地交接过渡区域近30年来森林资源空间分布规律、时间变化趋势及其变化影响因素。

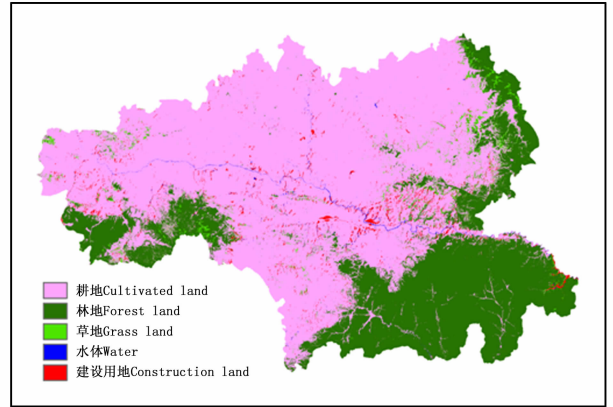
## 3 结果与分析

### 3.1 分类结果

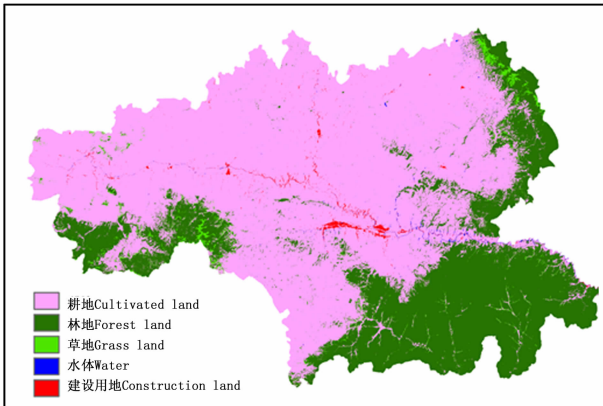
对 Landsat TM/OLI 影像分别采用随机森林 (RF) 和参数优化支持向量机 (POSVM) 分类方法进行分类,进行主要分析、编辑、重编码等后处理,结果如图4、图5所示。



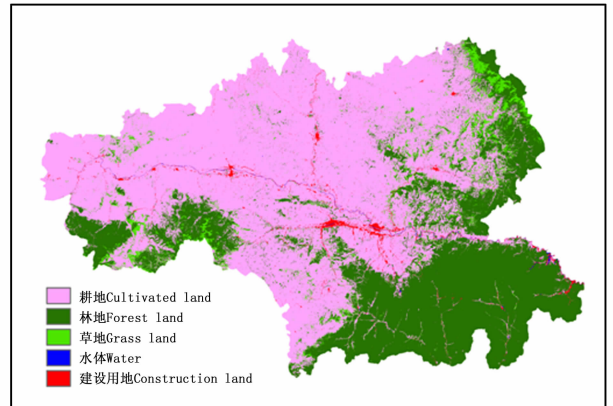
(a) 1990年



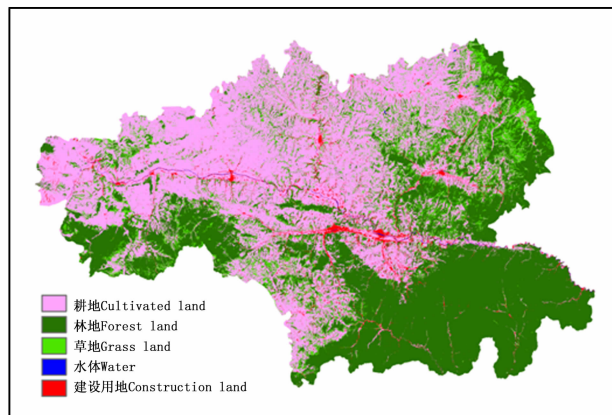
(b) 1996年



(c) 2002年



(d) 2008年



(e) 2015年

图4 基于RF算法分类结果图

Fig.4 Classification results based on Random Forest (RF) algorithm

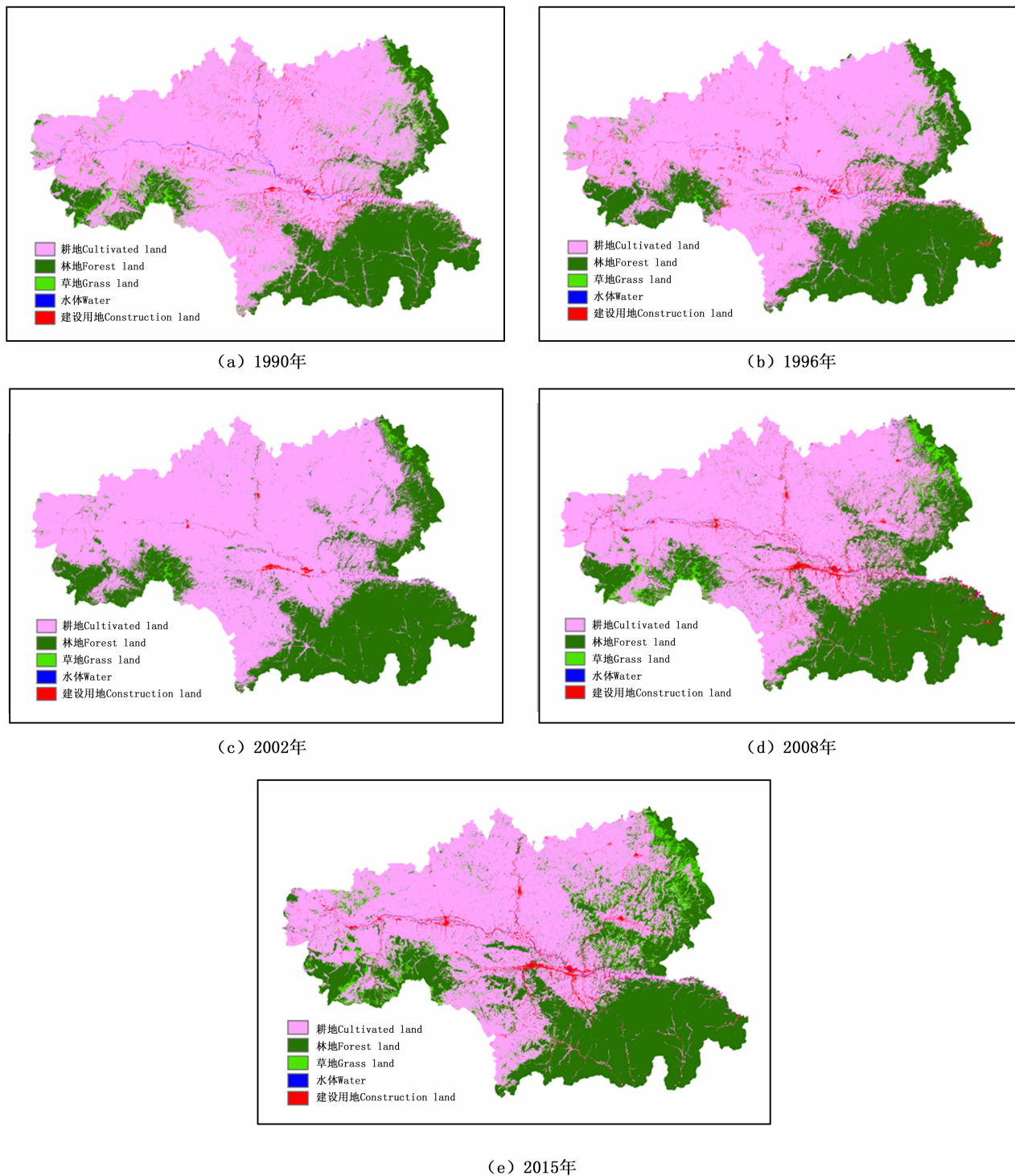


图5 基于 POSVM 算法分类结果图

Fig.5 Classification results based on Parameter Optimization SVM (POSVM) algorithm

为验证本研究采用的两种分类方法在典型黄土高原丘陵沟壑与小陇山-西秦岭山地交接带的土地覆盖分类精度和适用性,基于外业调查获取的有代表性、覆盖整个研究区的1006个典型地类类别GPS实测样本点,参考高分辨率遥感影像、已有辅助资料

和调查成果、目视解译与判读结果等,选取均匀分布、足够数量且有代表性的独立检验样本对上述分类结果逐期进行精度验证。结果表明:本研究所采用的两种非参数分类方法均取得了较好的分类效果,且随机森林(RF)分类方法在分类精度、效率、计

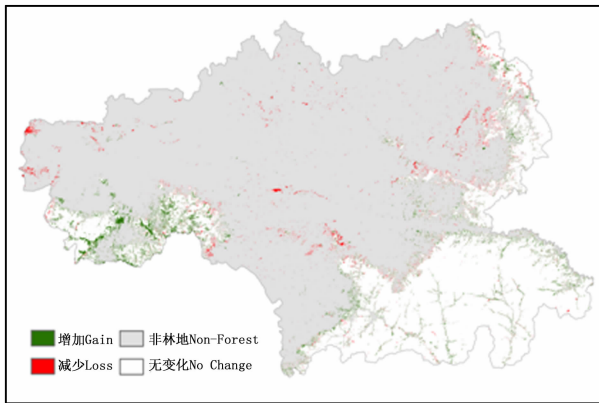
算量和稳定性方面均明显优于参数优化支持向量机(POSVM)分类方法。随机森林(RF)分类方法对于复杂地形、破碎地貌区和典型植被(森林-灌草-草地)交错过渡区域具有的较强的适用性,可应用于大区域、复杂地形、过渡区域的植被/森林制图和变化监测。

虽然林地和草地、林地和耕地、建设用地和耕地等存在一定程度的混淆,但总体上分类精度均达到95%以上,可满足森林资源监测实际应用需要。基于两种不同分类方法的分类结果具有较好的空间一

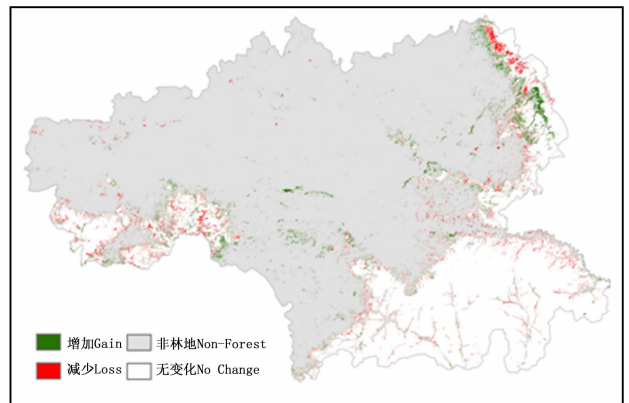
致性,时序分类结果及逐期变化分析结果可客观反映该区域近30年森林资源时空动态变化。以下基于随机森林(RF)分类结果对研究区森林资源进行动态变化趋势分析、结果统计和原因分析。

### 3.2 变化监测结果

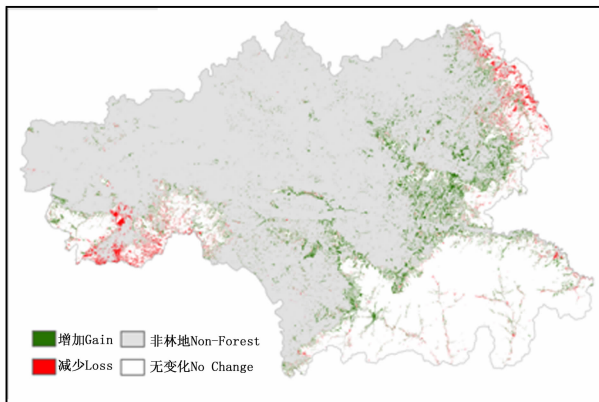
基于上述图4随机森林(RF)分类结果,对非林地类别进行合并,经逐期比较可得森林资源动态变化(林地分布、增减、趋势等)情况,具体结果如图6所示。



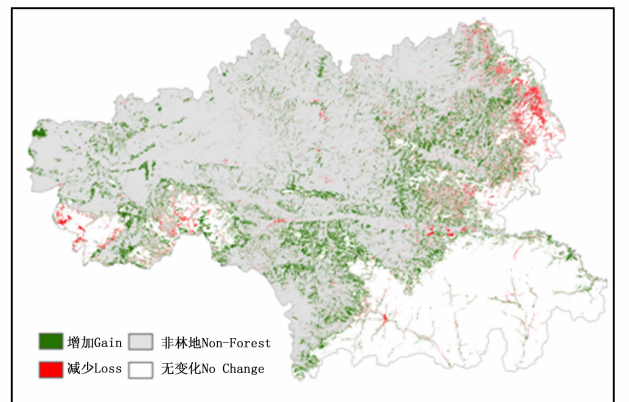
(a) 1990—1996年



(b) 1996—2002年



(c) 2002—2008年



(d) 2008—2015年

图6 森林资源动态变化监测结果图

Fig. 6 Monitoring results of dynamic changes of forest resources based on classification results

由图6及统计分析可知,该区域森林资源增减变化、趋势及变化类型,具体如下:

(1) 1990—1996年林地转化为非林地3.76%,非林地转化为林地3.02%。林地面积净减少0.74%。林地减少区域主要分布在武山县、麦积区和清水县;林地增加区域主要分布在武山县滩歌林场和清水县。类型转化主要表现为:林地转化为

耕地,耕地转化为林地和建设用地,草地转化为耕地、林地和建设用地。林地和耕地面积变化不显著,草地面积减少。

1996—2002年林地转化为非林地5.65%,非林地转化为林地2.91%。林地面积净减少2.74%,林地减少呈现加剧趋势。林地减少区域主要分布在武山县、甘谷县和张家川回族自治县;林地增加区域

主要分布在麦积区和张家川回族自治县。类型转化主要表现为:林地转化为耕地和草地,耕地转化为林地,草地转化为耕地和林地。耕地面积变化不显著,草地面积减少。

2002—2008年林地转化为非林地5.57%,非林地转化为林地6.63%。林地面积净增加1.06%。林地减少区域主要分布在武山县、甘谷县和张家川回族自治县;林地增加区域主要分布在秦州区、麦积区、清水县和张家川回族自治县。类型转化主要表现为:林地转化为草地和耕地,耕地转化为林地、草地和建设用地,草地转化为林地和耕地。耕地面积减少,林地和草地面积增加。

2008—2015年林地转化为非林地6.56%,非林地转化为林地15.45%。林地面积净增加8.89%。林地减少区域主要分布在武山县和张家川回族自治县;各县区均有林地增加。类型转化主要表现为:林地转化为草地和耕地,耕地转化为林地、草地和建设用地,草地转化为林地和耕地。耕地面积减少,林地和草地面积增加。

(2)在以上分类结果分析统计的基础上,得出森林资源变化的总体趋势:以2002年(2002年影像)为界,林地总体趋势为先减少后增加,2002年后林地面积增加显著。林地面积增加主要原因是其他类型林地向有林地转化:(a)封山育林、人工造林等措施使得灌木林和无林地以及宜林地转变为有林地,人工林面积的增加是林地面积增加的主要因素;(b)未成林造林地向有林地的转化,由于未成林地在影像上被有效识别不仅取决于影像本身及其预处理、分类方法和策略,还取决于地物本身。未成林地在幼苗和幼龄林阶段难以在影像上表现出来,而郁闭成林后,即可被有效提取和识别;(c)非林地经退耕还林而转化为有林地。1999年以后,随着天然林保护工程、退耕还林工程、重点公益林建设等林业重点工程的实施,该区域森林覆盖率上升趋势明显,林地面积显著扩大。

森林资源减少明显的区域主要集中在武山县和张家川回族自治县,在林地与其他地类的过渡地带、林缘区域表现尤为明显,尤其在2002年之后。林地减少的可能原因为人类活动影响的扩大使该区域原有森林、灌木林、疏林地等森林植被类型遭到严重破坏,林地转变为耕地、草地和建设用地等类型,局部生态环境有进一步恶化的风险和可能。

## 4 讨论

基于时序遥感影像非参数分类器分类后逐期比较法是大区域、复杂地形地貌条件下,典型过渡区快速、准确、高效获取森林资源现状和动态变化信息的一种有效途径。通过类型信息提取、逐期对比与统计分析,得出该区域近30年来森林资源(林地面积)呈现“先减少后增加”总体变化趋势。2002年(2002期影像)后林地面积增加尤为显著,随着国家六大林业重点工程的实施,该区域林地面积显著扩大、森林覆盖率明显上升,森林资源得到有效保护,生态环境得以持续改善。

本研究重点研究森林资源(林地)动态变化监测,而林地细类或森林类型的精准监测仍有待进一步深入研究。针对研究区监测应用中存在的问题,可能需要采用多源数据或高空间分辨率与高时间分辨率(多时相/时间序列)遥感影像相结合的方式予以解决。对于智能化分类器结果对比、组合分类器及分类策略在复杂地形地貌条件下、典型交接过渡区域分类效果评价和适用性等方面仍有待进一步研究。综合、充分应用多种变化监测技术(如GIS分析法、模型法、面向对象法、基于知识的方法等),提高林地及林地内类别间动态变化监测精度和效率尤为重要。而如何充分利用先进的影像分析技术,快速、高效获取所需的森林资源动态变化信息将成为应用的关键。在结合已有成果资料、专题信息、专家知识等进行多元信息挖掘与综合分析、时序变化信息地学解释、驱动力分析、预测分析、不确定性分析等方面仍有待进一步深入研究。

随着遥感影像空间分辨率不断提高、传感器类型不断增多、林业应用日益深入,遥感技术将在森林资源监测中发挥更大的作用,有助于深入了解在一定社会经济政策条件下森林资源的发展状况,全面评估林业重点工程实施效果和资源潜力,为促进区域森林资源管理、生态环境改善、政策调整实施、社会可持续发展等提供重要的信息参考和决策依据。

## 5 结论

本研究以甘肃省天水市为例,以1988—2015年5期夏季Landsat TM/OLI遥感影像为主要数据源,结合辅助数据和外业实地样点,采用基于两种非参数分类器分类后比较法的森林资源动态变化监测技术,初步揭示了典型黄土高原丘陵沟壑与小陇山



- 西秦岭山地交接过渡区域近30年来森林资源时空变化规律(类型、数量、空间分布、总体变化趋势等变化信息)和变化影响因素,在以上分类结果分析统计的基础上,得出森林资源变化的总体趋势:以2002年(2002年影像)为界,林地总体趋势为先减少后增加,2002年后林地面积增加显著。

## 参考文献:

- [1] 鞠洪波. 森林与湿地资源综合监测技术体系研究丛书[M]. 北京:中国林业出版社,2011.
- [2] Lu D, Mausel P, Brondizio E, *et al.* Change detection techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2365-2401.
- [3] Huang C, Gowarda S N, Schleeuwis K, *et al.* Dynamics of national forests assessed using the Landsat record: Case studies in eastern United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1430-1442.
- [4] Potapov P V, Turubanova S A, Hansen M C, *et al.* Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 106-116.
- [5] Rogan J, Franklin J, Roberts D A. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 143-156.
- [6] 于德永,王艳艳,郝占庆,等. 吉林省露水河地区森林景观格局变化[J]. *资源科学*,2005,27(04):147-153.
- [7] 曾庆伟,武红敢,苏森. 基于TM数据的林冠状态变化遥感监测研究[J]. *遥感技术与应用*,2009,24(2):186-191.
- [8] 王昊,吕植,顾垒,等. 基于Global Forest Watch观察2000-2013年间中国森林变化[J]. *生物多样性*,2015,23(5): 575-582.
- [9] 范应龙,谭炳香. 两种热带森林覆盖变化检测方法比较研究[J]. *林业科学研究*,2015,28(3):325-331.
- [10] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, *et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change[J]. *Science*, 2013, 342(6160):850-853
- [11] 刘清旺,武红敢,石进,等. 基于TM影像的森林病虫害遥感监测系统[J]. *遥感信息*,2007,(2):46-49.
- [12] 黄建文,鞠洪波,赵峰,等. 利用遥感进行退耕还林成活率及长势监测方法的研究[J]. *遥感学报*,2007,11(6):899-905.
- [13] 陈尔学,刘健,王晓慧,等. 重点防护林工程监测技术[M]. 北京:中国林业出版社,2012.
- [14] 黄建文,陈永富,陈巧. 利用3S技术进行退耕还林工程信息提取的研究[J]. *林业科学研究*,2010,23(4):500-504.
- [15] 陈巧,陈永富,鞠洪波. 基于3S技术的天保区植被变化监测方法研究[J]. *林业科学研究*,2013,26(6):736-743.
- [16] 杨朝俊,胡庭兴,刘波,等. 基于GIS的退耕还林工程区林地动态变化遥感监测研究[J]. *遥感信息*,2006,(01):38-40.
- [17] 李世明,王志慧,韩学文,等. 森林资源变化遥感监测技术研究进展[J]. *北京林业大学学报*,2011,33(3):132-138.
- [18] Hansen M C, Roy D P, Lindquist E, *et al.* A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2495-2513.
- [19] Hilker T, Wulder M A, Coops N C, *et al.* A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(8): 1613-1627.
- [20] 王旭红,肖平. 基于知识库分类法在植被提取中应用研究[J]. *测绘通报*,2004,(7):48-50.
- [21] 甘淑,袁希平,何大明. 遥感专家分类系统在滇西北植被信息提取中的应用试验研究[J]. *云南大学学报:自然科学版*, 2003,26(06):553-557.
- [22] 陈芸芝,陈崇成,汪小钦,等. 多源数据在森林资源动态变化监测中的应用[J]. *资源科学*,2004,26(4):146-152.
- [23] Desclée B, Bogaert P, Defourny P. Forest change detection by statistical object-based method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1-2): 1-11.
- [24] D Liu, K Song, John R G, *et al.* Using local transition probability models in Markov random fields for forest change detection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2222-2231.
- [25] 黄春波,佘袁勇,周志翔,等. 基于时间序列统计特性的森林变化监测[J]. *遥感学报*,2015,19(4):657-668.
- [26] 李世明,王志慧,李增元,等. 基于邻近相关图像和决策树分类的森林景观变化检测[J]. *林业科学*,2011,47(9):69-74.
- [27] 董晓峰,马如兰,庞国锦,等. 近30年陇东黄土高原沟壑区林地时空变化及其驱动力分析[J]. *西北师范大学学报:自然科学版*,2011,47(03):92-98.
- [28] 赵鹏祥,强建华,张会儒,等. 基于RS的黄土高原天然林资源时空动态变化分析[J]. *林业科学研究*,2007,20(3):307-311.
- [29] 国家林业局. 国家森林资源连续清查技术规定[M]. 北京:2003.
- [30] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. *地球科学进展*,1998,13(4):327-333.
- [31] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*,2005,9(5):589-595.
- [32] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*. 2001,45(1): 5-32.
- [33] Vapnik V N. *The Nature of Statistical Learning Theory*[M]. New York: Springer, 1995
- [34] 许文杰,邢朝辉,李菲菲. 基于参数选择优化SVM算法的研究[J]. *山东交通学院学报*,2010,18(2):79-82.
- [35] 林海晏,岳彩荣,吴晓晖,等. 基于EnMAP-Box的遥感图像分类研究[J]. *西南林业大学学报*,2014,(2):67-71.
- [36] 林海晏. 基于SVM遥感图像分类的参数优化研究[D]. 昆明:西南林业大学,2014.

(责任编辑:彭南轩)