

近 30 年来梵净山植被覆盖时空变化及影响因素分析

张珍珍, 熊康宁, 黄登红

(贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘 要:梵净山以生物多样性和生态过程的独特优势入选世界自然遗产提名地,为揭示其植被覆盖空间分布与环境因子的相关性及变化规律,选取 1990—2016 年 3 个时期 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像提取植被覆盖度和土地利用数据,分析了梵净山植被覆盖度时空变化特征。结果表明:(1)近 30 年间,植被覆盖度呈“减少—增加”变化,缓冲区植被覆盖度变化敏感度高于提名地;(2)地形因子在水热条件方面不同程度上影响各等级植被覆盖度的空间分布,低山(<900 m)、低中山($900\sim1\,600$ m)植被覆盖度高且面积占比较大,斜坡、陡坡、急坡的植被覆盖度占较大比重,分别为 33.33%, 28.48%, 12.18%, 阳坡、半阳坡的植被覆盖度高于阴坡和半阴坡且差异性明显;(3)梵净山植被覆盖度变化受人类活动影响,导致地表覆盖改变而使植被覆盖度呈现典型碎斑状和带状的空间特征,缓冲区城镇化发展对生态环境的压力越来越大,提名地的旅游设施建设导致植被覆盖减少日趋明显。

关键词:植被覆盖度; 时空变化; 地形; 人类活动; 遥感监测; 世界自然遗产

中图分类号:Q948.15; P463.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0183-07

Analysis on the Spatiotemporal Change and Influence Factors of Vegetation Cover in Fanjingshan Mountain over the Last 30 Years

ZHANG Zhenzhen, XIONG Kangning, HUANG Denghong

(School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering

Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: Fanjingshan National Nature Reserve was selected as a nominated World Natural Heritage for its unique advantages in biodiversity and ecological process. To reveal the correlation between the spatial distribution of vegetation coverage and environment factors and the variation of the former, Landsat TM/ETM/OLI remote sensing images in 1990, 2002 and 2016 were selected to extract vegetation coverage and land use data and analyze the temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Fanjingshan. The results showed that: (1) over the past three decades, vegetation coverage decreased first and then increased, and the sensitivity of vegetation coverage change in the buffer zone was higher than that in the nominated property; (2) the terrain factor influenced the spatial distribution of each grade vegetation coverage in water and heat conditions at different degrees; the vegetation coverage in low mountain (<900 m) and mid-low mountain ($900\sim1\,600$ m) was high, which accounted for a larger proportion of the area; the vegetation coverage in slope, abrupt slope and steep slope accounted for 33.33%, 28.48% and 12.18%, respectively; the vegetation coverage in sunny slope and semi sunny slope was higher than that in shady slope and semi shady slope, and the difference was obvious; (3) with the gradual transformation of surface landscape caused by anthropogenic activities, the vegetation coverage change appeared blocky and striped spatial agglomeration; the urbanization in the buffer zone had brought increasing pressure to ecological environment; the construction of tourist

收稿日期:2016-06-30

修回日期:2017-05-17

资助项目:贵州省研究生教育创新计划项目“贵州省熊康宁喀斯特环境研究生导师工作室”(黔教研合 GZS 字[2016]04 号);贵州省科技计划课题“贵州喀斯特石漠化综合防治工程技术研究中心滚动建设”(黔科合社 G 字[2012]4008);国家世界自然遗产申报保护项目“梵净山世界自然遗产申报与保护科技支撑项目”(20140505)

第一作者:张珍珍(1991—),女,河北保定人,硕士,研究方向为世界遗产监测与保护。E-mail: zzz3521@163.com

通信作者:熊康宁(1958—),男,贵州威宁人,教授,博士生导师,主要从事喀斯特与洞穴、资源与环境、石漠化生态治理、世界遗产申报与保护研究。E-mail: xiongkn@163.com

facilities in the nominated property had led to the decreasing trend of vegetation coverage.

Keywords: vegetation coverage; spatiotemporal variation; topography; anthropogenic activities; remote sensing monitoring; World Natural Heritage

植被是陆地生态系统的主体,其与地质、地貌、气候、水文、土壤、动物和微生物共同构成了自然地理环境,是最能反映其他要素性质的指示者,很大程度上代表了区域生态环境的总体状况^[1],也是生态环境变化的重要指标^[2]。植被的组成以及空间分布与配置格局是影响生态系统结构和功能的重要因素^[3-4],植被的生长状况对野生动物的食物、生境和种群产生重要影响^[5]。尤其是山区的植被有非常重要的作用,森林植被为物种提供了栖息地,较高的植被覆盖可以调节气候,减少水土流失,有效地减少如山体滑坡、泥石流和洪水等自然灾害^[6]。获取地表植被覆盖及其变化信息,对探讨与揭示地表空间变化规律及驱动因子、分析评价区域生态环境具有重要现实意义^[7]。

植被既是生态系统的最重要组成部分,也是遥感影像上的重要地物信息^[8]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)具有时间和空间上的连续性,常被用于监测植被生长状态^[9]。同时,NDVI能很好地反映植物生长状态和植被覆盖度,也是衡量区域生态系统的重要信息^[10-11]。Milne等^[12]最早通过陆地卫星监测澳大利亚世界遗产地威兰德拉湖区的土地覆盖,发现区内的土地覆盖率呈逐年削减状态;杨海龙等^[13]以“3S”技术统计了各植被类型中黔金丝猴的出现频率,结果表明中山常绿、落叶阔叶混交林和低山常绿阔叶林是黔金丝猴主要选择的植被类型。研究和实践表明,“3S”技术有助于及时掌握遗产地大尺度范围的动态变化^[14-15]。山区植被覆盖易受到自然灾害和人为活动的干扰,同时山区植被覆盖变化也受到气候、地形等因素的影响^[16-20],针对梵净山地区大尺度、长时段的植被覆盖度时空变化的研究较少。

NDVI和像元二分模型估算植被覆盖度的方法得到广泛应用^[21-25],利用遥感手段研究植被覆盖度时空分布及其影响因素对揭示梵净山生态环境状况具有重要的现实意义。研究以1990—2016年3个时期Landsat TM/ETM/OLI遥感数据为信息源,通过ArcGIS,SPSS等软件定量分析植被覆盖变化与地形因子、人类活动的关系,以为梵净山世界自然遗产提名地植被覆盖监测及生态环境管理提供科学依据。

1 研究区概况

梵净山世界自然遗产提名地位于贵州省印江、松桃与江口三县交界处,云贵高原东部边缘向湘西低山丘陵过渡的山原斜坡地带,属武陵山脉的主峰,地势隆起显著,地理位置 $27^{\circ}45'07''$ — $28^{\circ}02'42''$ N, $108^{\circ}30'43''$ — $108^{\circ}47'53''$ E。梵净山处于亚热带中部,主峰凤凰山海拔2 572 m(图1),低山丘陵环绕外围,不同高度的年平均气温介于 $5.0\sim 17.0^{\circ}\text{C}$,气温随地势的增高而下降,其年平均气温垂直递减率为 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (迎风坡), $0.56^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (背风坡)。梵净山发育完整的垂直带谱系列景观,生态系统类型丰富,包括地带性常绿阔叶林、暖性针叶林、温性阔叶林与针叶林等,是多种古老孑遗植物和珍稀濒危动植物的栖息地。迄今保存低山常绿阔叶林、低山针叶林、低山次生落叶阔叶林、中山针阔混交林、中山常绿落叶阔叶混交林、山顶苔藓矮林、高中山灌丛、高中山针阔混交林等森林生态系统和梵净山冷杉(*Abies fanjingshanensis*)、水青冈(*Fagus longipetiolata* Seem.)、黔桐(*Cyclobalanopsis stewardiana*)、珙桐(*Davidia involucrata* Baill.)、铁杉(*Tsuga chinensis* pritz.)等重要植物群落,含5个植被型组、10个植被型、46个群系,各类野生动植物7 154种。

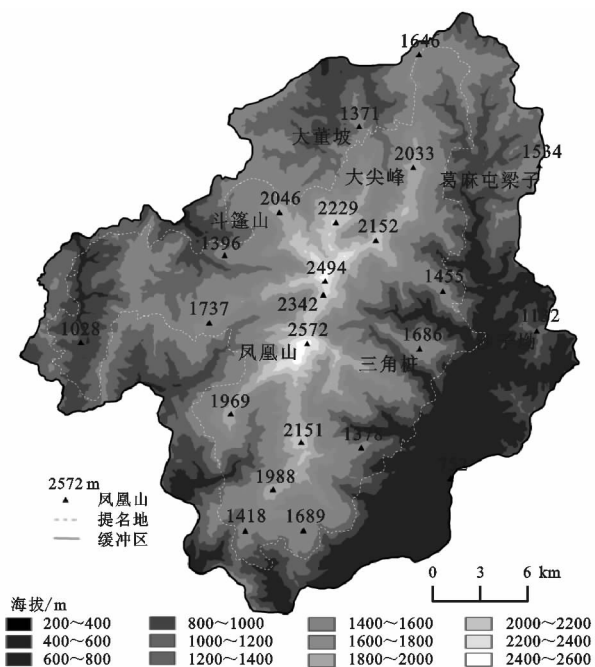


图1 研究区地形

2 数据来源

2.1 数据处理

DEM 数据来自 1:50 000 地形图。研究选取 1990 年 8 月 22 日、2002 年 8 月 31 日、2016 年 8 月 29 日 3 个时期的 Landsat TM/ETM/OLI 影像,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),以 ENVI 5.3 对遥感影像进行消除薄云、地形校正、几何校正、融合、裁剪等预处理,基于像元二分模型生产 3 个时期植被覆盖度分布图。参考《土地利用现状分类》(GB/T21010—2007)标准,以监督分类中最大似然分类器提取土地利用类型,分为耕地、林地、园地、水体、草地、裸地、城镇用地及未利用地 8 大类。以 Majority/minorityAnalysis 消除小图斑,Clump Class 合并临近的类似分类区,Sieve Classes 过滤掉被隔离的分类像元,将 0.5 m 空间分辨率航拍影像、野外调查数据与土地利用分类结果进行比较,对错分的类型进行人工修改,基于地表真实感兴趣区的分类结果精度均大于 81%。

2.2 研究方法

(1) 归一化植被指数(NDVI)。NDVI 能消除部分与太阳高度角、卫星观测角、地形、云影等与大气条件有关的辐射变化,也是植被生长状态及植被覆盖度最佳指示因子,被定义为近红外波段与可见光红波段数值之差和这两个波段数值之和比值,计算公式如下:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \tag{1}$$

式中:NIR 为近红外波段的反射率;R 为红光波段的反射率。Landsat TM/ETM 影像 $NDVI = (Band4 - Band3) / (Band4 + Band3)$,OLI 影像 $NDVI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4)$ 。

(2) 像元二分模型估算植被覆盖度。像元二分模型估算植被覆盖度计算简便、结果可靠,是一种实用的植被遥感估算模型^[26-27]。它假设一个像元的地表由有植被覆盖部分地表与无植被覆盖部分地表组成,遥感传感器观测到的光谱信息也由这 2 个因子线性加权合成,各因子的权重是各自的面积在像元中所占的比率。参考李苗苗等^[28]提出的估算 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的方法, V_n 为植被覆盖度,计算公式如下:

$$V_n = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \tag{2}$$

式中:NDVI 为该像元上的归一化植被指数; $NDVI_{soil}$ 为裸地部分的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为植被部分的 NDVI 值。

同一时相的遥感影像, $NDVI_{soil}$ 的变化范围一般在 $-0.1 \sim 0.2$,同时因植被类型的影响, $NDVI_{veg}$ 值也会随时间和空间的变化而改变, $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 不取固定值^[29]。根据影像上 NDVI 的灰度分布,以 0.5%置信度截取 NDVI 累计值百分比的阈值分别近似代表 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度时空变化

在 ENVI 5.3 中代入公式(2)计算植被覆盖度,设定植被覆盖度为 5 级:极低植被覆盖度($V_1 < 10\%$)、低植被覆盖度($10\% \leq V_2 < 30\%$)、中植被覆盖度($30\% \leq V_3 < 50\%$)、中高植被覆盖度($50\% \leq V_4 < 70\%$)、高植被覆盖度($70\% \leq V_5$)。如表 1 和附图 4 所示,近 30 年间,梵净山的植被覆盖良好,极低植被覆盖度和低植被覆盖度占比较低,其北部、西部的居民地以及东部带状公路沿线的植被覆盖变化较为稳定,各等级植被覆盖度之间的变化较大,其中 2002 年的植被覆盖度出现大范围降低。

表 1 1990—2016 年梵净山植被覆盖度

年份	V_1/km^2	$P/\%$	V_2/km^2	$P/\%$	V_3/km^2	$P/\%$	V_4/km^2	$P/\%$	V_5/km^2	$P/\%$
1990	0.07	0.01	2.28	0.29	64.31	8.29	705.10	90.87	4.35	0.56
2002	3.09	0.40	117.63	15.16	649.35	83.69	5.36	0.69	—	—
2016	0.59	0.08	12.15	1.57	601.43	77.51	161.77	20.85	—	—

注:—表示无值,P 为各等级植被覆盖度占研究区总面积比例。

为揭示研究区植被覆盖度的动态变化特征,建立植被覆盖度转移变化分级指标,发生 4 个等级变化为强度,3 个等级变化为中度,2 个等级变化为轻度,1 个等级变化为微度。其中,指定高植被覆盖度向低植被覆盖度转变为退化,反之为增加。在 ArcGIS 中将 1990—2016 年 3 期植被覆盖度数据进行 GIS 叠加分析,得到

植被覆盖度等级转移变化统计表(表 2)。1990—2002 年,植被覆盖出现微度退化面积 663.83 km²,轻度退化 79.08 km²,可能受到大面积的因子影响,无变化区域面积仅 30.65 km²;2002—2016 年,生态环境得到改善,无变化区域面积 505.73 km²,微度和轻度增加分别达 262.70、3.90 km²。1990—2016 年,植被覆盖度出现

微度退化面积 552.61 km²,无变化区 210.33 km²,总体来看研究区的植被覆盖度受到一定的影响。

3.2 植被覆盖度变化与地形因子关系

3.2.1 植被覆盖度与海拔 山地是贵州省分布面积最大的地貌类型,梵净山属武陵山脉向西南的延伸部分,可划分为低山(小于 900 m)、低中山(900~1 600 m)、中山(1 600~1 900 m)、高山(1 900~2 900 m)^[30]。研究

重点关注植被覆盖变化剧烈区域,即低山、中低山区域。由图 2 可见,研究区的低山、中低山区地势相对平缓,水热条件优越,植被覆盖度高,并且低山和中低山的植被覆盖度面积占比较大,1990—2016 年 3 个时期占比分别为 83.72%,83.68%,83.74%,但海拔相对较低的区域人类活动频繁,受农业耕种和城镇建设活动的影响,地表植被覆盖易受到破坏。

表 2 1990—2016 年梵净山植被覆盖度等级转移变化

变化程度	植被覆盖度变化类型	变化评分	面积/km ²		
			1990—2002 年	2002—2016 年	1990—2016 年
强度退化	V ₅ →V ₁	−4	—	—	—
中度退化	V ₅ →V ₂ ,V ₄ →V ₁	−3	0.49	—	0.11
轻度退化	V ₅ →V ₃ ,V ₄ →V ₂ ,V ₃ →V ₁	−2	79.08	0.06	5.13
微度退化	V ₅ →V ₄ ,V ₄ →V ₃ ,V ₃ →V ₂ ,V ₂ →V ₁	−1	663.83	3.02	552.61
无变化	无变化	0	30.65	505.73	210.33
微度增加	V ₁ →V ₂ ,V ₂ →V ₃ ,V ₃ →V ₄ ,V ₄ →V ₅	1	0.79	262.70	7.17
轻度增加	V ₁ →V ₃ ,V ₂ →V ₄ ,V ₃ →V ₅	2	—	3.90	—
中度增加	V ₁ →V ₄ ,V ₂ →V ₅	3	—	0.01	—
强度增加	V ₁ →V ₅	4	—	—	—

注:—表示无值。

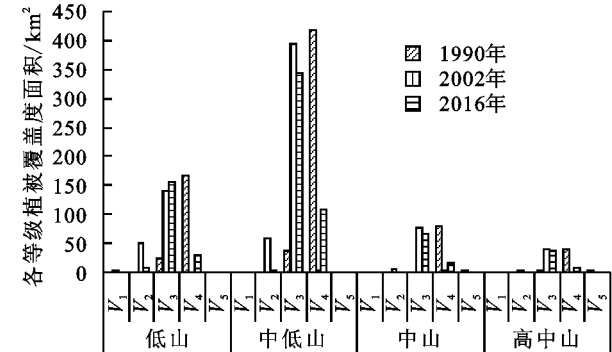


图 2 1990—2016 年海拔—植被覆盖度变化

3.2.2 植被覆盖度与坡度 不同坡度直接影响坡面接受太阳辐射的量值以及物质交流与能量转换的方式与程度,从而间接地影响该坡面植被类型与分布态势^[31]。从 1:50 000 DEM 获取研究区坡度数据,划分坡度类型为平坡(0°~5°)、缓坡(6°~15°)、斜坡

(16°~25°)、陡坡(26°~35°)、急坡(36°~45°)、险坡(46°以上)共 6 级^[32]。将 1990—2016 年 3 期植被覆盖度数据与坡度数据进行 GIS 叠加分析,获取坡度与植被覆盖度面积的变化关系图。从图 3 中可以看出,当坡度小于 5°时,植被覆盖度比较低;当坡度变大时,植被覆盖度有所上升,缓坡区植被覆盖度占比 19.42%;斜坡、陡坡、急坡的植被覆盖度占较大比重,分别为 33.33%,28.48%,12.18%;险坡植被覆盖较低,但是存在高植被覆盖度,占比 3.03%,说明研究区植被覆盖度较高的区域主要分布在坡度相对较陡的地带。植被覆盖度较低的区域主要分布在坡度相对较缓的地带,其原因是研究区坡度相对较缓的地带也是人类活动的集中区域,受人类活动的破坏植被覆盖度较低,而坡度较陡的地带,受人类活动影响较小,植被覆盖相对较好。

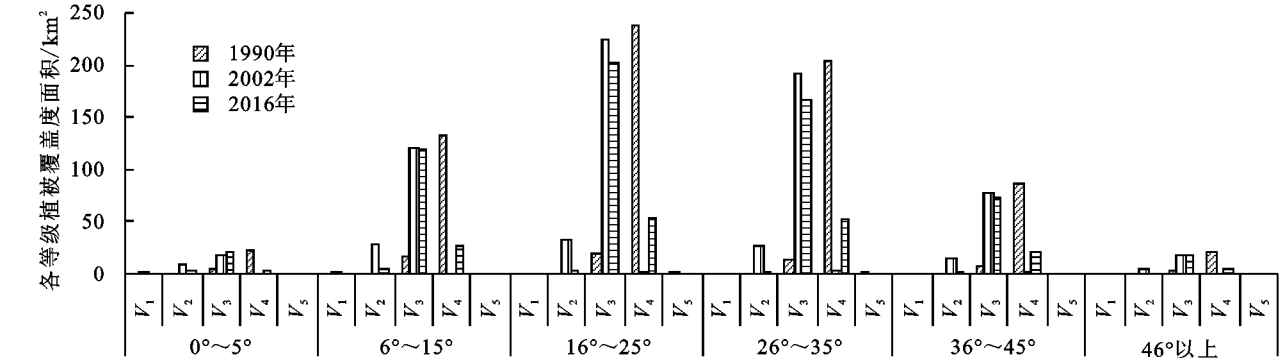


图 3 1990—2016 年坡度—植被覆盖度变化

3.2.3 植被覆盖度与坡向 坡向是决定地表面接受阳光和重新分配太阳辐射能量的重要地形因子之一^[33]。研究设定坡向:北为 0°,东为 90°,南为 180°,西为 270°,并将坡向划分为阳坡(135°~225°)、阴坡(315°~45°)、半阳坡(90°~135°,225°~270°)、半阴坡(45°~90°,270°~315°)。研究区具有典型的中亚热带季风山地湿润气候特征,夏半年盛行偏南风,为单一盛行风向,受地形阻挡的影响,阳坡的降水量也多于阴坡,从而有利于植被的生长。研究区的山体北东走向,属武陵山脉的主峰,地势隆起具有明显的孤岛

特征,导致水热因子较均衡环山体分布。

将坡向数据与植被覆盖度数据进行 GIS 叠加分析,得到研究区植被覆盖度变化与不同坡向数据(图 4)。1990—2016 年,中植被覆盖度以 2002 年变化幅度较大,并且阳坡、半阳坡和阴坡、半阴坡的植被覆盖度占研究区面积差异扩大。阳坡、半阳坡的植被覆盖整体高于阴坡、半阴坡。阳坡、半阳坡获得的太阳辐射能较多,光照时间最长,植被覆盖面积为 198.32,198.37 km²,半阴坡、阴坡的植被覆盖面积为 178.0,191.0 km²,阴坡和半阴坡可能因喜阴植被生长导致部分区域植被覆盖度较高。

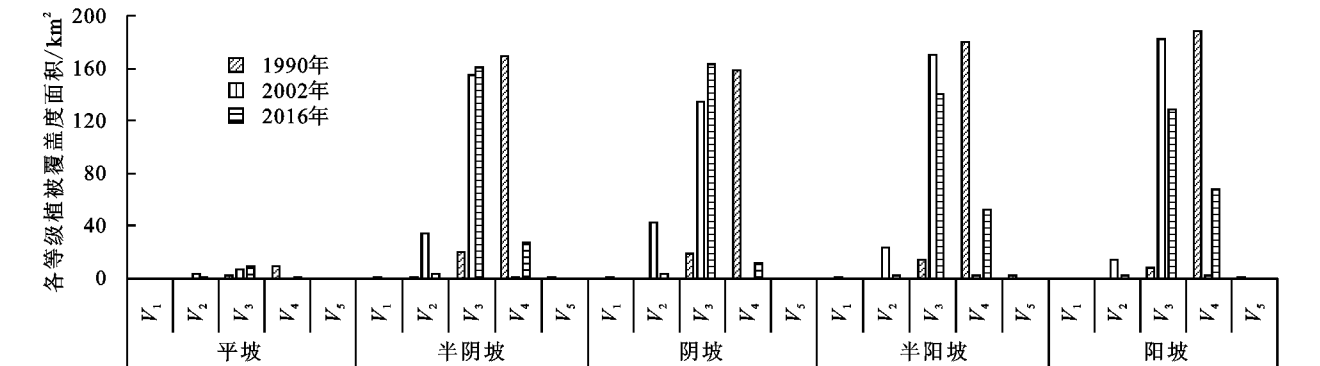


图 4 1990—2016 年坡向—植被覆盖度变化

3.3 植被覆盖度与土地利用

人类活动深刻地改变和干预了自然地理环境,土地利用是其主要表现形式,其直接表征就是地表覆被状况的改变,土地利用变化是反映人类活动强度的重要因子^[34-35]。

通过咨询世界自然遗产保护专家,实地调研研究区管理发展和现状及林地养护情况,将耕地、园地、城镇用地划为人类活动影响区(M),水体、草地、裸地、林地及未利用地合并为未利用地为自然区(N),得到梵净山 3 期土地利用图(附图 5)。1990—2016 年,自然区面积呈减少趋势,依次为:651.41 km²>610.18 km²>569.78 km²,相应的人类活动影响区面积呈扩展态势,分别为 124.70 km²<165.37 km²<206.33 km²。近 30 年间,研究区受人类活动影响区域主要分布于缓冲区农业耕作区,北部和南部的城镇建设区,以及环梵净山公路沿线。

将研究区 1990—2016 年的土地利用数据与同时期植被覆盖度数据分别进行 GIS 叠加分析,获取梵净山各等级植被覆盖度占人类活动影响区域的面积。如表 3 所示,自然区和人类活动影响区中的中植被覆盖度占各等级植被覆盖度的主要部分,各个时期内自然区中植被覆盖度、中高植被覆盖度均高于人类活动影响区。近 30 年间,自然区和人类活动影响区的极低植被覆盖度面积变化小;低植被覆盖度和中植被覆盖度在 2002 年出现倒 V 形变化,自然区内和人类活动影响区的低植被覆盖度相比 1990 年增长约 77 倍和 24 倍,中植被覆盖度较之于 1990 年增长近 10 倍和 7 倍,说明研究区植被可能受气象因素的大面积影响而导致植被覆盖度骤减。随人类活动范围和强度增大,缓冲区及提名地内的一部分高植被覆盖区变化转移为裸地、建设用地等无植被或少植被区,植被覆盖度出现轻度降低趋势,从而影响梵净山的生态环境功能和价值。

表 3 土地利用与植被覆盖度面积变化 km²

植被覆盖度 等级	1990 年		2002 年		2016 年	
	自然区	人类活动影响区	自然区	人类活动影响区	自然区	人类活动影响区
V ₁	0.04	0.03	2.01	1.08	0.26	0.33
V ₂	1.17	1.11	90.62	26.93	5.53	6.61
V ₃	48.12	19.67	513.92	135.10	457.62	143.34
V ₄	603.25	98.36	3.33	2.03	105.97	55.67
V ₅	4.35	—	—	—	—	—

注:—表示无值。

研究区内农村居民点规模小、数量多、分布广,主要分布在低海拔地区。传统生活生产方式对自然资源的依赖性较强,强烈的人类活动将低海拔地区的大部分灌丛和林地被转化为耕地或建设用地,导致植被覆盖脆弱性明显,其土地利用变化过程对区域生态环境的影响不容忽视。提名地内土地利用类型的变化对植被覆盖度的退化和植被恢复有明显影响,提名地有团龙村、大园址村等5个村,人口密度7人/km²,主要集中于梵净山西部,随着城镇化发展及进行遗产提名地保护管理,居民逐步外迁,提名地内居民人数呈减少趋势,同时经过实施生态管控,生态环境压力有所缓解;梵净山保护区的缓冲区分布凯文村、梵净山村等16个村,人口密度49人/km²,旅游开发活动如开辟交通、营建宾馆、饭店、停车场等导致林草地用途改变和对植物资源的损毁,以及农村居民点和城镇周边的耕地遭受侵占,使土地利用类型和空间结构更加复杂。此外,公路建设对植被覆盖度的转移变化有一定影响,梵净山环线公路分布于1300~1400 m以下的低山常绿阔叶林和低山次生落叶阔叶林区域,产生了线状无植被覆盖区。提名地和缓冲区修建旅游基础设施,以及存在滑坡、泥石流、森林病虫害等自然灾害,也成为影响植被覆盖度出现小斑状变化的扰动因素。

4 结论

(1) 1990—2016年,梵净山世界遗产提名地植被覆盖较好,缓冲区植被覆盖度较低且变化敏感度较高。研究区山体具有特殊的地势隆起的孤岛特征,地形因子海拔、坡度、坡向在热量和降水方面不同程度上影响各等级植被覆盖度的空间分布,同时地形因子极大影响着人类活动在研究区的空间分布,进而影响着生态环境承受的压力大小。

(2) 梵净山植被覆盖度变化与土地利用变化存在一定相关性。人类活动影响强度较高地区主要分布于缓冲区,导致缓冲区植被覆盖度脆弱性明显高于提名地,2002年以后大部分区域的植被覆盖度均在中高、中植被覆盖度以上,且多集中人类活动影响较小的坡地,低植被覆盖主要分布于缓冲区零星带状、片状的人类活动建设区。缓冲区城镇化发展对生态环境的压力越来越大,提名地的旅游设施建设导致植被覆盖度降低日趋明显,研究区当前和今后一段时期内应坚持保护好现有森林资源,继续实施退耕还林、天然林保护、自然保护区建设等生态建设工程,促进区域协调发展。

(3) 本文还存在不足和有待完善之处。研究采用的遥感数据的时间跨度近30年,影像数据时间分辨率较低,同时研究区的植被类型和下垫面具有复杂性和多样性,拟采用高时空分辨率、长时间序列的植被覆盖度数据集、多源遥感数据融合估算植被覆盖度,进一步研究气候、社会经济活动与植被覆盖度的综合响应机制,将更能反映人文和自然环境因子对梵净山自然遗产提名地植被的影响。

参考文献:

- [1] 梁应权. 植被监测及趋势分析: 植被数量生态学中几个理论问题的探讨[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 967-976.
- [2] Leprieur C, Verstraete M M, Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 10(4): 265-284.
- [3] 陈晋, 陈云浩, 何春阳, 等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. 遥感学报, 2001, 5(6): 416-422.
- [4] 陈涛, 牛瑞卿, 李平湘, 等. 密云水库流域2000—2005年植被覆盖度变化监测[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 190-195.
- [5] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 588-593.
- [6] 胡学平, 王式功, 许平平, 等. 2009—2013年中国西南地区连续干旱的成因分析[J]. 气象, 2014(10): 1216-1229.
- [7] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774-782.
- [8] Jin X, Wan L, Zhang Y K, et al. Quantification of spatial distribution of vegetation in the Qilian Mountain area with MODIS NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(21): 5751-5766.
- [9] Kaufman Y J, Tanré D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270.
- [10] 李崇巍, 刘丽娟, 孙鹏森, 等. 岷江上游植被格局与环境关系的研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 404-409.
- [11] Wang H, Liu G H, Zong-Shan L I, et al. Driving force and changing trends of vegetation phenology in the Loess Plateau of China from 2000 to 2010[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(5): 844-856.
- [12] Milne A K, O'NEILL A L. Mapping and monitoring land cover in the Willandra Lakes World Heritage Region[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(11): 2035-2049.

- [13] 杨海龙,李迪强,朵海瑞,等.梵净山国家级自然保护区植被分布与黔金丝猴生境选择[J].林业科学研究,2010,23(3):393-398.
- [14] 周忠发,秦青春,谢湛明,等.基于“3S”的梵净山自然保护区植被分布探讨[J].测绘与空间地理信息,2006,29(3):4-6.
- [15] 杨波,何露.农业文化遗产研究的GIS应用前景分析[J].中国农业资源与区划,2015,36(2):139-144.
- [16] Bayramov E, Buchroithner M F, McGurty E. Determination of main climate and ground factors controlling vegetation cover regrowth along oil and gas pipelines using multiple, spatial and geographically weighted regression procedures [J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66(7):2047-2062.
- [17] Jamali S, Seaquist J, Ardö J, et al. Investigating temporal relationships between rainfall, soil moisture and MODIS-derived NDVI and EVI for six sites in Africa [J]. Savanna, 2011,21(3):547-553.
- [18] Jin X, Wan L, Zhang Y K, et al. Quantification of spatial distribution of vegetation in the Qilian Mountain area with MODIS NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(21):5751-5766.
- [19] 卢德彬,禹真,毛婉柳,等.基于GIS和分形理论的山区土地利用空间结构研究[J].水土保持研究,2016,24(2):220-223.
- [20] Cong N, Piao S, Chen A, et al. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012,165:104-113.
- [21] 潘建平,叶焕焯.基于遥感分类的植被覆盖度提取[J].测绘信息与工程,2007,32(6):17-19.
- [22] 宋翔,颜长珍,朱艳玲,等.黄河源区土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J].中国沙漠,2009,29(6):1049-1055.
- [23] 孙家柄.遥感原理与应用[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [24] Tuanmu M N, Viña A, Winkler J A, et al. Climate-change impacts on understorey bamboo species and giant pandas in China's Qinling Mountains[J]. Nature Climate Change, 2013,3(3):249-253.
- [25] Turner B L I, Clark W C, Kates R W, et al. The earth as transformed by human action: global and regional changes in the biosphere over the past 300 years[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993.
- [26] 王静.土地资源遥感监测与评价方法[J].北京:科学出版社,2006.
- [27] 邢著荣,冯幼贵,杨贵军,等.基于遥感的植被覆盖度估算方法述评[J].遥感技术与应用,2009,24(6):849-854.
- [28] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [29] 吴英,张万幸,张丽琼,等.基于DEM的地形与植被分布关联分析[J].东北林业大学学报,2012,40(11):96-98.
- [30] 烟贯发,万鲁河,温智虹,等.基于RS和DEM的长白山天池植被分布的坡度坡向分析[J].测绘通报,2012(S1):233-236.
- [31] 杨三红,李晋敏.基于DEM的森林空间分布格局的研究[J].山西林业科技,2008(2):13-15.
- [32] 汪有奎,郭生祥,汪杰,等.甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估[J].中国沙漠,2013,33(6):1905-1911.
- [33] 于树梅,刘景时,袁金国.基于SPOT-VGT NDVI的西藏羊卓雍错流域地表覆被变化研究[J].光谱学与光谱分析,2010(6):1570-1574.
- [34] 王瑞燕,赵庚星,周伟,等.土地利用对生态环境脆弱性的影响评价[J].农业工程学报,2008,24(12):215-220.
- [35] 贺肖芳,陈燕,朱敏,等.盐城海岸带植被覆盖度时空变化及其与土地利用变迁响应研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(2):101-105.