汶川地震灾区植被覆盖度变化与地形因子的关系

熊俊楠[1], 张 昊[1], 彭 超[1], 范春捆[2], 朱吉龙[1], 龚 颖[1]
(1.西南石油大学 土木工程与建筑学院, 四川 成都 610500; 2.西藏自治区农牧科学院 农业研究所, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:[目的] 分析植被覆盖度变化与高程、坡度、坡向 3 种地形因子关系,为汶川地震灾区环境监测及修复、水土保持、灾害评估与防治等工作提供一定依据。[方法] 通过构建汶川地震灾区像元二分模型估算植被覆盖度,分析植被覆盖度与地形因子之间的关系。[结果] 高程小于 3 000 m 的各高程带、各坡度带中平均植被覆盖度、高植被覆盖度减少,低植被覆盖度增加的比例均与高程、坡度呈负相关。高程低于 500 m,500～1 000 m 区域和坡度小于 5°的区域其植被受地震影响大,恢复周期更长,截至 2015 年 5 月,尚未达到震前水平。各坡向区平均植被覆盖度,高、中、低植被覆盖度比例变化趋势较为一致,无明显差异,东、南、东南、北方向各等级植被覆盖度比例已达到震前水平。[结论] 植被覆盖度与地形因子之间关系密切,植被覆盖的动态监测可以从地形变化出发。

关键词:植被覆盖度; 地形因子; NDVI; 相关性分析; 汶川地震灾区
文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2018)03-0024-08 **中图分类号**:P237

文献参数:熊俊楠, 张昊, 彭超, 等.汶川地震灾区植被覆盖度变化与地形因子的关系[J].水土保持通报, 2018,38(3):24-31. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.005. Xiong Junnan, Peng Chao, Zhang Hao, et al. Vegetation variations and correlations with topographic factors in Wenchuan earthquake area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):24-31.

Vegetation Variations and Correlations with Topographic Factors in Wenchuan Earthquake Area

XIONG Junnan[1], ZHANG Hao[1], PENG Chao[1], FAN Chunkun[2], ZHU Jilong[1], GONG Ying[1]
(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan* 610500, *China*; 2. *Agricultural Research Institute of Tibet, Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Tibet* 850000, *China*)

Abstract: [Objective] To investigate the relationship between the vegetation coverage change and topographic factors (elevation, slope and slope aspects) in order to provide basics for environmental monitoring and restoration, soil and water conservation, and disaster assessment and prevention in Wenchuan earthquake area. [Methods] By using dimidiate pixel model to estimate vegetation fraction in the earthquake area, the relationships between vegetation fraction and topographic factors was analyzed. [Results] Vegetation fraction had negative correlations with slope and elevation (<3 000 m). Similar negative correlations were also found between the topographic factors and the proportion of low vegetation coverage. The effect of earthquake on the vegetation was dramatic in the area with elevation <500 m, and area with elevation ranged from 500 to 1 000 m and slope <5°, where the recovery period was longer. Until May 2015, vegetation recovery has not reached to the level before the earthquake. Besides, there were no significant differences between variation of vegetation coverage and proportion change of high, middle and low vegetation coverage area among different slope aspects. The proportion of high, middle and low vegetation coverage area in the east, south, north and southeast had been restored to the levels before the earthquake. [Conclusion] Vegetation fraction is closely related to topographic factors, and dynamic monitoring of vegetation status can be obtained from topographic changes.

Keywords: **vegetation fraction; topographic factor; NDVI; correlation analysis; Wenchuan earthquake area**

收稿日期:2017-10-26 **修回日期**:2017-12-22
资助项目:国家自然科学基金项目"基于人类动力学的面向震后救援的人员在地理建筑空间的分布规律研究"(51774250); 西藏自治区科技支撑计划项目"西藏主要气象灾害对农业的影响研究与数据库建设"(省 809)、住房和城乡建设部科学技术计划项目"城市地下管线无损探测方法及质量控制技术研究"(2016-K3-024)
第一作者:熊俊楠(1981—),男(汉族),四川省南充市人,博士,副教授,主要从事遥感应用与灾害风险分析方面的研究。E-mail:xjn@163.com。

植被作为地理环境的重要组成部分,与一定的地形、气候、土壤、地貌条件相适应,受到多种因子的制约[1-2]。同时,植被也是连接土壤、大气和水分的纽带,具有减少雨滴击溅、减缓地表径流、增加土壤保土固土等功能,是土壤侵蚀与水土流失的主要检测因子[3]。植被覆盖及其变化是区域生态系统环境变化的重要指示,获取地表植被覆盖及其变化信息,对于揭示地表空间变化规律,探讨植被覆盖变化的驱动因子,分析评价区域生态环境等具有重要现实意义[4],植被的形成及变化与所处的地理环境和人类活动密切相关,而地形在植被生长环境要素中占有主要作用,因此,研究地形因子与植被之间的关系是分析植被生长规律的重要途径之一[3,5-6]。

近年来,国内外许多学者对植被覆盖度及其影响因素进行了不同尺度的研究,其主要方法多以不同分辨率遥感影像为数据源进行区域植被覆盖度估算,通过数字高程模型(DEM)提取坡度、坡向、高程等地形因子,进而分析植被覆盖度与地形因子的相关性与定量关系。如蔡宏等[1]、程圣东等[7]以 TM 影像反演植被覆盖度,分别分析了赤水河流域、文安驿流域的植被覆盖度随高程、坡度及坡向变化规律与相关强度。张彦彬等[8],吕华丽[9]以 MODIS NDVI 为数据源分别对山西省 6 大煤田区、长江流域植被覆盖度与驱动力之间的关系进行了分析。目前汶川地震灾区植被覆盖度时空变化与驱动因素的分析已经取得一些成果,如吴春生等[10],彭文甫等[11]分析了汶川地震灾区 3 个时相植被覆盖度变化及其与地形因子的关系,得出不同生态系统受地震破坏、恢复与地形因子之间的关系。彭文甫等[12]对岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态变化进行了监测,分析了汶川地震前后植被受损与恢复的空间动态格局变化。但从 2008 年汶川地震后生态恢复重建以来,对汶川地震灾区植被覆盖度与地形的关系研究仍相对薄弱,针对汶川地震灾区震前、震后长时间序列植被覆盖变化的影响因素定量分析尚不多见。本文拟以 ArcGIS 和 ENVI 软件为平台,以 MODIS 影像为数据源,采用像元二分模型、分类分级和空间分析方法,分析汶川地震灾区 2008—2015 年地震前后共 8 个时相植被覆盖度的变化特征,通过 DEM 数据提取地形因子,研究震后植被覆盖度变化与高程、坡度、坡向等的定量关系,以期为汶川地震灾区生态环境监测及修复、水土保持、灾害评估与防治等工作提供依据。

1　研究区概况与数据处理

1.1　研究区概况

汶川地震灾区位于四川省西北部,川西高原向盆地过渡地带,涉及四川境内的成都、绵阳、德阳、雅安、广元、乐山、达州、阿坝州和甘孜州等 10 个市州,以及甘肃省、陕西省的部分地区,地理坐标为 102°21′—107°12′E,30°02′—34°12′N。研究区总面积为 122 109 km^2,其范围为汶川地震灾区按烈度Ⅶ—Ⅺ度划分区域。区内以高山峡谷地貌为主,地形十分陡峻,最高海拔 6 125 m,最低海拔 317 m,相对高差 5 808 m,海拔高度由西向东呈阶梯式下降。受气候和地形因素的影响,研究区的生态环境多样,拥有多种生态系统。

1.2　数据来源及预处理

MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,有 36 个离散光谱波段,光谱范围从 0.4(可见光)到 14.4(热红外)微米全光谱覆盖;其中包含 250 m(1～2 波段),500 m(3～7 波段),1 000 m(8～36 波段)等 3 个等级空间分辨率。本文采用空间分辨率 500 m 的 MOD02 HKM 数据,获取时间为 2008 年 3 月,2009,2010,2012,2014,2015 年 5 月,2011 年,2013 年 6 月共 8 期。通过 ENVI 软件的 Georeference MODIS 进行影像几何校正,消除 MODIS探测器对地球观测的视野几何特性、地球表面的曲率、地形起伏和探测器运动中的抖动等因素共同影响产生的影像几何畸变。以汶川地震灾区烈度矢量文件为边界进行影像裁剪,得到研究区 MOD02 HKM 影像,通过投影变换将数据转换为 Albers Equal Area 投影,从而实现 MOD02 HKM 数据的预处理,进行波段运算(Band Math)获得研究区 NDVI 数据。研究区 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站,空间分辨率为 90×90 m。

1.3　研究方法

(1) 植被覆盖度计算。基于遥感 NDVI 的植被覆盖度反演方法主要包括回归模型法和混合像元分解法[11-13]。本文采用混合像元分解法中的常用模型像元二分模型方法计算植被覆盖度[14-16],假设一个像元里面的信息就只由土壤和植被 2 部分组成,由传感器传回的信息(S)可以分解为土壤部分所贡献的信息 S_s 和植被部分所贡献的信息 S_v,即

$$S=S_s+S_v \tag{1}$$

在由植被和土壤构成的混合像元中,植被覆盖所占的比例就是该像元的植被覆盖度(用 F_c 表示),那么与之相对应的就是土壤所占的比例。对于一个由土壤和植被 2 部分组成的混合像元,像元中的植被覆盖面积比例即为该像元的植被覆盖度 F_c,而土壤覆盖的面积比例为 $1-F_c$。将混合像元的反射率看作是植被和土壤反射率的线性组合,其比重与他们所占

的面积有关，由此可构建出如下植被覆盖度计算公式。

$$F_c=(S-S_{soil})/(S_{veg}-S_{soil}) \quad (2)$$

式中：S_{soil}——纯土壤覆盖信息；S_{veg}——纯植被覆盖信息。若将植被指数(NDVI)看作是纯植被和纯土壤的线性组合，则(2)式可表示为以下公式。

$$F_c=(NDVI-NDVI_{soil})/(NDVI_{veg}-NDVI_{soi}) \quad (3)$$

式中：NDVI——计算所得像元NDVI值；$NDVI_{veg}$——纯植被覆盖区域NDVI值；$NDVI_{soil}$——纯土壤覆盖区域NDVI值。从理论上来说，$NDVI_{soil}$的值应该接近零，$NDVI_{veg}$的值为全植被覆盖像元的最大值，但是由于植被类型的不同，植被随季节变化等原因使得两者的值都会随着时间和空间而改变。因此，本文采用设置置信区间方法确定一个$NDVI_{min}$和$NDVI_{max}$作为$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$的值带入估算不同时相的植被覆盖度。

(2) 地形因子分类分级。以DEM数据为基础，将研究区高程按<500，500～1 000，1 000～1 500，1 500～2 000，2 000～2 500，2 500～3 000，3 000～350，3 500～4 000，>4 000 m划分为9个高程带。将坡度按<5°，5°～10°，10°～15°，15°～20°，20°～25°，25°～30°和>30°划分为7个坡度带。将研究区坡向按0°(平地)，0°～22.5°和337.5°～360°(北坡)，22.5°～67.5°(东北坡)，67.5°～112.5°(东坡)，112.5°～157.5°(东南坡)，157.5°～202.5°(南坡)，202.5°～247.5°(西南坡)，247.5°～292.5°(西坡)，292.5°～337.5°(西北坡)划分为9个坡向带。

为详细分析研究区植被覆盖度与地形因子的相关关系，首先对5·12汶川地震灾区平均植被覆盖度与地形因子的总体趋势进行分析，然后将前文提取得到的植被覆盖度，按植被覆盖度值<40%，40%～70%，>70%分为低植被覆盖度、中等植被覆盖度、高植被覆盖度，对各等级植被覆盖度的详细变化与地形因子的相关关系进行分析。

2 结果与分析

2.1 平均植被覆盖度与地形因子的关系分析

2.1.1 平均植被覆盖度随高程变化及特征分析 将计算得到的8期平均植被覆盖度与高程分带图叠加分析，得到每一高程带内平均植被覆盖度值，各高程带内平均植被覆盖度随高程的变化如图1所示。对2008年3月、2009年5月2期平均植被覆盖度在各高程带的分布分析表明，高程小于3 000 m的区域，平均植被覆盖度呈现明显减少，其中：高程<500 m区域，由84.45%减少到47.36%，减少了37.09%，减少比例最高；2 500～3 000 m区域，由35.96%减少到28.36%，减少了7.6%，减少比例最低；高程小于3 000 m的其余各高程带，呈现随着高程的增加，平均植被覆盖度减少的比例逐渐下降的特点，即平均植被覆盖度减少比例依次为：<500，500～1 000，1 000～1 500，1 500～2 000，2 000～2 500，2 500～3 000 m。高程大于3 000 m的区域，平均植被覆盖度并未减少，也未呈现出明显的规律性。说明2008年5月12日地震对研究区平均植被覆盖度破坏的影响，主要集中在3 000 m以下区域，且高程越低的区域，平均植被覆盖度所受影响越大。

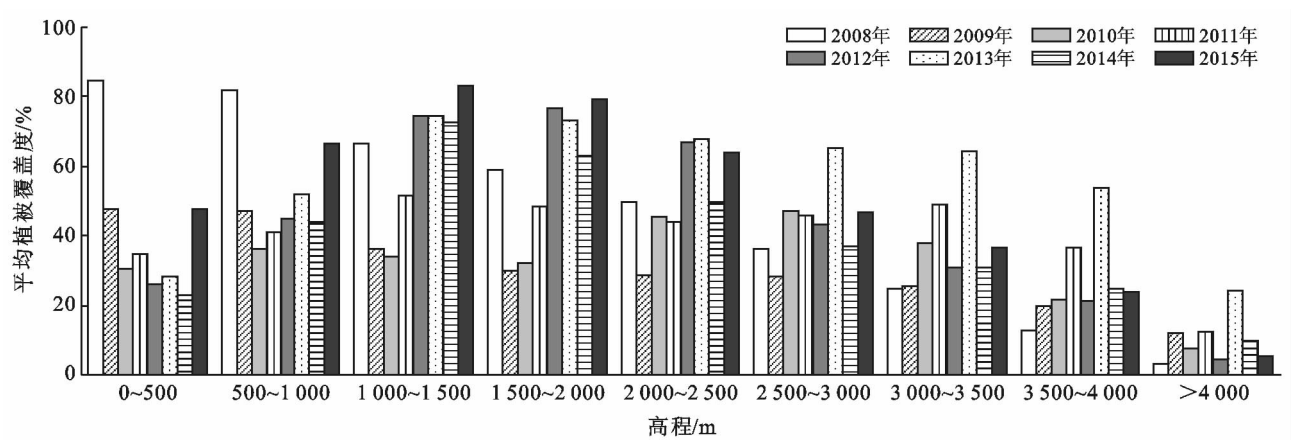


图1 各级高程带内平均植被覆盖度变化

对2008—2015年8期平均植被覆盖度在各高程带的综合分析表明，高程小于3 000 m的区域，平均植被覆盖度总体呈现出先减少后增加的趋势，其中：高程<500 m区域，平均植被覆盖度减少的周期最长，从2008年3月至2014年6月，整体呈现减少趋势，自2015年5月开始增加。高程500～1 000，

1 000～1 500 m 区域,平均植被覆盖度在 2010 年 5 月达到最低,2010 年 5 月后平均植被覆盖度整体呈现逐年增加趋势。高程 1 500～2 000,2 000～2 500,2 500～3 000 m 这 3 个区域,平均植被覆盖度最低值在 2009 年 5 月,2009 年 5 月后呈现逐年增加趋势。上述分析表明,高程＜500,500～1 000,1 000～1 500 m 区域,平均植被覆盖度受汶川地震的影响周期较长,其中＜500 m 区域受影响周期最长,为 6 a,其次为 500～1 000,1 000～1 500 m 区域受影响为 3 a,而 1 500～2 000,2 000～2 500,2 500～3 000 m 这 3 个高程带的平均植被覆盖度,主要在 2008,2009 年这 2 a受影响。

将各高程带 2009—2015 年平均植被覆盖度与 2008 年 3 月平均植被覆盖度进行对比分析表明,截至 2015 年 5 月,1 000～1 500,1 500～2 000,2 000～2 500,2 500～3 000 m 这 4 个高程带区域内的平均植被覆盖度均已达到或超过了 2008 年 3 月地震前的水平,而＜500 m,500～1 000 m 这 2 个区域平均植被覆盖度均低于 2008 年 3 月震前水平,这既与 2008 年 5·12地震对这 2 个区域内的平均植被覆盖度影响严重有关,也与灾后重建主要集中在这 2 个高程带区域有关。

通过平均植被覆盖度与高程的相关性分析表明,2008,2009 年相关系数分别为－0.996 3 和－0.966 5,具有高度的负相关性,说明随着高程增加,平均植被覆盖度逐渐降低。2010—2015 年,对于高程 1 500 m 以下区域,均呈现正相关性,相关系数分别为0.624 9,0.990 2,0.993 2,0.999 9,0.996 8,0.999 3;高程大于 1 500 m 区域,均呈现负相关性,相关系数分别为－0.598 9,－0.775 1,－0.977 0,－0.860 1,－0.993 4,－0.993 0。

2.1.2　*平均植被覆盖度随坡度变化及特征分析*　将各时相的平均植被覆盖度与划分的坡度带进行叠加分析,得到各坡度带不同时相的平均植被覆盖度,统计分析如图 2 所示。对 2008 年 3 月、2009 年 5 月两期平均植被覆盖度在各坡度带的分布分析表明,平均植被覆盖度在各坡度带均呈现明显减少趋势,其中:坡度小于 5°区域,平均植被覆盖度由 79.2%减少到 45.7%,减少了 33.5%,减少比例最高;坡度大于 30°区域,平均植被覆盖度由 33.8%减少到 25.7%,减少了 8.1%,减少比例最低。即随着坡度带的增加,平均植被覆盖度减少的比例逐渐减小。说明 2008 年 5 月 12 日地震对研究区各个坡度带的平均植被覆盖度均有影响,且坡度越小的区域,平均植被覆盖度所受影响越大。

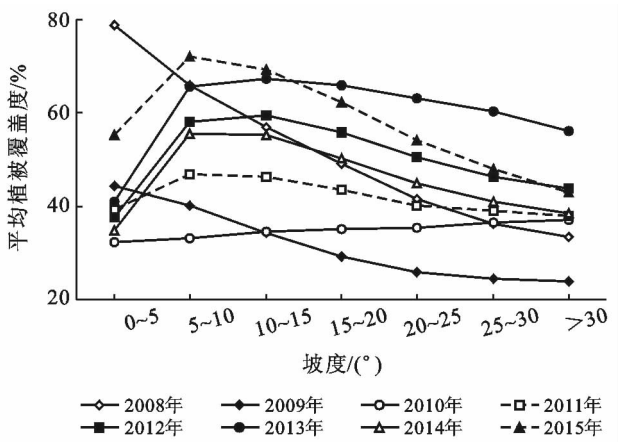


图 2　2008－2015 年研究区平均植被覆盖度随坡度变化

对 2008—2015 年 8 期平均植被覆盖度在各坡度带的综合分析表明,坡度小于 5°的区域,平均植被覆盖度总体呈现出先减少后增加的趋势,其中:坡度小于 5°,5～10°,10～15°的区域,平均植被覆盖度减少的周期最长,在 2010 年 6 月达到最低值。坡度 15°～20°,20°～25°,25°～30°和＞30°这 4 个区域,平均植被覆盖度在 2009 年 5 月达到最低,随后呈现逐年增加趋势。

将各坡度带 2009—2015 年平均植被覆盖度与 2008 年 3 月平均植被覆盖度进行对比分析表明,截至 2015 年 5 月,除坡度小于 5°的坡度带外,其余 6 个坡度带内的平均植被覆盖度均已达到或超过了 2008 年 3 月地震前的水平,这既与地震对坡度小于 5°的区域内平均植被覆盖度影响严重有关,也与灾后重建主要集中在坡度小于 5°的区域有关[17-18]。

由图 2 中 2008 年平均植被覆盖度在各坡度带的分布可以看出,2008 年 3 月研究区平均植被覆盖度的分布呈现随着坡度增加而降低的趋势,其与坡度的相关系数为－0.981 7,呈现高度负相关性。震后(2009 年 5 月)表明受地震的破坏影响,不同坡度带内的平均植被覆盖度均受到不同程度的减少,但整体上依旧呈现随着坡度越大平均植被覆盖度越低的趋势,其相关系数为－0.966 1,依然呈现高度负相关性。

2.1.3　*植被覆盖度随坡向变化的特征分析*　坡向就是每个栅格高程值改变量变化的方向,不同的坡面朝向,太阳辐射量及土壤水分的多少存在着明显的差异,进而植被分布特征也不同。将研究区坡向按前文所述划分为 9 级进行分析[1]。但由于研究区平地面积只有 0.005%,所占面积小,故本文只对除平地外的其余 8 级进行分析,结果如图 3 所示。对 2008 年 3 月、2009 年 5 月 2 期平均植被覆盖度在各坡向带的分布分析表明,平均植被覆盖度在各坡向带内均出现了降低,且不同坡向区域内,平均植被覆盖度降低的比例均在 35%左右,并无明显差异和规律性。

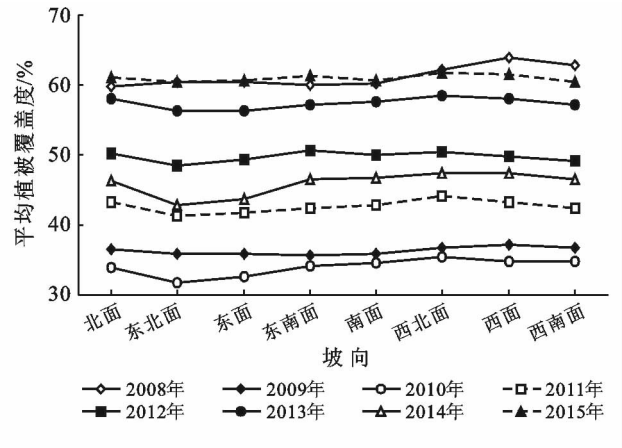


图 3 2008－2015 年不同坡向平均植被覆盖度分布

对 2008—2015 年 8 期平均植被覆盖度在各坡向带的综合分析表明，在各坡向区域内，平均植被覆盖度均呈现出先降低后增加的趋势，且各坡向区域内的平均植被覆盖度均在 2010 年出现最低值，2010 年 5 月后，各坡向区域内的平均植被覆盖度呈现上升趋势，截至 2015 年 5 月，东、南、东南、北方向的平均植被覆盖度达到了 2008 年 5 月 12 日地震前水平。通过分析平均植被覆盖度与各坡向的关系，结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出，各年份坡向与平均植被覆盖度均为正相关，其大小不同说明区域内平均植被覆盖空间分布在不同年份受坡向的影响大小不一。

表 1 平均植被覆盖度与坡向的相关性分析

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
相关系数 r	0.795 6	0.583 1	0.778 0	0.620 9	0.325 4	0.523 7	0.688 1	0.495 7

2.2 不同等级植被覆盖度与地形因子的关系分析

2.2.1 不同等级植被覆盖度随高程变化的特征分析

将不同等级植被覆盖分级图与各高程带叠加分析，统计结果如图 5 中 a，b，c 所示，分别为 2008—2015 年各高程区内低、中等、高植被覆盖度像元占比及其逐年变化趋势。

从图 4 中可以看出，高程＞4 000，3 500～4 000，3 000～3 500 m 这 3 个区域，地震前主要以低植被覆盖度为主，分别占该区域总面积的 95%，92%，81%，且地震前后该高程带低植被覆盖度的面积比例变化不显著，说明地震对高程大于 3 000 m 区域的植被影响不明显。高程＜500 m 和 500～1 000 m 区域，地震前主要以高植被覆盖度为主，占该区域总面积的 80%以上，2009 年 5 月与 2008 年 3 月对比发现，该区域低植被覆盖比例迅速增加，从 4%增加到 43%左右，高植被覆盖比例急剧降低，从 80%降低到 25%，说明地震对该区域植被覆盖度的影响最为严重。

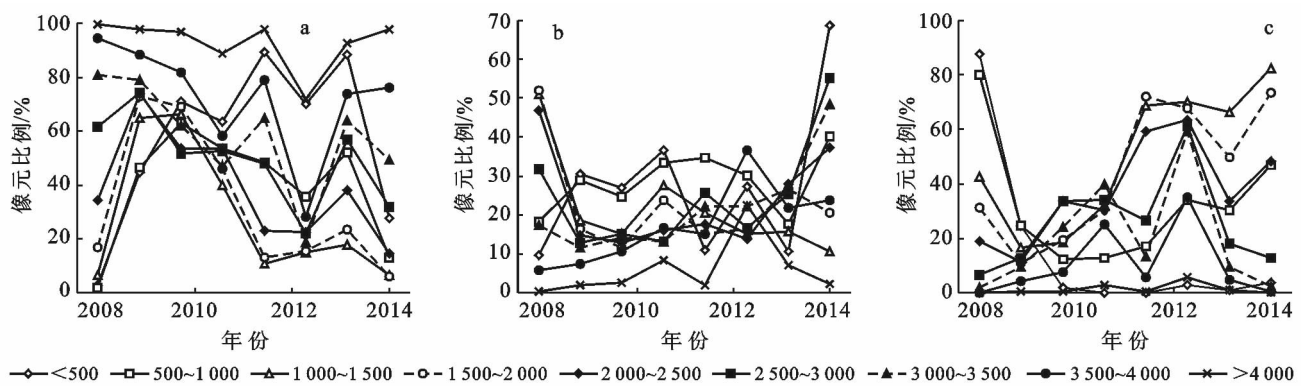


图 4 不同高程中低(a)、中(b)、高(c) 植被覆盖度像元占比

从图 4a 中各高程带低植被覆盖度占比及其变化分析表明，2008—2009 年，高程＞4 000，3 500～4 000，3 000～3 500 m 这 3 个区域低植被覆盖比例变化不明显，高程＜500，500～1 000，1 000～1 500，1 500～2 000，2 000～2 500 m 这 5 个区域低植被覆盖比例迅速增加，2 500～3 000 m 区域低植被覆盖度略有增加。总体来看，高程＜500，500～1 000，1 000～1 500，1 500～2 000，2 000～2 500，2 500～3 000 m 这 6 个区域低植被覆盖度占比呈现先增加后减小的趋势，截至 2015 年 5 月，高程＜500，500～1 000 m 这 2 个区域的低植被覆盖度比例略高于 2008 年 3 月震前值，高程 1 000～1 500，1 500～2 000，2 000～2 500，2 500～3 000 m 这 4 个区域的低植被覆盖度比例略低于震前水平。

从图 4b 中各高程带中等植被覆盖度占比及其变化分析表明,2008—2009 年,除高程 2 500～3 000,2 000～2 500,1 500～2 000,1 000～1 500 m 这 4 个区域中等植被覆盖度占比降低较为明显外,其余各高程均无明显变化。总体来看,高程 2 500～3 000,2 000～2 500,1 500～2 000,1 000～1 500 m 这 4 个区域中等植被覆盖度的占比呈现先降低后增加的趋势,高程＜500,500～1 000 m 两个区域呈现持续缓慢增加趋势。截至 2015 年 5 月,高程＜500,500～1 000,3 000～3 500,2 500～3 000 m 这 4 个区域的中等植被覆盖度占比高于 2008 年 3 月,而 1 000～1 500,1 500～2 000,2 000～2 500 m 这 3 个区域的中等植被覆盖度占比低于 2008 年 3 月。

从图 4c 中各高程带高植被覆盖度占比及其变化分析表明,2008—2009 年,高程＜500,500～1 000,1 000～1 500,1 500～2 000,2 000～2 500 m 这 5 个区域高植被覆盖占比减少,其中:高程＜500,500～1 000 m两个区域减小最为明显。总体来看,高程＜500,500～1 000,1 000～1 500,1 500～2 000,2 000～2 500 m 这 5 个区域高植被覆盖度的占比呈现先降低后增加的趋势。截至 2015 年 5 月,高程 1 000～1500,1 500～2 000,2 000～2 500 m 这 3 个区域的高植被覆盖度占比高于了 2008 年 3 月,高程＜500,500～1 000 m 两个区域的高植被覆盖度占比还低于 2008 年 3 月。

2.2.2　不同等级植被覆盖度随坡度变化的特征分析

将不同等级植被覆盖分级图与坡度带划分结果叠加分析,统计结果如图 5 中 a,b,c 所示,分别表示 2008—2015 年各坡度带内低、中等、高植被覆盖度像元占比及其逐年变化趋势。

从图 5a 中各坡度带低植被覆盖度占比及其变化分析表明,2008—2009 年,各坡度带中,低植被覆盖度占比均呈现急剧增加,其变化率依次为坡度＜5°,5°～10°,10°～15°,15°～20°,20°～25°,25°～30°,大于 30°,即随着坡度带的增大,低植被覆盖度占比增加的幅度逐渐减小。总体来看,划分的 7 个坡度带区域中,低植被覆盖度占比均呈现先增加后减小的趋势,其中坡度＜5°区域低植被覆盖度占比减少最为缓慢。截至 2015 年 5 月,除坡度＜5°区域低植被覆盖度占比例略高于震前水平外,其余各坡度区均已达到或低于震前水平。

从图 5b 中各坡度带中等植被覆盖度占比及其变化分析表明,2008—2009 年,除坡度＜5°区域中等植被覆盖度占比增加外,其余各坡度带均降低。总体来看,除坡度＜5°区域外,其余各坡度区中等植被覆盖度的占比呈现先降低后增加的趋势,坡度＜5°区中等植被覆盖度占比呈持续缓慢增加,至 2015 年 5 月,坡度＜5°区中等植被覆盖度已达 58%,超过震前水平,其余各坡度带中等植被覆盖达到或略低于震前水平。

从图 5c 中各坡度带高植被覆盖度占比及其变化分析表明,2008—2009 年,各坡度带区域高植被覆盖占比均减少,其减小比例依次为坡度＜5°,5°～10°,10°～15°,15°～20°,20°～25°,25°～30°,大于 30°,即随着坡度的增加,高植被覆盖度占比减小的幅度逐渐减小。总体来看,各坡度带内高植被覆盖度占比呈现出先降低后增加的趋势,截至 2015 年 5 月,除坡度＜5°区外,其余各坡度带高植被覆盖度占比均已达到或超过震前水平,而坡度＜5°区域高植被覆盖度还低于震前近 40%。

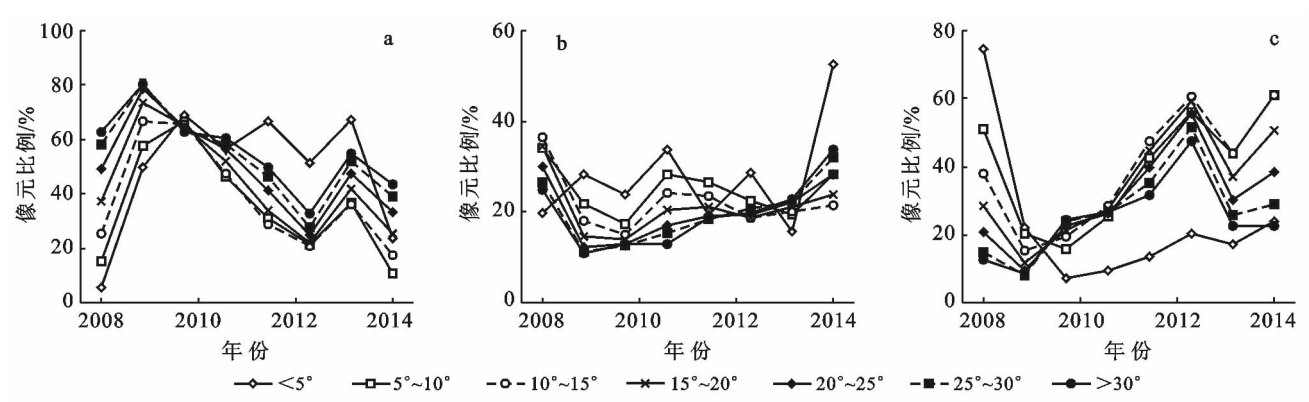


图 5　不同坡度带中低(a)、中(b)、高(c) 植被覆盖度像元占比

2.2.3　不同等级植被覆盖度随坡向变化的特征分析

将 2008—2015 年植被覆盖分级图与坡向带划分结果叠加分析(如表 2 所示),统计了各个年份低、中、高植被覆盖占不同坡向区像元比例。

从表 2 中可以看出,2008—2009 年,各坡向区低植被覆盖度像元比例均大幅增加,从 20%增加至 60%左右,至 2010 年,低植被覆盖度像元比例增加到最大值,2011 年开始,低植被覆盖度像元占比开始降

低，截止2015年5月，基本达到2008年3月震前水平。

2008—2009年，各坡向区中等植被覆盖度像元比例均降低，从30%降低至20%左右，至2010年，中等植被覆盖度像元比例降低到最低值16%左右，2011年开始，中等植被覆盖度像元占比开始增加，截止2015年5月，达到并超过2008年3月震前水平，各方向中等植被覆盖度像元所占比例约为34%。

表2 不同坡向区低、中、高植被覆盖度像元所占比例 %

年份	植被覆盖等级	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
2008	低	25.68	25.87	25.42	25.03	24.82	21.99	20.86	22.74
2009	低	62.54	63.22	63.73	63.76	63.35	61.87	61.32	62.12
2010	低	66.71	69.39	67.96	65.93	65.73	65.57	65.19	64.27
2011	低	52.15	54.73	53.77	52.52	52.61	52.85	51.68	50.09
2012	低	44.09	47.50	46.05	43.18	44.03	45.57	45.01	43.31
2013	低	31.45	34.21	33.34	32.30	31.68	31.59	30.60	30.25
2014	低	48.66	54.32	52.59	48.40	47.80	48.52	47.67	47.16
2015	低	23.56	24.18	22.72	22.25	23.57	23.80	21.78	21.49
2008	中	29.02	27.04	28.36	30.46	30.37	29.41	28.29	28.03
2009	中	20.33	20.39	19.71	20.02	19.91	21.01	21.12	21.10
2010	中	17.06	17.16	17.99	18.48	17.54	17.74	18.40	18.44
2011	中	25.31	25.34	25.96	25.74	25.00	26.36	27.17	26.86
2012	中	21.52	19.73	20.75	21.95	21.89	21.97	22.36	23.28
2013	中	21.82	21.78	22.79	22.28	22.27	24.16	24.11	23.11
2014	中	19.43	16.91	18.20	19.77	19.79	19.64	19.26	19.81
2015	中	33.36	33.96	35.09	33.95	33.87	34.95	35.76	35.35
2008	高	45.30	47.09	46.22	44.51	44.81	48.60	50.84	49.23
2009	高	17.13	16.39	16.56	16.22	16.74	17.12	17.57	16.78
2010	高	16.23	13.45	14.05	15.59	16.74	16.69	16.41	17.29
2011	高	22.54	19.93	20.27	21.74	22.39	20.79	21.15	23.04
2012	高	34.39	32.77	33.20	34.86	34.09	32.47	32.63	33.40
2013	高	46.73	44.00	43.87	45.41	46.05	44.25	45.29	46.64
2014	高	31.90	28.77	29.21	31.84	32.41	31.85	33.07	33.04
2015	高	43.08	41.86	42.19	43.80	42.56	41.25	42.46	43.16

2008—2009年，各坡向区高植被覆盖度像元比例均大幅降低，从50%降低至17%左右，至2010年，高植被覆盖度像元比例降低到最低值14%左右，2011年开始，高植被覆盖度像元占比开始增加，截止2015年5月，尚未达到2008年3月震前水平，各方向高植被覆盖度像元所占比例约为40%，说明高植被覆盖度的恢复更为漫长。各坡向之间低、中等、高植被覆盖度像元数比例变化整体趋势基本一致，无明显差异。

3 讨论与结论

本文以ArcGIS和ENVI软件为平台，基于MODIS遥感影像和像元二分模型，提取研究区2008—2015年8期植被覆盖度，重点分析了植被覆盖度变化与地形因子的相关关系，结果如下：

(1) 汶川地震前后植被覆盖度对比分析表明，高程大于3 000 m区域平均植被覆盖度、高、中、低植被覆盖度比例均无明显变化，其余各高程带中平均植被覆盖度均明显减少，且随着高程增加，平均植被覆盖度减小的比例逐渐降低，即植被覆盖度减小比例与高程呈负相关关系。汶川地震后7期植被覆盖数据分析表明，高程越低的区域，植被恢复周期越长，截至2015年5月，高程＜500 m，500～1 000 m区域的平均植被覆盖度尚未达到震前水平，高植被覆盖度比例低于地震前，低植被覆盖度比例高于地震前，其他各高程带区域平均、高、中、低植被覆盖度比例均已达到地震前水平。

(2) 汶川地震前后植被覆盖度对比分析表明，随着坡度的增加，平均植被覆盖度减少的比例逐渐减小，即平均植被覆盖度减少与坡度呈负相关关系。各坡度带中等、低植被覆盖度比例增加，高植被覆盖度比例降

低,低植被覆盖度占比增加的幅度随着坡度增加而减少,高植被覆盖度占比降低的幅度随着坡度的增加也减少。截至 2015 年 5 月,除坡度<5°区域平均植被覆盖度低于震前水平,低植被覆盖度比例高于震前,中等、高植被覆盖度比例低于震前外,其余坡度区的平均、高、中、低植被覆盖度比例均已达到震前水平。

(3) 汶川地震前后植被覆盖度对比分析表明,不同坡向区平均植被覆盖度降低约 35%,低植被覆盖度比例由 20%增加到 60%,中等植被覆盖度比例降低约 10%,高植被覆盖度比例降低约 33%。截至 2015 年 5 月,东、南、东南、北方向的平均植被覆盖度达到了震前水平,其余各方向植被覆盖度接近但略低于震前水平,但各个方向上高植被覆盖度占比均尚未达到震前水平。

研究表明,高程小于 1 000 m,坡度小于 5°的区域,平均植被覆盖度、中等植被覆盖度、高植被覆盖度比例降低,低植被覆盖度比例增加,植被受地震影响时间长,植被恢复较为缓慢。各地形因子中,高程对研究区植被损毁与恢复的影响十分明显,经多次现场考察与文献分析表明,地震触发的崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害,主要发育在高程<1 500 m 的区域,直接造成各小流域沟口、河岸及沟谷两侧地表植被变化,震后 5~10 a 内,邻近汶川地震发震断层带区域仍有次生灾害发生,具有极大破坏潜力,导致大量的植被损失,植被生长与恢复比较困难。同时,灾后道路、房屋等基础设施重建,河谷地区河滩地、靠近河岸的缓坡区域等被充分开发利用,人类工程及社会经济活动加剧,是高程较低区域植被覆盖恢复缓慢的又一因素。随着高程的不断增加,气温逐渐降低,植被分布的垂直地带性特征明显,人类活动逐渐减少,对植被的影响和扰动逐渐降低,因此高海拔区植被覆盖度变化不明显。

坡度对汶川地震灾区植被损毁与恢复的影响亦十分明显,坡度 15°~30°的区域是滑坡等地质灾害易发区,坡度小于 5°的区域,多是滑坡体和泥石流等松散固体物质的堆积区,对植被造成直接影响。同时,河谷平原区、山区台地等缓坡区域,是灾后重建集中安置和搬迁的主要区域,工程活动亦十分频繁,植被破坏严重,虽然降水、土壤涵养能力较强且均有利于植被生长,但植被恢复持续时间很长,截至 2015 年 3 月,高植被覆盖区低于震前 40%左右,由于工程建设所占用耕地、林地等所造成的植被覆盖度降低的区域,其植被恢复能力已达到或接近可恢复的极值。

坡向对汶川地震灾区植被损毁和恢复的影响相对较弱,地震发生后,次生地质灾害、人类工程活动与坡向均没有明显的规律性。各坡向区植被覆盖度损毁与恢复的整体趋势基本一致,但植被恢复的速度不尽相同。东、南、东南方向由于属于阳坡,其光照时间更长,光合作用充足,降水充沛,更有利于植被的生长与恢复。因此,截至 2015 年 5 月植被覆盖度已达到震前水平,其余各方向则略低于震前。植被覆盖的时空变化影响因素极其复杂,除受地形因素影响外,也受气候、人类活动、土地利用变化等多种因素的共同作用,因此,关于植被覆盖变化与气候等其他因素的关系,还需进一步深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等. 基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J]. 地球与环境,2014,42(4):518-524.

[2] 姚晨,黄微,李先华. 地形复杂区域的典型植被指数评估[J]. 遥感技术与应用,2009,24(4):496-501.

[3] 李恒凯,刘小生,李博,等. 红壤区植被覆盖变化及与地貌因子关系:以赣南地区为例[J]. 地理科学,2014,34(1):103-109.

[4] 苗正红,刘志明,王宗明,等. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. 遥感技术与应用,2010,25(3):387-393.

[5] Liu Liangyun, Jing Xia, Wang Jihua, et al. Analysis of the changes of vegetation coverage of western Beijing mountainous areas using remote sensing and GIS[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009,153(1/4):339-349.

[6] Peng Jian, Liu Yinghui, Shen Hong, et al. Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of Northwestern Yunnan, China using RS and GIS[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2012,184(8):4787-4798.

[7] 程圣东,李占斌,鲁克新,等. 文安驿流域植被覆盖度时空分异及其与地貌因子关系研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27(2):145-150.

[8] 张彦彬,安楠,刘佩艳,等. 基于 MODIS 数据的山西省六大煤田区植被覆盖度时空变化特征及其驱动力分析[J]. 干旱区地理,2016,39(1):162-170.

[9] 吕华丽. 长江流域植被覆盖变化及其驱动力因子研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.

[10] 吴春生,王文杰,刘孝富,等. 基于 TM 遥感数据的汶川地震极重灾区生态恢复研究[J]. 地球信息科学学报,2012,14(5):666-672.

[11] 彭文甫,王广杰,周介铭,等. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J]. 生态学报,2016,36(7):1975-1988.

[12] 彭文甫,周介铭,徐新良,等. 成都平原及其周边区域植被覆盖动态监测[J]. 地球与环境,2017,45(2):193-202.

(下转第 37 页)

和植被盖度与土壤盐含量间相关性最强($r=0.734$, $r=-0.955$);进一步分析植被与水、盐间的数量关系可以看出,植被地上生物量每提高 1 kg/m^2,将使植被覆盖区表层土壤的含水率上升 6%,植被的盖度每提高 1%,将使植被覆盖区表层土壤的电导率降低 2.2 μS/cm;当利用以上线性回归关系预测植被覆盖区耕地的土壤水、盐含量时,其准确度可达 53.9%和 91.2%以上。

综上所述,由于秦王川灌区种植的春小麦生育期较短,易引发土壤的次生盐渍化问题;而披碱草/苜蓿混播牧草覆盖耕地时间较长可预防耕地发生土壤次生盐渍化的风险。为了降低土壤盐渍化的危害,秦王川灌区应尽快调整农业种植结构,实行草田轮作制度,大力推广种植生长期较长的牧草(如披碱草/苜蓿混播)。

[参 考 文 献]

[1] 李昂,吴应珍,马明广,等.西北地区种植甘草对土壤次生盐渍化的影响[J].水土保持通报,2016,36(6):47-52.

[2] 杨思存,车宗贤,王成宝,等.甘肃沿黄灌区土壤盐渍化特征及其成因[J].干旱区研究,2014,31(1):57-64.

[3] 王少丽,高占义,郭庭天.灌区土壤盐渍化发展模拟预测与对策研究[J].灌溉排水学报,2006,25(1):71-76.

[4] 赵可夫,范海,江行玉.盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J].应用与环境生物学报,2002,8(1):31-35.

[5] 蔺海明,贾恢先,张有福,等.毛苕子对次生盐碱地抑盐效应的研究[J].草业学报,2003,12(4):58-62.

[6] 彭红春,李海英,沈振西.利用人工种草改良柴达木盆地弃耕盐碱地[J].草业学报,2003,12(5):26-30.

[7] 李昂,吕正文,蔺海明,等.秦王川灌区不同绿色覆盖方式预防土壤次生盐渍化效应研究[J].草业科学,2008,25(10):20-24.

[8] 魏晓斌,王志峰,于洪柱,等.不同生长年限苜蓿对盐碱地土壤肥力的影响[J].草业科学,2013,30(10):1502-1507.

[9] 郭晔红,蔺海明,贾恢先,等.种植中药材对盐碱地的改良效果研究[J].甘肃农业大学学报,2005,40(6):757-762.

[10] 张世彪,李松,牛珂平,等.甘肃秦王川灌区农业节水途径探讨[J].中国沙漠,2012,32(1):270-275.

[11] 王文焰,王全久,张建丰,等.甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J].水土保持学报,2002,16(3):110-113.

[12] 缑倩倩,韩致文,屈建军,等.秦王川灌区农田土壤盐分离子特征分析[J].土壤,2014,46(1):100-106.

[13] Li Ang, Niu Kechang, Du Guozhen. Resource availability, species composition and sown density effects on productivity of experimental plant communities[J]. Plant Soil, 2011,344(1):177-186.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2007:178-188.

[15] 李昂,张鸣,陈映全,等.西北风蚀区种植甘草对农田土壤质地及碳、氮含量的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):286-290.

[16] 张浩,李志华,何蛟涛,等.干旱区盐渍土形成和水盐运移机理[J].生物学通报,2011,46(4):10-12.

[17] 李昂.生物措施防治土壤盐渍化的机理及研究进展[J].甘肃高师学报,2013,18(2):56-59.

(上接第 31 页)

[13] 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.

[14] 汪明霞,王卫东.植被覆盖度的提取方法研究综述[J].黄河水利职业技术学院学报,2013,25(2):23-26.

[15] 程红芳,章文波,陈锋.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].国土资源遥感,2008(1):13-18.

[16] 刘广峰,吴波,范文义,等.基于像元二分模型的沙漠化地区植被覆盖度提取:以毛乌素沙地为例[J].水土保持研究,2007,14(2):268-271.

[17] 马娜,胡云锋,庄大方,等.基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J].地理科学,2012,32(2):251-256.

[18] 刘琳,姚波.基于 NDVI 象元二分法的植被覆盖变化监测[J].农业工程学报,2010,26(S1):230-234.