

甘肃省植被覆盖变化及其对退耕还林工程的响应

胡春艳^{1,2}, 卫伟^{1①}, 王晓峰², 陈利顶¹, 陈晓妮³, 季元祖⁴ (1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3. 甘肃省退耕还林工程建设办公室, 甘肃 兰州 730030; 4. 甘肃省林业科学研究院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 利用 2000—2015 年 MODIS-NDVI 数据, 基于遥感和地理信息系统技术, 采用像元二分法和一元线性回归分析法, 定量探讨了甘肃省近 16 a 植被覆盖的时空变化特征, 并在此基础上评估退耕还林面积与植被覆盖的相互关系。结果表明: (1) 2000—2015 年甘肃省年均归一化植被指数(NDVI)值呈增加趋势, 年增长速率为 0.43%, 说明甘肃省植被覆盖总体呈改善态势。(2) 16 a 间, 全省植被覆盖虽有局部恶化趋势, 但改善区域面积远大于植被退化区域。其中, 明显改善、中度改善和轻微改善区域面积分别占总面积的 20.62%、14.67% 和 33.05%, 退化区域面积仅占 2.87%。(3) 总体上, 甘肃省植被覆盖度仍然较低, 全省 16 a 平均植被覆盖度为 50.98%, 低、中低植被覆盖区面积占总面积的 50% 以上, 且分布不均, 其中东南地区平均植被覆盖度最高, 为 75.43%, 中部次之, 为 47.84%, 西北最低, 只有 31.77%, 空间差异显著。(4) 退耕还林面积能较好地解释植被覆盖度的变化。退耕还林工程集中区即黄河以东地区累计退耕还林面积与 2000—2015 年年均植被覆盖度明显相关, 其决定系数 R^2 为 0.721 8。

关键词: 退耕还林工程; 甘肃省; 植被覆盖; 像元二分法; 时空变异

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2016)04-0588-07

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.04.012

Change in Vegetation Cover as Affected by Grain for Green Project in Gansu. HU Chun-yan^{1,2}, WEI Wei¹, WANG Xiao-feng², CHEN Li-ding¹, CHEN Xiao-ni³, JI Yuan-zu⁴ (1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Office of the Returning Farmland to Forest Project in Gansu Province, Lanzhou 730030, China; 4. Academy of Forestry in Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the 2000–2015 MODIS-NDVI remote sensing data, spatio-temporal variation of land vegetation cover in Gansu Province was explored with the aid of the GIS technology, and linear regression analysis methods. Then, on such a basis, the relationship between vegetation coverage and the total area involved in the Grain-for-Green project was analyzed. Results show that the annual NDVI value of Gansu Province continued to increase during the study period, with an annual growth rate of 0.43%, indicating that vegetation coverage was generally improved in Gansu Province. Although vegetation coverage in some regions still showed a decreasing trend, the areas with vegetation coverage improving formed the majority of the province. Among them, the highly-improved regions, moderately-improved regions, and slightly-improved regions accounted for about 20.62%, 14.67% and 33.05% of the province in area, respectively, while the regions with vegetation cover degrading only held 2.87%. In general, however, the total effective vegetation coverage in Gansu is still lower, compared with many other provinces in China, with the mean of 16 years being only 50.98%. The areas medium and low in vegetation coverage in total accounted for over half of the total area, and unevenly distributed. The southeast part of the province was the highest in vegetation coverage, reaching 75.43%, followed by the central part and the north-west part, with coverage of 47.84% and 31.77%, respectively, indicating that the distribution of vegetation cover varied spatially in the province. The area of lands involved in the Grain-for-Green project better explains the changes of vegetation coverage. The annual mean vegetation coverage of the years from 2000–2015 of the province was significantly related to the area of lands affected by the “Grain for Green” project in the region east to the Yellow River, with a determination coefficient of 0.721 8.

收稿日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(41371123, A1390462); 国防科工局高分地球表层系统科学研究应用示范系统(一期)黄土高原生态系统变化研究示范(30-Y30B13-9003-14/16)

① 通信作者 E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

Key words: Grain for Green Project; Gansu Province; vegetation cover; dimidiate pixel method; spatio-temporal variation

退耕还林工程是我国乃至世界上投资最大、政策性最强、涉及面最广和群众参与程度最高的一项重大生态工程,同时也是应对环境变化和人类活动干扰的重要措施之一^[1],广受国内外关注^[2-6]。以植被恢复为核心的生态建设及其效益研究已成为当前生态学研究的前沿和热点问题^[7],大规模的植被恢复工程已显著提高西部退耕区植被覆盖率^[8],从区域尺度定量分析植被恢复进度,有利于准确评估退耕还林工程所取得的实效,进而为工程顺利实施提供理论参考和科学依据^[7]。

植被覆盖时空变化是自然和人类活动共同作用的结果,尤其是人类活动和区域政策影响日益加剧的今天,植被覆盖变化更能深刻反映人类活动的印记。目前,国内外研究者立足不同时空尺度,利用归一化植被指数(NDVI, I_{NDV})对植被覆盖的分布特征、时间变化规律及其与气候变化和人类活动间的关系进行了大量研究与应用^[9-14]。其中,有关黄土高原植被覆盖变化的研究成果较多。信忠保等^[12]指出,自退耕还林政策大规模实施以来,黄土高原植被覆盖度显著提高;张庆宝等^[13]发现自1999年大规模植被建设之后,黄土高原 I_{NDV} 年均值显著增加,但植被覆盖对气候等自然因子的变化敏感度在降低,说明宏观管理政策对植被覆盖增加起到了促进作用;SUN等^[14]分析了植被覆盖与气候和人类活动的关系,特别是退耕还林工程,结果发现,工程实施以来植被覆盖度增长速率显著提高。类似的研究有很多,结论也很相似,均是从宏观角度很好地揭示了植被覆盖变化及其与人类活动的关系,并得出了有意义的结论。然而,从定量角度分析两者关系的报道相对较少,不利于准确评估退耕还林工程所取得的实效。随着GIS和遥感技术的发展,与实际退耕还林数据相结合、定量分析退耕还林工程对植被覆盖度影响以及准确评估工程所取得的实效显得越来越重要,笔者将以此为切入点进行研究。

甘肃省是我国水土流失严重的省份之一,也是我国沙漠化土地分布面积较大的省份之一,同时也是退耕还林(草)工程实施的重要区域。随着人类活动对区域生态环境的影响不断加剧,定量评估该地区植被变化对重大生态工程的响应特征,对于优化和调整相关政策措施具有突出意义。笔者选用2000—2015年MODIS-NDVI数据,应用像元二分法,估算不同时期甘肃省的植被覆盖度,分析植被

的时空变化规律及其与退耕还林的关系,以期对甘肃省植被的定量评价和动态监测提供技术与理论支持,为客观评价甘肃省退耕还林工程的生态效益提供科学依据。

1 研究区概况

甘肃省(32°11′~42°57′N, 92°13′~108°46′E)地处我国西北内陆干旱半干旱地区,地形呈狭长状,地貌形态复杂,地势自西南向东北倾斜,全省包括12个地级市和2个自治州,大致可划分为陇南山地、陇东陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地和北山山地6大区域,属大陆性温带季风气候区。自然植被东南部为森林和草地,西北部为荒漠草原。全省占地面积约为45.5万km²,居全国第7位。山地多,平地少,山地和丘陵面积占全省土地总面积的78.2%。气候干燥,气温日较差大,光照充足,太阳辐射强。年平均气温在0~14℃之间,由东南向西北降低。年均降水量约为300mm,降水各地差异很大,自东南向西北减少,降水各季分配不均,主要集中在6—9月。甘肃省是率先在全国开展退耕还林工程试点的省份之一,从1999年工程启动到2013年的14a内,甘肃省共完成退耕还林工程建设任务189.69万hm²,中央累计投入178亿元。新一轮退耕还林工程实施期限为2014—2020年,实施对象主要为25°以上坡耕地和严重沙化耕地。

2 资料与方法

2.1 数据来源与预处理

卫星遥感资料来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA),其中NDVI数据为2000—2015年16d最大值合成Terra-MODIS L3级产品数据,空间分辨率为250m,选取6—9月作为研究时段。该数据统一采用Sin投影并已进行去云、辐射校正和大气校正等处理。

利用MRT(MODIS Reprojection Tools)软件将MODIS-NDVI数据进行格式转换和投影转换,将HDF格式转换为Tiff格式,并将Sin投影转换为WGS84/Albers Equal Area Conic投影,同时完成图像的空间拼接和重采样。采用MVC合成法将6—9月8期NDVI数据进行最大值合成,获取年内最大NDVI来表示当年植被生长最好的状况。由于NDVI数据的像元初始值(digital number, ND, D_n)为

-3 000 ~ 10 000^[15], 为了方便分析, 利用 ArcGIS 10.2 栅格计算器, 根据公式 $I_{NDV} = 0.000 1 D_n$ ^[16], 将 MODIS-NDVI 的 D_n 值转化为对应的 I_{NDV} 值 (-1 ~ 1), 最后按照甘肃省行政边界裁剪出研究区域数据。

1999—2014 年甘肃省退耕还林统计数据来自甘肃省林业厅退耕还林工程建设办公室。

2.2 植被覆盖度计算

植被覆盖度 (fractional vegetation coverage, FVC) 的计算使用混合像元分解模型中最常用的线性像元二分模型。模型假设 1 个像元由土壤和植被 2 个部分组成, 混合像元的 I_{NDV} 值为 2 个部分植被指数值的加权平均和, 权重为各部分在像元中的面积比例, 其计算公式^[17-18]如下:

$$I_{NDV} = I_{NDV_{veg}} \times f + I_{NDV_{soil}} \times (1 - f) \quad (1)$$

式(1)中 $I_{NDV_{veg}}$ 为植被覆盖部分的 I_{NDV} 值; $I_{NDV_{soil}}$ 为土壤部分的 I_{NDV} 值; f 为植被覆盖度。根据式(1) f 的计算公式如下:

$$f = \frac{I_{NDV} - I_{NDV_{soil}}}{I_{NDV_{veg}} - I_{NDV_{soil}}}$$

在实际计算过程中, 分别用生长季内植被 I_{NDV} 最大值 ($I_{NDV_{max}}$) 和最小值 ($I_{NDV_{min}}$) 代替 $I_{NDV_{veg}}$ 和 $I_{NDV_{soil}}$, 则植被覆盖度计算公式如下:

$$f = \frac{I_{NDV} - I_{NDV_{min}}}{I_{NDV_{max}} - I_{NDV_{min}}}$$

由于地域差异, 植被覆盖度等级划分标准难以统一, 在参照相关研究成果^[19-22]的基础上, 结合甘肃省特有的生态环境特点, 将植被覆盖度划分为 5 个等级: 低植被覆盖度 [0, 30%)、中低植被覆盖度 [30%, 45%)、中植被覆盖度 [45%, 60%)、中高植被覆盖度 [60%, 75%) 和高植被覆盖度 [75%, 100%]。

2.3 趋势分析

利用一元线性回归方程的斜率来模拟研究区域逐个栅格单元的变化趋势^[23-25], 进而可以反映一定时间序列植被覆盖的变化趋势和变化幅度, 计算公式^[26-27]如下:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times I_{NDV_i} - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n I_{NDV_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

在实际计算中, 为了便于计算, 对上述公式作如下改进:

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times I_{NDV_i}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n I_{NDV_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2}$$

$$n \geq 2 \quad (2)$$

式(2)中 n 为研究阶段的时长; I_{NDV_i} 为第 i 年 I_{NDV} 值; S 为像元 I_{NDV} 回归方程的斜率, 反映了研究期间植被覆盖度的变化趋势。若 $S > 0$, 表示随时间变化, 植被指数升高, 表明植被覆盖度呈增加趋势, 该值越大, 植被覆盖增加越明显; 若 $S < 0$, 表明植被覆盖度呈下降趋势; 若 $S = 0$, 表明植被覆盖度完全没有变化。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖空间分布特征

基于 2000—2015 年年均植被覆盖度, 计算 16 a 的平均值, 获得甘肃省植被覆盖平均分布 (图 1)。

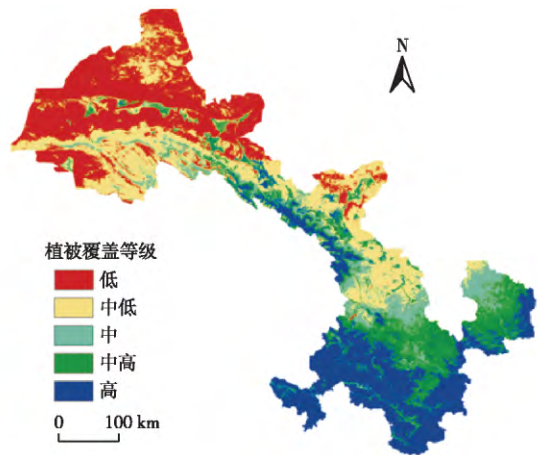


图 1 甘肃省植被覆盖空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation cover in Gansu Province

由图 1 可知, 甘肃省 2000—2015 年平均植被覆盖度总体特征表现为东南高西北低, 其中东南地区平均植被覆盖度最高, 中部次之, 西北最低, 空间差异明显, 全省 16 a 平均植被覆盖度为 50.98%, 与陕西省多年 (2000—2012 年) 平均植被覆盖度 (65.55%)^[28] 和吉林省 2000—2007 年平均植被覆盖度 (80.03%)^[29] 相比, 甘肃省总体植被覆盖度较低。东南地区 16 a 平均植被覆盖度为 75.43%, 主要包括陇中黄土高原和陇南山地, 陇中黄土高原是甘肃省实施退耕还林的重点地区, 平均植被覆盖度为 62.43%, 陇南山地为秦岭的西延部分, 地形复杂, 林地、草地面积较大, 平均植被覆盖度在 75% 以上; 中部地区 16 a 平均植被覆盖度为 47.84%, 主要包括兰州市、平凉市黄河以西部分, 武威市, 金昌市及张掖市, 植被覆盖度空间差异较大, 其中祁连山地和乌鞘岭自然植被丰富, 植被覆盖度达 75% 以

上,而靠近腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠地区,植被覆盖度约为 30%;西北地区在地理区域上属大陆性干旱区,常年高温,降水少,植被类型以荒漠为主,16 a 平均植被覆盖度为 31.77%。

对研究区 16 a 植被覆盖度平均值分级统计的结果显示:甘肃省低植被覆盖区面积占研究区面积的 26.07%,中低植被覆盖区面积占 27.03%,中植被覆盖区面积占 10.78%,中高植被覆盖区面积占 13.08%,高植被覆盖区面积占 23.04%。

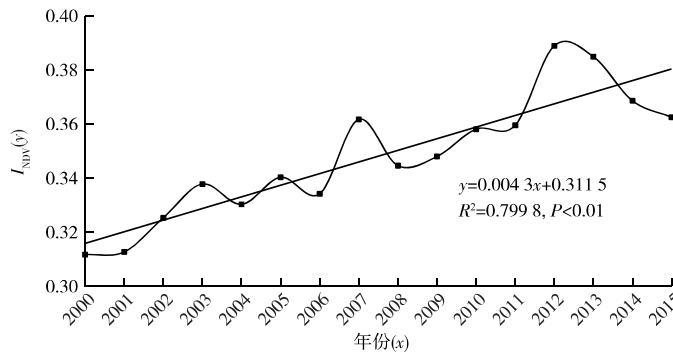


图 2 甘肃省植被覆盖度 (I_{NDV}) 年际变化曲线及线性趋势

Fig. 2 Curve of interannual variation of vegetation coverage and linear trend

根据趋势分析算法,利用 ArcGIS 10.2 软件对研究区进行逐栅格趋势分析,得到甘肃省近 16 a 的 I_{NDV} 变化趋势的空间分布(图 3,表 1),S 分级参照已有研究^[23,30-31]。

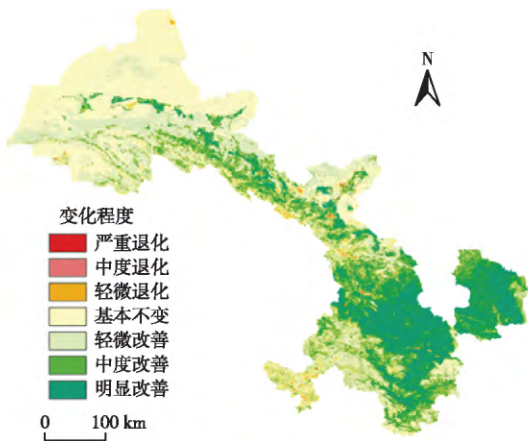


图 3 2000—2015 年甘肃省 I_{NDV} 变化趋势

Fig. 3 I_{NDV} variation trend of the past 10 years

由 I_{NDV} 趋势分析结果可知,庆阳市、平凉市中部和东南部、天水市大部分地区、定西市大部分地区、临夏回族自治州部分地区以及兰州市部分地区等, I_{NDV} 的变化趋势呈明显上升趋势,说明 16 a 来这些

3.2 植被覆盖变化及其趋势特征

从 I_{NDV} 数据中提取每年 I_{NDV} 平均值来表征植被覆盖的变化特征(图 2)。由图 2 可知,近 16 a 甘肃省植被覆盖整体呈上升趋势,但受到气候和温湿度等的影响,年际间也有波动。2000 年植被覆盖最低, I_{NDV} 年平均值为 0.3117,2012 年植被覆盖状况最好, I_{NDV} 年平均值为 0.3889,年增长速率为 0.43%,说明研究期间甘肃省植被覆盖状况得到了改善。

区域的植被覆盖得到了明显改善,其他地区或有所改善或基本不变,只有较少地区植被覆盖有所退化。其中,植被覆盖得到改善的区域面积约占总面积的 68.34%,明显改善的区域面积占 20.62%;基本不变区域面积约占 28.79%;退化区域面积约占总面积的 2.87%,且严重退化区在研究区分布极小,仅占整个区域面积的 0.20%。

表 1 近 16 a 来甘肃省 I_{NDV} 变化趋势统计结果

Table 1 Statistics of the I_{NDV} variation trends of the past 10 years

I_{NDV} 变化趋势	变化程度	面积比例 / %
$S \leq -0.009$	严重退化	0.20
$-0.009 < S \leq -0.0045$	中度退化	0.45
$-0.0045 < S \leq -0.001$	轻微退化	2.22
$-0.001 < S \leq 0.001$	基本不变	28.79
$0.001 < S \leq 0.0045$	轻微改善	33.05
$0.0045 < S \leq 0.009$	中度改善	14.67
$S > 0.009$	明显改善	20.62

S 为像元 I_{NDV} 回归方程的斜率。

3.3 退耕还林工程时空分布及其变化特征

对甘肃省及各市 1999—2014 年的退耕还林、荒山造林和封山育林面积(以下统称为退耕还林面积)进行统计,近 16 a 来甘肃省各市退耕还林面积

分布情况见图4。

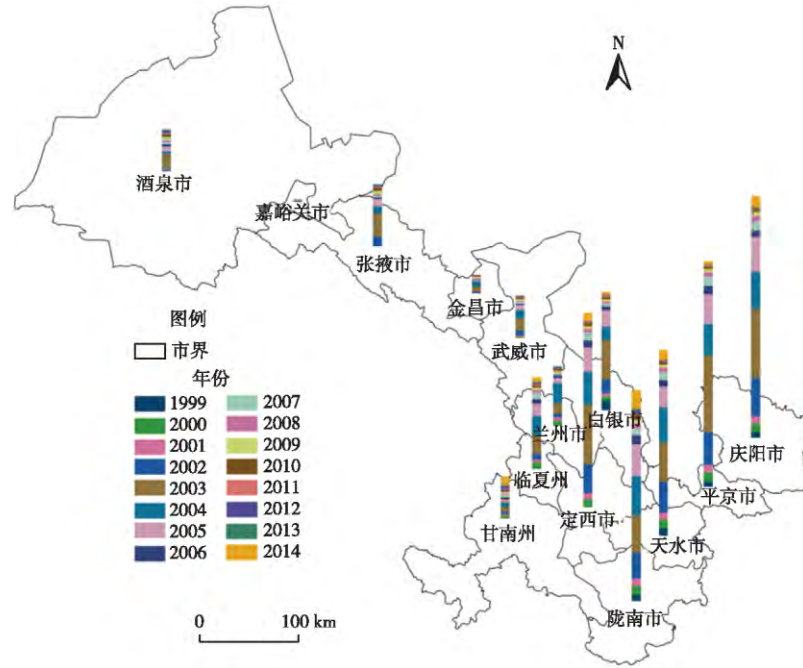


图4 近16 a来甘肃省各市退耕还林面积分布

Fig. 4 Area distribution of "Grain for Green" in cities of Gansu Province in the past 16 years

由图4可知,1999—2014年甘肃省退耕还林面积整体经历了增加(1999—2003)—减少(2003—2013)—增加(2013—2014)的过程,除兰州市和陇南市外,2003年是16 a来甘肃省各市退耕还林最多的一年,全省共退耕还林52.7万 hm^2 ,此外,2002、2004和2005年也是退耕还林面积相对较多的年份,全省造林总面积分别为24.7万、32.2万和25.2万 hm^2 。随着累计退耕还林面积的增加,适宜退耕还林的坡耕地、荒地面积逐渐减少,退耕还林任务也逐年减少,同时各市间逐年退耕还林任务差距也在降低,但由于新一轮退耕还林工程的启动,2014年各市退耕还林面积又有所回升。

空间上来看,甘肃省东南地区是退耕还林的重点区域,16 a累计退耕还林面积占全省退耕还林总面积的89.09%,其中,庆阳市、平凉市、天水市、陇南市和定西市是累计退耕还林面积较多的地区,分别为30.5万、28.5万、23.4万、26.6万和24.5万 hm^2 。甘肃省黄河以西大部分地区自然环境恶劣,土地类型以荒漠为主,退耕还林任务较少。

3.4 植被覆盖度与退耕还林面积的关系

植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,影响植被覆盖变化最主要的气候因素是降水和温度。大量研究^[12,17]也表明,温度主要调节

植被年内生长节律,而降水与植被覆盖度的年际变化有着很好的正相关关系。对于甘肃省而言,尤其是黄河以东地区,研究期间最重要的人为因素是退耕还林工程,该工程的实施对地面植被结构带来了直接影响^[32]。对甘肃省及各市1999—2014年累计退耕还林面积进行统计,分别将黄河以东和以西地区统计结果与对应地区年均植被覆盖度的变化进行拟合,结果见图5(a)~(b)。黄河以东和以西地区累计退耕还林面积与植被覆盖度的关系形成明显对比,相关系数分别为0.7218和0.4101,可见,甘肃省退耕还林工程区累计退耕还林面积与植被覆盖度的相关性远远大于非工程区,说明退耕还林面积能较好地解释植被覆盖度的变化。

截至2014年,甘肃省累计退耕还林面积为196万 hm^2 。退耕还林面积较多的区县为会宁县、环县和静宁县,退耕还林面积分别为7.07万、5.92万和5.62万 hm^2 ;退耕还林面积较少的区县为玛曲县、阿克塞县、肃北县和安宁区,退耕还林面积分别为0、 1.73×10^3 、 2.57×10^3 和 1.47×10^3 hm^2 。除玛曲县外,甘肃省各区县的累计退耕还林面积和植被覆盖度之间均存在明显的正相关关系,相关系数均在0.5以上,说明退耕还林工程的推行对各区县植被覆盖的增加起到了主要作用。

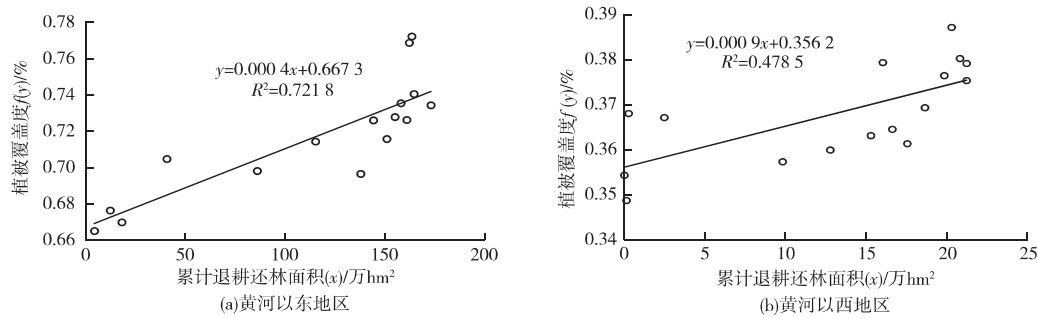


图5 甘肃省植被覆盖度与累计退耕还林面积的关系

Fig. 5 Relationship between fractional vegetation coverage and total area of the farmland transformed into forestland in Gansu

为了进一步验证累计退耕还林面积对植被覆盖度的增加起到了主要作用,选取玛曲县和夏河县进行对比分析。玛曲县从未进行过退耕还林,夏河县从2000年起每年都有造林任务,而且2个县同属甘南州,没有明显的气候差异。用趋势分析算法对玛曲县和夏河县进行逐栅格趋势分析,分别得到2个县近16 a I_{NDV} 变化趋势的空间分布状况,夏河县植被覆盖得到改善的区域面积约占总面积的77.77%,基本不变区域面积约占总面积的15.94%;而玛曲县植被覆盖得到改善的区域面积仅占总面积的13.28%,基本不变区域面积约占总面积的75.49%。由对比结果可知未进行退耕还林的玛曲县植被覆盖基本没有改善,而进行退耕还林的夏河县植被覆盖得到了良好的改善,说明退耕还林对植被覆盖度确有贡献。

4 讨论与结论

围绕植被覆盖度的时空变化,不同学者结合降水与温度数据进行了大量报道,但目前与实际退耕还林面积相结合的报道还不多。易浪等^[9]从1999—2010年间黄土高原总造林情况和森林覆盖率的提高角度来说明黄土高原大范围的退耕还林工程使其生态环境得到极大改善;刘宪峰等^[33]从退耕还林工程实施以来,累计造林面积趋势与 I_{NDV} 变化趋势的一致程度得出生态工程的实施对我国植被覆盖的增加起到了极大的促进作用;朱会利等^[32]从延安市累计退耕还林面积与植被覆盖度的相关性来分析退耕还林对植被覆盖度的影响,相关系数达到0.939,退耕还林工程对延安市各区县植被覆盖的增加起到了主要作用。笔者研究结果也表明,甘肃省退耕还林工程集中区即黄河以东地区年际植被覆盖度与累计退耕还林面积之间也呈较好的相关性,相关系数为0.7218。笔者还分别选取了

有、无退耕还林的2个县进行对比,进一步证明累计退耕还林面积对植被覆盖度的增加起到了主要作用。

利用甘肃省2000—2015年MODIS-NDVI数据,对该省16 a植被覆盖的时空变化特征进行分析,并利用甘肃省退耕还林统计数据探讨人类活动在植被演化中的作用,以期为区域生态环境保护与治理提供科学依据。研究表明:

(1) 从空间分布上来看,甘肃省总体植被覆盖度不高,全省16 a平均植被覆盖度为50.98%,低、中低植被覆盖区面积占总面积的50%以上,且分布不均,其中东南地区平均植被覆盖度最高,为75.43%,中部次之,为47.84%,西北最低,只有31.77%,空间差异显著。

(2) 从时间变化特征上来看,2000—2015年甘肃省年均 I_{NDV} 值呈增加趋势,年增长速率为0.43%,说明甘肃省植被覆盖总体上呈现改善趋势,但从变化趋势上来看,甘肃省植被覆盖呈整体改善、局部恶化的趋势,改善的区域远远大于植被退化区域。其中,明显改善、中度改善和轻微改善区域面积分别占总面积的20.62%、14.67%和33.05%,退化区域面积仅占2.87%。

(3) 退耕还林面积能较好地解释植被覆盖度的变化。对甘肃省1999—2014年累计退耕还林面积进行统计,分别将黄河以东和以西地区统计结果与对应地区年均植被覆盖度进行回归分析,决定系数 R^2 分别为0.7218和0.4101,可见,退耕还林工程区累计退耕还林面积与植被覆盖度的相关性远大于非工程区。选取从未进行过退耕还林的玛曲县,分析1999年以来该县植被覆盖度的改善情况,同时选取从2000年起每年都有造林任务的夏河县作对比,结果显示玛曲县植被覆盖度的改善幅度远小于夏河县。

参考文献:

- [1] CAI Hong-yan ,YANG Xiao-huan ,XU Xin-liang. Human - Induced Grassland Degradation/Restoration in the Central Tibetan Plateau: The Effects of Ecological Protection and Restoration Projects [J]. Ecological Engineering 2015 83: 112-119.
- [2] BEN NETT M T , CHEN Xie , HOGARTH N , et al. China's Conversion of Cropland to Forest Program for Household Delivery of Ecosystem Services: How Important Is a Local Implementation Regime to Survival Rate Outcomes? [J]. Forests ,2014 ,5(9) : 2345-2376.
- [3] BENNETT M T. China's Sloping Land Conversion Program: Institutional Innovation or Business as Usual? [J]. Ecological Economics 2008 65(4) : 699-711.
- [4] PERSSON M ,MOBERG J ,OSTWALD M et al. The Chinese Grain for Green Programme: Assessing the Carbon Sequestered Via Land Reform [J]. Journal of Environmental Management ,2013 ,126: 142-146.
- [5] 李彧挥 孙娟. 从政府与农户的动态博弈分析退耕还林工程的可持续性[J]. 中国人口·资源与环境 2006 ,16(6) : 62-65.
- [6] 孔忠东 徐程扬 杜纪山. 退耕还林工程效益评价研究综述[J]. 西北林学院学报 2007 22(6) : 165-168.
- [7] 范建忠 李登科 董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测[J]. 农业工程学报 2012 28(7) : 228-234.
- [8] 杨子生 韩华丽 朱玉碧 等. 退耕还林工程驱动下的土地利用变化合理性研究: 以云南芒市为例[J]. 自然资源学报 ,2011 ,26(5) : 733-745.
- [9] 易浪 任志远 张翀 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学 2014 36(1) : 166-174.
- [10] TIAN Hai-jing ,CAO Chun-xiang ,CHEN Wei ,et al. Response of Vegetation Activity Dynamic to Climatic Change and Ecological Restoration Programs in Inner Mongolia From 2000 to 2012 [J]. Ecological Engineering 2015 82: 276-289.
- [11] LI Shuang-shuang ,YANG Sai-ni ,LIU Xian-feng ,et al. NDVI - Based Analysis on the Influence of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region ,Central China [J]. Remote Sensing ,2015 ,7(9) : 11163 -11182.
- [12] 信忠保 许炯心 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学) ,2007 ,37(11) : 1504-1514.
- [13] 张宝庆 吴普特 赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报 2011 27(4) : 287-293.
- [14] SUN Wen-yi ,SONG Xiao-yan ,MU Xing-min et al. Spatiotemporal Vegetation Cover Variations Associated With Climate Change and Ecological Restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology 2015 209/210: 87-99.
- [15] 宋富强 康慕谊 杨朋 等. 陕北地区 GIMMS、SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析[J]. 北京林业大学学报 ,2010 32(4) : 72-80.
- [16] HUTE A ,JUSTICE C ,VAN LEEWEM W. Modis Vegetation Index (Modis 13) Algorithm Theoretical Basis Document [M]. New York: NASA Press ,1996: 5-12.
- [17] 穆少杰 李建龙 陈奕兆 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报 2012 67(9) : 1255-1268.
- [18] LI Jing-zhong ,LIU Yong-mei ,CAO Ming-ming et al. Space-Time Characteristics of Vegetation Cover and Distribution: Case of the Henan Province in China [J]. Sustainability ,2015 ,7(9) : 11967-11979.
- [19] 陈效述 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报 2009 64(1) : 84-94.
- [20] 刘宪锋 杨勇 任志远 等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J]. 中国沙漠 2013 33(4) : 1244-1249.
- [21] 赵海迪 刘世梁 董世魁 等. 基于植被覆盖度的藏羚羊栖息地时空变化研究[J]. 生态学报 2014 34(12) : 3285-3292.
- [22] 李钰澈 贾坤 魏香琴 等. 中国北方地区植被覆盖度遥感估算及其变化分析[J]. 国土资源遥感 2015 27(2) : 112-117.
- [23] 宋怡 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠 2007 27(1) : 89-93.
- [24] 马明国 王建 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报 2006 10(3) : 421-431.
- [25] STOW D ,DAESCHNER S ,HOPE A et al. Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index Across the North Slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing 2003 24(5) : 1111-1117.
- [26] 马明国 董立新 王雪梅. 过去 21 a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟[J]. 冰川冻土 2003 25(2) : 232-236.
- [27] 张东海 任志远 王晓峰 等. 基于 MODIS 的陕西黄土高原植被覆盖度变化特征及其驱动分析[J]. 生态与农村环境学报 ,2013 29(1) : 29-35.
- [28] 何慧娟 卓静 王娟 等. 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系[J]. 生态学报 2016 36(2) : 439-447.
- [29] 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.
- [30] 范娜 谢高地 张昌顺 等. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析[J]. 资源科学 2012 34(7) : 1222-1231.
- [31] 李双双 延军平 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报 2012 67(7) : 960-970.
- [32] 朱会利 杨改河 韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析[J]. 农业机械学报 2015 46(8) : 272-280.
- [33] 刘宪锋 朱秀芳 潘耀忠 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报 2015 35(16) : 5331-5342.

作者简介: 胡春艳(1990—),女,陕西延安人,硕士生,主要从事生态遥感方面的研究。E-mail: cdhuchuny@163.com

(责任编辑: 李祥敏)