

2000-2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因

刘宪锋^{1,2}, 潘耀忠^{1,2}, 朱秀芳^{1,2}, 李双双^{1,3}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 利用MODIS-NDVI数据, 辅以趋势分析、Hurst指数及偏相关分析等方法, 本文探讨了2000-2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及未来趋势, 并对其驱动因素进行分析。研究发现: ① 近15年秦巴山区植被覆盖呈显著增加趋势, 增速为2.8%/10a, 其中2010年之前植被覆盖呈持续增加趋势, 增速为4.32%/10a, 而2010年之后呈连续下降态势, 降速为-6.59%/10a; ② 空间上, 植被覆盖格局呈现“中间高、四周低”的分布特征, 高值区主要分布在陕西境内的秦岭山地和大巴山山地; ③ 秦巴山区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占81.32%和18.68%; 然而, 分段结果表明, 2010-2014年有71.61%的区域植被覆盖呈下降趋势; ④ 秦巴山区植被覆盖变化的反向特征强于同向特征, 其中46.89%的区域将由改善转为退化, 而持续改善地区仅占34.44%; ⑤ 植被覆盖变化主要归因于降水的减少, 同时拉尼娜年的植被覆盖整体好于厄尔尼诺年; ⑥ 人类活动对植被覆盖造成双重影响, 是植被覆盖变化的另一重要影响因素。

关键词: 植被覆盖; 时空变化; 归因分析; ENSO; 秦巴山区

DOI: 10.11821/dlxb201505003

1 引言

秦巴山区是中国中部重要的地理生态分界线, 又是南水北调中线水源区、中国最大连片贫困区, 其环境和发展意义特别重大。20世纪以来, 随着全球的人口、资源、环境等诸多问题的出现, 人类的可持续发展面临着极大的挑战^[1]。在气候变化和人类活动的双重效应下, 陆地生态系统受到了前所未有的扰动和威胁。秦巴山区作为气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区, 在全球变化背景下, 其生态系统结构和功能势必会发生变化或破坏^[2-3]。然而, 目前对该区域认识程度很低, 且现有数据过于零星和残缺, 有必要对该区域各个地理要素进行全面调查和科学评价, 提高气候变化对典型陆地生态系统造成影响的认识水平^①。植被作为陆地生态系统的主体, 既是气候变化的承受者, 同时也对气候变化产生反馈作用, 是生态环境监测、生态风险及脆弱性评价的优先指标^[4]。因此, 全面评价秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因研究显得尤为重要和迫切。

收稿日期: 2014-12-21; 修订日期: 2015-02-11

基金项目: 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助 [Foundation: Major Project of High-resolution Earth Observation System]

作者简介: 刘宪锋(1986-), 男, 黑龙江鹤岗人, 博士研究生, 主要从事资源环境遥感、灾害遥感研究。

E-mail: liuxianfeng7987@163.com

通讯作者: 潘耀忠(1965-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境遥感、统计遥感和灾害遥感研究。E-mail: pyz@bnu.edu.cn

① 根据孙鸿烈院士、郑度院士、孙九林院士在“秦巴山地环境与发展暨干旱半干旱区河流断流及其影响研讨会”上讲话整理。

随着全球气候变化课题日益受到学界高度关注,全球气候变化与陆地生态系统的关系研究是当前国际社会十分关注的科学问题^[5-6],其中植被对气候变化的响应无疑成为世界各国学者关注的焦点和核心问题^[7-8]。已有研究指出,气候变化分为趋势变化、波动变化和极端事件三个方面^[9-10]。以往植被覆盖变化归因研究多关注气候变化的趋势和波动特征对植被的影响^[11-12],而关于极端气候事件对植被生长的影响尚缺乏全面的认识。目前,国内外学者针对南美洲亚马逊流域^[13-14]和非洲刚果盆地^[15]等地球关键地区植被对极端气候事件的响应做了较多探索性工作,并取得了有意义的结论。遗憾的是,国内关于极端事件对植被生长影响的研究稍显薄弱,尤其是秦巴山区等气候变化的敏感区和脆弱区。同时,IPCCAR5指出,过去60年(1951-2012)全球平均气温上升 $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.49\sim 0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[9],而中国1960-2009年地表平均气温亦升高了 $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$,远高于全球或北半球同期增温速率^[16],以北方增暖最为明显,由此导致极端气候事件出现的频率和强度呈现出增加趋势^[17-18],加大了陆地生态系统的风险和脆弱性,危及生态安全。另有研究发现,北半球植被与气温的相关性在减弱,并认为其原因可能是由于干旱导致^[19]。由此可见,极端事件不仅对植被生态系统本身造成影响,同时也改变了植被与气候因子的关系。值得注意的是,不同区域地理要素的格局和过程存在显著差异,加强区域的研究有利于全面认识陆地生态系统的演变特征^[1]。在气候变化背景下,植被对极端气候的响应异常敏感,有必要对植被覆盖变化及其与气候的反馈关系进行重新认识和评价。

秦巴山区作为地球关键地带,其地理要素研究尚显薄弱,加之近年来气候变化导致极端气候事件不断增多,研究极端事件与植被覆盖变化的关系,提高植被活动对极端事件响应的认识,有助于综合风险防范与防灾减灾工程的顺利实施。与此同时,随着《国家新一轮退耕还林还草总体方案》的实施,全面认清秦巴山区植被覆盖本底特征及其对气候变化的响应至关重要。基于上述认识,在“格局—过程”思想指导下,利用植被指数数据,辅以趋势分析、残差分析和Hurst指数等方法,本文分析了秦巴山区植被覆盖变化的趋势特征、波动特征及未来趋势,并对其影响因素进行分析。定期评价植被覆盖变化特征,对于了解区域生态环境变化特征,促进区域生态环境与社会经济的协调可持续发展具有举足轻重的作用。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

秦巴山区位于中国中部,整个区域介于 $102^{\circ}54'\sim 112^{\circ}40'\text{E}$ 和 $30^{\circ}50'\sim 34^{\circ}59'\text{N}$ 之间,总面积约 22.23 万 km^2 ,地跨陕西省、甘肃省、四川省、湖北省、河南省及重庆市(图1)^[20]。在地貌上,秦巴山区包括秦岭山地、汉江河谷盆地及大巴山山地3个单元,地势起伏明显。由于秦岭山脉和大巴山对北方冷空气和西南暖湿气流的阻挡和阻隔作用,冬季受蒙古冷高压控制,夏季受西伸太平洋副热带高压和四川盆地热低压控制,造就了冬季寒

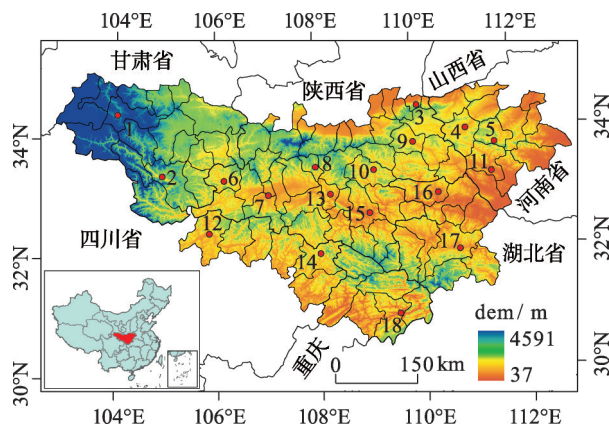


图1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 Study area and the distribution of meteorological stations

冷少雨、夏季多雨并有伏旱、春季干燥、秋季湿润的气候特征^[21]。同时, 由于该区域地处暖温带和北亚热带过渡区, 是中国南北气候、生物区系的交汇地带, 所以植被区系成分复杂多样, 秦岭主体为暖温带落叶阔叶林为优势的植被类型, 秦岭以南为北亚热带常绿阔叶林成分的落叶阔叶林混交植被类型^[22]。

2.2 数据准备

遥感对陆地植被的探测主要是基于植被的光谱反射信息, 特别是在可见光与近红外范围的强吸收与高反射差异^[23]。基于上述特征已发展上百种植被指数, 其中归一化植被指数 (the normalized difference vegetation index, NDVI) 能够有效识别植被变化信息, 是目前使用最为广泛的植被指数之一^[24]。考虑到研究区地形主要为山地的特征, 我们选择了空间分辨率较高的MODIS Q1NDVI数据, 时间跨度为2000-2014年, 来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的EOS/MODIS数据产品 (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>), 空间分辨率为250 m×250 m, 时间分辨率为16 d。由于MODIS/NDVI产品经过水、云、重气溶胶等处理, 保证了数据质量, 加之较高的空间分辨率, 被广泛应用于区域植被覆盖变化研究。首先, 使用MRT (MODIS Reprojection Tools) 将下载的MODIS-NDVI进行格式和投影转换; 然后, 为消除异常值的影响, 采用最大合成法 (MVC) ^[25]合成月NDVI数据。同时, 由于年最大NDVI能够有效反映区域植被覆盖状况, 因此, 文中采用年最大NDVI影像进行植被覆盖时空变化研究。

气象数据为2000-2014年秦巴山区18个气象台站的逐日数据 (包括: 平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、风速及降水量), 来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。同期南方涛动指数 (SOI) 数据取自中国气象局国家气候中心气候变化与预测研究室发布的74项环流指数数据集。

2.3 研究方法

2.3.1 趋势分析 采用非参数化趋势度 (Sen) ^[26]方法来计算秦巴山区NDVI的变化趋势, 并通过Mann-Kendall^[27]统计检验法对变化趋势的显著性进行检验。Sen趋势分析方法的优点是不需要样本服从一定的分布, 并且不受异常值的干扰, 对测量误差或离群数据具有较强的规避能力。公式如下:

$$\beta = \text{mean} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中: β 为植被变化趋势; i 、 j 为时间序数; x_i 、 x_j 分别表示第 i 、 j 时间的NDVI值; 当 $\beta > 0$ 时, 表明植被覆盖呈上升趋势; 当 $\beta < 0$ 时, 表明植被覆盖呈下降趋势。

2.3.2 变异系数和残差分析 变异系数表示了地理数据的相对变化 (波动) 程度, 文中采用变异系数分析植被变化的稳定性^[28], 计算公式如下:

$$C_v = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

式中: C_v 为NDVI变异系数; i 为时间序数; x_i 为第 i 年NDVI; \bar{x} 为2000-2014年NDVI平均值; 当 C_v 值越小, 表明NDVI波动越小; 当 C_v 值越大, 表明NDVI波动越大。

同时, 为验证结果的可靠性, 进一步采用残差分析的方法对植被的波动特征进行分析, 具体操作是: ① 根据回归方程, 计算不同年份NDVI的残差值; ② 对不同年份残差值取绝对值, 生成残差数据序列; ③ 对上述残差数据进行趋势分析, 如果变化趋势接近于0, 说明该区域NDVI变化较小, 反之亦然。

2.3.3 未来趋势分析 基于重标极差 (R/S) 分析方法的Hurst指数是定量描述时间序列信

息长期依赖性的有效方法,它最早是由英国水文学家Hurst提出,其基本原理是^[29]:

给定一时间序列 $\{\zeta(t)\}$, $t = 1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau = 1$, 定义均值序列:

$$\langle \zeta \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \zeta(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (3)$$

累积离差:
$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\zeta(u) - \langle \zeta \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (4)$$

极差:
$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

标准差:
$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\zeta(t) - \langle \zeta \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (6)$$

若存在 $R/S \propto \tau^H$, 则说明时间序列, $t = 1, 2, \dots$ 存在Hurst现象, H 值称为Hurst指数, 其值可在双对数坐标系 $(\ln \tau, \ln R/S)$ 中用最小二乘法拟合得到。Hurst指数主要有3种形式: ① 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明该时间序列是一个持续性序列, 即未来变化趋势与过去趋势一致, 且 H 越接近于1, 持续性越强; ② 当 $H = 0.5$ 时, 表明该时间序列为随机序列, 即未来变化趋势与过去趋势无关; ③ 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明该时间序列具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去趋势相反, 且 H 越接近于0, 反持续性越强。

3 植被覆盖时空变化特征

3.1 时间变化特征

2000-2014年秦巴山区平均植被覆盖呈增加趋势, 增速为 $2.8\%/10 \text{ a}$ ($p < 0.001$)。值得注意的是, 研究区植被覆盖变化趋势在2010年发生逆转, 前期植被覆盖呈持续增加趋势, 增速为 $4.32\%/10 \text{ a}$ ($p < 0.001$), 而后期植被覆盖呈持续下降趋势, 降速为 $-6.59\%/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$), 其中2014年下降最为明显(图2)。这一现象表明, 虽然秦巴山区实施大范围退耕还林还草等生态恢复工程, 但植被覆盖在2010年之后并未出现持续上升的态势, 而是表现为先上升再下降的变化特征, 其原因可能与近年来大范围干旱事件有关。

3.2 空间变化特征

3.2.1 空间分布特征 秦巴山区植被覆盖格局整体呈现“中间高、四周低”的分布特征, 高值区主要分布在陕西境内的秦岭山地和大巴山山地, 因为这些地方主要植被类型为阔叶林、针叶林和灌丛, 植被长势较好; 而低值区则主要分布在甘肃陇南的礼县、西和县、武都县, 天水的武山县和甘谷县, 甘南的舟曲县, 以及汉江河谷盆地的局部地区等地, 以上地区多为耕地区, 植被较为稀疏, 因此NDVI较低, 然而由于近年来退耕还林还草工程的实施, 这些地区植被恢复最快。NDVI频度图显示, 秦巴山区植被覆盖整体较好, NDVI大于0.7的区域占全区的92.48% (图3a)。同时, 随着海拔的升高, 秦巴山区植被覆盖逐渐升高, 其中500~3600 m植被覆盖相对稳定, 并以1200 m左右达到最高

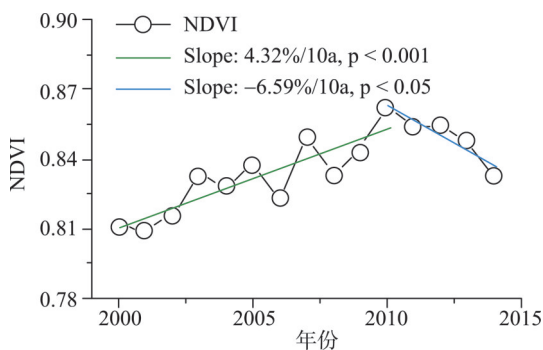


图2 2000-2014年植被覆盖时间变化趋势
Fig. 2 Temporal variation of vegetation coverage during 2000-2014

值, 而3600 m之后植被覆盖急剧下降, 这可能是由于高海拔地区植被分布稀疏且多为草原和灌丛等类型所致(图3b)。

3.2.2 空间趋势特征 为检测秦巴山区植被覆盖变化趋势, 笔者计算了2000-2014年植被NDVI的Sen趋势度, 并进行了M-K检验, 将结果划分为极显著变化($p < 0.01$)、显著变化($p < 0.05$)、弱显著变化($p < 0.1$)和无显著变化四个等级。结果表明, 秦巴山区植被覆盖整体表现为上升趋势, 呈增加和减少趋势的面积分别占81.32%和18.68%。就上升趋势而言, 46.86%的面积为无显著上升, 极显著和显著上升的面积仅占7.18%和16.14%(表1)。从空间分布来看, 极显著增加的区域主要分布在植被覆盖较低的西北地区, 其原因可能是这些地区原有植被覆盖较低, 后因退耕还林还草工程的实施, 使得植被覆盖度显著提升(图4)。进一步计算了2010-2014年的变化趋势, 发现秦巴山区71.61%的区域呈下降趋势, 其中显著和极显著下降区域分别占6.38%和3.45%, 主要分布在甘肃陇南东部、宝鸡西南部、汉中市各县、安康市西南部等地。

3.2.3 空间波动特征 2000-2014年秦巴山区变异系数介于0.004~0.84之间, 说明研究区植被变化存在显著的空间差异特征。具体而言, 低值区主要分布在秦岭和大巴山山地, 该区域植被类型多为阔叶林和针叶林, 变化较为稳定; 高值区主要分布在研究区西北部 and 东部的部分地区, 该区域多为耕地, 在退耕还林还草等生态恢复工程实施下, 变动较为剧烈, 植被覆盖主要表现出增加趋势(图5a)。同时, 计算了研究区植被的残差趋势(图5b), 残差趋势接近于0的区域同样为变异系数的低值区, 由此相互验证, 进一步证

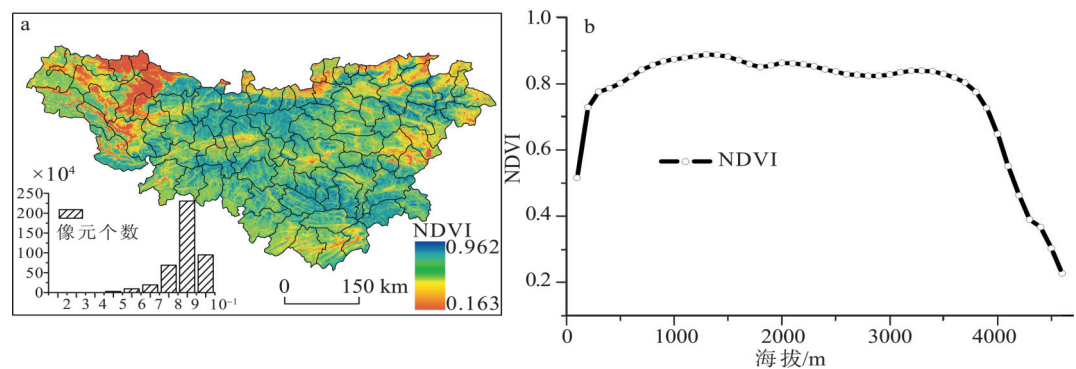


图3 秦巴山区NDVI空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of NDVI in the Qinlign-Daba Mountains

表1 秦巴山区不同植被变化类型像元个数及百分比

变化类型	2000-2014			2010-2014		
	像元个数	百分比/%	累积百分比/%	像元个数	百分比/%	累积百分比/%
无显著下降	795821	18.68	18.68	2 384 471	55.96	55.96
弱显著下降	—	—	—	248 378	5.83	61.78
显著下降	—	—	—	271 746	6.38	68.16
极显著下降	—	—	—	147 003	3.45	71.61
无显著上升	1996785	46.86	65.53	1 099 103	25.79	97.40
弱显著上升	474747	11.14	76.67	46 298	1.09	98.49
显著上升	687832	16.14	92.82	43 585	1.02	99.51
极显著上升	306127	7.18	100.00	20 727	0.49	100.00

明了本研究结果的可靠性。

3.3 未来趋势特征

上述分析主要是对近15年秦巴山区植被“格局—过程”的分析，而关于其未来变化趋势尚不明晰，为此进一步计算了植被NDVI的未来变化特征（图6a）。结果显示，秦巴

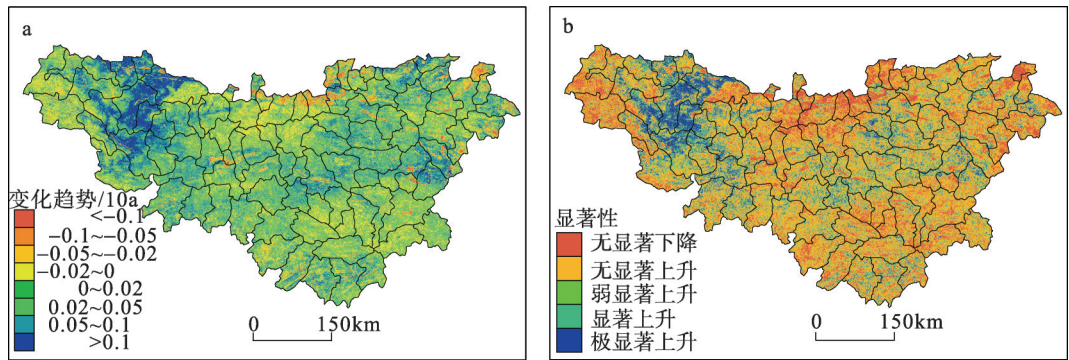


图4 2000-2014年秦巴山区NDVI变化趋势及显著性
Fig. 4 Trend and significance of NDVI in the Qinling-Daba Mountains during 2000-2014

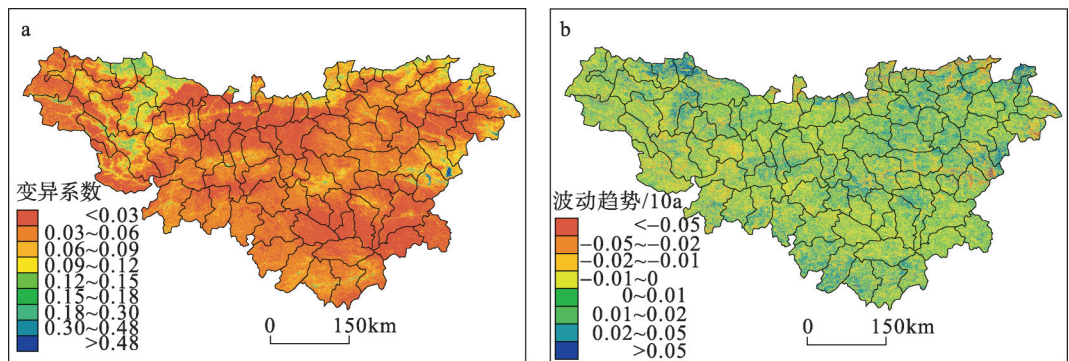


图5 2000-2014年秦巴山区NDVI变化稳定性
Fig. 5 Stability of changes of NDVI in the Qinling-Daba Mountains during 2000-2014

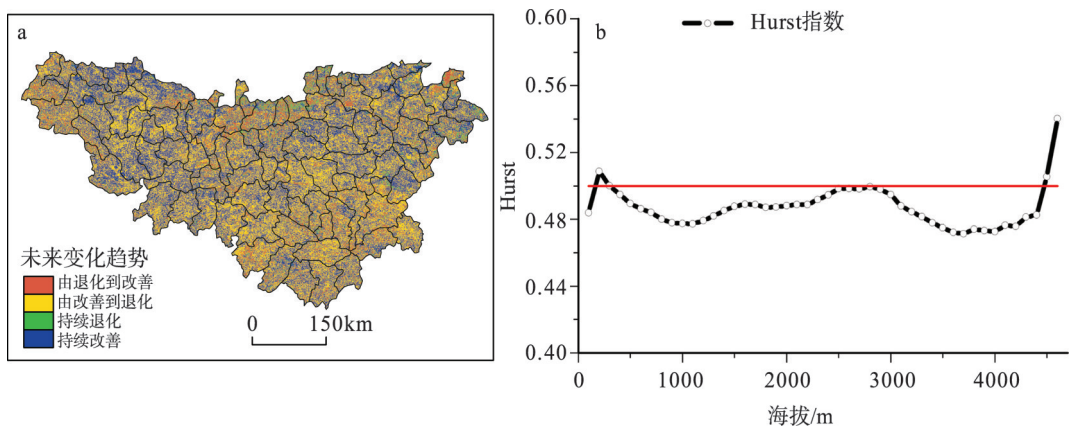


图6 秦巴山区NDVI未来趋势及分异特征
Fig. 6 Future trend of NDVI and its difference with altitude in the Qinling-Daba Mountains

山区植被 NDVI 的 Hurst 指数平均值为 0.4857 (0.0996~0.9837), 其中 Hurst 指数小于 0.5 的像元数占 57.12%, 说明秦巴山区植被变化的反向特征要强于同向特征。统计表明, 研究区 46.89% 的区域将由改善转为退化, 持续退化地区占 8.44%, 而持续改善地区仅占 34.44%。同时, Hurst 指数介于 0.4~0.6 之间的像元数共占 68.15%, 而小于 0.4 和大于 0.6 的像元数分别占 19.36% 和 12.49%, 表明秦巴山区植被呈现强反向特征和强同向特征的区域相对较少。值得注意的是, 秦巴山区 Hurst 指数随海拔波动较小, 4500 m 以下 Hurst 指数以低于 0.5 为主, 而 4500 m 以上的区域 Hurst 指数显著升高, 说明 4500 m 以下区域植被主要以反向变化特征为主 (图 6b)。

4 植被覆盖变化的归因

4.1 植被覆盖对气候变化的响应

全球气候变化导致区域气温和降水格局发生变化, 进而对植被活动造成显著影响。统计结果显示, 2000-2013 年秦巴山区气温和降水均呈微弱增加趋势, 增速分别为 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p=0.56$) 和 $32.06\text{ mm}/10\text{ a}$ ($p=0.66$)。逐站点分析显示, 陕西略阳站 (站号 6)、汉中站 (站号 7) 和四川广元站 (站号 12) 降水均呈极显著增加趋势, 而重庆奉节站 (站号 18) 则呈极显著减少趋势, 同时该站气温呈极显著增加趋势, 两者共同作用加剧了该区域的水分亏缺状况 (图 7)。

在植被变化与气候因子关系分析中, 为保证数据的准确性及研究结果的可信度, 本文选择站点尺度分析植被生长对气候变化的响应。具体操作步骤为: ① 根据研究区气象站点位置, 利用 ArcGIS 提取各个气象站点周边 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 植被 NDVI 平均值, 作为该站点的 NDVI 值; ② 对 2000-2013 年 NDVI、气温和降水数据进行去除趋势处理, 然后分别计算 NDVI 与气温和降水的偏相关系数。结果表明, NDVI 与气温的相关性为 -0.012 ($-0.448\sim 0.228$); 而 NDVI 与降水的偏相关系数为 0.612 ($-0.110\sim 0.695$), 通过了显著水平 0.05 的检验, 同时站点 1 和 10 也达到了显著相关。上述分析表明, 秦巴山区 NDVI 与降水偏相关系数大于与气温偏相关系数, 说明秦巴山区植被生长受降水影响要强于气温。

由于降水是秦巴山区植被生长的主要限制因素, 进一步分析秦巴山区降水变化特征。考虑到研究区植被覆盖从 2010 年开始呈连续下降态势, 重点分析了 2010 年之后降水与植被变化特征。图 8a 显示研究区中东部地区降水量呈显著下降趋势, 增加地区仅分布在西部少数地区。同时, 秦巴山区 2000-2013 年连续无雨日数 (CCD) 同样呈极显著上升趋势 (1.15 d/a), 且站点 3、5、7、10、13、17 均达到显著上升水平, 其中 2010-2013 年 CCD 增速为 3.38 d/a , 进一步佐证了秦巴山区干旱事件在增加的事实。对比图 8b 可以看出, 同期研究区大部分地区植被呈现下降趋势, 表明植被活动因受到水分限制而降低。已有研究指出, 干旱导致植被生长受到限制, 进而导致植被生产力下降, 从而削弱森林固碳能力^[19]。同时, 在干旱环境下植被水分利用率会有所提高^[30], 然而笔者发现近

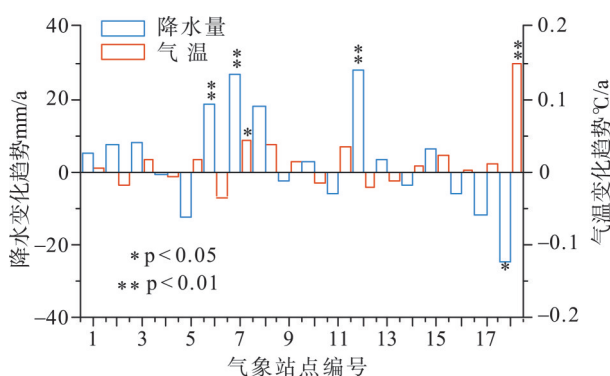


图7 2000-2013年秦巴山区气温和降水变化趋势
Fig. 7 Trend of temperature and precipitation in the Qinling-Daba Mountains during 2000-2013

15年秦巴山区水分利用率尚未出现明显变化,而是呈现平稳波动趋势。

全球尺度的气候振荡导致极端气候事件的发生,进而对陆地生态系统造成严重影响。研究发现,ENSO事件与植被变化具有较好的相关性,相关系数达0.49 ($p < 0.05$),说明ENSO事件对植被生长存在重要影响(图9a),与Thomas Hilker等人研究结果一致^[14]。为具体阐明ENSO对植被活动的影响,根据国家气候中心最新发布的厄尔尼诺和拉尼娜事件统计表,选取了厄尔尼诺峰值年(2002、2006、2009年)和拉尼娜峰值年(2007、2010年);然后将厄尔尼诺和拉尼娜典型年份的NDVI分别求取平均值。结果显示,拉尼娜年的植被覆盖整体好于厄尔尼诺年(图9b),定量统计表明,厄尔尼诺年植被NDVI正距平像元仅占28.37%,而负距平像元占71.63%;相反,拉尼娜年植被NDVI正距平像元数占80.48%,而负距平百分比仅占19.52%,进一步验证ENSO事件对植被生长具有重要影响。为解释上述现象,我们分析了秦巴山区降水变化特征,发现拉尼娜年该区域降水偏多,有利于植被生长;而厄尔尼诺年降水偏少,尤其是夏季降水亏缺明显,抑制了植被的生长^[31]。综上表明,全球尺度的气候波动对区域植被变化具有重要影响,如果未来干旱等极端事件的强度和频率继续增加,植被生长将会面临更大的风险和胁迫。

4.2 人类活动对植被覆盖的影响

气候变化是秦巴山区植被覆盖变化的重要影响因素,但是人类活动也是不可忽略的驱动因素。人类活动对植被的影响分为正面效应(如退耕还林还草等生态工程)和负面效应(如城市扩展、人为森林破坏等)。本文将从两个方面进行分析:一方面,笔者首先

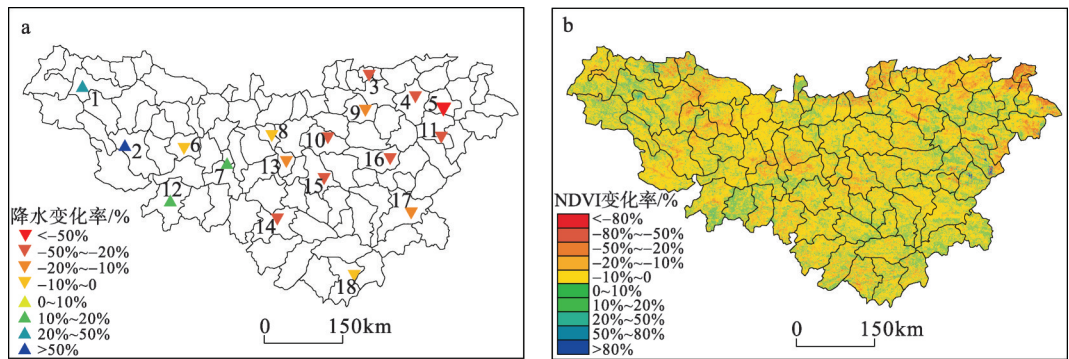


图8 2010-2014年秦巴山区降水异常(a)与NDVI变化率(b)

Fig. 8 Precipitation deficit (a) and change rate of NDVI (b) in the Qinling-Daba Mountains during 2010-2014

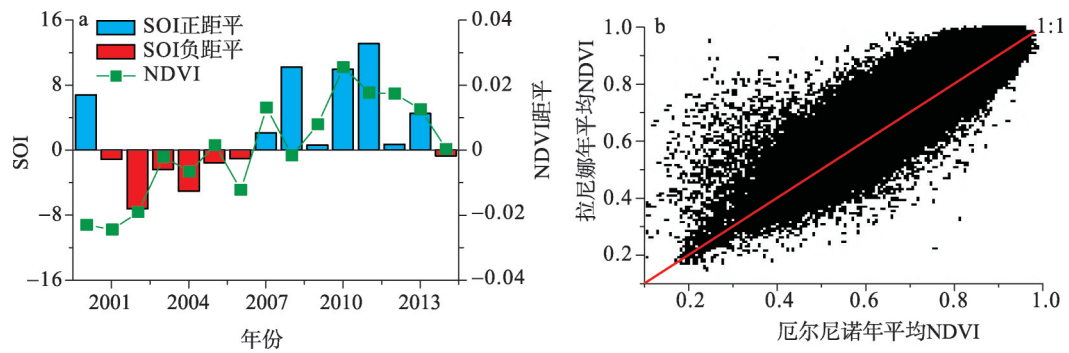


图9 NDVI与ENSO事件的关系

Fig. 9 Correlation between NDVI and ENSO

从《中国林业统计年鉴》统计秦巴山区96个县区的逐年造林面积(图10a), 结果显示2002-2004年造林面积最多, 同期NDVI迅速增加, 并且随着退耕还林还草工程等生态工程的不断推进, 秦巴山区植被覆盖呈现逐渐上升的趋势, 说明生态工程的实施有效改善了区域生态环境。值得注意的是, 在生态恢复背景下, 2010-2014年植被呈现连续下降趋势, 其原因可能更多的归因于气候因素的变异, 如干旱胁迫。另一方面, 城市扩展将导致城市周边植被遭到破坏, 导致植被覆盖下降。在此, 以汉中市为例进行说明, 首先计算了2010-2014年植被覆盖变化率; 然后, 以城市驻地为圆心, 生成10个2 km间隔的缓冲圈, 用以定量分析城市扩展对植被的影响; 最后统计不同环内植被覆盖变化率。结果显示(图10b), 城市周边地区植被覆盖均表现出下降趋势, 说明城市扩张是导致植被覆盖下降的另一驱动因素。值得注意的是, 尽管城市扩展范围有限, 但是城市扩展及其带来的影响对植被的破坏远大于其直接占用造成的影响。

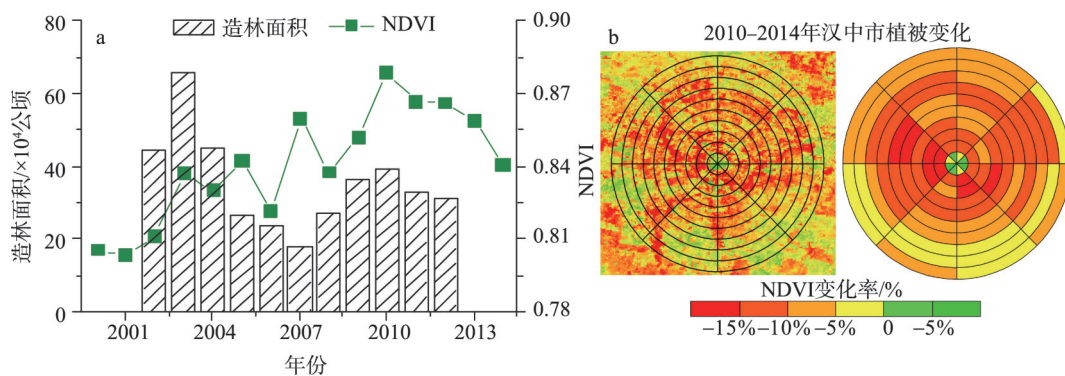


图10 人类活动对植被覆盖的影响

Fig. 10 Influence of human activities on vegetation coverage

5 结论与讨论

5.1 结论

利用MODIS-NDVI数据, 辅以趋势分析、Hurst指数及偏相关分析方法, 分析了秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其驱动因素。本文主要得出以下结论:

(1) 2000-2014年秦巴山区植被覆盖呈显著增加趋势, 增速为 $2.8\%/10\text{ a}$, 其中2010年之前植被覆盖呈持续增加趋势, 增速为 $4.32\%/10\text{ a}$, 而2010年之后则表现为连续下降的态势, 降速达 $-6.59\%/10\text{ a}$ 。

(2) 空间上, 植被覆盖格局呈现“中间高、四周低”的分布特征, 高值区主要分布在陕西境内的秦岭山地和大巴山山地, 并且随海拔的升高, 植被覆盖逐渐变好, 直至3600 m之后NDVI值急剧下降。

(3) 秦巴山区植被覆盖整体表现为上升趋势, 呈增加和减少趋势的面积分别占81.32%和18.68%, 极显著增加区域主要分布在植被覆盖较低的西北地区; 而2010-2014年71.61%的区域植被呈下降趋势。

(4) Hurst分析表明, 秦巴山区植被变化的反向特征强于同向特征, 其中46.89%的区域将由改善转为退化, 而持续改善地区仅占34.44%。同时, Hurst指数随海拔波动较小, 4500 m以下以低于0.5为主。

(5) 降水是秦巴山区植被生长的主要影响因素, 近年来降水偏少导致植被覆盖呈下降趋势。同时, 发现 ENSO 与植被变化趋势具有较好的相关性, 并且拉尼娜年的植被覆盖整体好于厄尔尼诺年。

(6) 人类活动对植被造成了双重影响, 一方面退耕还林还草等生态工程有效改善了区域生态环境, 使植被覆盖增加; 另一方面, 随着城市化的推进, 城市扩张对城市周边植被覆盖造成一定的负面影响。

5.2 讨论

目前, 极端事件对植被造成的影响受到了国内外学者的广泛关注与研究^[14-15, 32]。在众多影响因素中, 干旱由于发生范围大、持续时间长, 成为抑制植被生长最为重要的胁迫因子。笔者针对典型年份分析了极端事件对植被可能造成的影响, 并探讨了 ENSO 与植被变化的相关性。然而, 不同季节植被对于干旱的响应可能存在差异, 在冬季和春季由于气温偏低, 气温可能是影响植被生长的主要限制因子, 而夏季和秋季由于温度适宜, 降水将成为植被生长的主要限制因子, 因此, 不同季节植被对极端气候的响应值得进一步关注与研究。同时, 如何分离气候变化与人类活动对植被覆盖变化的影响依然是急需解决的科学问题, 值得进一步研究新方法、新理论取得突破。

另一方面, 本文仅仅关注了气候对植被的影响, 而植被变化对局地气候的反馈及机制也是植被与气候关系研究的重要内容。同时, 在极端气候条件下, 植被对气候变化的敏感性仍需进一步探索和分析^[14, 19]。在数据源上, 研究中仅使用了目前分辨率最高的 MODIS-NDVI 数据, 并未使用多源 NDVI 数据集进行相互验证工作。应指出的是, 不同 NDVI 数据集, 由于存在分辨率和影像质量的差异, 其对植被覆盖变化的评估结果可能存在差异, 今后将进一步分析不同 NDVI 数据集在植被覆盖变化评估中的一致性及不确定性, 以得到更为可靠的结论。

参考文献(References)

- [1] Fu Bojie. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059. [傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [2] Walther G R, Post E, Convey P et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 2002, 416: 389-395.
- [3] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 637-669.
- [4] Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 897-908. [刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 897-908.]
- [5] WaKer B, Steffen W. IGBP Science No.1: A Synthesis of GCTE and Related Research. Stockholm: IGBP, 1997: 1-24.
- [6] Shi Peijun, Kong Feng, Fang Jiayi. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1281-1290. [史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局. *地理科学*, 2014, 34(11): 1281-1290.]
- [7] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560-1563.
- [8] Ma Zhihai, Peng Changhui, Zhu Qiuan, et al. Regional drought-reduced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(7): 2423-2427.
- [9] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2013 Fifth Assessment Report (AR5). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010). *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(10): 2294-2306. [史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010). *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2294-2306.]
- [11] Zhang Xuezhen, Dai Junhu, Ge Quansheng. Variation in vegetation greenness in spring across eastern China during

- 1982-2006. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 45-56.
- [12] Ding Mingjun, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(3): 259-268.
- [13] Lewis S L, Brando P M, Phillips O L, et al. The 2010 Amazon drought. *Science*, 2011, 331(6071): 554.
- [14] Thomas Hilker, Alexei I Lyapustin, Compton J Tucker, et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(45): 16041-16046.
- [15] Zhou Liming, Tian Yuhong, Myneni Range B, et al. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 2014, 509(7498): 86-90.
- [16] National Assessment Report on Climate Compiling Committee. Second National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 2011. [《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [17] Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. The spatial-temporal changes of cold surge in Inner Mongolia during recent 53 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 1013-1024. [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 近 53 年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素. *地理学报*, 2014, 69(7): 1013-1024.]
- [18] Markus Reichstein, Michael Bahn, Philippe Ciais, et al. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500: 287-295.
- [19] Piao Shilong, Nan Huijuan, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, doi: 10.1038/ncomms6018.
- [20] BAI Hongying. The Response of Vegetation to Environmental Change in Qinba Mountains. Beijing: Science Press, 2014. [白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [21] Liu Yinhan. Research on land category. *Geography Central*, 1983, 1: 47-56. [刘胤汉. 关于土地类型划分的研究. *中原地理研究*, 1983, 1: 47-56.]
- [22] Ren Zhiyuan, Li Jing. The valuation of ecological services from the vegetation ecosystems in the Qinling-Daba Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 503-511. [任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评. *地理学报*, 2003, 58(4): 503-511.]
- [23] Jiang Zhangyan, Huete Alfredo R, Didan Kamel, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3833-3845.
- [24] Barati Susan, Rayegani Behzad, Saati Mehdi, et al. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2011, 14(1): 49-56.
- [25] Holben N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [26] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [27] Kendall M G. Rank Correlation Methods. 1948.
- [28] Xu Jianhua. Mathematical Method in Modern Geography. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 37-41. [徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 37-41.]
- [29] John R, Chen Jiquan, Lu Nan, et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi- arid region of Inner Mongolia. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2018-2032.
- [30] Josep Peñuelas, Josep G Canadell, Romà Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20: 597-608.
- [31] Babst, Flurin, Poulter Benjamin, Trouet Valerie, et al. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22: 706-717.
- [32] Zhao Zhiping, Wu Xiaopu, Li Guo, et al. Drought in southwestern China and its impact on the net primary productivity of vegetation from 2009-2011. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 1-16. [赵志平, 吴晓普, 李果, 等. 2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响. *生态学报*, 2015, 35(2): 1-16.]

Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors

LIU Xianfeng^{1,2}, PAN Yaozhong^{1,2}, ZHU Xiufang^{1,2}, LI Shuangshuang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Qinling- Daba (Qinba) Mountains, a key ecological zone of terrestrial ecosystem, has experienced a significant change of vegetation coverage in recent years, which is characterized by rapid climate change. Using MODIS- NDVI dataset, the current study investigated the patterns of spatiotemporal variation of vegetation coverage in the Qinba Mountains during the period 2000-2014. In addition, possible environmental factors affecting this variation were identified. Sen+Mann-Kendall model and partial correlation analysis were used to analyze the data, followed by the calculation of Hurst index in order to analyze future trends of vegetation coverage. The results of the study showed that (1) the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the study area revealed a significant increase during 2000- 2014 (linear tendency 2.8%/10a). During this period, a stable increase was detected before 2010 (linear tendency 4.32%/10a), followed by a sharp decline after 2010 (linear tendency - 6.59%/10a). (2) In terms of spatiotemporal variation, vegetation cover showed a "high in the middle and low in surroundings" pattern. High values of vegetation coverage were mainly found in the Qinba Mountains of Shaanxi Province, while low values of vegetation coverage were mainly observed in Longnan, Tianshui, and Gannan prefectures occupied by arable land. (3) The area covered with vegetation was larger than the degraded area, accounting for 81.32% and 18.68% of the total area, respectively. Piecewise analysis revealed that 71.61% of the total study area showed a decreasing trend in vegetation coverage during 2010-2014, of which, the extremely significant and significant decrease accounted for 6.38% and 3.45%, respectively. (4) The reverse characteristics of vegetation coverage change were stronger than the same characteristic in the Qinba Mountains. Some 46.89% of the entire study area is predicted to decrease in future, while 34.44% of the total area will follow a continuous increasing trend. (5) The change of vegetation coverage was mainly attributed to the deficit of precipitation. At the same time, vegetation coverage during La Nina years was larger than that during El Nino years. Statistical analysis showed that positive and negative anomaly pixels accounted for 28.37% and 71.63%, respectively during El Nino years and 80.48% and 19.52%, respectively during La Nina years. (6) Human activities can induce ambiguous effects on vegetation coverage: both positive effect (through the implementation of the ecological restoration project) and negative effect (through urbanization) were observed.

Keywords: vegetation coverage; spatiotemporal variation; attribution analysis; ENSO; Qinling-Daba (Qinba) Mountains