

文章编号: 1008-2786-(2017)6-778-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000278

秦岭山地植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应

王 涛, 白红英^{1*}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054;

3. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 秦岭山地是中国中东部重要的地理界线和山地生态系统最为丰富的区域之一, 对气候变化和人类活动的影响较为敏感。基于秦岭山地 MODIS NDVI、气温、降水和 DEM 数据, 利用线性趋势法、相关系数、偏相关系数和缓冲区方法, 分析了植被 NDVI 对气候变化与人类活动的响应, 结果表明: (1) 2000—2015 年秦岭山地植被 NDVI 总体呈线性增加趋势, 占总面积的 84.84%。减少趋势主要分布在中西部区域(中、高海拔地区)以及河谷地、盆地, 如汉中市、安康市和商洛市等城市附近区域。(2) 2000—2014 年秦岭山地植被 NDVI 与气温之间以负相关为主, 与降水之间以正相关为主, 同时气温、降水对植被 NDVI 的影响具有交叉作用, 其中降水的交叉作用(10.05%)高于气温的作用(9.64%)。(3) 市级较县级范围人类活动强烈, 植被 NDVI 在 1 km 范围变化速率为正(植被增加)、2~5 km 范围变化速率为负(植被恶化, 可能遭受人为破坏)、6~10 km 范围变化速率为正(人类活动相对较弱)、11~15 km 范围变化趋于平稳(基本不受人类活动影响)。该研究可为秦岭山地植被生态环境保护和人类活动调整与限制提供科学依据。

关键词: 气温; 降水; NDVI; 缓冲区分析; 秦岭山地

中图分类号: Q948

文献标志码: A

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)2013 年第五次评估报告认为高纬度地区和高海拔地区是对气候变化响应最为敏感的区域, 也是未来生态环境发生较大变化的潜在区域^[1-3]。秦岭山地是中国中东部重要的地理界线和山地生态系统最为丰富的区域之一, 受气候变暖影响, 秦岭山地生态系统正经历着复杂的变化过程, 科学认识这一过程, 对于秦岭山地生态系统保护政策的科学制定具有重要意义。

植被动态变化监测及其对气候因子和人类活动的响应一直是学者关注的热点问题^[4-5], 该内容包

括 3 个方面。(1) 植被动态变化监测。由于当前用于植被动态监测的数据具有不同的时间、空间分辨率特征, 在研究不同区域、不同时间范围, 甚至不同数据研究同一区域方面, 研究结果会存在较大的差异^[6-8]。如低分辨率的 GIMMS NDVI^[9-11]、SPOT NDVI^[12-14]多应用于洲际、国家和区域、省域尺度上植被变化及其气候响应研究, 这两类 NDVI 在描述全球、半球及洲际尺度上具有优势, 但在刻画区域、省域尺度上存在精度不足的问题。中高分辨率的 MODIS NDVI^[15-17]、Landsat NDVI^[18-19]在区域、省域尺度上具有较强的优势, 但 Landsat NDVI 由于时间连续性较差, 在植被变化监测方面应用较少, 多应用于中高分辨率 NDVI 数据计算结果的验证。秦岭

收稿日期(Received date): 2016-09-14; **改回日期**(Accepted date): 2017-02-02

基金项目(Foundation item): 国家林业公益性行业科研专项(201304309); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1616) [National Forestry Public Welfare Industry Scientific Research Project (201304309); Open Foundation of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau (A314021402-1616)]

作者简介(Biography): 王涛(1984-), 男, 河南汤阴人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 区域环境变化 [Wang Tao (1984-), male, born in Tangyin, Henan province, Ph. D., Lecturer, research on regional environment change.] E-mail: wht432@163.com

* **通信作者**(Corresponding author): 白红英(1962-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 全球变化生态学 [Bai Hongying (1962-), female, Ph. D., professor, specialized in global change ecology.] E-mail: hongyingbai@163.com

山地植被垂直地带性明显,植被类型丰富,宋富强等^[20]对比认为 MODIS NDVI 更适合于植被类型丰富的地表。(2)植被对气候因子的响应。多使用相关系数方法对植被与气温、降水的双变量关系进行判别^[21-23],而对用于多变量相关关系判别的偏相关系数使用相对较少。由于植被生长过程受到气温、降水的双重作用,故偏相关系数用于判别气温、降水的交叉作用具有优势。(3)植被对人类活动的响应研究。该类研究日渐增多^[24-25],如 Li 等^[26]认为植被对以城市扩张为主的人类活动表现出先降低后升高的变化过程。但还未出现较为统一的研究方法,任何方法均值得进行尝试。

秦岭山地地形复杂、植被类型多样,植被与气温、降水的关系存在一定的空间差异,并且作为南水北调中线工程的水源地,该区域的城市建设与发展受到较大的限制,当前的经济发展水平不高,探讨秦岭山地植被 NDVI 对气候与人类活动的响应过程,可为秦岭山地区域植被生态保护和人类活动调整与限制提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区

秦岭是中国中东部重要的山系,是黄河水系和长江水系的分水岭,也是暖温带和亚热带的分界线。秦岭山地有广义和狭义之分,广义秦岭涉及甘肃省、陕西省、河南省、四川省、湖北省及重庆市部分区域,狭义秦岭仅指陕西省境内的秦岭腹地区域。本文主要分析狭义秦岭山地区域(图1),位于 105°30' ~

111°05' E 和 31°55' ~ 34°35' N 之间,总面积约 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。秦岭山地南北气候差异较大,由北而南气候逐渐由暖温带大陆性季风气候过渡到亚热带季风气候,最冷月平均气温也由 0 °C 以下升高至 0 °C 以上,年降水量从 500 mm 升高至 1000 mm 以上。秦岭山地植被垂直地带性显著,由山麓到主峰太白山拔仙台(海拔 3771.2 m),依次为农耕植被(或常绿阔叶林)、山地落叶阔叶林、山地针叶林、高山灌丛、高山草甸^[27]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

数据来源及预处理过程包括:(1)2000—2015 年 MODIS 13Q1 - Level 3 NDVI 产品,时、空分辨率分别为 16 d 和 250 m,下载自 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>。利用 MRT (Modis Reprojection Tool) 对 MODIS NDVI 影像进行解码、拼接、重投影、格式转换等处理,并利用边界提取 2000—2015 年秦岭山地时间序列 NDVI 影像。(2)气象站点空间分布见图1,共计 31 个站点 2000—2014 年逐年年降水量和年平均气温数据,收集自中国气象数据网(<http://www.data.cma.cn>),陕西省和西安市统计年鉴。利用 IDW (Inverse Distance Weighted) 空间插值方法获取秦岭山地 2000 ~ 2014 年年平均气温和年降水量的空间分布数据。(3)30 m 分辨率 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(<http://www.gscloud.cn>)。

1.2.2 数据处理

(1) 植被生长季确定

基于 2000—2015 年 16 d MODIS NDVI 影像,计

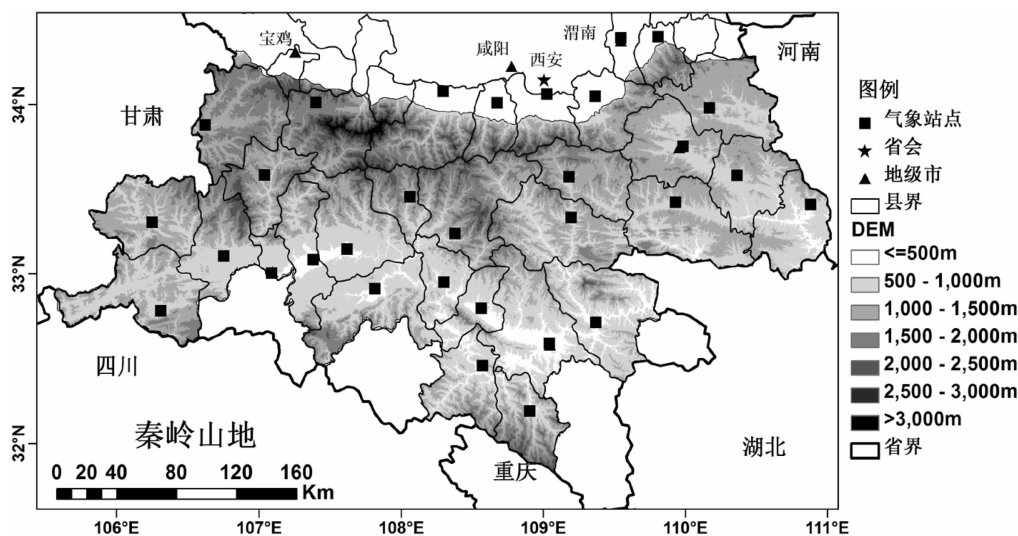


图1 研究区及气象站点分布

Fig.1 Study area and distribution of weather stations

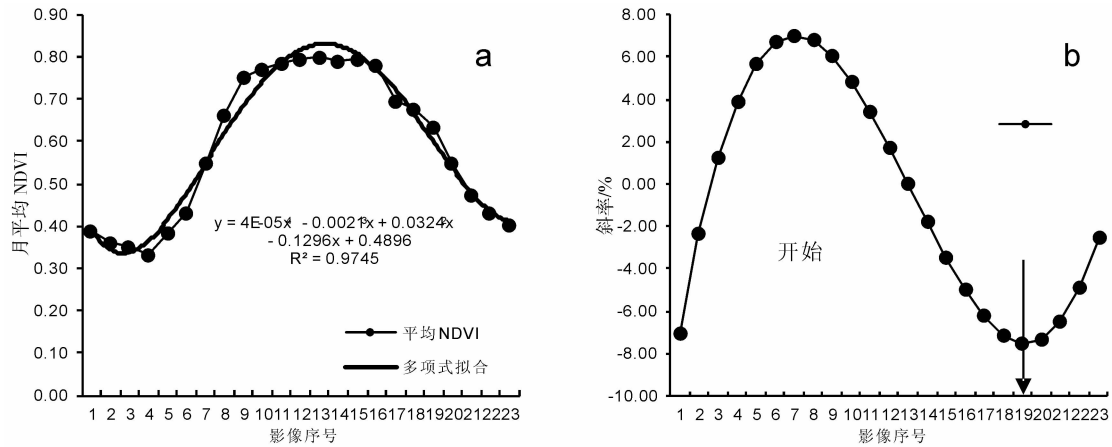


图2 2000—2015年同期影像NDVI平均值变化拟合(a)及变化斜率(b)

Fig. 2 Fitted curves of (a) average NDVI and (b) slope of images of the same period from 2000 to 2015

算多年同期植被NDVI平均值,得到2000—2015年同期植被NDVI平均值变化曲线(图2a)及其斜率曲线(图2b)。由图2a可知,秦岭山地2000—2015年同期影像多年NDVI平均值变化过程符合4次多项式拟合结果($R^2 = 0.9745$),对多项式求一阶导数可以获得多项式拟合曲线的斜率(图2b),斜率变化的两个转折点,即为植被生长季开始和结束的位置,故可知秦岭山地植被生长季开始于4月上旬(第7期影像,NDVI平均值为0.5509),结束于10月中旬(第19期影像,NDVI平均值为0.6356)。由此可知,秦岭山地植被生长季范围为4月上旬~10月中旬,即第7~19期影像,包括13期影像。

植被生长季范围确定之后,可利用MVC(Maximum Value Composition)方法,获取4月~10月逐月植被NDVI最大值,而后求取植被生长季NDVI平均值,作为年值。

(2) 气象数据插值过程

气象数据包括气温和降水数据,降水空间分布直接利用IDW方法空间插值获取,气温空间分布生成过程借助以下公式:

$$T = T_0 - \alpha \times E \quad (1)$$

式中, T 为最终获取的气温; T_0 表示海拔0 m处气温; α 表示气温垂直递减率; E 为实际海拔。计算过程概括为3个步骤:首先,利用2000—2014年气象站点多年平均气温和高程相关关系(图3),得到秦岭山地气温垂直递减率 $\alpha = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$;其次,选择5个分布较为均匀的气象站点作为交叉验证数据,不参与计算过程;借助 α 将其它站点气温修正到0 m处,并利用IDW进行空间插值,获取 T_0 值;第三,基于DEM和 α ,计算得到公式(1)中($\alpha \times E$),

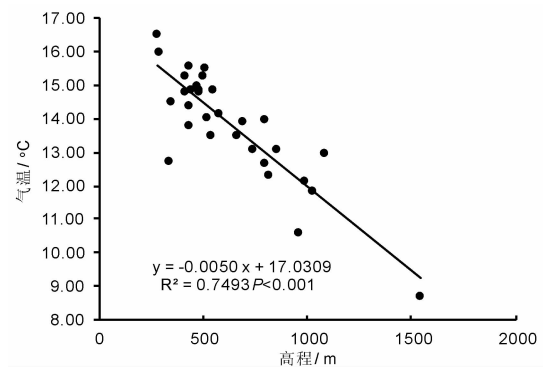


图3 气温与高程的相关关系

Fig. 3 Correlation between temperature and elevation

最终获取 T 值的空间分布;第四,将计算得到的5个交叉验证站点气温值与实测值比较,最大误差为15.37%,最小误差为0.17%,平均误差为8.09%,能够满足精度要求;最后,利用所有气象站点气温数据,结合公式(1)获取2000—2014年秦岭山地气温空间分布数据。

1.3 研究方法

1.3.1 一元线性回归模型及其显著性检验

一元线性回归模型用于分析秦岭山地植被NDVI时间和空间序列变化过程及未来可能的变化方向,反映研究时段内线性变化趋势及其空间分布,计算公式如下^[28]:

$$Y = aX + b \quad (2)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (3)$$

$$b = \bar{y} - a \bar{x} \quad (4)$$

式中, Y 为2000—2015年研究区植被NDVI值或

NDVI 影像; X 为 2000—2015 年年份; a 为系数; b 为常数; \bar{x} 和 \bar{y} 为 X 和 Y 的平均值。 a 值的正与负反映植被 NDVI 的线性增加与减少。

一元线性回归模型显著性采用 F 检验, 计算公式如下:

$$F = U/[Q/(n-2)] \quad (5)$$

式中 $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, $U = b^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2$, \hat{y} 为利用 a 、 b 和 x 计算得到的 y 的拟合值, 其它参数同前。查询 F 检验临界值表, 当 $\alpha = 0.05$, 临界值为 4.60, 即 $|F| > 4.60$ 时, 显著, 反之, 则不显著。

1.3.2 相关系数和偏相关系数

相关系数主要用于分析两个独立变量间的相关关系, 计算公式为^[28]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, x 、 y 分别为 2000—2014 年 NDVI 和气温或降水。 r 值在 $[-1, 1]$ 之间, $r = 0$ 表示两变量不相关; r 值越趋近于 -1 表示负相关关系越强, 反之则正相关关系越强。查询相关系数临界值表, 当 $\alpha = 0.05$, 临界值为 0.5139, 即相关系数 $|r| > 0.5139$ 时, 显著, 反之, 则不显著。

由于植被 NDVI 受气温、降水的共同作用影响, 故使用偏相关系数分析气温、降水共同作用下, 二者分别与植被 NDVI 的偏相关关系。假设植被 NDVI 与气温、植被 NDVI 与降水、以及气温与降水的相关系数分别用 r_{12} 、 r_{13} 和 r_{23} 表示, 则植被 NDVI 与气温、植被 NDVI 与降水的偏相关系数计算公式如下^[28]:

$$r_{12 \cdot 3} = \frac{r_{12} - r_{13} \times r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (7)$$

$$r_{13 \cdot 2} = \frac{r_{13} - r_{12} \times r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (8)$$

式中, $r_{12 \cdot 3}$ 、 $r_{13 \cdot 2}$ 分别表示植被 NDVI 与气温、植被 NDVI 与降水的偏相关系数。偏相关系数的显著性检验采用 t 检验, 计算公式为:

$$t_{12 \cdot 3} = \frac{r_{12 \cdot 3}}{\sqrt{1 - r_{12 \cdot 3}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (9)$$

$$t_{13 \cdot 2} = \frac{r_{13 \cdot 2}}{\sqrt{1 - r_{13 \cdot 2}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (10)$$

式中, $r_{12 \cdot 3}$ 、 $r_{13 \cdot 2}$ 同前; n 为样本数, 文中为 15; m 为自变量个数, 文中为 2。查 t 分布表, 当 $\alpha = 0.05$, 临界值为 2.1790, 即偏相关系数 $|t| > 2.1790$, 显著,

反之则不显著。

2 结果分析

2.1 植被 NDVI 时空变化趋势分析

2.1.1 植被 NDVI 时间变化趋势分析

图 4 反映了 2000—2015 年秦岭山地植被 NDVI 变化趋势、3 年滑动平均及线性拟合结果。研究时段内秦岭山地植被 NDVI 值介于 0.7106 ~ 0.7986 之间, 总体植被状况较好。3 年滑动平均曲线表明, 植被 NDVI 变化呈波动的上升过程, 主要经历了 2000—2004 年和 2007—2013 年的上升阶段, 以及 2004—2007 年和 2013—2015 年的下降阶段。秦岭山地植被 NDVI 总体呈线性的增加趋势, 线性递增率为 0.0029/a ($P < 0.05$), 通过 0.05 显著性水平检验, 表明未来一段时间总体植被 NDVI 仍将保持线性递增趋势。

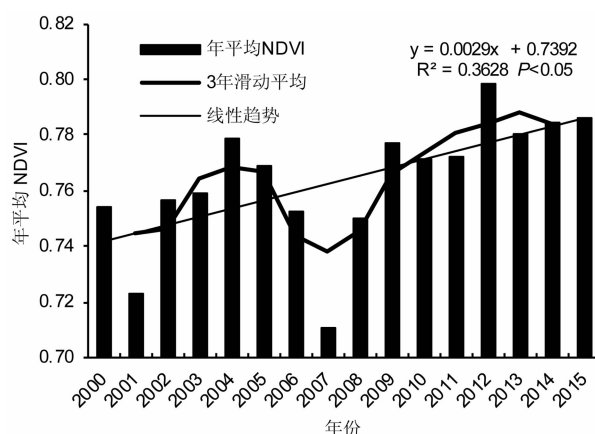


图 4 2000—2015 年秦岭山地植被 NDVI 变化趋势

Fig. 4 Trend of NDVI change in the Qinling Mountains from 2000 to 2015

2.1.2 植被 NDVI 空间变化趋势分析

利用公式(3)和(5)分别计算得到 2000—2015 年秦岭山地植被 NDVI 的空间变化趋势(图 5a)、变化速率(图 5b)、线性变化趋势 F 显著性检验结果(图 5c)。

图 5a 表明, 2000—2015 年秦岭山地植被 NDVI 总体呈增加趋势, 占总面积的 84.84%, 集中分布在区域的中东部、西南部, 西北部有小范围分布; 呈减少趋势的面积占 15.16%, 结合图 1 研究区 DEM 分布可知, 减少区域集中分布于两个区域, 一是海拔较高的区域, 位于区域的中西部; 二是河流谷地、山间盆地, 如汉中、安康、商洛等城市附近区域, 该区域地

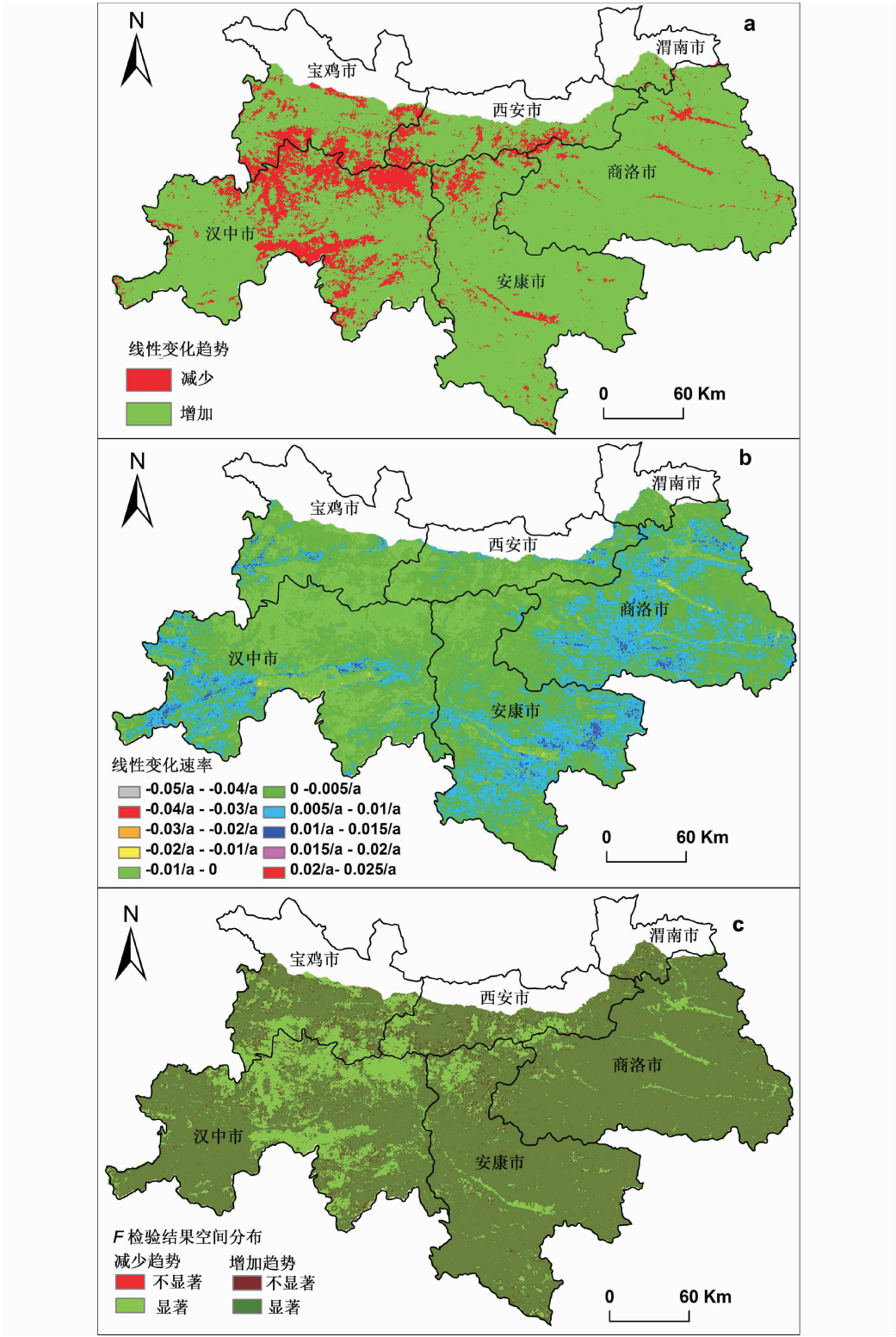


图5 秦岭山地植被 NDVI 线性变化趋势(a)、变化速率(b)和 *F* 检验结果(c)

Fig. 5 Linear change trend (a), change rate (b) and *F*-test results (c) of NDVI in the Qinling Mountains

势低平,也是秦岭山地社会经济发展较快、城市建设用地扩张迅速的区域,与崔晓临等^[29]对秦岭山地植被 NDVI 垂直变化分析结果较为一致,即植被 NDVI

的变化减少区域集中于高海拔区域和低海拔的谷地、盆地区域。

图 5b 表明研究时段研究区植被 NDVI 变化速

率介于 $-0.05 \sim 0.025$ 之间,尤其集中于 $-0.01 \sim 0.015$ 之间,占区域总面积的 99.81%,其中 $0 \sim 0.005$ 范围所占面积比例最大,占 60.92%,是区域植被 NDVI 变化速率分布的主体;其次为 $0.005 \sim 0.01$ 范围,为 22.83%,主要分布于区域的东部、西南部,零星分布于北部、中部区域;之后为 $-0.01 \sim 0.01 \sim 0.015$ 范围,分别占 14.98% 和 1.08%,前者为减少趋势分布的主体,与图 5a 减少趋势分布范围近似一致,后者主要零星分布于 $0.005 \sim 0.01$ 范围的核心地带。

图 5c 表明秦岭山地 2000—2015 年植被 NDVI 线性增加或减少趋势均以显著为主,空间分布与图 5a 中线性增加或减少的区域一致。统计像元数量可知,线性减少趋势中,不显著像元比例可忽略不计,显著比例占 15.16%;增加趋势中,不显著像元比例占总像元数量的 3.36%,显著比例占 81.48%。 F 检验结果反映出未来秦岭山地植被 NDVI 呈减少趋势的区域仍将保持减少态势,需要深入研究减少过程的驱动机制,提出可行的调控措施,遏制植被恶化趋势。

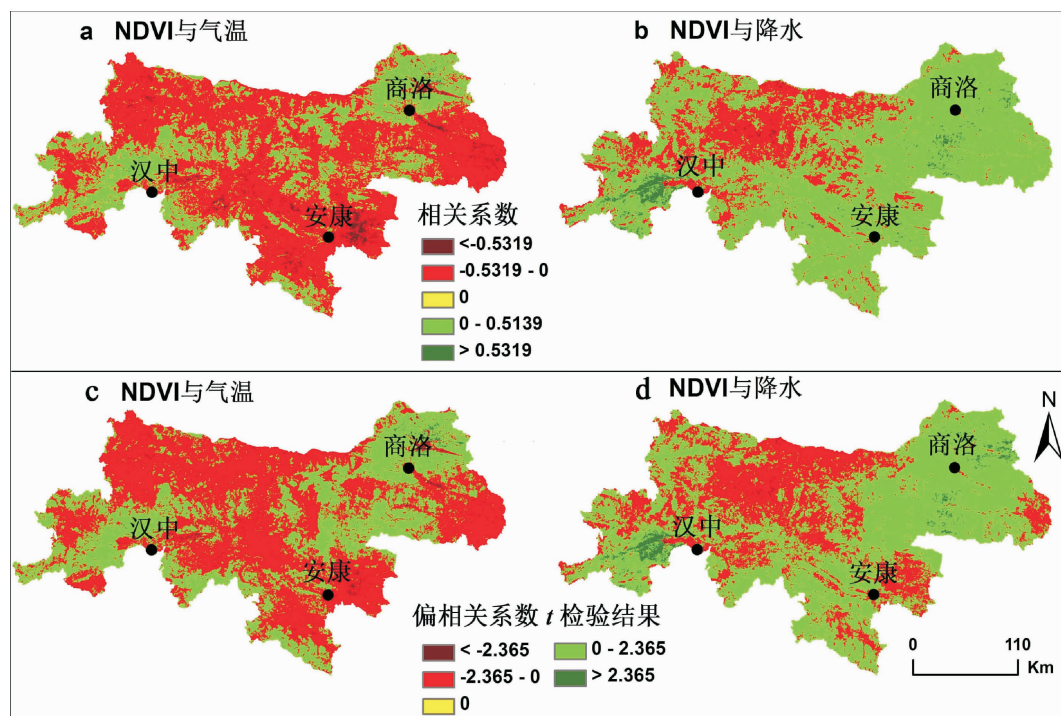
2.2 植被 NDVI 对气候变化的响应

根据公式(6)~(10)计算得到 2000—2014 年秦岭山地植被 NDVI 与年平均气温、年降水量之间的相关关系(图 6a 和图 6b)、偏相关关系 t 检验结果的显著性分布(图 6c 和图 6d)。

2.2.1 植被 NDVI 对气温变化的响应

2000—2014 年秦岭山地植被 NDVI 与年平均气温的相关关系及偏相关关系均表明,二者之间以负相关关系为主,但又存在差异。相关关系以负相关为主,分布范围较广,占区域总面积的 69.82%,其中显著负相关的面积仅占 2.45%;正相关面积占 30.18%,主要分布在区域的东北(商洛市范围)和西南区域(汉中市范围),其中呈显著正相关关系的区域仅占 0.22%(图 6a 和图 7a)。

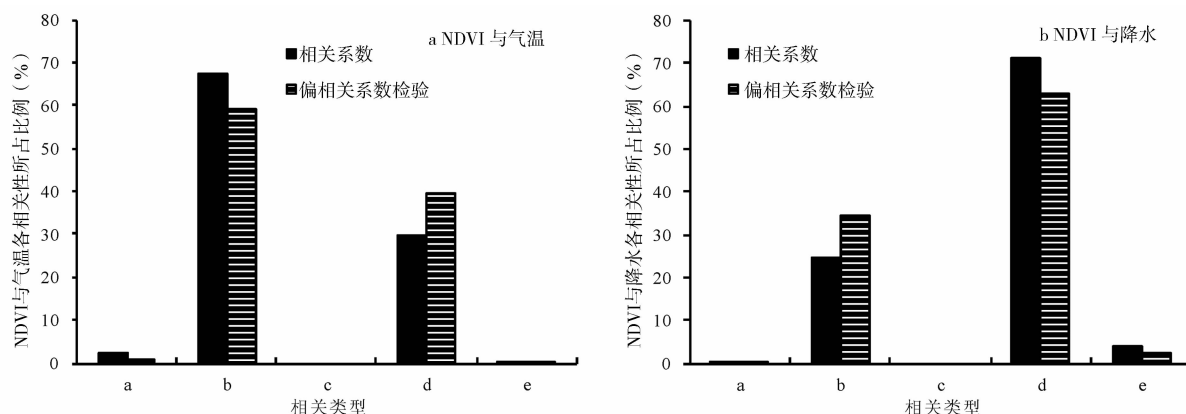
偏相关系数的 t 检验结果表明总体上秦岭植被 NDVI 与气温之间以负偏相关关系为主,占区域总面积的 59.77%,相较负相关系数,面积减少 10.05%,表明降水在植被 NDVI 与气温的负相关关系中,具有 10.05% 的影响作用。显著负偏相关面积仅占 0.83%,不显著负偏相关面积占 58.94%,分



注:图中 a 和 b 为相关系数,按照 $\alpha=0.05$ 时,临界值为 0.5139,划分为 5 个类型,其中 < -0.5319 和 > 0.5319 表示显著相关,0 表示不相关,其它为不显著;c 和 d 为偏相关系数的 t 检验结果,按照 $\alpha=0.05$ 时,临界值为 2.1790,划分为 5 个类型,其中 < -2.1790 和 > 2.1790 表示显著偏相关,0 表示不相关,其它为不显著。

图 6 植被 NDVI 与气温、降水的相关系数(a 和 b)和偏相关系数 t 检验结果(c 和 d)

Fig. 6 Correlation (a, b), partial correlation t -test results (c, d) for NDVI and temperature



注:图中横坐标表示相关关系和偏相关关系 t 检验结果的显著性,即a:显著负(偏)相关、b:负(偏)相关、c:不相关、d:正(偏)相关、e:显著正(偏)相关。

图7 植被NDVI与气温、降水相关关系分布的面积比例统计

Fig. 7 Area ratio of correlation relationship between NDVI and temperature, precipitation

布范围与偏相关系数分布类似;正偏相关面积占40.23%,其中显著正偏相关面积仅占0.49%,主要分布在正偏相关分布区域中部(图6c和图7a)。

以上分析表明,2000—2014年秦岭山地植被NDVI与气温之间以负相关和负偏相关为主,反映出全球及区域气温升高过程中,区域植被朝相反的方向发展,需引起重视。同时也可看出,气温、降水在植被生长过程中作用交叉,仅从相关关系上不能完整表现植被NDVI与气温的作用关系,需要从偏相关方面进一步分析,才会得到较为客观的结果。

2.2.2 植被NDVI对降水变化的响应

2000—2014年秦岭山地植被NDVI与年降水量之间的相关关系显著性分布、偏相关系数 t 检验结果均表明,植被NDVI与降水之间以正相关关系为主。具体表现为,植被NDVI与降水的相关系数以正相关为主,占区域总面积的75.15%,其中显著正相关区域仅占3.93%。正相关分布范围较广,以东部、西南部即商洛市、安康市及汉中市为主体。负相关关系占24.85%,其中呈显著负相关关系的区域仅占0.29%。负相关关系主要分布在区域的中北部及汉中、安康所在的山间谷地、盆地等人类活动较为密集的区域(图6b和图7b)。

由于偏相关系数结果与其 t 检验结果分布相近,以其 t 检验结果可以反映偏相关系数情况。剔除气温因素后,植被NDVI与降水的偏相关关系仍以正偏相关为主,占区域总面积的65.41%,相较正相关关系减小9.64%,反映出气温在降水对植被NDVI生长作用过程中,起到9.64%的作用,二者的交叉作用相近,降水的交叉作用(10.05%)略大于

气温的交叉作用(9.64%),仅差0.41%。植被NDVI与降水正偏相关减少范围主要分布在东部,如商洛市东南部、安康市的中、东部区域。负偏相关关系占34.59%,相较相关系数分布范围增加,增加量及增加区域为正偏相关减少量及减少区域(图6d和图7b)。

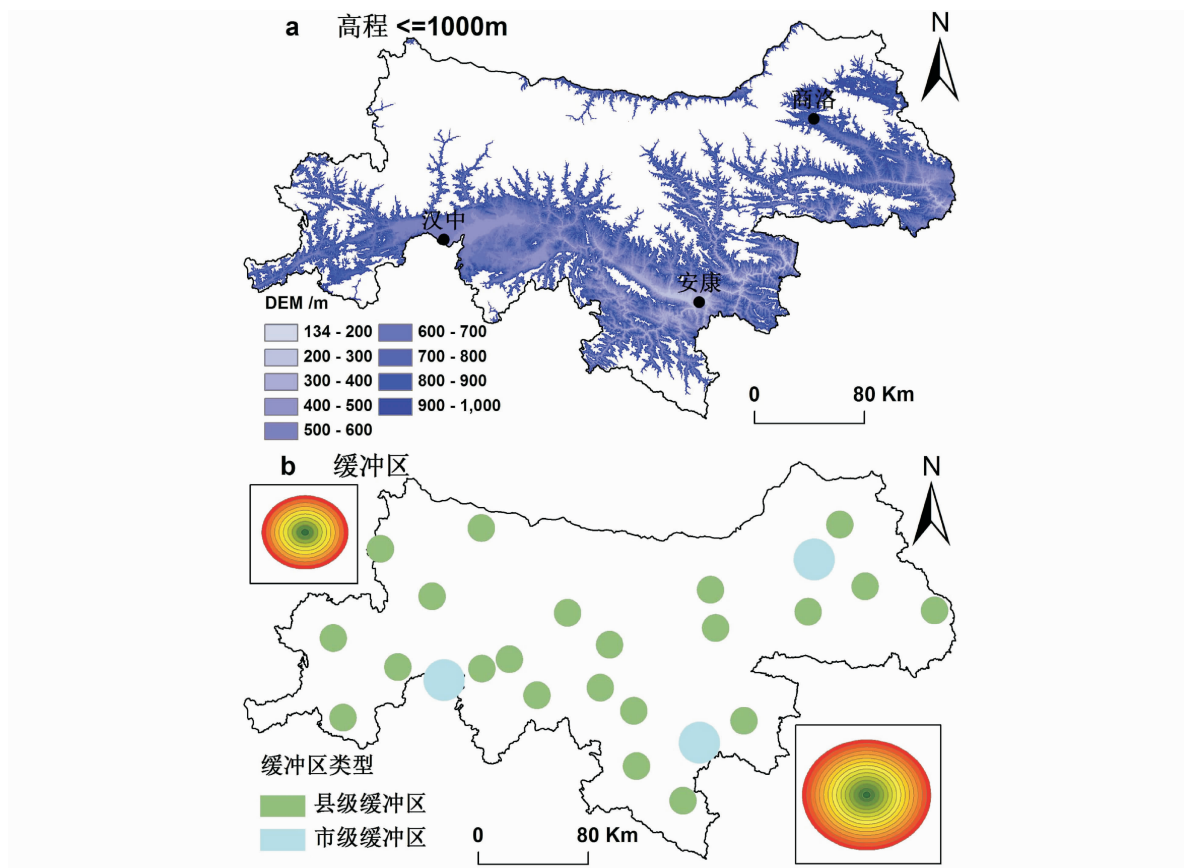
以上分析表明,2000—2014年秦岭植被NDVI与年降水量之间以正相关关系为主,反映出该区域降水对植被生长的影响要高于气温,并且降水变化对植被生长具有促进作用,而气温的变化(主要为升高)对植被反而起到限制作用。随着全球及区域气候变暖,秦岭山地植被生态受气温升高、降水变率增大影响将会产生怎样的变化过程,还需进一步的深入研究。

2.3 植被NDVI对人类活动的响应

2.3.1 人类活动影响范围的定量化确定

利用遥感影像解译获取的建设用地分布区域,一般被定义为人类活动的范围。但该种方式仅能够确定人类活动的范围,还未能涉及影响这一词义。同时,对于人类活动对植被的影响,有研究表明其随经济发展呈先降低后升高的抛物线变化过程,即在经济发展初期,随着城市经济、人口增加,城市建设用地规模不断扩大,导致植被覆盖水平下降,而当经济发展到一定程度,基于对城市生态环境的关注与建设,从而使得城市区域植被覆盖水平逐步提高^[26]。按照该观点,秦岭山地范围内经济发展水平相对较低,人类活动对植被应以负向作用为主。

基于以上认识,通过两种方法分析秦岭山地人类活动,一是基于植被类型及其分布的海拔高度,将



注:图 a 是基于 30 m 分辨率 DEM 数据提取得到;图 b 是分别以距地市、县区行政中心 15 km 和 10 km,间隔 1 km 生成的缓冲区。

图 8 基于植被与高程(a)和缓冲区(b)的人类活动范围划分

Fig. 8 Distribution of human activities based on vegetation and elevation (a), and buffer analysis (b)

≤ 1000 m 的区域作为人类活动影响范围^[26],由于秦岭山地 DEM 最小值为 134 m,故以 100 m 为间隔划分不同高程区域(图 8a);二是基于城市规模,将区域内不同等级行政中心(地市、县)作为人类活动范围的中心,利用缓冲区分析,建立地市行政中心(商洛、安康、汉中)15 km 以内,间隔 1 km 的缓冲区,而县级行政中心建立 10 km 以内,间隔 1 km 的缓冲区(图 8b)。通过以上确定人类活动范围的方法,分析提取的区域内植被 NDVI 的变化情况。

2.3.2 人类活动范围内植被 NDVI 变化趋势分析

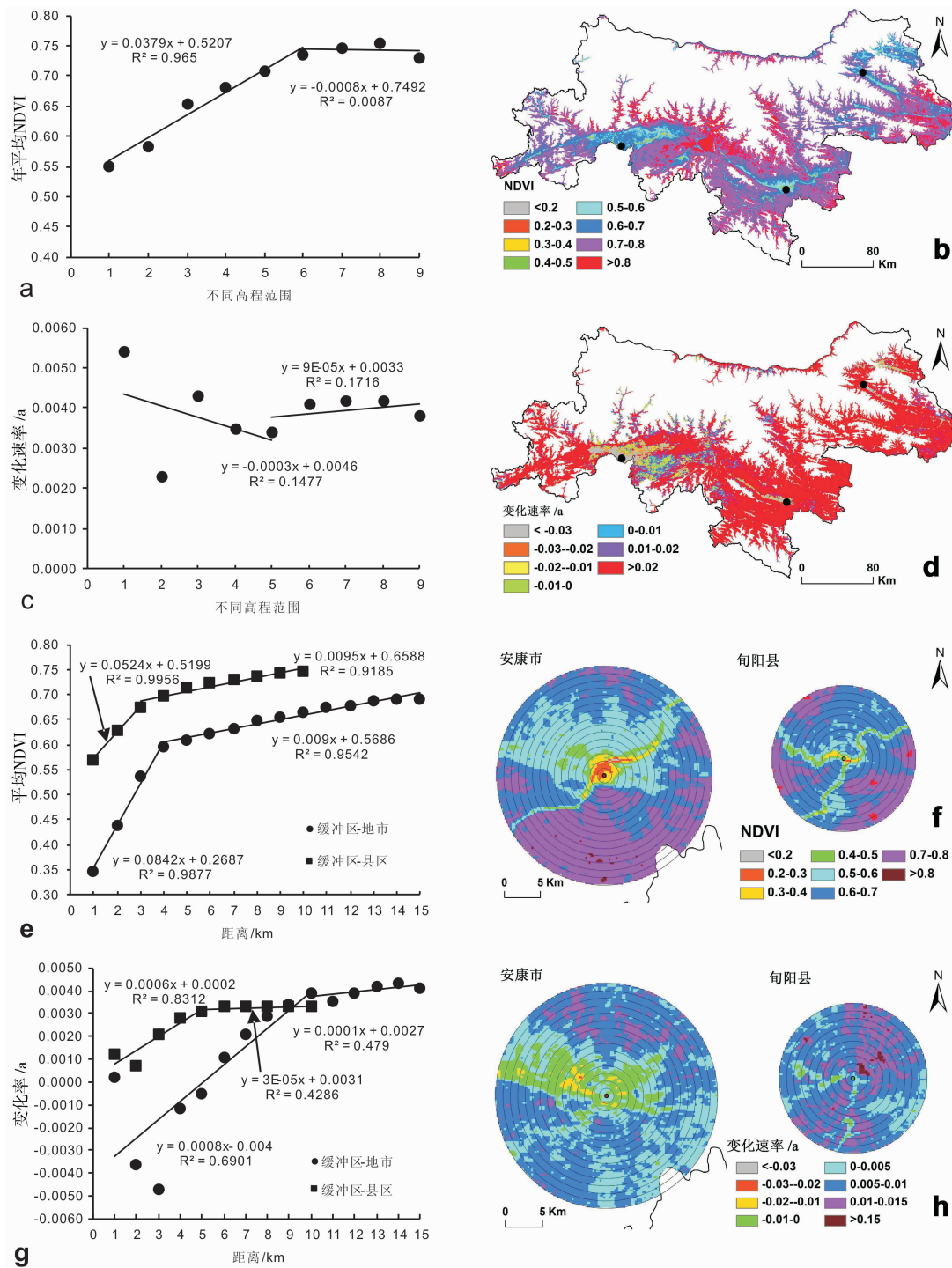
根据人类活动范围定义规则,获得不同高程范围和市、县行政中心缓冲区范围 2000—2015 年平均植被 NDVI 值及线性变化速率结果,见图 9。

2000—2015 年平均植被 NDVI 值随高程总体呈线性增加过程,但可划分为两个部分,即 ≤ 700 m 和 700 ~ 1000 m 范围,前者平均植被 NDVI 值随高程增加的线性递增率为 0.034/100 m,后者为 -0.009/100 m,即 ≤ 700 m 范围平均植被 NDVI 随高程增加而增加,超过 700 m 界线后,随高程增加反

而降低(图 9a)。空间分布反映出城市周围尤其是汉中市、安康市和商洛市所在的河谷、盆地区域,平均植被 NDVI 值较低(图 9b)。

线性变化速率随高程总体呈下降趋势,以 600 m 为界,划分为 ≤ 600 m 和 600 ~ 1000 m 两个部分,前者呈线性下降趋势,线性变化率为 -0.0003/100 m,后者呈先升高后下降的变化过程。即 ≤ 1000 m 范围植被 NDVI 总体呈增加趋势,植被改善,但 ≤ 600 m 范围植被 NDVI 增加速率迅速下降,之后变化趋势平稳(图 9c)。空间分布结果表明,植被 NDVI 变化速率呈线性减少的区域主要集中于城市附近区域,如汉中市、安康市和商洛市周围(图 9d),植被 NDVI 减少趋势分布区域可以认为受到人类活动的直接影响和干预。

县、市级行政中心缓冲区结果表明(图 9e),县级行政中心 10 km 范围缓冲区 2000—2015 年平均植被 NDVI 值 > 0.55 ,均大于市级行政中心相应缓冲区范围平均植被 NDVI 值。同时,平均植被 NDVI 随距离市、县行政中心距离的增加总体均呈增加趋



注:图 a、c 的横坐标为高程分组类型,1 表示 ≤ 200 m,2 表示 200 ~ 300 m,3 表示 300 ~ 400 m,4 表示 400 ~ 500 m,5 表示 500 ~ 600 m,6 表示 600 ~ 700 m,7 表示 700 ~ 800 m,8 表示 800 ~ 900 m,9 表示 900 ~ 1000 m。图 a 表示 2000—2015 年平均 NDVI 值随高程的变化;图 b 为 ≤ 1000 m 范围 2000—2015 年平均值空间分布;图 c 表示 2000—2015 年植被 NDVI 线性变化速率随高程的变化;图 d 为 ≤ 1000 m 范围植被 NDVI 线性变化速率空间分布;图 e 表示 2000—2015 年平均 NDVI 值随距市、县行政中心距离的变化;图 f 为典型市、县缓冲区范围平均 NDVI 空间分布;图 g 表示 2000—2015 年植被 NDVI 线性变化速率随距市、县行政中心距离的变化;图 h 为典型市、县缓冲区范围植被 NDVI 线性变化速率空间分布。

图 9 人类活动影响范围内植被 NDVI 变化趋势

Fig. 9 Change trend of NDVI in the range of human activities

势,但可划分为具有明显差异的两个变化阶段。对市级行政中心而言,划分为4 km 范围和4~10 km 范围,前者平均植被 NDVI 呈快速增加趋势,线性递增率为0.084 km,后者增速减缓,仅为0.009 km。县级行政中心方面,划分为3 km 范围和3~10 km 范围,前者平均值被 NDVI 迅速增加,线性递增率为0.052 km,后者增速减缓,仅为0.0095 km,反映出城市行政等级不同,人类活动的强度不同,从而对植被 NDVI 产生的影响也不同。安康市、旬阳县平均植被 NDVI 随距离行政中心的距离增加,呈明显的增加过程(图9f)。

市、县两级行政中心缓冲区范围内(图9g),2000—2015年植被 NDVI 线性变化速率随距行政中心距离的增加总体呈上升趋势,县级缓冲区范围内植被 NDVI 线性变化速率均为正值,并且变化速率在9 km 以内均高于市级缓冲区相应范围,反映出县级行政中心人类活动虽然强烈,但并未对植被 NDVI 产生负向作用,植被 NDVI 仍呈增加趋势,植被状况良好且逐渐改善。市级缓冲区范围内,2~5 km 缓冲区范围植被 NDVI 变化速率为负值,反映出该范围植被覆盖不断恶化,植被 NDVI 值降低过程,同时也应注意到1 km 范围的变化速率为正值,印证了Li等^[26]的研究结论,即市区1 km 范围城市化历史较长,绿化水平相较2~5 km 范围高,故1 km 范围表现出植被 NDVI 的增加趋势,而2~5 km 范围仍处于城市化开发阶段,原有自然或人工植被遭到破坏,而城市绿化植被又未能填补空缺,造成植被 NDVI 的持续下降。县、市级缓冲区植被 NDVI 速率变化过程可划分为两个阶段,县级缓冲区划分为5 km 以内和5~10 km 范围,前者线性递增率为0.006 km,后者仅为0.00003 km;市级缓冲区划分为10 km 以内和10~15 km 范围,前者线性递增率为0.0008 km,后者仅为0.0001 km。安康市和旬阳县植被 NDVI 变化速率随距离行政中心的距离增加,变化速率也逐渐增加(图9h)。

由此可以认为,秦岭山地范围内,县级、市级缓冲区范围平均 NDVI 分别在3 km、4 km 处发生转折,而年平均 NDVI 变化速率分别在5 km、10 km 处发生转折。同时也反映出年平均 NDVI 及其变化速率均随距离县、市行政中心距离的增加,呈现出增加的过程。

3 结论与讨论

(1)2000—2015年秦岭山地总体植被 NDVI 呈

线性增加趋势,减少趋势主要分布在中西部区域(中、高海拔区域)及河流谷地、盆地,如汉中市、安康市和商洛市等城市附近区域。

(2)2000—2014年秦岭山地植被 NDVI 与气温之间以负相关和负偏相关为主,与降水之间以正相关和正偏相关为主,同时气温、降水对植被 NDVI 的影响具有交叉作用,其中降水交叉作用(10.05%)略高于气温作用(9.64%)。

(3)植被 NDVI 对人类活动响应分析结果表明,利用缓冲区和平均 NDVI 及其线性变化速率,更易于得到植被 NDVI 的响应特征。秦岭山地市级、县级缓冲区范围平均 NDVI 分别在4 km 和3 km 处发生转折,而平均 NDVI 的年变化速率分别在10 km 和5 km 处发生转折,转折后平均 NDVI 及其年变化速率随到行政中心距离的增加而趋于平稳。市级较县级范围人类活动强烈,植被 NDVI 在1 km 范围变化速率为正(植被增加)、2~5 km 范围变化速率为负(植被恶化,可能遭受人为破坏)、6~10 km 范围变化速率为正(人类活动相对较弱)、11~15 km 范围变化趋于平稳(基本不受人类活动影响)。

植被对气候变化响应研究较为丰富和成熟,而对偏相关分析方法的忽略,使得气温、降水对植被的共同作用及其各自作用无法得到定量区分,本文探讨了利用相关-偏相关分析方法,定量区分气温、降水对植被作用。植被对人类活动响应方面,人类活动范围的界定较为模糊,尽管可以利用建设用地等人工不透水面表示人类活动范围,但人类活动对植被的影响具有过渡性和随距人类活动中心距离增加递减的特性,使得利用固定区域界定过渡区域有较大的局限性,植被线性变化趋势与缓冲区方法结合,为定量确定人类活动空间范围提供了可能。秦岭山地植被 NDVI 对极端气候事件、地形分布及人类活动响应是需要进一步研究的内容。

参考文献(References)

- [1] STOKER T F, QIN G K, PLATTNER M, et al. IPCC, 2013: Summary for policymakers [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1–25.
- [2] GARTZIA M, CABELLO F P, BUENO C G, et al. Physiognomic and physiologic changes in mountain grassland in response to environmental and anthropogenic factors [J]. *Applied Geography*, 2016, **66**: 1–11.
- [3] ZHANG C, LU D, CHEN X, et al. The spatiotemporal patterns of vegetation coverage and biomass of the temperate deserts in central Asia and their relationships with climate controls [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **175**: 271–281.

- [4] PAWLIK Ł, MIGON P, OWZAREK P, et al. Surface processes and interactions with forest vegetation on a steep mudstone slope, stółowe Mountains, SW Poland [J]. *Catena*, 2013, **109**: 203–216.
- [5] KOSANIC A, ANDERSON K, FRERE C H, et al. Regional vegetation change and implications for local conservation: an example from west Cornwall (United Kingdom) [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, **4**: 405–413.
- [6] FENSCHOLT R, PROUND S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends-comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **119**: 131–147.
- [7] JAMALI S, JONSSON H, EKLUNDH L, et al. Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 182–195.
- [8] LI Z, FOX J M. Mapping rubber tree growth in mainland Southeast Asia using time-series MODIS 250m NDVI and statistical data [J]. *Applied Geography*, 2012, **32**(2): 420–432.
- [9] JU J, MASEK J G. The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **176**: 1–16.
- [10] GURGEL H C, FERREIRA N J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(18): 3595–3609.
- [11] JIANG N, ZHU W, ZHENG Z, et al. A comparative analysis between GIMMS NDVIg and NDVI3g for monitoring vegetation activity change in the northern hemisphere during 1982–2008 [J]. *Remote Sensing*, 2013, **5**(8): 4031–4044.
- [12] ZHOU H, ROMPAEY A V, WANG J. Detecting the impact of the “Grain for Green” program on the mean annual vegetation cover in the Shaanxi province, China using SPOT-VGT NDVI data [J]. *Land Use Policy*, 2009, **26**(4): 954–960.
- [13] CHUAI X W, HUANG X J, WANG W J, et al. NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, **33**(7): 1696–1706.
- [14] 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*, 2007, **37**(11): 1504–1514 [XIN Zhongbao, XU Jiongxin, ZHENG Wei. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981–2006): impacts of climate changes and human activities [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, **51**(1): 67–78]
- [15] LI J, LIU Y, CAO M, et al. Space-time characteristics of vegetation cover and distribution: case of the Henan province in China [J]. *Sustainability*, 2015, **7**(9): 11967–11979.
- [16] WARDLOW B D, EGBERT S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U. S. Central Great Plains [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 1096–1116.
- [17] WU C, GONSAMO A, GOUGH C M, et al. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **147**: 79–88.
- [18] YANG Q, QIN Z, LI W, et al. Temporal and Spatial variations of vegetation cover in Hulun Buir grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2012, **26**(4): 328–343.
- [19] LI S, YANG S, LIU X, 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.
- [20] 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 [SONG F Q, KANG M Y, YANG P, et al. Comparison and validation of GIMMS, SPOT-VGT and MODIS global NDVI products in the Loess Plateau of northern Shaanxi province, northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(4): 72–80]
- [21] LI S, XIE Y, BROWN D G, et al. Spatial variability of the adaptation of grassland vegetation to climatic change in Inner Mongolia of China [J]. *Applied Geography*, 2013, **43**: 1–12.
- [22] LIU X, ZHU X, PAN Y, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, **26**(1): 45–58.
- [23] LI Z, Huffman T, Mcconkey B, et al. Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **138**: 232–244.
- [24] WESSELS K J, PRINCE S D, FROST P E, et al. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern south Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(1): 47–67.
- [25] PENG J, LI Y, TIAN L, et al. Vegetation dynamics and associated driving forces in eastern China during 1999–2008 [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(10): 13641–13663.
- [26] LI C, KUANG Y, HUANG N, et al. The long-term relationship between population growth and vegetation cover: an empirical analysis based on the panel data of 21 cities in Guangdong province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, **10**(2): 660–667.
- [27] 白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–42 [BAI Hongying. The responses of forest vegetation to environmental change in Qinling Mountains [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1–42]
- [28] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 37–70 [XU Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 37–70]
- [29] 崔晓临, 白红英, 王涛. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应[J]. *资源科学*, 2013, **35**(3): 618–626 [CUI Xiaolin, BAI Hongying, WANG Tao. Difference in NDVI with altitudinal gradient and temperature in Qinling area [J]. *Resources Science*, 2013, **35**(3): 618–626]

Variation of Vegetation NDVI in Response to Climate Changes and Human Activities in Qinling Mountains

WANG Tao^{1, 2, 3}, BAI Hongying¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The Qinling Mountains are important geographical boundary to central and eastern China. They host a variety of ecological systems, but they are susceptible to climate change and human activities. In this research, data including MODIS NDVI, temperature, precipitation, and DEM were collected from the Qinling mountainous area, and the linear trend method, correlation analysis, partial correlation coefficients analysis and the buffer method were used to analyze the responses of NDVI to climate changes and human activities. The results showed that: (1) For the period of 2000 – 2015, NDVI in the Qinling mountainous area exhibited a trend of linear increase, accounting for 84.84% of the total area, whereas the areas with a trend of decreasing NDVI were mainly distributed in the mid-west region (medium and high altitude areas) and some river valleys and basins, such as the areas in the vicinity of the cities of Hanzhong, Ankang and Shangluo. (2) During 2000 – 2014 in the Qinling Mountains, a negative correlation was revealed between NDVI and air temperature, and a positive correlation was revealed between NDVI and precipitation. During this time, air temperature and precipitation had a cross-cutting effect on NDVI, with a higher effect of precipitation (10.05%) than of temperature (9.64%). (3) The change in NDVI was positive in the range of 1 km (vegetation increased), negative in the 2 ~ 5 km range (vegetation deteriorating, possibly subject to vandalism), positive again in the 6 ~ 10 km range (human activities were relatively weak), and stable in the 11 ~ 15 km range (ultimately unaffected by human activities). This study will provide a scientific basis for environmental protection of vegetation in the Qinling Mountains and for regulating human activities.

Key words: Air temperature; precipitation; NDVI; buffer analysis; Qinling Mountains

封面照片: 云南省昆明市东川区蒋家沟 黏性泥石流龙头爬高现象

小江流域的蒋家沟被国内外泥石流学者誉为“天然泥石流博物馆”。黏性泥石流龙头爬高现象是指泥石流沿沟道运动过程中,龙头在弯道处发生冲起-爬高-翻卷,并跌落进泥石流中的现象。

(康志成摄)