

逯颖,王涛,田阳. 秦岭山地森林植被变化及对气候响应的地形影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):214-218.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.056

秦岭山地森林植被变化及对气候响应的地形影响

逯颖^{1,2}, 王涛^{2,3}, 田阳⁴

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2. 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西西安 710054;
3. 西北大学城市与环境学院,陕西西安 710127; 4. 重庆市綦江区横山镇人民政府,重庆 401460)

摘要:地形是影响森林植被分布与生长的重要地理因子,秦岭山地作为中国中部重要生态屏障区,其森林植被变化及对气候变化响应研究受到广泛关注。基于2000—2014年秦岭山地MODIS NDVI、DEM、气温和降水数据,利用线性趋势法和相关系数对森林植被变化及对气候响应的坡向、坡度影响进行了分析,研究结果:(1)秦岭山地森林植被以落叶阔叶林为主,占森林总面积的59.72%。按坡向划分,森林植被主要分布在半阳坡上,约占50%;按坡度划分,森林植被主要集中在斜坡和陡坡上,共占50%以上。(2)2000—2014年秦岭山地各森林植被NDVI均呈线性增加过程,在坡向和坡度上均表现为落叶阔叶灌木林线性增加速率最高、落叶阔叶林次之、常绿针叶林最低的特征,并且落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林、常绿阔叶林的主体部分均呈显著的线性增加趋势,而针阔混交林、常绿针叶林的增加过程不显著。(3)秦岭山地森林植被与气温在不同坡向和坡度上均呈负相关关系,而与降水呈正相关关系,反映该区域热量条件充足,降水成为森林植被生长的主要限制因子。同时,在不同一坡向上,随着坡度的增加,气温、降水与森林植被的相关关系变化趋势较为一致。研究结果表明,秦岭山地地形条件对森林植被分布影响较大,而不同地形上水热条件对植被生长发育影响较小。

关键词:MODIS NDVI;线性趋势;相关系数;坡向;坡度;秦岭山地

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)01-0214-05

全球环境变化尤其是全球气候变暖及所导致的全球气温

上升、降水变率增大等受到国内外学者的广泛关注^[1-2],也逐次被联合国气候变化专门委员会气候变化报告所证实^[3],报告认为,全球气候变暖对高纬度地区和高海拔地区的生态环境影响较大,这些区域也成为全球及区域气候变化的敏感地带,成为研究热点地区^[4-5]。秦岭山地作为中国中东部最为重要的山脉,陆地生态系统类型多样,由于高差较大,植被地带性发育较好,自下而上依次为山地农耕植被、山地落叶阔叶林带、山地针叶林带和高山灌丛草甸带^[6]。丰富的植被覆盖类型,使秦岭山地成为研究全球及区域气候变化的重要场

收稿日期:2017-04-20

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(编号: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(编号:A314021402-1616)。

作者简介:逯颖(1994—),女,山西寿阳人,硕士研究生,主要从事林业遥感研究。E-mail:luying82500@163.com。

通信作者:王涛,博士,讲师,主要从事区域环境变化研究。E-mail:wht432@163.com。

治理技术进展[J]. 中国农学通报,2006,22(2):361-365.

[10]李乐舜. 过碳酸胺开发应用前景广阔[J]. 小氮肥设计技术, 2004,25(1):46-48.

[11]钟宁,曾清如,李顺兴,等. 过碳酸胺对土壤中非离子表面活性剂的修复研究[J]. 土壤,2009,41(6):947-951.

[12]乔秀丽,田军. 二次逐步回归优化制备过碳酸胺工艺[J]. 应用化工,2012,41(11):1980-1982.

[13]王鸿显,任保增,刘瑛,等. 湿法生产过碳酸胺原料配比的理论分析和实验研究[J]. 化学通报(网络版),2002,65(1):864-868.

[14]Okano T, Tamura T, Abe Y, et al. Micellization and adsorbed film formation of a binary mixed system of anionic/nonionic surfactants [J]. Langmuir,2000,16(4):1508-1514.

[15]Yang K, Zhu L, Xing B. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solutions of TX100 and SDBS [J]. Environmental Science & Technology,2006,40(13):4274-4280.

[16]宋春满,方敦煌,邓云龙,等. 土壤中17种有机氯农药残留量的毛细管气相色谱测定法[J]. 分析试验室,2007,26(6):41-43.

[17]董冀川,杨琼. 气相色谱法同时分析测定土壤中15种有机氯农药残留[J]. 中国环境监测,2009,25(4):7-10.

[18]曹梦华,王琳玲,陈静,等. 有机氯农药污染土壤的Fenton氧化修复研究[J]. 环境工程,2012,30(5):127-130.

[19]李莹,李方敏. Fenton氧化法修复多环芳烃污染土壤的研究进展[C]//2014中国环境科学学会学术年会论文集. 北京:中国环境科学学会,2014:6228-6229.

[20]Ferrarese E, Andreottola G, Oprea I A. Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation [J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(1):128-139.

[21]Valderrama C, Alessandri R, Aunola T, et al. Oxidation by fenton's reagent combined with biological treatment applied to a creosote-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials,2009,166(2/3):594-602.

[22]汤艳杰,贾建业,谢先德. 铁锰氧化物在污染土壤修复中的作用[J]. 地球科学进展,2002,17(4):557-564.

[23]任丽英,马家恒,徐振,等. 铁铝复合氧化物对土壤Mn、Pb和Cd有效性的影响[J]. 矿物学报,2014,34(3):396-400.

所^[7-8]。秦岭植被覆盖变化研究对于区域生态环境保护、陆地生态系统安全等具有重要理论与现实意义。

秦岭及其附近区域在过去50年经历了复杂的气候变化过程,其中气温在南北坡均表现出上升趋势,北坡增温速度高于南坡^[9-10],而降水变化趋势并不显著,降水变率增大^[11]。受中国改革开放以来经济快速发展影响,尽管秦岭山地区域经济发展相对较缓,城市规模扩张较慢,但对区域植被也产生了明显的破坏^[12-13]。在气候变化及城市扩张的驱动下,秦岭山地植被在不同区域上表现出不同的变化特征,如高、中海拔区域植被的退化与气温升高、降水变化之间的关系较为明显,由于海拔限制,人类活动影响相对较小^[14-15];而低海拔区域尤其是山间盆地和河流谷地,地势平坦,土壤肥沃,是人口主要分布区,城市扩张的负向作用在该区域表现显著^[16-18]。

地形是影响植被覆盖分布的重要自然地理因素,在反映植被覆盖与自然要素关系方面具有独特的作用,受到较多关注^[19-20]。秦岭山地地形复杂,但地形对区域内植被覆盖影响的研究较少,尤其是在森林植被对气候变化响应研究方面。秦岭山地森林植被变化及对气候变化响应的地形影响分析,可为区域森林生态环境保护与建设提供科学决策支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的秦岭山地,主要指秦岭腹地即陕西省境内的秦岭山地(图1),位于105°30′~111°05′E和31°55′~34°35′N之间,总面积约7万km²。秦岭山地是中国暖温带和亚热带的分界线,也是长江水系和黄河水系的分水岭,1月平均气温由北而南逐渐由0℃以下升至0℃以上,年降水量也由500~600mm增加至1000mm以上。气候条件的差异,导致秦岭山地北坡与南坡差异较大,北坡山势陡峭,河流长度短且流速急,如灞河、泾河等,河流谷底发育程度较低;而南坡山势减缓,汉江、丹江等河流发育,山间谷地发育,成为人类活动密集区域。作为中国南水北调中线工程的水源地,秦岭山地陆地生态系统变化受到更多重视。

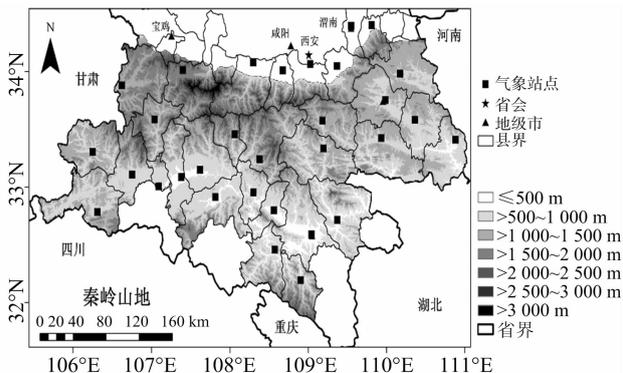


图1 研究区位置及气象站点分布

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 数据来源 (1)2000—2014年250m分辨率、16d合成的MODIS 13Q1 - Level 3 NDVI产品,下载自<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>; (2)秦岭及附近区域31个气象站点2000—2014年逐年气温和降水数据(图1),下载自中国气

象数据网(<http://www.data.cma.cn>); (3)研究区30m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>); (4)2010年秦岭山地植被类型分布数据,收集自“全国生态环境10年变化遥感调查与评估”项目。

1.2.2 数据预处理 (1)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—2014年秦岭山地时间序列MODIS NDVI影像。依据文献^[21]中植被生长季确定方法,得到秦岭山地植被生长季开始于4月上旬,结束于10月中旬。而后先求出2000—2014年4—10月逐月植被NDVI最大值,再利用月平均值获取植被生长季NDVI年值。(2)依据文献^[15]中山地气温数据IDW(Inverse Distance Weighted)空间插值过程,利用气温垂直递减率和DEM进行气温插值修正方法,获取研究区2000—2014年逐年年平均气温空间分布图。降水数据直接采用IDW插值获得。(3)由DEM提取坡度和坡向因子。参照文献^[6],将坡度划分为0~5°(平坡,S1)、>5~15°(缓坡,S2)、>15~25°(斜坡,S3)、>25~35°(陡坡,S4)、>35~45°(急坡,S5)、>45°(险坡,S6)共6个范围。将坡向划分为-1~0°(平坡,A1)、>0~45°(315~360°)(阴坡,A2)、>45~135°(225~315°)(半阳坡,A3)、>135~225°(阳坡,A4)共4个范围。(4)基于2010年秦岭山地植被类型分布,将森林植被划分为常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶阔叶灌木林、针阔混交林共5个类型。由于森林植被分布与高程之间具有一定的相关性,故文中不对高程的影响进行分析。

1.3 分析方法

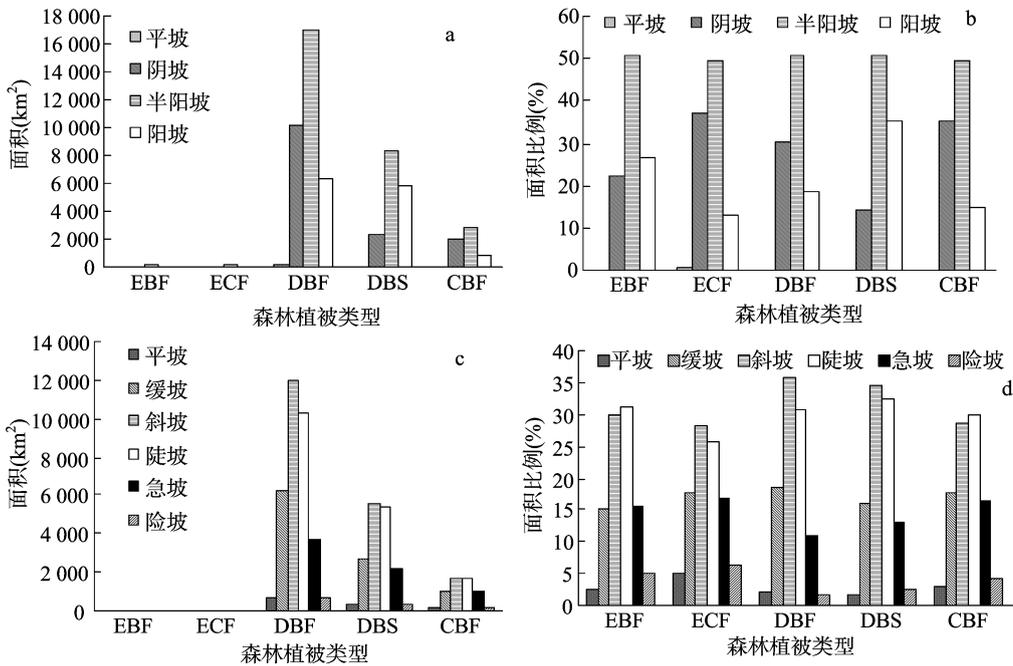
分析了秦岭山地不同森林植被类型中,不同坡度、坡向范围2000—2014年NDVI的线性变化趋势,以及NDVI分别与气温、降水的相关关系,线性趋势和相关系数的计算方法参见文献^[22]。

2 结果与分析

2.1 森林植被分布

利用2010年秦岭山地植被类型分布数据,结合DEM提取坡向和坡度数据,获得不同坡向和坡度下植被类型面积及百分比,结果见图2。

从图2可以看出,秦岭山地森林植被中,落叶阔叶林面积最大,为33447.16km²,占森林植被总面积的59.72%,落叶阔叶灌木林次之,常绿阔叶林面积最小。从坡向分布上看,森林植被分布面积及比例除在平坡较小外,其他3个坡向分布均较大,其中半阳坡各森林植被类型面积比例均在50%左右,占比最高,但森林植被在阴坡和阳坡的分布存在差异,如常绿阔叶林和落叶阔叶灌木林在阳坡的分布面积和比例高于阴坡,而常绿针叶林、落叶阔叶林和针阔混交林在阴坡分布的面积比例高于阳坡(图2-a、图2-b)。从坡度分布上看,森林植被分布较为均匀,但多集中在缓坡、斜坡、陡坡和急坡上,而斜坡和陡坡又是最为集中的2个坡度,比例均在50%以上,其中常绿阔叶林和针阔混交林在陡坡上的分布面积和比例最大,常绿针叶林、落叶阔叶林和落叶阔叶灌木林在斜坡上的分布面积和比例最大(图2-c、图2-d)。



EBF—常绿阔叶林; ECF—常绿针叶林; DBF—落叶阔叶林; DBS—落叶阔叶灌木林; CBF—针阔混交林。图3同

图2 不同坡向和坡度下森林植被类型面积及比例

2.2 森林植被 NDVI 变化趋势

利用各植被类型在不同坡向和坡度上的栅格分布数据,结合秦岭山地逐年 NDVI 数据,提取得到各植被类型在不同

坡度、坡向上 2000—2014 年 NDVI 平均值,并计算其随年份的变化速率,计算结果见表 1。

表 1 2000—2014 年森林植被 NDVI 平均值及线性变化速率

地形因子	等级划分	常绿阔叶林		常绿针叶林		落叶阔叶林		落叶阔叶灌木林		针阔混交林	
		平均值	速率	平均值	速率	平均值	速率	平均值	速率	平均值	速率
坡向	平坡(A1)	0.740 4	0.002 9*	0.752 8	0.001 6	0.773 6	0.002 8*	0.787 1	0.002 9*	0.745 4	0.002 1
	阴坡(A2)	0.753 9	0.003 1*	0.758 7	0.001 4	0.777 3	0.002 8*	0.789 5	0.002 9*	0.766 8	0.001 8
	半阳坡(A3)	0.773 2	0.002 7*	0.757 0	0.001 4	0.776 3	0.002 9*	0.785 5	0.003 1*	0.766 5	0.001 7
	阳坡(A4)	0.793 3	0.002 0	0.755 2	0.001 5	0.775 0	0.002 9*	0.784 7	0.003 2*	0.766 5	0.001 6
	平均值	0.765 2	0.002 7	0.755 9	0.001 5	0.775 5	0.002 9	0.786 7	0.003 0	0.761 3	0.001 8
坡度	平坡(S1)	0.715 6	0.001 0	0.708 2	0.002 3	0.764 8	0.003 0*	0.783 8	0.003 2*	0.727 8	0.002 1
	缓坡(S2)	0.761 2	0.002 5	0.729 4	0.002 2	0.771 7	0.003 0*	0.783 8	0.003 2*	0.742 1	0.002 4
	斜坡(S3)	0.772 7	0.002 7*	0.752 7	0.001 6	0.777 0	0.002 9*	0.785 6	0.003 2*	0.759 9	0.002 2
	陡坡(S4)	0.776 1	0.002 9*	0.767 8	0.001 1	0.783 6	0.002 7*	0.789 7	0.003 0*	0.777 7	0.001 4
	急坡(S5)	0.786 2	0.002 4	0.781 7	0.000 7	0.791 0	0.002 3	0.794 8	0.002 7*	0.786 0	0.001 0
	险坡(S6)	0.794 4	0.002 2	0.786 1	0.000 7	0.795 5	0.001 7	0.798 6	0.002 3	0.787 3	0.000 8
	平均值	0.767 7	0.002 3	0.754 3	0.001 4	0.780 6	0.002 6	0.789 4	0.002 9	0.763 5	0.001 7

注:“*”表示在 0.05 水平上差异显著。

从表 1 可以看出,2000—2014 年秦岭山地各森林植被类型 NDVI 平均线性变化速率均为正值,而在坡向、坡度上均表现出落叶阔叶灌木林平均线性增加速率最高,落叶阔叶林次之,常绿阔叶林再次,针阔混交林和常绿针叶林最低的特征,并且平均值大小与此相同。森林植被 NDVI 线性变化速率反映出研究时段内秦岭山地植被总体逐步改善趋势,并且落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林、常绿阔叶林的改善要优于针阔混交林和常绿针叶林。

坡向上,落叶阔叶灌木林和落叶阔叶林 NDVI 线性变化速率均通过 0.05 显著性检验,而针阔混交林和常绿针叶林均未通过检验。常绿阔叶林在平坡、阴坡和半阳坡上均呈显著的增加趋势,而在阳坡上变化速率不显著。坡度上,针阔混交

林和常绿针叶林均未通过显著性检验,而落叶阔叶灌木林除在险坡上变化速率不显著外,其他 5 个坡度均通过显著性检验。落叶阔叶林除在急坡和险坡不显著外,其他 4 个坡度上均显著,而常绿阔叶林仅在斜坡和陡坡上通过显著性水平检验,其他 4 个坡度上均不显著。结合图 2 可知,落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林、常绿阔叶林的主体部分均呈显著的线性增加趋势,而针阔混交林、常绿针叶林的增加过程不显著。

2.3 森林植被变化对气候的响应

气温和降水是表征气候的重要指标。基于 2000—2014 年秦岭山地气象站点逐年气温、降水数据的空间插值结果,结合相关系数计算方法,分别得到 NDVI 与气温、降水的相关系数空间分布结果,而后使用不同坡向、坡度上各植被类型分布

数据进行提取,计算结果见表2。

秦岭山地是中国亚热带与暖温带的分界线,水热资源丰富。从表2可以看出,森林植被与气温、降水相关系数在坡向和坡度上的平均值可以看出,各森林植被类型与气温的相关系数均为负值,而与降水均为正值,但相关系数平均值均较小,反映出该区域森林植被发育过程,热量条件充足,能够满足需求,而降水相对成为植被发育的限制因子。在不同坡向上,常绿阔叶林和落叶阔叶林与气温相关系数在平坡和阴坡的绝对值最大,而常绿针叶林、落叶阔叶针叶林和针阔混交林在阴坡和半阳坡的绝对值最大。常绿阔叶林、常绿针叶林和

针阔混交林与降水的相关系数在平坡和阴坡最大,而落叶阔叶林在平坡和阳坡最大,落叶阔叶混交林在半阳坡和阳坡最大。在不同坡度上,各森林植被与气温的相关系数分布较为分散,如常绿阔叶林相关系数绝对值最大值出现在斜坡和陡坡上,而落叶阔叶林出现在陡坡和急坡上,其他3类森林植被分布也不一致。各森林植被与降水的相关系数分布较为集中,除常绿阔叶林与降水相关系数最大值出现在陡坡和险坡外,其他4类森林植被类型与降水相关系数最大值均出现在平坡和缓坡上。

表2 森林植被与气温、降水的相关系数

地形因子	等级划分	常绿阔叶林		常绿针叶林		落叶阔叶林		落叶阔叶灌木林		针阔混交林	
		气温	降水								
坡向	平坡(A1)	-0.177 9	0.165 6	-0.045 5	0.194 1	-0.103 7	0.155 2	-0.114 1	0.139 8	-0.038 0	0.134 4
	阴坡(A2)	-0.177 4	0.187 2	-0.066 6	0.128 1	-0.105 6	0.147 9	-0.115 8	0.139 6	-0.065 0	0.107 0
	半阳坡(A3)	-0.126 4	0.150 6	-0.055 3	0.078 9	-0.101 9	0.149 7	-0.117 5	0.154 2	-0.059 4	0.081 5
	阳坡(A4)	-0.067 6	0.130 1	-0.045 5	0.091 6	-0.091 6	0.150 1	-0.115 1	0.160 0	-0.049 3	0.060 1
	平均值	-0.137 3	0.158 4	-0.053 2	0.123 2	-0.100 7	0.150 7	-0.115 6	0.148 4	-0.052 9	0.095 8
坡度	平坡(S1)	-0.087 1	0.011 5	0.001 8	0.231 9	-0.096 2	0.174 2	-0.123 4	0.167 1	-0.037 8	0.151 7
	缓坡(S2)	-0.118 4	0.153 8	-0.050 6	0.184 2	-0.100 2	0.162 4	-0.118 5	0.162 1	-0.039 0	0.154 8
	斜坡(S3)	-0.132 5	0.157 5	-0.098 8	0.106 7	-0.101 6	0.151 5	-0.115 9	0.155 9	-0.047 8	0.116 2
	陡坡(S4)	-0.135 5	0.159 8	-0.051 3	0.060 5	-0.102 6	0.134 2	-0.112 6	0.145 6	-0.068 7	0.055 3
	急坡(S5)	-0.106 8	0.147 3	-0.029 0	0.024 9	-0.102 2	0.100 0	-0.108 3	0.127 8	-0.082 0	0.029 9
	险坡(S6)	-0.059 6	0.174 2	-0.061 2	0.080 8	-0.101 1	0.060 1	-0.107 0	0.104 8	-0.096 7	0.016 0
	平均值	-0.106 7	0.134 0	-0.048 2	0.114 8	-0.100 7	0.130 4	-0.114 3	0.143 9	-0.062 0	0.087 3

2.4 不同坡向下森林植被对气候响应的坡度影响

从图2可以看出,选择森林植被分布集中的阴坡、半阳坡和阳坡区域,分别提取不同坡向下,各森林植被与气温、降水的相关系数在不同坡度上的分布见图3。

关关系,而与降水均呈正相关关系,与表2结果一致。阴坡与半阳坡各森林植被与气温的相关系数沿坡度变化过程较为相近。具体表现为,阴坡和半阳坡上,森林植被与气温的相关性均表现为常绿阔叶林 > 落叶阔叶灌木林 > 落叶阔叶林 > 针阔混交林 > 常绿针叶林,并且常绿阔叶林和常绿针叶林随坡度

从图3可以看出,不同坡向上,森林植被与气温均呈负相

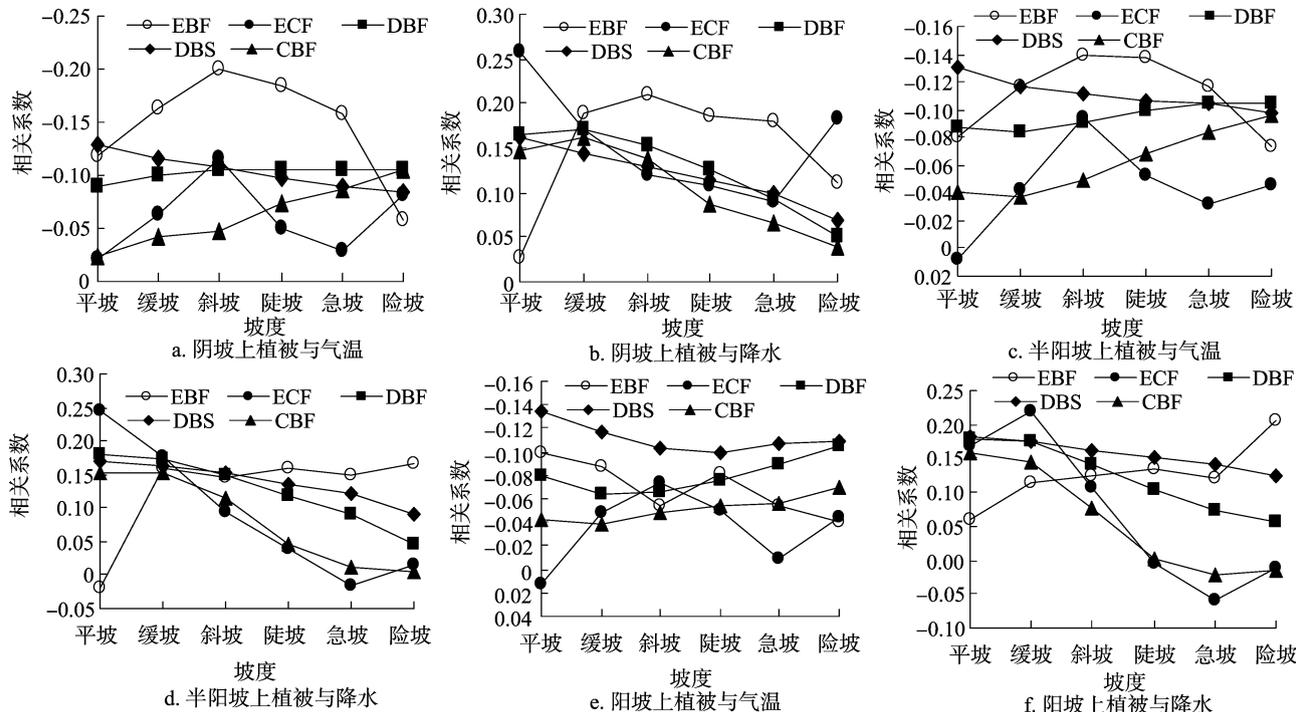


图3 不同坡向条件下森林植被与气温、降水的相关系数

的增加,与气温的相关性呈先增加后降低的抛物线变化过程,落叶阔叶灌木林与气温的相关性随坡度增加呈持续降低过程,而落叶阔叶林和针阔混交林呈持续的增加过程,尤其是针阔混交林(图3-a、图3-c)。阴坡和半阳坡上森林植被与降水相关系数大小具有较大差异,而随坡度增加的变化过程较为相近,其中除常绿阔叶林与降水相关系数随坡度增加先增加后减小或稳定外,其他4类森林植被与降水的相关系数均随坡度增加呈持续的下降过程,尤其是在半阳坡上,急坡和险坡上常绿针叶林和针阔混交林与降水的相关系数趋近于零(图3-b、图3-d)。阳坡上,森林植被与气温的相关性表现出一定的差异,表现为常绿阔叶林与气温的相关性随坡度的增加表现出与阴坡、半阳坡相反的过程,即沿坡度增加由开口向下的抛物线过程转变为开口向上的抛物线过程,其他4类森林植被与气温的相关性沿坡度变化过程与阴坡、半阳坡一致(图3-e)。森林植被与降水的相关性也表现出一定差异,表现为针阔混交林和常绿针叶林在陡坡、急坡和险坡与降水的相关性由阴坡、半阳坡的正相关转变为了负相关(图3-f)。分析结果表明,总体上秦岭山地森林植被与气温、降水在不同坡向上随坡度的变化过程差异较小,反映出该区域水热条件充足,而地形对植被发育的影响较小。

3 结论

基于2000—2014年秦岭山地MODIS NDVI、DEM、气温和降水数据,利用线性趋势法和相关系数对森林植被变化及其对气候响应的坡向、坡度影响进行了分析,分析结果:(1)秦岭山地森林植被以落叶阔叶林为主,占森林总面积的59.72%,落叶阔叶灌木林次之,常绿阔叶林面积最小。按坡向划分,森林植被主要分布在半阳坡上,约占50%。按坡度划分,森林植被主要集中在斜坡和陡坡上,二者分布面积占50%以上。(2)2000—2014年秦岭山地各森林植被NDVI均呈线性增加过程,并且在坡向和坡度上均表现为落叶阔叶灌木林线性增加速率最高,落叶阔叶林次之、常绿针叶林最低的特征,并且落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林、常绿阔叶林的主体部分均呈显著的线性增加趋势,而针阔混交林、常绿针叶林的增加过程不显著。(3)秦岭山地森林植被与气温在不同坡向和坡度上均呈负相关关系,而与降水呈正相关关系,反映该区域热量条件充足,而降水成为森林植被生长的主要限制因子。同时,在同一坡向上,随着坡度的增加,气温、降水与森林植被的相关关系变化趋势较为一致,表明秦岭山地地形影响下水热条件对森林植被生长发育的影响较小。

参考文献:

[1] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389–395.

[2] Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(10): 1188–1195.

[3] Stoker T F, Qin G K, Plattner M, et al. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]//IPCC Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[4] 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.

[5] Jacqueline G F, Antoine G, Niklaus E Z. Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18(4): 571–582.

[6] 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.

[7] Zhao X, Ma C H, Xiao L. The vegetation history of Qinling Mountains, China[J]. *Quaternary International*, 2014, 325(6): 55–62.

[8] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, 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.

[9] 李双双, 延军平, 万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J]. *地理科学*, 2012, 32(7): 853–858.

[10] Jiang C, Mu X M, Wang F, et al. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960—2012[J]. *Quaternary International*, 2016, 392(21): 155–167.

[11] 高翔, 白红英, 张善红, 等. 1959—2009年秦岭山地气候变化趋势研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 207–211.

[12] Pekin B K. Anthropogenic and topographic correlates of natural vegetation cover within agricultural landscape mosaics in Turkey[J]. *Land Use Policy*, 2016, 54: 313–320.

[13] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human – induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? a case study in South Africa[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(2): 271–297.

[14] Zhan Z Z, Liu H B, Li H M, et al. The relationship between NDVI and terrain factors—a case study of Chongqing[J]. *Procedia Environmental Science*, 2012, 12: 765–771.

[15] 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.

[16] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 272–281.

[17] Liu S L, Deng L, Zhao Q H, et al. Effects of road network on vegetation pattern in Xishuangbanna, Yunnan Province, Southwest China[J]. *Transportation Research Part D – Transport and Environment*, 2011, 16(8): 591–594.

[18] Stefanov W L, Netzband M. Assessment of ASTER land cover and MODIS NDVI data at multiple scales for ecological characterization of an and urban center[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(1/2): 31–43.

[19] Florinsky I V, Kuryakova G A. Influence of topography on some vegetation cover properties[J]. *Catena*, 1996, 27(2): 123–141.

[20] Xu X L, Ma K M, Fu B J, et al. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry warm river valley, SW China[J]. *Catena*, 2008, 75(2): 138–145.

[21] 王涛, 陶辉, 雷刚, 等. 博斯腾湖流域植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(4): 228–236.

[22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 37–70.