

基于 MODIS 产品的秦岭地区 NDVI、地表温度和蒸散变化关系分析

何慧娟,王 钊*,董金芳,王 娟

(陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心,陕西 西安 710014)

摘 要:秦岭是我国自然环境的天然分界区,是我国中部重要的生态屏障,也是南水北调重要的水源涵养区。为了更好地服务于生态环境建设,选取 MODIS 植被指数 NDVI、地表温度及地表蒸散数据产品,针对秦岭地区生态环境建设以来 2001—2013 年植被及水热条件发生的变化以及空间分布规律进行分析。结果表明,从区域平均情况来看,只有 NDVI 有显著升高的变化趋势,耕地区 NDVI 变化趋势大于林草区域。林草区 NDVI、蒸散平均值高于耕地区,而地表温度在耕地区高于林草区。从各像元的空间分布图来看,NDVI、地表温度和蒸散的空间分布都有明显的山体脉络。NDVI 随高度的增加而增大,2 000 m 左右开始略微下降。地表温度随高度的升高呈极显著的线性下降趋势,海拔每升高 100 m 温度下降 0.51℃。蒸散随海拔高度先是增高,在海拔 800~1 800 m 变化趋于平缓,随后随海拔的升高而降低。NDVI、地表温度和蒸散都在低海拔地区变化明显。2001—2013 年秦岭地区 NDVI 呈显著增加趋势,与陕西开展的生态环境建设工程密不可分。在全球增温的背景下,地表温度没有明显变化,与植被的调节作用有一定关系。蒸散的增加趋势与 NDVI 的上升引起蒸腾作用加大有关,而蒸散的减小趋势与太阳辐射的减小有关。

关键词:MODIS;秦岭;海拔高度;NDVI;地表温度;地表蒸散

中图分类号:S771.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)04-0179-06

NDVI, LST and ET Variation Analysis Based on MODIS Datasets in the Qinling Mountains

HE Hui-juan, WANG Zhao*, DONG Jin-fang, WANG Juan

(Shaanxi Agricultural Remote Sensing and Economic Crop Meteorological Service Center, Xi'an 710014, Shaanxi, China)

Abstract: The Qinling Mountains is not only the natural boundary of southern and northern China, but also is a significant ecological barrier in the middle of China, and an important water source conservation area of South-to-North Water Transfer Project. In order to serve the ecological environment construction with scientific and accurate information, NDVI (normalized difference vegetation index), LST (land surface temperature) and ET (evapotranspiration) of MODIS datasets were used to analyze the spatiotemporal variation laws and change relations of vegetation cover and hydrothermal condition after developing ecological environment construction in the Qinling Mountains area (2001—2013). It was found that generally, only NDVI presented extremely significant increasing trend in volatility, and in farmland it was more significant than in forest-grassland. NDVI and ET in forest-grassland were higher than in farmland, but LST in farmland was higher than in forest-grassland. From the point of the spatial distribution, spatial variations of NDVI, LST and ET presented mountainous features. NDVI increased with the increase of altitude, began to decline slightly at about 2 000 m. LST presented extremely significant linear downward trend with altitude. In addition, LST dropped 0.51℃ as altitude increased for every 100 m. With the increase of altitude, ET

收稿日期:2017-12-26 修回日期:2018-12-25

基金项目:陕西省气象局“火车头计划”环境遥感应用创新团队项目。

作者简介:何慧娟,女,硕士,高级工程师,研究方向:生态环境遥感监测及气候变化。E-mail:393621703@qq.com

* 通信作者:王 钊,男,高级工程师,研究方向:遥感应用。E-mail:sandtom@163.com

started to increase below 800 m and later flattened at 800—1 800 m, and then decreased in the end. NDVI, LST and ET changed obviously in low altitude. From 2001 to 2013, the improvement of NDVI in the Qinling Mountains area was the interactive effect of implementation of a series of ecological construction projects such as closing hill for forestation and restoring farmland into forestland and grassland. Under the background of global warming, no obvious change in LST, indicating a certain correlation with the regulation function of vegetation. The increase trend of ET caused by the improvement of NDVI, and the decrease trend of ET was associated with the decrease of solar radiation.

Key words: MODIS; the Qinling Mountains; altitude; NDVI; LST; ET

秦岭横亘于我国中部,是我国南北地质、气候、生物、水系、土壤等五大自然地理要素的天然分界线,是我国中部最重要的生态安全屏障,是南水北调中线工程的重要水源涵养区^[1]。1999 年国家实施天然林保护工程及退耕还林工程以来,秦岭地区生态环境得以恢复和发展,植被覆盖度^[2]、叶面积指数^[3]、净初级生产力^[4]等多个植被指标均呈上升趋势。因此分析生态环境工程建设以来秦岭地区植被及水热条件发生的变化,有助于加深对陆面过程的认识,对生态环境建设进一步开展具有重要意义。

植被是联系地气之间能量交换、水分循环和生物化学循环过程的纽带。大部分现有植被分布反映了土壤水分或温度的地域性梯度变化^[5],在山地地区海拔梯度是决定植被分布的主导因素,随着海拔的增加,水热因子发生变化,对应的植被也相应改变^[6-7]。同时植被变化也会使地表反照率、粗糙度及土壤湿度等产生变化^[8],从而影响地表能量和水汽收支平衡^[9]。近年来,许多学者都对秦岭地区开展了大量研究^[10-14],加深了对秦岭生态环境的认识,对秦岭地区生态环境保护具有重要意义。传统对于秦岭区域水热变化的分析多基于站点资料,在山地地区,站点分布少且不均匀,多在低海拔山谷盆地地区,因而不能很好的表现整个区域的变化规律,特别是随海拔高度变化的规律。现如今,遥感技术的迅速发展,可以提供大范围的地表特征参数,其中 MODIS 数据具有较高的时空分辨率,并提供海洋、陆地、大气、生物和冰雪等 40 余种数据产品,而且具有免费获取等优势,对于综合认识秦岭地区植被与水热变化规律具有明显的优势。因此,本研究将选取 MODIS 植被指数、地表温度及蒸散数据产品,针对秦岭地区生态环境建设以来植被及水热条件发生的变化以及空间分布规律进行分析,并细致地讨论植被及水热随海拔梯度的变化规律,从而更好地服务于生态环境建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭主体位于陕西省南部,研究区参考 DEM

及植被类型图对陕西省境内秦岭区域进行划分,区域范围如图 1、图 2 所示。北边以秦岭山脉北源为界,与关中盆地相接,南边以秦岭和巴山之间的汉江为界。区域平均海拔 1 235 m,海拔高度由东南向西北递增,最高点位于秦岭主峰太白山,海拔 3 767 m。秦岭是我国南北气候的分界线,以南为亚热带湿润季风气候,以北为暖温带半湿润、半干旱季风气候。植被以北亚热带落叶阔叶、常绿阔叶混交林,暖温带落叶阔叶林为主。从植被类型图来看,林草分布在海拔高度较高的地区,耕地主要分布在东部和南部山谷地区。按海拔高度统计来看,林草集中在高海拔地区,海拔 700 m 以上林草多于耕地,在海拔 1 300 m 左右林草占比达到峰值,海拔 1 000 m 以上林草面积占总林草面积的 84.5%。耕地集中在低海拔地区,海拔 1 500 m 以下耕地面积占总耕地面积的 93.9%,海拔 700 m 以下耕地面积多于林草,在海拔 600 m 左右耕地占比达到峰值。

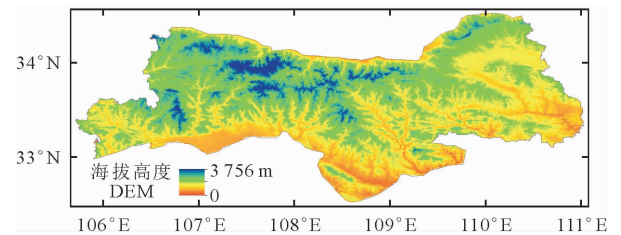


图 1 研究区海拔高度分布

Fig. 1 Altitude of the study area

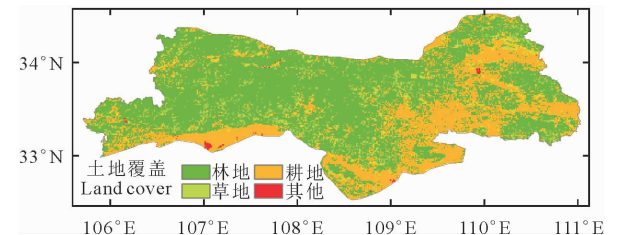


图 2 研究区土地覆盖类型分布

Fig. 2 Land cover types of the study area

1.2 数据及方法

MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 2 颗卫星上的中分辨率成像光谱仪,卫星每天过境 2 次。具有 36

个波段、拥有 250、500、1 000 m 3 种分辨率。本研究对秦岭地区植被及水热变化的分析采用了 3 种 MO-

DIS 数据产品 MOD13Q1、MYD11A2 及 MOD16A3, 数据使用情况见表 1。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

名称	年份	分辨率/m	来源	用途
MOD13Q1/NDVI	2001—2013	250	Terra/MODIS	植被长势分析
MYD11A2/LST	2001—2013	1 000	Aqua/MODIS	地表温度分析
MOD16A3/ET	2001—2013	1 000	Terra/MODIS	地表蒸散分析
MOD12Q1/LUCC	2001	1 000	Terra/MODIS	土地利用类型划分
DEM	2002	1 : 50 000	基础测绘数据	海拔高度层次变化分析

MOD13Q1 为 Terra 卫星 16 d 合成的 250 m 植被指数产品,提取其中归一化植被指数(normalized difference vegetation index,简称 NDVI)数据用于分析植被生长状况。NDVI 的计算使用了 MODIS 红光、近红外反射率数据,经过水、云、重气溶胶,以及云阴影掩膜处理的双向大气校正表面反射率计算得来^[15]。

MYD11A2 为 Aqua 卫星 1 km 地表温度(Land Surface Temperature,简称 LST)8 d 合成产品,是由每日 1 km 地表温度/发射率产品(MYD11A1)合成的,存储的是 8 d 中晴好天气下的地表温度/发射率的平均值。MYD11A2 有白天和夜间地表温度数据^[16]。

MOD16A3 为 1 km 年合成蒸散数据产品。蒸散(evapotranspiration,简称 ET)的计算是基于 Penman-Monteith 公式,使用的是 2011 年 Q. Z. Mu^[17-18]等在 2007 年算法的基础上改进的蒸散算法^[17-18]。蒸散包括地表蒸发和植物蒸腾。陆地蒸散水分来源于土壤、植被拦截未达地面的雨水、植被茎叶的气孔。

3 种 MODIS 数据产品都使用 2001—2013 年数据,轨道号为 h26v05 和 h27v05,数据在 MODL-AND 提供的 MRT (MODIS REPROJECTION TOOL)投影转换工具中对 h26v05 和 h27v05 两区图像进行拼接和投影转换,转换为等经纬度坐标投影,基准面为 WGS-84 坐标系。为了与地表温度和蒸散数据统一,NDVI 数据重采样为 1 km,并利用最大值合成法(MVC)提取了年 NDVI 最大值,用于反映当年植被生长最好的状况。计算了地表平均温度数据,为白天和夜间地表温度的平均值,并计算了地表温度的年平均值,用于分析年际变化规律。

另外还使用了 MODIS 数据产品中 2001 年 MOD12Q1 土地覆盖数据,用于反映研究时间段开始时地表植被覆盖情况。土地覆盖数据按 IGBP (国际地圈生物圈计划)定义分为 17 类,为了研究需要,将土地利用类型合并为林草、耕地及其他地物

类,研究区域内土地覆盖类型基本为林地和耕地,占总面积 99%以上。分析还用到了 1 : 50 000 基础测绘 DEM 高程数据及区域内 20 个气象站点 1984—2013 年年平均气温和年降水数据。

变化趋势的分析是利用最小二乘法拟和线性回归方程的方法,得到变量随时间变化的倾向率,它反映了变量上升或下降的速率,即表示上升或下降趋势的快慢。采用相关系数的统计检验方法进行趋势显著性检验,当 $P>0.1$ 为没有通过显著性检验,称为不显著; $P=0.1$ 为显著性检验的最低标准;当 $P\leq 0.1、0.05、0.01、0.001$ 时,分别称为达到显著、较显著、很显著、极显著水平。

2 结果与分析

2.1 区域平均年际变化特征

2001—2013 年秦岭地区 NDVI 有很显著的上升趋势($P<0.01$),2001—2013 年 NDVI 平均值为 0.873,2001—2006 年 NDVI 均低于平均值,2007 年以后除 2008 年 NDVI 均高于平均值,最小值在 2001 年(0.855),最大值在 2010 年(0.904)。2001—2013 年秦岭地区地表温度变化趋势并不明显,2001—2013 年地表温度年平均值为 12.87℃,最小值在 2010 年(12.09℃),最大值在 2013 年(13.68℃)。除 2013 年外,近 5 a 地表温度都低于平均值。2001—2013 年年蒸散量也无明显的变化趋势,最小值在 2001 年(612.38 mm),最大值在 2002 年(682.34 mm)。除 2012 年外,近 5 a 地表蒸散都低于平均值(图 3)。

由表 2 可知,林草面积占区域总面积的 77.112%,耕地占总面积的 28.713%。林草区域 NDVI、蒸散平均值高于耕地区域,而地表温度在耕地区域高于林草区域,这与普遍认识较为一致^[19-20]。从变化趋势来看 NDVI 在林草区域和耕地区域都有很显著的增高趋势,从倾向率来看,耕地区域大于林草区域,说明耕地区域植被变化更为明显。地表温度和蒸散在林草区和耕地区整体没有明显的变化趋势。

表 2 NDVI、LST、ET 植被类型统计结果
Table 2 NDVI,LST,ET in different vegetation types

植被类型	面积占比/%	归一化植被指数		地表温度/℃		地表蒸散/mm	
		多年平均	变化趋势	多年平均	变化趋势	多年平均	变化趋势
林草	77.112	0.887	0.002 3***	12.204	-0.017	6 768.713	-8.457
耕地	28.713	0.839	0.003 9***	14.486	-0.031	6 184.237	3.403

注：* 为 $P\leqslant 0.1$ ；** 为 $P\leqslant 0.05$ ；*** 为 $P\leqslant 0.01$ ；**** 为 $P\leqslant 0.001$ 。

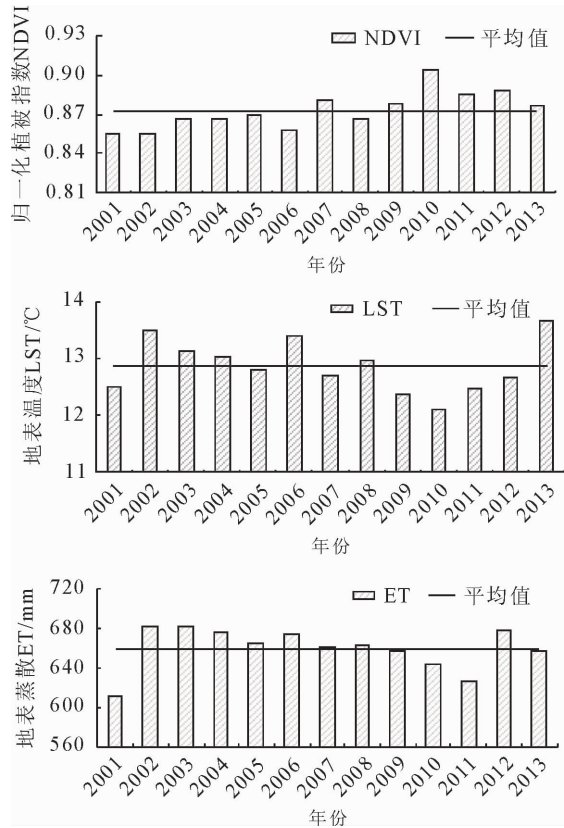


图 3 2001—2013 年研究区归一化植被指数、地表温度、地表蒸散年际变化

Fig. 3 Annual variation of NDVI,LST,ET of the study area during 2001—2013

总的来说,2001—2014 年植被呈明显增加趋势,在耕地区域变化趋势更大,这与陕西开展的生态环境建设工程密不可分^[2]。在全球处于明显的升温过程中^[21],秦岭地区 2001—2013 年温度却没有明显上升,这可能与植被的变化有关,植被对温度具有调节作用,特别是在植被明显上升的情况下。蒸散变化是一个复杂的过程,植被长势变好时植被的蒸腾作用加剧,从而蒸散量增加,但同时植被的增加又会使局地温度下降,不利于蒸散。

2.2 空间分布特征

从各像元多年平均的空间分布图来看(图 4),地表温度与海拔高度有着密切的联系,地表温度随海拔高度升高而降低,这也与普遍规律一致。NDVI 也与海拔高度联系紧密,NDVI 随海拔高度的升高而升高,同时 NDVI 也受水热条件的制约,随着

海拔的升高环境不利于植被生长,NDVI 在达到一定高度时下降。蒸散的空间分布特征分 2 个方面:一方面从植被分布来说,在林草区域蒸散高于耕地区域,在 NDVI 较高的地区高于较低的地区;另一方从海拔高度上看,蒸散的空间变化有明显的山体脉络,在温度较高的低海拔地区蒸散也较高。

从图 4 可以看出,NDVI 在大部分区域呈明显增高的趋势,在低海拔耕地区域变化尤为明显,可以明显看到政府开展生态环境工程的成效。地表温度有明显变化的区域不多,集中在耕地区域 NDVI 有明显变化的地区,说明 NDVI 的极显著的升高趋势会使得局地地表温度降低。另外,在全球温度上升的背景下,研究区域温度没有明显变化也可以体现出植被的降温作用。蒸散变化趋势的空间分布也较为复杂,蒸散在耕地区呈增加的趋势符合之前的分析结果,在地表温度没有明显变化的条件下,耕地变为林草,NDVI 的增加更利于植被从土壤中吸取水分,蒸散随之增大。而在东部耕地以外的地区,蒸散呈减小的趋势,而这些区域 NDVI 变化幅度并不大,这可能与太阳辐射有关。有研究证明,在全球升温的背景下蒸散的减小是与云量或气溶胶的增加引起的辐射量的下降有关^[14]。

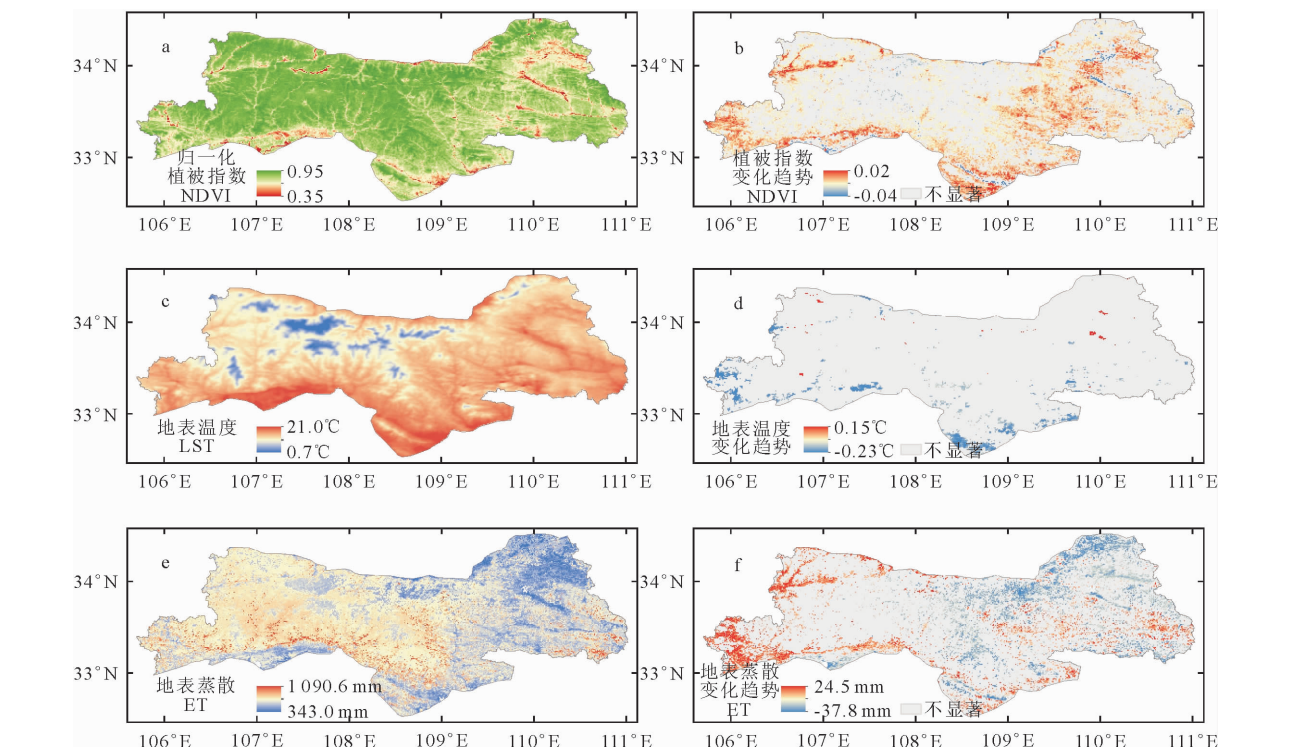
总体来说,NDVI、地表温度和蒸散的空间分布都有明显的山体脉络,说明在秦岭地区海拔高度是影响植被与水热空间变化最重要的因素,因此下来将继续针对海拔高度进行分层讨论。

2.3 随海拔高度的变化特征

对海拔高度进行划分,由于 300 m 以下及 2 600 m 以上面积较小,因此将 0~300 m 划分为一层,2 600 m 以上划分为一层,300~2 600 m 按 100 m 的间距进行划分,最终划分 25 层。计算各层 NDVI、地表温度和蒸散的平均值,并统计各层变化显著区域占所在层面积的百分率。从图 5 可以看出,NDVI 随高度的增加而增大,在达到 2 000 m 左右的高度时随高度的增高 NDVI 值略微下降。地表温度随高度的升高呈极显著的线性下降趋势,海拔每升高 100 m 温度下降 0.512 8℃,这也与大部分研究结论相似^[7,10]。蒸散随海拔高度先是增高,在海拔 800~1 800 m 变化趋于平缓,随后随海拔的升高

而降低。结合 NDVI 和地表温度随高度变化的规律分析得出,在海拔较低的地区,地表温度能够满足植被生长需要,随着 NDVI 的增高,植物蒸腾加剧,蒸散也随之增大。随着高度的继续升高,地表温度持续下降,植物为了减少热量的散失,蒸腾作用减

小,因此即使 NDVI 还在升高,但是蒸散总量开始没有明显的变化。随着海拔的继续升高,地表温度持续降低,NDVI 也开始下降,各种条件都不利于蒸散的形成,蒸散总量开始下降。



注: a. 归一化植被指数多年平均; b. 归一化植被指数变化趋势; c. 地表温度多年平均; d. 地表温度变化趋势; e. 地表蒸散多年平均; f. 地表蒸散变化趋势。

图 4 研究区空间分布特征

Fig. 4 Distribution of the study area

从图 5 可以看出,NDVI 主要呈增加趋势,在低海拔地区变化明显,变化显著区域先是随海拔的升高面积占比增加,在海拔 700 m 左右面积占比达到最大,显著变化区域占所在层面积的 80.45%,海拔 700 mm 后随海拔的升高占比下降。地表温度显著变化的区域面积占比较小,主要呈降低的趋势,在低海拔地区较为明显,显著变化区域随海拔高度的升高占比显著下降,在海拔 0~300 m 时占比 22.75%,到海拔 1 000 m 左右时占比减至 5.52%。在低海拔地区,蒸散变化相对明显,并且显著增加区域与显著减小区域的面积占比情况相当,通过与 NDVI 和地表温度的比较看到,蒸散显著增加区域占比的变化情况与 NDVI 的变化相一致,而蒸散显著减小区域占比的变化情况与地表温度的变化相一致;而在高海拔地区,大致在海拔 1 200 m 以上,蒸散主要呈减小的趋势,显著减小的面积占 25% 左右,而这高度以上 NDVI 和地表温度变化已经相对不明显。这一特征也与之之前讨论一样,与太阳辐射

的减小有关。

3 结论与讨论

通过对生态环境建设以来,秦岭地区 NDVI、地表温度及蒸散的时空变换特征分析,得到以下结论:

从区域平均情况来看,在全球升温的背景下,2001—2013 年 NDVI 整体有很显著的上升趋势,而地表温度和蒸散没有显著的变化趋势。林草区 NDVI、蒸散平均值高于耕地区,而地表温度在耕地区高于林草区。耕地区 NDVI 变化趋势大于林草区域,而地表温度和蒸散在林草区和耕地区都没有明显的变化趋势。

从各像元的空间分布图来看,NDVI、地表温度和蒸散的空间分布都有明显的山体脉络。NDVI 随海拔高度的升高而升高,在达到一定高度时下降;在大部分区域呈明显增高的趋势,在低海拔耕地区域变化尤为明显。地表温度随海拔高度升高而降低;有明显变化的区域不多,集中在耕地区域 NDVI 有

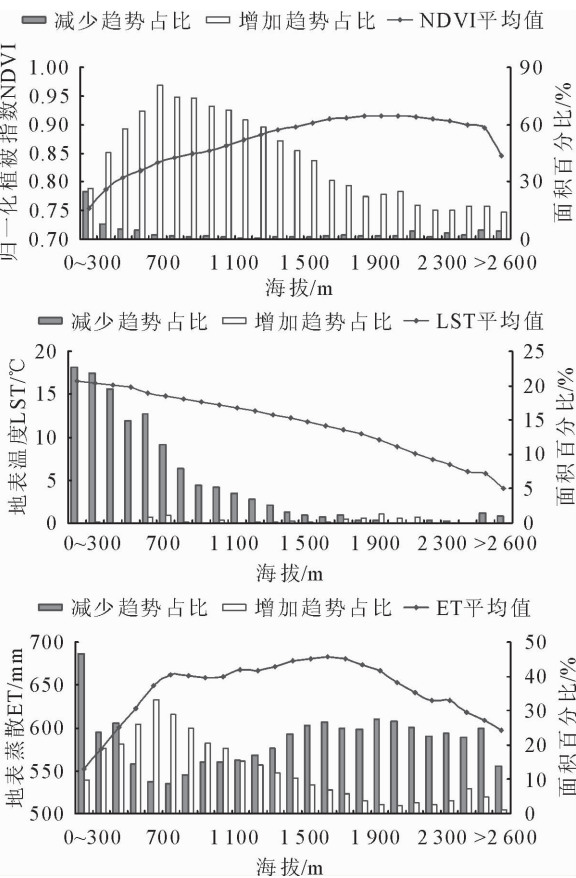


图5 归一化植被指数、地表温度、地表蒸散
随海拔高度的变化

Fig. 5 Variation of NDVI, LST, ET on different altitudes

明显变化的地区。蒸散在 NDVI 较高的地区偏高，在温度较高的低海拔地区也偏高。蒸散在耕地区呈增加的趋势，而在东部耕地以外的地区，蒸散呈减小的趋势。

从海拔高度的分层讨论来看，NDVI 随高度的增加而增大，2 000 m 左右开始略微下降；NDVI 主要呈增加趋势，在低海拔地区变化明显，700 m 左右变化达到最大。地表温度随高度的升高呈极显著的线性下降趋势，海拔每升高 100 m 温度下降 0.512 8℃；地表温度显著变化的区域面积占比较小，主要呈降低的趋势，在低海拔地区较为明显。蒸散随海拔高度先是增高，在海拔 800~1 800 m 变化趋于平缓，随后随海拔的升高而降低；在低海拔地区，蒸散显著增加区域占比的变化情况与 NDVI 的变化相一致，而蒸散显著减小区域占比的变化情况与地表温度的变化相一致；而在高海拔地区，蒸散主要呈减小的趋势。

总体看来，2001—2013 年秦岭地区 NDVI 呈显著增加趋势，与陕西开展的生态环境建设工程密不可分。在全球增温的背景下，地表温度没有明显变化，与植被的调节作用有一定的关系。蒸散的增加趋势与 NDVI 的上升引起蒸腾作用加大有关，而蒸

散的减小趋势与太阳辐射的减小有关。

参考文献：

[1] 刘康,马乃喜,胥艳玲,等. 秦岭山地生态环境保护与建设[J]. 生态杂志,2004,23(3):157-160.
LIU K,MA N X,XU Y L,*et al.* Protection and construction of eco-environment in Qinling Mountainous area [J]. Chinese Journal of Ecology,2004,23(3):157-160. (in Chinese)
[2] 李登科,范建忠,王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2896-2903.
LI D K,FAN J Z,WANG J. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (11):2896-2903. (in Chinese)
[3] 董金芳,袁媛,何慧娟,等. 基于 MODIS 的陕西省叶面积指数时空变化特征分析[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):79-85.
DONG J F,YUAN Y,HE H J,*et al.* Analyses of spatial-temporal changes of leaf area index in Shaanxi Province based on MODIS[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3):79-85. (in Chinese)
[4] 王娟,卓静,何慧娟,等. 2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):238-245.
WANG J,ZHUO J,HE H J,*et al.* Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2013 in Qinling Mountainous[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(5):238-245. (in Chinese)
[5] BONAN G B. Ecological Climatology: Concepts and Applications[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2002.
[6] 朱晓勤,刘康,李建国,等. GIS 支持下的秦岭山地植被分布与环境梯度关系研究[J]. 水土保持研究,2009,16(2):169-175.
ZHU X Q,LIU K,LI J G,*et al.* Analysis on vegetation-environment gradient correlation in Qinling Mountain based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16 (2): 169-175. (in Chinese)
[7] 池秀莲,唐志尧. 面积、温度及分布区限制对物种丰富度海拔格局的影响:以秦岭太白山为例[J]. 植物生态学报,2011,35(4):362-370.
[8] SELLERS P J. Biophysical models of land surface processes [C]//TRENBERTH K E. Climate System Modeling. Cambridge:Cambridge University Press,1992:451-490.
[9] LEAN J,ROWNTREE P R. Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics[J]. J Climate,1997,10(6):1216-1235.
[10] 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.
[11] 麻坤,赵鹏祥,季菲菲,等. 基于植被指数的秦岭森林健康评价方法研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):145-150.
MA K,ZHAO P X,JI F F,*et al.* Forest health assessment method in Qinling Mountains based on the vegetation indices [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):145-150. (in Chinese)

the error in variable model[J]. Ecological Modelling, 2002, 156:225-236

[14] 唐守正,李勇. 生物数学模型的统计学基础[M]. 北京:科学出版社,2002:234-261.

[15] 李永慈,唐守正,李海奎,等. 用度量误差模型方法编制相容的生长过程表和材积表[J]. 生物数学学报, 2004, 19(2): 199-204

LI Y C, TANG S Z, LI H K, *et al.* Using the method of measurement error model to compile the compatible growth table and volume table[J]. Journal of Biomathematics, 2004, 19(2):199-204. (in Chinese)

[16] 蒋益,邓华锋,高东启,等. 用度量误差模型方法建立油松树高曲线方程组[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 126-129.

JIANG Y, DENG H F, GAO D Q, *et al.* Constructing height-diameter curve equations with measurement error models for Chinese pine stands[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(5): 126-129. (in Chinese)

[17] 李永慈,唐守正. 带度量误差的全林整体模型参数估计研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 23-27.

LI Y C, TANG S Z. Parameter estimate of the whole stand model with measurement error[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(1): 23-27. (in Chinese)

[18] 李安明,郭小龙,张岗岗,等. 小陇山林区日本落叶松人工林全林整体模型的建立与验证[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 26-29, 40.

LI A M, GUO X L, ZHANG G G, *et al.* Establishment of the whole *Larix kaempferi* stand model in Xiaolongshan region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 26-29, 40. (in Chinese)

[19] 王金池,冉啟香,邓华锋,等. 基于度量误差方法的油松林分生长模型[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 68-74.

WANG J C, RAN Q X, DENG H F, *et al.* Stand growth model for *Pinus tabulaeformis* using measurement error method [J]. Journal of Zhejiang A&F University. 2018, 35(1): 68-74. (in Chinese)

[20] 高东启. 北京市蒙古栎、油松林分生长预估模型研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.

[21] 朱光玉,胡松,符利勇. 基于哑变量的湖南栎类天然林林分断面面积生长模型[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2018, 42(2): 155-162.

ZHU G Y, HU S, FU L Y. Basal area growth model for oak natural forest in Hunan Province based on dummy variable [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2018, 42(2): 155-162. (in Chinese)

(上接第 184 页)

[12] 杜乐山,关潇,李俊生,等. 秦岭高山林线区域温度变化研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 43-47.

DU L S, GUAN X, LI J S, *et al.* Temperature variation in the timberline area of Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 43-47. (in Chinese)

[13] 蒋冲,王飞,喻小勇,等. 秦岭南北近地面水汽时空变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3805-3815.

JIANG C, WANG F, YU X Y, *et al.* Spatial and temporal variation of surface water vapor over Northern and Southern regions of Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3805-3815. (in Chinese)

[14] 蒋冲,王飞,刘思洁,等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 0844-0855.

JIANG C, WANG F, LIU S J, *et al.* Evaporation paradox in the Northern and Southern regions of the Qinling Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 0844-0855. (in Chinese)

[15] BHANDARI S, PHINN S, GILL T. Assessing viewing and illumination geometry effects on the MODIS vegetation index (MOD13Q1) time series; implications for monitoring phenology and disturbances in forest communities in Queensland, Australia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(22): 7513-7538.

[16] NETELER M. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data[J]. Remote Sensing, 2010, 2(1): 333-351.

[17] MU Q Z, HEINSCH F A, ZHAO M S *et al.* Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111: 519-536.

[18] MU Q Z, ZHAO M S, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 1781-1800.

[19] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627.

[20] 范建忠,李登科,高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1536-1543.

[21] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). climate change 2013: the physical science basis[J]. Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment, 2013.