DOI: 10.5846/stxb201706261150
彭擎,王让会,蒋烨林,吴晓全.植被-地温指数(NDVI-LST)在新疆干旱监测中的适应性.生态学报,2018,38(13): - .
Peng Q, Wang R H, Jiang Y L, Wu X Q.Adaptability of drought situation monitor in Xinjiang with the NDVI-LST index.Acta Ecologica Sinica,2018,38(13): - .

植被-地温指数(NDVI-LST)在新疆干旱监测中的适应性

彭 擎[1,2],王让会[1,2,*],蒋烨林[1,2],吴晓全[1]
1 南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044
2 大气环境与装备技术协同创新中心,南京 210044

摘要:采用 MODIS 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)和地表温度(Land Surface Temperature,LST)产品数据分析新疆 2000—2015 年生长季 3 阶段 NDVI 与 LST 的时空变化特征及相关关系;利用多元线性回归方法分析不同时期影响 NDVI-LST 相关关系的气象因子;并按不同土地覆盖与土地利用(Land-Use and Land-Cover Change,LUCC)类型分析 NDVI-LST 相关关系时空变化特征。结果表明:(1)生长季 3 时期 LST 与 NDVI 均存在显著相关关系,可利用两者的特殊关系进行干旱评估。(2)不同时期气象因子对 NDVI-LST 相关关系影响程度不一;并且不同 LUCC 类型的 NDVI-LST 相关关系也存在明显差异。(3)在生长季中期利用植被健康指数(Vegetation Health Index,VHI)对新疆大部分地区的植被健康和干旱进行监测是可行有效的,而初期与末期的干旱评估需要利用其它干旱指数进行补充研究。

关键词:地表温度;归一化植被指数;植被健康指数;干旱监测;生长胁迫

Adaptability of drought situation monitor in Xinjiang with the NDVI-LST index

PENG Qing[1,2], WANG Ranghui[1,2,*], JIANG Yelin[1,2], WU Xiaoquan[1]
1 *School of Applied of Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2 *Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing* 210044, *China*

Abstract: In this study, the spatial-temporal characteristics of vegetation status, drought conditions, and their correlation were studied through three phases of the normalized difference vegetation index (NDVI), land surface temperature(LST)-moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) database during the growing season in Xinjiang from 2000 to 2015. In addition, a multivariate linear regression method was used in this study to analyze the meteorological factors that could influence the relationship between NDVI and LST of different phases. The spatial-temporal characteristics of the relationship between NDVI and LST were analyzed by dividing different land use cover changes (LUCC). The results showed that (1) there was a significant correlation between LST and NDVI in the third quarter of the growth season, and drought conditions could be evaluated using the relationship between NDVI and LST. (2) The influence of meteorological factors on the NDVI-LST correlation was different in various phases in Xinjiang. Moreover, there were significant differences in NDVI-LST correlations among different LUCC. (3) It was effective to monitor vegetation health and drought conditions in most areas of Xinjiang using a vegetation health index in the middle of the growing season, whereas earlier and latter drought assessments needed to be supplemented by other drought indices.

基金项目:中国清洁发展机制基金(2013013);国家科技支撑计划(2012BAD16B0305;2012BAC23B01)资助
收稿日期:2017-06-26; **网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: rhwang@nuist.edu.cn

Key Words: surface temperature; normalized difference vegetation index; vegetation health index; drought monitoring; growth stress

干旱作为一种持续性异常干燥天气,会导致农业、林业的严重损失,造成生态系统的破坏和水文水分循环的不均衡性。干旱的严重程度取决于水分亏缺程度、持续时间以及受灾区域的大小[1]。在全球气候变化的背景下,全球干旱化趋势日益严重[2],干旱的动态演替和大尺度范围监测成为全球变化研究中的热点问题。一些干旱指数依赖地面监测获取,一些通过能量平衡模型获取,还有些干旱指数通过遥感监测数据单独使用或结合能量平衡模型获得[3-4]。卫星遥感数据获取干旱指数通常使用多波段运算而得。干旱状况通常与植被状态或盖度相关,而植被指数由卫星的可见光和近红外通道探测数据进行线性或非线性组合获得,能够提供植被的生长状况和盖度等信息[5],因此植被指数被广泛应用于干旱监测与模拟。

NDVI 是最常见植被指数,Tucker 等[6]和 Choudhury 等[7]发现 NDVI 可以作为识别和量化干旱区、半干旱区干旱扰动的响应因子。Kogan 等[8]提出利用 NDVI 反演植被状态指数(Vegetation Condition Index,VCI),成为最为广泛应用的一种干旱遥感监测指数,同时许多研究和业务应用结果表明,应用 VCI 表征干旱具有较好的效果[9-11]。LST 在一定程度上反映土壤含水量的变化状况,揭示植被的潜在覆盖量,而其热反应的敏感程度也有助于及时发现干旱发生时 LST 异常升高[12-13]。kogan[14]将 VCI 归一化方法应用于 LST 得到温度状态指数(Temperature Condition Index,TCI),依据植被冠层或土壤表面温度随水分胁迫的增加而升高的原理来表征土壤水分状态。单独利用 NDVI 或 LST 进行干旱监测,无法全面、及时地显现干旱的动态变化,因此将 NDVI 与 LST 的空间特征相结合进行干旱监测能够提高旱情监测的准确性与实用性。研究表明,NDVI 与 LST 之间具有明显的负相关关系,通常当地表蒸散减少,地表感热通量增加,进而导致地表温度升高,而植被气孔阻力是植被蒸腾作用的关键控制因素,土壤湿度是影响植被气孔阻力和土壤蒸发的主要因素,因此 NDVI 与 LST 两者之间的关系与土壤湿度密切相关[15]。

NDVI-LST 空间像元散点图的典型“三角形”或“梯形”分布被应用于模拟土壤-植被-大气蒸发和蒸腾的交互作用[16-17]。NDVI 的大小与生物量有关,可以表示植被长势好坏,而 LST 变化与土壤的蒸发或植被蒸腾相关,蒸腾量越小,LST 越高,植被受到水分胁迫越严重。在干旱监测方面,NDVI-LST 的负相关关系受到了极大关注,在干旱状态下,NDVI 值通常比正常情况下低,土壤蒸发和植被蒸腾显著,LST 高于正常值。McVicar 和 Bierwirth[18]利用 LST 与 NDVI 的简单比例来研究干旱状况。Kogan[14]提出利用 VCI 和 TCI 构建 VHI,VHI 已经被广泛应用于干旱监测、干旱严重程度及持续时间评估以及干旱早期预警等多方面[19-20]。VHI 的有效性依赖于 NDVI-LST 所对应的负相关关系。而对于 NDVI-LST 的长时间尺度的时空状况研究过程,NDVI-LST 之间的关系并不是一成不变的,往往存在非负关系。其在温暖季节存在强烈的负相关关系,而冬季则呈现正相关关系。关于 NDVI-LST 关系的全球分布研究表明[21-22],干旱地区和中纬度地区呈现出负相关关系,热带和高纬度地区呈现正相关关系。总体而言,在植被生长受到能量(辐射、温度)限制的地区 NDVI-LST 的相关关系趋势为正。因此,VHI 应用是有限制的,只有在 NDVI-LST 呈现负相关关系的时段和地区才能很好地用于干旱监测。

新疆地处亚欧大陆腹地,受全球气候变化的影响较大,旱涝灾害日趋严峻。不少研究利用 SPI(Standard Precipitation Index)、SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)、CI(Meteorological Drought Composite Index)、S(S Drought Index)、PDSI(Palmer Drought Severity Index)等[23-27]干旱指数对全疆或局部地区进行干旱特征分析,研究利用相关指数对新疆进行干旱等级划分,对不同年份各区域的干旱等级和面积变化进行分析。而本研究利用 MODIS 数据集来计算新疆 NDVI-LST 的一般性关系,进而进行干旱监测和评估,对生长季不同时期气象因子对 NDVI-LST 相关系数空间分布贡献率进行研究,同时探索不同植被覆盖类型下 NDVI-LST 相关系数变化规律,以期能够为新疆干旱的准确监测和制定干旱应对措施提供科学依据。

1　研究区概况

新疆地处亚欧大陆中部(34°25′N—49°10′N,73°40′E—96°23′E),位于我国西北边陲,总面积为 1.66×10^6 km^2,约占全国面积的 1/6。新疆地形为山脉与盆地相间,北有阿尔泰山,南有昆仑山,中部天山贯穿全疆,将新疆分为南北两个部分,南部为塔里木盆地,北部为准格尔盆地。新疆地处内陆,远离海洋,气流受到高山阻隔而形成温带大陆性干旱气候,年平均降水量约为 159.0 mm,年均气温为 9.8℃,年均日照时数为 2751.4 h。据统计数据分析,新疆历年来发生多次干旱灾害,1950 年至 2000 年期间有记载的干旱灾害次数为 47 次,且自 20 世纪 80 年代后开始,特大干旱灾害发生频次明显增大[28]。

2　数据来源与方法

2.1　NDVI 和 LST 数据

从中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)获取自 2000 年至 2015 年生长季(4—9 月)新疆地区 MOD13A2 NDVI,MOD11A2 LST 产品数据,空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率分别为 16 d 和 8 d。利用 MRT 工具对数据进行格式与投影转换,利用 ENVI 5.1 对数据进行拼接和裁剪,利用 MVC 法获得月 NDVI 数据和地温数据。

2.2　气象数据

根据中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.ov. cn/index.jsp)提供的新疆 59 个标准气象站 2000—2015 年的逐日气温和降水数据,以及 13 个站点的太阳辐射数据,整理得到生长季的月数据,利用 IDW 插值获得与 MODIS 数据空间分辨率、投影一致的月降水量、月平均气温和月太阳辐射的栅格图。

2.3　土地覆盖与土地利用数据

采用中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)提供的 2010 年新疆地区土地覆盖与土地利用数据(LUCC),进行重分类获得耕地、林地、草地、居民用地、未利用地、水域 6 种一级土地利用类型(MODIS 数据中水体植被指数小于 0,被认定为地表含水量 100%,故分析数据时不考虑植被指数小于 0 的部分)。具体分布情况如图 1。

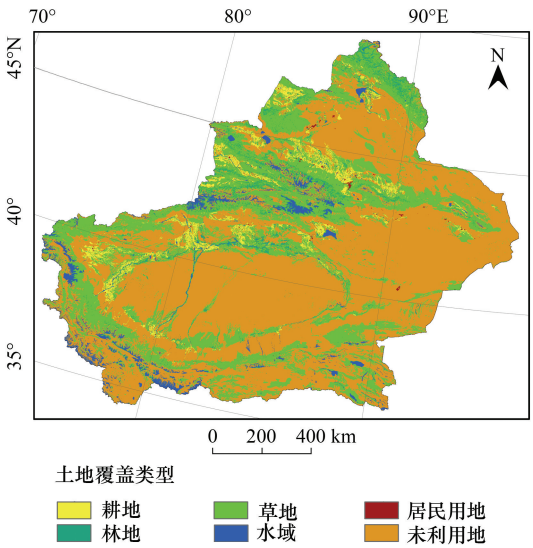

图 1　新疆土地覆盖与土地利用数据图

Fig.1　Land use and cover of Xinjiang

2.4　分析方法

NDVI 与 LST 相关性分析。对 MODIS 数据产品进行前期处理后,计算获得多年生长季初期(4—5 月)、中期(6—7 月)与末期(8—9 月)NDVI 与 LST 平均值空间分布图。利用 IDL 进行编程处理,获得 NDVI 与 LST 生长季 3 个时期像元对应的密度散点图,以及 3 个时期 NDVI 与 LST 相关系数分布图。

对影响 NDVI 与 LST 相关系数的因子进行分析。将生长季初期、中期、末期的 NDVI-LST 相关系数分布图与对应时期气温、降水、太阳辐射分布图栅格转点,利用 SPSS 对获得的数据进行多元线性回归分析[29]。

3　结果与分析

3.1　LST 与 NDVI 的时空关系

根据生长季不同时期 NDVI 多年均值分布图(图 2(a-c))可知,新疆植被盖度具有北疆远高于南疆、西部

及西北部地区明显高于东部及东南部地区的特征。NDVI 高值出现在天山、阿尔泰山区域,表明该区域具有较好的植被覆盖,NDVI 最大值出现在伊犁河谷地区。生长季中期、末期 NDVI 较高值区面积较生长季初期有所增加。

由图 2(g-i)知,研究区内 NDVI-LST 的相关关系符合三角形/梯形特征,生长季初期 NDVI 值主要集中在 0—0.6,生长季中期与末期 NDVI 范围明显增大,NDVI-LST 所构成的特征空间也向 NDVI 高值区扩展。总体而言,NDVI-LST 存在干、湿边不同的变化趋势:干边区域 NDVI 与 LST 变化趋势相反,而湿边区域 NDVI 与 LST 具有相同变化趋势。

由图 3 可知,生长季初期 NDVI-LST 呈现正相关占研究区 41.781%,不(弱)相关占研究区 38.031%,而负相关区域仅占 20.188%。其中正相关主要分布在阿尔泰山、塔里木盆地区域,负相关区域主要为天山、昆仑山脉北部及准格尔盆地等地区。生长季中期,正相关占区域 32.153%,不(弱)相关区域约为 26.579%,负相关区域为 41.268%。相比生长季初期负相关区域面积明显增加,变化主要集中在天山山脉和阿尔金山区域,由初期的不(弱)相关与正相关转变为负相关,阿尔泰山部分区域也由正相关转变为负相关。而生长季末期,正相关区域约占研究区 22.176%,不(弱)相关区域约占全疆 38.748%,负相关区域占区域 39.076%。其中,正相关与负相关区域面积均有所减少,由相关转变为不(弱)相关区域,发生这些转变的区域主要集中在准格尔盆地、天山、塔里木盆地的部分地区。

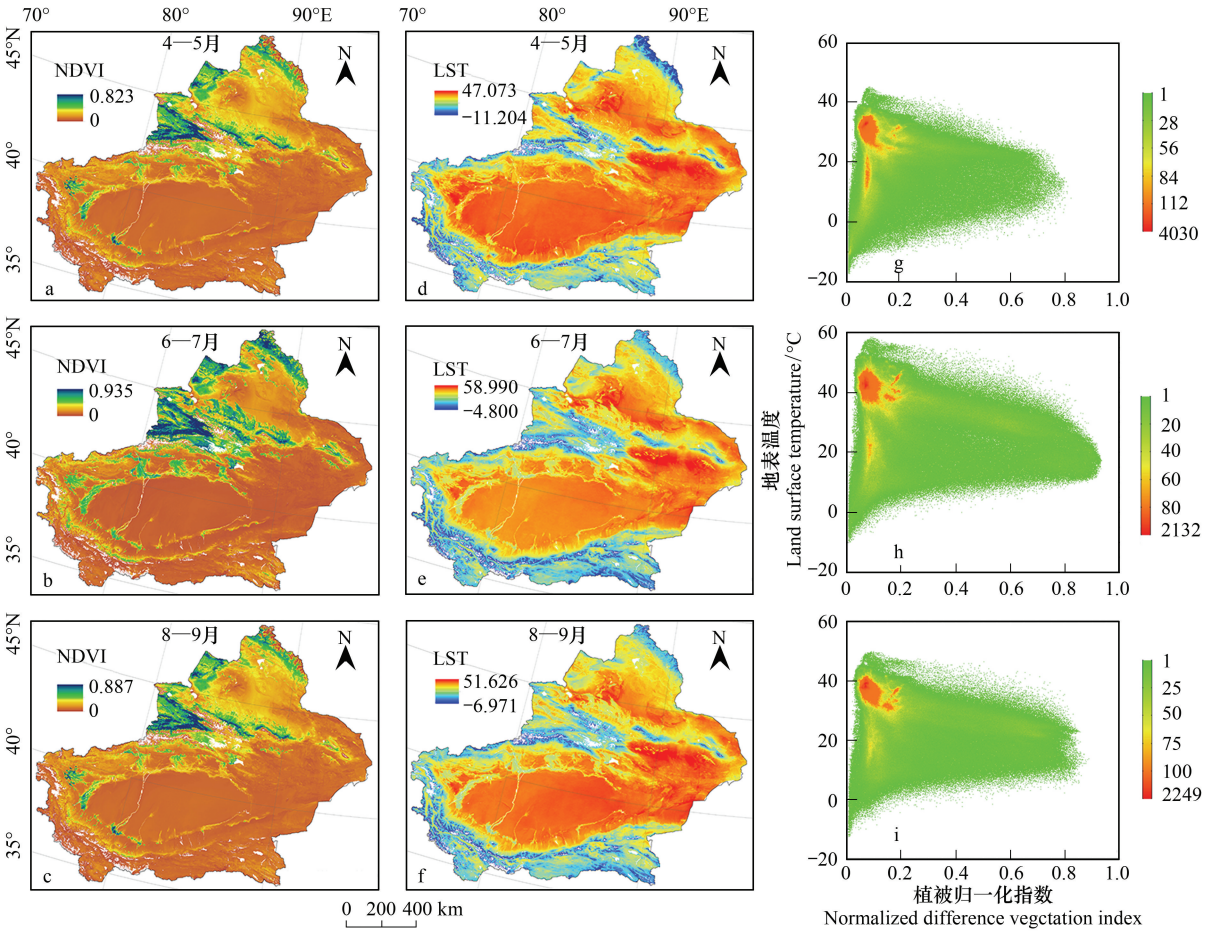

图 2 生长季 3 个时期 NDVI 平均值(a-c),LST 平均值(d-f)和 NDVI-LST 密度散点图(g-i)

Fig.2 Long-term average of NDVI for the three sub-periods of the growing seasons(a-c),(d-f) Long-term averages of LST and (g-i) density scatter-plots of LST & NDVI for the same sub-periods.

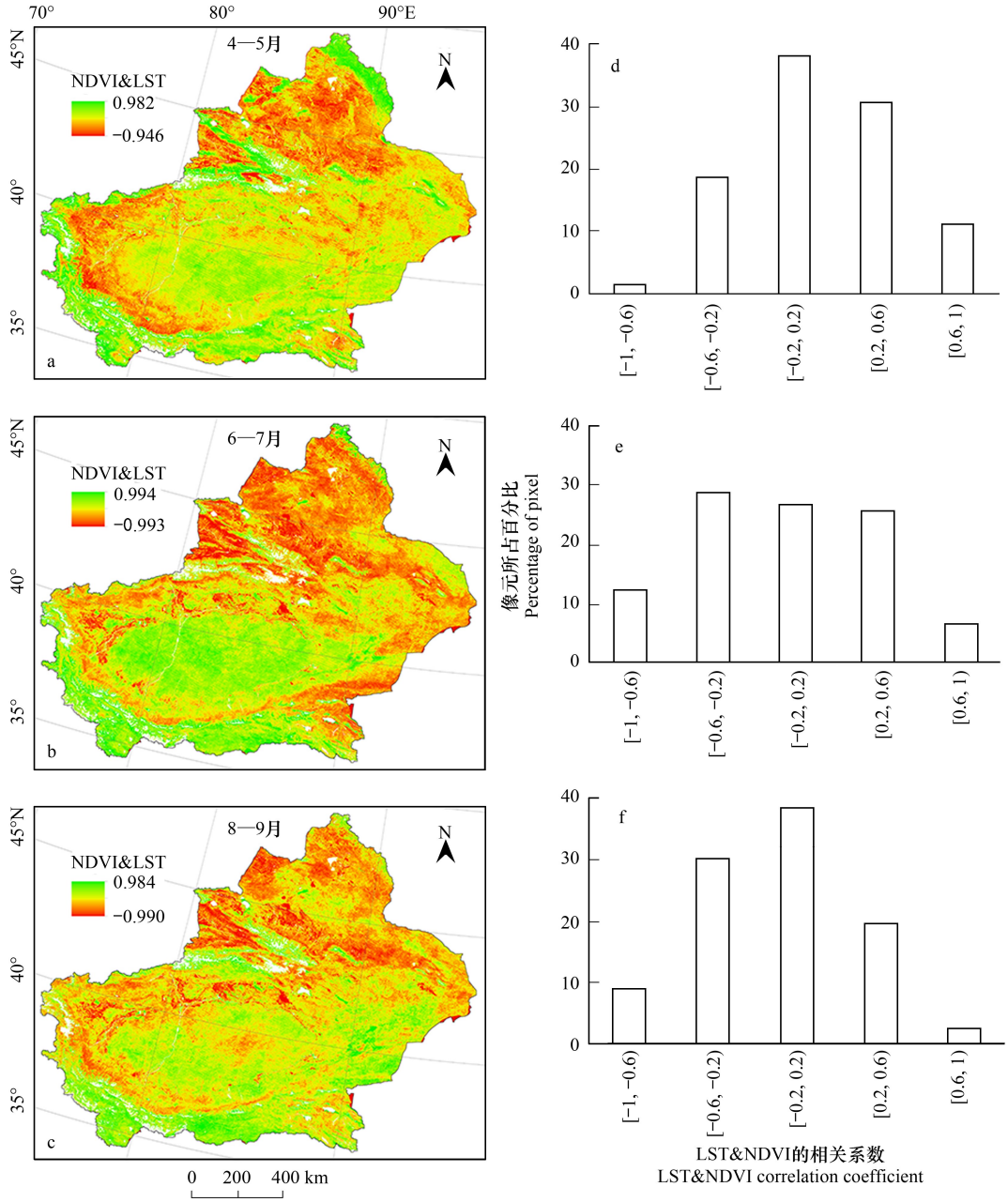

图 3　生长季 3 个时期 NDVI-LST 相关系数空间分布图(a-c)和正相关(r>0.2),负相关(r<−0.2),不(弱)相关(−0.2<r<0.2)占区域百分比图(d-f)

Fig.3　Spatial distribution of pixels with positive (r>0.2), negative (r<−0.2), or insignificant (−0.2<r<0.2) correlations for the (a-c) three sub-periods of the growing seasons and (d-f) their respective frequency histograms.

3.2　气象因子对 NDVI-LST 相关关系的驱动

根据气象因子空间分布情况与 NDVI-LST 相关关系分布可知,生长季不同时期气象因子对 r 的贡献率各不相同。能量和水分为植被生长的两大限制性因子,而不同因子的限制情况随植被生长期发生改变。对生长季初期、中期与末期的气象因子太阳辐射、气温、降水与 NDVI-LST 相关系数进行多元线性回归分析,回归结果如表 1。

由表 1 可知,生长季 3 阶段 NDVI-LST 的与气象因子进行回归分析得到决定系数分别为 0.531,0.562,0.587,表明气象因子与 NDVI-LST 相关系数确有密切关系。从生长季不同时期所构建的回归模型可知,生长季初期,太阳辐射是影响 NDVI-LST 相关关系的主要因子。在生长季的中期和末期,气温与降水为影响 NDVI-LST 相关系数的主要气象因子。对标准化系数 β(表 1)进行分析,在生长季中期和末期降水对 r 具有强烈的

影响(β 值分别为-2.144 和-1.289);其次分别为气温(β 值分别为-1.757 和-1.130)和太阳辐射(β 值分别为 0.430 和-0.195);在生长季中期降水的影响尤为明显。总体来说,降水、太阳辐射和气温的 β 值基本为负值,表明 NDVI-LST 的相关系数随着降水、太阳辐射和气温的增长而降低。在整个生长季中期与末期太阳辐射的贡献率最小,表明在研究区内,辐射水平较高,辐射不是限制植被生长的重要因子。

如图 4 所示生长季初期的太阳辐射总体低于生长季中期与末期水平,且对比生长季 3 个时期,在生长季中期与末期阿尔泰山地区太阳辐射值均高于初期,这既为生长季初期 NDVI-LST 正相关区域明显大于之后两个时期的原因,也是阿尔泰山地区由生长季初期的正相关转变为负相关的原因。对于生长季中期,尽管降水增加,但气温也明显上升,蒸散增加,植被生长受到水分的限制明显,NDVI-LST 负相关区域明显增加。生长季末期,由于气温的下降,与降水量的不断补充,新疆旱情得到明显缓解,NDVI-LST 不相关区域明显增加。

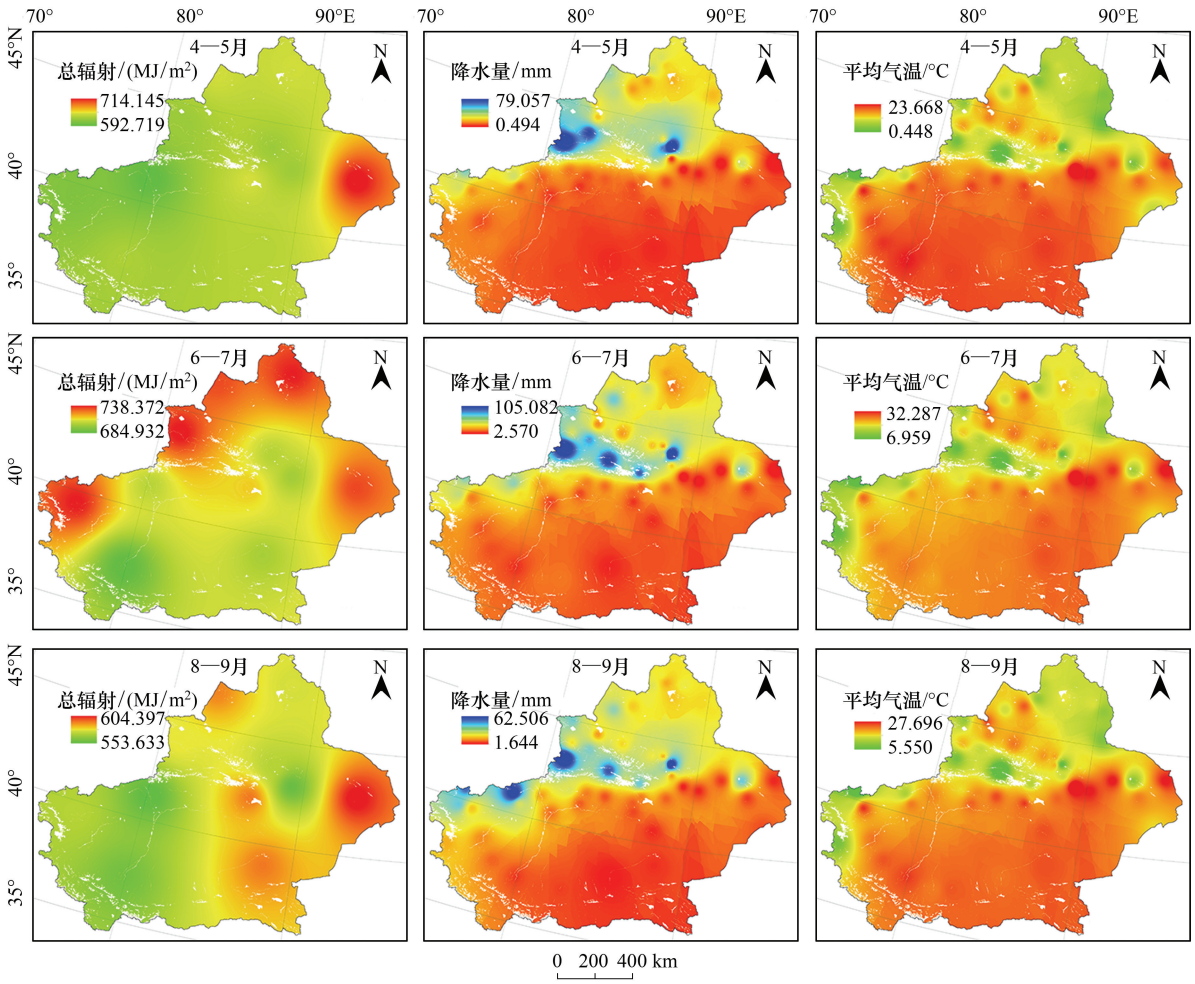

图 4 生长季 3 个时期太阳辐射、降水、气温空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of solar radiation, precipitation, and air temperature in three sub-periods of the growing season

表 1 生长季不同时期相关系数 r 与气象因子多元回归分析结果

Table 1 Results of multiple regressions between r and meteorological factors for each of the three sub-periods

模型 Model	参数值 Parameter values	降水 Precipitation	太阳辐射 Radiation	气温 Air temperature
4 月—5 月 April-May				
R^2 Coefficient of determination	0.529			
标准误差 Standard error	0.301			
B(系数) Regression coefficient		-0.040	-0.014	-0.148

续表

模型 Model	参数值 Parameter values	降水 Precipitation	太阳辐射 Radiation	气温 Air temperature
显著性 Significance	$P<0.000$	$P<0.003$	$P<0.000$	$P<0.000$
β(标准系数)Standardized regression coefficient		−0.457	−0.639	−0.485
6 月—7 月 June-July				
R^2 Coefficient of determination	0.564			
标准误差 Standard error	0.311			
B(系数)Regression coefficient		−0.151	0.018	−0.425
显著性 Significance	$P<0.000$	$P<0.000$	$P<0.001$	$P<0.000$
β(标准系数)Standardized regression coefficient		−2.144	0.430	−1.757
8 月—9 月 August-September				
R^2 Coefficient of determination	0.587			
标准误差 Standard error	0.261			
B(系数)Regression coefficient		−0.117	−0.010	−0.245
显著性 Significance	$P<0.000$	$P<0.000$	$P<0.021$	$P<0.000$
β(标准系数)Standardized regression coefficient		−1.289	−0.195	−1.130

3.3　NDVI-LST 与 LUCC 相关关系

植被覆盖状况是影响 NDVI-LST 相关关系的另一因子。分析不同 LUCC 类型对 NDVI-LST 相关关系的影响有助提高干旱监测的准确度。表 2 列出了生长季初期、中期和末期不同 LUCC 类型下 NDVI-LST 正相关、负相关、不(弱)相关系数所占的百分比。

表 2　生长季不同时期不同地类的正、负、不(弱)相关系数百分比

Table 2　Percent of domain area showing negative, insignificant, and positive correlations between LST and NDVI during the three sub-periods

土地类型 Land types	百分比 Percentage		
	$r<-0.2$	$-0.2<r<0.2$	$r>0.2$
4 月—5 月 April-May			
草地 Grassland	25.108	32.836	42.055
林地 Forest	12.899	29.182	57.918
耕地 Cropland	39.039	43.539	17.422
居民用地 Residential land	36.677	45.169	18.154
未利用地 Unused land	16.752	40.406	42.842
总体 Total	20.188	38.031	41.781
6 月—7 月 June-July			
草地 Grassland	58.485	23.543	17.971
林地 Forest	60.138	28.333	11.529
耕地 Cropland	84.108	13.351	2.541
居民用地 Residential land	72.267	20.554	7.179
未利用地 Unused land	29.302	28.893	41.805
总体 Total	41.268	26.579	32.153
8 月—9 月 August-September			
草地 Grassland	54.187	30.393	15.420
林地 Forest	54.829	33.413	11.759
耕地 Cropland	84.519	13.910	1.571
居民用地 Residential land	69.949	22.872	7.179
未利用地 Unused land	28.045	44.694	27.261
总体 Total	39.076	38.748	22.176

在生长季初期,草地、林地 NDVI-LST 的相关性区域分别占其总面积的 67.164%和 70.818%。耕地、居民用地与未利用地分别有 56.561%,54.831%,59.594%的区域 NDVI-LST 具有相关性。其中,草地、林地分别有 42.055%,57.918%的面积具有正相关关系,该区域植被覆盖度较高,且该时期影响植被生长的主要因子为太阳辐射,故大部分区域 NDVI-LST 呈现正相关。而耕地由于人为干扰的作用,作物生长所受限制相对较少,仅有 17.422%的区域 NDVI-LST 的相关关系呈现正相关。居民用地受到人为活动影响较大,人工绿地的建立等使得 NDVI-LST 的相关关系在该区域变化较为复杂[29]。未利用地区植被覆盖较少,影响 NDVI-LST 相关关系的因素主要是地表蒸散所改变的土壤水分含量。其中干旱的未利用地区(水分含量低)具有低 NDVI 和高 LST 值;而富含水分的未利用地区(水分含量较高)具有低 NDVI 和低 LST 值。总体来看,新疆大部分地区 NDVI-LST 相关关系呈现为正相关,这与 VHI 依据的基本假设不相符合,故该时段无法有效应用 VHI 进行干旱状况评估。

在生长季中期,草地、林地、耕地分别有 58.485%、60.138%、84.109%的区域 LST 与 NDVI 具有负相关关系。由多元回归分析可知,在此时期辐射不是植被生长的主要限制因子。对于植被覆盖较佳区域,该时期气温升高导致植被蒸散增加,同时土壤水分蒸发量增加,LST 降低,土壤湿度降低,植被生长受到水分限制;对于未利用地区植被覆盖度低,植被蒸散少甚至没有,LST 变化只与土壤水分蒸发相关;因此草地、林地、耕地植被覆盖较多的区域 LST 与 NDVI 呈现负相关关系,而未利用地区 NDVI-LST 的负相关区域面积较少。在此时期,VHI 可以有效的应用于农业地区及其他高植被覆盖地区。

生长季末期,各土地利用类型正、负相关系数百分比相对于中期均有减少,而不(弱)相关百分比增加,其中未利用地区增加高达 15.801%。通过生长季初期、中期、末期 LST 与 NDVI 相关系数对比发现,塔克拉玛干沙漠腹地地区 LST 与 NDVI 的相关系数一直保持为正,这是由于该区域植被稀疏、降水稀少,影响 NDVI-LST 关系的关键因子为土壤水分,水分的增减主要受气温影响。而天山大部分区域,植被盖度高,NDVI-LST 相关关系与植被生长状况密切相关,影响植被生长的主要因子为降水量,故生长季整个时期,大部分区域 LST 与 NDVI 呈现负相关关系。

4 讨论

一些研究表明[21-22,30],当植被生长受到水分限制时,NDVI-LST 往往呈现负相关关系;当植被生长受到能量限制时,NDVI-LST 往往呈现正相关关系。VHI 的构建是以 NDVI-LST 的负相关关系为基础,故在受水分限制的区域内应用 VHI 去研究植被受干旱的影响具有较好的适用性。在植被生长受到能量限制的区域,NDVI-LST 具有正相关关系,依据 VHI 判断植被受到干旱的影响程度将会出现错误。LST 与 NDVI 无相关性的区域,无法有效获取 VHI 的正确结果,不能够利用 VHI 对植被受干旱的影响程度进行判断。

LST 的决定性因子为地表土壤水分与植被覆盖状况[31-32],人工非渗透表面与植被稀疏地区(裸地)植被覆盖极低,且地表水分含量稀少,缺乏有效的蒸腾作用,无法有效利用 NDVI-LST 相关关系判断干旱状况,且该类区域水分状况受气温影响明显,当温度上升,由于缺乏植被的降温作用,LST 较植被覆盖度高的区域上升明显。因此考虑利用其它相关指数判断干旱状况,如利用归一化水汽指数(Normalized Difference Moisture Index,NDMI)与 LST 的相关关系,分析判断城市与裸地区域的干旱状况更为有效[33]。对裸地干旱状况进行有效监测,有助于依据其动态变化状况进一步了解荒漠区生态环境状况变化,为减缓荒漠化程度提供科学依据。

目前,许多基于 NDVI-LST 具有负相关关系提出的若干植被健康和干旱指数(如植被供水指数(Vegetation Supply Water Index,VSWI)、VHI 等)在干旱监测中获得广泛应用[24-35],但利用该类指数进行研究,都是假定水分始终是植被生长的限制因子,忽略了其他因素(辐射、气温)对植被生长的限制,可能在分析中存在误判。研究表明,在生长季初期限制新疆植被生长的重要因子为辐射,这与相关指数的前提假设相违背,因此在该时期需要从其他角度进行干旱监测,即便在观测到 NDVI-LST 负相关的区域也需要长时间考察验证,最终确认

影响 NDVI-LST 相关关系的因子后使用合适的干旱指数。由于温度、湿度、风速、气压等气候因素所引起的大气干旱,可以考虑利用改进的 PDSI、SPEI-PM 指数、CI[36-38]等进行干旱状况评价,同时亦可考虑将气象类干旱指数与遥感类干旱指数结合使用,如选取 3 类气象干旱指数(降水距平百分率、SPI、相对湿润指数(Relative Moisture Index,MI))与 2 类遥感干旱指数(VWSI、NDVI)与实测土壤湿度进行相关分析,选取相关系数最高的气象干旱指数与植被干旱指数共同构建综合干旱监测指数[39]。

NDVI-LST 在新疆干旱的使用中具有适用性,一方面新疆地域辽阔,植被盖度和土壤水分变化范围较大,符合 NDVI-LST 特征空间概念的基本原理[13-15];另一方面新疆总体海拔位置较高,太阳辐射资源丰富,是中国辐射资源仅次于西藏的地区[40]。总体而言,能量不是限制新疆植被生长的最重要因素,故大多数情况下利用 NDVI-LST 评估新疆干旱具有可行性。西北其他相对海拔高度较低的地区,如陕西地区太阳辐射相对较低[41],可能会对当地植被生长造成限制,故在该类区域应用 NDVI-LST 时,需进一步研究判断植被生长的限制因子,才能更为准确的进行干旱评估。近年来,随着全球气候变化,干旱区域开始由干旱半干旱地区向湿润地区发展,许多学者对西南干旱进行了分析研究,多种干旱指数也被广泛应用[42-44]。由于西南地区的独特地理位置与气候背景,植被资源丰富、盖度佳,植被盖度跳跃小,故利用 NDVI-LST 对该区域进行干旱状况监测,效果不佳。

5　结论

对新疆 2000—2015 年生长季 3 阶段 LST,NDVI 空间分布及相关关系进行分析,利用利用多元线性回归分析分析不同时期影响 NDVI-LST 相关关系的气象因子,分析不同 LUCC 类型 NDVI-LST 相关关系的时空变化特征,得出以下结论:

(1)生长季 3 时期 LST 与 NDVI 均存在显著相关关系,生长季初期、中期、末期具有相关性的区域分别占新疆 61.969%、73.421%、61.252%,可依据两者的关系对新疆生长季干旱状况进行分析。研究表明在生长季过程中,从初期到中期新疆干旱情况日益严重,而末期新疆干旱状况有所缓解。

(2)生长季新疆地区 NDVI-LST 相关关系受气象因子、季节和植被盖度影响。生长季初期主要因子影响因子为太阳辐射,中期与末期主要影响因子为气温与降水。草地、林地、耕地等高植被覆盖区大 NDVI-LST 相关关系与植被状况密切相关。未利用地区与居民用地区植被稀少,NDVI-LST 相关关系与土壤水分状况直接关联。通过对 r 的变化规律及驱动因子分析,能够更好地对新疆干旱进行评估。

(3)生长季中期基于 NDVI-LST 经验关系利用 VHI 对新疆大部分地区的植被健康和干旱进行监测是有效的,但对于生长季初期和末期的应用效果不佳,需要进行类似和互补研究。在研究过程中,确认影响 NDVI-LST 相关关系的因子后,使用合适干旱指数能够更加有效地提升干旱监测的准确性和科学性。

参考文献(References):

[1] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. Water International, 1985, 10(3): 111-120.

[2] AghaKouchak A, Farahmand A, Melton F S, Teixeira J, Anderson M C, Wardlow B D, Hain C R. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 452-480.

[3] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 马柱国. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(3): 337-353.

[4] Quiring S M, Papakryiakou T N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118(1/2): 49-62.

[5] 于敏, 张洪玲, 张桂华. T_s-NDVI 特征空间结构及与气候特征的相关性研究. 高原气象, 2015, 34(1): 183-189.

[6] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.

[7] Tucker C J, Choudhury B J. Satellite remote sensing of drought conditions. Remote sensing of Environment, 1987, 23(2): 243-251.

[8] Kogan F. World droughts in the new millennium from AVHRR——based vegetation health indices. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2002, 83(48): 557-572.

[9] 吕潇然, 尹晓天, 宫阿都, 王前锋, 李静, 张慧. 基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1634-1644.

[10] 沙莎, 郭铌, 李耀辉, 任余龙, 李忆平. 植被状态指数 VCI 与几种气象干旱指数的对比——以河南省为例. 冰川冻土, 2013, 35(4): 990-998.
[11] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 张小飞. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化. 生态学报, 2007, 27(11): 4563-4575.
[12] 管延龙, 王让会, 李成, 姚健, 张萌, 赵建萍. 基于 MODIS 数据的天山区域地表温度时空特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 681-688.
[13] 沙莎, 郭铌, 李耀辉, 胡蝶, 王丽娟. 温度植被干旱指数(*TVDI*)在陇东土壤水分监测中的适用性. 中国沙漠, 2017, 37(1): 132-139.
[14] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91-100.
[15] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
[16] Jang J D, Viau A A, Anctil F Ç. Thermal——water stress index from satellite images. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(8): 1619-1639.
[17] Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, Fensholt R, Eklundh L. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(2): 262-274.
[18] McVicar T R, Bierwirth P N. Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(11): 2109-2128.
[19] Ma'rufah U, Hidayat R, Prasasti I. Analysis of relationship between meteorological and agricultural drought using standardized precipitation index and vegetation health index // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017, 54(1): 012008.
[20] Choi M, Jacobs J M, Anderson M C, Bosch DD. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. Journal of Hydrology, 2013, 476: 265-273.
[21] Son N T, Chen C F, Chen C R, Chang L Y, Minh V Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. International Journal of Applied Earth Observation andGeoinformation, 2012, 18: 417-427.
[22] Zhang F, Zhang L W, Shi J J, Huang J F. Soil moisture monitoring based on land surface temperature-vegetation index space derived from MODIS data. Pedosphere, 2014, 24(4): 450-460.
[23] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 白云岗. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变. 应用气象学报, 2012, 23(3): 322-330.
[24] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征. 干旱区研究, 2016, 33(2): 338-344.
[25] 慈晖, 张强. 遥感手段及气象干旱指数在新疆干旱监测过程中的应用. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1653-1662.
[26] 潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 李小飞. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 32-39.
[27] 刘卫国, 王曼, 丁俊祥, 吕光辉. 帕默尔干旱指数在天山北坡典型绿洲干旱特征分析中的适用性. 中国沙漠, 2013, 33(1): 249-257.
[28] 胡颖颖, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 黄婷, 朱亚, 买尔当·克依木. 新疆 2001—2010 年农业气候干旱脆弱性分析. 中国沙漠, 2014, 34(1): 254-259.
[29] 蒋烨林, 王让会, 李焱, 李成, 彭擎, 吴晓全. 艾比湖流域不同土地覆盖类型土壤养分高光谱反演模型研究. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1555-1564.
[30] Karnieli A, Agam N, Pinker R T, Anderson M, Imhoff M L, Gutman G G, Panov N, Goldberg A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. Journal of Climate, 2010, 23(3): 618-633.
[31] Deo R C, Şahin M. Forecasting long-term global solar radiation with an ANN algorithm coupled with satellite-derived (MODIS) land surface temperature (LST) for regional locations in Queensland. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 828-848.
[32] Duan S B, Li Z L, Tang B H, Wu H, Tang R L. Generation of a time-consistent land surface temperature product from MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 339-349.
[33] 李斌, 王慧敏, 秦明周, 张鹏岩. NDVI、NDMI 与地表温度关系的对比研究. 地理科学进展, 2017, 36(5): 585-596.
[34] 杨曦, 武建军, 闫峰, 张洁. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况. 生态学报, 2009, 29(3): 1205-1216.
[35] 刘世梁, 田韫钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应. 生态学报, 2016, 36(15): 4699-4707.
[36] 王兆礼, 李军, 黄泽勤, 钟睿达, 陈佳颖, 邱卓辉. 基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析. 农业工程学报, 2016, 32(2): 161-168.
[37] 李翔翔, 居辉, 刘勤, 李迎春, 秦晓晨. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析. 生态学报, 2017, 37(6): 2054-2066.
[38] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李维, 魏小琴, 加依娜古丽·窝扎提汗, Rasulov H. 基于综合气象干旱指数的 1961—2012 年阿勒泰地区干旱时空演变特征. 应用生态学报, 2015, 26(2): 512-520.
[39] 张建平, 刘宗元, 王靖, 何永坤, 罗红霞. 西南地区综合干旱监测模型构建与验证. 农业工程学报, 2017, 33(5): 102-107.
[40] 黄家敏, 杨洪海, 陈勇航, 光莹, 辛渝, 马骁骏. 基于 GEWEX-SRB 资料的新疆地区太阳辐射时空分布特征. 太阳能学报, 2017, 38(2): 516-523.
[41] 李净, 冯姣姣, 王卫东, 张福存. 基于 LM-BP 神经网络的西北地区太阳辐射时空变化研究. 地理科学, 2016, 36(5): 780-786.
[42] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 李忆平, 贾建英, 王静. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因. 地理学报, 2014, 69(5): 632-639.
[43] 张强, 姚玉璧, 王莺, 王素萍, 王劲松, 杨金虎, 王静, 李忆平, 尚军林, 李文举. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策. 生态学报, 2017, 37(21), doi: 10.5846/stxb201608111644. (in press)
[44] 王理萍, 王树仿, 王新华, 张刘东, 王福来. 五种干旱指数在云南省的适用性分析. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 117-124.