

张喜成,徐长春,宋佳,等. 基于遥感 DSI 的新疆干旱特征分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(2):239-246.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.02.043

基于遥感 DSI 的新疆干旱特征分析

张喜成^{1,2}, 徐长春^{1,2}, 宋佳^{1,2}, 李晓菲^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院,新疆乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,新疆乌鲁木齐 830046)

摘要:利用 2000—2016 年 MODIS ET/PET 和 NDVI 数据集构建干旱严重指数(drought severity index, DSI)来监测新疆干旱过程,分析其时空分布特征与变化趋势,并利用实测农业旱情资料[湿润指数(W)和植被净初级生产力(NPP)]与 DSI 做相关性分析,探讨 DSI 在新疆地区的适用性。结果表明,新疆整体处于干旱状况。全疆秋季干旱频率最高,冬季最低。近十几年新疆干旱趋势减弱,干旱面积最大值出现在 2008 年,最小值出现在 2016 年。各季节内南疆地区干旱趋势减弱,夏季最为突出。北疆、天山地区干旱趋势表现为夏季减弱,秋季增强。从几种指标的相关性来看,实测农作物干旱面积与 DSI 监测的干旱面积的相关性较高,决定系数达到 0.67。北疆地区 DSI- W 、DSI- NPP 相关性最高,决定系数分别达到 0.69/0.62。在空间 Pearson 相关性上,DSI- W 和 DSI- NPP 整体上均呈显著正相关,分布比例分别占全疆面积的 88%、86.65%,这有力地证明了 DSI 适用于新疆地区的干旱监测分析。

关键词:DSI; 干旱监测; 时空分布; 变化趋势; 新疆; 相关性分析

中图分类号: S127; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)02-0239-08

干旱是一种周期性发生的自然现象,它的发生过程复杂,通常表现为一种缓慢的自然灾害^[1-3]。在所有自然灾害中,干旱是最复杂、最不易理解的,对社会、经济、环境的影响较大^[4-5]。根据国际灾害数据库,干旱发生次数仅占所有自然灾害的 5%,但受灾人数却高居首位,达到受灾人口总数的 30%^[6]。

随着全球变暖和极端事件的频繁发生,干旱灾害的监测与防御已引起人们的高度关注^[7-8]。传统的干旱指数一般是基于降水、气温等站点数据判断其周边区域干湿状况,很难以点代面地反映整个区域干湿状况的空间分布特征^[9]。20 世纪 60 年代以来,卫星遥感技术飞速发展且完善,为大尺度、快速、多时相的干旱监测奠定了技术基础^[10]。目前,国内外学者已开发出许多基于植被条件、地表温度及两者相结合的综合遥感指标^[6]用以监测干旱。虽然这些指标对干旱监测非常有用,但它们也有局限性。通常情况下,干旱事件与植被响应之间存在

时间滞后效应,因此单靠归一化植被指数(NDVI)也不能完全反映干旱信息。此外,由于净辐射和风速等气象条件对地表温度(LST)的影响^[11],也会影响其持续有效的干旱监测能力。蒸散(ET)作为陆地水循环和能量循环的重要组成部分,与气象干旱指数相比,更能直接和有效地描述生态系统水分状况。2013 年, Mu 等基于中分辨率成像光谱仪(MODIS) ET/潜在蒸散量(PET)和 NDVI 数据产品提出了一种干旱严重指数(drought severity index, DSI),并应用于全球尺度干旱监测,取得了良好的效果^[12-15]。

新疆作为我国典型的干旱半干旱区,由于其特殊的地理位置,气候环境恶劣、水资源短缺且时空分布不均、季节性供需矛盾大,导致新疆干旱频率较高。干旱灾害已成为新疆缺水地区农牧业最主要的自然灾害之一。因此,分析新疆地区干旱状况及其时空变化特征,对新疆旱情预防、农业灌溉措施制定及作物结构优化具有重要的参考价值。近年来,研究者对新疆地区频繁的旱情进行了研究。罗青红等基于湿润指数分析了新疆甘家湖地表干湿状况变化趋势^[16];邓兴耀等分析了我国西北干旱区蒸散发时空动态特征^[17];许玉忠等基于标准化降水指数(SPI)分析了新疆干旱时空分布^[18]。但 DSI 目前在新疆地区尚无应用案例,在我国区域的应用案例也较少。

收稿日期:2018-10-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41561023)。

作者简介:张喜成(1992—),男,甘肃平凉人,硕士,主要从事干旱区绿洲资源环境遥感应用分析研究。E-mail: 18449815621@163.com。

通信作者:徐长春,博士,副教授,主要从事干旱区气候、水文与水资源研究。E-mail: xcc0110@163.com。

本研究以新疆地区为研究区,采用 2000—2016 年 MODIS 产品 NDVI 和 ET/PET 数据集,构建干旱严重指数,分析 2000—2016 年新疆干旱特征时空动态,并利用实测农作物旱灾面积、湿润指数(W)和植被净初级生产力(NPP)与 DSI 进行相关分析,探讨 DSI 在新疆干旱监测中的适用性。

1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处我国西北边陲,位于 $73^{\circ}20' \sim 96^{\circ}25'E$, $34^{\circ}15' \sim 49^{\circ}10'N$ 之间。境内东西向伸展三大山系,北部阿尔泰山,南部昆仑山,天山山脉横亘中部,分割形成准噶尔盆地和塔里木盆地,形成了独特的山体、绿洲、盆地相间的地貌格局(图 1)。新疆远离海洋,三面环山,属典型的大陆性干旱气候。全疆年降水量少且时空分布不均,其中北疆年降水量为 150 ~ 200 mm,南疆不足 100 mm,蒸发量为 2 000 ~ 2 500 mm,干旱程度为 4 ~ 16^[19]。

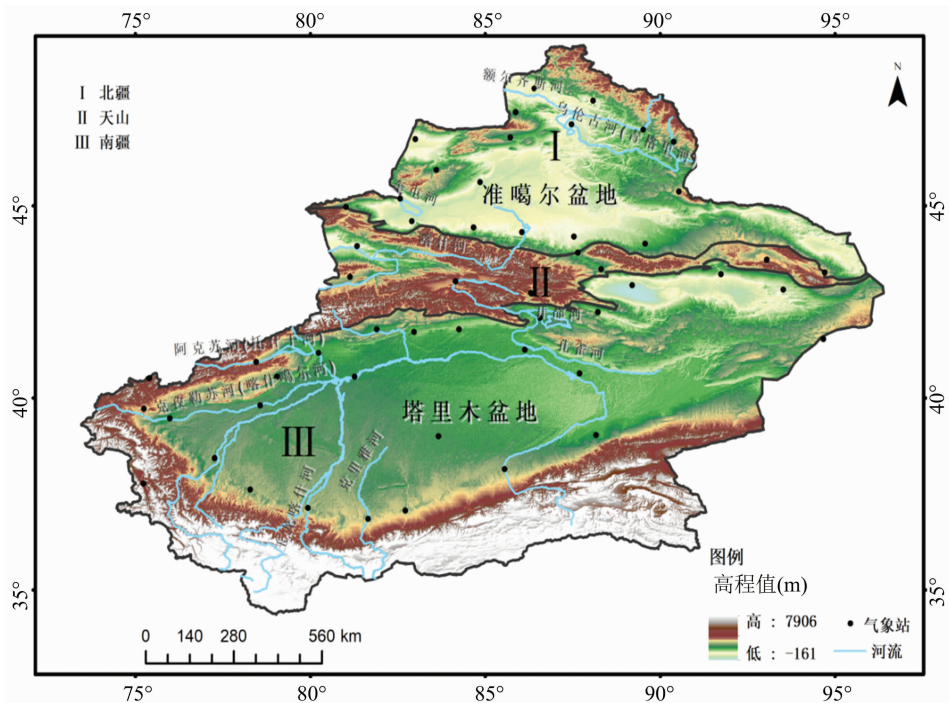


图1 研究区概况

DEM 数据为 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission), 空间分辨率为 90 m × 90 m, 来自中国科学数据云 (<http://www.csdb.cn/>)。

降水和农作物干旱数据分别来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 和中国农业农村部 (<http://zzys.agri.gov.cn/zaiqing.aspx>)。

其中,NPP 作为植被生态系统中物质、能量转换和传递的基础,直接反映了植被在自然条件下自

目前,干旱已成为影响新疆地区经济、农业发展的主要自然灾害,选择新疆地区进行干旱监测具有一定的典型性和代表性。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究中使用的遥感数据为 MOD13 NDVI 产品 (<https://lpdaac.usgs.gov/>)、MOD17 NPP 产品 (http://files.ntsg.umd.edu/data/NTSG_Products/MOD17/) 和 MOD16 ET/PET 产品 (http://files.ntsg.umd.edu/data/NTSG_Products/MOD16/)。时间分辨率统一为年和月,空间分辨率为 1 km × 1 km。使用 MRT(M reprojection tool)对原始数据进行镶嵌、重投影,并在 ArcGIS、ENVI 等软件中进行裁剪、剔除无效值等预处理,最终形成 2000—2016 年的时间序列数据集。

身的生产能力,同时也能够有效地响应气候与环境变化^[20]。农作物干旱数据可以从实际角度反映一个地区的干旱状况,在本研究中作为辅助数据用于分析 DSI 在新疆干旱监测中的适用性。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱严重指数 DSI 由 Mu 等于 2013 年提出,综合考虑了 NDVI、ET/PET 等 2 个基本要素^[12]。其中,NDVI 描述植被的光合作用以及生长状态,

ET/PET 反映植被的水分胁迫状况,通过两者累加能综合反映干旱状况。相比于其他干旱指数,DSI 具有潜在的优势。具体算法:

$$Z_{NDVI} = \frac{R_{NDVI} - \bar{R}_{NDVI}}{\sigma_{NDVI}}; \quad (1)$$

$$Z_{ET/PET} = \frac{R_{ET/PET} - \bar{R}_{ET/PET}}{\sigma_{ET/PET}}; \quad (2)$$

$$Z = Z_{ET/PET} + Z_{NDVI}; \quad (3)$$

$$DSI = \frac{Z - \bar{Z}}{\sigma_Z}. \quad (4)$$

式中: Z_{NDVI} 为标准化后的 NDVI; $Z_{ET/PET}$ 为标准化后的 ET/PET; R_{NDVI} 为 2000—2016 年间某年的 NDVI; \bar{R}_{NDVI} 为 2000—2016 年的平均 NDVI; $R_{ET/PET}$ 为 2000—2016 年间某年的 ET/PET; $\bar{R}_{ET/PET}$ 为 2000—2016 年的平均 ET/PET; σ_{NDVI} 为 NDVI 的方差; $\sigma_{ET/PET}$ 为 ET/PET 的方差; σ_Z 为 Z 的方差; \bar{Z} 为 Z 的平均值。DSI 越小,干旱程度越强,DSI 越大,干旱程度越弱。

2.2.2 湿润指数 (W) 地表湿润指数是近年来应用相对较多的一个综合性干旱指标,因其同时考虑大气降水和地表蒸发潜力 2 个物理参量对地表干湿的影响,对干旱监测具有良好的效果。地表湿润指数干湿等级划分参考申双和等的文献^[21]。具体算法:

$$W = P/PET. \quad (5)$$

式中: W 为湿润指数; P 为降水量,mm; PET 为潜在蒸散量,mm。

2.2.3 DSI 年际变化趋势 利用线性倾向计算每个像元 2000—2016 年的 DSI 时间线性倾向率,计算公式为

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times DSI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n DSI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}. \quad (6)$$

式中: S 为线性倾向值; n 为年序列总长度($n=17$); $i=1,2,\dots,n$,分别对应 2000—2016 年; DSI_i 为对应第 i 年的 DSI。 $S < 0$ 时,表示随着时间 i 的增加,DSI 呈逐渐减少趋势; $S > 0$ 时,表示随着时间 i 的增加,DSI 呈逐渐增加趋势。

3 结果与分析

3.1 新疆干旱过程监测

采用 2000—2016 年 NDVI 和 ET/PET 数据集构建 DSI,用于监测新疆干旱过程(图 2)。从 DSI 监测

结果看,新疆干旱状况时空变异性转大。2000—2016 年多数年份新疆处于干旱状态,多数地区 DSI 介于 $-1.5 \sim -0.3$ 之间。特别是 2001 年、2008 年、2012 年和 2014 年,DSI 低至 $-3.8 \sim -3.3$,全疆出现严重干旱。其中,2008 年最为严重,据史料记载,2008 年新疆发生春夏秋连旱,旱情仅次于 1974 年,是历史上第 2 个严重干旱年,造成的经济损失达 10 亿元以上,18.7 万 km^2 草场干枯。

3.2 新疆干旱特征的空间分布

根据 DSI 的大小将干旱等级分为 6 级,统计分析新疆年均干旱面积比例(表 1)。全疆干旱面积(占比为 40.08%)大于湿润面积(占比为 36.65%),其中初期、轻度干旱面积所占比例较大。表明新疆虽然整体上处于干旱状况,但干旱强度适中。各亚区内干旱面积比例表现为北疆(40.97%)>南疆(40.55%)>天山(38.33%)。结合 2000—2016 年新疆干旱等级众数(出现频率最多的值)空间分布(图 3-a)可知,新疆干旱区多出现在塔城地区、昌吉回族自治州中部地区以及阿勒泰地区南部、克孜勒苏柯尔克孜自治州、若羌县、和田县等。湿润区多出现在伊犁地区、阿勒泰地区北部等。

结合图 4 与图 3-b,从不同季节角度进一步分析新疆干旱空间分布特征。总体上,南疆各季节干旱面积最大(占比为 39.12%~43.80%),出现频率最高。北疆地区不同季节干旱面积比例表现为秋季(41.71%)>夏季(40.34%)>春季(39.07%)>冬季(34.94%);天山地区干旱面积比例也是秋季最大(40.93%),冬季最小(36.32%)。除伊犁地区与阿勒泰北部地区外,全疆整体上秋季干旱频率最高,夏季次之。冬季全疆湿润频率最高,尤其昌吉回族自治州中部地区与阿勒泰西南地区最为明显。

3.3 新疆干旱特征的时间变化趋势

将 2000—2016 年新疆干旱面积比例作一元线性回归分析(图 5),结合新疆年际、季节 DSI 变化趋势(图 6),分析新疆地区干旱状况随时间趋势变化特征。17 年间,全疆干旱面积比例波动较大,整体上呈下降趋势,变化率为 $-1.35\%/年$,尤其在 2009 年之后下降趋势更为明显。全疆干旱情况表现为轻度干旱($-0.34\%/年$)>适度干旱($-0.33\%/年$)>初期干旱($-0.26\%/年$)>严重干旱($-0.23\%/年$)>极端干旱($-0.18\%/年$)。各亚区干旱面积也呈减小趋势,变化率且现为南疆($-3.05\%/年$)>北疆($-1.51\%/年$)>天山($-0.11\%/年$)。

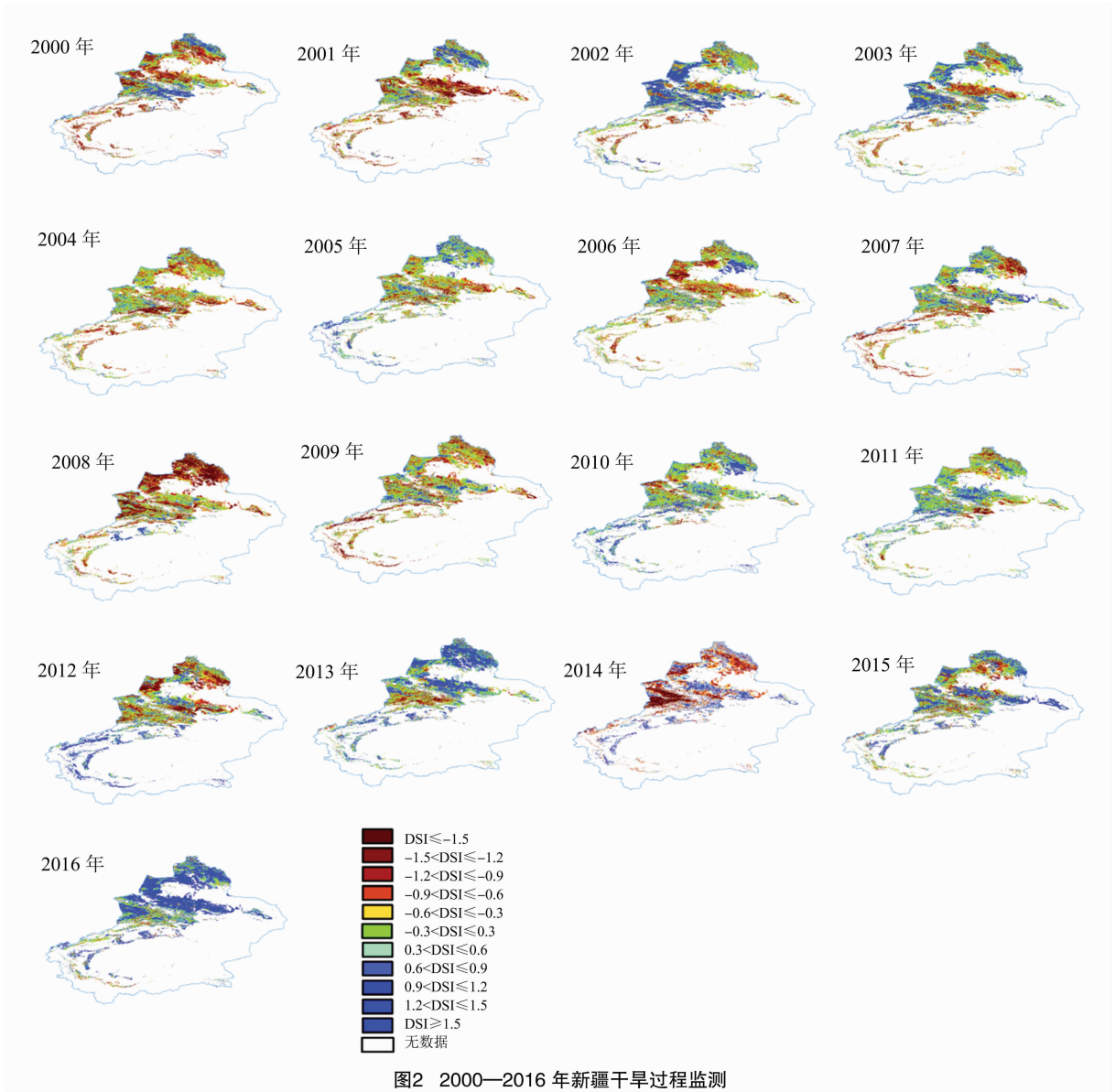


图2 2000—2016 年新疆干旱过程监测

表 1 新疆年均干旱面积比例

DSI 取值范围	干旱等级	年均干旱面积比例(%)			
		新疆整体	北疆	南疆	天山
$DSI \leq -1.5$	极端干旱	4.964 3	4.532	4.943	5.691
$-1.5 < DSI \leq -1.2$	严重干旱	4.860 7	4.851	5.451	4.539
$-1.2 < DSI \leq -0.9$	适度干旱	7.839 7	8.205	8.315	6.965
$-0.9 < DSI \leq -0.6$	轻度干旱	10.500 9	11.074	10.440	9.589
$-0.6 < DSI \leq -0.3$	初期干旱	11.912 6	12.311	11.398	11.548
$-0.3 < DSI \leq 0.3$	正常(既不干旱也不湿润)	23.275 4	23.106	22.131	24.208

由图 6 可知,DSI 整体上以轻微增加为主,表明新疆整体上干旱趋势减弱,趋向湿润化,但变化速率较慢。天山山地、阿尔泰山山地、塔城地区呈减小趋势,其中,天山山地减小趋势最为明显,表明这些地区干旱程度加重。从季节变化趋势分布可知,各季节南疆地区 DSI 整体上呈增加趋势,干旱趋势

减弱趋向湿润化,夏季最为明显。天山山地地区整体呈减小趋势,干旱程度加重,秋季最为明显。北疆地区夏季呈增加趋势,干旱程度减弱,其他季节都呈减小趋势,秋冬两季干旱程度增加最为明显。

3.4 DSI 在新疆的适用性分析

DSI 是由 NDVI 和 ET/PET 数据构建,其中 ET/

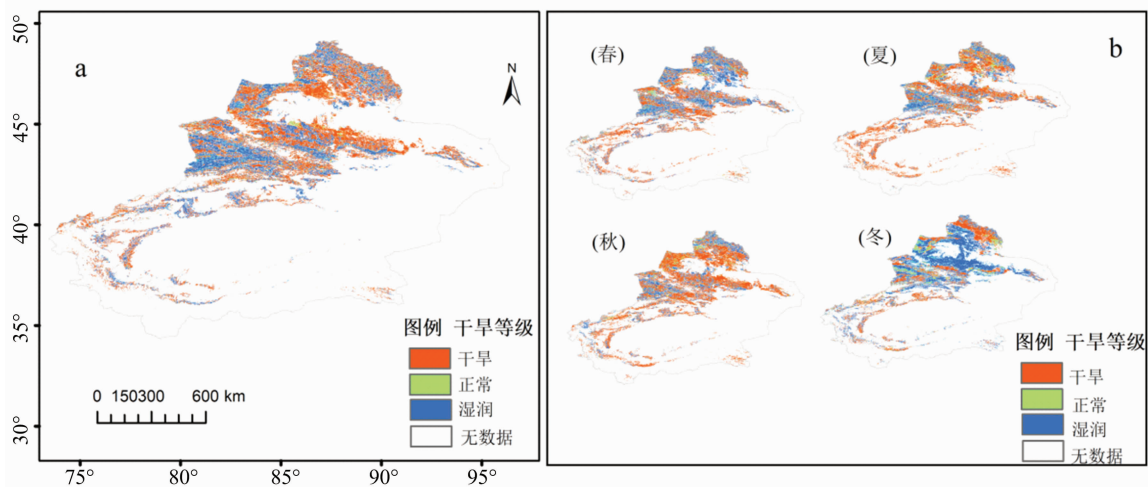


图3 新疆年际(a)、季节(b)干旱等级众数空间分布

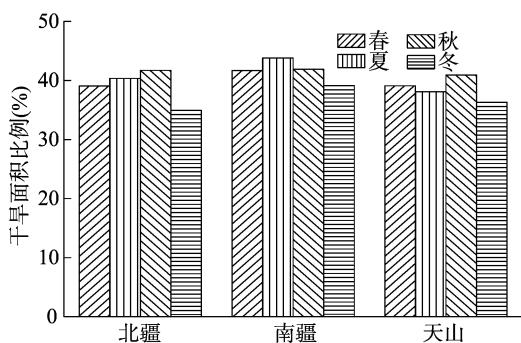


图4 新疆各亚区不同季节干旱面积比例

PET 数据在新疆地区已经利用实测数据得到广泛验证^[17,22],NDVI 数据也在新疆地区取得较好的应用成果^[23-25]。因此,DSI 从数据精度方面适用于新疆地区。

其次,分别利用 2000—2016 年新疆农作物旱灾面积(s)、年降水量(p)与 DSI 监测的干旱面积(y)及湿润指数(W)、NPP 从时间变化趋势一致性和相关性上评价其在新疆地区的适用性(图 7)。

实测农作物干旱面积与 DSI 监测的干旱面积变化趋势一致,两者相关性较高,决定系数达到 0.67。

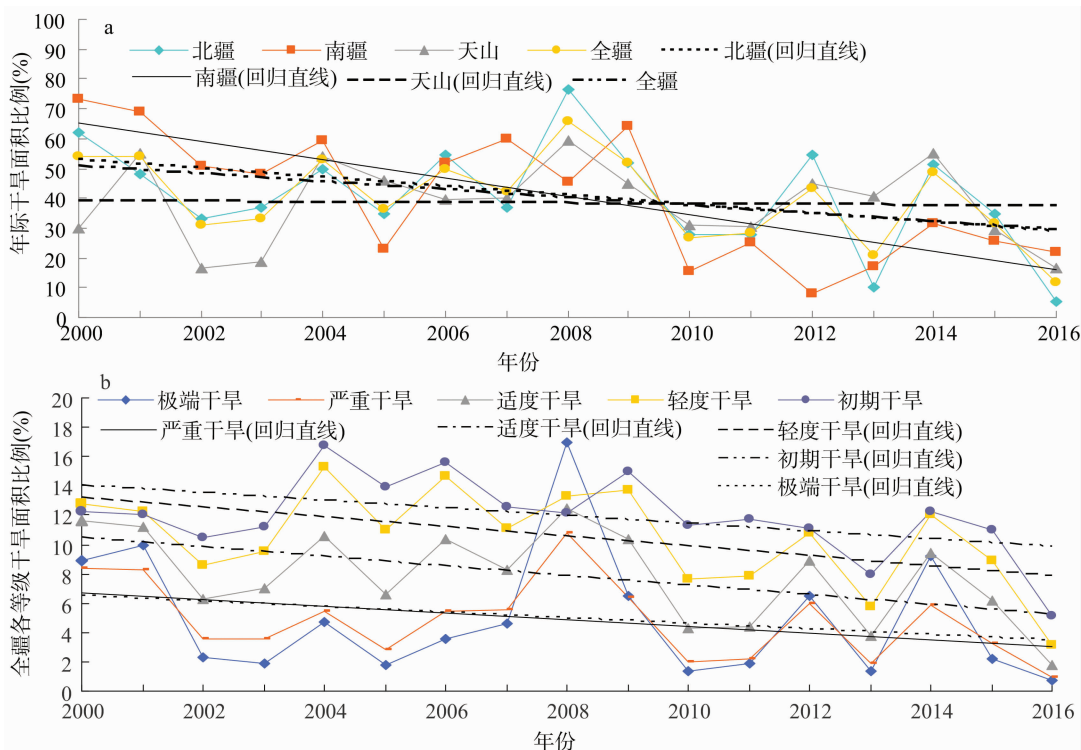


图5 2000—2016 年新疆干旱面积比例变化

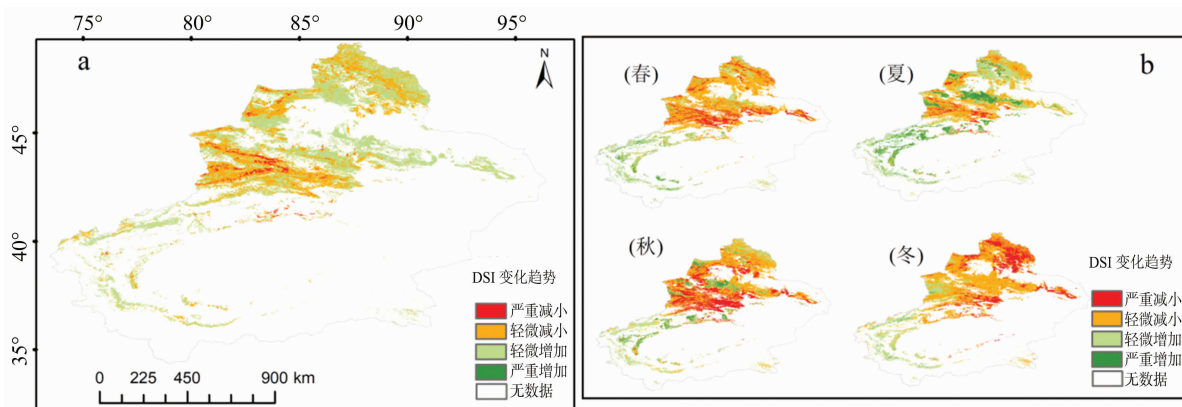


图6 新疆 DSI 年际(a)、季节(b)变化趋势

降水量与 DSI 监测的干旱面积相关性较高,决定系数 0.63。北疆、南疆地区的 W、NPP、DSI 变化趋势保持较好的一致性,天山地区少数年份三者变化趋势一致性较差。从 3 种指标的相关性来看,北疆地区相关性最高,DSI - W、DSI - NPP 的决定系数分别达到 0.69、0.62;南疆地区 3 种指标的相关性良好,DSI - NPP、DSI - W 的决定系数分别达到 0.69、0.53;天山地区相关性较差。

最后通过计算湿润指数(W)、NPP、DSI 逐像元空间 Pearson 相关系数(图 8),进一步分析 DSI 在新疆的适宜性。结果显示,DSI - W 和 DSI - NPP 整体上都呈显著正相关,分别占全疆面积的 88%、86.65%,说明 DSI 在干旱监测方面具有较大的应用潜力。

综上,DSI 与湿润指数(W)、植被净初级生产力(NPP)在时间变化趋势和空间分布上都具有显著的相关性,有力地证明了 DSI 适用于新疆干旱监测。

4 讨论

本研究中用 DSI 监测干旱面积与实测农作物旱灾面积相关性较高,结合黄健熙等的研究发现,DSI 在农业干旱监测方面相较于帕尔默干旱指数(PDSI)更为准确,且能较好地反映农业干旱的空间差异性和时间演变性^[1,26]。说明 DSI 在农业干旱监测方面具有较大的应用潜力。新疆地区夏秋两季干旱较为严重,此时正值农作物生长期,对作物长势造成一定影响。因此,本研究对新疆农作物旱情预防和灌溉措施制定提供了一定的参考价值。

近十几年新疆干旱面积呈减少趋势,南疆最为明显。这与许玉忠等基于标准化降水指数(SPI)指数^[18]、潘淑坤等基于干旱指数^[27]、刘星含等基于 MODIS - TVDI 指数在新疆干旱监测研究^[28]中的变

化趋势一致。干旱受降水、蒸散发、土地覆盖变化的综合影响。近年来全球变暖,北冰洋冰川、天山冰川大量消融,增加了新疆大气中的水汽含量,导致新疆降水量呈轻微增加趋势,变化率为 2 mm/年。其次,2000 年以来新疆大部分地区蒸散发有轻微的减少趋势,变化率为 -0.93 mm/年^[17]。这可能是近十几年新疆干旱面积减少的主要原因。本研究结论为认识新疆干旱变化动态添加了新的依据。

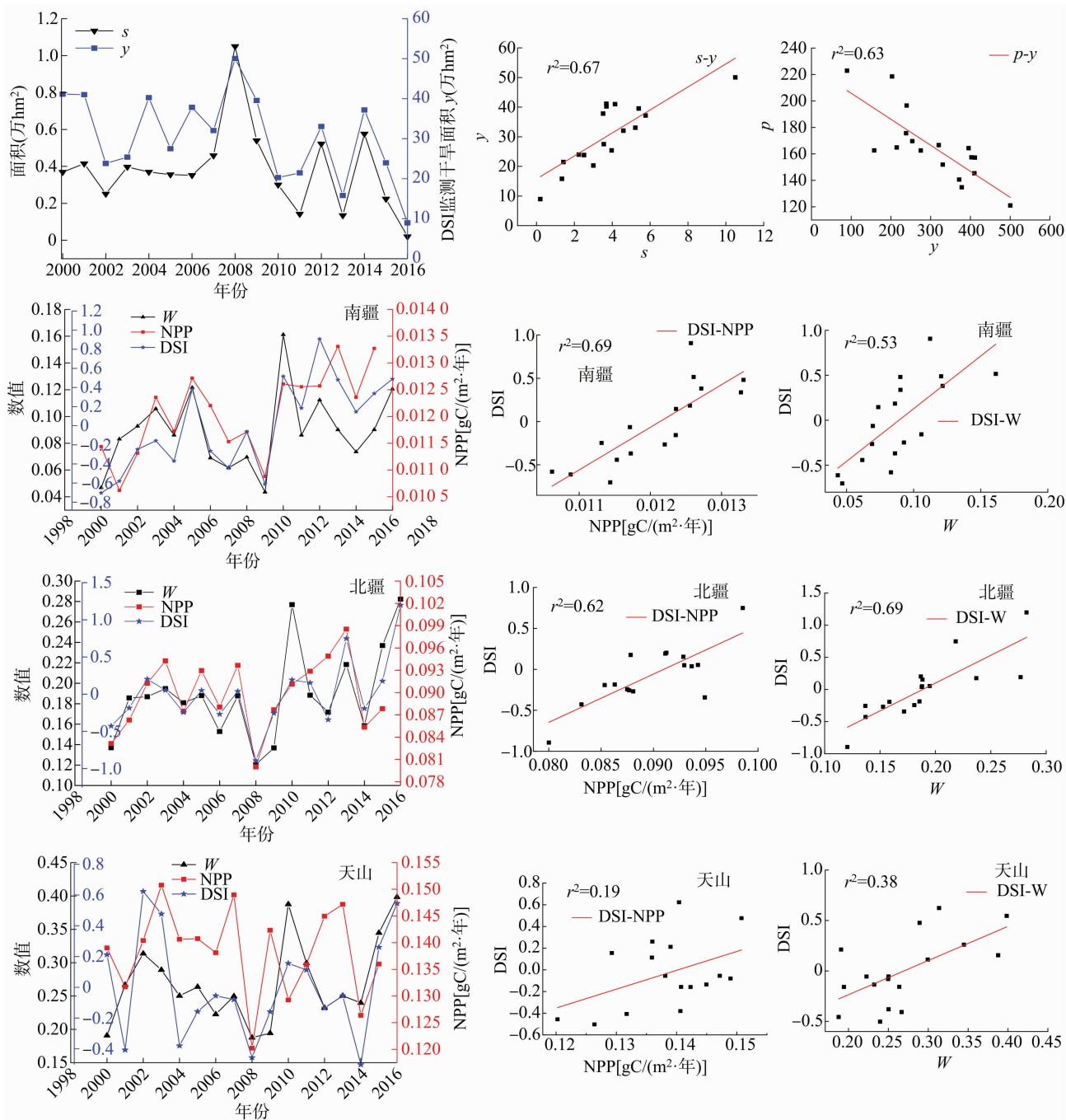
DSI 目前基于经验采用 0.5 为 ET/PET 与 NDVI 的权重系数,没考虑二者各自在时空上对干旱贡献度的差异。NDVI 对干旱响应存在一定的时间滞后性,而土壤湿度体现了地表降水和蒸散的综合效应,是干旱监测的关键指标之一^[29]。后续研究应结合土壤湿度数据链接 NDVI 与 ET/PET,提高三者对干旱响应的同步性,并进一步研究三者各自在时空上对干旱贡献度的差异,以此为依据调整三者的权重系数,优化 DSI,提高其对干旱监测的精确性。

5 结论

(1)本研究通过 MODIS NDVI 和 ET/PET 数据集,构建干旱严重指数(DSI),分析新疆 2000—2016 年干旱状况的时空动态特征,结果与前人采用其他干旱指数取得的成果^[27-28,30-31]基本一致。

(2)空间分布特征:新疆整体上处于干旱状况,以轻旱、中旱为主。干旱出现频率最多的地区为塔城地区、昌吉回族自治州中部地区、阿勒泰地区南部、克孜勒苏柯尔克孜自治州、若羌县、和田县等。全疆干旱频率秋季最高,冬季最低。

(3)时间变化趋势:近十几年新疆干旱面积整体上呈减少趋势,2009 年之后减少趋势更为明显。干旱面积最大值出现在 2008 年,最小值出现在 2016 年。各季节内南疆地区干旱趋势减弱,夏季最

图7 新疆农作物旱灾面积、 W 、 NPP 与 DSI 变化曲线及相关性

为突出。北疆地区夏季干旱趋势减弱,秋冬两季干旱趋势明显增强。天山山地整体上干旱趋势增强,秋季最为明显。

(4)适用性分析: DSI 基础构成数据 ET/PET 以及 $NDVI$ 广泛应用于新疆地区,数据精度已得到实测数据验证。实测农作物旱灾面积、降水量与 DSI 相关性较高。湿润指数(W)、 NPP 与 DSI 在时间变化趋势上具有较高的一致性和相关性。在空间 Pearson 相关性上,整体上也呈显著相关,这有力地

证明了 DSI 在干旱监测方面具有较大的应用潜力,适用于新疆地区。

参考文献:

- [1] 黄健熙, 张洁, 刘峻明, 等. 基于遥感 DSI 的干旱与冬小麦产量相关性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 166-173.
- [2] 张利利, 周俊菊, 张恒玮, 等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 996-1007.
- [3] 赵丽, 冯宝平, 张书花. 国内外干旱及干旱指标研究进展[J].

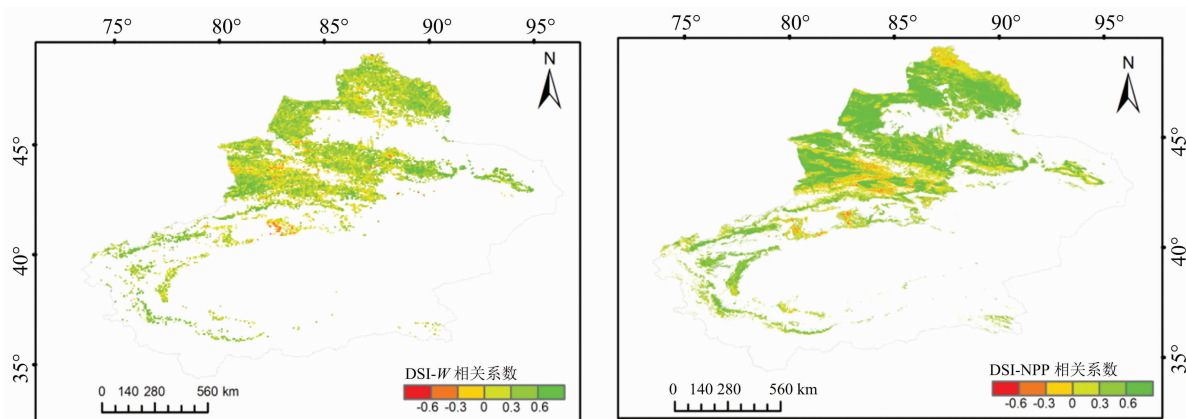


图8 2000—2016 年新疆 DSI-W、DSI-NPP 空间相关系数

江苏农业科学,2012,40(8):345-348.

- [4] 李 勤,张 强,黄庆忠,等. 中国气象农业非参数化综合干旱监测及其适用性[J]. 地理学报,2018,73(1):67-80.
- [5] Alam U. Drought and water crises: Science, technology, and management issues edited by Donald A. Wilhite,2005. CRC Press, 406 pp. ISBN 0 8247 2771 1 [J]. Environmental Policy & Governance,2010,16(6):378-379.
- [6] Zhang J,Mu Q Z,Huang J X. Assessing the remotely sensed drought severity index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China[J]. Ecological Indicators,2016,63:296-309.
- [7] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [8] Waltershea E A,Peters A J. Drought monitoring with NDVI - Based standardized vegetation index[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2002,68(1):71-76.
- [9] Brown J F, Reed B C, Hayes M J, et al. A prototype drought monitoring system integrating climate and satellite data [C]// Integrating Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale. Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference. 2002.
- [10] 张书余. 干旱气象学[M]. 北京:气象出版社,2008.
- [11] Williamson S N, Hik D S, Gamon J A, et al. Evaluating cloud contamination in Clear - Sky MODISTerraDaytime land surface temperatures using Ground - Based meteorology station observations [J]. Journal of Climate,2013,26(5):1551-1560.
- [12] Mu Q Z,Zhao M S,Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2013,94(1):83-98.
- [13] Um M J, Kim Y, Park D. Evaluation and modification of the Drought Severity Index (DSI) in East Asia [J]. Remote Sensing of Environment,2018,209:66-76.
- [14] Zhang X Q, Yamaguchi Y. Characterization and evaluation of MODIS - derived drought severity index (DSI) for monitoring the 2009/2010 drought over southwestern China[J]. Natural Hazards, 2014,74(3):2129-2145.
- [15] Haroon M A, Zhang J H, Yao F M. Drought monitoring and performance evaluation of MODIS - based drought severity index (DSI) over Pakistan [J]. Natural Hazards,2016,84(2):1349-1366.
- [16] 罗青红,宁虎森,陈启民. 基于湿润指数的新疆甘家湖地表干湿状况变化趋势[J]. 干旱区研究,2016,33(5):921-926.
- [17] 邓兴耀,刘 洋,刘志辉,等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报,2017,37(9):2994-3008.
- [18] 许玉忠,罗 鸣. 基于 SPI 的新疆干旱时空分布分析[J]. 人民珠江,2016,37(10):38-42.
- [19] 周华荣,黄韶华. 对新疆生态环境问题及其对策的若干思考 [J]. 干旱区资源与环境,1999(4):1-8.
- [20] 孙 睿,朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报,2000,55(1):36-45.
- [21] 申双和,张方敏,盛 琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报,2009,25(1):11-15.
- [22] 阿迪来·乌甫,王素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等. 基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J]. 地理研究,2017,36(7):1245-1256.
- [23] 闫俊杰,乔 木,周宏飞,等. 基于 MODIS/NDVI 的新疆伊犁河谷植被变化[J]. 干旱区地理,2013,36(3):512-519.
- [24] 李海霞,杨 井,陈亚宁,等. 基于 MODIS 数据的新疆地区土壤湿度反演[J]. 草业学报,2017,26(6):16-27.
- [25] 何宝忠. 新疆植被物候时空变化特征[J]. 生态学报,2018,38(6).
- [26] 王 莹,吴荣军,郭照冰. 基于实际蒸散构建的干旱指数在黄淮海地区的适用性[J]. 应用生态学报,2016,27(5):1603-1610.
- [27] 潘淑坤,张明军,汪宝龙,等. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(3):32-39.
- [28] 刘星含,张佳华,许晓宏. MODIS - TVDI 指数监测新疆干旱动态[J]. 遥感信息,2015(2):111-115.
- [29] 郭维栋,马柱国,姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报,2003,58(增刊1):83-90.
- [30] 胡 琦,董 蓓,潘学标,等. 1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. 农业工程学报,2017,33(6):124-132,315.
- [31] 庄晓翠,杨 森,赵正波,等. 干旱指标及其在新疆阿勒泰地区干旱监测分析中的应用[J]. 灾害学,2010,25(3):81-85.