

doi: 10. 6046/zrzyg. 2021389

引用格式: 程军,李云贞,邹渝. 新疆干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):216–224. (Cheng J, Li Y Z, Zou Y. Spatial and temporal dynamics of drought in Xinjiang and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(4):216–224.)

新疆干旱时空动态及其对气候变化的响应

程 军¹, 李云贞², 邹 渝³

(1. 渭南师范学院环境与生命科学学院,渭南 714099; 2. 四川大学水利水电学院,成都 610065; 3. 四川省生态环境科学研究院,成都 610041)

摘要: 为实现对新疆地区旱情的动态连续监测,基于温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI),辅以 Sen 斜率法、重标极差法及偏相关分析法探究了新疆 2001—2020 年 TVDI 时空动态、变化趋势、未来持续状态及季节性降水、气温对 TVDI 的影响。结果表明: ①TVDI 最小值出现在天山山脉以北及昆仑山脉地区,TVDI 值在 0.57 以下,属轻旱等级,塔里木盆地和准噶尔盆地 TVDI 在 0.86 以上,属特旱等级; ②春季 TVDI 呈减小趋势,减小速率为 0.001 3/a,夏季 TVDI 增加速率为 0.001 4/a,秋季 TVDI 增加速率最大(增加速率为 0.002 0/a),冬季 TVDI 增加速率最小(增加速率为 0.000 8/a); ③春、冬季未来一段时间内大部分区域 TVDI 将呈增加趋势,夏、秋季 TVDI 将在未来一段时间内大部分像元呈减小趋势; ④春、冬季 TVDI 与降水以负相关为主,夏、秋季 TVDI 与降水以正相关为主,春季 TVDI 与气温以正相关为主,夏季 TVDI 与气温的相关性从西向东递减,相关性从负相关逐渐变成正相关,秋、冬季 TVDI 与气温以负相关为主。

关键词: TVDI; 气温; 降水; 新疆

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2022)04–0216–09

0 引言

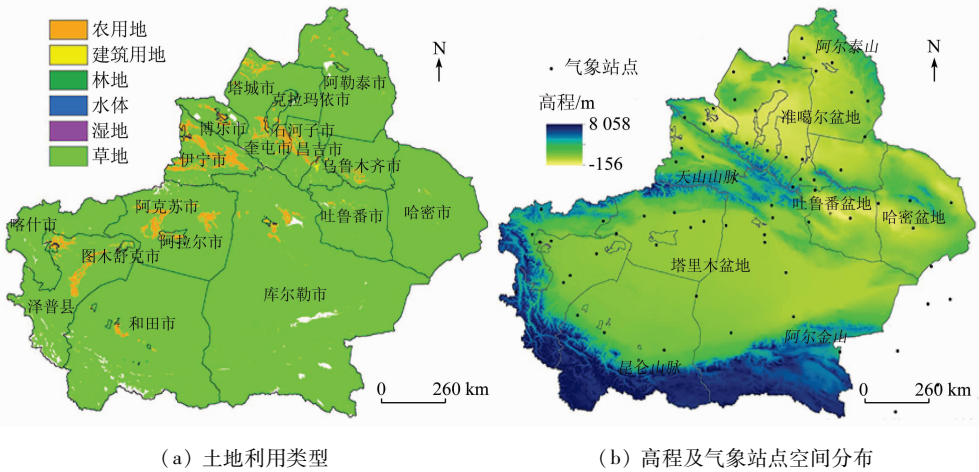
新疆是“丝绸之路经济带”的核心区,但由于其特殊的地理位置,气候环境恶劣、水资源短缺且时空分布不均、季节性降水供需矛盾大等,导致干旱事件频繁发生,成为该地区 21 世纪面临的最复杂的挑战之一^[1–3]。但干旱事件的发生是一个复杂的过程,受气候变化、植被退化和人类活动等多种因素的影响。相对其他自然灾害,其发生频率高、持续时间长、影响范围广,成为影响农业生产和生态环境最严重的气象灾害^[4–6]。因此,如何及时、有效、大范围监测和预测新疆干旱发生和发展规律已成为亟待解决的重要科学课题。

传统干旱监测主要是基于地面站点的土壤墒情数据,其准确性、代表性和完整性都存在局限。而遥感技术能利用传感器获取及时、客观的大范围综合地表信息,同时监测地表温度和植被生长状态。目前已有诸多学者基于遥感对新疆干旱和水分状况进行研究^[7–11],谢培等^[7]发现 1961—

2015 年新疆干旱由南向北依次增加。但有研究发现 2000—2016 年天山山脉以北及昆仑山脉地区较为湿润,而在塔里木盆地较干旱^[8],2015 年以塔里木盆地和准噶尔盆地为 2 个干旱中心,旱情状况由严重逐步向周围山区递减至湿润状态^[11]。同时,有学者发现 1961—2015 年新疆整体表现为干旱逐渐减弱趋势,新疆西北部以变湿为主,东南部以变干为主^[12–14]。21 世纪以来,随温度跃升,蒸发需求加剧,而降水量增加趋势减缓甚至微弱减少,导致新疆呈明显暖干化趋势,干旱化区域主要在新疆南部、东部和天山山区,而在新疆北部地区和西南部增湿特征明显^[12]。新疆夏季新疆地区干旱趋势减弱最为突出,北疆和天山地区干旱表现为夏季减弱、秋季增强趋势^[11,14–16]。上述研究对新疆干旱时空动态和变化趋势的研究存在差异,有研究指出这与新疆干旱动态变化与地形、降水量、太阳辐射和地表蒸散发及极端气候事件等因素有关^[17–21]。目前虽已有对新疆干旱的研究,但关于干旱变化动态及成因仍存在较大的争议,且干旱监测是一项长期性、经常性的重要监测任务,

仍需时刻关注新疆干旱的时空动态及主导因子。温度植被干旱指数 (temperature vegetation dryness index, TVDI) 因考虑温度与植被指数双重特征, 被证明可以有效地反映干旱特征^[9-11]。

基于此, 本文利用 2001—2020 年的 TVDI 数据, 辅以 Sen 斜率法、重标极差法和偏相关分析法对新疆干旱时空动态、变化趋势、未来变化趋势及季节性气候对干旱影响进行分析, 以期揭示生态工程措施下新疆干旱的时空变化特征, 为我国生态环境改善及未来生态环境建设提供科学依据。



注: 基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016) 1549 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 1 研究区土地利用类型和海拔及气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land use, altitude and meteorological stations in the study area

减少, 北疆一般多在 150 ~ 200 mm, 南疆则不足 100 mm, 多年平均蒸发量约 2 000 mm。年均气温约为 9.72 ℃, 具有冬季严寒、夏季酷热的特点, 气温年较差和日较差大。干旱是新疆的主要经常性自然灾害, 1950—2000 年新疆有记载的干旱灾害共 47 次, 平均每年 1.06 次^[1-2]。

1.2 数据来源

归一化差值植被指数 (normalization difference vegetation index, NDVI) 源于 Google Earth Engine (GEE) 平台上提供的 2001—2020 年 MOD13Q1 产品的 NDVI 数据, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d, 经过几何纠正和大气校正的标准 3 级产品数据, 数据经过最大值合成法合成为月值。

地表温度 (land surface temperature, LST) 源于 GEE 平台提供的 2001—2020 年的 MOD11A2 产品提供的空间分辨率为 1 km、时间分辨率为 8 d 的 LST 数据, 该数据经过地形校正和月最大值合成。

土地利用数据源于 GEE 平台提供的 MCD12Q1 产品, 该产品是根据 IPGP 进行分类的全球产品, 土地覆盖数据重分类为林地、草地、湿地、农用地、建筑用地和水体。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区地处中国西北边陲 (E73°29'54" ~ 96°23'3", N34°20'11" ~ 49°10'55"), 是中国占地面积第一大省区, 总面积达 1.64 × 10⁶ km²。新疆远离海洋, 深居内陆, 四周有高山阻隔, 形成明显的温带大陆性干旱气候, 干旱少雨, 水资源紧缺, 生态环境脆弱 (图 1(a))。夏季短暂, 冬季漫长而寒冷, 冷热差异大, 降水量少而不均, 从西北向东南逐渐

数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 由资源环境数据与平台网站 (<http://www.resdc.cn/user>) 提供, 空间分辨率为 1 km。

气象数据采用中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/data/cdcindex>) 提供的 2001—2020 年的月值数据得到新疆及其周围的 130 个站点气象数据 (图 1(b)), 将 12—2 月定义为冬季, 3—5 月定义为春季, 6—8 月定义为夏季, 9—11 月定义为秋季, 最后利用 ANUSPLINE 软件插值为 1 km 空间分辨率的栅格数据。LST 数据为 0 cm 位置的 LST, 本文采用该数据对 LST 的校正结果进行验证。

2 研究方法

2.1 LST 的地形校正

在不同高程下, LST 会因气温和大气湍流的影响而有较大变化。当研究区内地形有明显起伏时, 在高程较高的地区, 气温较低, LST 也会较低, 若不经高程校正, 高程高区 LST 低, 会造成对该区域土壤湿度的高估^[22]。因此, LST 数据需要使用 DEM 数据对其进行校正, 公式为:

$$T = T_s + aH \quad , \quad (1)$$

式中： T 为经 DEM 校正后的 LST 值； T_s 为原始的 LST 值； H 为 DEM 值； a 为校正系数，结合相关参考文献^[22]，本文 a 取值为 $-0.6/100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过采用中国气象数据网提供的 2002—2008

年 0 cm LST 观测数据 (gradient surface temperature, GST) 对校正前后的 LST 进行验证 (图 2)，发现通过 DEM 校正后的 LST 与 GST 的相关性较原始的高，因此本文采用校正后的 LST。

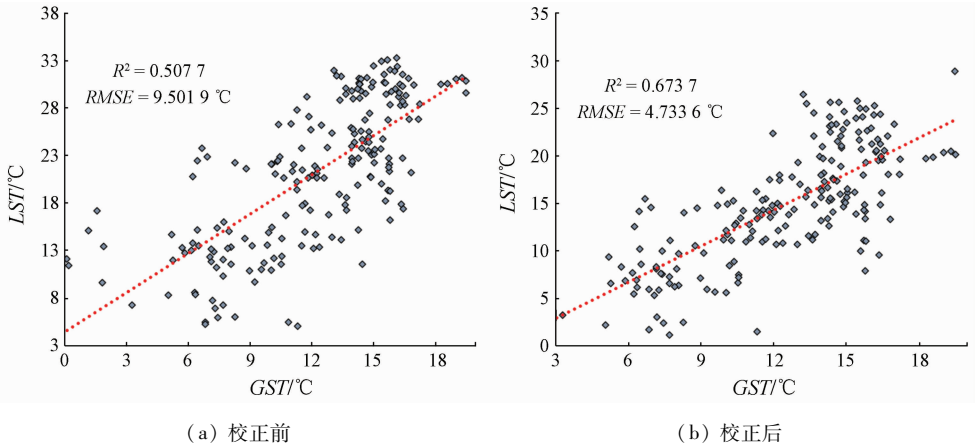


图 2 地表温度站点实测数据与校正前后 LST 结果比较

Fig. 2 Comparison between measured data of surface temperature station and LST results before and after correction

2.2 TVDI

Price^[23] 和 Sandholt 等^[24] 研究发现植被覆盖度与土壤含水量之间的变化范围较大时,NDVI 与 LST 间构成的散点图是一个三角形,指出 TVDI 是利用 T-NDVI 特征空间提取的水分胁迫指标来估算陆面表层土壤水分的一种方法。Moran 等^[25] 对 T-NDVI 特征空间的研究中发现地表最低温度与植被覆盖度和植被覆盖类型存在一定的关系。TVDI 的计算公式为：

$$TVDI = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad , \quad (2)$$

式中： T_{max} 为经 DEM 校正后的最高地表温度； T_{min} 为经 DEM 校正后的最低地表温度。

2.3 干旱变化趋势分析

采用 Sen 斜率估计法分析 2001—2020 年间新疆 TVDI 的变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式为^[26]：

$$\beta = Median\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad , \quad (3)$$

式中： β 为 TVDI 变化趋势； $Median()$ 为取中值函数。当 $\beta > 0$ 时,TVDI 呈增加趋势； $\beta < 0$ 时,TVDI 呈减小趋势。

2.4 干旱变化持续性分析

Hurst 指数是根据长时间序列数据预测未来持续状态时间序列信息长期依赖性的有效方法。研究基于 Hurst 中的重标极差法可以反映其变化趋势的

持续性^[27]。若 $Hurst > 0.5$, 表示 TVDI 时间序列是一个持续性序列,即未来物候变化趋势与过去一致；若 $Hurst = 0.5$, 则说明 TVDI 序列为随机序列,与过去没有关系；若 $Hurst < 0.5$, 则表明 TVDI 时间序列数据具有反持续性,即 TVDI 过去变化趋势与未来的变化趋势相反^[27]。

2.5 TVDI 与气温、降水偏相关分析法

本研究采用偏相关分析法研究 TVDI、气温和降水的关系,偏相关系数计算公式为^[17]：

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)} \quad , \quad (4)$$

式中： x, y 和 z 分别为 TVDI、降水量与温度； r_{xy} 为 TVDI 与降水量的相关系数； r_{xz} 为 TVDI 与温度的相关系数； r_{yz} 为降水量与温度的相关系数； $r_{xy \cdot z}$ 为将温度固定后 TVDI 与降水量间的偏相关系数,以此类推。

3 结果与分析

3.1 干旱时空分布特征

参阅吴黎^[28] 对 TVDI 干旱指标的划分标准和本研究区 TVDI 的分布特征 ($TVDI \leq 0.46$, 无旱； $0.46 < TVDI \leq 0.57$, 轻旱； $0.57 < TVDI \leq 0.76$, 中旱； $0.76 < TVDI \leq 0.86$, 重旱； $0.86 < TVDI \leq 1$, 特旱) 对研究区进行土壤湿度分级。从 20 a 新疆 TVDI 时间曲线发现 (图 3)：TVDI 以 $0.0007/a$ 速率增加 ($P < 0.05$)，属中旱和重旱等级。2002 年 TVDI

有最大值(0.774),2005 年有最小值(0.736)。其中,冬季干旱程度最大,均值集中在 0.85 ~ 0.90。属特旱等级,增加速率为 0.000 8/a。春季 TVDI 波动性最大,减小速率为 0.001 3/a。夏季 TVDI 增加

速率为 0.001 4/a,变化速率为四季中最大。秋季 TVDI 增加速率最大,增加速率为 0.002 0/a,变化较为明显。总体而言,新疆干旱等级较高,且除春季表现为干旱减缓趋势,其他季节均为干旱增加趋势。

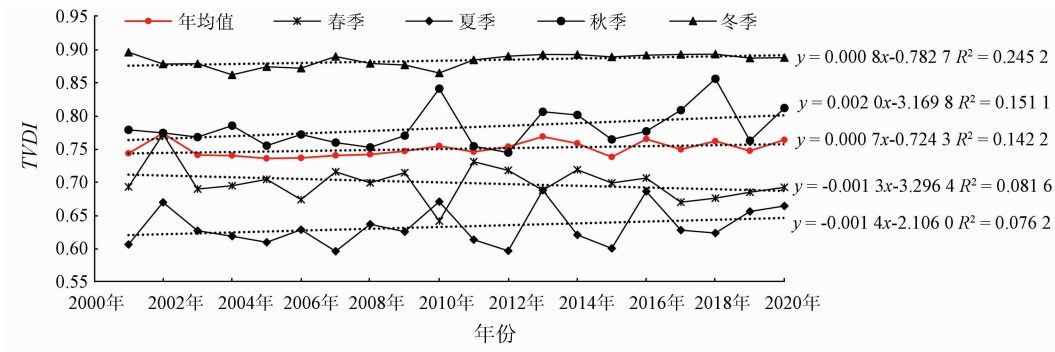


图 3 TVDI 的年际变化趋势
Fig.3 Interannual change trend of TVDI

从 20 a 新疆 TVDI 空间分布发现(图 4),TVDI 极小值集中在天山山脉以北及昆仑山脉地区,集中在 0.57 以下,属轻旱等级。塔里木盆地和准噶尔盆地的 TVDI 基本在 0.86 以上,属特旱等级,整体表

现为南疆干旱程度高于北疆。从年际变化来看,2002 年、2010 年、2013 年、2014 年以及 2016—2020 年 TVDI 属特旱的面积大于其他年份,在 2001—2008 年表现为特旱面积减少趋势,尤其是 2006 年

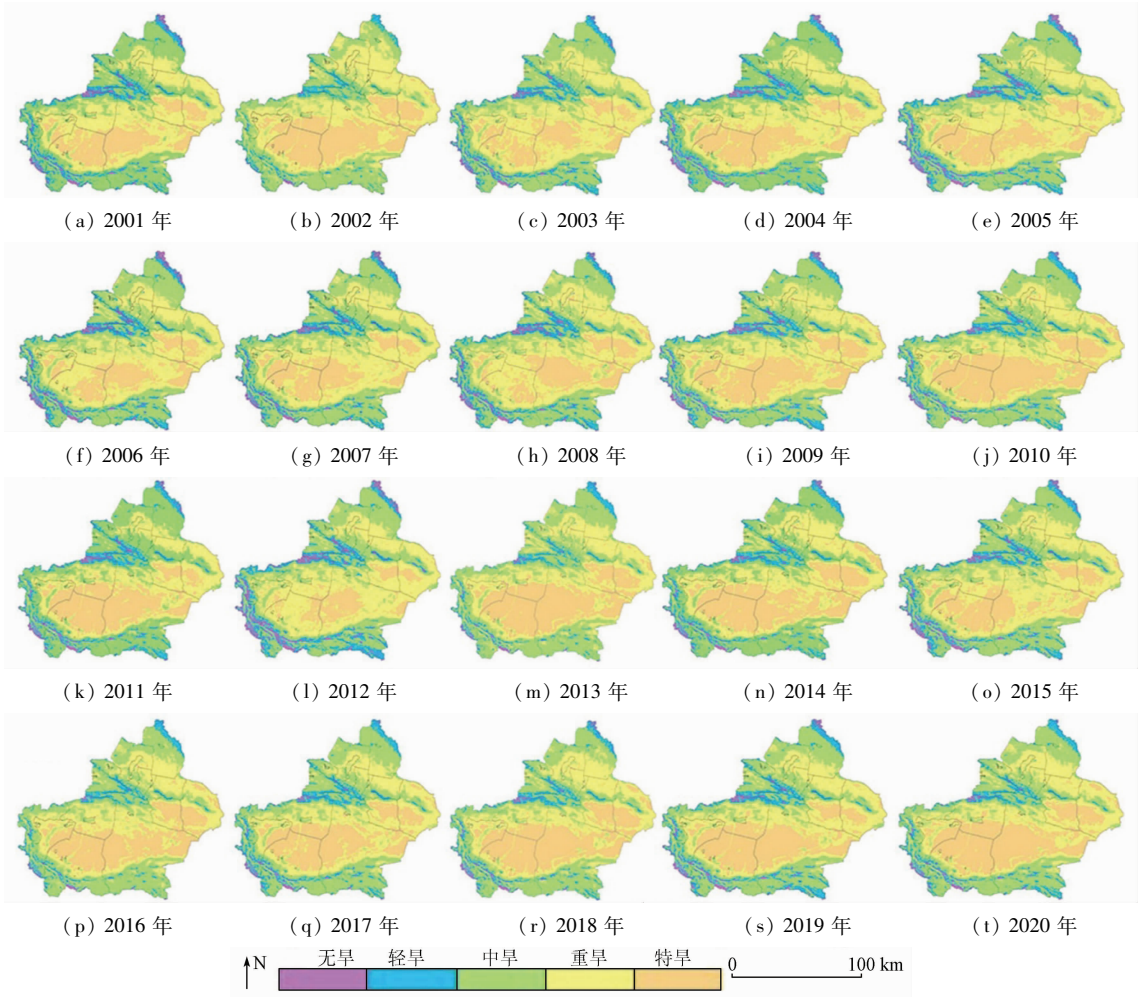


图 4 TVDI 空间分布
Fig.4 Spatial distribution of TVDI

和 2007 年特旱面积比其他年份小。但除 2012 年和 2009—2015 年特旱面积较小,其他年份特旱面积呈明显增加趋势。

3.2 干旱的空间变化趋势

从 20 a 新疆 TVDI 变化特征发现(图 5):春季 TVDI 以减小趋势为主($P < 0.05$),减小速率集中在 $-0.005 \sim 0/a$,占新疆总面积的 74.25%。TVDI 呈不显著增加趋势的区域集中在塔里木盆地和吐鲁番盆地。夏季 TVDI 以增加趋势为主,但在天山山脉以北地区的 TVDI 为减少趋势。秋季 91.59% 表现

为增加趋势,增加速率在 $0 \sim 0.005/a$ 的像元占 89.32%,呈减小趋势的区域零星分布在天山山脉。冬季 TVDI 为增加趋势,呈较小趋势的区域分布在柴达木盆地和吐鲁番盆地。统计不同土地利用下各季节在不同变化速率下像元百分比发现(图 6):春季 TVDI 呈减小趋势的像元数明显多于其他三季,但不同土地利用覆盖区域的差异较大;秋季在整个区域均以增加趋势为主,即土壤水分明显在减少,不同土地利用类型的像元数的差异较小;冬季不同土地利用类型覆盖区域相差不大。

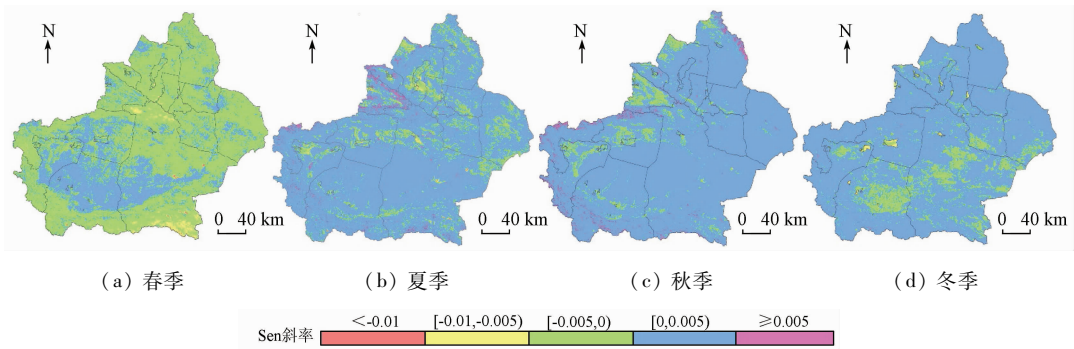


图 5 TVDI 变化趋势
Fig. 5 TVDI change trend

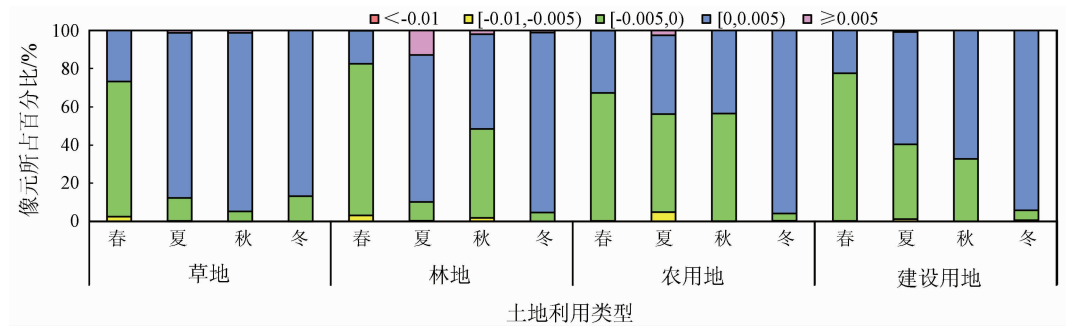


图 6 不同土地利用类型 TVDI 变化趋势统计
Fig. 6 Statistics of different land use types of TVDI change trend

3.3 干旱变化的持续性分析

从新疆 20 a 变化持续性空间分布(图 7)发现:春季 Hurst 指数均值为 0.423,即未来一段时间内 TVDI 变化趋势与 2001—2020 年变化趋势相反,即

大部分区域 TVDI 将呈增加趋势。夏季 Hurst 集中在 0.5 以下的占比为 90.23%,但在准噶尔盆地地区的 Hurst 集中在 0.5 以上,即这些区域 TVDI 未来变化趋势与过去 20 a 趋势相反。秋季 TVDI 的 Hurst 均

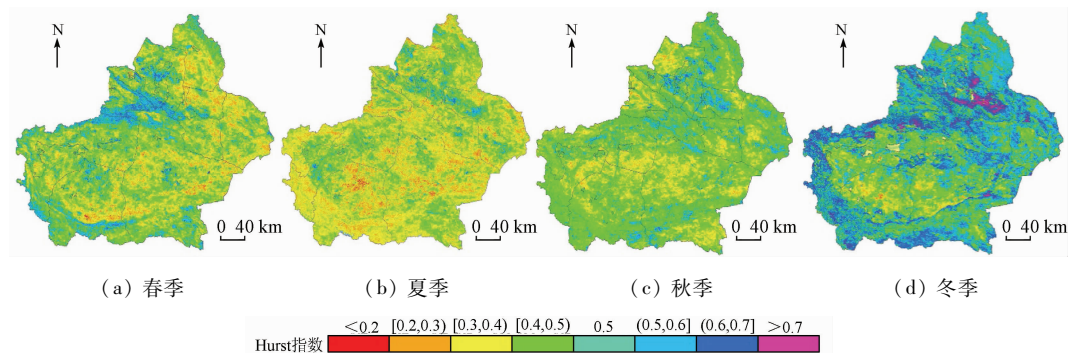


图 7 TVDI 的 Hurst 指数空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of Hurst index of TVDI

值为 0.440,结合趋势分析表明未来秋季 TVDI 将在一段时间内呈减小趋势。冬季 Hurst 均值为 0.517,变化趋势与过去 20 a 的相同。总体而言,不同季节未来 TVDI 变化趋势均与过去趋势存在一定的关系。

3.4 干旱对气候变化的响应

从图 8 可知,控制气温条件下,春季 TVDI 与降水间以负相关为主,占比为 89.31%,相关系数集中在 $-0.5 \sim 0$,TVDI 与降水呈正相关的区域集中在柴达木盆地和准噶尔盆地。夏季 TVDI 与降水以正相关为主,尤其在昆仑山脉和天山山脉南北坡地区相关性较高,在塔里木盆地和准噶尔盆地以东地区的 TVDI 与降水呈负相关。秋季 TVDI 与降水以正相

关为主,而在准噶尔盆地和大黑山地区,降水与 TVDI 以负相关为主。冬季 TVDI 与降水以负相关为主,尤其在塔里木盆地和阿尔泰山脉地区,负相关系数在 0.5 以下。控制降水条件下,春季 TVDI 与气温以正相关为主,但在阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山脉地区为负相关。夏季 TVDI 与气温的相关性从西向东相关性从负变为正。秋季 TVDI 与气温以负相关为主,尤其在天山北坡、昆仑山脉和阿尔泰山脉地区,负相关系数在 -0.3 以下,但在吐鲁番盆地和塔里木盆地以正相关为主。冬季气温与 TVDI 以负相关为主,但在柴达木盆地、阿尔泰山脉、准噶尔盆地和吐鲁番盆地为正相关,相关系数在 0.3 以上。

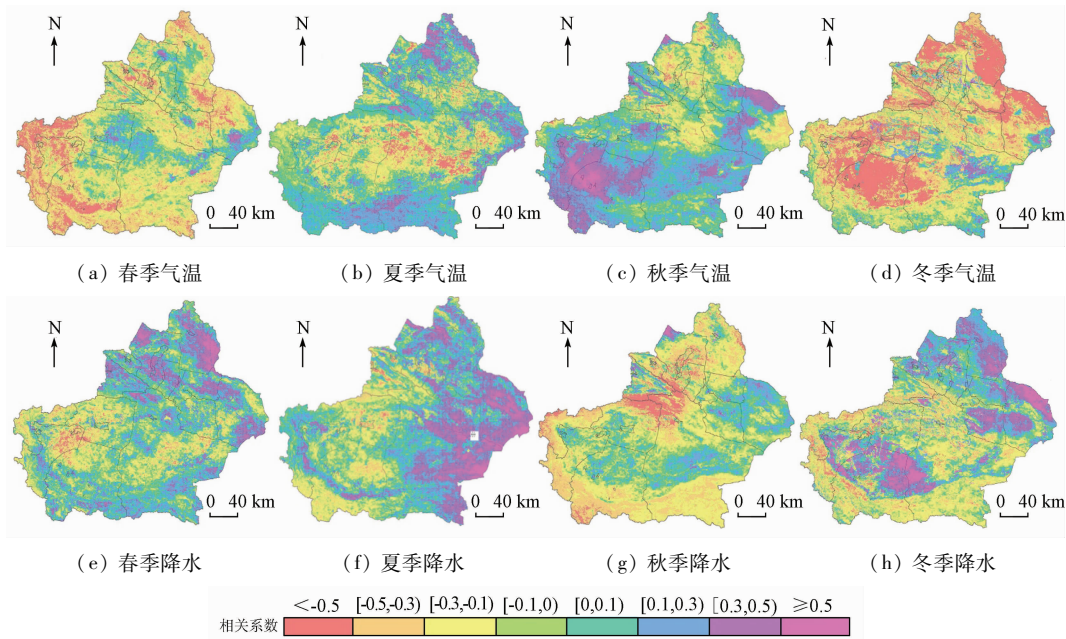


图 8 TVDI 与季节性气温和的降水偏相关系数分布
Fig.8 Distribution of partial correlation coefficient between TVDI and temperature and precipitation

统计不同土地利用覆盖下的四季相关系数发现 (图 9),春季 TVDI 与降水均表现为显著负相关,相关系数在 $-0.2 \sim -0.1$ 。夏季除林地的 TVDI 与降水为正相关,其他类型均与降水为负相关。秋季

TVDI 与降水在不同土地利用类型均为正相关,相关系数均在 0.1 以下。冬季不同土地利用类型下的 TVDI 与降水均为负相关。春季气温与 TVDI 均为正相关,但草地的相关性较低,农用地和建筑用地的

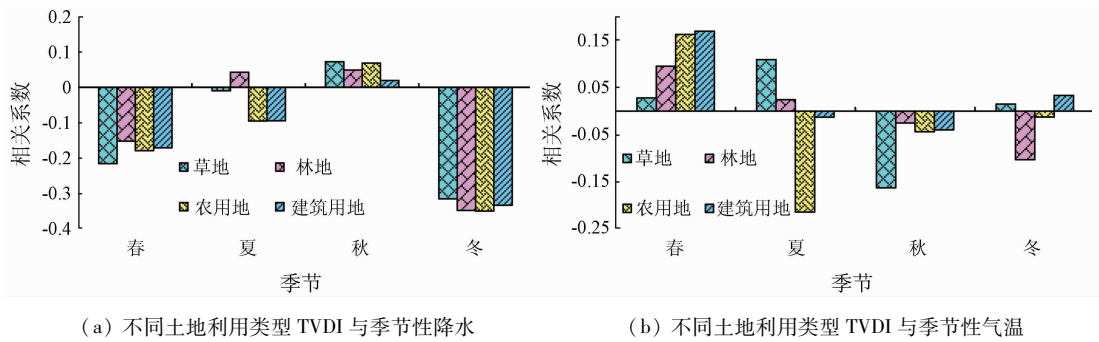


图 9 不同土地利用类型 TVDI 与季节性降水和气温的相关系数
Fig.9 Distribution of mean correlation coefficient between TVDI and seasonal precipitation and temperature in different land use types

相关性较高。夏季草地和林地的 TVDI 与气温为正相关,农用地和建筑用地的 TVDI 与气温为负相关。秋季不同土地类型的 TVDI 与气温均为负相关。冬季草地和建筑用地与气温为正相关,林地与农用地的 TVDI 与气温为负相关。

4 结 论 与 讨 论

4.1 讨 论

地处亚洲中部干旱区的新疆生态环境十分脆弱、干旱灾害严重、土地荒漠化及抵御干旱灾害的能力较低,目前我国开展了一系列水土保持工程、退耕还草工程改善新疆生态环境建设。在这一系列工程实施下,新疆生态环境得到很好的改善,尤其是夏季干旱程度比未实施前的干旱防治能力强很多。但实施工程之初,没有考虑到新疆生态水文等自然因素,土地利用面积的变化使新疆部分地区土壤蒸发量加大,造成土地干旱程度增加。本文发现 2001—2020 年新疆整体为变旱趋势,呈现出南疆高于北疆,以柴达木盆地、准噶尔盆地为中心区向周围地区逐渐变湿分布特征,其中大部分地区属特旱和重旱等级。这一研究结果与黄静等^[1]的结果一致。20 a 间新疆干旱以不显著增加趋势的区域集中在柴达木盆地、塔里木河和孔雀河地区。未来一段时间内干旱将以不显著减小趋势变化,但在准噶尔盆地和塔里木盆地仍以增加趋势为主,春、夏季大部分区域干旱程度有所缓解,但冬、春季会在大范围变旱,尤其在天山山脉地区和柴达木盆地地区表现尤为显著。降水和气温与 TVDI 均以呈正相关为主,究其原因可能是新疆太阳辐射较大,随着近几年气候变暖,地表蒸散发逐渐增加,而降水并没有显著增加,没有缓解新疆地表含水量,所以干旱程度逐渐严重。其次,全球气候变暖导致植被蒸腾作用加快,使土壤水分减少,反过来抑制植被生长,导致干旱加重。

由于受季节性气温和降水及植被类型等多种因素影响,新疆不同季节干旱对气温和降水响应情况不同。春季 TVDI 与降水呈负相关,与气温为正相关,主要原因是春季气温逐渐回升,植被进入返青期,所需水分增加,导致土壤含水量减少,降水虽可以缓解地表的持续干燥化。但新疆海拔高,受太阳辐射、风速等因素较大,春季气温升高会导致蒸散发增加,从而进一步增加春季干旱。但在阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山脉等地区,春季气温升高会使高山积雪消融,给河流补给水源,使该地区水资源充裕,干旱减轻。夏季气温高,降水量少,且多为植被覆盖密度较低的地区,水分蒸散发量大,是一年中干

旱最为严重的季节,在较为干旱的盆地地区降水的增多有利于干旱的缓解,但在高海拔地区降水天气会导致积雪消融速率减慢,使干旱加重,而气温与降水相反。秋季 TVDI 与降水为正相关,与气温为负相关,主要是因为气温下降,水分蒸散发量降低,植被生长所需水分减少,高海拔地区有降雪出现,补给水资源,山区土壤含水量增加,使得干旱程度降低。冬季气温最低,蒸腾作用弱,新疆部分地区受积雪补给水源,且植被多处于休眠状态,所需水分较低,是一年中湿润度最高且干旱范围面积最小的季节,只有塔里木盆地的部分地区处于干旱状态,但也由于较大的植被覆盖度和较大的风速,较为干旱的盆地地区气温升高会导致进一步的干旱。

4.2 结 论

本文基于 TVDI 指数分析了 2001—2020 年间新疆干旱时空格局和季节性气候对于干旱影响。研究结果表明:

1)TVDI 最小值出现在天山山脉以北及昆仑山脉地区,TVDI 值在 0.57 以下,属轻旱等级,塔里木盆地和准格尔盆地 TVDI 值在 0.86 以上,均属特旱等级。

2)TVDI 以 0.000 7/a 速率增加。春季 TVDI 呈减小趋势,减小速率为 0.001 3/a,夏季 TVDI 增加速率为 0.001 4/a,秋季 TVDI 增加速率最大(增加速率为 0.002 0/a),冬季 TVDI 增加速率最小(增加速率为 0.000 8/a)。

3)Hurst 指数均值为 0.423,即未来一段时间内新疆 TVDI 可能呈现出不显著的减小趋势。春、冬季未来一段时间内大部分区域 TVDI 将呈增加趋势,夏、秋季 TVDI 将在未来一段时间内大部分像元呈减小趋势。

4)TVDI 与降水以正相关为主,即降水量增多,TVDI 增加。春、冬季 TVDI 与降水以负相关为主,夏、秋季 TVDI 与降水以正相关为主。春季 TVDI 与气温以正相关为主,夏季 TVDI 与气温的相关性从西向东从负相关逐渐变成正相关,秋、冬季 TVDI 与气温以负相关为主。

参考文献(References):

[1] 吴燕锋,巴特儿·巴克,罗那那. 1961—2012 年北疆干旱时空变化[J]. 中国沙漠,2017,37(1):158—166.
Wu Y F, Bake B, Luo N N. Spatiotemporal pattern of drought in north Xinjiang, China in 1961—2012[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 158—166.
[2] 李江. 新形势下新疆重大水利工程科技需求与展望[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 1—9.
Li J. Scientific and technical demands and prospects of major water

conservancy projects in Xinjiang under new circumstances[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(12):1-9.

[3] 魏 林,龙鸿艳. 新疆喀什干旱区实施新一轮退耕还草问题探讨[J]. 草食家畜,2020(2):46-48.

Wei L,Long H Y. Discussion on the problems existing in implementation of the new round of returning farmland to grassland in arid region of Kashgar Xinjiang[J]. Grass - Feeding Livestock,2020(2):46-48.

[4] 杨 涛,陆桂华,李会会,等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展,2011,22(2):279-286.

Yang T,Lu G H,Li H H,et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science,2011,22(2):279-286.

[5] 秦大河,丁一汇,王绍武,等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展,2002,17(3):314-319.

Qin D H,Ding Y H,Wang S W,et al. Ecological and environmental change in West China and its response strategy[J]. Advance in Earth Sciences,2002,17(3):314-319.

[6] 姚玉璧,张 强,李耀辉,等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学,2013,35(9):1884-1897.

Yao Y B,Zhang Q,Li Y H,et al. Drought risk assessment technological progresses and problems[J]. Resources Science,2013,35(9):1884-1897.

[7] 谢 培,顾艳玲,张玉虎,等. 1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(2):332-339.

Xie P,Gu Y L,Zhang Y H,et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961—2015[J]. Arid Land Geography,2017,40(2):332-339.

[8] 高瑜莲,柳锦宝,柳维扬,等. 近 14 年新疆南疆绿洲地区地表蒸散与干旱的时空变化特征研究[J]. 干旱区地理,2019,42(4):830-837.

Gao Y L,Liu J B,Liu W Y,et al. Spatio-temporal variation characteristics of surface evapotranspiration and drought at the oasis area of the southern Xinjiang in recent 14 years[J]. Arid Land Geography,2019,42(4):830-837.

[9] 彭 擎,王让会,蒋烨林,等. 植被-地温指数(NDVI-LST)在新疆干旱监测中的适用性[J]. 生态学报,2018,38(13):4694-4703.

Peng Q,Wang R H,Jiang Y L,et al. Adaptability of drought situation monitor in Xinjiang with the NDVI-LST index[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(13):4694-4703.

[10] 张 喆,丁建丽,李 鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J]. 中国沙漠,2015,35(1):220-227.

Zhang Z,Ding J L,Li X,et al. Suitability of TVDI used to monitor agricultural drought in arid area[J]. Journal of Desert Research,2015,35(1):220-227.

[11] 黄 静,张 运,汪明秀,等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报,2020,40(3):1077-1088.

Huang J,Zhang Y,Wang M X,et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(3):1077-1088.

[12] 姚俊强,毛伟峰,胡文峰,等. 1961—2015 年新疆区域 SPEI 干旱指数数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2019,4(3):112-121.

Yao J Q,Mao W Y,Hu W F,et al. A dataset of drought indices based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) over Xinjiang, China (1961—2015)[J]. China Scientific Data,2019,4(3):112-121.

[13] 马柱国,符添斌,杨 庆,等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学,2018,42(4):248-258.

Ma Z G,Fu C B,Yang Q,et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951—2016[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2018,42(4):248-258.

[14] Yao J,Zhao Y,Yu X. Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961—2015[J]. PeerJ,2018,6:e4926.

[15] Xie P,Lei X,Zhang Y,et al. Cluster analysis of drought variation and its mutation characteristics in Xinjiang Province, during 1961—2015[J]. Hydrology Research,2018,49(4):1016-1027.

[16] Ma Y J,Shi F Z,Hu X,et al. Threshold vegetation greenness under water balance in different desert areas over the silk road economic belt[J]. Remote Sensing,2020,12(15):2452.

[17] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219-226.

Shi Y F,Shen Y P,Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219-226.

[18] 鞠 彬,曾 明,徐国梁. 不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):237-243.

Ju B,Zeng M,Xu G L. Application research of different drought indexes for drought assessment in Habahe region of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2017,28(2):237-243.

[19] 轩俊伟,郑江华,刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究,2016,33(2):338-344.

Xuan J W,Zheng J H,Liu Z H. SPEI-based spatiotemporal variation of drought in Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2016,33(2):338-344.

[20] 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.

Liu X H,Zhang J H,Xu X H. Drought monitoring in Xinjiang by using MODIS-TVDI[J]. Remote Sensing Information,2015(2):111-115.

[21] 郭燕云,胡 琦,傅玮东,等. 基于 SPEI 指数的新疆天山草地近 55 a 干旱特征[J]. 干旱区研究,2019,36(3):670-676.

Guo Y Y,Hu Q,Fu W D,et al. Drought trend over the grasslands in the Tianshan Mountains, Xinjiang in recent 55 years based on SPEI[J]. Arid Zone Research,2019,36(3):670-676.

[22] 沙 莎,郭 锐,李耀辉,等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J]. 干旱气象,2014,32(1):128-134.

Sha S,Guo N,Li Y H,et al. Introduction of application of temperature vegetation dryness index in China[J]. Journal of Arid Meteorology,2014,32(1):128-134.

[23] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent inertia[J]. Remote Sensing of Environment,1985,18(1):59-47.

[24] Sandholt I,Rasmussen K,Andersen J. A simple interpretation of

surface temperature / vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79 (2-3): 213-224.

[25] Moran M S, Hymer D C, Qi J. Soil moisture evolution using multi-temporal synthetic aperture Radar SAR in semiarid rangeland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1-3): 69-80.

[26] 汪攀, 刘毅敏. Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(6): 454-457, 472.

Wang P, Liu Y M. Application of Sen's slope estimation and Mann-Kendall method in the trend analysis of equipment operation[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6): 454-457, 472.

[27] 姜丽霞, 王晾晾, 吕佳佳, 等. 基于 Hurst 指数的黑龙江省作物生长季降水趋势研究[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(2): 70-77.

Jiang L X, Wang L L, Lyu J J, et al. A study on rainfall trend during the crop growing season in Heilongjiang Province based on Hurst exponent method[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(2): 70-77.

[28] 吴黎. 基于 MODIS 数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 130-135.

Wu L. Classification of drought grades based on temperature vegetation drought index using the MODIS data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 130-135.

Spatial and temporal dynamics of drought in Xinjiang and its response to climate change

CHENG Jun¹, LI Yunzhen², ZOU Yu³

(1. College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714099, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Sichuan Academy of Ecological and Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: This study aims to achieve the dynamic and continuous monitoring of drought in Xinjiang. Based on the temperature vegetation dryness index (TVDI), as well as the Sen's slope trend analysis, R/S, and partial correlation analysis, this study analyzed the spatial and temporal dynamics, changing trends, and future sustainable state of TVDI and the influences of seasonal precipitation and temperature on TVDI in Xinjiang during the period from 2001 to 2020. The results are as follows. ① The northern Tianshan Mountains and the Kunlun Mountains showed minimum TVDI values of less than 0.57, indicating light drought. The Tarim and Junggar basins showed TVDI values of greater than 0.86, indicating extraordinary drought. ② The TVDI values in spring decreased at a rate of 0.001 3/a. By contrast, the TVDI values in summer, autumn, and winter increased at a rate of 0.001 4/a, 0.002 0/a, and 0.000 8/a, respectively. Therefore, the increased amplitude of the TVDI values was the highest in autumn and the lowest in winter. ③ In the near future, the TVDI values in most regions of Xinjiang will increase in spring and winter, while the pixel quantity of most TVDI values will increase in summer and autumn. ④ The TVDI values were mainly negatively correlated with precipitation in spring and winter and were positively correlated with precipitation in summer and autumn. The TVDI values were mainly positively correlated with temperature in spring and were negatively correlated with temperature in autumn and winter. Moreover, the TVDI values in summer had a decreased correlation with temperature from west to east, with the correlation gradually changing from a negative to a positive correlation.

Keywords: TVDI; temperature; precipitation; Xinjiang

(责任编辑: 张 仙)