

基于 MODIS 数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析

程小强^{1,2}, 周兆叶^{1,2}, 李旺平^{1,2*}, 上官冬辉³, 汪孝贤^{1,2}, 张秀霞^{1,2}, 郝君明^{1,2},
林庆润^{1,2}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学甘肃省应急测绘工程研究中心, 兰州 730050; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 在全球变暖的背景下, 及时准确地进行干旱监测对保障区域生态安全、对“新丝绸之路经济带”沿线各国的经济发展以及农业生产具有重要的指导意义。近年来, 世界各地自然灾害频繁发生, 中亚地区的干旱问题已成为全球生态环境变化中最显著的问题之一, 阻碍了中亚及周边国家社会经济的长期、稳定发展。该研究基于 2001—2020 年的 MODIS 地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 和归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 数据建立了温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 模型, 利用趋势分析、MK 趋势检验、地理探测器等方法揭示了中亚地区近 20 a 的干旱时空变化及特征、干旱演变规律并探讨了不同因素 (气温、年均降雨量、土地利用类型、人口密度、高程、坡度、坡向) 对 TVDI 的影响。结果表明: 1) 中亚干旱区 TVDI 空间分布具有明显的区域特征, 呈现出自西南向东北递减趋势, 其中 66% 面积呈干旱显著加剧趋势 ($P < 0.05$), 34% 的面积呈干旱显著减弱趋势 ($P < 0.05$), 呈现“北部变干、南部变湿”空间变化趋势。其中, 哈萨克斯坦的西北部一带旱情加剧显著; 2) 从旱情年际变化趋势可知, 近 20 a 中亚地区生长季干旱程度略呈加剧趋势, 2012 年为干旱最严重的年份。TVDI 空间分布差异显著, 整体呈季节性变化, 其干旱等级表现为: 夏季 > 春季 > 秋季; 3) 单因子探测结果显示, 气温和高程是驱动研究区干旱化形成的主要影响因素, 多因子交互作用下, 气温和高程、气温和坡度、气温和土地利用、气温与降雨量这 4 对组合贡献最大。随着全球气候变化、人类活动 (植被破坏、城市化建设、开垦耕地、过度放牧、工业污染等) 持续加剧, 近 20 a 来中亚地区气温逐渐上升, 降雨量的减少, 导致植被退化, 进而导致生态环境恶化、干旱化趋势加剧。该研究可为当地政府及相关部门的旱灾防控提供参考和提升中国应对中亚生态风险及地缘安全影响的能力具有重要意义。

关键词: 干旱; 中亚地区; 温度植被干旱指数 (TVDI); 趋势分析; 地理探测器; 影响因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.016

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0128-10

程小强, 周兆叶, 李旺平, 等. 基于 MODIS 数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 128-137. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.016 <http://www.tcsae.org>

Cheng Xiaoqiang, Zhou Zhaoeye, Li Wangping, et al. Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 128-137. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

干旱是干旱、半干旱地区最常见的自然灾害之一^[1], 其具有涉及范围广、受灾面积大、持续时间长等特点^[2], 干旱问题是当今国际社会关注的热点。“一带一路”是中国面向 21 世纪新的世界发展格局提出的一项具有突破性、全局性和长远性的重要国家战略^[3]。中亚干旱区既是全球气候变化响应最为敏感的地区之一, 又是“一带一路”建设发展的核心区域, 水资源问题十分突出^[4]。伴随着人类活动的加剧和全球气候的变化, “丝绸之路经济带”核心区的中亚地区生态环境退化问题已经上升为全球干旱地区生态环境问题的突出地区之一, 严重制约着中亚及其周边各国的经济发展和社会稳定^[5]。因此, 在全

球气候变暖的背景下, 全球干旱化趋势日益严重^[6], 利用卫星遥感数据及相关资料进行长时序干旱动态监测及风险评估具有重要的意义。

近几十年来, 国内外学者从不同尺度、采用不同方法及不同干旱指数进行了大量的干旱监测工作。如 Rouse 等^[7]提出的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 能够较好描述植被生长状态和植被覆盖度, 同时被广泛用以估算植被生物量和评估环境状况。在此基础上, Sandholt 等^[8-10]利用简化的 NDVI-LST 特征空间提出了温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Drought Index, TVDI), 该方法基于遥感数据进行简化 NDVI-LST 三角形及梯形特征空间, 它能够较好地对于干旱、半干旱区进行旱情监测。Koohi 等^[11]提出基于标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 的方法利用降雨资料 SM2RAIN-ASCAT 与地面实测数据进行干旱时空监测及其相关分析, SM2RAIN-ASCAT 在干旱区探测干旱的效率相对较有优势。汤诗怡等^[12]提出基于垂直干旱指数

收稿日期: 2022-01-19 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (20JR5RA444)

作者简介: 程小强, 研究方向为环境遥感。Email: 1269445098@qq.com

*通信作者: 李旺平, 博士, 副教授, 研究方向为 3S 技术及应用。

Email: lwp_136@163.com

(Vertical Drought Index, PDI)、改进型垂直干旱指数 (Improved Vertical Drought Index, MPDI) 分析了半干旱地区不同季节土壤湿度的相关性差异, 该研究表明干旱指数 PDI、MPDI 对土壤水分监测有较好的适应性。武彬等^[13]利用 VIIRS 数据构建 TVDI 模型对干旱区土壤湿度监测验证具有一定的优势, 弥补了 VIIRS 产品在中国该领域研究的空白。于维等^[14]提出基于 MODIS-TVDI 和 GNSS_PWV 数据, 利用相关分析、回归分析等方法研究干旱区干旱时空特征, 表明大气可降水量 (Precipitable Water Vapor, PWV) 和 TVDI 有较强的相关性, 变化趋势基本一致。余灏哲等^[15]提出基于多元回归模型利用 TRMM 降尺度数据和 MODIS 数据构建综合干旱指数对干旱半干旱地区进行干旱监测评价, 监测结果与实际的旱情相符合。鹿国武等^[16]提出基于高分一号遥感数据利用改进的垂直干旱指数法的干旱监测研究, 结果表明该方法适用于对半干旱地区进行监测, 取得良好的效果。王正东等^[17]提出基于 MODIS 数据构建了 EVI-LST 模型反演山东省干旱时空变化特征并探讨了降雨、气温与 TVDI 的相关性, 结果表明该方法能较好地反映表层土壤水分变化趋势。Liu 等^[18]提出了多元线性回归方法建立综合干旱指数 (Moderator Variables to Build Composite Drought Indices, MCDIs), 分析了 MCDIs 与不同月尺度的 SPEI 和单一遥感干旱指数的相关性, 研究结果表明, MCDIs 较单项干旱指数更适合监测干旱, 其中 MCDIs-9 是研究农业干旱的良好指标。Zhang 等^[19]利用主成分分析方法建立了综合干旱监测指数 (Comprehensive Drought Monitoring Index, CDMI) 并与受旱面积、相对土壤湿度及作物产量来验证这一指数。结果表明, 基于多源遥感数据的 CDMI 数据是农业干旱监测与评价的可靠而有效的指标之一。

尽管当前许多学者利用不同的干旱指数对不同区域进行的相关干旱监测研究及其影响因素分析取得了一定的进展, 然而, 目前基于 TVDI 指数的干旱监测研究大多选择一期 (几期) 遥感影像为研究目标, 以验证 TVDI 指数在研究区干旱监测的适用性, 干旱动态监测研究较为匮乏, 尤其在中亚典型干旱区植被生长季内连续的动力干旱监测过程研究不够深入。另外, 在探讨中亚干旱

及影响因素时, 主要从气温、降雨等气象因子方面考虑, 较少涉及高程等地形因子对干旱分布的影响研究。但是, 干旱受地形和人类活动等影响, 因此, 针对此方法还有待进一步深入探讨^[9], 干旱灾害除受系统内部各个因子的影响之外, 人类活动对干旱发生的过程和机理也具有明显的影响^[20]。因此, 本文基于 2001—2020 年的 MODIS 产品数据 MOD11A2 LST 和 MOD13A2 NDVI 利用温度植被干旱指数模型 (TVDI) 来开展中亚地区植被生长季旱情监测, 利用趋势分析法分析中亚地区近 20 a 的干旱时空变化特征、未来趋势预测, 利用 GIS 技术和地理探测器等方法, 揭示中亚地区干旱的驱动因素, 并对监测结果进行讨论分析。本研究进一步揭示 2001—2020 年中亚地区植被生长季内干湿变化的时空演变规律和干旱化的证据, 以期当地政府及相关部门的旱灾防控提供参考和提升中国应对中亚生态风险及地缘安全影响的能力。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中亚是指亚洲中部地区 (35°08'31"~55°24'54" N", 46°28'30"~87°21'18" E"), 即哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和土库曼斯坦 (图 1a)。该区总面积 400 万 km², 地形地貌复杂、地域辽阔, 人口 5 000 多万, 人口密度为 15 人/km², 是当今世界上地广人稀的地区之一^[21]。

中亚干旱区日照充足, 雨水稀少, 区域分布差异明显。其主要气候类型为温带大陆性气候, 东南地区海拔较高, 阻隔了海洋与内地的温湿循环。该地区受夏季风的影响, 降水空间分布极其不均匀, 表现为从东南向西北递减, 且年降雨量均在 300 mm 以下。其中, 降雨量较多的是塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦全境, 较少的是乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的荒漠地区 (图 1b)。气温的空间分布差异也较为显著, 从西南向东北递减, 且年均气温均在 10 °C 左右。其中, 年均气温最低的是哈萨克斯坦北部地区, 年平均气温较高的是土库曼地区和乌兹别克地区 (图 1c); 由于中亚地区地势东部高西部低, 因此中亚地区的河流呈现出沿西北流向^[22]。

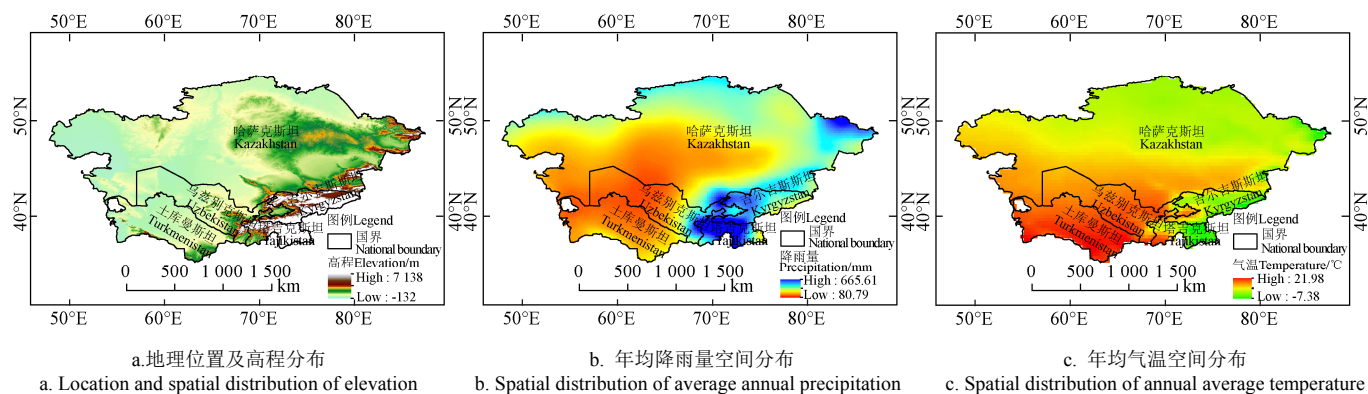


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

研究数据来源于美国国家航空航天局 NASA 官网上 Terra 卫星的数据产品, 包括地表温度指数 (T_s)、归一化植被指数 (NDVI)、土地利用/覆盖数据 (MCD12Q1) (网址: <http://landsweb.nascom.nasa.gov>)。LST 由裸地地表温度和植被冠层温度构成, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 8 d^[23]。NDVI 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 16 d。数字高程模型 (SRTM DEM) 来自 CGIAR CSI (Consortium for Spatial Information) 下载的空间分辨率 90 m 的高程 DEM 数据, 将 DEM 划分为: <0、0~300、>300~600、>600~900、>900~1 200、>1 200~1 500、>1 500~1 800、>1 800~2 100、>2 100~2 400 和 >2 400 m; 坡度划分为 <8°、8°~15°、>15°~25°、>25°。人口密度数据来源于 LandScan 人口密度数据集 (<https://www.satpalda.com/product/landscan/>), 空间分辨率为 1 km, 投影是地理坐标系 WGS84, 单位是人/像素。

本文采用的降雨量、气温数据来源于英国 CRU (University of East Anglia, Climatic Research Unit) 发布的全球陆地表面月均气候数据集 (<http://www.cru.uea.ac.uk/data>), 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 选取时间为 2001—2020 年。相关研究表明^[24], CRU 气象资料在中亚干旱区具有较好的可靠性和适用性, 故本文采用该数据开展研究。

MCD12Q1 利用三级土地利用类型年合成全球 500 m 数据产品。本文利用中亚地区 2001—2020 年植被生长季 (4—10 月) 的土地利用/覆盖类型数据, 将其利用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 软件进行格式转换、拼接、投影转换等批处理, ArcGIS 进行裁剪、剔除无效值, 该产品采用国际地圈生物圈计划全球植被分类方案, 将土地利用类型分为 17 种, 本文将其合并为 6 类一级地类, 即: 林地、草地、建筑用地、农用地、水域、未利用地。

1.3 研究方法

1.3.1 T_s -NDVI 模型

利用 ENVI 软件中 IDL 插件进行批处理剔除异常值, 因为 NDVI 小于 0 的表层以水系、冰川、云团或者积雪为主, 所以可以认为它们土壤水分含量为 100%, 当 $0 < \text{NDVI} < 0.2$ 时, 表层基本上是裸土, 因植被覆盖度很低, NDVI 很难指示该区域植被长势状况^[25], 故本文选取 NDVI 取值范围为 [0.2, 1]。基于地表温度 (T_s) 与归一化植被指数 (NDVI), 建立相关 T_s -NDVI 特征空间模型^[8] (图 2), 并利用 Python 编程实现干、湿边方程拟合和 TVDI 指数提取。

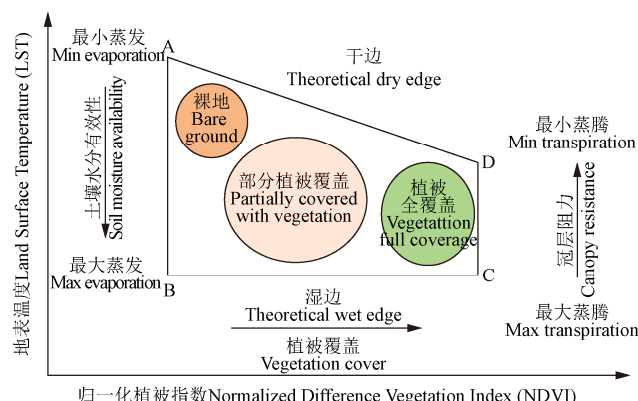
研究表明, 对干旱较严重地区, 地表温度与植被指数呈显著的负相关关系^[8]。干、湿边方程及 TVDI 模型计算如下:

$$\text{TVDI} = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (1)$$

$$\text{干边方程: } T_{s_{\max}} = a + b \cdot \text{NDVI} \quad (2)$$

$$\text{湿边方程: } T_{s_{\min}} = c + d \cdot \text{NDVI} \quad (3)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 为干湿边拟合回归系数, 分别为干湿边方程的斜率和截距, T_s 为陆地地表温度, $T_{s_{\max}}$ 和 $T_{s_{\min}}$ 为给定 NDVI 对应下的最高和最低陆地地表温度 ($^\circ\text{C}$)。



注: 本研究采用 Du 等^[26]提出的 T_s -NDVI 特征空间模型。

Note: The T_s -NDVI feature space model proposed by Du et al^[26] was used in this study.

图 2 T_s -NDVI 特征空间分布图

Fig.2 T_s -NDVI feature spatial distribution map

TVDI 值介于 0~1 之间, TVDI 值越大, 表示干旱越严重, 反之, 表示越干旱。即 TVDI 值与土壤含水率呈负相关性关系^[27]。根据 T_s -NDVI 散点图可以得到, 在干边 TVDI=1, 对应湿边 TVDI=0, TVDI 值越大, 表示该地区越干旱。

1.3.2 趋势分析法

采用趋势分析法^[28]对 2001—2020 年中亚地区 TVDI 年际变化趋势进行分析, 基于栅格像元的 TVDI 趋势变化采用式 (4) 计算:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (i \cdot \text{TVDI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{TVDI}_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中 n 为累计年数, 本文为 20, TVDI_i 为第 i 年的生长季干旱指数, θ_{slope} 为一元线性回归方程的斜率, 当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 表示干旱程度呈增加趋势; 当 $\theta_{\text{slope}} = 0$ 时, 表示干旱程度基本不变; 当 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时, 表示干旱程度呈减小趋势。

根据一元线性回归法, 可以判断 TVDI 时空变化趋势, 结合 MK 显著性检验, 将 TVDI 趋势变化分为 5 个等级, 即: 显著减少 ($\text{slope} < 0$, $P < 0.01$)、较显著减少 ($\text{slope} < 0$, $0.01 < P < 0.05$)、显著增加 ($\text{slope} > 0$, $P < 0.01$)、较显著增加 ($\text{slope} > 0$, $0.01 < P < 0.05$)、无显著变化 ($P > 0.05$)。

1.3.3 地理探测器模型

本研究利用地理探测器模型功能包括^[29]: 1) 因子探测: 探测自变量对因变量的解释度, 即 q 值, q 值越大, 说明自变量对因变量值的解释力越强; 2) 交互式探测: 地理探测器模型表达如下式:

$$q = 1 - \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

式中 h 为影响干旱分布因子的分类； N_h 为层 h 的单元数， N 为研究区全部单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是变量某一层 h 方差和全区方差。由于中亚干旱空间分布是多个因素共同作用的结果， q 值越大表示影响因子对多年干旱空间分异的解释力越强，相反则越弱。

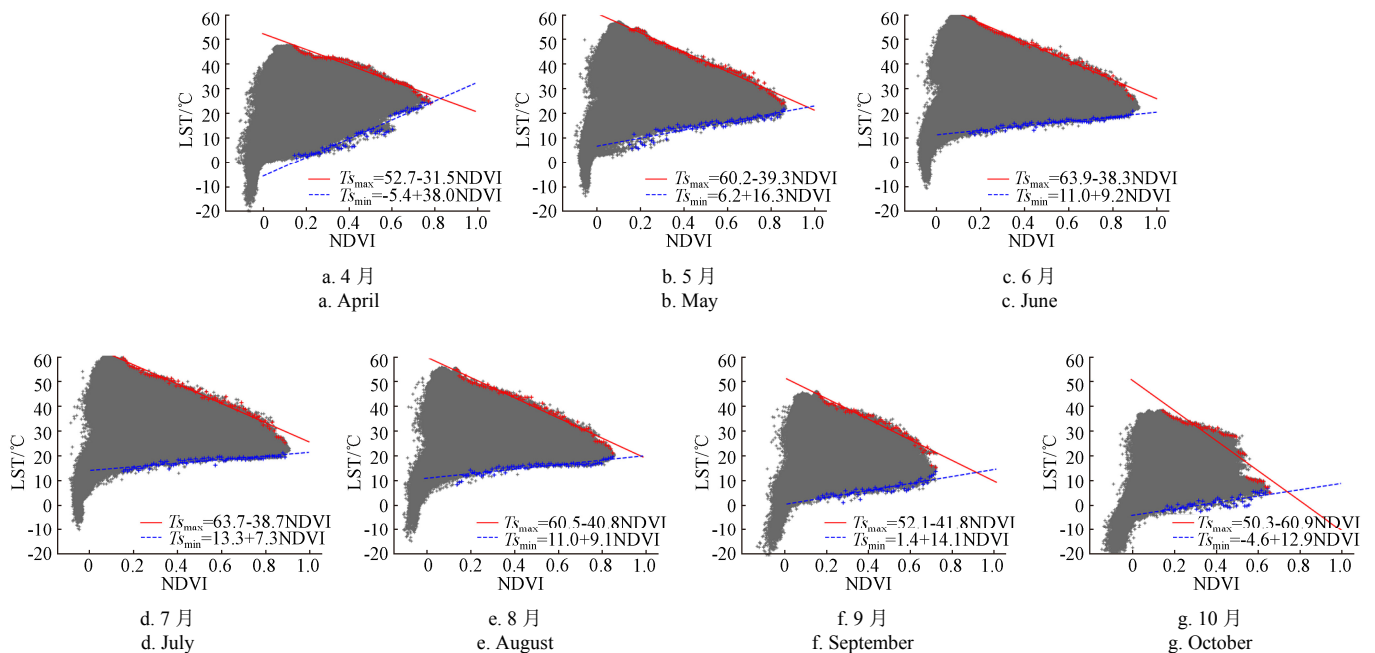
交互探测分别计算因子 X_1 和 X_2 的 q 值 ($q(X_1)$ 和 $q(X_2)$)，然后计算因子 X_1 和 X_2 交互作用的 q 值 ($q(X_1 \cap X_2)$)；根据 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 的关系，交互作用可分为非线性减弱 ($q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$)、单因子非线性减弱 ($\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$)、双因子增强 ($q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$)、独立 ($q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$)、非线性

性增强 ($q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$)。本文基于交互作用的探测结果，评估在双因子共同作用下影响多年干旱空间分布的能力是否增强。

2 结果与分析

2.1 T_s -NDVI 特征空间及干、湿边方程拟合

使用 Python 编程，对研究区内每个 NDVI 像元以 0.01 的步长求出对应的最高和最低地表温度 $T_{s_{\max}}$ 和 $T_{s_{\min}}$ 。建立了 2001—2020 年生长季 (4—10 月) 的 T_s -NDVI 特征空间，并拟合出干边、湿边方程 (图 3)，最后计算出中亚 2001—2020 年年际、月际的温度植被干旱指数 TVDI。



注： $T_{s_{\max}}$ 和 $T_{s_{\min}}$ 分别为给定 NDVI 对应的最高和最低陆地地表温度 (°C)。

Note: $T_{s_{\max}}$ and $T_{s_{\min}}$ are the maximum and minimum land surface temperatures (°C) corresponding to a given NDVI, respectively.

图 3 2001—2020 年中亚地区生长季干、湿边界拟合

Fig.3 Fitting the dry and wet boundaries of the growing season in Central Asia from 2001 to 2020

由图 3 可知，利用 Python 实现 T_s -NDVI 特征空间中地表温度最大值和最小值，通过线性拟合计算干边和湿边方程，干、湿边方程特征变化显著。由拟合结果可以得到，当 $0.2 < \text{NDVI} \leq 0.8$ 时，NDVI 与地表温度的最大值 $T_{s_{\max}}$ 呈负相关关系，且线性关系显著；当 $0.8 < \text{NDVI} < 1.0$ 时， $T_{s_{\max}}$ 散点与干边处主轴显著偏离，且下降幅度比前一段明显增大。随着 NDVI 的增大，最高温度和最低温度的温差逐渐减小，呈现出一个三角特征空间，且地面温度的最大值、最小值与 NDVI 呈近似线性关系，干边斜率基本都小于 0，而湿边斜率大于 0。温差越大，表示越干旱，反之，越湿润。

2.2 基于 TVDI 的中亚干旱时空变化特征

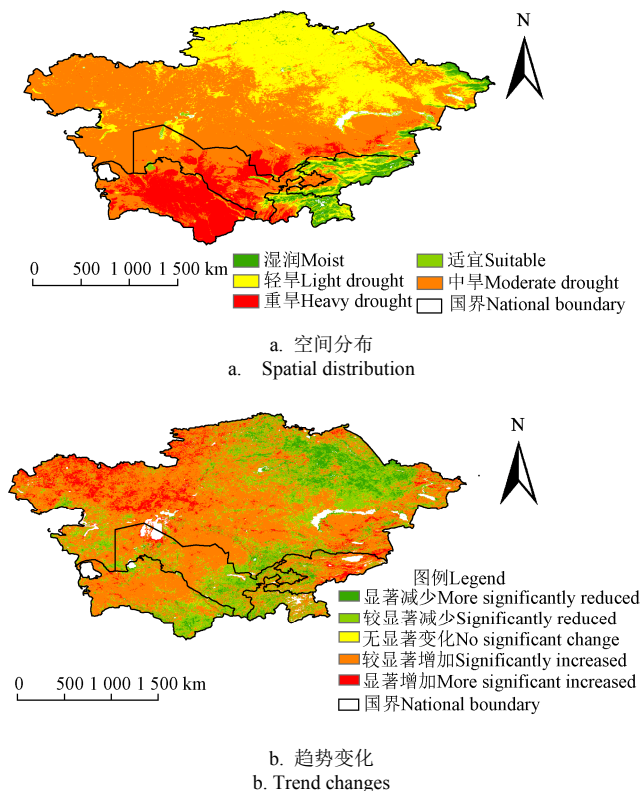
2.2.1 干旱空间分布特征及变化趋势

中亚地区 2001—2020 年 TVDI 均值空间分布格局呈现出较强的地域差异性 (图 4a)，中亚干旱空间格局上呈由西南向东北递减的分布特征，中亚地区 20 a 的 TVDI

均值为 0.64，说明中亚地区整体处于中旱状态；较湿润地区分布在塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦及哈萨克斯坦以东地区，哈萨克斯坦地区较干旱。干旱状况较严重地区分布在土库曼斯坦和乌兹别克斯坦，该地区雨水极少，植被密度低，土壤含水率较低，生态系统恢复能力较弱，生态系统的稳定性很容易受到干旱影响。

利用线性回归与 MK 显著性检验分析方法，对不同地区的 TVDI 的年际变化趋势进行统计分析 (表 1)，结果显示，吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦和土库曼斯坦的 TVDI 有逐年上升的趋势，即这 3 个地区的干旱趋势在逐渐增强；而塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦的干旱趋势在下降，即这两个地区的干旱趋势在逐渐减弱。从图 4b 中可以看出，2001—2020 年，干旱变化趋势明显，不同地区干旱趋势差异明显。中亚干旱变化趋势总体表现为干旱化微弱增强的趋势，自 2001 年以来约 66% 的区域表现为干旱显著加剧 ($P < 0.05$)，未来干旱化趋势持续增强，主

要分布在哈萨克斯坦西南地区、乌兹别克斯坦地区以及土库曼斯坦西北部地区；2001—2020 年区域内呈显著变湿的区域占 34% ($P<0.05$)，主要分布在哈萨克斯坦中东部、塔吉克斯坦西南部、土库曼斯坦东南部，即北部变干、南部变湿。



注：本文采用齐述华等^[30]的干旱等级划分标准，即：0<TVDI≤0.2，湿润；0.2<TVDI≤0.4，适宜；0.4<TVDI≤0.6，轻旱；0.6<TVDI≤0.8，中旱；0.8<TVDI≤1.0，重旱。

Note: The drought classification standard by Qi Shuhua et al^[30] is adopted in this study, i.e.: 0<TVDI≤0.2, moist; 0.2<TVDI≤0.4, suitable; 0.4<TVDI≤0.6, light drought; 0.6<TVDI≤0.8, moderate drought; 0.8<TVDI≤1.0, heavy drought.

图 4 2001—2020 年中亚干旱区年均 TVDI 空间分布及趋势变化

Fig.4 Spatial distribution and trend change of annual average TVDI in arid regions of Central Asia from 2001 to 2020

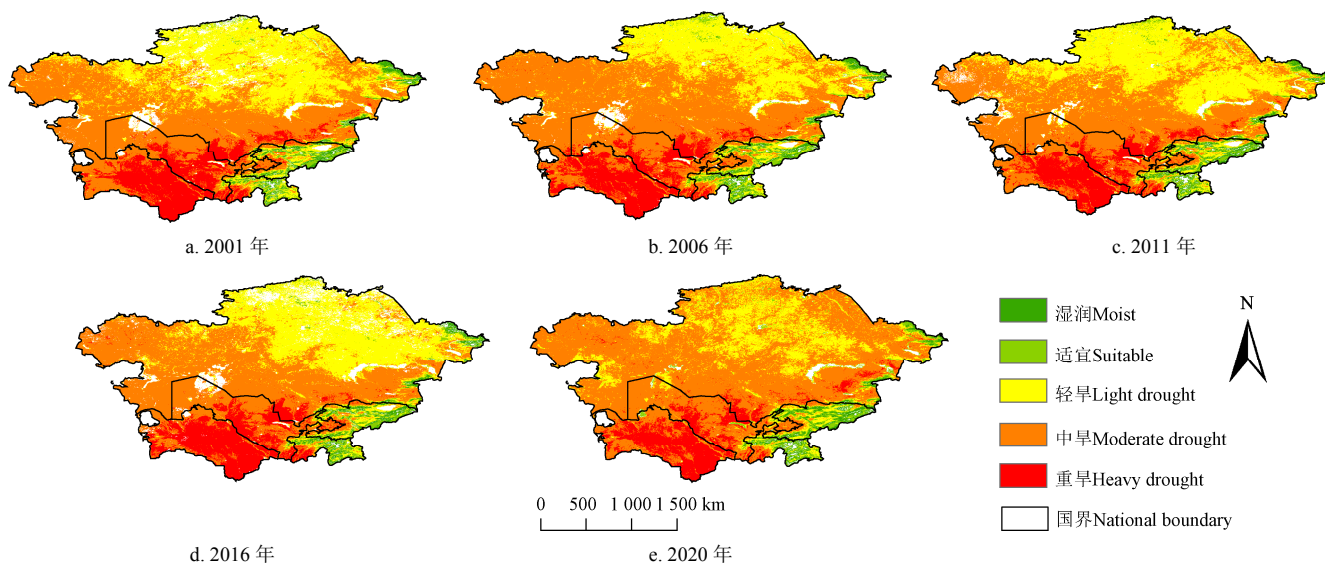


图 5 2001—2020 年中亚地区植被生长季 TVDI 年际 TVDI 空间分布变化

Fig.5 Spatial variation of annual TVDI distribution in vegetation growing seasons in Central Asia from 2001 to 2020

表 1 不同地区 TVDI 的一元线性回归特征及干旱变化趋势
Table 1 Univariate linear regression characteristics and drought trend of TVDI in different regions

国家 Country	回归方程 Regression equation	R^2	干旱趋势 Trend of drought
吉尔吉斯斯 Kyrgyzstan	$TVDI=0.000\ 5x-0.691\ 4$	0.02	增强
哈萨克斯坦 Kazakhstan	$TVDI=0.000\ 8x+2.101\ 8$	0.07	增强
塔吉克斯坦 Tajikistan	$TVDI=-0.000\ 5x-0.691\ 4$	0.05	减弱
土库曼斯 Turkmenistan	$TVDI=0.000\ 1x-0.611\ 4$	0.04	增强
乌兹别克斯 Uzbekistan	$TVDI=-0.000\ 1x-0.903\ 2$	0.01	减弱
中亚 Central Asia	$TVDI=0.000\ 5x-0.383\ 0$	0.05	增强

注：x 为年份。下同。

Note: x is the year. Same below.

2.2.2 2001—2020 年 TVDI 年际变化分析

根据齐述华等^[30]提出的干旱等级划分标准，将 2001—2020 年中亚地区植被生长季（4—10 月）TVDI 值进行分级。图 5 可以直观地反映出近 20 a 来中亚地区干旱年际变化特征，中亚地区干旱分布差异显著，以区域性和局域性干旱为主，中亚西南部地区干旱发生的频率和范围大于东北部地区，整体来看，中亚地区呈现干旱化趋势，且主要集中在中部和西南部地区。

从中亚地区 TVDI 年际变化可知（图 6a），近 20 a 中亚地区发生不同程度的干旱，TVDI 值略呈上升趋势，上升速率为 0.005/10 a。TVDI 值出现不规则波动变化，峰值出现在 2012 年，相对低值出现在 2002 年、2003 年、2011 年和 2019 年。中亚干旱程度分级的面积变化（图 6b）结果表明，中旱区所占面积比最大，其次是轻旱区。自 2001 年以后主要以中旱区和重旱区为主，在 2012 年中旱和重旱总面积比达到最大，2012 年以后中旱和重旱总面积占比略有减少。

2.2.3 2001—2020 年 TVDI 月际变化分析

利用 Python 软件编程提取不同时间各像元 TVDI 值，根据齐述华等^[30]提出的干旱等级划分标准将 2001—2020 年中亚地区植被生长季（4—10 月）TVDI 均值利用 ArcGIS 软件进行重分类得到该地区月际干旱等级分布图（图 5）。

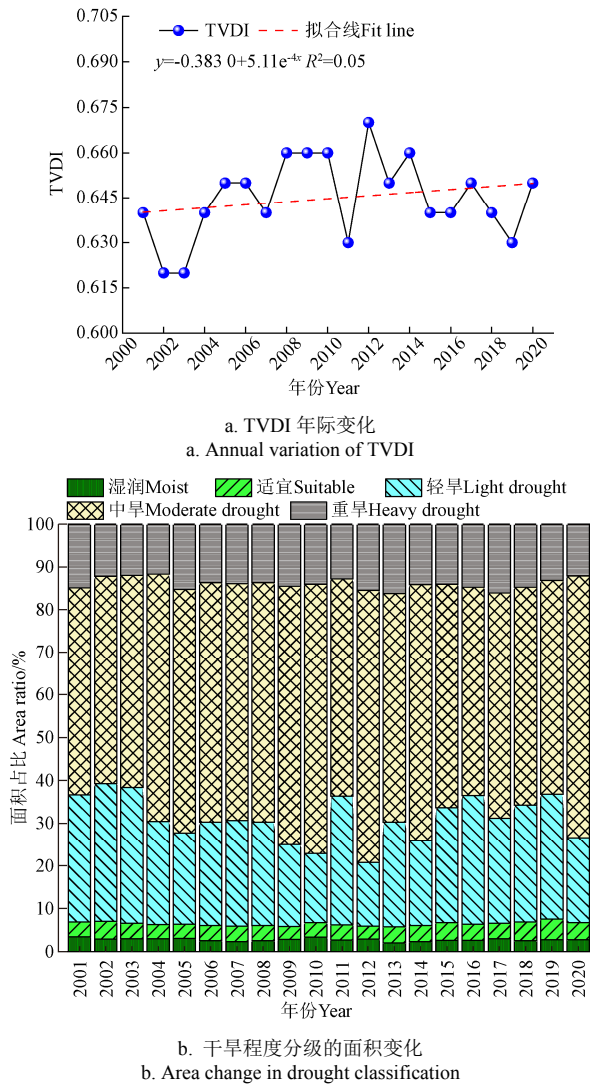


图 6 2001—2020 年中亚地区植被生长季 TVDI 年际变化和干旱程度分级的面积变化

Fig.6 Annual variation of TVDI and area variation of drought classification in vegetation growing seasons in Central Asia from 2001 to 2020

从图 7、图 8 可以看出，不同季节的干旱演变在空间上差异较大，中亚西南部地区干旱发生的频率和范围大于东北部地区。TVDI 随着月际变化呈现出先上升后下降的趋势，6 月是中亚地区干旱最严重的月份。随着温度的上升，冰雪消融，径流量增加，植被也随之逐渐增长^[31-32]。4—5 月（春季）TVDI 的范围在 0.587~0.681 之间，春季主要是中部和西南部地区干旱趋势显著；6—8 月（夏季）TVDI 的范围为 0.676~0.722 之间，夏季温度升高，降雨量少，且大多数地区的植被覆盖度较低，水分蒸发量上升，是中亚地区植被生长季中干旱最严重的季节，除哈萨克斯坦东北部和吉尔吉斯斯坦部分区域干旱区域减弱外，中亚大部分地区干旱普遍加剧趋势；9—10 月（秋季）TVDI 值介于 0.510~0.609 之间，秋季温度下降，水分蒸发降低，植被生长所需水分减少，高海拔地区伴有降雪出现，补给了水源，山区土壤含水率增加，TVDI 值降低。

2.3 影响因素分析

综合考虑像元空间分辨率和地形垂向分带特征的影响，

结合前人的相关研究，选取 2001—2020 年年均气温、年均降雨量、土地利用类型、人口密度、高程、坡度、坡向作为自变量分析中亚地区干旱化驱动因子。在 ArcGIS10.5 上对自变量进行分类并可视化，然后以各因子提取每个格网内因变量和自变量的采样值进行地理探测器分析，得到了各因子对中亚地区干旱空间差异的解释力程度。

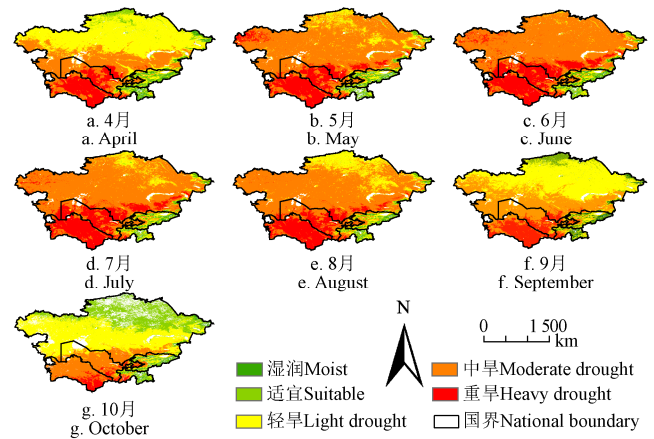


图 7 2001—2020 年中亚地区植被生长季 TVDI 月际空间分布变化

Fig.7 Spatial variation of inter-monthly TVDI distribution in vegetation growing seasons in Central Asia from 2001 to 2020

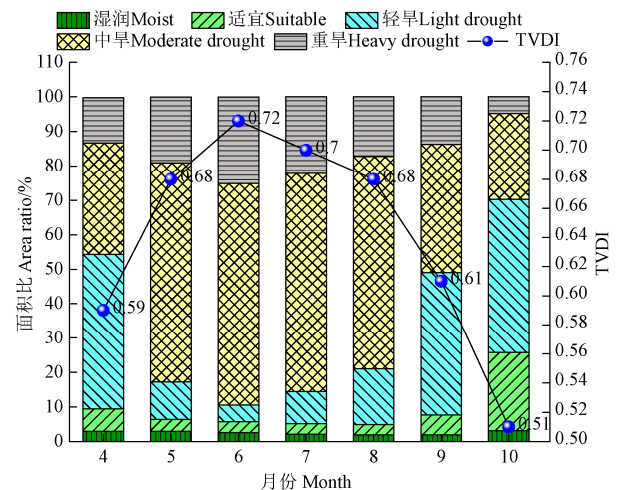


图 8 2001—2020 年中亚地区植被生长季干旱等级面积比及 TVDI 月际变化

Fig.8 Drought grade area ratio and monthly variation of TVDI in growing seasons in Central Asia from 2001 to 2020

单因子探测结果显示，坡向和人口密度未通过显著性检验 ($P>0.05$)，其他探测因子均通过显著性检验 ($P<0.05$ ，表 2)，可作为影响因素对中亚地区干旱空间异质性分析。 q 值越大表示影响 TVDI 的程度越大，反之，越小。影响因子解释力大小排序为：气温、高程、坡度、降雨量、土地利用类型，其中气温和 DEM 是影响近 20 a TVDI 空间分布差异的主导因子 (q 值均大于 0.45)，其他因子对 TVDI 的影响程度是有所差异的。对单因子探测的结果进行对比基础上，将研究区的因变量 TVDI 与 5 个通过显著性检验的自变量进行交互式探测分析。由表 2 可以看出，双因子交互作用下的影响程度均为双因子增强和非线性增强，各个交互作用最强的都是与气温的交

互。交互作用主要揭示近 20 a 中亚地区影响干旱分布的因子在共同作用下的影响程度要大于任何一个单一因子的影响程度。温度和高程的交互作用 (q 值为 0.803) 对 TVDI 影响最强, 坡度和土地利用类型的交互作用 (q 值为 0.352) 对 TVDI 影响最弱。说明各个因子在共同作用下, 直接或者间接影响中亚地区干旱空间分布的差异。

表 2 单因子和多因子交互探测结果

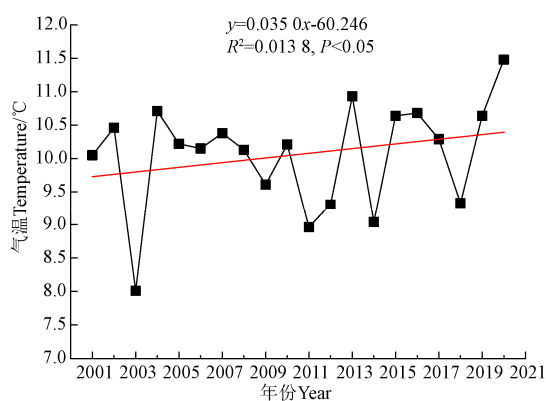
Table 2 Single factor and multi-factor interactive detection results

影响因子 Impact factors	气温 Temperature	降雨量 Precipitation	坡度 Slope	高程 Elevation	土地利用类型 Land use type
气温	0.607	0.674	0.720	0.803	0.676
降雨量	-	0.256	0.385	0.564	0.431
坡度	-	-	0.273	0.491	0.352
高程	-	-	-	0.488	0.584
土地利用类型	-	-	-	-	0.055

注: 粗体为各单因子的 q 值; 其余为因子间相互作用 q 值。

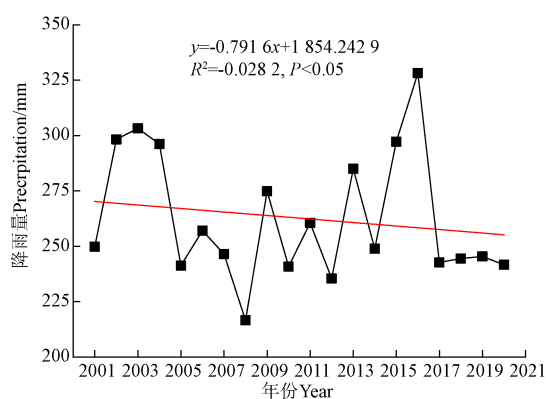
Note: Bold is the q -value of each single factor; and the rest are the q -values of the interactions between factors.

为了进一步探究气象因子对 TVDI 的影响, 分析了研究区 2001—2020 年年均气温及年均降雨量的趋势变化(图 9a、9b)。结果表明, 中亚干旱区 20 a 年均气温在 8.01~11.48 °C 之间, 多年的均值为 10.06 °C, 呈轻微增长趋势, 其变化率为 0.350 mm/10a; 而年均降雨量介于 210~330 mm 之间, 多年均值为 262.71 mm, 呈轻微减少趋势, 且变化率为 7.916 mm/10a。气温的上升对中亚干旱化趋势影响较大, 降雨量的减少进一步加剧了干旱化程度。



a. 年均气温年际变化

a. Annual variation in mean annual temperature



b. 年均降雨量年际变化

b. Annual variation in average annual rainfall

图 9 气温和降水因子年际变化趋势

Fig.9 Annual change trends of temperature and precipitation factors

3 讨论

本研究基于 MODIS 植被指数和地表温度产品计算中亚地区 2001—2020 年生长季的 TVDI, 对研究区进行干旱监测。研究结果较好地反映了中亚地区的总体时空变化特征、未来的变化趋势及地形、气象和人类活动对干旱的综合影响, 系统揭示了中亚干旱时空演变特征及各因子的影响机理, 研究结果可为未来中亚地区的生态安全修复及应对旱灾防控提供参考依据。

本研究从像元尺度上对中亚地区时空变化特征进行分析, 中亚 2001—2020 年 TVDI 时空变化分布特征分析表明, 20 a 间中亚地区 TVDI 总体略呈增长趋势, TVDI 趋势变化分析表明, 土库曼斯坦、乌兹别克斯坦中部、哈萨克斯坦中南部等地的干旱趋势增强, 其他地区则有所减弱。这与张乐园等^[33-37]的研究结论一致。彭宇等^[38]在 1990—2019 年中亚干旱状况时空变化特征及大气涛动驱动分析研究中表明, 中亚地区干旱指数夏秋旱、春湿的季节性变化特征, 干旱空间总体呈现自西南向东北逐渐减轻。Dilinuer 等^[39]研究表明, 中亚干旱区呈现出北部变干而南部变湿的趋势。而本研究表明, TVDI 整体呈季节性变化, 其干旱等级表现为: 夏季>春季>秋季, 其空间分布具有明显的区域特征, 呈现出自西南向东北递减趋势, 空间趋势变化呈现出哈萨克斯坦的西北部一带旱情加剧显著, 研究结论相一致。影响因素结果得到, 气温是干旱加剧的主导因素, 这与张乐园等^[34]结论是一致的。本研究结果表明, 采取积极有效的生态保护措施, 不仅对未来控制和缓解干旱、减少自然灾害发生风险有一定的参考价值, 而且在全球气候变暖背景下, 对提升应对中亚生态风险及地缘安全具有重要的科学意义和战略价值。

本文采用 TVDI 模型监测中亚地区干旱时空分布特征并与已有研究结果进行对比, 已证实该研究可以取得较好的可靠结果。后续研究可采用多种植被干旱指数模型(如: 增强型植被指数(EVI)、改进的温度植被干旱指数(Improved Temperature Vegetation Dryness Index, iTVDI)^[40]、干旱严重度指数(Drought Severity Index, DSI)^[41]), 寻求最优方法对中亚地区干旱空间分布状况进行可行性分析。采用长时间序列遥感数据进行大范围干旱监测, 数据量大, 存在大量重复计算, 人为因素较多, 容易出现失误, 未来工作应结合其他干旱影响因素指标(大气环流、海温和太阳活动、CO₂排放量等)研究开发一套基于 C#语言的实时干旱监测系统, 更加合理、动态地进行干旱监测及预警。

4 结论

基于 2001—2020 年 MODIS 数据产品, 通过计算不同时间尺度和空间变化的温度植被干旱指数(TVDI), 分析了中亚地区近 20 a 的干旱时空变化及特征, 并利用地理探测器中单因子分析和交互式探测分析对 TVDI 的 7 个影响因子(气温、年均降雨量、土地利用类型、人口密度、高程、坡度、坡向)进行了影响因素分析, 得出

以下结论:

1) 中亚干旱区 TVDI 空间分布具有明显的区域特征, 呈现出自西南向东北递减趋势, 其中 66% 面积呈现干旱加剧趋势 ($P < 0.05$), 34% 的面积呈现干旱减弱趋势 ($P < 0.05$), 呈现“北部变干、南部变湿”空间变化趋势。

2) 从旱情年际变化趋势可知, 近 20 a 中亚干旱程度略呈加剧趋势, 2012 年干旱最为严重。TVDI 月际空间分布差异显著, 整体呈季节性变化, 其干旱等级表现为: 夏季 > 春季 > 秋季。TVDI 随着月际变化呈现出先上升后下降的趋势, 其中 6 月是中亚地区干旱最严重的月份。

3) 单因子探测结果显示, 气温和高程是驱动研究区干旱化形成的主要影响因素, 多因子交互下, 气温和高程、气温和坡度、气温和土地利用、气温与降雨量这四对组合共同驱动干旱化形成。随着全球气候变暖、人类活动(植被破坏、城市化建设、开垦耕地、过度放牧、工业污染等)持续加剧, 近 20 a 中亚地区气温逐渐上升, 降雨量的减少, 导致植被退化, 进而导致生态环境恶化、干旱化趋势加剧。

[参 考 文 献]

- [1] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 632-639.
Han Lanying, Zhang Qiang, Yao Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 632-639. (in Chinese with English abstract)
- [2] 何建村, 白云岗, 张严俊. 基于 MODIS 数据新疆土壤干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 735-742.
He Jiancun, Bai Yungang, Zhang Yanjun. Soil drought characteristics in Xinjiang with remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 735-742. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李新武, 张丽, 郭华东, 等. “丝绸之路经济带”干旱-半干旱区生态环境全球变化响应的空间认知[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(5): 559-566.
Li Xinwu, Zhang Li, Guo Huadong, et al. Space recognition of eco-environment global change response of arid and semi-arid region of the Silk Road Economic Belt[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(5): 559-566. (in Chinese with English abstract)
- [4] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269-276.
Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in northwest China[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 269-276. (in Chinese with English abstract)
- [5] 彭擎, 王让会, 蒋焯林, 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 Qing, Wang Ranghui, Jiang Yelin, et al. Adaptability of drought situation monitor in Xinjiang with the NDVI-LST index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4694-4703. (in Chinese with English abstract)
- [6] AghaKouchak A, Farahmand A, Melton F S, et al. Remote sensing of drought: progress challenges and opportunities[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 452-480.
- [7] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in Great Plains with ERTS[J]. Proceedings of the Third ERTS Symposium, 1973, 3(8): 309-317.
- [8] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.
- [9] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于 SPEI 和 TVDI 的河南省干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 126-132.
Chen Shaodan, Zhang Liping, Tang Rouxin, et al. Analysis on temporal and spatial variation of drought in Henan Province based on SPEI and TVDI [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 126-132. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王凤杰, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于 FY-3A/VIRR 和 TERRA/MODIS 数据藏北干旱监测对比[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1229-1239.
Wang Fengjie, Feng Wenlan, Zhaxi Yangzong, et al. The comparison of FY-3A/VIRR and TERRA/MODIS data for drought monitoring[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1229-1239. (in Chinese with English abstract)
- [11] Koohi S, Azizian A, Brocca L. Spatiotemporal drought monitoring using bottom-up precipitation dataset (SM2RAIN-ASCAT) over different regions of Iran[J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146535.
- [12] 汤诗怡, 张翔, 陈能成. 干旱指数的土壤湿度监测适应性分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 114-119.
Tang Shiyi, Zhang Xiang, Chen Nengcheng. Adaptability analysis of drought index in soil moisture monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(11): 114-119. (in Chinese with English abstract)
- [13] 武彬, 张清, 李希灿, 等. VIIRS-TVDI 法反演干旱区农田土壤湿度[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1327-1333.
Wu Bin, Zhang Qing, Li Xican, et al. Evaluating soil moisture of prime farmland using the VIIRS-TVDI in arid land[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1327-1333. (in Chinese with English abstract)
- [14] 于维, 柯福阳, 曹云昌. 基于 MODIS_TVDI/GNSS_PWV 的云南省干旱特征时空分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 202-210.
Yu Wei, Ke Fuyang, Cao Yunchang. Spatial-temporal analysis of drought characteristics of Yunnan Province based on MODIS_TVDI/GNSS_PWV data [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 202-210. (in Chinese with English abstract)
- [15] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于 TRMM 降尺度数据和 MODIS 数据的综合干旱监测模型构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2553-2568.
Yu Haozhe, Li Lijuan, Li Jiuyi. Establishment of comprehensive drought monitoring model based on downscaling TRMM and MODIS data[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2553-2568. (in Chinese with English abstract)
- [16] 鹿国武, 尚建设, 周清, 等. 基于高分一号数据的干旱监测方法研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(1): 63-66.
Lu Guowu, Shang Jianshe, Zhou Qing, et al. Research on drought monitoring method based on data of GF-1[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(1): 63-66. (in

- Chinese with English abstract)
- [17] 王正东, 郭鹏, 万红, 等. 基于 MODIS 数据的山东省 2014—2016 年干旱监测分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 330-336.
Wang Zhengdong, Guo Peng, Wan Hong, et al. Analysis of drought monitoring in Shandong Province from 2014 to 2016 based on MODIS data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 330-336. (in Chinese with English abstract)
 - [18] Liu Q, Zhang S, Zhang H, et al. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711:134585.
 - [19] Zhang Z, Xu W, Shi Z, et al. Establishment of a comprehensive drought monitoring index based on multisource remote sensing data and agricultural drought monitoring[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2113-2126.
 - [20] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.
Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 196-213. (in Chinese with English abstract)
 - [21] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1-12.
Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)
 - [22] Mohammat A, Wang X H, Xu X T, et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 178-179(5): 21-30.
 - [23] 匡昭民. 基于 EOS_MODIS 卫星数据的甘蔗干旱遥感监测模型及其应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
Kuang Zhaomin. Sugarcane Drought Monitoring Models and its Application with Remotely Sensed Data from EOS/MODIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
 - [24] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于 CRU 资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403.
Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396-403. (in Chinese with English abstract)
 - [25] 王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979-987. (in Chinese with English abstract)
 - [26] Du L, Song N, Liu K, et al. Comparison of two simulation methods of the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing, 2017, 9: 177.
 - [27] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 473-478.
Yao Chunsheng, Zhang Zengxiang, Wang Xiao. Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 473-478. (in Chinese with English abstract)
 - [28] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 等. 红河流域“通道—阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2056-2064.
He Yixuan, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. The EVI trends and driving factors in Red River Basin affected by the “corridor-barrier” function during 2000—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2056-2064. (in Chinese with English abstract)
 - [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principles and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)
 - [30] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数 (TVDI) 进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
Qi Shuhua, Wang Changyao, Niu Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature vegetation dryness index (TVDI)[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2003, 7(5): 420-427. (in Chinese with English abstract)
 - [31] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323.
Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1309-1323. (in Chinese with English abstract)
 - [32] 李稚, 李玉朋, 李鸿威, 等. 中亚地区干旱变化及其影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(1): 37-50.
Li Zhi, Li Yupeng, Li Hongwei, et al. Analysis of drought change and its impact in Central Asia[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(1): 37-50. (in Chinese with English abstract)
 - [33] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于 SPEI 指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 331-340.
Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 331-340. (in Chinese with English abstract)
 - [34] Zhang L, Wang Y, Chen Y, et al. Drought risk assessment in Central Asia using a probabilistic copula function approach[J]. Water, 2020, 12(2): 421.
 - [35] Zhang R, Zhao C, Ma X, et al. Projected Spatiotemporal Dynamics of Drought under Global Warming in Central Asia[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4421.
 - [36] Guo H, Bao A, Liu T, et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1523-1538.
 - [37] Zhang Y, An C B, Liu L Y, et al. High-elevation landforms

- are experiencing more remarkable wetting trends in arid Central Asia[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, S1674927822000491.
- [38] 彭宇, 李发东, 徐宁, 等. 1990—2019 年中亚五国干旱状况时空变化特征及大气涛动驱动分析[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(2): 312-324.
- Peng Yu, Li Fadong, Xu Ning, et al. Spatial-temporal variations in drought conditions and their climatic oscillations in Central Asia from 1990 to 2019[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(2): 312-324. (in Chinese with English abstract)
- [39] Dilinuer T, Yao J, Chen J, et al. Regional drying and wetting trends over Central Asia based on Köppen climate classification in 1961-2015[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(3): 363-372.
- [40] Yang R, Wang H, Hu J, et al. An improved temperature vegetation dryness index (iTVDI) and its applicability to drought monitoring[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14: 2284-2294.
- [41] Ali S, Tong D, Xu Z, et al. Characterization of drought monitoring events through MODIS- and TRMM-based DSI and TVDI over South Asia during 2001-2017[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 33568-33581.

Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data

Cheng Xiaoqiang^{1,2}, Zhou Zhaoye^{1,2}, Li Wangping^{1,2*}, Shangguan Donghui³, Wang Xiaoxian^{1,2}, Zhang Xiuxia^{1,2}, Hao Junming^{1,2}, Lin Qingrun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Emergency Surveying and Mapping Engineering Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. State Key Laboratory of Cryosphere Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Drought has become a global concern, and timely and accurate drought monitoring has an important guiding significance for the regional ecological security, economic development, and agricultural production of countries along the "New Silk Road Economic Belt" in the context of global warming. Since natural disasters have occurred frequently around the world in recent years, the drought has also posed a great threat to the global ecological environment, particularly to the long-term social and economic development of Central Asia and the surrounding countries. In this study, a Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) model was established using the MODIS Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Central Asia from 2001 to 2020. Based on trend analysis, MK test, and geographic detectors, the spatial and temporal variations, of drought and drought changing patterns in Central Asia in the last 20 years, the drought evolution pattern and the influence of different factors (temperature, mean annual precipitation, land use type, population density, DEM, slope, aspect) on TVDI were also investigated. The results show that: 1) There was an obvious regional pattern in the spatial distribution of TVDI in the study area, which were mainly characterized by regional and local droughts. The frequency and degree of droughts in the southwestern part of Central Asia are than those in the northeastern part, with a decreasing trend from the southwest to the northeast. For all the study area, 66% of the area showed a significantly increasing trend of drought ($P < 0.05$), whereas, 34% of the area showed a significant decreasing trend of drought ($P < 0.05$), indicating a pattern of "dry in the north and wet in the south". Overall, Central Asia shows an increasing trend of aridity, with the most severest drought in the northwestern part of Kazakhstan. 2) The degree annual of drought slightly increased over the past 20 years, with the severest drought occurred in 2012. There was a significantly different spatial distribution of TVDI, which with a clear seasonal change. The drought degree was ranked as follows: summer > spring > autumn. 3) The single-factor detection results showed that the contribution of the influencing factors to drought was ranked as follows: temperature > DEM > slope > precipitation > land use type, with the controlling factors of temperature and DEM for the drought (all q values were greater than 0.45). The multi-factor analysis showed the two-factor enhancement and non-linear enhancement, with t major contribution from the four combinations, e.g., — temperature and DEM, temperature and slope, temperature and land use, and temperature and precipitation. Under the background of global climate warming and increasing human activities (vegetation deterioration, urbanization and construction, cultivation, overgrazing, industrial pollution, etc.), the air temperature gradually increased and the precipitation decreased in Central Asia over the past 20 years. These changes led to vegetation degradation, which in turn resulted in ecological degradation and increased drought degrees. This finding can provide a scientific reference for the decision-making on the drought prevention and control, particularly for the ecological risks and geo-security impacts.

Keywords: drought; Central Asia; Temperature Vegetation Drought Index (TVDI); trend analysis; Geodetector; influencing factors