

基于植被状态指数的甘肃省 2000—2019 年 干旱时空特征分析

张 瑾, 王 斌, 白建军

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘 要: 农业发展受干旱影响极为敏感。为了为制定科学的应对措施和干旱缓解措施提供科学依据, 利用 NDVI 作为基础数据, 将植被状态指数(VCI)作为表征干旱的指标, 通过分析 VCI 的变化趋势、计算干旱频率和干旱面积占比、分析 VCI 与降水量的相关性, 探讨 2000—2019 年不同空间尺度甘肃省干旱的时空分布特征, 并且结合土地利用类型分析了不同用地类型发生不同程度旱情的可能性。结果表明: 甘肃省农业干旱高发于春季, 其次是秋季; 空间上以全域性干旱为主, 即研究时段内甘肃省干旱面积占比大于 50% 为主, 并呈现西北高东南低的空间格局; 植被状态指数与当月降水量的相关系数最大, 达到了 0.827; 林地和草地发生干旱的比例最低, 未利用地发生干旱的比例最高。综上, 甘肃省旱情以全域性干旱为主, 且时空分布不均, 整体旱情呈现逐渐缓解的趋势。

关键词: 甘肃省; 干旱变化; 植被状态指数(VCI); 相关性分析

中图分类号: P338^{+.6}

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0167-07

Analysis of the Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Gansu Province from 2000 to 2019 Based on the Vegetation State Index

ZHANG Jin, WANG Bin, BAI Jianjun

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Agricultural development is extremely sensitive to the impact of drought. In order to provide a scientific basis for formulating appropriate scientific response and drought mitigation measures, NDVI was used as the basic data, and the Vegetation Condition Index (VCI) was used as an indicator to characterise drought. By analysing the variation trend of VCI, calculating the drought frequency, the proportion of drought area, and analysing the correlation between VCI and precipitation, the temporal and spatial distribution characteristics of drought in Gansu Province at different spatial scales from 2000 to 2019 were discussed. Combined with land use types, the possibility of different degrees of drought in different land use types were analysed. The results show that: the agricultural drought in Gansu Province is most common in spring, followed by summer; spatially, it is dominated by global drought, that is, the proportion of drought area in Gansu Province was more than 50% during the study period, and the spatial pattern is high in the northwest and low in the southeast; The correlation coefficient between the vegetation state index and the monthly precipitation was the largest, reaching 0.827; the drought rate of forest land and grassland was the lowest, and the drought rate of unused land was the highest. To sum up, the drought in Gansu Province is dominated by global drought, and the spatial and temporal distribution is uneven.

Keywords: Gansu Province; drought change; Vegetation Condition Index (VCI); correlation analysis

农业干旱是由于各种原因造成的土壤水分不能满足农作物水分需求, 使农作物正常生长受到抑制, 进而导致生物量和产量减少的现象^[1-3], 有着发生频率高、影

响范围广、持续时间长和受灾损失重等特点^[4-5]。干旱频发不仅会影响社会稳定, 给社会经济带来重大损失^[6], 而且会破坏生态环境, 加剧荒漠化。近几十年

收稿日期: 2021-09-09

修回日期: 2021-09-27

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42072208); 陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(2018JM4027), 中央高校基本科研业务费(GK201803056)

第一作者: 张瑾(1997—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向为农业遥感与数字地貌。E-mail: zhangjin018@snnu.edu.cn

通信作者: 王斌(1984—), 男, 陕西商洛人, 博士, 副教授, 主要从事地表过程与全球变化研究。E-mail: bin.wang@snnu.edu.cn

来,由于全球气候变暖等原因,农业干旱的发生频率和发生强度均呈现显著上升和增加的趋势。干旱是一种复杂并且难以理解的现象,目前难以找到预测干旱的有效方法^[7]。因此,分析和研究已经发生的干旱事件,有助于我们更好地了解干旱形成的机理,为制定科学的应对措施和干旱缓解措施提供科学依据。干旱的监测和早期的预警对国民经济建设、生态环境以及社会的可持续发展都有着十分重要的意义。

目前常用进行农业干旱监测的手段有利用站点数据进行监测和利用遥感数据进行监测两种。前者常用的干旱指数有 PDSI(帕默尔干旱指数)^[8]、SPI(标准化降水指数)^[9]、SPEI(标准化降水蒸散指数)^[10]、CI(综合指数)^[11]和 K 指数等^[12]。由于干旱是持续性、区域性事件,仅凭借站点数据进行空间插值来监测农业干旱不仅精度低,并且具有一定的不确定性。遥感可以获得多波段、多时段的地表变化信息,从而能够监测各种地球表面自然灾害的时空动态变化情况,补充了传统的站点监测的不足,逐渐成为干旱监测领域的前沿与热点^[3,13-15]。植被状态指数(VCI)是以归一化植被指数(NDVI)为基础数据计算得到的遥感指数,VCI 定义为当期 NDVI 与 NDVI 多年最小值的差值与 NDVI 多年最大值和最小值的差值的比值,通过对 NDVI 进行逐像元归一化处理,减少了水分之外的地理和生态因子对 NDVI 空间变异的影响^[16-18]。

甘肃省位于我国西北干旱半干旱地区,其农业发展深受干旱事件影响。目前,对甘肃省干旱特征的研究主要分为采用单一指数评价气象干旱或农业干旱和研究不同干旱指标在甘肃省的适用性两类。已有研究大多使用站点数据计算干旱指数来探讨甘肃省干旱时空特征,对栅格数据的分析较少。甘肃省的农业用水来自降水、冰川融水和灌溉三方面,因此利用降水数据计算得到的干旱指数并不能准确反映甘肃省农业干旱情况,本文排除不同农业用水供给源的影响,使用可以反映植被生长状况的 NDVI 数据计算得到的植被状态指数(VCI)作为表征干旱程度的指标,利用逐月植被状态指数和年均植被状态指数来反映甘肃省春、夏、秋三季干旱情况变化趋势;同时,结合气象站点的观测数据,探究植被状态指数和降水的相关性;此外,通过计算干旱频率和干旱面积占比来反映甘肃省干旱分布的时空特征,为甘肃省开展抗旱减灾工作提供科学参考。

1 研究区概况

甘肃省地处中国西北内陆,位于黄河上游,地理坐标为 32°11′—42°57′N,92°13′—108°46′E,位于黄

土高原、青藏高原和内蒙古高原的交汇带^[19]。地势自西南向东北倾斜,地形狭长,海拔 587~5 485 m,年平均气温 8℃。甘肃省地形复杂多样,与海洋距离较远导致暖湿气团不易到达,属于典型的大陆性干旱半干旱季风气候,受到季风的影响,甘肃省的降水多集中在 6—8 月,年平均降水量约为 400 mm^[20]。全省共有 12 个地级市和 2 个自治州。甘肃省地形狭长,地势西部高东北部低,地貌复杂多样,山地、高原、平川、沙漠和戈壁交错分布。一般将甘肃省分为五大地区,分别是河西地区(包括嘉峪关、酒泉、张掖、武威、金昌),陇中地区(包括兰州、白银、天水、定西、临夏),陇东地区(包括庆阳、平凉),陇南地区(陇南),甘南地区(甘南)。甘肃省自然灾害频发,其中干旱灾害最为严重,据统计,每年农作物平均受旱面积 8.268 4×10⁵ hm²,减产粮食(50~100)×10⁴ t^[21]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据资料来源

本研究采用 MODIS 系列的 NDVI 合成产品。使用来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)时间跨度为 2000 年 1 月—2019 年 12 月的 NDVI 月合成产品,空间分辨率为 1 km。采用的气象数据是中国地面气候资料月值数据集中甘肃省 2000 年 1 月—2019 年 12 月的逐月降水数据,来自中国气象数据网(<http://www.nmic.cn>)。土地利用数据为 2018 年甘肃省土地利用合成产品,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 农业干旱识别方法 植被覆盖区的植被指数变化由两类因素导致:生态系统因素和极端天气因素。极端天气因素不能由植被指数直接进行监测。植被状态指数是由来自美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的 Kogan 等^[22]提出的。假设 VCI 指数的变化只受极端天气因素的影响,从而将生态系统因素与极端天气因素剥离开来。由于气象因子与植被覆盖状况和长势密切相关,假设 NDVI 的最小值出现在不利天气条件下(如干旱),NDVI 的最大值出现在最佳天气条件下。利用长时序的 NDVI 数据计算 NDVI_{max} 和 NDVI_{min},根据某时段 NDVI 与 NDVI_{max} 或 NDVI_{min} 的差值可以反映出植被在当前气象条件下的生境状况。本研究将植被状态指数作为识别农业干旱的指标,以月为基本时间尺度,计算研究时段内逐月的 VCI 值,计算方法如下:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

式中: VCI_i 为某年第 i 月的植被状态指数,其值越小表示该时期植被长势越差,干旱程度越严重; $NDVI_i$ 为某年第 i 月的 NDVI 值; $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为研究时段内 NDVI 的最大和最小值。 VCI 取值为 0~1,根据 VCI 值的大小,可将农业干旱分为 5 个等级^[23]。

2.2.2 农业干旱评估指标

(1) 计算干旱面积占比(P_n)。通过计算某一区域发生农业干旱的面积与区域总面积的比值可以反映农业干旱的覆盖范围和严重程度,计算公式如下:

$$P_n = \frac{s}{S} \times 100\% \quad (2)$$

式中: s 为发生农业干旱的面积; S 为研究区域的总面积。本文通过计算发生农业干旱的像元个数和研究区域总像元个数的比值得到干旱面积占比;根据 P_n 的大小,将农业干旱的影响范围分为 5 级^[24]。

(2) 干旱发生频率(P_m)。通过计算某一区域农业干旱发生次数与总时序长度的比值,来反映农业干旱发生的频繁程度。计算公式如下:

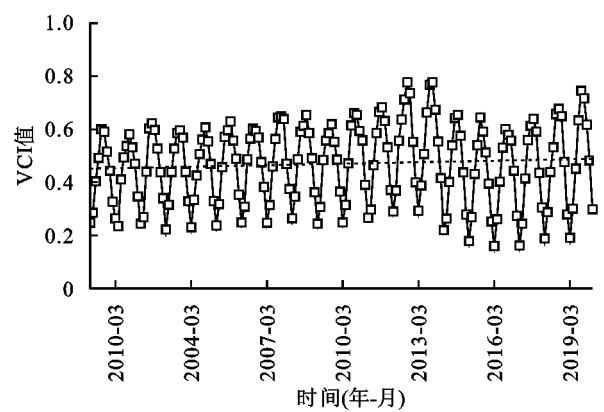
$$P_m = \frac{f}{F} \times 100\% \quad (3)$$

式中: f 为研究时段内农业干旱发生次数; F 为研究时段总长度。

3 结果与分析

3.1 基于 VCI 的甘肃省农业干旱事件识别

通过计算研究时段内逐月植被状态指数,得到甘肃省 2000—2019 年逐月植被状态指数(VCI)时序变化图(图 1)。研究时段内共 180 个月份的数据中仅有 38 个月的 VCI 值大于 0.6,即仅有 38 个月份甘肃省未发生农业干旱,其余月份旱情集中在轻旱与中旱之间。仅在 2006 年 1 月和 2016 年 1 月出现特旱;重旱集中出现在春季。研究时段内 VCI 呈现缓慢上升的趋势,即 2000—2019 年甘肃省的旱情逐步缓解。



注:图中每一个数据点表示研究时段内逐月的数据,下同。

图 1 甘肃省 2000—2019 年逐月 VCI 时序变化

3.2 甘肃省农业干旱空间特征分析

通过对研究时段内干旱频率进行计算,得到甘肃省 2000—2019 年农业干旱频率空间分布图(图 2)。春季甘肃省农业干旱频率主要集中在 60%~100%,呈现西北高东南低的空间特征,其中河西地区和陇中地区的定西等地干旱最为严重,干旱频率超过了 60%,由于河西地区土地利用类型主要是戈壁和沙漠,植被覆盖度低且春季降水较少,水源涵养功能弱,土壤干燥缺水;加之在植被覆盖较弱的区域,NDVI 指数会出现监测不到的情况,也会导致植被状态指数的偏低;陇中地区属于旱作物区,降水为地表主要水源补给,春季旱情高发会影响作物前期生长。甘南地区、陇南地区和陇东地区干旱频率较低,这些地区植被覆盖度高,土壤保水性能好。夏季为 4 个季节中旱情最轻的季节,这是甘肃省降水季节分布不均和夏季冰川融水增多共同导致的结果,干旱频率高的地区分布在河西地区,该地区夏季温度高、降水少且植被覆盖度低;陇南地区、甘南地区和陇东地区干旱频率最低,介于 0~20%;干旱频率在 40%~60%的地区仅呈条带状分布于河西地区和陇中地区。秋季仅有陇中地区的干旱频率较夏季有所降低,其余地区干旱频率均上升,空间分布上与夏季相似。

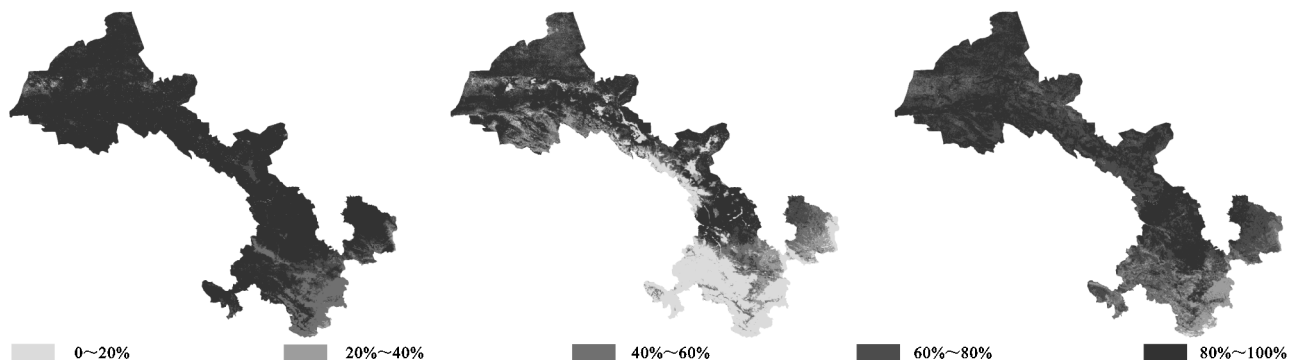


图 2 甘肃省 2000—2019 年农业干旱频率空间分布

3.3 甘肃省农业干旱时间特征分析

通过计算研究时段内逐月的农业干旱面积占比,

得到甘肃省 2000—2019 年逐月农业干旱面积占比时序变化图(图 3)。研究时段内,甘肃省整体上以全域

性干旱为主,仅2012年8月、9月和2013年7月、8月为局域性干旱。总体上干旱面积占比呈现缓慢减少的趋势,表明甘肃省的农业干旱情况正在逐步缓解,这与VCI缓慢上升表示甘肃省农业旱情正在逐步缓解的趋势基本一致。

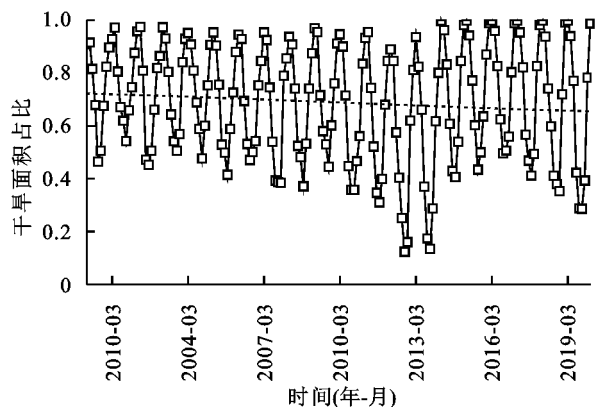


图3 甘肃省2000—2019年逐月农业干旱面积占比时序变化

3.4 长时序降水量与VCI的相关性分析

农业干旱是土壤缺失水分所导致的结果,本文通过分别计算VCI值和当期降水量、滞后一个月降水量和滞后两个月降水量的相关系数,来探究VCI与降水量的相关性。

如图4所示,降水量和VCI值存在较高的相关性,但仅凭折线-柱状组合图无法得出两者间具体的相关系数,因此在SPSS 25.0中分别对逐月VCI值和当期降水量、滞后一个月降水量、滞后两个月降水量进行Spearman相关性分析,得到VCI值和当期降水量、滞后一个月降水量和滞后两个月降水量的相关系数分别为0.827**,0.767**,0.116,**代表显著性水平为0.001。

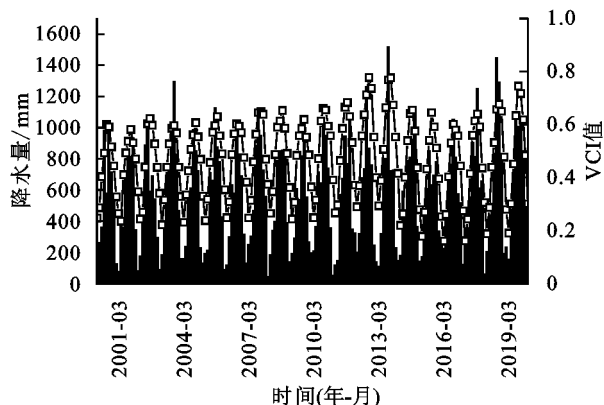


图4 甘肃省2000—2019年逐月VCI和降水量时序变化

由于水资源匮乏,甘肃省大部分地区为雨养农业区,虽也有部分地区依靠地理位置优势可以将冰川融水作为农业补给水源,但这种方式不仅可实行的区域较少且对时间的依赖性较强。通过计算发现:甘肃省的植被状态指数与当月降水量的相关性最高,相关系数达到了0.827;其次是滞后一个月的相关系数,为

0.767;植被状态指数与滞后两个月的降水量相关系数最小,仅为0.116。甘肃省植被状态指数与当月和滞后一个月的降水量的相关系数均高于0.7,说明甘肃省地区降水是影响植被生长的重要因素,这是甘肃省水资源空间分布不均且年降水量少导致的结果。

3.5 五大地区农业干旱时空特征分析

甘肃省分为河西、陇中、陇东、甘南和陇南五大地区,每个地区的土地利用类型、植被覆盖情况以及气候类型都不尽相同,从整个甘肃省尺度分析的结果并不能细致地反映不同地区的干旱时空特征,有必要缩小空间尺度分析五大地区每个地区的农业干旱时空特征。其中甘南地区和陇南地区的气候类型以及植被覆盖度等情况相似,因此将两个地区合并为陇南及甘南地区进行分析。

如图5—6所示,研究时段内所有地区的旱情总体上均呈现出逐渐缓解的趋势。其中,河西地区北部旱情加重,南部旱情缓解。河西地区北部土地利用类型以沙漠和戈壁为主,植被覆盖量少,且仅为稀疏的小灌木,以梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、红柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.)等抗旱性植物为主。归一化植被指数是对植被活动的度量,在河西地区北部植被活动弱的地区,归一化植被指数无法正确反映植被的生长状况,进而无法反映该区域农业干旱的状况;而位于河西地区南部的地区,土地利用类型以林地和草地为主,归一化植被指数可以很好地反映植被的生长状况。酒泉、张掖、金昌和武威等市的干旱频率从2000年开始显著下降,这与近年来河西走廊地区大力发展灌溉农业有密切关系,河西走廊地区是西北内陆著名的灌溉农业区,它提供了全省几乎全部的棉花、90%的甜菜、60%以上的商品粮、40%以上的油料、啤酒大麦和瓜果蔬菜。研究时段内河西地区2006年中旱、重旱和特旱的发生比例均呈现下降的趋势,轻旱和无旱的发生比例呈现上升的趋势。近年来,政府积极采取退耕还林、退耕还草等措施将易造成水土流失的耕地根据先陡坡后缓坡的原则,逐步停止耕种,根据土质的差异,因地制宜地恢复植被,合理利用资源,加大在防治荒漠化方面的投入,在草方格中种植梭梭、花棒等抗旱性植物,河西地区最广泛的沙质荒漠化得到了遏制,生态环境有了很大改善,干旱情况也得到了缓解。

陇中地区广泛分布有黄土,沟壑纵横,植被覆盖较差,黄土地区表层土壤涵养水的能力较弱,大量降水被消耗于蒸发、下渗和流失^[25]。研究时段内,陇中

地区旱情逐渐缓解,北部地区最为显著,2000 年北部地区干旱频率以 80%及以上为主,而 2019 年北部地区干旱频率以 40%~60%为主,干旱频率 80%以上的地区仅有零星分布。特旱和重旱发生的比例大幅下降,其中重旱发生的比例减少了近 50%;发生轻

旱、中旱和无旱的比例呈现增加的趋势。近年来,人们逐渐意识到了生态环境的重要性,加上在政府的支持下陇中地区众多市县实施退耕还林、退耕还草工程,生态环境得到了有效改善,陇中地区的旱情得到显著缓解。



图 5 五大地区 2000—2019 年干旱频率空间分布

自有历史文献记载以来,陇东地区的人们为了生存毁林开荒,地表植被资源被乱砍滥伐,森林草地面积不断下降,地表植被覆盖率极低,逐渐增加的裸露

的黄土面积使得水土流失加剧,生态环境遭到严重破坏。近年来,在“十三五”构建“两屏三带”生态安全战略格局的政策支持下,陇东地区生态环境逐步好转。

研究时段内,陇东地区北部和中部的旱情由于干旱频率 80% 以上为主变为 40%~60% 为主,中部一些地区干旱频率仅为 20%~40%。从不同旱情占比情况来看,研究时段内发生无旱和特旱的比例均接近于 0,发生重旱的比例显著下降,到了 2019 年时已接近 0,发生中旱的比例也呈现下降的趋势,仅有发生轻旱的

比例显著上升,由最开始的 0 上升到约 70%。“十三五”规划明确了我国以“两屏三带”为主体的生态安全战略格局,黄土高原川滇生态屏障重点要加强水土流失防治和天然植被保护,北方防沙带重点要加强防护林建设、草原保护和防风固沙,对暂不具备治理条件的沙化土地实行封禁保护。

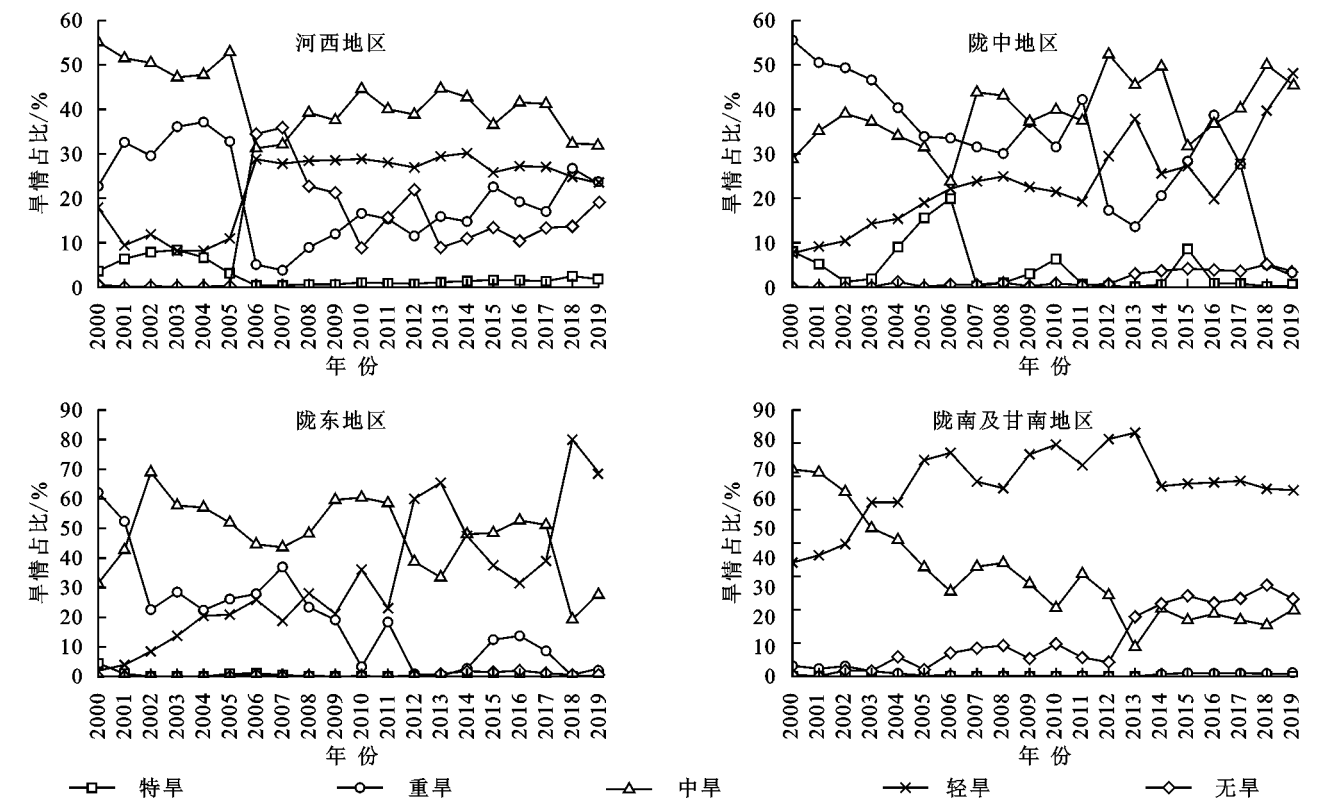


图 6 五大地区不同旱情占比

陇南及甘南地区在甘肃省起着重要的生态屏障的作用,陇南地区植被覆盖率高,为各种动植物生长繁殖提供了优渥的条件。甘南地区处于长江和黄河的上游,水资源丰富;森林资源丰富,占全省林地总面积的 30%,是甘肃重要的畜牧业生产基地。陇南及甘南地区旱情在五大地区中最轻,仅有东北部地区旱情较重,但截至 2019 年,东北部地区旱情得到了极大缓解,干旱频率以 20%~40% 为主。整个陇南及甘南地区仅有个别地区干旱频率高于 60%。从不同旱情占比情况来看,陇南及甘南地区发生特旱和重旱的比例一直接近于 0,发生中旱的比例呈现下降的趋势,发生轻旱和无旱的比例大幅上升。

研究时段内,甘肃省旱情虽有反复,但整体上呈现旱情缓解的趋势。

3.6 基于土地利用类型的甘肃省农业干旱空间分析

土壤水分是土壤中的重要组成物质,也是决定土壤生产力的重要因素之一。农业干旱发生的一个重要原因是土壤水分不能满足农作物水分需求,使农作物无法正常生长,进而导致生物量和产量减少。而植

被覆盖和土地利用影响着土壤水分的含量及其分布^[26]。甘肃省的未利用地主要是分布在河西地区的西北部和东北部的沙漠和戈壁,林地和草地主要分布在河西地区的南部以及甘南、陇南、陇东地区(图 7)。不同用地类型发生不同程度旱情的比例见表 1。

不同用地类型发生不同程度旱情的比例不同。耕地发生轻旱的比例最高,其次是无旱,发生特旱的比例仅为 0.05%,虽然甘肃省降水在时间和空间上分布都不均,但多地发展灌溉农业,一定程度上弥补了降水量的不足,减少了旱情的发生。林地和草地发生无旱的比例最高,其次是轻旱,林地和草地植被覆盖度高,土壤保水性能好。甘肃省的未利用地主要是河西地区的沙漠和戈壁,土壤肥力和保水性能都较差,植被覆盖仅是矮小的灌木,发生重旱和特旱的比例最高,达到了 19.849 2%,10.162 9%。近年来,当地的人们探索出了草方格和种植梭梭、花棒等抗旱性植物来改善沙漠化的方法,这种方法成本低,见效快,已经成为了河西地区最常用的治沙手段,遏制着巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠前进的步伐。

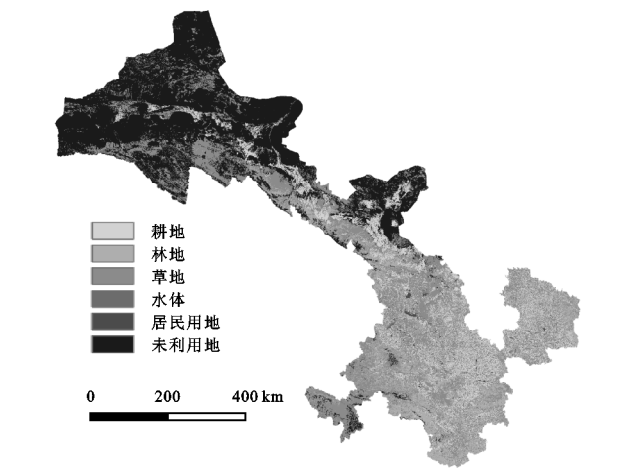


图 7 2018 年甘肃省土地利用类型空间分布

表 1 不同土地利用类型旱情分布 %

干旱程度	耕地	林地	草地	居民用地	未利用地
无旱	6.3391	7.2187	13.2513	0.1271	0.8862
轻旱	7.2003	1.8523	12.6397	0.1782	2.6155
中旱	2.4887	0.3846	4.7447	0.1761	4.6630
重旱	0.4630	0.1654	3.3797	0.1342	19.8492
特旱	0.0513	0.0269	0.8185	0.1832	10.1629

不同类型的用地类型发生不同程度旱情的比例不同,导致的原因也不同,要因地制宜对不同用地类型和不同程度的旱情提出不同的科学决策,最大程度上缓解甘肃省的旱情。

4 结论

(1) 研究时段内,VCI 指数集中在 0.3~0.6,呈现缓慢上升的趋势,表明甘肃省的旱情集中在轻旱与中旱之间,且有逐渐缓解的趋势。从时间分布来看,甘肃省旱情春季最为严重,其次是秋季。

(2) 研究时段内,甘肃省一直表现为全域性干旱为主,呈现西北高东南低的格局,但干旱面积占比的值呈现缓慢下降的趋势,表示甘肃省旱情正在逐渐缓解,这与 VCI 反映的趋势基本一致。

(3) VCI 与当月的降水量相关性最好,相关系数为 0.827,结果表明降水是影响植被生长的重要因素,这是甘肃省水资源空间分布不均导致的结果。

(4) 不同用地类型发生干旱的比例不同,其中林地和草地发生干旱的比例最低,未利用地发生干旱的比例最高。

(5) 甘肃省各个地区的气候格局、土地利用类型和农业生产用水源均有较大差异,要根据实际情况制定缓解农业干旱的相关政策。旱情最重的河西地区未利用地类型面积占比较大,应种植抗旱作物,提高植被覆盖度,减少裸地面积占比,改善生态环境;其余地区应着重发展灌溉农业,减少水资源时空分布不均对农业带来的影响。

参考文献:

[1] 黄友听,刘修国,沈永林,等.农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J].农业工程学报,2015,31(16):186-195.

[2] 刘立文,段永红,徐立帅,等.山西省农业干旱时空变化特征[J].灌溉排水学报,2020,39(2):114-121.

[3] 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.

[4] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J].地理研究,2019,38(7):1820-1832.

[5] 张有智,解文欢,吴黎,等.农业干旱灾害研究进展[J].中国农业资源与区划,2020,41(9):182-188.

[6] 韩兰英,张强,程英,等.农业干旱灾害风险研究进展及前景分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(6):97-102.

[7] 孙亲.基于 VCI 指数的中国 1981—2015 年干旱时空变化特征研究[D].江苏苏州:江苏师范大学,2017.

[8] 王姝,李金建,秦宁生.基于历史帕默尔干旱指数(PDSI)数据集重建的长江源区过去 706 a 径流量[J].中国沙漠,2019,39(3):126-135.

[9] 于家瑞,艾萍,袁定波,等.基于 SPI 的黑龙省干旱时空特征分析[J].干旱区地理,2019,42(5):1059-1068.

[10] Kit F F, Yuk F H, Chai H K. Spatiotemporal analysis of seasonal SPEI in Peninsular Malaysia[J]. Earth and Environmental Science, 2020,476:012113.

[11] 周丽,谢舒蕾,吴彬.基于 CI 和强度分析方法的四川冬春季干旱事件变化特征[J].自然灾害学报,2020,29(3):36-44.

[12] 王素萍,王劲松,张强,等.多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J].高原气象,2020,39(3):628-640.

[13] 林妍,高伟,师晋平,等.基于 MODIS 和 FY-2D 卫星降水数据的遥感旱情监测研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):51-57.

[14] Choi M, Jacobs J M, Anderson M C, et al. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476:265-273.

[15] 宋扬,房世波,卫亚星.农业干旱遥感监测指数及其适用性研究进展[J].科技导报,2016,34(5):45-52.

[16] Quiring S M, Ganesh S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(3):330-339.

[17] 王莺,沙莎,张雷.甘肃省河东地区干旱遥感监测指数的对比和应用[J].中国沙漠,2015,35(4):1006-1014.

[18] 赖力,栗晓玲,冯凯.甘肃省农业干旱对多尺度气象干旱的响应[J].节水灌溉,2020(2):102-108.

- [13] Hou M J, Ge J, Gao J L, et al. Ecological risk assessment and impact factor analysis of alpine wetland ecosystem based on LUCC and boosted regression tree on the Zoige Plateau, China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 368-390.
- [14] Lin Y Y, Hu X S, Zheng X X, et al. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks[J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 3392-3403.
- [15] Mohammad V. Temperature analysis of reference evapotranspiration models [J]. Meteorological Applications, 2015, 22(3): 385-394.
- [16] 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 等. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4304-4313.
- [17] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727.
- [18] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: A natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment and Planning A, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [19] 康紫薇, 张正勇, 位宏. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6472-6485.
- [20] 赵岩洁, 李阳兵, 邵景安. 基于土地利用变化的三峡库区小流域生态风险评价: 以草堂溪为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(6): 944-956.
- [21] Leuven R, Gne I P. Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment [J]. Freshwater Biology, 2002, 47(4): 845-865.
- [22] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5952-5960.
- [23] 田鹏, 李加林, 史小丽, 等. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2697-2706.
- [24] Carreo L V, Frank F C, Viglizzo E F. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 154(5): 68-77.
- [25] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 432-445.
- [26] 环境保护部. 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知(环发(2015)56号)[Z]. 北京: 环境保护部, 2015.
- [27] 苏海民, 何爱霞. 基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 91-99.
- [28] 和春兰, 普军伟, 沈金祥. 2005—2018 年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 219-227.
- [29] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. 地理科学, 2015, 35(6): 790-797.
- [30] 王海宾, 侯瑞萍, 郑冬梅, 等. 基于地理加权回归模型的亚热带地区乔木林生物量估算[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 184-190.

~~~~~

(上接第 173 页)

- [19] 王丽娜, 丁文广, 许丹阳. 基于 DEM 的甘肃省地貌形态特征分类[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 258-263.
- [20] 胡蝶, 沙莎, 王丽娟, 等. 欧空局主被动微波土壤水分融合产品在甘肃省干旱监测中的应用[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 517-528.
- [21] 韩兰英, 张强, 赵红岩, 等. 甘肃省农业干旱灾害损失特征及其对气候变暖的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 767-776.
- [22] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data [J]. Advances in Space Research, 1993, 13(5): 219-222.
- [23] 沙莎, 郭锐, 李耀辉, 等. 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[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 990-998.
- [24] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [25] 祁飞飞. 陇东黄土高原沟壑区乡村聚落居住形态研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [26] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国科学基金, 1999, 13(4): 225-227.