

塔里木河下游植被非生长季火灾风险等级遥感评估

金庆日¹, 艾力克木·司拉音¹, 夏依旦·吾买尔江², 郭增坤^{3,4}, 阿布都米吉提·阿布力克木^{3,4}, 艾里西尔·库尔班^{3,4*}

(1. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域干流管理局, 新疆库尔勒 841000; 2. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域希尼尔水库管理局, 新疆库尔勒 841000; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 以塔里木河下游地区为例, 利用已知火灾发生点前后时段卫星遥感数据, 计算干枯燃料指数 (dead fuel index, DFI) 和 2 种燃烧指数, 即归一化燃烧指数 (normalized burn ratio, NBR) 和燃烧面积指数 (burn area index, BAI), 分析干枯燃料指数和燃烧指数的相关性, 并评估研究区的火灾风险等级。结果表明: 燃烧指数可以较为准确地得到过火区域的位置; 干枯燃料指数 (DFI) 与燃烧指数存在一定的相关性, R 分别为 0.53 (NBR), 0.51 (BAI); 2021 年 2 月发生的火灾处于高风险区域, 说明干枯燃料指数可以作为火灾风险等级评估指标, 并利用 2020—2021 年秋冬季分析, 得到火灾风险等级图。

关键词 干枯燃料指数; 归一化燃烧指数; 燃烧面积指数; 火灾风险评估; 塔里木河下游

中图分类号 S762 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)03-0101-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.03.022



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Assessment of Fire Risk Level of Non-growing Season in the Lower Reaches of Tarim River Using Remotely Sensed Data

JIN Qing-ri¹, Alikemu Slayin¹, Xiayidan Wumaierjiang² et al (1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Tarim River Basin Mainstream Management Bureau, Korla, Xinjiang 841000; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Tarim River Basin Xinir Reservoir Management Bureau, Korla, Xinjiang 841000)

Abstract Taking the lower reaches of Tarim River as the study area, we calculated the dead fuel index (DFI) and two burn fuel indexes, respectively normalized burn ratio (NBR) and burn area index (BAI), using the satellite remote sensing data before and after the fire at the known fire site. Then we analyzed the correlation between DFI and burn indexes (NBR and BAI) and evaluated the fire risk level in the study area. The results show that the burn indexes could accurately obtain the position of the fire area; DFI had a certain correlation with the burn indexes. R was 0.53 (NBR) and 0.51 (BAI) respectively. The fire in February 2021 happened in high risk area, which indicated that DFI can be used as an index for fire grade evaluation, and the fire risk map in autumn and winter 2020-2021 was obtained.

Key words Dead fuel index; Normalized burn ratio; Burn area index; Fire risk assessment; Lower Reaches of Tarim River

植被作为生态系统的重要组成部分, 在干旱区非生长季节易发生火灾, 火灾对于植被的干扰显而易见^[1]。近些年由于气候的变化以及社会经济的快速发展, 火灾在各地频繁发生^[2], 如澳大利亚草原的大火^[3], 美国洛杉矶的森林大火^[4]以及蒙古国频发的草原火灾^[5], 严重影响着当地社会的发展及居民的安全。火灾的发生不仅对各地区的社会经济造成严重危害, 且对当地的土地资源及生态造成破坏^[6-8]。因此, 对火灾风险等级进行研究, 有助于减少火灾发生的频率, 提高发生火灾时的救援效率, 并降低火灾导致的损失。

随着遥感技术的发展, 火灾监测与评估技术也得到了长足发展。Bian 等^[9]相关学者, 利用 GIS 和 RS 技术构建了呼伦贝尔草原的火灾风险评估模型。杨晓颖等^[10]根据蒙古高原草原的特点及成灾机理, 制作得到蒙古高原草原火灾风险分布图。张继权等^[11]采用加权综合评价结合层次分析法对吉林省西部的草原火灾风险程度进行定量评价。然而, 目前的研究较少考虑季节性, 自然环境下的火灾大多发生在植被的非生长季, 但是对于非生长季的火灾风险等级评估需要进行更进一步探究。在塔里木河下游, 由于其特殊环境造就的植被类型极易发生火灾, 然而针对该区域的火灾评估方法研

究相关文献和案例相对较少。

笔者选取的塔里木河下游地区, 自生态输水工程实施以来, 截至 2020 年, 累计输送生态水量达 $84.45 \times 10^8 \text{ m}^3$, 植被长势明显转好, 面积也得到扩大, 其中以芦苇为主的草本植物空间分布和生长状况变化突出^[12-13]。笔者利用 Sentinel-2A 数据, 计算非生长季的干枯燃料指数和燃烧指数, 分析其相关性, 利用火灾发生地的指数值进行地面验证, 结合指数直方图建立火灾风险等级标准, 并对塔里木河下游地区非生长季火灾风险等级进行分类, 最终获得研究区域的火灾风险等级图, 以期当地政府部门应对火灾提供科学决策依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于塔里木河下游, 在塔克拉玛干沙漠和库鲁克塔格沙漠之间^[14] (图 1), 范围为西起大西海子水库至台特玛湖的狭长绿色走廊 ($87^{\circ}35' \sim 88^{\circ}40' \text{ E}$, $39^{\circ}20' \sim 40^{\circ}45' \text{ N}$)。其中, 大西海子水库至阿拉干河段属于双河道, 植被覆盖度高; 阿拉干至台特玛湖河段属于单河道, 植被覆盖度低。研究区年降雨量处于 $17.4 \sim 42.0 \text{ mm}$, 潜在蒸发量高达 $2\ 500 \sim 3\ 000 \text{ mm}$, 是全国最干旱的区域之一^[15]。该地植被水分补给主要依靠河流上游来水, 植被大多生长在河漫滩及两岸的低阶区域, 形成由乔、灌、草组成的干旱区河岸林植被。乔木主要有胡杨 (*Populus euphratica*)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*); 灌木主要有多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*)、黑刺 (*Hippophae neurocarpa*)、铃铛刺 (*Halimodendron halodendron*); 草本植物主要有芦苇 (*Phragmites australis*)、骆驼刺

基金项目 国家自然科学基金委员会面上基金项目 (32071655, 31570536); 新疆维吾尔自治区塔里木河流域干流管理局项目 (TGJGL-JJG2021ZXFW0007)。

作者简介 金庆日 (1982—), 男, 新疆库尔勒人, 高级工程师, 从事河流生态系统监测与水资源管理研究。* 通信作者, 研究员, 从事遥感与地理信息系统应用研究。

收稿日期 2022-03-18

(*Alhagi sparsifolia*)、罗布麻 (*Apocynum venetum*)、花花柴 (*Karelinia caspia*)、胀果甘草 (*Glycyrrhiza inflata*) 等^[16]。

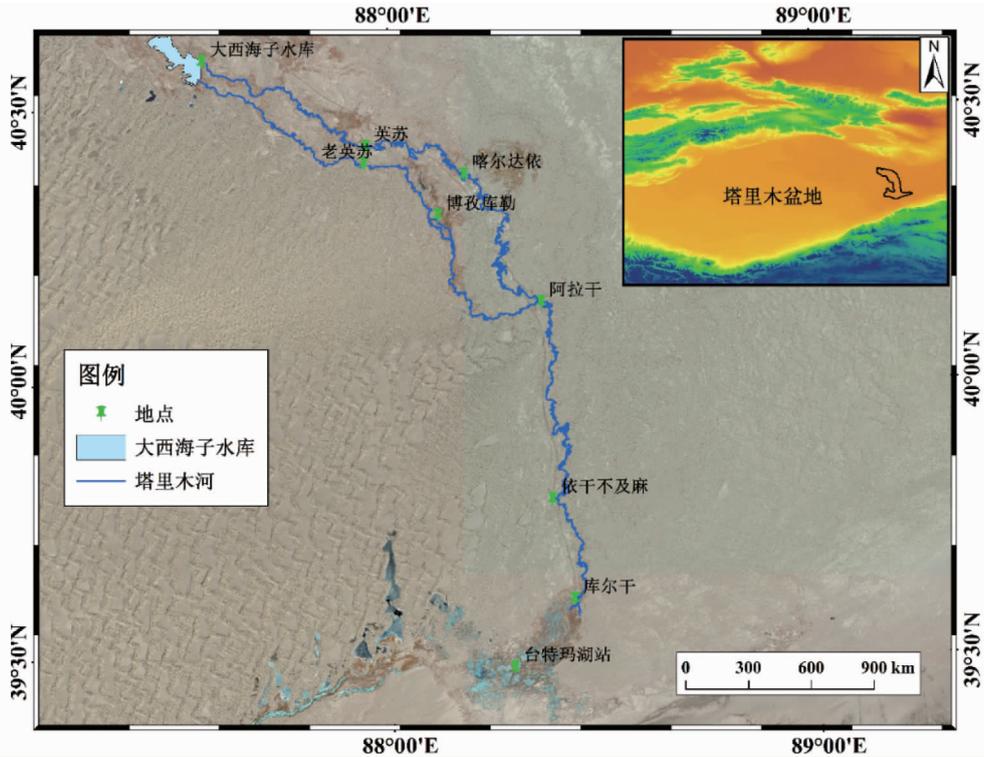


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of study areas

1.2 遥感数据获取及预处理 采用的 Sentinel-2A 数据来自欧洲“哥白尼计划”中 Sentinel-2 系列的光学遥感卫星 (<https://scihub.copernicus.eu/>), 该卫星携带的多光谱成像仪 (MSI) 具有 13 个光谱波段, 其中 3 个红边波段对于观测植被生长更具有优势^[17] (表 1)。笔者选取火灾发生时间 (2021 年 2 月 6 日) 前后影像质量较好的时段, 分别为 2021 年 2 月 4 日和 2 月 19 日, 轨道序号分别为 N0209_R119_T45SWD、N0209_R119_T45SXD 和 N0209_R119_T45TWE、N0209_R119_T45TXE。该数据已完成辐射定标与几何校正, 在 SNAP 软件中使用 Sen2Cor 插件进行大气校正, 然后利用 QGIS 软件将

数据重采样至 10 m, 镶嵌并裁剪出研究区的范围。最后, 利用改进归一化差异水体指数 (MNDWI)^[18] 结合阈值法将研究区内的水体进行掩模。

1.3 DFI 指数 Cao 等^[19] 根据干枯植被的光谱特征, 提出应用于多光谱数据的干枯燃料指数 (dead fuel index, DFI), 验证了 DFI 指数估算干枯植被的潜力; 并将 DFI 指数应用于亚洲草原地区火灾风险敏感性模型, 证实了该指数对于干枯植被的估算潜力。在非生长季, 大量绿色植被转变为干枯植被, 因此使用 DFI 指数可以很好地表征干枯植被, 这在塔里木河下游的研究区已经得到验证^[20]。该指数公式为

$$DFI = 100 \times \left(1 - \frac{SWIR2}{SWIR1} \right) \times \frac{RED}{NIR} \quad (1)$$

式中, RED、NIR、SWIR1 和 SWIR2 分别对应红色、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 的波段反射率, 对应 Sentinel-2A 数据的第 4、8、11 和 12 波段。为了扩大 DFI 值的差异性, DFI 扩大了 100 倍。此外, 需要去除水体及云对该指数的影响, 以免产生异常值影响分析结果^[21]。

1.4 燃烧指数 对于燃烧指数的研究, 与其他光谱指数 (如 NDVI) 相同, 选择对火灾比较敏感的波段, 通过波段间的组合运算反演得到图像上的指数。通过分析燃烧指数图像, 可以获取火灾区域、火灾燃烧程度等信息。该研究选取归一化燃烧指数 (normalized burn ratio, NBR) 和燃烧面积指数 (burn area index, BAI) 来对研究区的过火区域进行监测^[22-23], 公式为

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

表 1 Sentinel-2A 传感器波段信息

Table 1 Bands information of Sentinel-2A sensor

波段号 Band number	波段类型 Band type	波长范围 Wavelength range//nm	空间分辨率 Spatial resolution m	时间分辨率 Time resolution d
B1	海岸波段	433~453	60	10
B2	蓝波段	458~523	10	10
B3	绿波段	543~578	10	10
B4	红波段	650~680	10	10
B5	植被红边波段	698~713	20	10
B6	植被红边波段	733~748	20	10
B7	植被红边波段	773~793	20	10
B8	近红外波段	785~900	10	10
B8a	植被红边波段	855~875	20	10
B9	水蒸气波段	1 360~1 390	60	10
B10	短波红外波段	10 600~11 190	60	10
B11	短波红外波段	1 565~1 655	20	10
B12	短波红外波段	2 100~2 280	20	10

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - RED)^2 + (0.6 - NIR)^2} \quad (3)$$

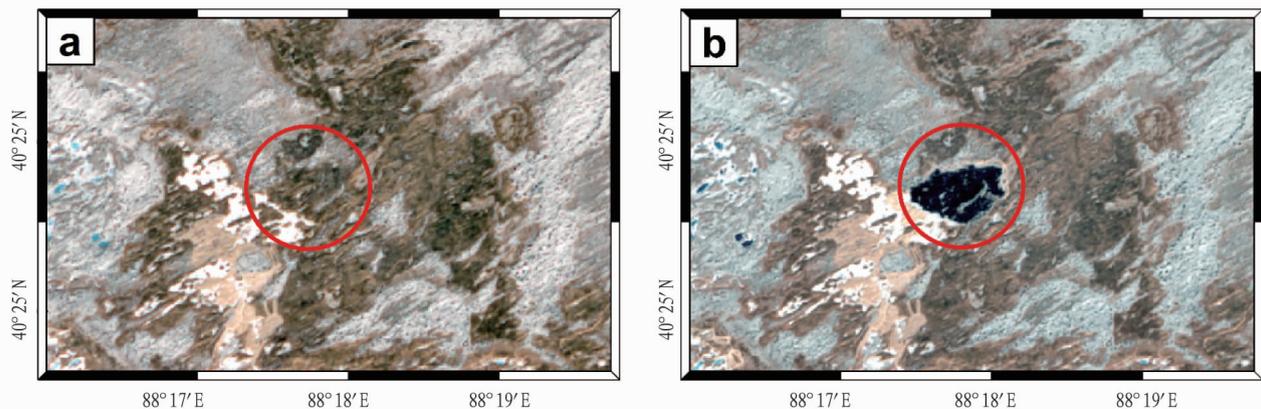
式中, RED、NIR 和 SWIR 分别为红色、近红外和短波红外的反射率, 对应 Sentinel-2A 数据的第 4、8 和 11 波段, 中心波长分别为 665、842 和 1 610 nm。BAI 对于过火区域有较好的区分能力, 对于过火和未过火区域, 其数值均大于 0; 未过火区域的取值较小, 过火区域的取值较大, 且焚烧程度越严重, 取值越大。相关研究表明, BAI 相对于 NDVI、SAVI 和 GEMI 等植被指数, 对于过火区域的探测更为敏感和准确^[24]。NBR 取值范围为[-1, 1], 过火区域一般为负值, 未过火区域一般

为正值。

2 结果与分析

2.1 过火区域影像

使用 2021 年 2 月 4 日和 19 日火灾发生前后的 Sentinel-2A 影像, 通过目视解译方式对起火位置进行选择(图 2)。为提取出过火范围, 利用 ENVI 5.3 软件中的“Band Math”进行波段计算, 得到 2 个时期的 NBR 和 BAI 图像。采用阈值分割的方法对着火区域和未着火区域进行划分, 进而将各指数分为 2 类。对于过火区域来说, NBR 图像的数值大于 0, 且 BAI 图像的数值较高, 根据 2 个指数对于过火区域具有较强的区分能力, 提取出过火区域。



注: a 为过火前, b 为过火后, 红色圆圈为火灾发生区域。

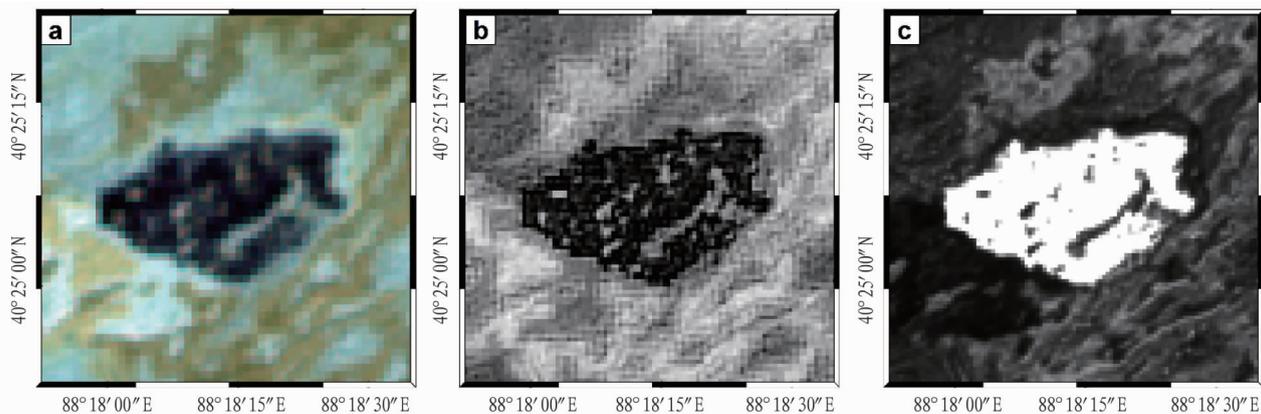
Note: a is before the fire, b is after the fire, and the red circle is the fire area.

图 2 火灾前后 Sentinel-2A 影像对比

Fig. 2 Sentinel-2A image before and after fire

为便于展示, 利用 Sentinel-2A 假彩色合成结合对比 NBR 和 BAI 指数来确定过火面积(图 3)。近红外波段对植被较为敏感, 过火区域经过火烧, 植被基本消失, 过火区域明显不同于未过火的区域, 因此用假彩色合成进行显示, 采用 Sentinel-2A 影像中的近红外波段、红波段和绿波段进行组合, 在合成图中深色区域为过火区域。对遥感影像进行波段运算, 如图 3b、3c 所示, 对于 BAI 来说, 过火区域的 BAI 数值

较大, 高于周围为发生火灾的区域, 具有明显的差异性。而从反演得到的 NBR 可以看出, 过火区域的 NBR 数值较小, 在图像中显示为较暗的区域。通过对比 NBR 和 BAI 指数, NBR 所显示的过火范围大于 BAI 显示的过火范围。利用阈值法分别对 NBR 和 BAI 指数图像进行过火与非过火区域划分, 取 2 个指数得到过火范围的交集, 从而得到此次火灾发生的范围, 统计得到过火面积为 156 031 m²。



注: a. 假彩色合成显示; b. NBR 指数显示; c. BAI 指数显示。

Note: a. Pseudo color composite display; b. NBR index display; c. BAI index display.

图 3 2021 年 2 月 19 日过火地区影像

Fig. 3 Image of fire area on February 19, 2021

2.2 DFI 与燃烧指数相关性分析

通过前面的分析, 已确定火灾发生范围, 在此基础上选取并统计过火范围内的 DFI

指数和燃烧指数(BAI 和 NBR)。考虑到火灾发生后,过火区域的干枯植被已被燃烧,故无法得到准确的 DFI 数值,因此通过火灾发生前(2月4日)影像反演得到 DFI 指数。在该假设火灾发生前后(2月4日和2月19日)研究区植被变化差异不大,故在像元尺度上构建过火区域的 DFI 和 BAI、NBR 关系。

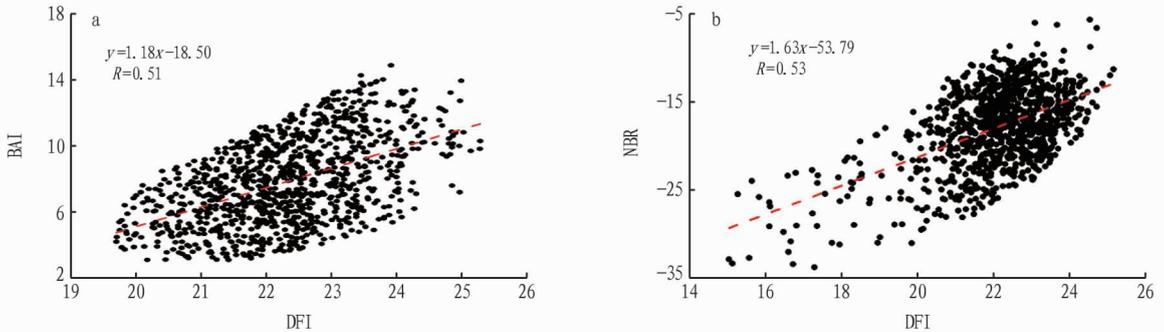


图4 DFI与BAI(a)、DFI与NBR(b)的关系

Fig. 4 Relationship between DFI and BAI(a), DFI and NBR(b)

2.3 火灾风险等级评估 为估算火灾发生的风险等级,该研究利用表征非光合植被的 DFI 指数,进行火灾风险等级划分,根据过火范围得到对应的 DFI 图像。利用 ENVI 中的统计工具,获得像元值的分布直方图,据此对过火区域的 DFI 进行密度分割,设置为 4 个区域:DFI < 7,为无风险;DFI 为 7~<13,为低风险;DFI 为 13~<18,为中风险;DFI ≥ 18,为高风险。由此得到塔里木河下游(大西海子水库至台特玛湖)火灾风险等级图(图 5)。

该研究发现,在非生长季时期,火灾风险较高的地区均为植被生长较为茂密的区域,这些区域干物质比例极高,发生火灾风险较大,火灾等级较高,其主要区域分布在大西海子水库至阿克东段,英苏附近,以及其文库勒湿地、博孜库勒、库尔干至台特玛湖等。

3 结论与展望

该研究以塔里木河下游为研究区域,基于 Sentinel-2A 影像数据,对火灾区域的位置进行了确定及面积统计,通过分析 DFI 与燃烧指数的相关性,对非生长季研究区火灾风险等级进行了评估,得到以下结论:

- (1) 基于 Sentinel-2 影像数据反演得到的燃烧指数(BAI 和 NBR)可以较为准确地识别过火区域的位置。
- (2) 选取 DFI 作为非生长季时期植被的表征指数,通过分析其与 2 种燃烧指数的相关性,与 BAI 的 R 为 0.51,与 NBR 的 R 为 0.53。说明 DFI 与 BAI 和 NBR 存在一定的相关性。

(3) 通过对研究区火灾风险等级分析发现,火灾风险等级较高的区域主要分布在大西海子水库至阿克东段、英苏附近、其文库勒湿地、博孜库勒及库尔干至台特玛湖。

该研究仍存在进一步改进的空间。首先,参考的火灾情况只有一次,过火面积相对较小,缺少分散性的样本,因此,对火灾范围内的像元作为信息单元进行统计分析,以提高样本量;在充分掌握历史火情信息的基础上,关注今后火灾发

统计过火区域每个像元的 DFI、BAI 和 NBR 指数,并对 DFI 和 BAI、DFI 和 NBR 进行相关性分析(图 4)。在 $P < 0.05$ 水平下,DFI 与 BAI 的 R 为 0.51,DFI 与 NBR 的 R 为 0.53,说明 DFI 与燃烧指数存在一定线性关系,DFI 值高的地方,BAI 和 NBR 数值也相对较高。因此,利用 DFI 预估火灾的风险等级具有一定的可行性。

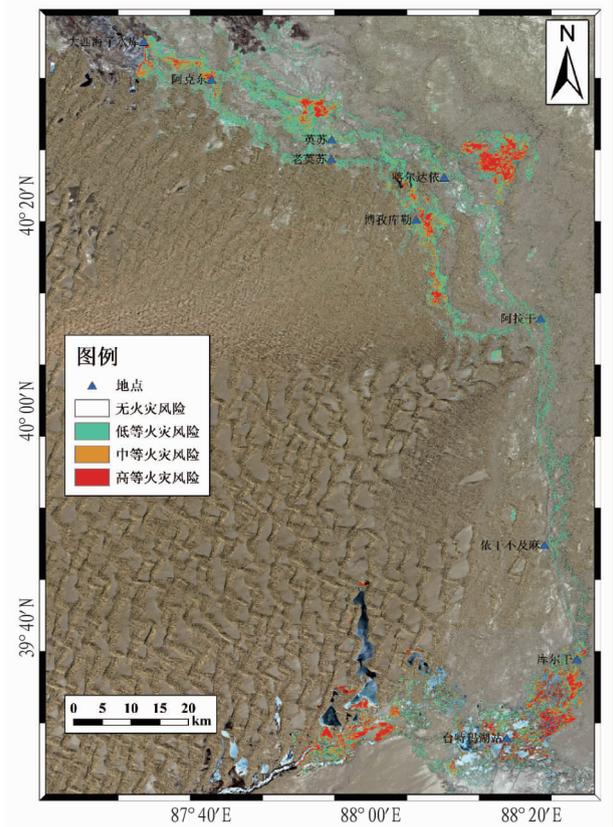


图5 火灾风险等级

Fig. 5 Fire risk level

生情况,及时掌握地面数据,以进一步探索提高该方法的精度和可靠性。其次,该研究仅采用遥感数据及光谱指数计算方法,未能采集到火灾发生地的适时地面光谱测量数据和燃烧物样本,且只采用了一个卫星遥感平台的单一遥感器的数据,因此仍难以满足及时掌握火灾情景和发展趋势的需求,今后需要进一步开展基于多平台(卫星+无人机+观测塔)-多传感器的高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率的

遥感数据相结合的高频率遥感数据进行实时-准实时监测与评估系统的研究。

参考文献

- [1] 崔亮. 内蒙古呼伦贝尔草原火灾风险预警研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [2] JOHNSTON L M, WANG X L, ERNI S, et al. Wildland fire risk research in Canada[J]. *Environmental reviews*, 2020, 28(2): 164–186.
- [3] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 澳大利亚草地火研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(1): 113–118.
- [4] 曹伦. 大火再度肆虐加州[J]. *生态经济*, 2009, 25(2): 15–17.
- [5] 张福. 科学指挥有效增雨, 成功堵截蒙古国境外火[J]. *科学技术创新*, 2019(18): 50–51.
- [6] 姜莉, 玉山, 乌兰图雅, 等. 草原火研究综述[J]. *草地学报*, 2018, 26(4): 791–803.
- [7] 陈洁, 郑伟, 高浩, 等. 多源卫星遥感农作物秸秆焚烧过火区面积估算方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 207–214.
- [8] 郑伟, 邵佳丽, 王萌, 等. 多源卫星遥感草原火灾动态监测分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(3): 54–61.
- [9] BIAN H F, ZHANG H Y, ZHOU D W, et al. Integrating models to evaluate and map grassland fire risk zones in Hulunbuir of Inner Mongolia, China[J]. *Fire safety journal*, 2013, 61: 207–216.
- [10] 杨晓颖, 玉山, 都瓦拉, 等. 蒙古高原草原火灾风险评估研究[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(4): 1032–1044.
- [11] 张继权, 刘兴朋, 佟志军. 草原火灾风险评估与分区: 以吉林省西部草原为例[J]. *地理研究*, 2007, 26(4): 755–762.
- [12] 陈亚宁, 吾买尔江·吾布力, 艾克热木·阿布拉, 等. 塔里木河下游近 20 a 输水的生态效益监测分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(3): 605–611.
- [13] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018 年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 985–992.

(上接第 100 页)

ZmCOL3 则可以通过激活 *ZmCCT10* 的表达来抑制开花时间^[8]。在早花玉米中, 在 *ZmCCT10* 启动子中检测到一个类似 CACTA 的转座因子, 该转座因子可明显缩短植株的开花时间^[9–10]。另外, 与 *ZmCCT10* 同源的 CCT 家族基因 *ZmCCT9* 同样受昼夜调控, 负调控成花素基因 *ZCN8* 的表达, 从而导致植株在长日照下推迟开花^[11–12]。2018 年有研究表明, 利用基因编辑技术敲除 *ZmCCT9* 后, 可导致玉米在长日照下提早开花, 同时能够增强植株对于高纬度地区的适应性^[11]。有研究表明, *ZmMADS69* 抑制开花抑制因子 *ZmRap2.7* 的表达, 从而促进 *ZCN8* 的表达并导致早期开花^[13]。*ZMM4* 基因可有效促进玉米成花转变, 并且过表达 *ZMM4* 可以促使转基因植株比野生型更早开花^[14]。

该研究结果表明, 在长日照条件下 *ZmCCT10* 作为开花抑制因子调节玉米开花, 利用基因编辑技术敲除 *ZmCCT10* 后, 可有效促使玉米在长日照下提早开花并出现矮化等优良性状, 为提高玉米抗倒伏、早熟等方面奠定了基础。

参考文献

- [1] MATSUOKA Y, VIGOUROUX Y, GOODMAN M M, et al. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2002, 99(9): 6080–6084.
- [2] COLES N D, MCMULLEN M D, BALINT-KURTI P J, et al. Genetic control of photoperiod sensitivity in maize revealed by joint multiple population analysis[J]. *Genetics*, 2010, 184(3): 799–812.
- [3] COLES N D, ZILA C T, HOLLAND J B. Allelic effect variation at key photoperiod response quantitative trait loci in maize[J]. *Crop science*, 2011, 51(3): 1036–1049.
- [4] HUNG H Y, SHANNON L M, TIAN F, et al. *ZmCCT* and the genetic basis

- [14] 刘桂林, 艾里西尔·库尔班, 玉米提·哈力克, 等. 基于变化轨迹探测的植被景观格局动态分析: 以塔里木河下游生态输水区域为例[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1472–1478.
- [15] 高庆, 艾里西尔·库尔班, 肖昊. 塔里木河下游区域植被时空变化[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 624–632.
- [16] 热依拉·木民, 塔依尔江·艾山, 玉米提·哈力克. 塔里木河下游胡杨空心特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1933–1940.
- [17] 李天驰, 杨福芹, 卢燕. 基于 Sentinel-2 影像的四川木里森林火灾监测[J]. *南方林业科学*, 2020, 48(6): 49–53.
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589–595.
- [19] CAO X, CHEN J, MATSUSHITA B, et al. Developing a MODIS-based index to discriminate dead fuel from photosynthetic vegetation and soil background in the Asian steppe area[J]. *International journal of remote sensing*, 2010, 31(6): 1589–1604.
- [20] GUO Z K, KURBAN A, ABLEKIM A, et al. Estimation of photosynthetic and non-photosynthetic vegetation coverage in the lower reaches of Tarim River based on sentinel-2A data[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(8): 1–17.
- [21] 王光镇, 王静璞, 邹学勇, 等. 基于像元三分模型的锡林郭勒草原光合植被和非光合植被覆盖度估算[J]. *生态学报*, 2017, 37(17): 5722–5731.
- [22] 马建行, 宋开山, 温志丹, 等. 基于 Landsat 8 影像的不同燃烧指数在农田秸秆焚烧区域识别中的应用[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3451–3456.
- [23] 张素梅, 杜惠琳, 刘良, 等. 基于 Landsat 时间序列遥感数据的华北平原农田火烧迹地检测与制图[J]. *地理科学*, 2020, 40(1): 149–157.
- [24] CHUVIECO E, MARTÍN M P, PALACIOS A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination[J]. *International journal of remote sensing*, 2002, 23(23): 5103–5110.

of day-length adaptation underlying the postdomestication spread of maize[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2012, 109(28): E1913–E1921.

- [5] DUCROCQ S, GIAUFFRET C, MADUR D, et al. Fine mapping and haplotype structure analysis of a major flowering time quantitative trait locus on maize chromosome 10[J]. *Genetics*, 2009, 183(4): 1555–1563.
- [6] ABOU-ELWAF A S F, BÜTTNER B, CHIA T, et al. Conservation and divergence of autonomous pathway genes in the flowering regulatory network of *Beta vulgaris* [J]. *Journal of experimental botany*, 2011, 62(10): 3359–3374.
- [7] BÜTTNER B, ABOU-ELWAF A S F, ZHANG W Y, et al. A survey of EMS-induced biennial *Beta vulgaris* mutants reveals a novel bolting locus which is unlinked to the bolting gene *B*[J]. *Theoretical & applied genetics*, 2010, 121(6): 1117–1131.
- [8] JIN M L, LIU X G, JIA W, et al. *ZmCOL3*, a CCT gene represses flowering in maize by interfering with the circadian clock and activating expression of *ZmCCT* [J]. *Journal of integrative plant biology*, 2018, 60(6): 465–480.
- [9] YANG Q, LI Z, LI W Q, et al. CACTA-like transposable element in *ZmCCT* attenuated photoperiod sensitivity and accelerated the postdomestication spread of maize[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2013, 110(42): 16969–16974.
- [10] SU H H, LIANG J C, ABOU-ELWAF A S F, et al. *ZmCCT* regulates photoperiod-dependent flowering and response to stresses in maize[J]. *BMC plant biology*, 2021, 21(1): 1–15.
- [11] HUANG C, SUN H Y, XU D Y, et al. *ZmCCT9* enhances maize adaptation to higher latitudes[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2018, 115(2): E334–E341.
- [12] MENG X, MUSZYNSKI M G, DANILEVSKAYA O N. The *FT*-like *ZCN8* gene functions as a floral activator and is involved in photoperiod sensitivity in maize[J]. *Plant cell*, 2011, 23(3): 942–960.
- [13] LIANG Y M, LIU Q, WANG X F, et al. *ZmMADS69* functions as a flowering activator through the *ZmRap2.7-ZCN8* regulatory module and contributes to maize flowering time adaptation [J]. *New phytologist*, 2019, 221(4): 2335–2347.
- [14] DANILEVSKAYA O N, MENG X, SELINGER D A, et al. Involvement of the MADS-box gene *ZMM4* in floral induction and inflorescence development in maize[J]. *Plant physiology*, 2008, 147(4): 2054–2069.