

哈尼梯田对厄尔尼诺极端干旱事件的响应及其机制分析

丁银平¹, 刘志林¹, 角媛梅¹, 胡涛²

(1.云南师范大学地理学部,昆明 650500;2.四川省阆中师范学校,四川 阆中 637400)

摘要:为探讨自然环境要素对典型干旱事件的响应与路径,以 2019 年厄尔尼诺极端干旱事件为背景,在气象站观测数据基础上识别出 1 个干旱年份(2019 年)和 1 个正常年份(2013 年),使用 landsat8 影像反演了哈尼梯田区 2 个年份的地表温度(TEM)、土壤水分(TVDI)、植被覆盖(NDVI)、地表水体(NDWI)等自然环境要素数据,进一步探讨了哈尼梯自然环境要素对极端干旱事件的响应状态、相互作用、影响路径等问题。结果表明:哈尼梯田区在极端干旱事件下气温增加了约 2℃,植被指数下降了约 0.04,土壤水分指数增加了约 0.07,水体面积下降了 40.2%;地表温度与植被覆盖、地表水体为显著负相关($p<0.05$),与土壤水分为显著正相关($p<0.05$);植被覆盖与土壤水分为显著负相关($p<0.05$),与地表水体为显著正相关($p<0.05$);土壤水分与地表水体为显著负相关($p<0.05$);地表温度、土壤水分、植被覆盖、地表水体均发生了显著变化($p<0.05$),且形成了正反馈路径,加剧了区域的干旱。研究结果可高效合理地预防和减缓干旱对社会和自然环境的影响具有重要科学和现实意义。

关键词:厄尔尼诺;干旱;Landsat8;TVDI;NDVI;地表温度

中图分类号:P343.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)05-0161-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.023

Response and Its Mechanism of Hani Terraces to El Nino Extreme Drought Events

DING Yinping¹, LIU Zhilin¹, JIAO Yuanmei¹, HU Tao²

(1.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500;

2.Sichuan Langzhong Normal School, Langzhong, Sichuan 637400)

Abstract: Discovering the response and path of natural environmental elements to extreme drought events has important scientific and practical significance for efficiently and reasonably preventing and mitigating the impact of drought on society and the natural environment. Based on the El Niño extreme drought event in 2019, this study identified a drought year (2019) and a normal year (2013) using the weather data from meteorological station. And the landsat8 images of these two years were used to invert the natural environment factors of Hani Rice Terraces region, including surface temperature (TEM), soil moisture (TVDI), vegetation coverage (NDVI), surface water body (NDWI). Furthermore, the response status, interaction of these natural environment factors and the path to the extreme drought event are revealed. The results showed that: (1) Under the extreme drought event, the Hani Rice Terraces region temperature increased by about 2℃, vegetation index decreased by about 0.04, soil moisture index increased by about 0.07, water area decreased almost 40.2%. (2) The surface temperature, soil moisture, vegetation coverage, surface water changed significantly, and a positive feedback path was formed, and it helped to accelerate the regional drought.

Keywords: El Niño; drought; Landsat 8; TVDI; NDVI; land surface temperature

全球气候变化已成为 21 世纪人类面临最复杂的挑战之一,对区域生态环境和人类社会可持续发展产生了重要影响^[1-2]。根据联合国资料^[3]显示,气候变

化使厄尔尼诺、ENSO 及其引发的全球洪涝、干旱等极端气候事件更加频繁。根据联合国资料^[3]显示,1991—2005 年全球累积暴发极端自然灾害 3 300 多

收稿日期:2021-03-18
资助项目:中国科学院 A 类战略先导专项(XDA19090121);国家重点研发计划项目(2018YFE0184300);国家自然科学基金项目(41761115, 41271203);云南师范大学研究生科研创新重点项目(ysdyjs2019166)
第一作者:丁银平(1985—),女,博士研究生,主要从事自然地理研究。E-mail:272629459@qq.com
通信作者:角媛梅(1972—),女,博士,教授,主要从事景观生态研究。E-mail:ymjiao@sina.com

次,造成 34 亿人受灾、产生 9 167 亿美元经济损失,其中旱灾每年造成经济损失约为 60~80 亿美元,远超其他自然灾害^[4]。中国是世界上自然灾害最严重的国家之一,尤其以旱灾最为突出^[5],全球气候变化研究中,脆弱生态区和山地的区域响应是研究的重点之一。厄尔尼诺现象是造成全球气候异常的重要因素之一,其对区域环境的影响是目前学术界研究的热点^[6]。农业是国民经济的基础,干旱是制约国民经济发展的主要因素^[7-8]。因此,农业对厄尔尼诺极端干旱事件的响应及其机制分析具有重要科学和现实意义。

目前农业干旱研究的数据源主要为气象数据和遥感数据^[9],其中气象数据具有时间分辨率较高,通常可以精确到天、时尺度,但需要布设大量气象观测站,导致其空间分辨率较低,且研究成本较大。遥感数据具有数据易获取、覆盖面广、空间分辨率高的特点,但其时间分辨率较低,重访周期普遍大于 15 天,且可获取的历史影像时间较短,适合一些缺乏气象观测数据的山区。当前农业干旱研究的主要内容集中在干旱监测方法和时空演变格局方面。干旱监测方法主要包括单个或多个遥感参数或监测模型^[10-12],其中遥感参数包括温度植被干旱指数(TVDI)、植被健康指数(VHI)等^[13],在此基础上一些研究对干旱监测的方法进行了对比与改进,如多指数的对比与应用^[14],表层土壤水反演方法改进等^[15],使现有的遥感参数在干旱监测和反演中精度不断提升,成为干旱监测研究的有力手段;在干旱时空演变格局上,目前的研究已经解决了干旱在各季节爆发的空间变化特征,如在抚河流域的研究^[16]得出,干旱春季在崇仁地区、夏季在南丰和黎川地区、秋季在抚州和金溪地区、冬季在东乡地区的空间演变格局。在时间变化特征上,在三峡库区的研究^[17]发现,干旱强度按冬、春、夏和秋季的顺序依次减小,在黄淮海的研究^[7]发现,春、冬 2 季最为干旱。时空格局的研究基本揭示清楚了干旱爆发的时间和空间特征,但未进一步讨论区域自然环境对干旱响应的时空格局;在干旱与全球气候变化上,已有研究^[16]发现,在抚河流域 ENSO 暖事件强度越大,越有可能发生严重的干旱事件,在毛乌素的研究^[6]得出,厄尔尼诺现象对区域气候具有增温减湿的作用,目前的研究已基本揭示了全球变化对区域气候具有重要的影响,明确了厄尔尼诺现象对极端干旱的影响。综上,遥感参数是未来干旱监测主要手段与方法,尤其是对缺乏高精度气象数据的区域。基本清晰的揭示了干旱爆发的时空特征,但较少涉及自然环境对干旱响应的时空特征。基本确认了厄尔尼诺与区域极端干旱事件的关

系,但对厄尔尼诺极端干旱事件下,区域自然环境的响应特征及相互作用机制的探讨还较薄弱。

厄尔尼诺极端干旱事件下,哈尼梯田的自然环境要素将会产生什么样的响应?各要素在干旱事件下的相互作用关系是什么?关键要素对干旱的影响路径?目前学界关注的还较少,仍不十分清晰。因此,本文结合典型极端干旱事件,探讨了自然环境要素的响应状态及其相互作用关系,在此基础上探讨了关键要素对干旱的影响路径,从而为科学认知干旱,科学减灾提供理论基础,同时也为保护世界文化景观遗产,实现遗产可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与干旱现状

1.1 研究区概况

哈尼梯田主体位于中国西南部的云南省红河州元阳县(图 1),地理坐标为 22°49′—23°19′N,120°27′—103°13′E,地处北回归线以南,属亚热带季风气候。年均气温为 25.6℃,最高气温 43.7℃,最低气温 5.3℃,年降水量 705.4 mm,年日照时间 2 000.5 h。2009 年被列入世界农业文化遗产和国家湿地公园名录,2013 年联合国教科文组织批准为世界文化遗产,遗产核心区和缓冲区面积达 461 km²。遗产区以梯田“分布之广,规模之大,建造之奇,在中国仅有,世界罕见”而闻名中外^[18]。2016 年元阳县境内分布梯田 478 km²,占国土面积 23%,最大海拔为 2 954 m,最低为 126 m,海拔落差 2 825 m。哈尼梯田海拔落差大,立体气候显著,温差大。哈尼梯田是延续了 1 300 多年的山区传统稻作集约农业典范,也是世界文化景观遗产、全球重要农业文化遗产、中国国家湿地公园所在地^[19]。由于其独特的“森林—村寨—梯田—水系”立体结构,使其具有良好的水源涵养、调节功能,2010 年云南“三连旱”时期,哈尼梯田仍保持良好生产功能,受到国内外学者的关注,因此哈尼梯田是进行干旱及其响应机制研究的最佳研究区域。但由于其地处山区,缺乏高精度的气象观测数据,复杂的立体气候,导致研究基础较为薄弱。

1.2 厄尔尼诺与近 10 年的干旱事件

2019 年来,云南省爆发了极端干旱事件,同期气温偏高 1.18℃,降水偏少 42%^[20]。根据国家气候中心监测,2018 年 9 月赤道中东太平洋海表温度偏暖范围逐渐扩大,进入厄尔尼诺状态^[21],至 2019 年 2 月底,已达到形成一次厄尔尼诺事件的标准。9 月爆发的厄尔尼诺事件使大气环流发生改变,冬春季从中高纬度南下影响云南的冷空气偏东偏弱,导致云南省境内气温较常年同期偏高。同时,大气环流发生改

变,导致印度洋和孟加拉湾,西太平洋和南海 2 个人 滇水汽通道发生异常,造成降水持续偏少^[20]。2019 年 5 月 15 日国家预警信息发布中心发布了哈尼梯田 干旱橙色(气象干旱 25~50 年一遇或 40%以上农作 物受旱)预警信号:哈尼梯田区各乡镇气象干旱已 达到重旱等级,且各地气象干旱将持续发展^[22]。同时, 云南气象局自 2019 年 4 月 18 日至 5 月 15 日来连续 发布哈尼梯田区高温橙色、红色预警 23 次。作为世 界文化遗产与农业遗产的哈尼梯田,其可持续性受到 了极大威胁。

根据元阳县气象观测站 2009—2019 年逐月降水 数据(图 2),2019 年降水仅为近 10 年平均降水量的 50.9%,是近 10 年的最低值,低于“云南 3 年连旱 (2009—2012)”^[23]。从月数据来看,2019 年 1—5 月降 水显著低于同期的其他年份,为 1—5 月平均降水量的 66.8%。因此,可以确定 2019 年哈尼梯田区的干 旱主要发生在 1—5 月。近 10 年月平均降水量为 61.43 mm,2013 年月均降水量为 64.46 mm,是最接 近年平均降水量的年份,2009—2019 年 1—5 月降水 总量的年平均值为 182.72 mm,2013 年 1—5 月为 233.7 mm,较高于均值但未达极大值。

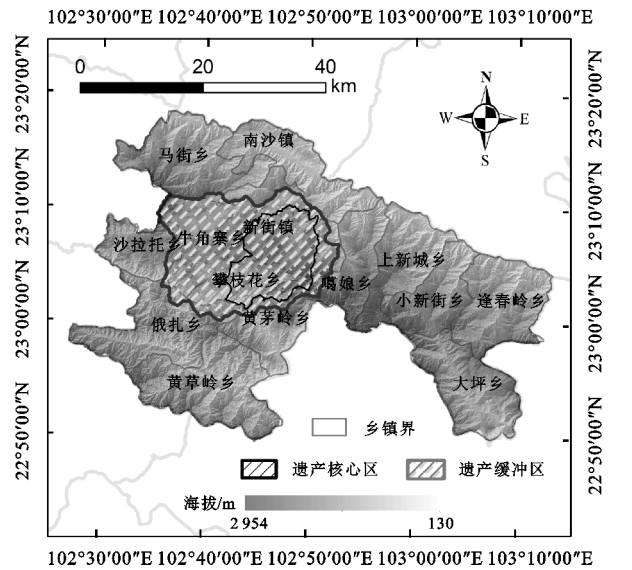
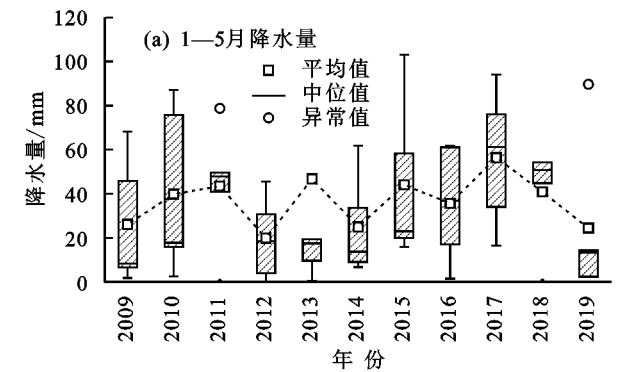


图1 研究区地理位置

总体来看,2013 年降水量最接近月均降水,且 1—5 月降水总量高于其他年份。另外未有相关文献 和新闻记载过 2013 年相关旱情,同时已有学者^[23] 2013 年在哈尼梯田进行土壤持水性研究,亦未发现 降水异常。总体来看,哈尼梯田 2013 年降水量最接 近月均降水,且 1—5 月降水总量高于其他年份,故选 择 2013 年 1—5 月为背景值。

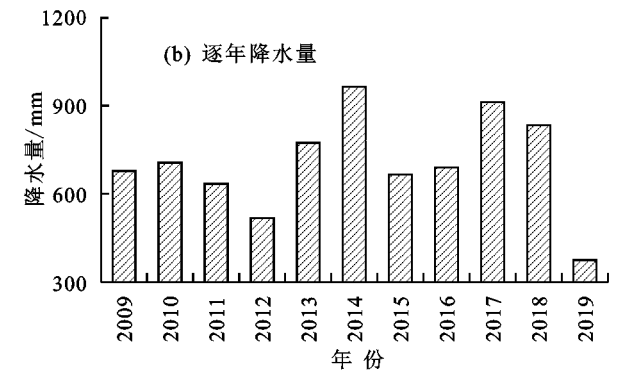


图2 元阳县 2009—2019 年降水量

2 数据处理与方法

2.1 数据来源与处理

通过美国地质勘探局官网 USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) 下载 2019 年 1—5 月和 2013 年 1—5 月 Landsat8 影像,共 14 景。进行辐射定标、 大气校正、镶嵌、拼接后形成研究初步数据。对于云 雾遮盖区域,使用 Haze Tool 工具进行去除填补。最 后将 2019 年 1—5 月影像通过计算像元均值合并为 一景,作为干旱源数据,将 2013 年 1—5 月影像合并 为一景作为背景源数据。

2.2 地表温度反演

地表温度反演采用目前较为成熟且常用的单窗 算法。计算公式为:

$$T_s = (a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D)) / C \quad (1)$$

式中: T_s 为地表真实温度(K); a 和 b 为常量,分别为 $-67.355\ 351$ 和 $0.458\ 606$; C 和 D 为中间变量, $C = \epsilon\tau$, $D = (1 - \tau)(1 + (1 - \epsilon)\tau)$,其中 ϵ 为地表比辐射 率, τ 为大气透射率; T_b 为像元亮度温度(K)

本文使用 ENVI5.3 扩展工具 Landsat8 TIRS 地 表温度反演工具进行,地表温度反演,结合当地天气 预报及自设气象站进行精度校正。

2.3 地表植被指数反演

TM/ETM 数据源的 NDVI 植被归一化指数计 算公式为:

$$NDVI = (Band4 - Band3) / (Band4 + Band3) \quad (2)$$

Modis 数据源的 NDVI 植被归一化指数计算公 式为:

$NDVI = (Band2 - Band1) / (Band2 + Band1)$ (3)

本文使用 TM/ETM30m 数据为主,使用 Modis250m 数据验证反演结果。

2.4 地表土壤湿度反演

温度植被干旱指数(TVDI)可以较好地消除土壤背景影响,有效检测土壤水分,反映旱情特征。

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s-min}}{a + bNDVI - T_{s-max}}$$
 (4)

$$T_{s-min} = a_1 + b_1 \times NDVI$$
 (5)

$$T_{s-max} = a_2 + b_2 \times NDVI$$
 (6)

$$TVDI = \frac{(T_s - (a_1 + b_1 \times NDVI))}{((a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI))}$$
 (7)

式中: T_{s-min} 为湿边; T_{s-max} 为干边; $NDVI$ 为植被归一化指数; a_1 、 b_1 、 a_2 和 b_2 分别为旱边和湿边拟合方程的系数。

2.5 地表水体面积反演

使用 Mcfeeters^[24] 提出的归一化差异水体指数

(简称归一化水指数)NDWI(normalized difference water index)来反演,其公式为:

$$NDWI = \frac{(B_{Green} - B_{NIR})}{(B_{Green} + B_{NIR})}$$
 (8)

式中: B_{Green} 为绿光波段; B_{NIR} 为近红外波段。

3 结果与分析

3.1 地表温度对极端干旱事件的响应

通过气温反演,得到哈尼梯田正常年份(背景值)与干旱事件下的气温分布。由图 3 可知,正常年份下哈尼梯田气温均值为 29℃,干旱事件下气温均值为 31℃,增加了约 2℃。说明在干旱事件下,哈尼梯田地表温度更高。从空间来看,哈尼梯田的高温主要集中在北部的红河河谷地区,由东向西依次递减,平均温度>30℃,为全县温度最高的区域,南部的哀牢山为气温最低的区域,平均气温<20℃。从气温的响应来看,北部的红河河谷与南部的哀牢山在干旱与正常年份的温差不大,说明气温变化不大,对干旱的响应不显著。

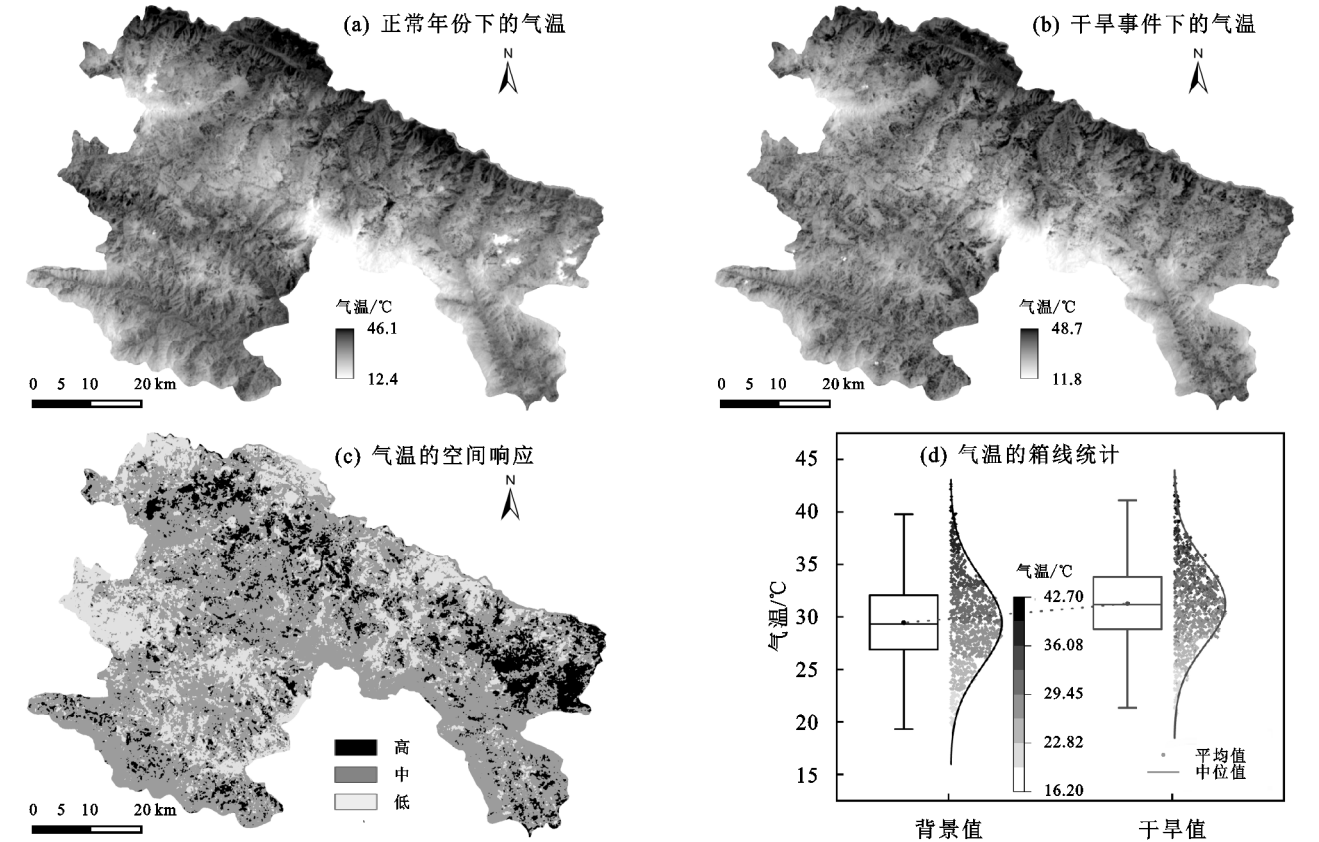


图 3 干旱与正常年份的地表温度及其空间响应

根据乡镇空间分布将全县划分为东、中、西 3 个空间区域,分别统计各区内各乡镇的正常与干旱事件下的地表温度及其变化值。由表 1 可知,哈尼梯田东部包括马街、牛角寨、沙拉托、俄扎与黄草岭 5 个乡镇,正常年份下平均温度为 29.64℃,最高温度出现在沙拉托,最低温度为牛角寨与俄扎,干旱事件下气

温均值为 30.96℃,较正常年上升 4.45%,其空间格局转化为最高温度出现在北部的马街,最低气温出现在俄扎。总体来看,最高温度在干旱背景下更趋向于北部,最低气温格局不变。从干旱背景与正常年份的气温差值来看,5 个乡镇中,马街、牛角寨、俄扎与黄茅岭为正响应,即在干旱背景下,区内气温增加,沙拉

托一地为负响应,在干旱背景下气温下降了 0.2 ℃,响应较弱。从响应程度来看,黄草岭>马街>俄扎=牛角寨>沙拉托,其中黄茅岭位于哈尼梯田的最南端,纬度最低,马街位于最北部,纬度最高;中部主要包括南沙、新街、攀枝花、黄茅岭、嘎娘和上新城 6 个乡镇,正常年份下其均温为 30.45 ℃,干旱事件下为 32.08 ℃,同比上升了 5.36%,在对于干旱事件的响应上,呈新街>南沙>攀枝花>嘎娘>上新城>黄茅岭,表明新街在干旱事件下气温变化的最为剧烈,上升幅度达到了 2.4 ℃;西部主要包括小新街、逢春岭和大坪 3 个乡镇,正常年份下其均温为 27.73 ℃,干旱事件下为 30.40 ℃,同比上升了 9.62%,在对于干旱事件的响应上,呈逢春岭>小新街>大坪,表明逢春岭在干旱事件下气温变化最为剧烈,达到了 3.40 ℃。综上,哈尼梯田东、中、西部在干旱事件下均为正响应,即地表温度呈上升趋势(同比上升 4%~10%),在空间分布上中部地表温度最高(30.45 ℃),西部最低(27.73 ℃),在对于干旱事件的响应上西部最为剧烈(9.62%),东部最为稳定(4.45%),表明温度最低的区域对于干旱事件的响应越剧烈,温度越高的区域对于干旱的弹性越强。

表 1 地表温度的空间特征

空间 区域	区域	背景值/ ℃	干旱值/ ℃	变化值/ ℃	响应
东	马街乡	30.0	31.8	1.8	+
	牛角寨镇	28.9	30.5	1.5	+
	沙拉托乡	31.1	30.9	-0.2	-
	俄扎乡	28.8	30.3	1.5	+
	黄草岭乡	29.4	31.3	1.9	+
中	南沙镇	35.2	36.9	1.7	+
	新街镇	28.8	31.2	2.4	+
	攀枝花乡	29.7	31.3	1.5	+
	黄茅岭乡	30.4	31.7	1.3	+
	嘎娘乡	28.4	29.8	1.4	+
西	上新城乡	30.2	31.6	1.4	+
	小新街乡	27.9	30.2	2.4	+
	逢春岭乡	28.2	31.6	3.4	+
	大坪乡	27.1	29.4	2.3	+

3.2 植被指数(NDVI)对极端干旱事件的响应

通过 NDVI 的计算,得到哈尼梯田正常年份(背景值)与干旱事件下的 NDVI 分布(图 4)。正常年份下哈尼梯田的 NDVI 值为 0.38,在干旱事件下为0.34,下降了约 0.04。说明在干旱事件下,哈尼梯田植被覆盖度更低,植被生长的健康状态更差。从空间来看,哈尼梯田的高覆盖植被主要集中在最南部的哀牢山区,平均 NDVI 值为 0.6,为全县最高的区域,由高值区向北,植被盖

度与健康程度依次下降,北部红河河谷为全境 NDVI 值最低的区域,平均 NDVI 值<0。从 NDVI 值的响应来看,南部的哀牢山在干旱与正常年份的 NDVI 值相差不大,说明其 NDVI 值较为稳定,对于干旱的响应不明显,高相应区主要出现在红河河谷区。

分别统计哈尼梯田区各乡镇的正常与干旱事件下的植被指数(NDVI 值)及其变化值(表 2)。哈尼梯田东部 5 个乡镇,正常年份下平均 NDVI 值为 0.39,最大值出现在俄扎和黄草岭,最低值为沙拉托,干旱背景下 NDVI 均值为0.34,较正常年下降 13.7%。从干旱背景与正常年份的 NDVI 值差值来看,5 个乡镇中,马街、牛角寨、俄扎与黄茅岭为负响应,即在干旱背景下,区内 NDVI 值下降,沙拉托一地为正响应,在干旱背景下 NDVI 值上升了 0.003,响应较弱。中部主要为南沙、新街等 6 乡镇,正常年份下其 NDVI 均值为0.34,干旱事件下为 0.32,同比下降了 5.83%,表明干旱事件下植被覆盖率与健康度有所下降,在对于干旱事件的响应程度南沙>上新城>攀枝花>黄茅岭>嘎娘>新街,其中南沙为正响应,即在干旱背景下其 NDVI 值出现上升,主要原因为南沙位于红河河谷,灌溉水源充足,植被正常需水得以保障,同时热量增加利于植被生长,其余区域均为负响应,即在干旱事件下其 NDVI 值出现下降,其中新街为下降最大的区域(-0.067),表明其植被在干旱事件下影响最大。西部主要为小新街、逢春岭和大坪等 3 个乡镇,正常年份下其 NDVI 均值为 0.41,干旱事件下为 0.35,同比下降了 13.11%,在对于干旱响应程度上呈大坪>小新街>逢春岭,其中大坪 NDVI 值下降幅度最大为0.10,表明大坪的植被对于干旱事件最为敏感。综上,哈尼梯田区内东、中、西部在干旱事件下,其 NDVI 值均呈下降趋势(下降 5%~14%),表明干旱事件下哈尼梯田区的植被均受到不同程度的负面影响,在 NDVI 值分布上,西部植被覆盖最高(NDVI 值 0.41),中部最低(NDVI 值 0.34),在响应程度上东部最强烈(13.7%),其次为西部(13.11%),中部最小(5.83%),表明植被覆盖度越高越健康的区域在干旱事件下变化越大,植被覆盖越低的区域对于干旱的弹性越强。

3.3 地表土壤湿度(TVDI)对极端干旱事件的响应

通过 TVDI 的计算,得到哈尼梯田正常年份(背景值)与干旱年份事件下的 TVDI 分布(图 5)。正常年份下,哈尼梯田 TVDI 值为 0.49,在干旱事件下, TVDI 值为 0.56,增加了约 0.07。说明在干旱年份下,哈尼梯田地表土壤更干旱。从空间来看,哈尼梯田的重度干旱主要集中在北部的红河河谷,由南向

北,干旱程度依次加剧,河谷区平均 TVDI 值为 0.80,为全县最高的区域,南部的哀牢山区为全境 TVDI 最低的区域,平均 TVDI 接近 0。从 TVDI 值的响应来

看,南部的哀牢山在干旱与正常年份的 TVDI 值相差不大,说明两地 TVDI 较为稳定,对干旱的响应不明显,高响应区主要集中在元阳县中到北部。

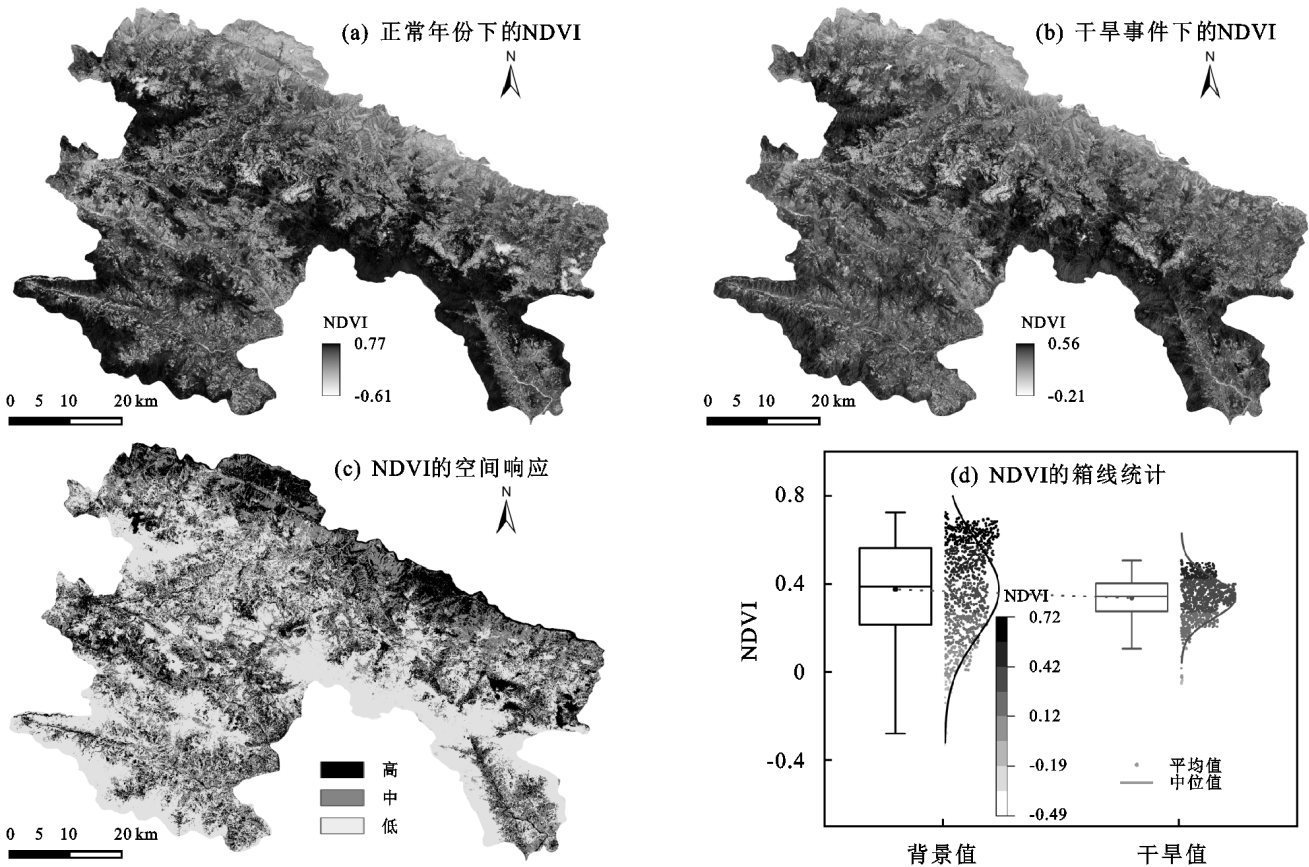


图 4 干旱与正常年份的 NDVI 值及其空间响应

表 2 NDVI 值的空间特征

空间区域	区域	背景值/ ℃	干旱值/ ℃	变化值/ ℃	响应
东	马街乡	0.34	0.31	-0.026	-
	牛角寨镇	0.41	0.35	-0.062	-
	沙拉托乡	0.32	0.33	0.003	+
	俄扎乡	0.46	0.36	-0.102	-
	黄草岭乡	0.44	0.35	-0.086	-
中	南沙镇	0.20	0.25	0.049	+
	新街镇	0.39	0.33	-0.067	-
	攀枝花乡	0.36	0.34	-0.025	-
	黄茅岭乡	0.37	0.33	-0.039	-
	嘎娘乡	0.41	0.36	-0.058	-
西	上新城乡	0.33	0.33	-0.008	-
	小新街乡	0.40	0.35	-0.050	-
	逢春岭乡	0.34	0.33	-0.016	-
	大坪乡	0.48	0.38	-0.101	-

在行政单元来看,分别统计各区内各乡镇的正常与干旱年份的地表土壤湿度及其变化值(表 3)。哈尼梯田东部 5 个乡镇,正常年份下平均 TVDI 值为

0.50,最大值出现在沙拉托和牛角寨和黄草岭,最低值为俄扎,干旱背景下 TVDI 均值为 0.57,较正常年上升 13.94%。从干旱事件与正常年份的 TVDI 差值来看,5 个乡镇均为正响应,即在干旱事件下,区内 TVDI 值上升,地表土壤更加干燥。从响应程度来看,东部俄扎>马街>黄草岭>牛角寨>沙拉托,表明俄扎地表土壤湿度对干旱的响应程度最高,即其土壤湿度变化最大。中部包括南沙、新街、上新城、嘎娘、攀枝花、黄茅岭等 6 个乡镇,正常年份下平均 TVDI 为 0.53,干旱事件下为 0.58,上升了 10.41%。中部 6 个乡镇在干旱事件下其 TVDI 值均为正响应,南沙>新街>上新城>嘎娘>攀枝花>黄茅岭,即南沙在干旱事件下其地表土壤湿度下降幅度最大,响应最强烈,黄茅岭地表土壤湿度变化最小,最为稳定。西部主要包括小新街、逢春岭和大坪 3 个乡镇,正常年份下其 TVDI 平均值为 0.43,干旱事件下为 0.49,同比上升了 13.95%。在响应程度上呈逢春岭>小新街>大坪,表明逢春岭在干旱事件下其 TVDI 值变化最大,地表土壤最干旱。综上,哈尼梯田东、中、西 3 部分,干旱事件下其 TVDI 值均上升了 10%~14%,表明干旱事

件下哈尼梯田区地表土壤湿度下降了 10%~14%，地表更加干旱，从 TVDI 值来看西部最湿润(TVDI 值 0.43)，中部最干燥(TVDI 值 0.53)，在响应程度上西部

响应最强烈(13.95%)，其次为东部(13.94%)，中部最稳定，表明在干旱事件下，越湿润的地区响应越强烈，越干旱的地区其应对干旱的弹性越强。

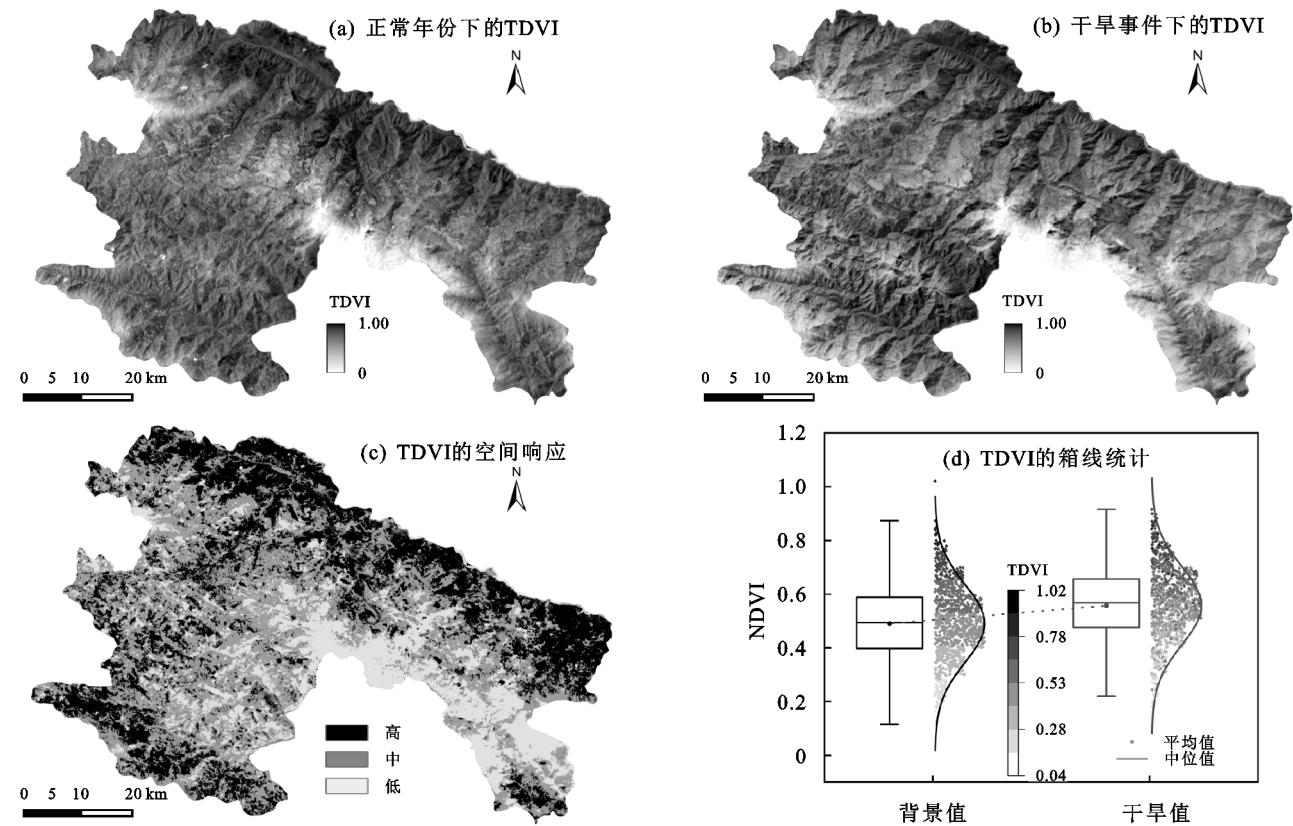


图 5 干旱与正常年份的地表土壤水分及其空间响应

表 3 地表土壤水分的空间特征

空间区域	区域	背景值/ ℃	干旱值/ ℃	变化值/ ℃	响应
东	马街乡	0.49	0.57	0.080	+
	牛角寨镇	0.50	0.57	0.066	+
	沙拉托乡	0.54	0.59	0.053	+
	俄扎乡	0.48	0.56	0.081	+
	黄草岭乡	0.50	0.57	0.070	+
	南沙镇	0.62	0.72	0.097	+
中	新街镇	0.49	0.56	0.066	+
	攀枝花乡	0.56	0.59	0.024	+
	黄茅岭乡	0.56	0.58	0.016	+
	嘎娘乡	0.44	0.49	0.043	+
	上新城乡	0.50	0.56	0.055	+
	小南街乡	0.45	0.51	0.062	+
西	逢春岭乡	0.44	0.55	0.110	+
	大坪乡	0.40	0.41	0.011	+

3.4 地表水体面积对极端干旱事件的响应

通过水体的计算，得到哈尼梯田正常年份(背景值)与干旱年份下的水体分布(图 6)。正常年份下，哈尼梯田水体面积为 33.65 km²，干旱年份水域面积为 20.12 km²，下降了 13.53 km²。正常年份下，水域主要分布在红河河谷与元阳县中部的水田，在干旱事

件下西部的马街、南沙境内的红河流域水体面积显著下降，分别减少了 52.16%和 29.87%。在中部主要表现为水田面积的快速下降，总体约 57.80%的水田消失，其中牛角寨、新街和小南街境内，分别下降了 69.24%，51.86%和 52.29%。相对而言，干旱事件下，全域大面积河流、湖泊、水田等地表水体出现了明显的变化(消失)，但部分区域也出现水域增加现象，主要原因为 2010 年后当地政府为调节水资源、抗旱防灾大规模修建水库蓄水所致。

由表 4 可知，在乡镇尺度上，14 个行政单元中 13 个在干旱事件下地表水体面积发生了下降。东部 5 个乡镇正常年份下其地表水体面积平均值为 1.15 km²，干旱事件下为 0.46 km²，减少了 60.1%。中部 6 个乡镇正常年份下的水体面积均值为 2.29 km²，干旱事件下为 1.56 km²，水体面积下降了 31.8%。西部 3 个乡镇正常年份下的水体面积均值为 2.90 km²，干旱事件下为 1.45 km²，同比水体面积下降了 50.0%。从空间来看哈尼梯田西部水体面积最大，其次位中部，东部水体面积最小。对于干旱的响应程度上，东部响应最为强烈，水体面积减少 60.10%，其次位西部 50.0%，中部最稳定 31.8%。

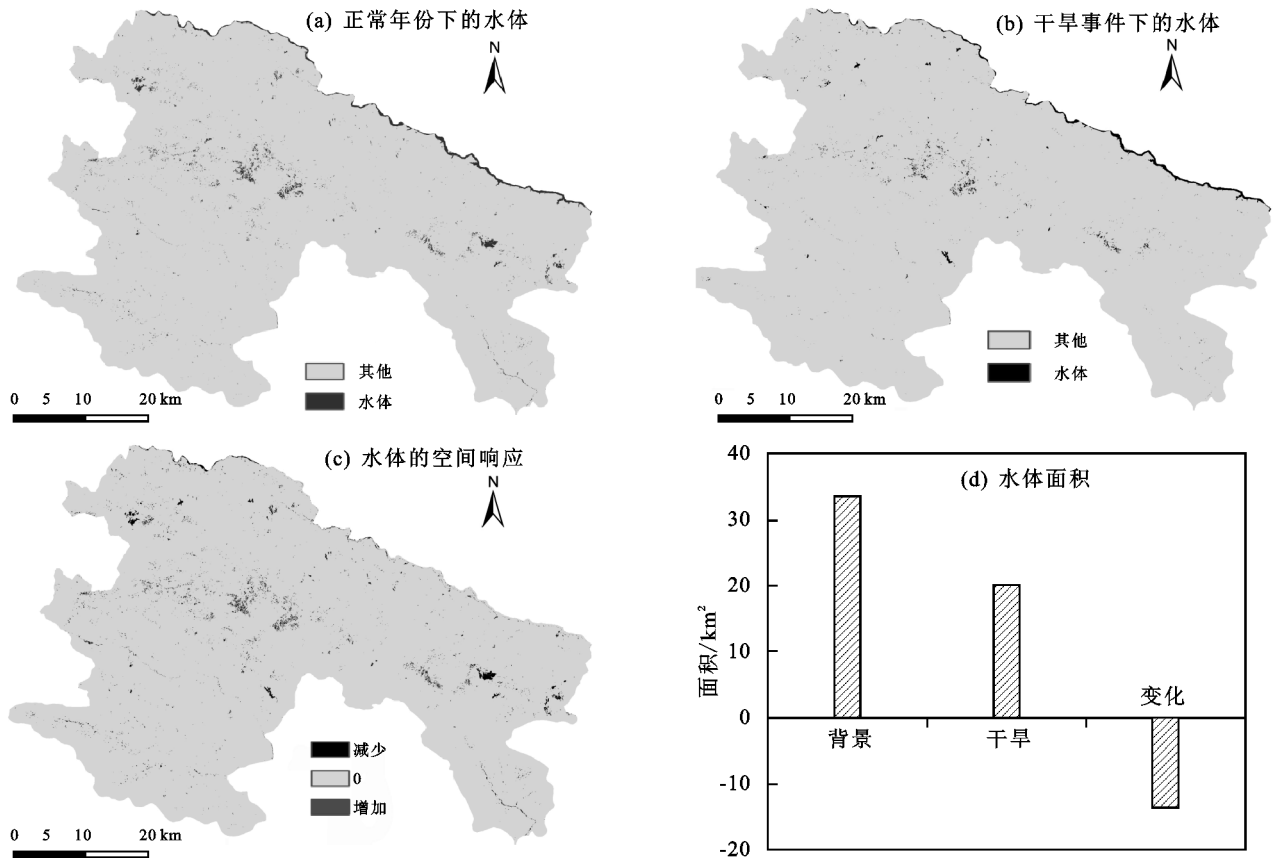


图 6 干旱与正常年份的地表水体面积及其空间响应

4 讨论

4.1 哈尼梯田对极端干旱事件响应的统计显著性

地表温度(TEM)、植被指数(NDVI)、地表土壤湿度(TVDI)和地表水体面积(NDWI)在干旱事件下均发生了一定变化。在统计学上,上述变化是否达到了显著变化? 对 4 组数据进行独立样本 T 检验,结果见表 5。地表温度(TEM)的 F 值为 1.05, $p=0.31>0.05$,故接受原假设方差相等, $t=-4.36$, $df=82$, $p=0<0.005$,说明地表温度在干旱事件中发生了显著变化,其均差值为 -1.73 ,表明干旱事件下地表温度平均升高了 $1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$;植被指数(NDVI)的 F 值为 17.68, $p=0<0.05$,故不接受原假设,方差不相等, $t=3.68$, $df=55.79$, $p=0.001<0.005$,说明地植被指数在干旱事件中发生了显著变化,其均差值为 0.04,表明干旱事件下植被指数下降了 0.04,即植被叶面积和健康状态显著下降;地表土壤湿度(TVDI)的 F 值为 0.05, $p=0.82>0.05$,故接受原假设方差相等, $t=-4.46$, $df=82$, $p=0<0.005$,说明地表土壤湿度在干旱事件中发生了显著变化,其均差值为 -0.06 ,表明干旱事件下地表土壤湿度指数上升了 0.06,即地表土壤水分下降,干旱程度增加;地表水体面积(NDWI)的 F 值为 32.68, $p=0<0.05$,故不接受原假设,方差不相等, $t=2.67$, $df=67.54$, $p=0.009<0.005$,说明地表水体面积

在干旱事件中发生了显著变化,其均差值为 0.87,表明干旱事件下地表水体面积下降了 0.87 km^2 ,即地表水体面积发生显著变化。

本研究结果显示,厄尔尼诺极端干旱事件下,地表温度显著增高,土壤湿度和水体面积显著下降,这与徐小玲等^[6]研究得出的厄尔尼诺事件加强了毛乌素沙区的暖干化程度结果一致。同时本研究还发现,极端干旱事件下,植被指数也呈显著下降的趋势,这与方健梅等^[25]得出的 NDVI 与年降水呈正相关性的结论一致,即干旱事件下降水减少,植被指数随之下降。

4.2 哈尼梯田对极端干旱事件响应的区域差异

总体上,哈尼梯田关键自然环境要素对厄尔尼诺极端干旱事件具有较高的响应与在毛乌素的研究^[6]结果一致。本研究发现,厄尔尼诺极端干旱事件下哈尼梯田气温呈上升趋势,土壤水分、植被指数、水体面积呈显著下降趋势,这与在青海湖、毛乌素的研究^[6,25]结果相似。本研究发现,在极端干旱事件下哈尼梯田地表温度越低的区域对极端干旱响应越剧烈,植被覆盖越低的区域对于干旱响应越弱,土壤越湿润的地区对于干旱响应越强烈的空间特征。哈尼梯田具有显著的立体性气候,北部为红河河谷,盛行干热河谷气候,全年高温干燥,植被稀疏,多为灌木。南部为哀

牢山山区,为典型的亚热带山地气候,分布大面积的常绿阔叶林^[18]。在极端干旱事件下,河谷区植被覆盖度低,且多为耐热耐旱植被,因此受影响较小,而南部阔叶林耐旱耐热性较弱,受影响较大,导致了植被覆盖低的北部区域对干旱响应较弱,南部高值区响应强的空间特征;厄尔尼诺事件通常伴随气温升高,即短波辐射增加,在干热河谷区气温较高,植被较少,叶面积的反射率变化不大。而在阔叶林区,为山地气候,海拔高,植被茂盛,叶面积反射率高,导致区内温度低。但在干旱事件影响下,降水减少,植被供水不足,叶面积缩小,对短波辐射的反射率下降,地表吸收热量增加,地表温度快速增加,因此造成了地表温度越低对极端干旱响应越剧烈的现象;土壤水分与植被的分布趋势一致,北部河谷区较为干燥,南部山区较为湿润,在干旱事件下,南部地表温度变化幅度大,蒸发加剧,导致原本湿润的土壤水分下降,而北部土壤较为干燥因此变化幅度较小,造成了土壤越湿润的地区对干旱响应越强烈的空间特征。

4.3 哈尼梯田对极端干旱事件的响应机制

厄尔尼诺极端干旱事件下,主要表现为大气降水减少^[6],进而导致以雨水补给为主的地表水发生显著变化^[23]。本研究发现,哈尼梯田的地表水体和土壤水分在干旱事件下显著下降,印证了降水与土壤水分、地表水体的紧密联系。植被主要通过根系获取土壤中水分,因而其直接利用水源为地表水,即为地表水体和土壤水分,在哈尼梯田研究发现,植被指数与地表水体具有 0.11 显著正相关关系,与土壤水分(TVDI 指数越高土壤越干燥)具有一0.73 显著

负相关关系,证明了植被与地表水体和土壤水分具有显著相关关系。已有研究^[6]表明,厄尔尼诺会导致区域气温上升,一般认为,温度升高将加剧地表水蒸发,使地表水进一步减少,植被直接利用水量下降,叶面积缩小,短波辐射反射率下降,导致地表温度增加。在厄尔尼诺极端干旱事件下,哈尼梯田地表温度增加了 1.8 ℃,印证了本次干旱具有厄尔尼诺的主要特征,同时发现地表温度与地表水体具有一0.13 显著负相关关系,与土壤水分具有0.90的显著正相关关系,植被指数与温度具有一0.86 显著负相关关系,很好地证明了在极端干旱事件下哈尼梯田存在温度、地表水和植被之间的反馈关系(表 6)。

表 4 地表水体面积的空间特征

空间 区域	区域	背景值/ ℃	干旱值/ ℃	变化值/ ℃	响应
东	马街乡	3.03	1.45	−1.58	−
	牛角寨镇	1.12	0.34	−0.77	−
	沙拉托乡	0.64	0.21	−0.42	−
	俄扎乡	0.54	0.20	−0.35	−
	黄草岭乡	0.41	0.09	−0.32	−
中	南沙镇	3.66	2.57	−1.09	−
	新街镇	5.58	2.69	−2.90	−
	攀枝花乡	0.37	0.05	−0.31	−
	黄茅岭乡	0.21	0.69	0.48	+
	嘎娘乡	0.61	0.45	−0.16	−
西	上新城乡	3.28	2.90	−0.38	−
	小新街乡	3.85	1.84	−2.01	−
	逢春岭乡	4.30	2.43	−1.87	−
	大坪乡	0.55	0.08	−0.47	−

表 5 各环境因子的独立样本 T 检验

环境 变量	方差方程的 Levene 检验			均值方程的 T 检验				
	假设	F	Sig	t	df	Sig(2-tailed)	均值差值 MD	标准误差 SE
气温 TEM	假设方差相等	1.05	0.31	−4.36	82.00	0	−1.73	0.40
	假设方差不相等	\	\	−4.36	81.29	0	−1.73	0.40
植被 NDVI	假设方差相等	17.68	0	3.68	82.00	0	0.04	0.01
	假设方差不相等	\	\	3.68	55.79	0.001	0.04	0.01
土壤 TVDI	假设方差相等	0.05	0.82	−4.46	82.00	0	−0.06	0.01
	假设方差不相等	\	\	−4.46	80.69	0	−0.06	0.01
水体 NDWI	假设方差相等	32.68	0	2.67	82.00	0.009	0.87	0.32
	假设方差不相等	\	\	2.67	67.54	0.009	0.87	0.32

注:F 和 t 为统计量;Sig 为显著性;df 为自由度。

通过梳理各环境因子之间的相关关系及数值变化,绘制了红河哈尼梯田关键自然环境要素对干旱事件的响应路径(图 7)。在干旱事件下,哈尼梯田自然环境形成了正反馈路径,具体路径:哈尼梯田降水量较正常年份减少 60.72 mm(30%),由此导致地表水

体面积萎缩,较正常年份约下降 30%,同时使土壤更加干燥,其 TVDI 指数增加 0.1;地表水体和土壤干燥,导致植被的供水下降,使植被的覆盖度与单株的健康程度下降,导致 NDVI 指数下降 0.014;植被覆盖度下降,反射率下降,地表吸收更多的热量,导致地

表温度上升 1.8℃;地表温度上升,导致蒸发加剧,使地表水体与土壤更加干旱。

在未有外来降水前提下,正反馈路径进一步加剧区域的干旱程度。因此防旱减灾的有效途径是尽可能改变各环境间的正反馈机制,改变地表温度(TEM)、植被指数(NDVI)、地表土壤湿度(TVDI)和地表水体面积(NDWI)其中的某一个因子形成负反馈路径,将有利于缓解区域旱情。

表 6 各环境之间的相关关系

环境变量	TEM	NDVI	TVDI	MDWI
TEM	1.00	-0.86	0.90	-0.13
NDVI	-0.86	1.00	-0.73	0.11
TVDI	0.90	-0.73	1.00	-0.18
MDWI	-0.13	0.11	-0.18	1.00

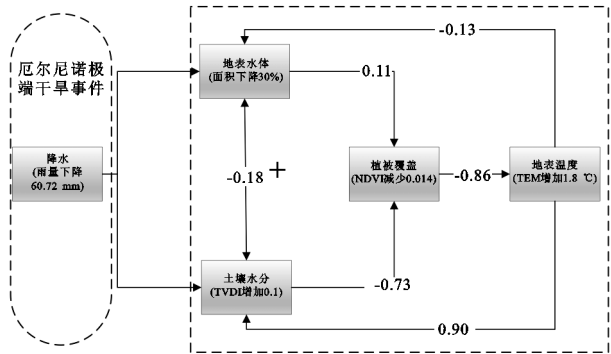


图 7 哈尼梯田区对极端干旱事件的响应机制

厄尔尼诺对全球气候产生了重要的影响,虽科学界目前已较为清晰地揭示了其形成机理及对自然环境的作用机制。但由于其是一个包含大气环流、海洋环流、水汽交互的复杂巨系统,目前仍不能较好地预测其爆发周期,干预其形成过程。厄尔尼诺对人类社会的影响主要为极端干旱^[16],不能准确预测便不能提前预防,不能干预便不能阻止极端干旱形成。因此,如何应对与减缓厄尔尼诺极端干旱显得尤为重要,然而学界对此方面的研究还较少,尤其是理论上的讨论。本研究以厄尔尼诺极端干旱事件为背景,揭示了哈尼梯田关键自然环境要素对其响应特征,在此基础上探讨了各环境要素之间的反馈机制,从理论上探讨了可以通过破坏自然环境要素之间的正反馈循环来减缓和应对厄尔尼诺极端干旱。

5 结论

(1)自然环境要素对极端干旱事件均有显著的响应。首先,地表温度(TEM)较正常年份上升了 5.89%,其剧烈程度在空间上表现为西高(9.62%)东低(4.45%),且具有原本温度越低响应越剧烈的特征;其次,植被指数(NDVI)较正常年份的下降了 10.48%,在空间上东、中、西部均呈下降趋势(5%~14%),且东部(13.7%)>

西部(13.11%)>中部(5.83%),表明植被覆盖度越高变化越大;再次,地表土壤湿度(TVDI)较正常年份增加了 12.34%,在空间上东、中、西部均上升了 10%~14%,且西部(13.95%)>东部(13.94%),中部最稳定,表明越湿润的地区对干旱的响应越强烈;最后,地表水体面积(NDWI),极端干旱年份(20.12 km²)较正常年份(33.65 km²)下降了 13.53 km²。

(2)自然环境要素间均具有显著的相关性:TEM 与 NDVI、NDWI 呈显著负相关,与 TVDI 呈显著正相关;NDVI 与 TVDI 呈显著负相关,与 NDWI 呈显著正相关;TVDI 与 NDWI 为显著负相关。

(3)干旱事件对自然环境因子(TEM、NDVI、TVDI、NDWI)形成了正反馈路径,将会加剧该区域干旱,通过外界干扰作用此路径是减缓干旱的有效手段。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] Forootan E, Khaki M, Schumacher M, et al. Understanding the global hydrological droughts of 2003—2016 and their relationships with teleconnections[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650(2): 2587-2604.

[4] 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.

[5] 赵海莉,张婧.基于 Citespace 和 Vosviewer 的中国水旱灾害研究进展与热点分析[J].生态学报,2020,40(12):4219-4228.

[6] 徐小玲,延军平.近 30 年毛乌素沙区的气候与厄尔尼诺/拉尼娜事件的相关分析[J].干旱区研究,2003,20(2):117-122.

[7] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,2014,34(2):460-470.

[8] Leng G Y, Hall J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future[J]. Science of The Total Environment, 2019, 654: 811-821.

[9] 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.

[10] Li F P, Li H Y, Lu W X, et al. Meteorological drought monitoring in northeastern China using multiple indices[J]. Water, 2019, 11(1): e72.

[11] 罗彪,刘潇,郭萍.基于 MODIS 数据的河套灌区遥感干旱监测[J].中国农业大学学报,2020,25(10):44-54.

[12] 温庆志,孙鹏,张强,等.基于多源遥感数据的农业干旱

监测模型构建及应用[J].生态学报,2019,39(20):7757-7770.

[13] 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.

[14] 王文,黄瑾,崔巍.云贵高原区干旱遥感监测中各干旱指数的应用对比[J].农业工程学报,2018,34(19):131-139.

[15] 赵凯,黄资或.基于改进热惯量模型的表层土壤水反演研究[J].测绘与空间地理信息,2017,40(5):41-43.

[16] 朱圣男,刘卫林,万一帆,等.抚河流域干旱时空分布特征及其与 ENSO 的相关性[J].水土保持研究,2020,27(6):131-138.

[17] 郑金涛,彭涛,董晓华,等.三峡库区气象干旱演变特征及致灾因子危险性评价[J].水土保持研究,2020,27(5):213-220.

[18] 刘志林,丁银平,角媛梅,等.红河哈尼梯田潜在弃耕风险耕地识别及其主要影响因素[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(1):124-135.

[19] 刘志林,李石华,角媛梅,等.基于曲面耕作半径与 MaxENT 模型的哈尼梯田区聚落格局优化[J].农业工程学报,2019,35(20):242-252.

[20] 掌上春城.省气象局:全球变暖+厄尔尼诺导致云南干旱[EB/OL]. [2020-12-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1634690108989669483&wfr=spider&for=pc>.

[21] 中国气象局国家气候中心.气候系统检测·诊断·预测·评估:极端事件[EB/OL]. [2020-12-10]. http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_china_extreme.php.

[22] 国家预警信息发布中心.云南省红河哈尼彝族自治州元阳县气象台发布干旱橙色预警[EB/OL]. [2020-12-10]. <http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qyjxx/>.

[23] 宗路平,角媛梅,华红莲,等.哈尼梯田景观水源林区土壤水分垂直变化与持水性能[J].水土保持通报,2014,34(4):59-64.

[24] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J].International Journal of Remote Sensing, 1996,17(7):1425-1432.

[25] 方健梅,马国青,余新晓,等.青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):105-112.

《水土保持学报》著作权使用声明

尊敬的《水土保持学报》各位作者：

您的来稿正式发表后,文章著作权归作者所有,其编辑版权归本刊编辑部所有。本刊已许可中国知网、万方、超星、维普、博看网、北京中邮阅读网等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。

另外,本刊针对我国目前期刊界严惩学术不端行为,为防止论文发表后出现学术不端行为,诸如:数据资料造假,内容抄袭或变相抄袭,剽窃他人或合作者研究成果,重复发表;用而不引,虚假引用,转引文献,不完整引用;虚假署名,未按作者贡献署名,等等。敬请各位作者投稿前进行自查并彻底规避,并郑重承诺:呈交给《水土保持学报》的论文,是本人与论文其他作者共同开展的研究工作和共同取得的研究成果。