

# 基于 TVDI 和 Landsat-8 的喀斯特峡谷区干旱监测

余军林, 罗 娅, 赵志龙, 杨月燕, 罗旭琴

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵安新区 550025)

**摘 要:** [目的] 探索适用于喀斯特地表干旱遥感监测的技术方法, 为石漠化治理监测以及抗旱减灾工作提供技术参考。[方法] 运用大气校正法反演地表温度 ( $T_s$ ) 和归一化植被指数 (NDVI), 构建花江峡谷区 2013 年、2014 年和 2015 年旱季的温度—植被干旱指数 (TVDI), 并结合地面实测数据对 TVDI 作为旱情指标进行了验证。[结果] ① 反演的 TVDI 与同时期实测的 0—10 cm 土壤体积含水量数据呈显著的负相关关系 ( $p < 0.05$ )。② 3 个时期的干旱等级以轻旱为主; 轻旱、干旱和重旱累计面积占全区比重大, 呈现 2014 年旱情重于 2015 年和 2013 年的特点。③ 3 个时期的旱情在空间分布上, 湿润和正常等级在地形上主要分布在海拔 900~1 100 m 地带,  $15^\circ \sim 35^\circ$  的斜坡和缓陡坡, 以及阴坡和半阳坡; 在石漠化等级上, 主要分布在无石漠化区、轻度石漠化区和潜在石漠化区; 在土地利用类型中主要分布在有林地、旱地、灌木林地和其他林地。轻旱、干旱和重旱在地形上主要分布在海拔 500~900 m,  $6^\circ \sim 25^\circ$  的缓坡和斜坡, 以及阳坡和半阳坡; 在石漠化等级上, 轻旱和干旱主要分布在轻度石漠化区、潜在石漠化区、中度石漠化区和强度石漠化区, 重旱主要分布在非喀斯特区; 在土地利用类型上, 轻旱、干旱和重旱主要分布在旱地、园地和其他林地。[结论] TVDI 可作为研究区的干旱监测指标, 基于 TVDI 和 Landsat-8 数据的干旱监测方法在喀斯特峡谷区具有一定适用性。

**关键词:** 喀斯特峡谷区; 温度—植被干旱指数 (TVDI); 干旱监测; 分布特征

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2019)01-0104-10

**中图分类号:** TP79, P423.3, S342.1

**文献参数:** 余军林, 罗娅, 赵志龙, 等. 基于 TVDI 和 Landsat-8 的喀斯特峡谷区干旱监测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 104-113. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.017; Yu Junlin, Luo Ya, Zhao Zhilong, et al. Drought monitor in karst gorge area based on Landsat-8 and TVDI[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 104-113.

## Drought Monitor in Karst Gorge Area Based on Landsat-8 and TVDI

Yu Junlin, Luo Ya, Zhao Zhilong, Yang Yueyan, Luo Xuqin

(School of Geography and Environmental Sciences,  
Guizhou Normal University, Gui'an New District, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the technology and method of remote sensing monitoring of karst surface drought, in order to provide technical reference for the monitoring of rocky desertification control and drought mitigation. [Methods] The atmospheric temperature correction method was used to derive the surface temperature ( $T_s$ ) and the normalized difference vegetation index (NDVI) to construct the temperature vegetation dryness index (TVDI) of Huajiang gorge in the dry season of 2013, 2014 and 2015. The TVDI was validated as a drought indicator based on the ground measured data. [Results] ① The TVDI showed a significant negative correlation with the measured soil water content of 0—10 cm in the same period ( $p < 0.05$ ). ② Light drought was the main drought grade in the three periods, and the cumulative areas of light drought, drought and heavy drought accounted for a large proportion of the whole region. It showed that the drought in 2014 was heavier than drought in 2015 and 2013. ③ The wet and normal grades were mainly distributed on slopes and gentle steep slopes of 900~1100 m height above sea level, slope of  $15^\circ \sim 35^\circ$ , and shady and semi-sunny slopes. In terms of rock desertification, it was mainly distributed in non-rocky desertification

收稿日期: 2018-07-17

修回日期: 2018-08-11

**资助项目:** 国家十三五重点研发计划课题“喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范”(2016YFC0502607); 国家自然科学基金项目“喀斯特江河上游区植被恢复的水文过程综合响应研究”(41761003); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划(黔教合 KY 字[2018]042); 贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目(0514177)

**第一作者:** 余军林(1994—), 男(汉族), 贵州省丹寨县人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文遥感与水土资源保护。E-mail: 1342985044@qq.com。

**通讯作者:** 罗娅(1979—), 女(汉族), 贵州省毕节市人, 博士, 教授, 主要从事生态水文遥感与水土资源保护研究。E-mail: luoya2002@163.com。

areas, light rocky desertification areas and potential rocky desertification areas. Land use types were mainly forest land, dry land, shrubbery land and other forest land. Light drought, drought and heavy drought were mainly distributed on gentle slopes, and slopes of  $6^{\circ}\sim 25^{\circ}$ , 500~900 m height as well as sunny and semi-sunny slopes. Light drought and drought were mainly distributed in light desertification area, the potential rocky desertification area, the moderate rocky desertification area and the intensity rocky desertification area. The heavy drought was mainly distributed in the non-karst area. In terms of land use types, the light drought, drought and heavy drought were mainly distributed in dry land, gardens and other wooded land. [Conclusion] TVDI can be used as the drought monitor index in the study area. The drought monitor method based on Landsat-8 data and TVDI is applicable in the karst gorge area.

**Keywords:** karst gorge area; temperature vegetation dryness index (TVDI); drought monitor; distribution characteristics

干旱是全球频发的自然灾害之一,其发生面积广、频率高、持续时间长,给农业生产和居民生活带来极大影响<sup>[1]</sup>。据统计,在中国因干旱造成的灾害面积每年约有  $2.00 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,可导致粮食受灾减产  $1/2$ <sup>[2]</sup>。如中国西南五省(滇、黔、桂、川、渝)在 2009 年秋季至 2010 年春季连续发生了重大旱灾,对农作物生产力破坏严重,造成巨大经济损失<sup>[3]</sup>。农业干旱是受地质地貌、土壤、气象、灌溉模式和作物抗旱能力等因素综合影响的复杂过程,其破坏性主要体现在干旱对作物的水分胁迫作用<sup>[4-5]</sup>。因此,有效地掌握旱情及其发生的时空特征,是减小灾害造成社会经济损失的基础。

在滇黔桂石漠化地区,溶隙、溶洞、漏斗、落水洞和地下河等地下岩溶发达;地表石漠化面积广,岩石裸露、土层薄,地表系统蓄水能力差;降雨通过溶隙、落水洞、地下河等地下管网快速汇入河流,地表径流过程迅速,埋藏深的地下水无法补充上层土壤水分;因此,在湿润气候条件下形成罕见的地表岩溶干旱现象<sup>[6]</sup>。在石漠化程度较高的喀斯特峡谷区,正常年份 11 月至次年 2 月无降雨,干旱持续超过两个月,地表水干枯;加之居民点和耕地高于水面,人居分散,水资源利用困难,生活生产用水极为短缺<sup>[7]</sup>。为解决该地区水资源配置及饮水安全问题,开展干旱研究是必要的。

传统的干旱监测方法以有限地面观测点的土壤水分含量来反映旱情,可代表范围小、数据获取时效性差、准确性低、人力财力消耗大<sup>[8]</sup>。卫星遥感技术可获取地物光谱信息及时空特征,具有空间范围广、分辨率高、重访周期短、数据获取便捷可靠等优点<sup>[9]</sup>,可弥补传统方法的不足。现应用较为成熟的方法主要有土壤热惯量法和植被指数法,两者分别基于地表温度( $T_s$ )和归一化植被指数(NDVI),都与地表土壤水分存在密切联系,因此成为干旱监测的主要指标。土壤热惯量法适用于裸土或低植被覆盖地表,植被指

数法适用于有植被覆盖地表,但存在一定的滞后性<sup>[10]</sup>。Price<sup>[11]</sup>, Carlson 等<sup>[12]</sup>, Sandholt 等<sup>[13]</sup>把归一化植被指数(NDVI)与地表温度( $T_s$ )结合,提出温度—植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI),用于评价地表土壤水分状况,适用于包括裸土到完全覆盖的地表条件,其适用性和准确性都较高。

目前温度—植被干旱指数得到广泛应用和改进,荣祁远等<sup>[14]</sup>利用 Landsat-8 数据和 TVDI 对东北地区旱情监测中,表明 TVDI 相对于改进的垂直干旱指数(MPDI)具有更高的精度。姚春生等<sup>[15]</sup>研究新疆土壤湿度时,发现 TVDI 与地表实测土壤水分含量具有显著相关性;薛天翼等<sup>[16]</sup>采用 MODIS 数据和 TVDI 监测陕西的春季旱情及其动态变化,取得可靠结果。刘立文等<sup>[17]</sup>对比几种植被指数,选择经地形校正的 TVDI 进行作物的干旱状况监测,解决了地形对监测结果的影响。闫娜等<sup>[18]</sup>、伍漫春等<sup>[19]</sup>和季国华等<sup>[20]</sup>对 TVDI 模型进行改进和增强,分别发展出增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)- $T_s$  构建的干旱监测模型、改进型土壤调整植被指数(modified soil-justed vegetation index, MSAVI)- $T_s$  建立的模型和改进型温度植被干旱指数模型(MDTVDI),都表明比 TVDI 具有更高的精度。对比发现,前期干旱遥感监测多应用于干旱、半干旱农业发达地区,较多采用 MODIS 和 Landsat-TM 数据。然而,在地表干旱频发的喀斯特石漠化地区,利用高时效、高空间分辨率的遥感影像进行干旱的研究尚为缺乏,需进一步探索。

因此,本文拟以贵州花江喀斯特峡谷为研究区,运用 TVDI 和 Landsat-8 数据对该研究区的地表旱情进行监测,揭示喀斯特峡谷区旱季旱情的时空分布特征,探索适用于喀斯特地表干旱遥感监测的技术方法,为石漠化治理监测以及抗旱减灾工作提供参考。

## 1 研究区概况

花江峡谷位于贵州省关岭县和贞丰县交界处、北盘江中游的花江河段南北两岸,地理坐标为 $105^{\circ}36'30''$ — $105^{\circ}46'30''$ E, $25^{\circ}39'13''$ — $25^{\circ}41'00''$ N,总面积约 $47.63\text{ km}^2$ 。地势西高东低,河谷深切,峡谷发育在强岩溶化三叠系碳酸盐岩组向斜构造上。北盘江北岸是典型峰丛、台地地貌,南岸发育峰丛、峰丛深洼地地貌类型<sup>[21]</sup>,峡谷区喀斯特面积高达 $94\%$ ,石漠化面积占喀斯特面积的 $61.2\%$ 。海拔 $850\text{ m}$ 以下属南亚热带干热河谷气候, $900\text{ m}$ 以上是中亚热带河谷气候,年降水量约 $1\ 100\text{ mm}$ ,5—10月降水量占全年 $83\%$ 。地表除北盘江干流外,无常年流水支流。由于地下岩溶发育垂直裂隙、节理、孔隙,降雨快速下渗为地下水,且地下水埋藏深( $>200\text{ m}$ ),地表干旱频发。该区土层薄,且不连续,呈斑块状分布;土壤以石灰土为主<sup>[22]</sup>,土壤质地黏重、团粒结构缺乏,水分含量低、易干,富含钙质,土壤生产力低,土地质量差。植被以人工植被为主,顶坛花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)是广泛分布于峡谷区的特有品种,是石漠化治理中培育的主要经济作物。此外,还有香椿(*Toona sinensis*)、复羽叶栎树(*Koelreuteria bipinnata*)、核桃(*Juglans regia*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、金银花(*Lonicera japonica*)、仙人掌(*Opuntia stricta*)等。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源及预处理

**2.1.1 遥感数据与气象数据** 遥感数据选择 Landsat-8 OLI/TIRS 影像,图幅条带号为 128,127,列号为 042,成像时间为 2013 年 12 月 18 日,2014 年 12 月 28 日和 2015 年 2 月 23 日。Landsat-8 的 1—9 波段除 8 波段空间分辨率为 $15\text{ m}$ 外,其他为 $30\text{ m}$ ;10,11 波段为热红外波段,空间分辨率为 $100\text{ m}$ ,美国地质调查局(USGS)将其重采样到 $30\text{ m}$ 。由于 11 波段的定标参数存在不确定性<sup>[23]</sup>,本次选用 10 波段。数据下载于美国地质调查局 USGS(<http://glovis.usgs.gov>)和中国遥感数据网(<http://rs.ceode.ac.cn>)。气象数据来源于设在研究区的小型自动气象站和中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

利用 ENVI5.1 的辐射定标工具对影像进行辐射定标,计算真实大气表观反射率。ENVI5.1 的 FLAASH 大气校正工具增加有 Landsat-8 OLI 传感器类型,用于辐射定标后的大气校正。FLAASH 大气校正工具基于 6 S 模型,模型使用时,卫星成像时

太阳天顶角等参数来源影像文件的质量评估文件,大气模式为中纬度冬天、气溶胶类型选择为城乡、气溶胶反演方法为 2-band(K-T)。

**2.1.2 实测土壤水分数据** 由于花江峡谷区全年阴雨天气多,获取卫星过境时的实测土壤水分数据存在不确定性,所以用于验证 TVDI 作为旱情指标的数据来源于田涟祯等<sup>[24-25]</sup>在研究区已有的结果。该数据为 2013—2015 年各季度的地表 $0$ — $10\text{ cm}$ 土壤体积含水量均值,剔除极端值后选用 22 个样点数据,各样点基本特征见表 1。

选取实测样点以满足研究区地形、土地利用类型、土壤类型、植被类型和石漠化程度的多样性为原则,综合土地利用类型、石漠化程度和植被类型等因素,每种石漠化等级至少选择 2 个样点<sup>[25]</sup>。其中,土地利用类型覆盖了天然草地、灌木丛地、乔木林地、经济林、耕地、园地等,在石漠化治理模式上覆盖坡改梯模式、火龙果种植模式、顶坛花椒模式、封山育林和国家天然保护林等治理措施。经过空间自相关分析和研究空间结构,表明所选取的样点实测数据与空间属性具有一定的空间相关性;样点的半变异函数图变化规律为:东北—西南比西北—东南向具有更大的空间距离,样点布置呈东北—西南向,而不是在一条水平直线上,评价显示实测样点选取合理<sup>[24]</sup>。

### 2.2 温度—植被干旱指数(TVDI)的计算

**2.2.1 TVDI 原理** Price<sup>[11]</sup>和 Carlson 等<sup>[26]</sup>发现当研究区植被覆盖度从裸土到完全覆盖、土壤水分由干燥到湿润时,遥感反演的  $T_s$  与 NDVI 存在负相关关系,拟合的像元散点图大致呈三角形,构建出  $T_s$ -NDVI 特征空间(图 1a)<sup>[27]</sup>。图中 A 和 B 分别代表干燥裸土和湿润裸土,C 是土壤水分充足的植被完全覆盖,蒸散最大。AC 为植被指数对应最高地表温度,作为土壤较干燥的“干边”;BC 为植被指数对应最低温度,作为土壤较湿润的“湿边”。图 1a 中的 A,B,C 表示特征空间的 3 种极端状况。在植被生长的任何时期,各地表类型对应的  $T_s$ -NDVI 特征关系都存在于 ABC 组成的三角形区内<sup>[20]</sup>。

Sandholt 等<sup>[13]</sup>认为  $T_s$ -NDVI 特征空间中存在一系列的土壤水分等值线,这些等值线近似相交于干边与湿边的交点,并且这些等值线近似为直线;直线的斜率与土壤水分存在一元线性关系(图 1b),提出温度植被干旱指数(TVDI)可作为植被缺水指标,TVDI 指数同时考虑植被覆盖和地表温度,比较客观的指示土壤水分状况。表达式如下:

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

式中:  $T_{smax}$ ——NDVI 对应的最高地表温度,代表干边;  $T_{smin}$ ——NDVI 对应的最小地表温度,代表湿边;  $T_s$ ——任意像元地表温度,在干边上 TVDI 等于 1,在湿边上 TVDI 等于 0。TVDI 的干、湿边方程是利用反演得到的地表温度和植被指数拟合。  $T_{smin}$  和

$T_{smax}$  与 NDVI 存在的线性关系:

$$T_{smin}=a+b \text{ NDVI} \tag{2}$$
$$T_{smax}=c+d \text{ NDVI} \tag{3}$$

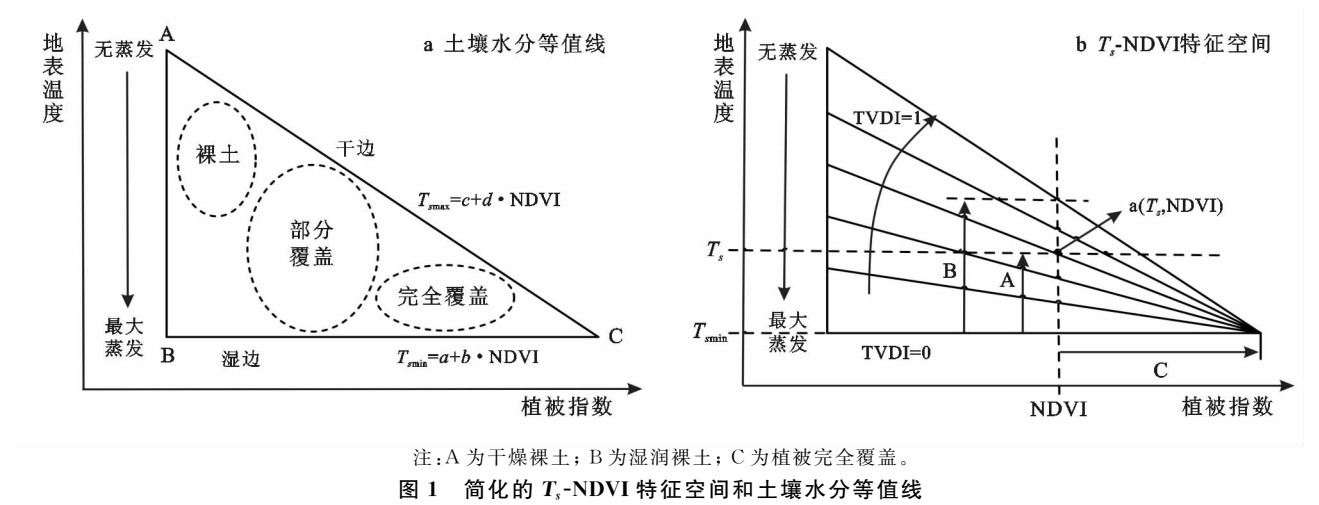
式中:  $a, b$ ——湿边拟合方程的系数;  $c, d$ ——干边拟合方程的系数。

表 1 地表土壤水分实测样点基本特征<sup>[24-25]</sup>

编号	地 名	经度	纬度	高程/ m	土壤类型	植被类型	植被覆 盖率/%	石漠化 等级
1	查尔岩村查尔岩组	105°38′41″	25°39′35″	738	黄色石圪垱土	花 椒	35	轻度
2	查尔岩村岩上组	105°38′05″	25°39′08″	952	薄层黑色石灰土	花椒、仙人掌	40	中度
3	板贵乡火龙果基地	105°39′43″	25°40′34″	595	黄色石圪垱土	火龙果、皇竹草	75	潜在
4	板贵乡乡政府	105°39′23″	25°40′53″	632	黄色石圪垱土	花 椒	45	轻度
5	板贵乡乡政府	105°39′24″	25°40′55″	626	黄色石圪垱土	草 地	30	轻度
6	查尔岩村查尔岩组	105°38′39″	25°39′15″	900	黄色石圪垱土	花 椒	30	强度
7	查尔岩村查尔岩组	105°38′39″	25°39′16″	909	黄色石圪垱土	复羽叶栎树	80	强度
8	银洞湾	105°40′23″	25°39′21″	749	黄色石圪垱土	花 椒	35	强度
9	王家屋基	105°39′55″	25°40′20″	575	黄色石圪垱土	皇竹草、苎草	78	潜在
10	王家屋基	105°39′56″	25°40′21″	575	黄色石圪垱土	花椒、柚木	14	轻度
11	王家屋基	105°39′56″	25°40′25″	555	黄色石圪垱土	柚木、花椒	35	中度
12	关岭县木工村	105°42′23″	25°39′37″	782	薄层棕色石灰土	栗子树、香椿	65	轻度
13	查尔岩村蓄水池	105°38′41″	25°39′35″	747	黄色石圪垱土	花椒、砂仁	50	中度
14	查尔岩组山地	105°38′39″	25°39′15″	900	黄色石圪垱土	花 椒	30	强度
15	查尔岩村查尔岩组	105°39′03″	25°39′36″	761	黄色石圪垱土	花椒、草地	70	中度
16	查尔岩村查尔岩组	105°38′08″	25°39′07″	727	黄色石圪垱土	乔木、草	95	轻度
17	岩上组洼地	105°38′06″	25°39′09″	944	薄层黑色石灰土	花椒、仙人掌	20	强度
18	关岭县木工村	105°42′25″	25°39′45″	792	薄层棕色石灰土	花椒、砂仁	50	轻度
19	银洞湾报公寨	105°40′24″	25°39′21″	731	黄色石圪垱土	花椒、橘子树	35	中度
20	板贵乡三家寨	105°38′19″	25°41′18″	779	黄色石圪垱土	花椒、辣椒	80	无
21	三家寨火龙果基地	105°39′14″	25°40′50″	632	黄色石圪垱土	火龙果、皇竹草	50	轻度
22	关岭县木工村	105°42′21″	25°39′35″	776	薄层棕色石灰土	皇竹草、苎草	60	潜在

TVDI 值在[0,1],干边的 TVDI 值近似为 1,湿边为 0。TVDI 值越大表示土壤越干燥,反之,TVDI 值越小土壤越湿润,TVDI 值与土壤水分存在负相关

关系。基于 ENVI 扩展模块 TVDI,输入  $T_s$  值和 NDVI 数据可求得干湿边方程和 TVDI 指数空间分布数据。



2.2.2 归一化植被指数(NDVI)及地表比辐射率反演 采用 Landsat-8 OLI 的第 4 波段和第 5 波段计算归一化植被指数(NDVI)<sup>[20]</sup>:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_5 - \rho_4)}{(\rho_5 + \rho_4)} \quad (4)$$

式中:  $\rho_5$ ;  $\rho_4$ ——近红外波段和红光波段的反射率。

地表比辐射率的计算采用覃志豪等<sup>[28]</sup>在 Sobrino<sup>[29]</sup>基础上改进的混合像元分解法,将地表分为水体、自然表面和城镇。计算如下:

水体:  $\epsilon_w = 0.995$  (5)

自然表面:  $\epsilon_f = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_s \epsilon_s + d_\epsilon$  (6)

城镇:  $\epsilon_b = P_v R_v \epsilon_v + (1 - P_v) R_m \epsilon_m + d_\epsilon$  (7)

式中:  $P_v$ ——植被覆盖度;  $R_v$ ,  $R_s$ ——植被温度比率和裸土温度比率;  $\epsilon_v$ ——植被比辐射率;  $\epsilon_s$ ——裸土比辐射率;  $R_m$ ——建筑表面温度比率;  $\epsilon_m$ ——建筑表面比辐射率。  $d_\epsilon$ ——地表几何分布及内部散射效应,平坦地表取值为 0。根据覃志豪等<sup>[28]</sup>研究成果,公式简化为:

水体:  $\epsilon_w = 0.995$  (8)

自然表面:  $\epsilon_f = 0.962\ 5 + 0.061\ 4 P_v + 0.046\ 1 P_v^2$  (9)

城镇:  $\epsilon_b = 0.958\ 9 + 0.086 P_v + 0.067\ 1 P_v^2$  (10)

植被覆盖度( $P_v$ )指植被冠层垂直投影面积占土壤总面积比例。地表比辐射率的计算需计算植被覆盖度,公式:

$$P_v = \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})} \quad (11)$$

式中:  $\text{NDVI}_{\max}$ ,  $\text{NDVI}_{\min}$ ——归一化植被指数最大值、最小值。通常波段受噪音干扰,可能出现异常值。对此,覃志豪等<sup>[28]</sup>提出以近似值替代  $\text{NDVI}_{\max}$ ,  $\text{NDVI}_{\min}$ ,将 NDVI 的取值设置在一个置信区间(如累积频率为 2%~97%)。按数据情况设置置信区间的方法如下:

$$P_v = \begin{cases} 0 & (\text{NDVI} < \text{NDVI}_{\min}) \\ \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})} & (\text{NDVI}_{\min} < \text{NDVI} < \text{NDVI}_{\max}) \\ 1 & (\text{NDVI} > \text{NDVI}_{\max}) \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 地表温度( $T_s$ )反演 采用大气校正法(辐射传输方程法)反演地表温度,根据辐射传输方程<sup>[30]</sup>,传感器接收到的热红外辐射亮度值的表达式为:

$$L_\lambda = [\epsilon B(T_s) + (1 - \epsilon) L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (13)$$

式中:  $\epsilon$ ——地表比辐射率;  $T_s$ ——地表真实温度(K);  $B(T_s)$ ——黑体在  $T_s$  的热辐射亮度;  $\tau$ ——大气在热红外波段的透过率。  $L_\uparrow$ ——大气向上辐射亮度;  $L_\downarrow$ ——大气向下辐射到达地面后反射的辐射亮

度。由公式(13)可知,温度为  $T$  的黑体在热红外的辐射亮度值  $B(T_s)$  的计算公式为:

$$B(T_s) = \frac{L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \epsilon)L_\downarrow}{\tau\epsilon} \quad (14)$$

式中:  $L_\lambda$ ——大气校正后的热红外波段辐射定标值。  $L_\uparrow$ ,  $L_\downarrow$  和  $\tau$  等大气剖面参数在 NASA 官网(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>)查询,输入影像成像时间、影像中心经纬度坐标从下影像文件里的 txt 元数据获取,气压、气温和大气湿度来自自动气象站和中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

计算得黑体辐射亮度后,由普朗克函数<sup>[31]</sup>计算出地表温度  $T_s$ :

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1\right]} \quad (15)$$

式中:  $T_s$  单位为 K;  $K_1$ ,  $K_2$ ——卫星预设常量, Landsat-8 的 10 波段设置  $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2 = 1\ 321.08 \text{ K}^{[20]}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 $T_s$ -NDVI 特征空间与干湿边拟合

利用 ENVI 软件 TVDI 扩展模块提取 NDVI 及其对应的地表温度  $T_s$  最大值和最小值,以 NDVI 作横坐标,  $T_s$  作纵坐标,构建 2013—2015 年 3 个时期旱季的  $T_s$ -NDVI 特征空间(图 2)。由图 2 可知,3 个时期的特征空间大体相似,形状类似于三角形。在 NDVI 与  $T_s$  关系上,随着 NDVI 的增大,  $T_s$  最大值递减,呈减小趋势;  $T_s$  最小值递增,呈增大趋势。总体上,  $T_s$  最大值、最小值与 NDVI 存在线性关系,且趋近于相交于一点。

对 NDVI 及其相对的  $T_s$  最大值、最小值进行拟合,得到 3 个时期的干边、湿边方程(图 2)。在干、湿边方程拟合中,由于 NDVI 小于 0 的主要是水体等比较湿润的地表,认为其含水量为 100%,所以只考虑 NDVI 大于 0 的情况。从拟合结果可知,干边方程的斜率小于 0,湿边方程斜率大于 0,表明随着植被覆盖度的增加,相应的  $T_s$  最大值逐渐减小,相应的  $T_s$  最小值逐渐增大。此外,对比拟合方程的  $R^2$  可知,3 个时期的湿边方程拟合效果都优于干边。

#### 3.2 TVDI 与土壤水分相关性

选用田涟祎等<sup>[24-25]</sup>2013—2015 年各季度的 22 个样点实测土壤水分数据。根据各样点坐标提取对应 TVDI 值,采用最小二乘法与相应的实测数据进行回归分析(表 2)。可知反演 3 个时期的 TVDI 与对应的表层 0—10 cm 土壤体积含水量呈负相关关系,土

壤体积含水量随 TVDI 增大而减小,符合 TVDI 值越趋近于 1 地表越干燥的原理。3 个时期的 TVDI 与实测数据的线性拟合结果通过显著性检验 ( $p <$

0.05),表明温度—植被干旱指数(TVDI)一定程度上能指示地表 0—10 cm 土壤水分状况,作为研究区干旱监测指标具有一定合理性。

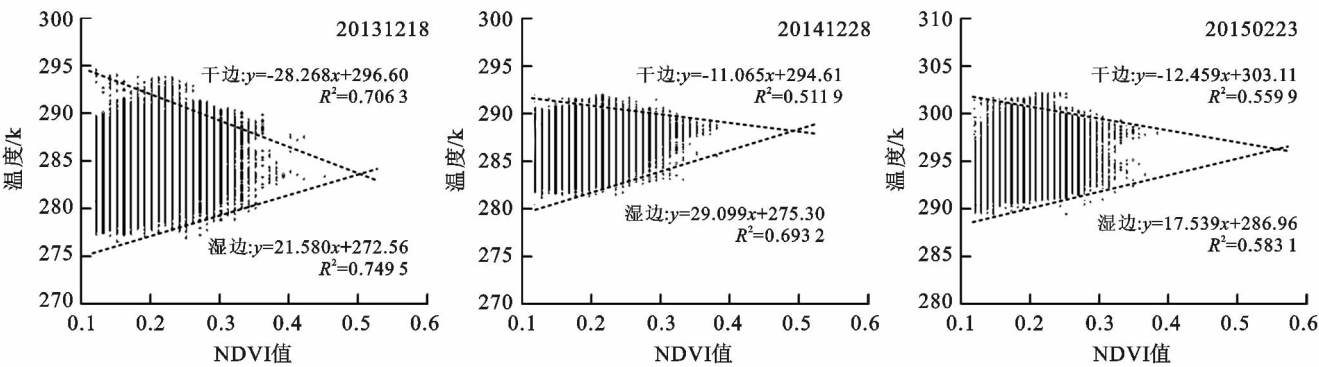


图 2  $T_s$ -NDVI 特征空间

从拟合方程  $R^2$  值(2013 年为 0.502 3,2014 年为 0.472 0,2015 年为 0.428 2)可知,数据点相对离散,拟合方程并非很理想,说明以表层土壤体积含水量验证 TVDI 可能存在一定问题,可能原因是:遥感方法获取的地表旱情应该包括整个植被根系层的土壤水分状况;此外,从土壤物理学角度考虑,土壤含水量的绝对值大小并不能充分代表土壤的供水状况,土壤持水特性还与土壤质地和土壤结构等土壤物理性质相关<sup>[32]</sup>;再者,基于花江峡谷区面积约 47.63 km<sup>2</sup> 的研究空间尺度,样点实测值与 100 m 空间分辨率像元值(Landsat-8 热红外波段实际空间分辨率)的相关分析结果达到较高的相关水平很困难。

3.3 旱情总体特征

根据表 2 计算出花江峡谷区 2013—2015 年旱季 3 个时期的 TVDI 值。以 TVDI 作为旱情指标,采用齐述华等<sup>[32]</sup>的分级标准:湿润( $0 < TVDI < 0.2$ )、正常( $0.2 \leq TVDI < 0.4$ )、轻旱( $0.4 \leq TVDI < 0.6$ )、干旱( $0.6 \leq TVDI < 0.8$ )、重旱( $0.8 \leq TVDI < 1$ )。由此得到 3 个时期的旱情空间分布特征(图 3),对各干旱等级进行统计可知:2013 年 12 月 18 日轻旱面积占全区面积的 31.60%,干旱占 27.11%,重旱占 10.63%,这 3 个等级累计面积占全区 69.34%;2014 年 12 月 28 日轻旱占全区 37.13%,干旱为 32.83%,重旱为 10.07%,3 个等级累计面积占全区 80.04%;2015 年 2 月 23 日轻旱占全区 32.62%,干旱为 29.68%,重旱为 13.64%,3 个等级累计面积占全区 75.94%。表明研究区的 3 个时期都以轻旱为主,发生干旱(轻旱、干旱和重旱 3 个等级累计)的面积大,呈现 2014 年  $>$  2015 年  $>$  2013 年的特点。

表 2 TVDI 与表层 0—10 cm 土壤体积含水量的关系		
日期	回归方程	$R^2$
20131218	$y = -13.132x + 21.998$	0.502 3
20141228	$y = -13.650x + 23.287$	0.472 0
20150223	$y = -12.532x + 23.068$	0.428 2

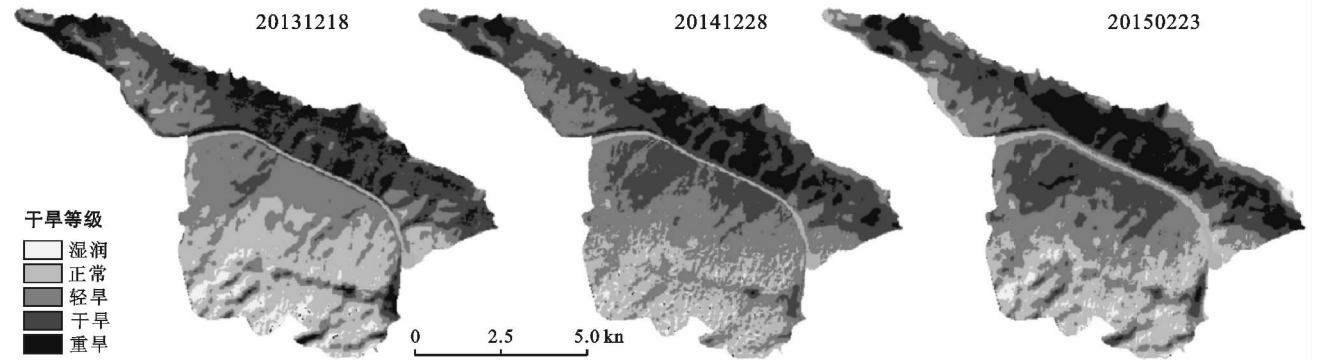


图 3 2013—2015 年花江峡谷区旱季干旱等级分布

3.4 旱情的空间分布特征

3.4.1 地形分布特征 根据花江峡谷区高程在446~1 359 m 的实际,将高程分为<500 m,500~700 m,700~900 m,900~1 100 m,1 100~1 300 m这5个等级。坡度根据李丹等<sup>[33]</sup>的分级标准,分为平地(0°~6°)、缓坡(6°~15°)、斜坡(15°~25°)、缓陡坡(25°~35°)和陡坡(35°~90°)5级。坡向以正北方起始,顺时针方向计算,将0°划分为平缓地、135°~255°为阳坡、45°~135°和225°~315°为半阳坡、0°~45°和315°~360°为阴坡<sup>[34]</sup>。

(1) 高程分布特征。据表3可知2013年、2014

年和2015年各干旱等级在不同高程分布面积占全区面积比例。湿润和正常地区在900~1 100 m 占全区面积比重最大,其中,湿润地区在2013年、2014年和2015年分别为3.83%,1.73%和1.91%,正常地区为17.62%,16.28%和14.11%;轻旱地区在500~1 100 m 占全区的面积累计比例最大,在2013年、2014年和2015年分别为29.99%,35.02%和27.76%,干旱地区分别为24.43%,30.50%和26.36%;重旱地区在500~900 m 占全区的面积累计比重最大,在2013年、2014年和2015年分别为8.19%,8.88%和11.23%。

表 3 干旱等级在不同地形的分布面积占全区面积比例 %

年份 类型	2013 年					2014 年					2015 年					
	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	
高程/m	<500	0.00	0.00	0.71	3.20	0.29	0.00	0.00	1.06	3.12	0.01	0.08	2.08	1.67	0.03	0.00
	500~700	0.00	0.72	10.89	10.10	4.59	0.00	0.05	7.26	13.66	5.29	0.21	2.39	4.99	10.73	5.86
	700~900	0.00	7.19	13.76	9.95	3.60	0.00	0.98	16.98	12.99	3.59	0.13	1.84	12.37	12.03	5.37
	900~1 100	3.83	17.62	5.34	4.38	2.28	1.73	16.28	10.78	3.85	0.82	1.91	14.11	10.40	3.60	0.79
	1 100~1 300	0.08	0.21	0.49	0.53	0.21	0.07	0.27	0.83	0.28	0.07	0.06	0.29	0.81	0.20	0.05
坡度	平 地	0.07	1.20	2.82	1.76	0.12	0.07	0.71	2.34	2.48	0.39	0.04	1.06	1.67	2.43	0.78
	缓 坡	0.66	8.27	14.88	10.22	2.00	0.48	4.77	13.26	13.34	4.18	0.36	5.58	10.36	13.20	6.53
	斜 坡	1.44	11.30	7.41	7.17	2.50	0.65	6.89	11.30	7.73	3.27	0.80	7.58	10.66	6.50	4.28
	缓陡坡	1.27	4.40	3.18	3.57	2.06	0.46	3.97	4.83	4.14	1.06	0.74	4.25	5.17	3.23	1.07
	陡 坡	0.58	1.58	3.27	4.40	3.87	0.15	1.81	5.33	5.23	1.19	0.63	2.89	4.76	4.37	1.04
坡向	平缓地	0.02	0.21	0.18	0.02	0.00	0.01	0.08	0.26	0.07	0.00	0.01	0.11	0.21	0.09	0.00
	阳 坡	0.08	1.21	4.49	17.01	9.46	0.13	1.40	5.86	16.15	8.71	0.08	1.98	7.03	12.34	10.81
	半阳坡	1.30	9.60	15.27	9.27	1.15	0.78	7.68	15.17	11.52	1.44	1.14	9.28	11.87	11.39	2.92
	阴 坡	2.55	15.45	11.63	1.07	0.04	0.87	8.86	15.59	5.40	0.02	1.32	9.89	13.37	6.07	0.08

3个时期的湿润和正常等级主要分布在900~1 100 m,轻旱和干旱主要分布500~1 100 m;重旱主要分布在500~900 m。表明500~900 m的旱情比较严重。

(2) 坡度分布特征。据表3可知2013年、2014年和2015年各干旱等级在不同坡度分布面积占全区面积比重。湿润在斜坡和缓陡坡占全区面积累计比重最大,在2013年、2014年和2015年分别为2.71%,1.11%和1.54%;正常在斜坡、缓坡和缓陡坡占全区面积累计比重最大,在2013年、2014年和2015年分别为23.97%,15.63%和17.41%;轻旱和干旱在缓坡和斜坡占全区面积累计比重最大,轻旱在2013年、2014年和2015年分别为22.29%,24.56%和21.02%,干旱分别为17.39%,21.07%和19.70%;重旱在缓坡、斜坡和陡坡均有分布,2013年在陡坡占全区面积比重最大(3.87%),2014年和2015年在缓坡最大,分别占全区面积4.18%和6.53%。

3个时期的湿润等级主要分布在斜坡和缓陡坡;正常主要分布在斜坡、缓坡和缓陡坡;轻旱和干旱主要分布缓坡和斜坡;重旱2013年主要分布在陡坡,2014年和2015年在缓坡。表明缓坡和斜坡旱情比较严重。

(3) 坡向分布特征。据表3可知2013年、2014年和2015年各干旱等级在不同坡向分布面积占全区面积比重。湿润、正常和轻旱在半阳坡和阴坡占全区面积累计比重最大,其中,湿润在2013年、2014年和2015年分别为3.85%,1.65%和2.46%,正常分别为25.05%,16.54%和19.17%,轻旱分别为26.90%,30.76%和25.24%;干旱在阳坡和半阳坡占全区面积累计比重最大,2013年、2014年和2015年分别为26.28%,27.67%和23.73%;重旱在阳坡占全区面积比重最大,2013年、2014年和2015年分别为9.46%,8.71%和10.81%。

可知,3个时期的湿润、正常和轻旱等级主要分布

在半阳坡和阴坡;干旱分布于阳坡和半阳坡;重旱主要分布在阳坡。表明阳坡和半阳坡旱情比较严重。

3.4.2 旱情的石漠化等级分布特征 根据熊康宁等<sup>[35]</sup>的石漠化等级划分,将研究区分为喀斯特区和非喀斯特区,其中的喀斯特区再分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化。

据表 4 可知 2013 年、2014 年和 2015 年各干旱等级在不同石漠化等级分布面积占全区面积比重。湿润和正常等级在无石漠化区、轻度石漠化区和潜在石漠化区占全区面积累计比重最大,其中,湿润在 2013 年、2014 年和 2015 年分别为 2.92%,1.31%和 1.93%,正常分别为 19.71%,13.93%和 16.82%;轻旱和干旱在各石漠化等级中广泛分布,轻旱在轻度石漠化区占全区面积比重最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 11.39%,12.42%和 11.30%),干旱在轻度石漠化区和非喀斯特区占全区面积累计比重最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 14.65%,16.76%和 14.7%);重旱在非喀斯特区占全区面积比重最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 3.50%,5.06%和 7.29%)。

由此可知,3 个时期的湿润和正常等级分布在无石漠化区、轻度石漠化区和潜在石漠化区;轻旱在轻度石漠化区、潜在石漠化区、无石漠化区、中度石漠化区和强度石漠化区都有分布,其中在轻度石漠化区的分布面积比重最大;干旱主要分布在轻度石漠化区和

非喀斯特区;重旱主要分布在非喀斯特区。

3.4.3 旱情的土地利用类型分布特征 根据土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017)<sup>[36]</sup>和盈斌<sup>[37]</sup>的研究结果对本研究区的土地利用类型进行划分,将研究区土地利用分为水田、旱地、园地、有林地、灌木林地、其他林地、天然草地、农村居民点、工矿用地、公路、其他草地、裸岩石砾地和河流 13 类。

据表 4 可知 2013 年、2014 年和 2015 年各干旱等级在不同土地利用类型中的面积占全区面积比例。湿润和正常等级在有林地、旱地、灌木林地和其他林地占全区面积累计比例最大,其中,湿润在 2013 年、2014 年和 2015 年分别为 3.30%,1.43%和 1.97%,正常分别为 19.06%,15.05%和 16.78%;轻旱在园地、其他林地、旱地和其他草地占全区面积累计比例最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 21.82%,23.26%和 20.80%);干旱在旱地、其他林地和园地占全区面积累计比例最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 13.89%,18.08%和 17.55%);重旱在旱地和园地占全区面积累计比例最大(2013 年、2014 年和 2015 年分别为 3.43%,5.65%和 7.77%)。

由此可知,3 个时期的湿润和正常等级主要分布在有林地、旱地、灌木林地和其他林地;轻旱分布在园地、其他林地、旱地和其他草地;干旱主要分布在旱地、其他林地和园地;重旱主要分布在旱地和园地。表明园地、旱地和其他林地的旱情较严重。

表 4 干旱等级在不同石漠化等级和土地利用类型的分布面积占全区面积比例															%	
年份 类型	2013 年面积比例					2014 年面积比例					2015 年面积比例					
	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱	
石漠化等级	无石漠化	1.31	7.23	3.99	3.18	1.02	0.57	5.92	6.54	3.17	0.51	1.01	7.74	4.90	2.30	0.78
	潜在石漠化	0.69	4.10	6.52	3.76	2.22	0.36	2.89	6.78	5.66	1.61	0.54	3.68	5.46	5.63	1.98
	轻度石漠化	0.92	8.38	11.39	6.69	1.97	0.38	5.12	12.42	9.79	1.64	0.38	5.40	11.30	9.99	2.28
	中度石漠化	0.35	3.15	4.75	2.87	1.35	0.13	1.61	5.82	3.98	0.94	0.18	1.99	5.64	3.67	1.00
	强度石漠化	0.31	3.33	4.51	3.15	0.69	0.12	1.67	5.72	3.96	0.52	0.13	1.94	5.32	3.96	0.65
	非喀斯特	0.00	0.00	0.70	7.96	3.50	0.00	0.00	0.14	6.97	5.06	0.00	0.00	0.16	4.71	7.29
土地利用类型	水田	0.00	0.00	0.01	1.49	0.32	0.00	0.00	0.00	1.02	0.82	0.00	0.00	0.00	0.62	1.22
	旱地	0.86	5.29	4.45	6.34	2.45	0.27	4.02	5.77	5.75	3.67	0.23	3.95	5.33	4.65	5.31
	园地	0.00	2.97	9.95	3.50	0.98	0.00	0.32	7.40	7.79	1.98	0.00	0.39	6.03	8.60	2.46
	有林地	1.10	5.66	1.96	0.66	0.66	0.47	4.92	3.40	0.74	0.07	0.77	5.32	2.44	0.90	0.16
	灌木林地	0.74	3.16	2.24	1.87	1.28	0.48	2.67	3.78	1.98	0.43	0.61	3.57	2.97	1.62	0.56
	其他林地	0.60	4.95	4.55	4.05	1.28	0.21	3.44	6.34	4.54	0.99	0.36	3.94	5.50	4.30	1.43
	天然草地	0.03	0.94	2.50	1.98	0.84	0.02	0.50	2.17	2.74	0.89	0.02	0.51	1.93	2.59	1.27
	农村居民点	0.00	0.26	0.31	0.25	0.06	0.00	0.09	0.37	0.35	0.06	0.00	0.12	0.29	0.33	0.14
	工矿用地	0.00	0.09	0.07	0.04	0.00	0.00	0.02	0.12	0.06	0.00	0.00	0.03	0.12	0.06	0.00
	公路	0.02	0.27	0.24	0.24	0.10	0.00	0.11	0.37	0.26	0.12	0.01	0.14	0.30	0.24	0.18
	其他草地	0.08	1.14	2.87	2.80	1.79	0.03	0.53	3.75	3.69	0.71	0.07	0.83	3.94	3.22	0.66
	裸岩石砾地	0.15	1.32	2.23	2.94	0.85	0.06	0.58	3.14	3.28	0.47	0.07	0.81	3.22	2.90	0.52
	河流	0.00	0.00	0.33	1.32	0.57	0.00	0.00	0.81	1.33	0.06	0.11	1.15	0.71	0.23	0.04



## 4 结论与讨论

采用 Landsat-8 数据,运用大气校正法反演NDVI 和  $T_s$ ,构建了  $T_s$ -NDVI 特征空间,得到 TVDI。并结合研究区已有研究成果的同时期实测土壤水分数据,对 TVDI 作为旱情指标进行验证,再对 2013—2015 年旱季旱情进行评价。

(1) 反演的 TVDI 与同时期实测地表 0—10 cm 土壤体含水量数据的线性回归拟合结果通过显著性检验( $p < 0.05$ ),两者呈负相关关系。表明 TVDI 可作为研究区干旱监测指标,TVDI 和 Landsat-8 数据在喀斯特峡谷区具一定适用性。

(2) 2013 年、2014 年和 2015 年旱季的旱情以轻旱为主,该等级发生的面积最大(2013 年占全区 31.60%,2014 年占 37.13%,2015 年占 32.62%);轻旱、干旱和重旱的累计面积占全区比重大(2013 年占 69.34%,2014 年为 80.04%,2015 年为 75.94%)。表明 2014 年旱季旱情重于 2015 年和 2013 年旱季。

(3) 3 个时期的旱情在空间分布上,湿润和正常等级在地形上主要分布在 900~1 100 m,15°~35°的斜坡和缓陡坡、阴坡和半阳坡;在石漠化等级上,主要分布在无石漠化区、轻度石漠化区和潜在石漠化区;在土地利用类型上,主要分布在有林地、旱地、灌木林地和其他林地。轻旱、干旱和重旱在地形上主要分布在 500~900 m,6°~25°的缓坡和斜坡、阳坡和半阳坡;在石漠化等级上,轻旱和干旱主要分布在轻度石漠化区、潜在石漠化区、中度石漠化区和强度石漠化区,重旱主要分布在非喀斯特区;在土地利用类型上,轻旱、干旱和重旱主要分布在旱地、园地和其他林地。

对 2013—2015 年旱季的旱情进行监测,所采用数据和方法在喀斯特峡谷区具有一定适用性,该技术方法可为石漠化治理中的生态环境监测以及抗旱减灾工作提供参考。选用 Landsat-8 数据,空间分辨率相对于常用的 MODIS 数据产品有了提高,但对于空间尺度小,植被覆盖度低、裸岩率高、地形起伏大的强异质性地表,使用 TVDI 模型需要进一步校正,以提高模型在喀斯特地区的适用性。其次,由于峡谷区雨季长,阴雨天气居多,可用卫星遥感影像集中于 12 月至次年 3 月的旱季,因而无法进行年际长时间序列的多时相监测,也不能满足农作物生长季的监测需要,此外,农业干旱的发生受降雨时空分配、土壤持水性、灌溉模式和作物生理结构等影响。因此,喀斯特地区干旱发生的时空特征及其影响因素和作用机制仍需进一步深入探讨。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Dai Aiguo. Erratum: Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2011,2(1):45-65.
- [2] 白力改,燕琴,张丽,等. MODIS 干旱指数对华北干旱的敏感性分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):708-716.
- [3] 李强子,闫娜娜,张飞飞,等. 2010 年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估[J]. 地理学报,2010,65(7):771-780.
- [4] Wang Wei, Wang Wenjie, Li Junsheng, et al. The impact of sustained drought on vegetation ecosystem in Southwest China based on remote sensing[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2(6):1679-1691.
- [5] 赵志平,吴晓蕾,李果,等. 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学报,2015,35(2):350-360.
- [6] 李阳兵,王世杰,李瑞玲,等. 花江喀斯特峡谷地区石漠化成因初探[J]. 水文地质工程地质,2004,31(6):37-42.
- [7] 覃焕勋. 喀斯特石漠化地区水利水保措施优化配套与极度干旱应急调控技术示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
- [8] 林巧,王鹏新,张树誉,等. 不同时间尺度条件植被温度指数干旱监测方法的适用性分析[J]. 干旱区研究,2016,33(1):186-192.
- [9] Yu Xiaolei, Guo Xulin, Wu Zhaocong. Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS: Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. Remote Sensing, 2014,6(10):9829-9852.
- [10] 李兴华,李云鹏,杨丽萍. 内蒙古干旱监测评估方法综合应用研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(3):162-166.
- [11] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1990,28(5):940-948.
- [12] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil-water content[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1995,77(3):191-205.
- [13] 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.
- [14] 荣祁远,何祺胜,刘宝柱. 基于 Landsat 8 数据的干旱监测研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(31):205-211.
- [15] 姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用,2004,19(6):473-479.

[16] 薛天翼,白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究,2017,24(4):240-246.

[17] 刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报,2014,34(13):3704-3711.

[18] 闫娜,李登科,杜继稳,等. 基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J]. 自然灾害学报,2010,19(4):178-182.

[19] 伍漫春,丁建丽,王高峰. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤水分反演[J]. 中国沙漠,2012,32(1):148-154.

[20] 季国华,胡德勇,王兴玲,等. 基于 Landsat 8 数据和温度—植被指数的干旱监测[J]. 自然灾害学报,2016,25(2):43-52.

[21] 张雅梅,熊康宁,安裕伦,等. 花江喀斯特峡谷示范区土壤侵蚀调查[J]. 水土保持通报,2003,23(2):19-22.

[22] 喻阳华,秦仕忆,钟欣平. 喀斯特干热河谷花椒林母岩化学组成与元素含量随海拔的分异[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2018,36(2):9-14.

[23] 徐涵秋. Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报,2016,20(2):229-235.

[24] 田涟伟,周忠发,闫利会. 人为干预下喀斯特峡谷区不同土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(6):92-96.

[25] 田涟伟. 石漠化地区土壤性质对不同土地利用方式的响应研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.

[26] Carlson T, Gillies R, Perry E. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1):161-173.

[27] 范辽生,姜纪红,盛晖,等. 利用温度植被干旱指数(TVDI)方法反演杭州伏旱期土壤水分[J]. 中国农业气象,2009,30(2):230-234.

[28] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感,2004,16(3):28-32.

[29] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(4):434-440.

[30] 李小文. 遥感原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008:109-115.

[31] 丁凤,徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学学报,2006,8(3):125-130.

[32] 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.

[33] 李丹,刘丹丹,赵金祥. 基于 DEM 的山区土地利用变化分析[J]. 水土保持研究,2014,21(1):66-70.

[34] 黎景良,后斌,危双峰,等. 基于 DEM 的广东省山区土地利用变化分析[J]. 测绘通报,2007(6):53-57.

[35] 熊康宁,黎平,周忠发. 喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究[M]. 北京:地质出版社,2002.

[36] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类,中华人民共和国国家标准 GB/T 21010—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[37] 盈斌. 岩溶地区土地利用、石漠化与治理工程设计[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.

(上接第 103 页)

[22] 李佳璐,姜霞,王书航,等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. 中国环境科学,2016,36(4):1207-1217.

[23] Wang Yangqian, Yang Liyuan, Kong Linghao, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [J]. Catena, 2015,125:200-205.

[24] 刘海彪,孔少飞,王伟,等. 中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单[J]. 环境科学,2016,37(8):2823-2835.

[25] Liang Xianmeng, Song Jinming, Duan Liqin, et al. Source identification and risk assessment based on fractionation of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,128(2):548-556.

[26] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, et al. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(17):10127-10147.

[27] Luo Wei, Lu Yonglong, Zhang Yan, et al. Watershed-scale assessment of arsenic and metal contamination in the surface soils surrounding Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(12):2599-2607.