

# 石漠化地区植被对干旱敏感性的遥感观测

倪雪波<sup>1, 2, 3</sup>, 刘荣高<sup>3</sup>, 王世杰<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 西南石漠化地区是国家重点治理的生态脆弱区域, 该区尽管年降雨量大, 但由于独特的水文特征, 植被也常因缺水生长受到抑制。本文利用 2000 至 2004 年中分辨率成像光谱辐射计(MODIS)250 m 归一化植被指数(NDVI)作为植被生长的指标参数, 分析了石漠化地区植被对春旱、夏旱的敏感性。结果表明: 干旱发生后, 石漠化地区 NDVI 降低明显, 而非石漠化地区植被受到的影响很小。春旱发生后, 生长初期 NDVI 比其它年份减少约 12%, 生长期开始的时间与春季降雨量有重要关系; 夏旱发生后, 生长后期 NDVI 减小约 16%, 但夏旱对植被的影响具有一个月的滞后。这说明石漠化使生态系统抗旱能力减弱, 更易受气候波动的影响。

**关键词:** 石漠化; 植被; MODIS NDVI; 干旱

中图分类号: X141; P694 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2009)03-0221-06

喀斯特石漠化是指在脆弱的喀斯特环境下, 受人类不合理的社会经济活动的干扰破坏, 造成土壤严重侵蚀, 基岩大面积出露, 土地生产力严重下降, 地表出现类似荒漠景观的土地退化过程<sup>[1]</sup>。西南石漠化与西北干旱、半干旱区的沙漠化已成为阻碍我国经济社会发展的两大生态问题。相对沙漠化而言, 石漠化受到的关注还比较少。石漠化发生后, 喀斯特生态系统的稳定性减弱, 即便年降雨量大, 临时干旱也能成为制约植被生长的因素, 但这方面的研究还非常缺乏。

遥感技术因其及时广域的特点, 在研究区域<sup>[2]</sup>、地区<sup>[3]</sup>范围内生态系统的变化与降雨的关系中已有很多应用。近年来中分辨率成像光谱辐射计(MODIS)因其高时空分辨率、高质量的产品而在生态环境、全球气候变化研究中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。本文利用 MODIS 250 m 归一化植被指数(NDVI)以及降雨数据, 分析了贵州省石漠化地区植被对春季、夏季降雨变化的敏感性。

## 1 数据与方法

### 1.1 实验点的选择

本文选择喀斯特发育典型且石漠化严重的贵州省作为研究对象。贵州省 16% 的国土面积已发生不同程度的石漠化, 26% 的面积正面临石漠化的危险(图 1)。实验点的选择基于全省有直接降雨记录的 19 个基准、标准气象站(中国气象科学数据共享服务网: <http://cdc.cma.gov.cn/>)。由于气象台站均设在城市, 我们在台站附近石漠化程度、覆被类型<sup>[5]</sup>均一的地方重新选择了实验点(表 1、图 1)。气象台站与对应的实验点之间降雨量差异很小, 且发生干旱的时间一致。为避免人类因素如灌溉的影响, 研究地区均不选在农田区, 且从根系深浅和影响地表蓄水能力上, 将<sup>[5]</sup>中植被归为草地、林地、灌木林木混交林、非植被、农田等几大类型。

### 1.2 石漠化等级分类图

本文采用的 1: 50 万贵州省不同石漠化等级分布图由贵州师范大学完成<sup>[6]</sup>, 石漠化等级的划分是根据植被覆盖度、土壤和岩性、地面坡度等决定石漠化的主要因素, 以及降雨特征等相关因素, 并在实地调查的基础上进行的。中度和强度石漠化地区土壤侵蚀强烈, 土层浅薄, 植被覆盖度 < 35%, 岩石裸露

收稿日期: 2009-01-22; 改回日期: 2009-05-18

基金项目: 973 项目(编号: 2002CB4125)和国家自然科学基金项目(编号: 90202002)共同资助

第一作者简介: 倪雪波(1981—), 男, 博士生, 研究方向为喀斯特石漠化的遥感监测与分析, E-mail: nixuebo@163.com

\* 通讯作者: E-mail: wangshijie@vip.skeig.cn

> 65%; 轻度石漠化地区土壤侵蚀较明显, 植被覆盖度 35% ~ 50%, 岩石裸露 50% ~ 65%; 非石漠化地区土壤侵蚀不明显, 土层厚实, 植被覆盖度 50% 以

上。如图 1 中, 贵州西南部石漠化比较严重, 也是春旱发生频繁的地区<sup>[7]</sup>; 东部石漠化程度较轻, 夏旱频繁<sup>[7, 8]</sup>。

表 1 实验点的基础状况

Table 1 Basic conditions for the 13 selected sites

气象站点	经纬度(°)	石漠化程度	干旱年份	主要覆被类型
贵阳	E106.81, N26.56	无	2003 年夏季	草地
湄潭	E107.44, N27.67	无	2003 年夏季	林地
桐梓	E106.86, N28.03	无	2001 年夏季	混交林
铜仁	E109.12, N27.79	无	2003 年夏季	混交林
习水	E106.24, N28.24	无	2003 年夏季	混交林
遵义	E106.88, N27.77	无	2001 年夏季	林地
罗甸	E106.77, N25.55	轻度	无	林地
毕节	E105.11, N27.23	轻度	2001、2003 年春季	草地
凯里	E107.84, N26.64	轻度	2003 年夏季	混交林
威宁	E104.40, N26.96	轻度	2000、2001、2003 年春季; 2003 年夏季	林地
黔西	E105.99, N27.04	中强度	2003 年夏季	草地
望谟	E106.35, N25.22	强度	2004 年春季	混交林
盘县	E104.45, N25.75	中强度	无	草地

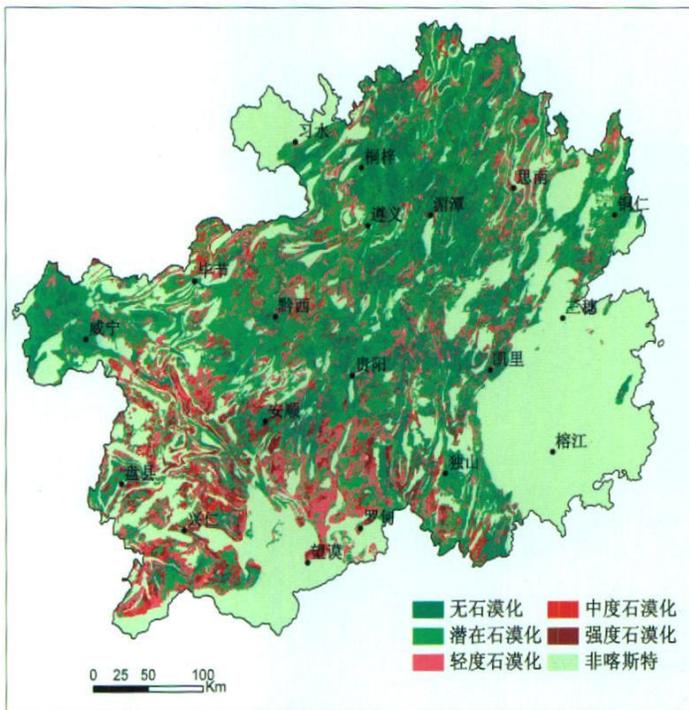


图 1 贵州省的石漠化分布情况<sup>[5]</sup>及实验点的分布

Fig. 1 Distribution of rocky desertification in Guizhou Province<sup>[5]</sup> and research sites

### 1.3 数据的处理

本文选用与净初级生产力和植被结构<sup>[9]</sup>都有很好相关性的植被指数 NDVI 来表征植被生长状况。

NDVI 由 2000 年 3 月 ~ 2004 年 12 月 MODIS 每 8 天的 250 m 红光 (620 ~ 670 nm)、近红外 (841 ~ 876 nm) 波段地表反射率 (<http://delenn.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/>) 计算获得。MODIS 传感器提供高分辨率 (最高 250 m)、少受水汽干扰的窄波段, 其陆地产品经过高精度的定标和大气校正, 8 天合成的反射率产品有效地降低了气溶胶、云、大气组分气体的干扰<sup>[10]</sup>。本文只选用质量控制标志中最佳质量的 MODIS 反射率数据。为了进一步减少残云的污染, 8 天合成的 NDVI 值复合成 16 天的合成值, 即选择相邻两个 NDVI 值中的大值<sup>[11]</sup> 表征 16 天内植被的生长状况。缺值的时间点用前后两个 NDVI 值的平均值替代, 每个点的 NDVI 为 7×7 象元的平均值。

站点的日降雨数据按 MODIS 16 天合成序列的时间跨度统计每 16 天的总降雨量。在干旱地区, 年降雨量少, 遥感观测的 NDVI 数据与全年尺度上的降雨量之间会有很好的相关性<sup>[12]</sup>, 但贵州省处于湿润多雨地区, 年降雨量 1 100 ~ 1 300 mm, 因此本文选择了植被生长期容易发生干旱的季节为研究对象。

### 1.4 对干旱敏感性的表示

贵州省全年降雨集中在 4 月至 10 月, 原本有利

于植被生长,但受到低纬副热带高压的影响,春季、夏季降雨偏少的情况时常发生<sup>[7,8]</sup>。本文先用回归方法分析了石漠化、非石漠化地区植被生长状况与春季、夏季降雨之间的相关性。在春季,NDVI 与降雨量均取每年 4、5 月份的平均值(MODIS 16 天合成序列中为 7~9 时间段);在夏季,降雨取每年 7、8 月份的平均值(13~15 时间段),而 NDVI 取 8 月到 10 月(生长期后期,MODIS 16 天合成序列中为 15~19 时间段)平均值。

为了观测石漠化地区植被对异常降雨的敏感性,选择了研究时间段内有春旱或夏旱发生的 11 个实验点(表 1),观测 NDVI 随降雨的变化。如果一年中 13~15 三个时间段上(7 月 12 日~8 月 28 日)降雨量均小于 50 mm<sup>[7]</sup>,且较其它年份偏少,则认为该年夏旱比较严重;如果一年中 7~9 三个时间段上(4 月 7 日~5 月 24 日)降雨量偏少,则认为春旱比较严重。植被生长状况的波动用 NDVI 异常值( $\Delta$ NDVI)表示,计算公式如下:

$$\Delta\text{NDVI}_{ij} = \text{NDVI}_{ij} - \text{NDVI}_j \quad (1)$$

其中  $\text{NDVI}_{ij}$  为  $i$  年(取 2000 至 2004 年) $j$  时间段(取 1 至 23)的 NDVI 值, $\text{NDVI}_j$  为  $j$  时间段五年的平均值,其中 1~3 时间段为 2001~2004 年的平均值。 $\Delta$ NDVI 表显示干旱发生时,植被生长状况与

正常降雨情况下的差异。

## 2 结 果

如图 2 中,在石漠化地区,NDVI 与降雨间有很好的相关性,生长初期 NDVI 与春季降雨间、生长后期 NDVI 与夏季降雨间的拟和方程分别是  $\text{NDVI} = 0.13 \times \ln P - 0.02$  ( $R^2 = 0.46$ ,  $p < 0.001$ )、 $\text{NDVI} = 0.07 \times \ln P + 0.30$  ( $R^2 = 0.30$ ,  $p < 0.001$ );而非石漠化地区则没有这种相关性。在图 3 NDVI 与降雨的时间序列中,植被生长状况随干旱的变化更加清楚:干旱发生时,石漠化地区 NDVI 明显低于其它降雨正常的年份(图 3a、c);而非石漠化地区 NDVI 较降雨充足的年份没有明显变化(图 3b、d)。夏旱发生后,石漠化地区植被在生长旺季因缺水生长受到影响,NDVI 先有小幅下降,在生长后期下降约 0.2NDVI(图 3a,2003 年有夏旱发生);而其它雨量丰富,或短期缺雨的年份,NDVI 没有大的波动,植被生长状况依旧。在 3c 中,毕节站点在 2000 年、2003 年春季降雨比其它年份同期偏少,对植被的生长产生了一定的影响,NDVI 下降约 0.1NDVI,这是由于在生长初期没有足够的降雨,植被抽芽受阻,生长期推迟;在雨季开始后,植被快速生长,因此 NDVI 下降的程度不如在夏旱发生后那样深。

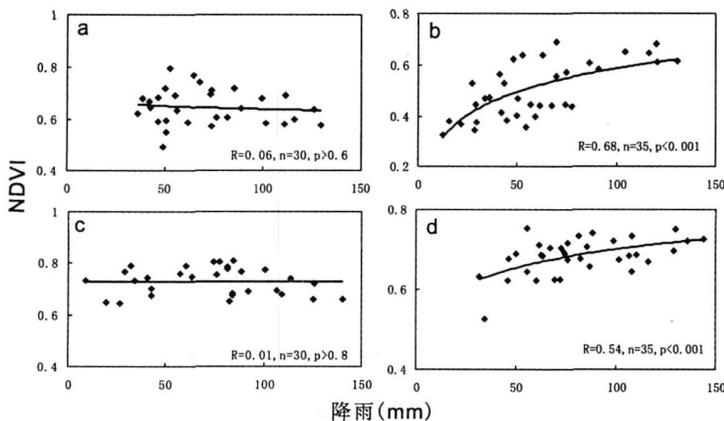


图 2 NDVI 与降雨的回归关系。a、b 分别为春季非石漠化、石漠化点; c、d 分别为夏季非石漠化、石漠化点。

参数的显著性检验用学生 t 检验法

Fig. 2 Regressions between NDVI and precipitation. a and c are spring droughts from non-desertification sites; b and d are summer droughts from rocky-desertification sites, and t is from Student's t-test.

## 3 讨 论

### 3.1 石漠化地区土壤蓄水能力下降

喀斯特地区成土困难,约 2000~000 年才能形

成 1 m 厚的土层;喀斯特土壤在岩土层之间缺少过渡层,土体极易容易滑动;石灰土疏松、渗漏强,因此西南喀斯特地区是十分脆弱的干旱生境。石漠化发生后,土壤沙化,团粒体结构破坏严重,毛管孔隙度

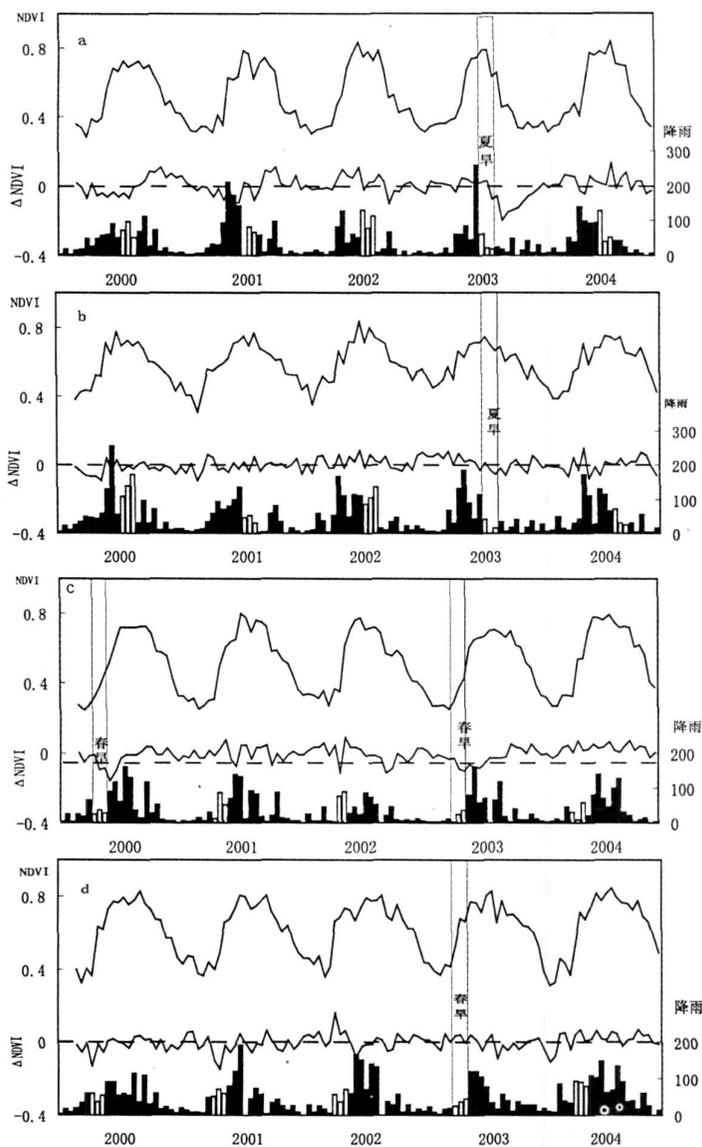


图3 黔西(a)、贵阳(b)、毕节(c)、习水(d)站点  
2000~2004年NDVI、 $\Delta$ NDVI及降雨(mm)的  
变化曲线,7、8月份降雨用空心方表示

Fig. 3 Time series of NDVI,  $\Delta$ NDVI and PPT (mm)  
at Qianxi (a), Guiyang (b), Bijie (c) and Xishui (d)  
from 2000 to 2004, and PPT in June and  
August are indicated by open squares

下降<sup>[13,14]</sup>,蓄水能力大大减弱,地质性干旱更加明显。石漠化过程中,植被从乔木为主退化为以灌木、草丛为主,甚至无植被覆盖的荒漠,而枯枝落叶的减少会削弱地表的保水性能,这也影响了石漠化地表的蓄水能力<sup>[15]</sup>。厚实的枯落物层在干旱时期帮助非石漠化地区维持了表层土壤较高的含水量,且强化了下层土壤液态水的再分配。对干旱期间土壤剖面的含水量研究表明<sup>[15]</sup>,以灌木、草丛等低矮、零星

分布的植被为主的石漠化地区,表层、中间层、深层土壤的含水量比以高大乔木为主的非石漠化地区分别低65%、48%、26%。因此在以灌木、草丛为主的石漠化地区,土壤的贮水量下降、贮水时间缩短<sup>[16]</sup>,干旱时期植被可利用的水分少,难以满足其生长需要。

### 3.2 植被根系对其水分利用的影响

在亚马逊热带雨林地区的研究表明<sup>[3]</sup>,森林保存完好的地区因为植被根系深,能利用土壤深部的水分而在干旱季节正常生长;在伐木严重而转变为农业用地的地区,因为深根的去,植被在干旱季节因为不能利用土壤深部的水分,其生长受到抑制。在石漠化地区,植被主要退化为草丛、灌木等低矮类型,根系短小,只能利用土壤浅层的水分,这也是石漠化地区对干旱敏感的重要原因。而非石漠化地区,高大乔木能很好地生长。虽然喀斯特地区土壤相比由其它母岩发育的土壤浅薄,但在长期的适应过程中,植被本身形成了石生性、旱生性的特点,湿润多雨的气候培育了石山上奇特的喀斯特森林。林木因为能利用土壤深处的水分,所以在地表临时缺水的情况下也能生存;而根系短小的灌木、草丛不能安全度过少雨的季节。另一方面,灌木、草丛因为只能利用土壤浅层的水而加快了水分蒸散,进而加剧地表的干旱。

### 3.3 干旱的影响

石漠化地区植被在生长初期比中后期对降雨的变化更敏感,生长期的开始时间受到春雨的及时性影响,而植被受夏季降雨的影响具有滞后性。贵州省从11月至次年3月便进入旱季,持续时间长,石漠化地区土壤蓄水少,因此在春季植被抽芽时节,植被生长与降雨有很强的相关性。在一些干旱地区的研究也表明,在生长初期NDVI随降雨的变化更及时,而生长中后期这种相应变化滞后的时间长<sup>[17]</sup>。由于数据的限制,所选择的石漠区实验点夏旱的强度较低且数量少,如图2b、d中,16天平均降雨量在50mm以下的点,春季较多,但夏季较少,这也影响了回归分析结果。

春旱发生的年份,NDVI减小主要是因为生长期推迟;而夏旱发生后,NDVI减小主要是因为植被干枯死亡。因此夏旱导致的植被生长受阻持续的时

间更长、程度更深。在图 3a、3c 中,这种差别也很明显。气候因素的变化对植被生长的影响主要是:生长周期的波动、生长期旺季生长的阻碍或促进<sup>[18]</sup>,而夏季植被生长受阻对植被净初级生产力的影响更大<sup>[19]</sup>。贵州省每年新增的石漠化面积大部分在夏旱容易发生的东部地区,因此干旱对该省带来的影响将日益严重。

## 4 结 论

石漠化地区是在湿润气候条件下的干旱生境,这对研究植被抵制干旱的机理提供了不同于干旱半

干旱地区的素材。文章利用遥感手段观测了石漠化地区植被对降雨变化的敏感性。结果表明,石漠化使得生态系统抵制干旱的能力减弱,NDVI 较降雨正常的年份明显降低;而非石漠化植被受干旱的影响很小。这是因为石漠化地区土壤层很薄,基岩致密,蓄水能力弱,且以草丛、灌木等为主的低矮植被根系短小,不能利用土壤深层的水分,因此植被对干旱的敏感性强。在石漠化地区,春季若出现降雨异常偏少,植被生长期将推迟;夏季若出现降雨异常偏少,植被生长受到滞后性的影响。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶 [ J ]. 2002, 21(2): 101—105
- [ 2 ] Lotsch A, Friedl M A, Anderson B T, *et al.* Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records[ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): doi: 10.1029/2003GL017506
- [ 3 ] Huete A R, Didan K, Shimabukuro Y E, *et al.* Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season[ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: doi: 10.1029/2005GL025583
- [ 4 ] Justice C O, Townshend J R G, Vermote E F, *et al.* An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*[ J ], 2002, 83(1—2): 3—15
- [ 5 ] Liu J Y, Zhuang D F, Luo D, *et al.* Land-cover classification of China: integrated analysis of AVHRR imagery and geophysical data. *International Journal of Remote Sensing*[ J ], 2003, 24(12): 2485—2500
- [ 6 ] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例[ C ]. 地质出版社, 北京, 2002
- [ 7 ] 徐丹丹, 谷晓平, 吴俊铭. 云贵喀斯特地区干旱时空分布规律研究. 贵州气象 [ J ], 2006, 30(2): 9—11
- [ 8 ] 刘雪梅, 宋国强, 程平顺, 等. 贵州省夏旱特征及分区研究[ J ]. 高原气象, 1997, 16(3): 292—299
- [ 9 ] Tucker C J, Sellers P J. Satellite remote sensing of primary production[ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1395—1416
- [ 10 ] Vermote E F, Saleous N Z E, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results[ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1—2): 97—111.
- [ 11 ] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417—1434
- [ 12 ] Tucker C J, Nicholson S E. Variation in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997[ J ]. *AMBIO*, 1999, 28: 587—591
- [ 13 ] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[ J ]. 土壤学报, 2005, 42(3): 419—427
- [ 14 ] 刘玉, 李林立, 赵柯, 等. 岩溶山地石漠化地区不同土地利用方式下的土壤物理性状分析[ J ]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 142—145
- [ 15 ] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响[ J ]. 土壤学报, 2006, 43(1): 26—32
- [ 16 ] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富. 岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性[ J ]. 土壤学报, 2004, 41(2): 196—202
- [ 17 ] Ji L, Peters A J. Lag and seasonality considerations in evaluating AVHRR NDVI response to precipitation [ J ]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(9): 1053—1061
- [ 18 ] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, *et al.* Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20069—20083
- [ 19 ] Kaufmann R K, D'Arrigo R D, Laskowski G, *et al.* The effect of growing season and summer greenness on northern forests[ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: doi: 10.1029/2004GL019608

## Remote Sensing of Land Sensitivity to Drought in a Karst Region of Southwest China

NI Xue-bo<sup>1,2,3</sup>, LIU Rong-gao<sup>2</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>

(1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China.; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China  
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Rocky desertification is widespread in a karst region of Southwest China and is likely to have severe effects on vegetation growth, especially when drought occurs. In this paper, we used Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 250m Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data collected from 2000 to 2004 as an indicator of vegetation growth to qualify how vegetation in this region in response to droughts in spring and summer. When drought occurred, pronounced NDVI declines were observed in rocky-desertification areas, but not in non-degraded karst areas. Spring drought response (SPDR) was immediate presumably because green-up was constrained by spring precipitation, and summer drought response (SUDR) was one-month lagged. Early growing season NDVI of SPDR and late growing season NDVI of SUDR were about 12% and 16% lower, respectively, than those of ordinary rainfall years; and physiologically, vegetation growth suffered much more from summer droughts. These results from remote sensing observations suggested that rocky desertification would make karst ecosystem become susceptible to climatic disturbances..

**Key words:** karst rocky desertification; MODIS NDVI; vegetation; drought sensitivity