

中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望

姚永慧

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要:石漠化是与北方荒漠化和黄土高原水土流失并列的中国三大土地退化问题之一。根据石漠化领域内的相关研究,系统总结了石漠化空间格局及动态过程研究、石漠化发展演化的机理研究等方面的进展与不足,提出构建基于中高分辨率遥感数据的石漠化时序轨迹新方法,并在此基础上进行长时间序列的石漠化过程分析,从时间和空间上定量、定位追踪石漠化的发展演化过程,不仅可以查明石漠化的发生地点及程度,还可以分析其发生和演化机理。将石漠化格局、过程与成因定量分析相结合,可以从更长的时间段内,更加精确地研究石漠化的时空变化规律,全面系统地揭示石漠化演化机制。

关 键 词:喀斯特;石漠化;遥感;动态变化;时序轨迹分析;中国西南

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.01.009

中图分类号:P95

文献标识码:A

1 引言

中国南方的云南、贵州、四川、重庆、广西、湖南和湖北七省(市、区),是中国喀斯特分布最集中的地区,全区总面积 $176.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中裸露与半裸露的碳酸盐岩分布面积占41.3%(卢耀如, 2003);区内石漠化等环境问题十分严重,部分省区石漠化土地占岩溶地貌总面积的30%~40%(表1)。

自然环境因素和人类活动因素的叠加是石漠化发生的主要原因:①石漠化与其地质地貌环境背景有很大关系。以贵州为例,贵州东部、东北部赤水一带和南、北盘江河谷区等岩溶不发育的地区,石漠化程度较轻,大多数地区无石漠化或无明显石漠化,轻度以上石漠化土地占比多数小于10%,生态环境较好;贵州西部、西南、南部和中部部分地区是喀斯特景观发育的地区,石漠化较严重,轻度以上石漠化土地占比多数大于30%;贵州中部和北部部分地区的石漠化程度界于前两者之间,轻度以上石漠化土地面积占比多在10%~30%之间;此外,中山和丘陵区也是石漠化的高发区(熊康宁等, 2002)。②喀斯特地区土地资源匮乏,可耕地面积少,而人口众多,人地矛盾突出。目前过度放牧、毁林开荒、火烧和樵采等人类活动导致植被

破坏,继而发生水土流失,是石漠化的主导因素。作为喀斯特地区土壤侵蚀的终极状态,石漠化正逐渐演变为继北方沙漠化和黄土高原地区水土流失之后的中国第三大土地退化问题(吴秀芹等, 2006),严重阻碍中国经济与环境的可持续发展。在国家“十五”和“十一五”规划纲要中,都明确将石漠化治理作为国计民生的大事,强调要“加快小流域治理,减少水土流失,推进黔桂滇喀斯特地区石漠化综合治理”,“巩固和发展退耕还林成果,继续推进退牧还草、天然林保护等生态工程,加强植被保护,加大荒漠化和石漠化治理力度,加强重点区域水污染防治”。

脆弱的喀斯特生境因此成为当前地理学界的研究热点(李阳兵等, 2002),大批学者分别从喀斯特石漠化的环境地质背景、地理地貌背景、地表作用过程及人地关系等角度对石漠化的形成和发展进行了研究,并尝试揭示其演化的驱动机制。

本文首先系统总结了石漠化相关研究的进展与不足,然后介绍了基于中高分辨率遥感数据的石漠化时序轨迹新方法,指出它可以从更长的时间段内,更加精确地研究石漠化的时空变化规律,全面系统地揭示石漠化演化机制,在未来研究中将得到更多应用。

收稿日期:2013-10; 修订日期:2013-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(41001278)。

作者简介:姚永慧(1975-),女,湖北安陆人,助理研究员,主要从事GIS、RS应用与山地环境研究,E-mail: yaoyh@lreis.ac.cn。

表1 1986–2000年贵州省不同石漠化类型在岩溶区的面积和占比

Tab.1 Areas and proportions of different rocky desertification types in Karst area of Guizhou during 1986–2000								
石漠化类型		无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	强度石漠化	极强度石漠化	已石漠化
1986年	面积/km ²	38527.42	32089.88	23618.23	13001.4	2191.04	19.13	38829.80
	占比/%	35.20	29.32	21.58	11.88	2.00	0.02	35.48
1995年	面积/km ²	38260.66	32623.36	22950.51	13378.79	2214.66	19.12	38563.08
	占比/%	34.96	29.81	20.97	12.22	2.02	0.02	35.23
2000年	面积/km ²	38725.33	31818.67	23695.15	12985.68	2203.02	19.26	38903.11
	占比/%	35.38	29.07	21.65	11.86	2.01	0.02	35.55

注：已石漠化土地=轻度以上石漠化土地(轻度+中度+强度+极强度)(引自白晓水等, 2009)。

2 主要研究进展

2.1 石漠化的地质地貌背景:喀斯特地貌

在喀斯特地貌研究方面,根据 Davis 和 Ground 提出的喀斯特地区地理循环理论和中国喀斯特研究实践,国内学者提出了中国喀斯特地貌发育理论及演化序列(任美镠等, 1983; 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1981)。

在后续研究中,有学者提出,受地质构造的影响,喀斯特演化是多旋回的,不同旋回的喀斯特地貌可以迭加在一起,出现幼年期、青年期和中年期喀斯特地貌并存的现象(宋林华, 2000; 宋林华等, 1995; 朱德浩, 1985),并研究了各类地貌的形成原因和过程(Song et al, 2004; 林钧枢, 1997; 宋林华等, 2003;熊康宁, 1994);提出了深部喀斯特发育机理(任美镠等, 1983),分析了喀斯特地区的溶蚀速率与强度(房金福等, 1993; 李钜章等, 1994)。

在喀斯特生态系统方面,袁道先主持的喀斯特地区生态环境研究计划和国际岩溶对比研究计划,对喀斯特地区的地质环境背景、岩溶生态系统的运行规律、岩溶系统与人类活动的相互作用关系等方面开展了系统研究,并取得显著成果(何师意等, 2001; 袁道先, 1993, 2001; 章程, 2006; 张跃红等, 2012)。

2.2 石漠化生态恢复及治理

在石漠化生态恢复与治理方面,学者们从种群、群落及其相应的生境出发,对喀斯特森林的特点、组成、结构、功能与演替规律进行了系统研究,并提出了石灰岩山地植被自然恢复与现存植被改造利用途径(屠玉麟, 1989; 朱守谦, 1997, 2003)。

与此同时,开展了对喀斯特森林及植被退化原因、过程以及恢复和重建的研究(王德炉等, 2003a; 杨胜天等, 2000; 姚长宏等, 2001; 喻理飞等, 1998),

对退化的喀斯特植被的恢复过程及演替规律(王德炉等, 2003a; 喻理飞等, 1998)、相应恢复阶段的土壤理化性质(王德炉等, 2003b; 魏媛等, 2008)、碳酸盐岩的溶蚀与风化成土速率等方面进行了研究(白占国等, 1998, 2002; 孙承兴等, 2002; 王世杰等, 1999; 杨胜天等, 2005),并尝试用定量的方法和模型来描述喀斯特环境退化和恢复速率、退化植被与土壤水分含量等下垫面的关系(王玉娟等, 2008; 杨汉奎等, 1994; 杨胜天等, 2000, 2007)。

2.3 石漠化空间格局及成因

相关的空间格局研究主要在贵州、广东和广西等地展开,并且主要利用2000年的 Landsat TM 影像来提取石漠化现状信息,在此基础上利用统计分析方法研究石漠化的驱动机制(王金华等, 2007; 吴良林等, 2009)。

例如,熊康宁等(2002)利用2000年的 Landsat TM 影像结合地面调查数据,将贵州喀斯特石漠化程度划分为6个等级,通过人机交互解译,建立了贵州不同等级石漠化的空间数据库,查明了贵州喀斯特石漠化的现状、分布和发展趋势,在相关分析的基础上建立了石漠化演化的动力指数模型。

胡宝清等(2006a, 2006b)同样使用2000年 TM 数据,提取了广西石漠化强度和空间分布信息,在此基础上,利用相关分析、因子分析及多元回归分析方法对石漠化的驱动因子进行分析,建立了喀斯特石漠化动力指数模型,计算出各因子对石漠化的贡献值,并指出石漠化产生的主导原因是不合理的人为活动(胡宝清等, 2004, 2006a, 2006b; 蒋树芳等, 2004)。随后,利用区域的综合分析和一定的数学模型,对土地退化的生态破坏度和区域环境灾害风险度进行了定性与定量相结合的综合评价与分区(胡宝清等, 2006a, 2006b),并对喀斯特石漠化地区的农业发展模式提出了建议(胡宝清等, 2008)。

2.4 石漠化动态变化及成因

在石漠化动态变化及其成因研究方面,主要利用2到3期Landsat TM数据,提取各期石漠化类型信息,并比较和分析各期之间的变化情况。

例如,白晓永等(2009)利用1986、1995、2000年3期历史石漠化数据,通过空间分析和转移矩阵,探讨及评价了贵州省石漠化的时空演变过程;王兮之等(2007)根据1988年和2004年TM影像,在GIS和FRAGSTAT景观格局分析软件支持下,定量分析了粤北典型岩溶山区及其4县(市)的土地石漠化类型变化及其景观格局时空动态特征,并且从自然因素和人为因素两个方面论述了中国南方岩溶地区石漠化过程及成因,提出了石漠化发展的一般模式。

研究者指出,一方面,南方岩溶区存在土地石漠化的自然过程,而另一方面,人类不合理的经济活动加速和加剧了土地石漠化进程;石漠化过程是由植被退化演替过程、土壤侵蚀过程、地表水流失过程、碳酸盐岩溶蚀侵蚀过程、土地生物生产力退化过程组合而成的地表生态过程(李森等, 2007; 王兮之等, 2007; 魏兴琥等, 2008)。

2.5 石漠化驱动机制研究

在石漠化驱动机制的定量研究方面,自然因素的定量化研究发展较快,近年来有较研究根据DEM、遥感影像、地质地貌图,获得相应的岩性分布、坡度/坡向和地貌类型信息等,将其与石漠化现状数据作相关分析,通过统计不同岩性、不同坡度等级和不同地貌类型中各级石漠化强度所占的比重,来定量描述自然因素对石漠化的影响(胡宝清等, 2004; 李阳兵等, 2009; 吴良林等, 2009; 熊康宁等, 2002; 张殿发等, 2002)。

相比之下,人文因素的定量化研究则一直比较薄弱,主要按照行政单元采集人文影响因子,基于传统统计学分析方法来研究石漠化现状信息与人文因素的关系(胡宝清等, 2004; 蒋树芳等, 2004; 李森等, 2007; 熊康宁等, 2002)。

除上述基于传统统计分析的驱动因素分析外,还有一部分研究者从人地关系的角度探讨喀斯特地区环境退化问题(苏维词, 2007; 蔡运龙, 1996; 王磊等, 2011),系统研究了土地利用/土地覆盖状况对土壤侵蚀、土地退化及生态重建的影响,提出喀斯特地区人地矛盾关系十分突出,中国西南喀斯特生态环境脆弱,在人口增长和经济发展的压力下,让退化土地自然恢复的思路已不切实际,必须通过社

会投入,对退化土地进行生态重建(彭建等, 2007; 万军等, 2003; 吴秀芹等, 2005, 2006)。

2.6 石漠化动态监测技术与方法

石漠化遥感监测为近年来迅速发展的石漠化时空格局研究提供了数据支撑,其本身的技术和方法也是石漠化研究的一个热点。

从已有的研究来看,主要是利用Landsat TM/ETM影像,通过人机交互解译或目视解译的方法提取石漠化信息(胡宝清等, 2006a, 2006b; 王金华等, 2007; 吴良林等, 2009; 熊康宁等, 2002);在变化探测方法上,主要采用双时序变化探测方法,即根据2到3期遥感影像,比较两个时相上的变化(白晓永等, 2009; 王兮之等, 2007);变化探测的时段主要集中在1986-2000年之间(白晓永等, 2009; 李森等, 2007; 王兮之等, 2007; 魏兴琥等, 2008)。总的来看,石漠化遥感监测使用的方法还比较传统,没有从较长的时间段内追踪石漠化的变化过程。

3 存在的主要问题

从上述分析来看,喀斯特石漠化研究虽然取得了很大的进展,但也存在以下几个明显的薄弱环节:

(1) 对石漠化空间格局即现状研究较多,而对石漠化过程研究较少。目前多是将石漠化现状作为一段时间内的结果开展研究,或从土地利用与土地覆盖变化的角度来进行动态分析,不利于深入研究石漠化演化过程及其成因。

(2) 在石漠化遥感变化探测方面,主要利用双时序分析方法进行两个时相或多个时相之间的对比,未能在一个连续的长时段内追踪时空上的演化过程。受遥感数据源的限制(主要利用Landsat TM/ETM影像),变化研究的时段主要集中在1986-2000年间,虽然在石漠化空间格局方面取得了很大的进展,但不利于揭示更长时间尺度上的规律。已有研究表明,1980年以前,即中国经济体制改革前,人类活动对石漠化的影响强度与1980年以后相比,存在显著的不同(李森等, 2007);1995年国家实施生态退耕、加大环境保护力度以后,人类活动对石漠化的影响也与此前有很大区别。因此,1986年以前和2000年以来,也是研究石漠化过程和成因时不可忽视的两个重要时段。

(3) 对石漠化过程中人为和自然因素影响的定量研究严重不足,尤其缺乏对人为因素的探讨。现

有研究多是按行政单元进行的基于传统统计方法成因分析,而不是按照实际空间位置进行的空间统计分析;按行政单元进行的人文要素分析也无法与自然要素的定量分析相匹配。同时,在分析成因时多是利用石漠化现状数据,因此很难从真正意义上厘清石漠化的驱动机制。

因此,针对中国西南喀斯特石漠化的研究,有必要进一步加强石漠化动态遥感监测方法,并在更长的时间序列上开展考察,以促进石漠化过程及成因机制探讨。

4 石漠化过程研究新方法:时序轨迹分析

4.1 时序轨变分析方法的特点

涉及遥感动态监测的方法很多,总的来说可以归为两类:基于高空间分辨率遥感数据的双时序变化检测方法和基于高时间分辨率遥感数据的时序轨迹分析方法(Coppin et al, 2004; Zhou et al, 2008)。目前的石漠化遥感监测方法主要采用的是双时序变化检测方法,由于这类研究方法是基于“两个时间旋回”尺度上的变化研究(Coppin et al, 2004),对于石漠化来讲,只能获得两个探测日期之间“变化/无变化”或“从什么变化为什么”的信息,难以深入研究石漠化的发展过程。

时序轨迹分析方法研究的是一个“连续”时间尺度上的变化信息,这种方法不仅关注两个时间段内发生了什么变化,更重要的是关注这种变化产生的过程(Coppin et al, 2004),因此在揭示动态过程方面具有优势。但是,这种方法是基于高时间分辨率、低空间分辨率的遥感数据如 AVHRR 或 MODIS 而发展起来的,虽然有利于反映时间上的变化趋势,但由于其对空间信息的反映存在不足,其应用和发展受到很大限制,通常被用来进行大区域植被动态变化(Dessay et al, 2004; Olsson et al, 2003)或某一类土地覆盖类型变化轨迹的研究(Liu et al, 2005; Southworth et al, 2002)。

随着中、高分辨率遥感影像数据的积累,将具有高空间分辨率的双时序变化检测与具有高时间分辨率的时序轨迹分析法相结合进行环境变化研究,将成为今后的一个趋势。Zhou 等(2008a, 2008b)基于中高分辨遥感影像,成功建立了一套高

效可行的时序轨迹分析方法,并对新疆尉犁县的土地覆盖变化的时序轨迹和空间格局进行了分析,定量分析了自然因素和人类活动对土地覆盖变化的影响。上述研究表明,时序轨迹分析方法在研究环境变化过程及定量分析成因机制方面具有明显优势。这种方法通过改进,也可以在石漠化演化研究方面得到应用。

4.2 基于中高分辨率遥感数据的石漠化时序轨迹分析

为了突破双时序遥感监测的瓶颈,既了解石漠化的变化情况,也了解变化的过程及其空间位置,迫切需要既能追踪石漠化演化过程、又具有较高时空分辨率的遥感监测方法,基于中高分辨率遥感数据的石漠化时序轨迹分析方法便可满足这一要求。

近几十年来,随着对地观测技术的迅速发展,遥感数据成为环境变化研究的重要数据源,已积累的大量遥感数据使得展开环境变化时空格局研究及其受人类活动的影响成为可能(Zhou et al, 2008a, 2008b)。特别是1995和2002年,美国先后解密了两批20世纪60-80年代的高分辨率监视卫星数据(CORONA, KH-7/KH-9, 均为灰度图像),使得遥感动态监测的时段向前扩展到20世纪60年代。

据此建立的起于20世纪60年代的基于中高分辨率遥感影像的石漠化时序轨迹分析方法,能够从更长的时间段上来监测石漠化的变化情况,从而可以更加完整地揭示石漠化发展过程。例如,假设研究1973-2006年间的石漠化演化过程,在某一空间单元内,从林地演化为草地,再被开垦为耕地,进而演化为轻度石漠化土地、中度石漠化土地或强度石漠化土地,就是一个典型的演化轨迹(图1)。通过石漠化演化轨迹的追踪,我们可以探索石漠化发生的过程和趋势。

5 未来石漠化研究趋势:格局、过程与机理的结合

以上分析表明,基于中高分辨率遥感数据,将石漠化格局、过程与成因定量分析相结合,是未来石漠化研究的发展趋势。

(1) 基于多源、多时相中高分辨率遥感影像,建立具有较高时空分辨率的石漠化遥感探测新方法,

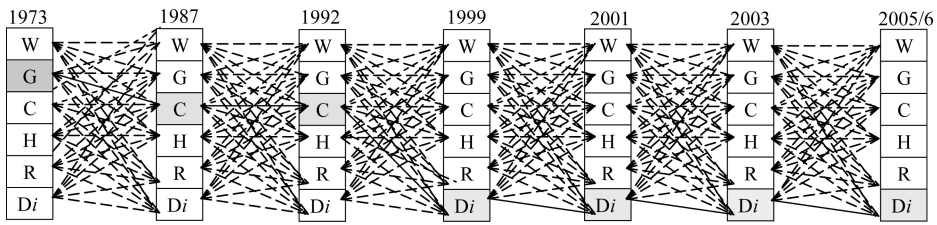


图1 石漠化时序轨迹分析示意图

(其中W:林地; G:草地; C:耕地; H:居民地及建筑用地等; R:水域; D:石漠化土地; $i=1\sim4$, 代表石漠化程度)

Fig.1 Schematic diagram of rocky desertification temporal trajectory analysis

进行石漠化时序轨迹分析,可以定量、定位地追踪每一空间位置上石漠化演化轨迹,不仅可以查明石漠化的发生地点及程度,还可以分析其发生和演化机理。这样就可以从更长的时间尺度上更加精确地研究石漠化的时空变化规律,全面系统地揭示石漠化发展过程。

(2) 在充分研究石漠化过程的基础上,定量分析自然因素和人文因素、特别是后者所起的作用,从更深的层次上揭示石漠化的驱动机制,弥补以往在驱动因素定量研究方面的不足。

(3) 通过对石漠化格局、过程及成因的定量分析,其数据和结果能够为区域生态修复和调控提供必要的基础,促进石漠化地区的环境治理与可持续发展。

参考文献(References)

- 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 2009. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价. 地理学报, 64(5): 609-618. [Bai X Y, Wang S J, Chen Q W, et al. 2009. Evaluation and the process of rocky desertification in Guizhou. Acta Geographica Sinica, 64(5): 609-618.]
- 白占国, 万国江. 1998. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 4(1): 1-7. [Bai Z G, Wan G J. 1998. Study on erosion rate and the environmental effect of carbonate rocks in Guizhou. Journal of Soil and Water Conservation, 4(1): 1-7.]
- 白占国, 万国江. 2002. 滇西和黔中表土中 ^{7}Be 与 ^{137}Cs 分布特征对比研究. 地理科学, 22(1): 43-48. [Bai Z G, Wan G J. 2002. A comparative study on distribution of ^{7}Be and ^{137}Cs in the topsoil of the west Yunnan and the central Guizhou. Scientia Geographica Sinica, 22(1): 43-48.]
- 蔡运龙. 1996. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. 地球科学进展, 11(6): 602-606. [Cai Y L. 1996. Ecological reconstruction in karst mountain poverty areas of the Southwest China. Advances in Earth Science, 11(6):

602-606.]

- 房金福, 林钧枢, 李钜章. 1993. 喀斯特区现代溶蚀强度与环境的研究: 以红水河流域为例. 地理学报, 48(2): 122-130. [Fang J F, Lin J S, Li J Z. 1993. Modern erosion intensity and environment in Karst district: a case study on the Red River catchment. Acta Geographica Sinica, 48(2): 122-130.]
- 何师意, 冉景丞, 袁道先, 等. 2001. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究. 地球学报, 22(2): 159-164. [He S Y, Ran J C, Yuan D X, et al. 2001. Study on hydrological and ecological effects in different Karst ecosystems. Journal of Earth Science, 22(2): 159-164.]
- 胡宝清, 陈振宇, 饶晓雪. 2008. 西南喀斯特地区农村特色生态经济模式探讨: 以广西都安瑶族自治县为例. 山地学报, 26(6): 684-691. [Hu B Q, Chen Z Y, Rao Y X. 2008. Discussion on eco-economic mode of rural Karst area in Southwest China: a case study of Du'an Yao Autonomous County of Guangxi. Journal of Mountain Science, 26(6): 684-691.]
- 胡宝清, 严志强, 廖赤眉, 等. 2004. 喀斯特石漠化与地质—生态环境背景的空间相关性分析: 以广西都安瑶族自治县为例. 热带地理, 24(3): 226-230. [Hu B Q, Yan Z Q, Liao C M, et al. 2004. Spatial correlation analysis of Karst rocky desertification and geological, ecological environment: a case study of Du'an Yao Autonomous County of Guangxi. Tropical Geography, 24(3): 226-230.]
- 胡宝清, 严志强, 廖赤眉. 2006a. 基于3S技术的广西喀斯特石漠化驱动机制图谱分析: 以广西壮族自治区为例. 山地学报, 24(2): 234-241. [Hu B Q, Yan Z Q, Liao C M. 2006a. Tupu analysis of the driving mechanism of Karst rocky desertification in Guangxi based on 3S Technology. Journal of Mountain Science, 24(2): 234-241.]
- 胡宝清, 严志强, 廖赤眉. 2006b. 基于GIS的喀斯特土地退化灾害风险评价: 以广西都安瑶族自治县为例. 自然灾害学报, 15(4): 100-106. [Hu B Q, Yan Z Q, Liao C M. 2006b. Evaluation of disaster risk of Karst land degradation based on GIS in Du'an Yao Autonomous County of

- Guangxi. *Journal of Natural Disasters*, 15(4): 100-106.]
- 蒋树芳, 胡宝清, 黄秋燕, 等. 2004. 广西都安喀斯特石漠化的分布特征及其与岩性的空间相关性. *大地构造与成矿学*, 28(2): 214-219. [Jiang S F, Hu B Q, Huang Q Y, et al. 2004. Spatial distribution characteristics of Karst rocky desertification and Spatial correlation analysis between them and lithology in Du'an of Guangxi. *Tectonics and Metallogeny*, 28(2): 214-219.]
- 李钜章, 林钧枢, 房金福. 1994. 喀斯特溶蚀强度分析与估算. *地理研究*, 13(3): 90-97. [Li J Z, Lin J S, Fang J F. 1994. Analysis and estimation of Karst erosion intensity. *Geographical Research*, 13(3): 90-97.]
- 李森, 魏兴琥, 黄金国, 等. 2007. 中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程. *中国沙漠*, 27(6): 918-926. [Li S, Wei X H, Huang J G, et al. 2007. Cause and process of the Karst rocky desertification of South China. *Chinese Desert*, 27(6): 918-926.]
- 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 2002. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 22(3): 365-371. [Li Y B, Hou J Y, Xie D T. 2002. Karst ecological research progress in Southwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 22(3): 365-371.]
- 李阳兵, 王世杰, 周梦维, 等. 2009. 不同空间尺度下喀斯特石漠化与坡度的关系. *水土保持研究*, 16(5): 70-77. [Li Y B, Wang S J, Zhou M W, et al. 2009. The relationship between Karst rocky desertification and slope under different spatial scales. *Research of Soil and Water Conservation*, 16(5): 70-77.]
- 林钧枢. 1997. 路南石林形成过程与环境变化. *中国岩溶*, 16(4): 346-350. [Lin J S. 1997. The formation and environmental change of Lunan Stone Forest. *Carsologica Sinica*, 16(4): 346-350.]
- 卢耀如. 2003. 地质—生态环境与可持续发展: 中国西南及邻近岩溶地区发展途径. 南京: 河海大学出版社. [Lu Y R. 2003. *Geology-ecological environment and sustainable development: development approaches for Karst region in Southwest China and the neighboring areas*. Nanjing, China: Hehai University Press.]
- 彭建, 蔡运龙, Verburg P H. 2007. 喀斯特山区土地利用/覆被变化情景模拟. *农业工程学报*, 23(7): 64-71. [Peng J, Cai Y L, Verburg P H. 2007. Scene simulation for land use and land cover in Karst mountain area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23(7): 64-71.]
- 任美镔, 刘振中. 1983. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆. [Ren M E, Liu Z Z. 1983. *Introduction to karstology*. Beijing, China: The Commercial Press.]
- 宋林华. 2000. 喀斯特地貌研究进展与趋势. *地理科学进展*, 19(3): 193-200. [Song L H. 2000. Progress and research trend of Karst geography. *Progress in Geography*, 19(3): 193-200.]
- 宋林华, 房金福, 邓自民, 等. 1995. 喀斯特洼地的分形特性研究. *地理研究*, 14(1): 8-16. [Song L H, Fang J F, Deng Z M, et al. 1995. Fractal characteristics for Karst depression. *Geographical Research*, 14(1): 8-16.]
- 宋林华, 王静, 林钧枢, 等. 2003. 福建龙岩龙石空洞发育双酸模式. *地理科学进展*, 22(5): 524-531. [Song L H, Wang J, Lin J S, et al. 2003. Double acid pattern for dragon stone cave development in Fujian Longyan. *Progress in Geography*, 22(5): 524-531.]
- 宋林华, 王静, 梁福源, 等. 人类和自然因素对风景旅游洞穴环境的影响研究. *中国岩溶*, 23(2): 91-99. [Song L H, Wang J, Liang F Y, et al. 2004. Effect of human and natural factors on the environment of show caves. *Carsologica Sinica*, 23(2): 91-99.]
- 苏维词. 2007. 西南喀斯特山区乡村可持续发展的驱动因子及其导向模式初探. *农业系统科学与综合研究*, 23(2): 152-157. [Su W C. 2007. Driving factors and demonstration models of rural sustainable development in Karst mountain region in the Southwest China. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 23(2): 152-157.]
- 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 2002. 碳酸盐岩差异风化成土特征及其对石漠化形成的影响. *矿物学报*, 22(4): 308-314. [Sun C X, Wang S J, Zhou D Q, et al. 2002. Carbonate rock weathering characteristics and its implication on Karst rock desertification. *Journal of Minerals*, 22(4): 308-314.]
- 屠玉麟. 1989. 贵州喀斯特森林的初步研究. *中国岩溶*, 8(4): 282-290. [Tu Y L. 1989. Preliminary study on Guizhou Karst forest. *Carsologica Sinica*, 8(4): 282-290.]
- 万军, 蔡运龙. 2003. 喀斯特生态脆弱区的土地退化及生态重建: 以贵州省关岭县为例. *中国人口·资源与环境*, 13(2): 52-56. [Wan J, Cai Y L. 2003. Degradation and ecological reconstruction in Karst fragile ecological area: a case study of Guanling, Guizhou. *China Population, Resources and Environment*, 13(2): 52-56.]
- 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 2003a. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 27(3): 26-30. [Wang D L, Zhu S Q, Huang B L. 2003a. The changes of vegetation features in the process of Karst rocky desertification in Guizhou. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 27(3): 26-30.]
- 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 2003b. 石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究. *山地农业生物学报*, 22(3):

- 204-207. [Wang D L, Zhu S Q, Huang B L. 2003b. A preliminary study on the change of physical and chemical properties of soil in the process of Karst rocky desertification. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 22(3): 204-207.]
- 王金华, 李森, 李辉霞, 等. 2007. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析: 粤北岩溶山区为例. *中国沙漠*, 27(5): 765-770. [Wang J H, Li S, Li H X, et al. 2007. Indications for classification of rocky desertification and their features of remote sensing image: a case study in the north Guangzhou. *Chinese Desert*, 27(5): 765-770.]
- 王磊, 蔡运龙. 2011. 人口密度的空间降尺度分析与模拟: 以贵州猫跳河流域为例. *地理科学进展*, 30(5): 635-640. [Wang L, Cai Y L. 2011. Spatial down-scaling analysis and simulation of population density in Maotiaohe Basin, Guizhou Province. *Progress in Geography*, 30(5): 635-640.]
- 王世杰, 季阳兵, 欧阳自远. 1999. 碳酸岩风化成土的作用研究. *中国科学: D辑*, 29(5): 441-449. [Wang S J, Ji Y B, Ouyang Z Y. 1999. Study on effect of Carbonate rock weathering. *China Science: Ser. D*, 29(5): 441-449.]
- 王兮之, 李森, 王金华. 2007. 粤北典型岩溶山区土地石漠化景观格局动态分析. *中国沙漠*, 27(5): 758-764. [Wang X Z, Li S, Wang J H. 2007. Analysis of dynamic landscape pattern of karst rocky desertification in the north of Guangdong. *Chinese Desert*, 27(5): 758-764.]
- 王玉娟, 杨胜天, 温志群, 等. 2008. 贵州典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水分及其影响因子研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 44(5): 529-532. [Wang Y J, Yang S T, Wen Z Q, et al. 2008. Study on soil moisture and its influence factors in Karst shrub and grass land in Guizhou Karst area. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 44(5): 529-532.]
- 魏兴琥, 李森, 罗红波, 等. 2008. 粤北石漠化过程土壤与植被变化及其相关性研究. *地理科学*, 28(5): 662-666. [Wei X H, Li S, Luo H B, et al. 2008. Study on the changes of soil and vegetation and their correlation on the process of rocky desertification in north of Guangdong. *Scientia Geographica Sinica*, 28(5): 662-666.]
- 魏媛, 张金池, 喻理飞. 2008. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 32(5): 71-75. [Wei Y, Zhang J C, Yu L F. 2008. Changes of soil microbial biomass carbon in the process of karst vegetation restoration. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 32(5): 71-75.]
- 吴良林, 陈秋华, 卢远, 等. 2009. 基于GIS/RS的桂西北土地石漠化与喀斯特地形空间相关性分析. *中国水土保持科学*, 7(4): 100-105. [Wu L L, Chen Q H, Lu Y, et al. 2009. Spatial correlation analysis of rocky desertification and Karst terrain based on GIS and RS. *China Science of Soil and Water Conservation*, 7(4): 100-105.]
- 吴秀芹, 蔡运龙, 蒙吉军. 2005. 喀斯特山区土壤蚀与土地利用关系研究. *水土保持研究*, 12(4): 46-48. [Wu X Q, Cai Y L, Meng J J. 2005. Study on the relationship between soil erosion and land use in Karst mountainous area. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(4): 46-48.]
- 吴秀芹, 蔡运龙. 2006. 我国亚热带喀斯特生态环境演变研究进展. *自然科学进展*, 16(3): 267-272. [Wu X Q, Cai Y L. 2006. Progress for evolution of subtropical karst environment in China. *Progress in Natural Science*, 16(3): 267-272.]
- 熊康宁. 1994. 关于锥状喀斯特与塔状喀斯特的水动力成因研究: 以黔中地区为例. *中国岩溶*, 13(3): 237-246. [Xiong K N. 1994. Study on hydrodynamic origin of cone Karst and tower Karst: a case study on central of Guizhou. *Carsologica Sinica*, 13(3): 237-246.]
- 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 2002. 喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究: 以贵州省为例. 北京: 地质出版社. [Xiong K N, Li P, Zhou Z F, et al. 2002. Study on rocky desertification based on remote sensing and GIS: a case of Guizhou. Beijing, China: Geological Publishing House.]
- 杨汉奎, 朱孝文, 李坡, 等. 1994. 喀斯特环境质量变异. 贵阳: 贵州科技出版社. [Yang H K, Zhu X W, Li P, et al. 1994. Karst environmental quality variation. Guiyang, China: Guizhou Science and Technology Press.]
- 杨胜天, 田雷. 2005. 喀斯特地区土壤水分层均衡模型应用研究. *中国岩溶*, 24(3): 186-191. [Yang S T, Tian L. 2005. Application of water balance model for soil layer in Karst area. *Carsologica Sinica*, 24(3): 186-191.]
- 杨胜天, 王玉娟, 温志群, 等. 2007. 典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水变化规律研究. *水土保持通报*, 27(4): 100-106. [Yang S T, Wang Y J, Wen Z Q, et al. 2007. Study on the variation of soil moisture in Karst shrub and grass land. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 27(4): 100-106.]
- 杨胜天, 朱启疆. 2000. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率. *地理学报*, 55(4): 459-466. [Yang S T, Zhu Q J. 2000. The degradation and recovery rates of natural environment in Karst Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 55(4): 459-466.]
- 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 2001. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. *地球学报*, 22(2): 159-164. [Yao C H, Jiang Z C, Yuan D X. 2001. Karst effect of vegetation in the Southwest of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(2): 159-164.]

- 喻理飞, 朱守谦, 魏鲁明, 等. 1998. 退化喀斯特群落自然恢复过程研究: 自然恢复演替系列. 山地农业生物学报, 17(2): 71-77. [Yu L F, Zhu S Q, Wei L M, et al. 1998. Study on the natural restoration process of degraded Karst vegetation communities. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 17(2): 71-77.]
- 袁道先. 1993. 碳循环与全球岩溶. 第四纪研究, (1): 1-6. [Yuan D X. 1993. Carbon cycle and global Karst. *Quaternary Sciences*, (1): 1-6.]
- 袁道先. 2001. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标与执行计划. 地球科学进展, 16(4): 461-466. [Yuan D X. 2001. Global comparison of karst ecosystem: objectives and implementation plan. *Advances in Earth Science*, 16(4): 461-466.]
- 章程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 2006. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究: 以重庆金佛山国家级自然保护区为例. 地球科学进展, 27(5): 510-514. [Zhang C, Jiang Z C, He S Y, et al. 2006. Study on the characteristics of karst dynamic system in altitudinal climate belts. *Advances in Earth Science*, 27(5): 510-514.]
- 张殿发, 王世杰, 周德全, 等. 2002. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制: 以贵州省喀斯特山区为例. 农村生态环境, 18(1): 6-10. [Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q, et al. 2002. The eco-geological environment of rocky desertification and its driving mechanism: a case study of Guizhou Karst mountain area. *Rural Ecological Environment*, 18(1): 6-10.]
- 张跃红, 安裕伦, 马良瑞, 等. 2012. 1960-2010年贵州省喀斯特山区陡坡土地利用变化. 地理科学进展, 31(7): 878-884. [Zhang Y H, An Y L, Ma L R, et al. 2012. Land use change of slope land in Karst mountainous regions, Guizhou Province during 1960-2010. *Progress in Geography*, 31(7): 878-884.]
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 1981. 中国自然地理地貌. 北京: 科学出版社. [Editorial Committee of Chinese Geography, Chinese Academy of Sciences. 1981. *Chinese geography: geomorphology*. Beijing, China: Science Press.]
- 朱安国, 林昌虎, 杨宏敏, 等. 1994. 贵州山区水土流失影响因素综合评价研究. 水土保持学报, 8(4): 17-24. [Zhu A G, Lin C H, Yang H M, et al. 1994. Comprehensive evaluation of the influence factors of soil erosion in mountainous area of Guizhou. *Journal of Soil and Water Conservation*, 8(4): 17-24.]
- 朱德浩. 1985. 对峰丛洼地形态和演化的几点认识: 以广西几个地区为例//中国地理学会地貌专业委员会. 喀斯特地貌与洞穴. 北京: 科学出版社: 57-64. [Zhu D H. 1985. Some thoughts on the formation and evolution of Karst depression//Geomorphology Committee of Geographical Society of China. *Karst Geomorphology and Cave*. Beijing, China: Science Press: 57-64.]
- 朱守谦. 1997. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳: 贵州科技出版社. [Zhu S Q. 1997. *Karst forest ecological research(II)*. Guiyang, China: Guizhou Science and Technology Press.]
- 朱守谦. 2003. 喀斯特森林生态研究(III). 贵阳: 贵州科技出版社. [Zhu S Q. 2003. *Karst forest ecological research(III)*. Guiyang, China: Guizhou Science and Technology Press.]
- Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, et al. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9): 1565-1596.
- Dessay N, Laurent H, Machado L A T, et al. 2004. Comparative study of the 1982-1983 and 1997-1998 El Nino events over different types of vegetation in South America. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20): 4063-4077.
- Liu H, Zhou Q M. 2005. Establishing a multivariate spatial model for urban growth prediction using multi-temporal images. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(5): 580-594.
- Olsson L, Eklundh L, Ardo J. 2003. A recent greening of the Sahel: trends, patterns and potential causes. Nairobi, Kenya: Academic Press Ltd & Elsevier Science Ltd.
- Southworth J, Nagendra H, Tucker C. 2002. Fragmentation of a landscape: incorporating landscape metrics into satellite analyses of land-cover change. *Landscape Research*, 27(3): 253-269.
- Zhang C, Yuan D X. 2001. New development of IGCP448 "World Correlation of Karst Ecosystem(2000-2004)". *Episodes*, 24(4): 279-280.
- Zhou Q M, Li B L, Kurban A. 2008a. Spatial pattern analysis of land cover change trajectories in Tarim Basin, Northwest China. *International Journal of Remote Sensing*, 29(19): 5495-5509.
- Zhou Q M, Li B, Kurban A. 2008b. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1093-1107.

Progress and prospect of Karst rocky desertification research in Southwest China

YAO Yonghui

(State Key Laboratory of Resource and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Karst rocky desertification is the third severe land degradation in China, following desertification in the north and soil and water loss in the Loess Plateau. This paper reviewed the progress and problems in the studies of Karst rocky desertification, and proposed a new method, which is temporal trajectory analysis based on high-resolution remote sensing data. At present, we have achieved great progress in the fields such as karst geology and geomorphology, restoration and reconstruction of Karst ecosystem, spatial pattern and dynamic changes of rocky desertification, evolution mechanism of karst rocky desertification as well as monitoring methods based on remote sensing. However, there are still a number of problems in the studies of evolutionary process of karst rocky desertification: (1) Current studies are mainly focusing on the spatial pattern of the rocky desertification based on remote sensing data and have successfully described the degree of severity of land degradation, but few of them are concerning the evolutionary process of karst rocky desertification; (2) Most of the studies on the evolutionary mechanism of Karst rocky desertification are qualitative descriptions and few of them are quantitative analyses; (3) The remote sensing monitoring methods normally are the double temporal variation detection method based on the "two time cycle" scales; only the information of "change/no change" or "what changes from what" can be acquired. Therefore, a new method, temporal trajectory analysis based on middle/high resolution remote sensing data, is introduced in this paper. This method focuses on "continuous" variations in a long time scale, and it is concerning not only what has changed between two time points, but also "where" and "how" the changes happened. By the temporal trajectory analysis method, the rocky desertification process in a long time series can be investigated, and the development of rocky desertification can be quantitatively and spatially tracked, so that we can know where, how and why the rocky desertification has happened. Temporal trajectory analysis method has advantages in discovering the evolutionary process of rocky desertification. Moreover, quantitative analysis of the pattern, process and evolutionary mechanism of Karst rocky desertification will be the trend in the future.

Key words: Karst; rocky desertification; remote sensing; dynamic change; temporal trajectory analysis; Southwest China