

岩溶生态系统脆弱性研究

李阳兵^{1,5}, 邵景安², 王世杰³, 魏朝富⁴

(1. 贵州师范大学地理与生物科学学院, 贵阳 550001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
4. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 5. 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047)

摘 要: 生态系统的脆弱性评价对于生态系统管理具有重要作用。在分析岩溶生态系统脆弱性特征和影响因素的基础上, 构建了针对岩溶自然系统的脆弱性评价指标体系, 涵盖了岩溶生态系统的结构脆弱性、生态过程脆弱性、生态功能脆弱性和人为胁迫脆弱性 4 个方面, 评价指标分别是结构稳定性、多样性生境、能量利用和积累、直接使用价值、石漠化程度和速率等。以不同类型的原生岩溶生态系统的生态基准值作为比较基础, 评价系统将现有的退化岩溶生态系统的脆弱性划分为轻微脆弱、中度脆弱、重度脆弱以及系统崩溃 4 级。

关 键 词: 岩溶; 生态系统; 脆弱性; 评价指标

中图分类号: P208; P931.5

全世界岩溶分布面积近 $2200 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占陆地面积的 15%, 居住人口约 10 亿, 集中连片的岩溶主要分布在: 欧洲中南部、北美东部和中国西南地区。前两个片区的岩溶, 因地质环境背景的脆弱性较小、人口和经济压力相对较轻, 生态地质环境问题不是很严重, 基本上是一个保护问题^[1]; 以贵州省为核心的中国西南岩溶地区, 地处亚热带, 太阳辐射能量高, 降雨充沛, 水热匹配, 有利于植物生长, 但地质环境脆弱性大、敏感度高, 面临人口超载和经济社会落后的双重压力, 但同时也因历史原因致使生态环境严重退化^[2], 出现了大面积基岩裸露的岩溶石漠化问题。岩溶环境问题已成为当代国际地学研究的热点之一^[3], 早在 1983 年岩溶环境已被看作是像沙漠边缘一样的脆弱生态环境^[4], 西南岩溶山地是典型的脆弱生态系统, 是我国的关键生态区之一^[5], 所发生的地质生态灾害- 石漠化问题是其脆弱性的明显体现, 治理任务艰巨。然而对岩溶生态系统的格局、生态过程与生态功能的研究仍是分散的, 致使目前仍不能定量阐明岩溶生态系统脆弱性的内在特性。因此, 立足于现有的对岩溶生态系统结构、功能及过程特性的理解, 对岩溶生态系统的脆弱性进行深入剖析, 以期引起学术界更多研究者的关注和参与, 有助于当前进行的岩溶石漠化土地的生态恢复重建。

1 岩溶生态系统

岩溶环境系统由五个基本部分组成, 即可溶岩及其风化残余的土壤、岩溶形态、岩溶水

收稿日期: 2006- 03; 修订日期: 2006- 07.

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划资助”(NCET- 05- 0819).

作者简介: 李阳兵(1968-), 男, 重庆潼南人, 博士后, 教授。主要研究方向为土地资源与生态环境治理, 发表论
文 50 余篇。E- mail: li- yapin@schu.com

文系统、岩溶地区的地表地下空气层以及岩溶生物群^[6]。同非岩溶地区相比,岩溶环境系统有二个基本的特点,一是从地球化学角度讲它是一种富钙的碳酸盐三相平衡的环境;二是其大气圈水圈和生物圈都具有地表地下双层结构。水、土壤和植被是岩溶生境中对干扰最为敏感的自然要素,故对此作详细讨论。

1.1 水文特征

西南地区陆壳间歇性隆升、刚性的碳酸盐岩的变形和裂隙发育以及碳酸盐岩本身的溶解性质,使得岩溶地区地表水文网出现一系列特殊的变化,水循环形成一种特殊的地表地下二元径流系统格局,水环境具有脆弱的特征。以峰丛洼地和峰丛盆地为主要的岩溶山区,地形崎岖不平,地表破碎,漏斗、溶洞、溶隙、溶洼及地下河广为分布,地表水渗漏严重。由丰沛雨量补给的地表水不易拦集、贮蓄,常由漏斗、溶隙等渗漏补给埋深不一、分布散乱的地下河。地高水低、雨多地漏、石多土少和土薄易旱,致使雨量丰沛的西南岩溶山区成为特殊干旱缺水地区。这种水文格局一方面易使地表生境干旱缺水;另一方面,由于各地段地下管网的通畅性差异很大,一遇大雨又很容易在低洼处堵塞造成局部涝灾;尤其是表层岩溶带具有特殊的地表、地下双重水文地质结构,导致表层岩溶带对污染极其敏感^[7]。这实质上是岩溶山区环境承灾的阈值弹性小、生态环境脆弱的反映,这种不利的自然条件不仅长时间制约着岩溶山区经济快速增长,而且也是当前开发岩溶山区所面临的关键性难题。如何在保护生态环境的前提下,以有限的水资源支撑更多的人口和更大的经济规模,是具体实施山区大开发面临并必须解决的重要问题。

1.2 土壤资源的脆弱性

成土母质特性决定了在人类活动尺度下的土壤不可再生性即脆弱性。碳酸盐岩上覆红土层的来源受自然条件和岩性的影响,不管是溶蚀残积成土还是上覆非碳酸盐岩成土,目前所见碳酸盐岩台上的红土层应该是全新世以前形成的,也很难早于中更新世,因为更早的岩溶形态基本已被破坏而很少保存下来^[8]。在目前的气候条件和人类时间尺度喀斯特山区的物理侵蚀速率大于成土速率,区域土壤层不可能继续增加,而只会逐渐流失殆尽。对土壤厚度有限、种子库和养分仅存于土壤剖面顶部 20~30mm 的喀斯特贫瘠土壤来说,这是土壤资源的永久损失,从这个意义上来看,岩溶石漠化土地的土壤资源是不可再生的。同时土被是岩溶石山区最大的水分诸存库之一,其损失也必将加剧岩溶性干旱。上述特点是碳酸盐岩地区土壤脆弱性与其它岩石类型区的根本区别之一,也是岩溶山区土地利用较困难的原因。

允许侵蚀量低。如广西岩溶区侵蚀模数 $256.5t/km^2 \cdot a$ ^[9],土壤允许流失量 $68 t/km^2 \cdot a$;滇东南峰丛山区侵蚀模数 $380t/km^2 \cdot a$,土壤允许流失量 $46t/km^2 \cdot a$ ^[10]。区域土层处于负增长状态。以红枫湖流域为例,碳酸盐岩风化残留物的成土速率仅为物理侵蚀速率的 $1/3$ ^[11],这是碳酸盐岩与其它岩类出露区域物理侵蚀的重要差别。岩溶环境中,尽管土壤元素背景值较高,但由于具有高的裂隙率,降雨过程中雨水淋溶作用可造成土壤中水溶性元素流失,使植物的生长与发育受到影响并加剧石漠化进程^[12]。短距离“土层丢失”现象普遍存在。岩溶区特殊的水文地质条件决定了厚层连续的风化壳只能发育在地下水以水平作用方式为主的地区^[13],在地下水以垂向作用为主的地区,地表只能出现不连续的薄层有机土。

1.3 植被特征

岩溶山区普遍具有生境基岩裸露、土体浅薄、水分下渗严重、生境保水性差、基质土壤和水等环境富钙的生态特征^[14], 岩溶生境的这一特点对植物种类成分有强烈的选择性, 植物种属大多革质化、石生、耐旱、细长并以喜钙、嗜钙为主要特征。限于严酷的石灰岩山地条件, 树木胸径、树高的生长具有速率慢、绝对生长量小, 但生长量稳定、波动较小, 以及种间、个体间生长过程差异较大的特点^[15], 如茂兰岩溶森林的生物量既低于水热条件相似的亚热带人工林与原生亚热带中山常绿阔叶林, 又低于较高纬度的寒温带针、阔混交林和亚高山针叶林(表 1)。岩溶森林是一种很典型的地形-土壤演替顶极, 其属性取决于坡度、坡位、坡向、土层厚度、土壤水分等限制因子^[16], 土壤条件对岩溶森林群落生物量的控制作用, 远大于气候条件^[17]。植被一旦破坏, 如果附近没有种源存在, 要想依靠土壤种子库中的种子来恢复森林植被是很困难的, 只能恢复草坡或早期灌丛植被^[18]。因此, 与亚热带的其它植被类型相比, 岩溶生态系统更为脆弱, 抵抗外界干扰的能力差, 林隙的密度和面积又相对较大^[19]。

表 1 喀斯特生态系统生产力与其它森林的比较

Tab.1 The productivity of karst ecosystem and comparison with other forests

地点	经纬度 (E, N)	生产力构成 (t/ha)				资料来源	
		乔木层	灌木层	草本层	合计		
茂兰常绿落叶林	108, 25	坡地	164.07	3.53	0.42	168.02	朱守谦 ^[20]
		山脊	102.08				
		漏斗	147.74				
茂兰常绿落叶林	108, 25	89.20	5.75	0.28	95.23	杨汉奎 ^[17]	
湖南会同杉木林	101, 24	274.9	13.2	3.50	291.6	邓士坚 ^[21]	
贵州中部灌丛			24.56-45.67			屠玉麟 ^[22]	
哀牢山木果石栎林	110, 27	348.7	6.32	0.66	355.68	邱学忠 ^[23]	
长白山阔叶红松林	128, 42	275.7				李文华 ^[24]	
长白山云、冷杉林	128, 42	242.6				李文华 ^[24]	

1.4 水、土、植物相互作用过程的脆弱性

岩溶生态系统的土壤、水文过程决定了植被—土壤双层结构不发育, 只有植被单层结构, 如以石面、石沟、石缝面积的比例代表岩石的裸露率, 茂兰岩溶森林小生境岩石裸露率为 98.05%~42.51%, 平均为 89.86%, 石面石沟型和石面型是研究地区最普遍的组合类型^[25]。岩溶森林—土壤层是维系生态环境良性循环的第一要素, 植被一旦遭受破坏, 即导致生态链物质、能量交换平衡失调, 正反馈良性效应中断。由于植被系统的丧失, 肥沃、湿润、阴暗生境逐渐向着干旱化生境发展。主要表现在水分的贮存量减少、贮存时间缩短^[26], 水分散失量大、速度快, 温度变化幅度加剧等方面, 形成了土少、水少、石多、干旱的严酷生境。土壤侵蚀、基岩大面积裸露的石漠化过程其实质是岩溶生态系统土壤-植被相互反馈的生物地球化学循环过程中断, 是土壤生态功能退化造成的生态系统的退化和岩溶地球化学系统的退化^[27], 岩溶石山地区因缺失土壤而表现出环境脆弱性。

近几年来已逐步认识到地质背景对岩溶生态系统的控制。以岩性为例, 石灰岩和白云岩二者的岩性差异决定了石灰岩分布区与白云岩分布区在岩石裂隙发育程度、岩石风化作用方式、地上地下双层结构、土壤分布、土层厚度、表层岩溶带的水文特点及小生境分布和生态

结构等方面都有差异,二者的溶蚀残余物在地表具有不同的堆积和丢失方式,因此岩性基底与石漠化的发生与发育存在着较为密切的联系^[28]。实际上岩溶生态系统各圈层可能发生着地质地貌组合 水文土壤组合 植被和小生境组合结构的作用过程,不同组合结构的岩溶生态系统具有特殊的功能,其本底稳定性与脆弱性各异,从而形成不同区域岩溶生态系统及生境类型的多样性(表 2)。

表 2 茂兰与花江岩溶生态系统自然特征的差异比较

Tab.2 Differences of natural indexes between Maolan karst eco-system and Huajiang karst eco-system

比较因素	茂兰峰丛洼地岩溶生态系统	花江峡谷岩溶石漠化生态系统
表层岩溶水	具有明显的二元结构,即枯枝落叶垫积层充填的表层岩溶带上部裂隙水和下部表层带裂隙水共存。表层岩溶带属缓慢渗流调蓄排泄型。	表层岩溶带无二元结构。为快速垂直入渗无调蓄排泄型、中速渗流排泄型,调节地表径流的能力差。
岩溶管道水	补给源主要为大气降水,次为森林滞留裂隙水。水补给面积大,径流途程长,排泄带低,但流量大。埋藏深度数米至数十米。	补给源主要为大气降水,岩溶水水位埋深。
土壤特征	有机质和氮、磷、钾养分丰富,土层薄,植被不连续。只存在自然的土壤侵蚀过程(“土层丢失”)。	土层薄,连续性极差,土壤具干、薄、粘、瘦、碱、和土表结壳特性,存在显著的人为加速土壤侵蚀过程。
小生境	复杂的岩石形态组合的小地形、微地形组成了如明亮、阴暗、干燥、湿润、积水、肥沃、瘦瘠等小生境,导致生境的多样性。	以单一干燥生境占主导地位,而无森林环境影响下的潮湿、荫蔽的多样性生境。
植被	是一种稳定的土壤—地形顶极群落:旱生—湿生,喜光—耐阴,喜肥—耐瘠,草质藤本—木质藤本,以及随遇植物—喜钙植物—专性植物,分别占领与其特性相适应的小生境。	具有明显的次生性,主要表现在群落组成树种较少而优势种明显,组成结构较为单一化。现存树种多以无性繁殖更新为主,比较适应该区高温干燥的环境。
旱涝灾害	极大地改善了地下水及地表水的循环交替条件,显示出岩溶森林的水文效应。	气象干旱和岩溶性干旱双重效应的结合,干旱频率高、程度深。
生态稳定性	原生性岩溶森林生态系统,脆弱。	石漠化岩溶生态系统,恢复困难。

2 岩溶生态系统脆弱特性

2.1 岩溶生态系统脆弱性研究工作评述

Downing 总结了许多有关脆弱性问题研究的成果,认为脆弱性应主要包括三个方面:首先脆弱性应作为一个结果而不是一种原因来研究,其次针对其他不敏感因子而言,其影响是负面,最后脆弱性是一个相对概念,而不是一个绝对的损害程度的度量单位^[29];赵平认为脆弱生态系统是从生态学角度看那些特别敏感并且要给予特殊关注的区域,脆弱性是生态系统固有的特性,其存在不取决于生态系统是否暴露于干扰之下;脆弱性是多个方面的综合体现,而且只有在人为或自然干扰的情况下才显露出来^[30]。

关于岩溶生态系统的脆弱性目前仍无一个确切的定义。靖娟利等用岩性、土层厚度、土地利用类型、植被覆盖率来评价西南部岩溶山区生态环境脆弱性^[31];胡宝清等选取地质地貌指标、气候水热指标、土地利用/覆被状指标、人类社会经济状况指标等 4 大类共 16 项指标,对广西 50 个典型岩溶县市生态环境脆弱性进行综合评价^[32];李阳兵等从宏观角度把西南岩溶生态系统的脆弱性分为基底性脆弱、界面性脆弱和波动性脆弱^[33];肖荣波等将影响石漠化的

因素确定为岩性、降雨、坡度和植被等 4 项并以此进行中国西南地区石漠化敏感性评价^[34]；王艳强等用地形分布、坡度与植被覆盖度来确定石漠化敏感性^[35]，黄秋昊等用植被覆盖率、土壤侵蚀面积百分比、25 坡耕地面积百分比等指标评价贵州省的石漠化危险度^[36]。上述研究选取的指标多注重地表形态变化或反映的是人为作用对岩溶区生境干扰而引起的生境退化，而对岩溶脆弱类型区的生态结构、生态过程和生态功能退化的描述不够，尤其缺乏对岩溶自然生态系统脆弱性的评价研究，不能体现出岩溶生态系统的脆弱性与其它脆弱生态系统如农牧交错带、干热河谷区相区别的特点。

2.2 岩溶生态系统脆弱特性分类

从自然生态角度分析，岩溶生境的脆弱性体现在地表地下双层空间结构形成的水土资源协调性差、造壤能力低且以 Ca 营养居首位、岩溶植被生长缓慢且植被逆向演替快、顺向演替难、生物资源集聚程度低几个方面。从稳定性看，岩溶环境属于一种动态的脆弱的系统，它将只在环境参数的严格限定的值区才持续存在，并且将在环境参数或种群值的重大扰乱之下崩溃，是一旦遭到破坏就很难恢复的环境。而这种不稳定性(敏感性)又决定了生物多样性低、生物量小、生物对生境的影响大，和生物因素受到干扰破坏后的易损性和低恢复性；在无干扰或干扰较轻时，生物因素与非生物因素之间能在较低水平保持相对平衡。人类干扰表现为不合理土地利用导致的土地覆盖变化进一步加强了非生物因素与生物因素间的相互影响程度，最终结果形成土壤、植被、地形间的差异退化，即土地石漠化。因此岩溶生态系统脆弱性可以进一步分为生态结构脆弱性、生态过程脆弱性、生态功能脆弱性、人为胁迫脆弱性(图 1)。

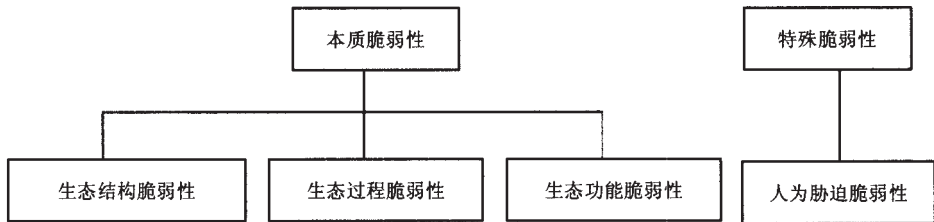


图 1 岩溶生态系统脆弱性示意图
Fig.1 The vulnerability of karst ecosystem

2.3 岩溶生态系统脆弱特性的描述

一般认为，生态系统的脆弱性与稳定性是两个内涵相同但表现形式相反的概念，高的脆弱性即意味着低的稳定性，评价生态系统的脆弱性需有一套综合性的概念和方法。王小丹认为脆弱性的大小是通过敏感性和稳定性等指标进行量化评价的^[37]，柳新伟提出生态系统的稳定性包括系统的敏感性、阈值和恢复力 3 个方面，反应了系统对干扰的反应和系统的内在特性^[38]，李双成认为脆弱性评价指标应集中考虑生态系统的结构、功能和生境 3 个方面^[39]。

近 50 年来残存的岩溶森林只有中热带季雨林的情安岭，北热带季雨林的弄岗，亚热带的茂兰、猴子沟、双河、兰泉阔叶落叶混交林等尚为完整的森林生态系统。在贵州，从水热条件看，贵州就有南亚热带岩溶沟谷型季雨林生态系统、中亚热带岩溶常绿林生态系统、北亚热带岩溶常绿落叶阔叶混交林生态系统、暖温带落叶—常绿阔叶混交林(以落叶林为主)生

态系统、及亚高山岩溶草甸生态系统。立足于对岩溶生态系统特性(结构、功能及过程)的理解,进行可操作的方法论探讨将是岩溶生态系统脆弱评估研究的突破口。因此,根据以往研究结果,从岩溶生态系统的生态结构脆弱性、生态过程脆弱性、生态功能脆弱性、胁迫脆弱性出发,提出能够表征岩溶生态系统脆弱特征的各项指标及相关具体度量内容(表3)。以此确立残存的不同类型的原生岩溶生态系统的生态基准值。

表 3 岩溶生态系统脆弱特性的评价指标

Tab.3 The evaluation index system of karst ecosystem vulnerability characteristics

脆弱性	相关度量	评价指标	具体度量指标
生态结构脆弱性	结构完整性	种类组成特征; 种类组成数量; 景观结构	阳生性、中生性、耐阴性种类, 先锋种、建群种顶极种, 林间植物等。
	结构稳定性	不同类型组成比, 斑块稳态特殊栖息地生境的存在; 不同食物链级别存在的生境	种类发展速度、种类组成稳定态。
	多样性生境		石面、石沟、石缝、土面等小生境的数量及空间分布及植物对其的利用率, 土壤有机碳等。
	物种丰富度	各类群生物种类和数量	植物(乔、灌、草和苔藓); 大型爬行动物、鸟类; 土壤动物和土壤微生物; 所有生物类群的种类和数量
生态过程脆弱性	物质循环	涵养水源; 水土保持; 气体交换; 养分循环	植被截流、枯落物和土壤蓄水量; 表土保持、养分维持; 固定 CO ₂ 和释放 O ₂ ; 养分吸收、养分存留、循环速率;
	能量利用和积累	光资源的利用; 生产力; 生物量; 分解速率	光合速率、呼吸速率、净第一性生产力; 生物量空间分布。
	抵抗力	生长范围	林分最大生长年限; 优势种的最佳生长年限。
	恢复力	种群恢复时间, 化解干扰的能力	最大可承受胁迫程度/恢复时间
生态功能脆弱性	直接使用价值	森林资源提供; 生态旅游; 科教文化价值	具体适合的经济度量法 ^[40]
	间接使用价值	水土保持; 养分循环和积累; 固定 CO ₂ 和释放 CO ₂	具体适合的经济度量法 ^[40]
	潜在使用价值	选择价值、遗产价值	当代选择利用资源支付费用; 为后代保留资源支付的费用。
人为胁迫脆弱性	资源环境意识; 生态退化现状; 贫困程度	石漠化程度和速率、污染灾害等	轻度、中度、强度石漠化现状和扩展速率, 表层岩溶带及地下水污染程度。

根据岩溶山区各类碳酸盐岩岩石的分布、地貌的演化阶段、小地形和植被覆盖,对西南岩溶山区现存的退化生态系统进行分类,共划分 45 种岩石-地貌-植被复合体(表 4),且可按照面积大小作进一步划分。每一类生态复合体在地下水埋藏、表层泉发育、水源涵养、土壤分布、小气候特征和生态敏感度等方面都有明显的差别,具有不同的生态系统服务功能和生态功能综合潜力,如白云岩、半岩溶低中山、草地与枯水资源的关系最为密切,对岩溶流域和导水能力起着决定作用^[41]。

参照不同类型的原生岩溶生态系统的生态基准值,将现有的岩溶退化生态系统的脆弱性划分为轻微脆弱、中度脆弱、重度脆弱以及系统崩溃 4 级(表 5)。需要提出的是,指标体系中各个指标脆弱性等级划分均是以系统的生态基准作为比较基础的。

2.4 岩溶生态系统脆弱性的尺度与等级特征

评价生态系统的脆弱性还取决于研究主体所考虑的时间和空间尺度以及系统内生物类群大小^[42]。西南岩溶石山是一种受地形、地质条件控制的脆弱环境,被复杂的地质构造、地层、深切河流分割成许多水、热、生物、地球化学背景条件千差万别的小单元,同一系统中又

有类型各异的小单元,在地貌格局、表土类型及植被分带等景观特征上呈现更大多样性^[43]。岩溶分布、地貌形态组合、气候资源、水资源、生物资源、土壤等所构成的岩溶地质生态环境综合类型不同,其本底稳定性与脆弱性各异,同时决定着土地利用的空间分异。

表 4 岩溶生态系统生态复合体类型
Tab.4 Eco-complexes types of karst ecosystem

	密林	疏林	灌丛	草丛	裸岩
灰岩峰丛洼地	+++++	++++	+++	++	+
白云岩峰丛洼地	+++++	++++	+++	++	+
灰岩与碎屑岩互层或夹碎屑岩峰丛洼地	+++++	++++	+++	++	+
灰岩溶蚀丘陵	+++++	++++	+++	++	+
白云岩溶蚀丘陵	+++++	++++	+++	++	+
灰岩与碎屑岩互层或夹碎屑岩溶蚀丘陵	+++++	++++	+++	++	+
灰岩峰丛峡谷	+++++	++++	+++	++	+
白云岩峰丛峡谷	+++++	++++	+++	++	+
灰岩与碎屑岩互层或夹碎屑岩峰丛峡谷	+++++	++++	+++	++	+

注:“+”的从多到少表示岩溶生态系统生态复合体脆弱性增强,生态功能综合潜力下降。

表 5 岩溶自然生态系统脆弱性评价
Tab.5 Indices for assessing the fragility of karst natural ecosystem

总指数	指标集	脆弱性分级			
		轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	系统崩溃
生态脆弱性	生态结构脆弱性	40%	60%	80%	100%
	生态过程脆弱性	40%	60%	80%	100%
	生态功能脆弱性	40%	60%	80%	100%
	人为胁迫脆弱性	40%	60%	80%	100%

通过对黔中地区表土侵蚀作用的 ⁷Be 示踪研究可知表土侵蚀受微地形影响,大部分被侵蚀的土粒经短距离位移,在低洼部位堆积^[44],使低洼地带能够维持较厚的土壤,从而维系了岩溶山区脆弱生态系统的繁衍。所以即使当石漠化发展末期阶段时,在一些较封闭的石缝等仍有少量的土壤留存,并维持了较好的土壤结构和较高的养分水平,主要是因为岩溶具有独特而极其复杂的小生境所致^[45]。因此,岩溶生态系统的空间分布受控于气候、地形、植被和土壤、及人类活动等多尺度因子,在一个广阔的尺度范围内表现出空间分异和缀块镶嵌的特点,岩溶生态系统脆弱性的正确评价有还依赖于空间尺度的正确选择,这增加了评价的复杂性,还需进行深入的研究。

3 讨论

岩溶地貌的生态空间具有多层性,土壤生态空间和岩层中巨大的生态空间既连成一体又互相叠置,局部地段这种叠置的层次更多,使树木生长过程中水分养分的消耗得到有限但却是长期的补给。这是常态地貌上所没有的,这也为如何客观度量生态系统的状态增加了困

难。但就岩溶环境系统的土壤、水、植物而言,它是一种脆弱的生态环境系统,岩溶生态系统的原始状态处于一种脆弱状态。岩溶生境中石山的形成是生态系统结构和功能的退化,植被破坏、土壤侵蚀、土下岩溶形态出露,导致覆盖型岩溶演变为裸露型岩溶,从而脆弱度增加。岩溶生境对干扰是敏感的,处于退化阶段的岩溶生境生态恢复力是弱小的。今后对岩溶生态系统脆弱性的研究,宜将目光转移到研究和解决生态环境问题上来,加强对自然生态系统脆弱性评价的研究,建立定量评估自然生态系统脆弱性、敏感性、适应性的方法、模型和指标体系,探讨岩溶生态系统脆弱性、适应性与可持续发展的耦合作用,以及建立适应性示范工程,这样对岩溶生态系统脆弱性的研究则更可能取得实质性的进展。

参考文献

- [1] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划. 地球科学进展, 2001, 16(4):461~466.
- [2] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲 等. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理模式. 第四纪研究, 2003, 23(6):657~666.
- [3] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. 世界科技研究与发展, 1997, 5:93~97.
- [4] 袁道先. 袁道先院士 1981 年在美国科技促进会(AAAS)的学术报告, 1981.
- [5] 张新时. 中国关键生态区的评价与对策. 中国基础科学, 2001, 21(5):11~14.
- [6] 袁道先. 论岩溶环境系统. 中国岩溶, 1988, 7(3):179~186.
- [7] 邹胜章, 张文慧, 梁 彬. 西南岩溶区表层岩溶带脆弱性评价指标体系的探讨. 地学前缘, 2005, 12(特):152~158.
- [8] 李兴中. 贵州高原喀斯特区地文期辨析. 贵州地质, 2001, 18(3):182~186.
- [9] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀. 山地研究, 1989, 7(4): 255~259.
- [10] 陈晓平. 喀斯特山区环境土壤侵蚀特性的分析研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 13(4):31~36.
- [11] 白占国, 万国江. 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, 1998, 4(1):1~7,46.
- [12] 何寻阳, 李 强. 表层岩溶带岩溶水的水化学动态变化及其环境效应——以马山弄拉兰电堂为例. 广西师范大学学报(自然科学版), 2005, 23(2):103~106.
- [13] 李德文, 崔之久, 刘更年. 岩溶风壳形成演化及其循环意义. 中国岩溶, 2001, 20(3): 183~188.
- [14] 屠玉麟. 贵州喀斯特灌丛群落类型研究. 贵州师范大学学报, 1995, 13(5):8~9.
- [15] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(II). 贵阳:贵州科技出版社, 1997, 55~64.
- [16] 屠玉麟. 贵州喀斯特森林的初步研究. 中国岩溶, 1989, 8(4): 282~290.
- [17] 杨汉奎, 程土泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究. 生态学报, 1991, 11(4):307~312.
- [18] 刘济明. 黔中喀斯特植被土壤种子库的初步研究. 朱守谦主编, 喀斯特森林生态研究(). 贵阳: 贵州科技出版社, 1997, 128~136.
- [19] 龙翠玲, 余世孝, 魏鲁明 等. 茂兰喀斯特森林干扰状况与林隙特征. 林业科学, 2005, 41(4):13~19.
- [20] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究. 植物生态学报, 1995, 19 (4): 358~367.
- [21] 邓士坚, 王开平, 高 虹. 杉木老龄人工林生物量和营养元素含量的分布. 生态学杂志, 1988, 7 (1): 13~18.
- [22] 屠玉麟, 杨 军. 贵州中部喀斯特灌丛群落生物量研究. 中国岩溶, 1995, 14(3):199~208.
- [23] 邱学忠 等. 云南哀牢山徐家坝地区木果石栎林生物量的初步研究. 云南植物研究, 1984, 6(1):85~92.
- [24] 李文华. 长白山主要生态系统生物生产量的研究. 森林生态系统研究, 1981, 34~48.
- [25] 朱守谦, 何纪星, 魏鲁明 等. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究. 朱守谦主编, 喀斯特森林生态研究(). 贵阳:贵州科技出版社, 2003, 38~48.
- [26] Je'ro'me Perrin*, Pierre- Yves Jeannin, et al. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. Journal of Hydrology, 2003, 279: 106~124.
- [27] 潘根兴, 曹建华, 何师意 等. 土壤碳作为湿润亚热带表层岩溶作用的动力机制: 系统碳库及碳转移特征. 南京农业大学学报, 1999, 22(9):49~52.
- [28] 李瑞玲, 王世杰, 周德全 等. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的空间相关分析. 地理学报, 2003, 58(2):314~320.
- [29] Thomas E Downing, Anand Patwardhan. Vulnerability assessment for climate adaptation, 2003, <http://start.org/Downing-Patwardhan Tp3.pdf>
- [30] 赵 平, 彭少麟, 张经纬. 生态系统的脆弱性与退化生态系统. 热带亚热带植物学报, 1998, 6(3):1779~186.
- [31] 靖娟利, 陈植华, 胡 成. 中国西南部岩溶山区生态环境脆弱性评价. 地质科技情报, 2003, 22(3):95~99.

- [32] 胡宝清, 金姝兰, 曹少英 等. 基于 GIS 技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价. 水土保持学报, 2004, 18(1):103-107.
- [33] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富 等. 西南岩溶山地生态脆弱性研究. 中国岩溶, 2002, 21(1):25-29.
- [34] 肖荣波, 欧阳志云, 王效科. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析. 生态学杂志, 2005, 24(5):551-554.
- [35] 王艳强, 朱 波, 王玉宽. 重庆市石漠化敏感性评价. 西南农业学报, 2005, 18(1):70-73.
- [36] 黄秋昊, 蔡运龙. 基于 RBFN 模型的贵州省石漠化危险度评价. 地理学报, 2005, 60(5):771-778.
- [37] 王小丹, 钟祥浩. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨. 山地学报, 2003, 21(增):21-25.
- [38] 柳新伟, 周厚诚, 李 萍. 生态系统稳定性定义剖析. 生态学报, 2004, 24(11):2635-2340.
- [39] 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价. 生态学报, 2005, 25(3):621-626.
- [40] Robert, Costanza, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 38(7): 253-260.
- [41] 贺中华, 杨胜天, 梁 虹 等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域枯水水资源影响因素识别- 以贵州省为例. 中国岩溶, 2004, 23(1):48-55.
- [42] 彭少麟. 南亚热带退化生态系统的恢复和重建的生态学理论和应用. 热带亚热带植物学报, 1996, 4(3):36-44.
- [43] 陈履安, 万国江. 喀斯特景观发育的地质基础- 以贵州地区为例. 万国江: 碳酸盐岩与环境, 北京: 地震出版社, 2000, 7-15.
- [44] 万国江, 白占国. 论碳酸盐侵蚀与环境变化. 第四纪研究, 1998, (3):279.
- [45] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 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, 2003,22(3):204-207,213.

A Conceptual Analysis of Karst Ecosystem Fragility

LI Yangbing^{1,5}, SHAO Jingan², WANG Shijie³, WEI Chaofu⁴

(1. School of Geography and Biology Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. National key laboratory of environmental geochemistry, geochemistry institute of Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; 4. Resources and Environment College, Southwest University, Chongqing 400716;

5. Geography Science Institute of Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: Assessing the fragility of ecosystem has an important role to sustainable ecosystem management. Karst environments, unique from other environments, is one kind of typical fragile ecosystem and key eco-region in China. Based on a critical review of current research about karst ecohydrological processes, soil fragility, vegetation characteristics, and the reciprocity of water, soil and plant in karst ecosystem, we developed an indicator system for assessing the fragility of degraded karst ecosystems, which including ecological structure fragility, ecological processes fragility, ecological function fragility and artificial menace fragility of karst ecosystem. Therefore, the evaluation indicator should explain the change and diversity of ecological structure, ecological process and ecological function. According to this principle, some index such as structure stability, diversity of microhabitat type, energy utility and accumulation, direct use value, the degree and speed of karst rocky desertification was chosen. Furthermore, the fragility of degraded karst ecosystems was divided into four levels by this assessment system as follows: slight fragility, medium fragility, severe fragility and ecosystem collapse compared with the ecological baseline of undisturbed karst nature ecosystem.

Key words: karst; ecosystem, fragility; assessment