

岩溶生态系统脆弱性剖析

李阳兵¹, 王世杰², 魏朝富³, 龙 健¹

(1. 贵州师范大学 地理与生物科学学院, 贵阳 550001; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
3. 西南农业大学 资源环境学院, 重庆 400716)

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生态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: P931.5; Q146

文献标识码: A

文章编号: 1001-5221(2006)04-0303-05

岩溶地区地面塌陷、森林退化、旱涝灾害、原生环境中的水质等生态环境问题自上个世纪70年代受到重视^[1]。岩溶环境不同于其它环境, 需要其特殊的干扰评价指标^[2], 然而对岩溶生态系统的生态过程、生态功能及其与生态格局关系的研究仍是分散的, 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, 并进而选择恰当的评价指标对现有的岩溶退化生态系统进行评价, 以指导当前岩溶石漠化土地的生态恢复重建。因此, 立足于现有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, 在理论和实践方面均有重要意义。

1 已有的工作评述

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^[3]; 胡宝清等选取地质地貌指标、气候水热指标、土地利用/覆被指标、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^[4]; 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^[5]; 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^[6]; 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^[7]; 黄秋昊等用植被覆盖率、土壤侵蚀面积百分比、 $\geq 25^\circ$ 坡耕地面积百分比等指标评价贵州省的石漠化危险度^[8]。上述研究指标选取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 岩溶生态系统脆弱特性

2.1 水文脆弱性

岩溶地区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。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, 一遇大雨低洼处又很容易堵塞造成局部涝灾; 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^[9]。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。

2.2 土壤脆弱性

岩溶石山地区因缺失土壤而表现出环境脆弱性。碳酸盐岩成土特性决定了人类活动尺度下岩溶环境土壤的不可再生性即脆弱性, 这是岩溶地区与其它岩石类型区的根本区别, 也是岩溶山区土地利

收稿日期: 2006-03-29; 修订日期: 2006-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(40361004); 黔教科办(2004)07

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, (E-mail) li-yabin@sohu.com。

用较困难的原因;二是允许侵蚀量低;三是区域土层处于负增长状态^[10],短距离“土层丢失”现象普遍存在。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^[11]。

2.3 植被脆弱性

岩溶生境特点对植物种类成分有强烈的选择性,即喜钙性、耐旱性及石生性的植物种群;限于严酷的石灰岩山地条件,岩溶生态系统树木胸径、树高

的生长具有速率慢、绝对生长量小,以及种间、个体间生长过程差异较大的特点^[12]。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、阔叶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^[13],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^[14]。与亚热带的其它植被类型相比,岩溶生态系统更脆弱,抵抗外界干扰的能力差,林隙的密度和面积又相对较大^[15]。

表1 喀斯特生态系统生产力与其它森林的比较

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

地点	生产力构成/ $t \cdot hm^{-2}$				资料来源	
	乔木层	灌木层	草本层	合计		
茂兰常绿落叶林	坡地	164.07	3.53	0.42	168.02	参[16]
	山脊	102.08				
	漏斗	147.74				
茂兰常绿落叶林	89.20	5.75	0.28	95.23	参[14]	
湖南会同杉木林	274.9	13.2	3.50	291.6	参[17]	
贵州中部灌丛		24.56 - 45.67			参[18]	
哀牢山木果石栎林	348.7	6.32	0.66	355.68	参[19]	
长白山阔叶红松林	275.7				参[20]	
长白山云、冷杉林	242.6				参[20]	

2.4 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,石面石沟型和石面型是岩溶森林小生境最普遍的组合类型^[21]。水、土壤和植被是岩溶生境中对干扰最为敏感的自然要素,如植被系统的丧失,肥沃、湿润、阴暗生境即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^[22],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^[23]。

3 岩溶生态系统脆弱性评价

3.1 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,它将只在严格限定的环境参数

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)决定了生物量小、生物对生境的影响大,生物因素受到干扰破坏后的易损和难恢复;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。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。

3.2 岩溶生态系统脆弱特性的评价

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^[24];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^[25];李双成认为脆弱性评价指标应集

中考考虑生态系统的结构、功能和生境 3 个方面^[26]。

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。根据以往研究结

果,从岩溶生态系统的脆弱性出发,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 2),并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 2 岩溶生态系统脆弱特性的评价指标

Tab. 2 The index system for evaluating the frangibility of karst ecosystem

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	阳性性、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	种类发展速度、种类组成稳定态。
	多样性生境	特殊栖息地生境的存在;不同食物链级别存在的生境	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	生态服务功能计算 ^[27]
	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	生态服务功能计算 ^[27]
	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 3)。且这种复合体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,如白云岩区、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^[28]。

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具完整的森林生态系统。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,根据现有的岩溶退化生态系统生态结构脆弱性、生态过程脆弱性、生态功能脆弱性、人为胁迫脆弱性分别达到生态基准值的 0~25%、25~50%、50~75%、75~100%;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。需要指出的是生态结构脆弱性、生态过程脆弱性、生态功能脆弱性其指标分值越高脆弱性越低,人为胁迫脆弱性指标分值较高脆弱性相应较高。

表3 岩溶生态系统生态复合体类型

Tab. 3 Eco-complex 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。

3.3 岩溶生态系统脆弱性评价的尺度与等级特征

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^[29]。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，其本底稳定性与脆弱性各异，同时也决定着土地利用的空间分异。因此，岩溶生态系统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还有赖于空间尺度的正确选择，这就增加了评价的复杂性。对此还需进行深入的研究。

4 讨论与结论

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。岩溶生境中石漠化的形成是生态系统结构和功能的退化，植被破坏、土壤侵蚀、上下岩溶形态出露，导致覆盖型岩溶演变为裸露型岩溶，从而使脆弱度增加。岩溶生态系统对干扰是敏感的，处于退化阶段的岩溶生境生态恢复力是弱小的。本文把岩溶生态系统脆弱性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，提出以现有的岩溶退化生态系统相关指标与不同类型原生岩溶生态系统生态基准值比较为基础，进行岩溶生态系统脆弱性评价。

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，以及建立不同岩溶地貌—生态经济类型区适应性示范工程，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] Le Grand HE. Hydrological and ecological problems of Karst regions [J]. *Science*, 1973, 179: 859 - 864.
- [2] Philip Van Beynen, Kaya Townsend. A disturbance index for karst environments [J]. *Environmental Management*, 2005, 36: 101 - 116.
- [3] 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[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(3): 95 - 99.
- [4] 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[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 103 - 107.
- [5] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 等. 西南岩溶山地生态脆弱性研究[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(1): 25 - 29.
- [6] 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[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 551 - 554.
- [7] 王艳强, 朱波, 王玉宽. 重庆市石漠化敏感性评价[J]. *西南农业学报*, 2005, 18(1): 70 - 73.
- [8] 黄秋昊, 蔡运龙. 基于 RBFN 模型的贵州省石漠化危险度评价[J]. *地理学报*, 2005, 60(5): 771 - 778.
- [9] 邹胜章, 张文慧, 梁彬. 西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J]. *地学前缘*, 2005, 12(特): 152 - 158.
- [10] 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[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 1 - 7, 46.
- [11] 何寻阳, 李强. 表层岩溶带岩溶泉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[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 23(2): 103 - 106.
- [12] 朱守谦, 魏鲁明, 张从贵, 等. 茂兰喀斯特森林树种生长特点初步研究[M]//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.
- [13] 屠玉麟. 贵州喀斯特森林的初步研究[J]. *中国岩溶*, 1989, 8(4): 282 - 290.
- [14] 杨汉奎, 程士泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究[J]. *生态学报*, 1991, 11(4): 307 - 312.

- [15] 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[J]. 林业科学,2005,41(4):13-19.
- [16] 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[J]. 植物生态学报,1995,19(4):358-367.
- [17] 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[J]. 生态学杂志,1988,7(1):13-18.
- [18] 屠玉麟,杨军. 贵州中部喀斯特灌丛群落生物量研究[J]. 中国岩溶,1995,14(3):199-208.
- [19] 邱学忠,谢寿昌,荆桂芬. 云南哀牢山徐家坝地区木果石栎林生物量的初步研究[J]. 云南植物研究,1984,6(1):85-92.
- [20] 李文华. 长白山主要森林生态系统生物生产量的研究[M]//王战. 森林生态系统研究,第2卷. 北京:中国林业出版社,1981:34-50.
- [21] 朱守谦,何纪星,魏鲁明,等. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究[M]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社,2003:38-48.
- [22] Jero me Perrin, Pierre-Yves Jeannin, Francois Zwahlen. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland [J]. Journal of Hydrology, 2003,279:106-124.
- [23] 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[J]. 南京农业大学学报,1999,22(9):49-52.
- [24] 王小丹,钟祥浩. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨[J]. 山地学报,2003,21(增):21-25.
- [25] 柳新伟,周厚诚,李萍. 生态系统稳定性定义剖析[J]. 生态学报,2004,24(11):2635-2340.
- [26] 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.
- [27] Robert Costanza, Ralph d' Arge, Rudolf de Groot, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 38(7): 253-260.
- [28] 贺中华,杨胜天,梁虹,等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域枯水资源影响因素识别——以贵州省为例[J]. 中国岩溶,2004,23(1):48-55.
- [29] 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[J]. 热带亚热带植物学报,1996,4(3):36-44.

An Analysis on the Frangibility of Karst Ecosystem

LI Yang-bing¹, WANG Shi-jie², WEI Chao-fu³, LONG Jian¹

(1. School of Geography and Biology Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; 3. Resources and Environment College, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Assessment on the frangibility of ecosystem plays an important role in ecosystem management. In this paper the characteristics and influence factors of karst ecosystem are analyzed, an index system for evaluating the frangibility of natural karst ecosystems is constructed, which covers structure, processes, function and man-made menace. The indexes include structure stability, diversity of microhabitat type, energy utility and accumulation, direct use value, the degree and speed of karst rocky desertification, etc. In the assessment system the frangibility of degraded karst ecosystems is classified into four levels: slight, medium, severe and ecosystem collapse, as compared with the primitive karst ecosystem.

Key words: Karst ecosystem; Frangibility; Assessment index