

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2020.08.017

旅游洞穴景观脆弱性概念与评价研究

邓亚东, 陈伟海, 罗书文,
孟庆鑫, 史文强, 李乐乐

中国地质科学院 岩溶地质研究所/自然资源部 广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要: 为探讨旅游洞穴景观脆弱性的概念、内涵与特征, 构建了旅游洞穴景观脆弱性评价指标体系并进行脆弱性评价实证研究, 在了解脆弱性研究相关成果的基础上, 结合岩溶洞穴景观系统的特点, 提出了旅游洞穴景观脆弱性概念, 分析了旅游洞穴脆弱性的内涵与特征, 并借鉴已开放洞穴的开发建设经验, 构建了一个包括本体脆弱性、自然脆弱性、人为脆弱性 3 个方面 15 个具体指标的评价指标体系. 运用 AHP 法与熵值法相结合的方法确定指标体系权重, 采用线性加权模型对旅游洞穴景观脆弱度进行评价及等级划分. 以石花水洞、水晶宫、芦笛岩、芙蓉洞、陶家台溶洞为例, 对这 5 个旅游洞穴景观脆弱度进行评判, 结果显示: 芦笛岩为高度脆弱; 石花水洞、芙蓉洞为中度脆弱; 水晶宫、陶家台溶洞为低度脆弱. 经实地验证, 评价结果与芦笛岩、石花水洞、芙蓉洞、水晶宫、陶家台溶洞脆弱性的实际表现比较吻合.

关键词: 旅游洞穴; 景观脆弱性; 评价

中图分类号: P964

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2020)08-0129-09

岩溶洞穴(Karst cave, 简称溶洞)是碳酸盐岩在岩溶作用下形成的地下空间, 是一种独特的地下旅游景观资源, 其景观的奇异性、神秘性、多样性吸引着无数游人, 被大量开发为旅游洞穴^[1]. 据统计, 到目前为止, 我国已有 500 多个洞穴向游人开放, 大多取得了较好的经济效益和社会效益, 如桂林芦笛岩、张家界黄龙洞、武隆芙蓉洞、贵州织金洞、云南九乡溶洞等. 然而, 在洞穴旅游开发中, 除洞穴景观的自然老化外, 旅游洞穴开发过程中游览道路、照明系统、安全护栏、景观护栏等游览设施的修建, 旅游洞穴开放后大量游客的涌入, 很大程度上改变了洞穴与外界物质能量和物理化学场的交流路径和结构, 洞穴景观出现断裂崩落、风化砂化、变黑变暗现象, 洞穴景观结构与美学价值受到损害并难以恢复, 景观脆弱性特征表现相当突出^[2-3]. 脆弱性评价是当前脆弱性研究的热点之一, 评价某一系统的脆弱性有助于了解系统的脆弱状况, 从而提出有利措施来实现系统的可持续发展. 同样, 通过旅游洞穴景观脆弱性评价来量化表征洞穴景观的脆弱程度, 可以客观地反映旅游洞穴景观安全状况, 对科学指导旅游洞穴景观的开发建设、运营管理等具有积极的作用. 当前, 在洞穴脆弱性问题上的研究主要集中在洞穴环境方面, 如: Ozimec^[4]在对克罗地亚 SIPUN 洞生物多样性调查基础上运用定性方法分析了 SIPUN 洞的环境脆弱性; Duc 等^[5]对比分析

收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502257); 中国地质科学院院长基金项目(YYWF201638); 中国地质科学院岩溶地质研究所所长基金项目(2017034); 全国重要地质遗迹调查项目(DD20179313).

作者简介: 邓亚东(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩溶地貌景观与洞穴研究.

了越南下龙湾 10 个洞穴的微气候、沉积物形态,探讨了洞穴环境脆弱性并提出了相应保护建议;Lobo 等^[6]对巴西 Diabo 洞的环境脆弱性进行了评价并以此测算了 Diabo 洞的旅游容量;Christiane 等^[7]运用 PSR 模型对巴西 9 个洞穴的环境脆弱性进行评估以此来划定洞穴优先保护区域;邱丽^[8]从环境脆弱性角度运用情景分析法对芙蓉洞环境容量进行了测算,在此基础上提出了芙蓉洞开发运营建议.然而,针对洞穴景观脆弱性方面的研究则较少,当前比较有代表性的洞穴景观脆弱性研究成果有:朱文孝等^[9]研究了旅游洞穴碳酸钙沉积物景观风化剥蚀、变色机理,指出脆弱性是旅游洞穴景观的特性之一;杨明德^[10]分析了旅游洞穴景观构成与功能,指出了旅游洞穴景观脆弱性的表现形式并提出了旅游洞穴景观可持续发展措施;王静^[11]针对旅游洞穴景观的脆弱性探讨了旅游活动对洞穴碳酸钙沉积物景观的影响并提出了相应保护对策.总体来看,他们对旅游洞穴景观脆弱性的研究主要集中在脆弱性的影响因素、表现特征及可持续发展措施上,均未涉及旅游洞穴景观脆弱性的概念、内涵与评价方法.因此,本文在借鉴相关学科领域有关脆弱性研究的基础上探讨洞穴景观脆弱性的概念、内涵及其定量评价方法,拟为洞穴景观旅游可持续发展提供依据.

1 旅游洞穴景观脆弱性概念、内涵与特征

1.1 脆弱性

“脆弱性”一词起源于 20 世纪初对自然灾害的研究^[12],随后发展到对饥饿与食物安全、风险、灾害、灾难、局地环境变化的研究.20 世纪 80 年开始,脆弱性的相关研究呈快速增长趋势,研究领域也由自然系统领域扩大至社会领域.随着研究领域的不断扩大,脆弱性的定义也从最早被认为是一种“度”“能力”或“可能性”到包含“敏感性”“应对能力”“暴露程度”“适应能力”“恢复能力”等要素的概念集合,再到融自然、经济、社会、人文和环境、组织和机构等特征的人地耦合系统脆弱性概念^[13-14].研究重点从单纯的自然系统脆弱性演化为以人和社会为中心,注重人和社会在脆弱性的形成以及降低脆弱性中的作用^[15].在不同学科领域,由于各自研究背景的差异,对脆弱性的理解也有差异^[16-17],许多学者根据自身研究领域特点定义出众多“脆弱性”子系统概念,如水资源脆弱性^[18]、生态脆弱性^[19]、经济脆弱性^[20]、科技脆弱性^[21]、社会脆弱性^[22]、城市脆弱性^[23]等.综合各学科学者对脆弱性概念的各种界定,可以发现脆弱性是指某一系统本身固有的属性在受到外界因素的干扰或侵害后反应出难以恢复原来状态的一种性质,这种性质是与系统的敏感性、暴露程度以及社会经济文化背景相关的应对损害事件的各种能力相关^[13].

1.2 旅游洞穴景观脆弱性概念与内涵

旅游洞穴景观是指构成洞穴系统的岩石、土壤、水体、气候、生物等可供观赏的景色、景象和形态结构,能吸引旅游者,并能满足其心理及精神需要,具有相应的旅游价值及功能的客观实体,主要包括生物景观、蚀余景观、堆积物景观、化学沉积物景观等.这些景观在自然力和人类旅游活动影响下会出现风化砂化、变黑变暗、脱皮掉块、崩落断裂,甚至造成景观消失.这些现象与脆弱性特性表征相一致,因此本文认为旅游洞穴景观属于脆弱性研究范畴.结合前述脆弱性概念的表征,本文认为旅游洞穴景观脆弱性是指旅游洞穴景观系统在自然环境变化与人类活动过程中因受到压力和扰动而产生的敏感性,并且因缺乏对外界压力和不利扰动的恢复能力而形成的不利影响和损害.其主要有 3 层含义:① 旅游洞穴景观脆弱性是旅游洞穴景观系统的客观属性,是旅游洞穴景观系统内部存在的,与生俱来的本质属性,始终存在于旅游洞穴景观的开发利用中,并随着敏感性和应对性的改变而变化,是一个动态变化的过程.② 旅游洞穴景观脆弱性通过景观崩落垮塌、变黑变暗、风化砂化、景观消失等现象表现出来,自然力或人为活动干扰较大且应对能力较弱时表现较为明显;自然力或人为活动干扰较小且应对能力较强时表现不明显.③ 旅游洞穴景观脆弱性是旅游洞穴系统受自然力和人类活动影响的一种敏感性状态,

而非绝对的数值。

1.3 旅游洞穴景观脆弱性特征

旅游洞穴景观是不可再生的旅游资源, 其环境变异敏感度高、空间异质性强、生态竞争能力差、易被替代概率大, 一旦遭到破坏难以恢复的特性使得旅游洞穴景观具有极大的脆弱性^[24]。在对我国典型旅游洞穴巴马水晶宫、桂林芦笛岩、武隆芙蓉洞、兴隆陶家台溶洞、儋州石花水洞进行实地调查的基础上, 结合前人研究成果, 本文认为旅游洞穴景观脆弱性特征主要表现在 5 个方面^[9-10, 25]: ① 景观易损性。当旅游洞穴开放后, 许多正在生长、吸引力高的奇异小形态洞穴景观发生掉落, 甚至消失。如巴马水晶宫拥有大量洁白无瑕的卷曲石, 在水晶宫开发 10 年后, 洞内卷曲石由白变黄变暗, 且大量断落, 其中毛发状断落尤为严重, 几乎消失; ② 景观易变性。当旅游洞穴开放后, 在很短时间内洞穴景观发生风化砂化、变黑变暗、脱皮掉块, 致使洞穴景观美学价值大大降低。如重庆武隆芙蓉洞, 芙蓉洞在开放之初洞内有晶莹剔透的鹅管、世界罕有的犬牙状晶花、奇巧洁白的鹿角状卷曲石, 在芙蓉洞开放 20 多年后, 鹅管景观砂化起粉, 脱皮掉块严重, 犬牙状晶花景观被绿藻附着, 色泽暗淡, 鹿角状卷曲石景观变黑变暗, 局部断裂, 美学价值丧失殆尽。③ 景观不可再生性。洞穴景观是在几万年至上千万年地质时间中形成的, 即使那些微小形态景观, 一旦被损坏, 很难再恢复。如在芦笛岩开发过程中, 游览道路的铺设、栏杆的修建、灯光安装等施工使得部分洞穴景观被切割损毁, 这些损毁的景观不能再生修复, 直接影响了洞穴景观的完整性; ④ 洞穴空间容量低承载力。洞穴是地下蚀成的相对封闭的地下空间, 多数洞穴洞腔大小不均, 洞道曲折、起伏大, 通畅性差, 空间可利用率低, 游客承载力也比较低, 若按照满足游客心理需求和游览安全所需距离计算, 许多溶洞游客容量在 3 000~5 000 人/日之间, 游客空间容量承载力较低。⑤ 洞穴空气容量低。由于洞穴相对封闭, 洞内空气流通较差, 洞穴景观产生的二氧化碳容易造成人员二氧化碳窒息等后果。此外, 洞穴的高湿度也容易让长期处于洞穴工作的人员身体不适。

2 旅游洞穴景观脆弱性评价

2.1 评价指标体系构建

本文借鉴洞穴景观旅游开发建设经验, 参照旅游洞穴景观发展变化特点^[11, 26], 构建旅游洞穴景观脆弱性评价指标体系, 所构建的旅游洞穴景观脆弱性评价指标体系主要依据为: ① 借鉴已开放洞穴在开发建设活动中的经验, 确保评价指标体系的可行性和实用性; ② 参考已发表相关文献中专家学者提出的影响景观脆弱性的要素指标, 确保评价指标的科学性; ③ 依据旅游洞穴景观资源的特点, 确保评价指标体系的针对性。④ 依照评价指标数据获取特性, 确保评价指标体系度量的规范性。筛选的指标尽可能反映出旅游洞穴景观对自然环境变化与人类活动的响应。该指标体系包括本体脆弱性、自然脆弱性和人为脆弱性 3 个一级指标, 其中, 本体脆弱性指标分解为 3 个二级指标, 自然脆弱性指标分解为 8 个二级指标, 人为脆弱性指标分解为 4 个二级指标(图 1)。

2.2 指标权重的确定

在脆弱性评价方法中, 权重的确定方法有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法多采用专家咨询打分的定性方法确定权重, 如专家咨询法、AHP 法等, 这类方法反映了决策者的意向, 受评价主体的主观影响大, 具有一定主观性, 不易令人信服; 客观赋权法多采用各指标的相关关系和变异程度来确定权重系数, 如主成分分析法、熵值法等; 这类方法从客观数据出发, 避免了人为带来的偏差, 但忽略了指标的重要程度, 结果往往会与真实情况有一定偏差。因此, 为了使指标权重赋值更客观合理, 本文尝试采用主客观相结合的赋权方法确定指标权值, 主观法采用运用广泛的 AHP 方法, 得到各指标权重 W_{ci} , 客观法采用熵值法, 得到各指标权重 W_{oi} , 再通过加权法确定各指标的权重。采用专家咨询法分别赋予 AHP 法和熵值法权

重 A 和 B , 运用公式(1)得到各指标综合权重 W_i .

$$W_i = AW_{ci} + BW_{si} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 个指标的综合权重; W_{ci} 为第 i 个评价指标的 AHP 法权重; W_{si} 为第 i 个评价指标的熵值法权重; A 为 AHP 法的权重; B 为熵值法的权重.

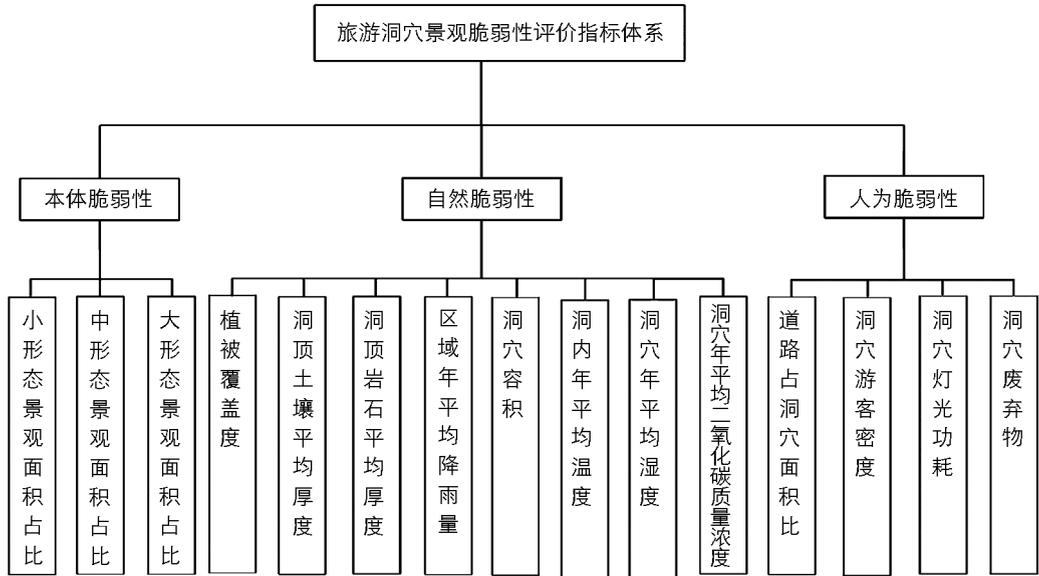


图 1 旅游洞穴景观脆弱性评价指标体系

2.3 评价模型

旅游洞穴景观脆弱度评价采用线性加权模型:

$$K = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (2)$$

式中: K 为旅游洞穴景观脆弱度评价值; W_i 为第 i 个评价指标的综合权重; P_i 为第 i 个评价指标的评价值; n 为评价因子的数目.

2.4 评价等级划分

为使评价结果更直观反映旅游洞穴景观脆弱等级和区域之间差异,评价指标的赋值采用特尔菲法,赋值范围为 $0 \sim 100$; 其值越接近于 0 , 表示景观生态脆弱性越差,越接近于 100 则越好. 利用相等间隔标准分类法将旅游洞穴景观脆弱性划分为 5 个级别, 具体见表 1.

表 1 旅游洞穴景观脆弱度等级划分标准

等级划分	极度脆弱	高度脆弱	中度脆弱	低度脆弱	微度脆弱
得分值域	(0~20]	(20~40]	(40~60]	(60~80]	(80, 100]

3 实例研究

3.1 研究区概况

本文选择我国热带、亚热带、温带季风气候区下 5 个典型旅游洞穴为研究对象, 它们分别是热带海南省儋州石花水洞; 亚热带广西壮族自治区巴马水晶宫、桂林芦笛岩以及重庆市武隆芙蓉洞; 温带河北省兴隆陶家台溶洞. 对上述旅游洞穴植被覆盖度、洞顶土层平均厚度、洞顶岩层平均厚度、洞内景观特征、洞穴规模等进行实地勘测、洞穴气象资料的收集、洞穴空气环境的远程监测, 并根据景区管理员提供的游客量、洞内灯光耗电量及废弃物数据, 归纳出各旅游洞穴特征(表 2).

表 2 典型旅游洞穴特征

洞穴名称	洞 穴 特 征
石花水洞	石花水洞位于海南省儋州市西南八一农场英岛山, 溶洞区域年均降雨量约 1 823 mm, 溶洞山体植被以灌草为主, 植被覆盖度约 49%; 洞顶土层平均厚约 1.4 m, 洞顶岩层平均厚约 12 m, 洞内年均温度约 24.2 °C, 湿度约 68.3%, 二氧化碳约 1 237.7 mg/L; 洞穴长约 1 500 m, 底面积 4 272 m ² , 容积 34 600 m ³ , 洞穴设计游览线路长 460 m, 洞内景观以石花、卷曲石、文石为特色, 还有大量的石笋、石柱景观, 其中小形态景观(主要指毛细水沉积景观及受外力易损景观)占比约 39%, 中型态景观(主要指受外力易损、易变异, 体量适中的景观)占比约 34%, 大形态景观(主要指不易受外力破坏体量较大的景观)占比约 27%, 游览道路占洞穴面积比约 12.8%, 洞内灯光以高热灯为主, 日均耗电量约 69 kW, 从 2015 年至今, 溶洞年均游客约 8 万人/年, 年均每平方米废弃物 84 g.
芦笛岩	芦笛岩位于桂林市西北的桃花江畔, 溶洞区域年均降雨量约 1 974 mm, 溶洞山体植被茂密, 植被覆盖度约 91%; 洞顶土层平均厚约 0.3 m, 洞顶岩层平均厚约 18 m, 洞内年均温度约 22.1 °C, 湿度约 76.8%, 二氧化碳约 1 462.6 mg/L; 洞穴测量长约 310 m, 底面积 1 512 m ² , 容积 208 600 m ³ , 洞穴设计游览线路长 272 m, 洞内景观以石柱、石幕、石瀑布、石带大型景观为特色, 其中小形态景观占比约 14%, 中型态景观占比约 34%, 大形态景观占比约 51%, 游览道路占洞穴面积比约 28.8%, 洞内以高热灯为主, 日均耗电量约 83 kW, 从 2015 年至今, 溶洞年均游客超过 90 万人/年, 年均每平方米废弃物 350 g.
水晶宫	水晶宫位于巴马县城西北的那社乡大洛村牛洞屯, 溶洞区域年均降雨量约 1 700 mm, 溶洞山体植被良好, 植被覆盖度约 76%; 洞顶土层平均厚约 0.2 m, 洞顶岩层平均厚约 21 m, 洞内年均温度约 21.5 °C, 湿度约 84.6%, 二氧化碳约 2 941.4 mg/L; 洞穴测量长约 600 m, 底面积 22 962 m ² , 容积 430 000 m ³ , 洞穴设计游览线路长 560 m, 洞内景观以卷曲石、鹅管、石枝、石花为特色, 还有大量的石笋、石柱景观, 其中小形态景观占比约 38%, 中型态景观占比约 26%, 大形态景观占比约 36%, 游览道路占洞穴面积比约 3.7%, 洞内灯光以 LED 为主, 日均耗电量约 73 kW, 从 2015 年至今, 溶洞年均游客约 25 万人/年, 年均每平方米废弃物 33 g.
芙蓉洞	芙蓉洞位于重庆市武隆区江口镇芙蓉江右岸, 溶洞区域年均降雨量约 1 184 mm, 溶洞山体植被茂密, 植被覆盖度约 93%; 洞顶土层平均厚约 0.6 m, 洞顶岩层平均厚约 63 m, 洞内年均温度约 20.5 °C, 湿度约 82.4%, 二氧化碳约 2 014.9 mg/L; 洞穴长约 2 596.8 m(开放段), 底面积 44 225 m ² , 容积 817 992 m ³ , 洞穴设计游览线路长 1 800 m, 洞内景观以石瀑布、鹅管、卷曲石、方解石晶花为特色, 还有大量的石钟乳、石笋、石柱景观, 其中小形态景观占比约 58%, 中型态景观占比约 18%, 大形态景观占比约 24%, 游览道路占洞穴面积比约 6.1%, 洞内灯光以高热灯为主, 日均耗电量约 330 kW, 从 2008 年至今, 溶洞年均游客约 35 万人/年, 年均每平方米废弃物约 203 g.
陶家台溶洞	陶家台溶洞位于兴隆县北水泉乡陶家台村, 溶洞区域年均降雨量约 763 mm, 溶洞山体植被茂密, 植被覆盖度约 69%; 洞顶土层平均厚约 2.3 m, 洞顶岩层平均厚约 23 m, 洞内年均温度约 14.1 °C, 湿度约 85.3%, 二氧化碳约 2 236.2 mg/L; 洞穴测量长约 531.6 m, 底面积 4 388.4 m ² , 容积 60 668.7 m ³ , 洞穴设计游览线路长 272 m, 洞内景观以鹅管、石枝、石花和卷曲石为特色, 还有大量的石笋、石柱景观, 其中小形态景观占比约 40%, 中型态景观占比约 39%, 大形态景观占比约 21%, 游览道路占洞穴面积比约 9.9%, 洞内灯光以 LED 为主, 日均耗电量约 24 kW, 从 2008 年至今, 溶洞年均游客约 9 万人/年, 年均每平方米废弃物约 38 g.

3.2 评价指标权重计算

根据对石花水洞、水晶宫、芦笛岩、芙蓉洞、陶家台溶洞调查、勘测取得的洞穴特征数据, 采用熵值法^[27]计算出评价指标熵值法权重; 再采用 AHP 法^[28]计算出评价指标的层次分析法权重; 采用

专家咨询法赋予熵值法和 AHP 法权重值分别为 0.4 和 0.6。利用公式(1)计算出各评价指标的综合权重,结果见表 3。

表 3 旅游洞穴景观脆弱性评价指标体系权重

目标层	准则层	AHP 法 权重	熵值法 权重	综合 权重	标准层	AHP 法 权重	熵值法 权重	综合 权重
旅游 洞穴 景观 脆弱 性评 价指 标体 系	自然 脆弱 性	0.191 2	0.285 8	0.229 04	植被覆盖度	0.004 5	0.006 2	0.005 18
					洞顶土壤平均厚度	0.007 0	0.087 1	0.039 04
					洞顶岩石平均厚度	0.011 0	0.048 6	0.026 04
					区域年平均降雨量	0.047 5	0.013 0	0.033 70
					洞穴容积	0.022 4	0.114 1	0.059 08
					洞内年平均温度	0.003 1	0.003 9	0.003 42
					洞穴年平均湿度	0.055 7	0.000 9	0.033 78
	人为 脆弱 性	0.573 3	0.671 2	0.612 46	洞穴年平均二氧化碳	0.040 0	0.012 0	0.028 80
					小形态景观面积占比	0.151 5	0.020 3	0.099 02
					中形态景观面积占比	0.066 6	0.008 4	0.043 32
					大形态景观面积占比	0.017 4	0.014 3	0.016 16
					道路占洞穴面积比	0.021 1	0.061 4	0.037 22
					洞穴游客密度	0.366 2	0.391 7	0.376 40
					洞穴灯光功耗	0.137 7	0.126 2	0.133 10
				洞穴废弃物	0.048 3	0.091 9	0.065 74	

3.3 评价结果

根据石花水洞、水晶宫、芦笛岩、芙蓉洞、陶家台溶洞洞穴特征,依据上述确立的旅游洞穴景观评价指标体系、评价方法、等级划分标准,利用特尔菲法^[29],邀请从事旅游洞穴科研、旅游洞穴开发管理的专家进行指标打分,然后对各评价指标分值进行统计;利用公式(2)计算出石花水洞、水晶宫、芦笛岩、芙蓉洞、陶家台溶洞脆弱性评价分值,进而划分出洞穴景观脆弱性等级,得到 5 个洞穴脆弱性等级:芦笛岩为高度脆弱;石花水洞、芙蓉洞为中度脆弱;水晶宫、陶家台溶洞为低度脆弱(表 4)。

表 4 旅游洞穴脆弱度评价值与脆弱性等级

评价因子	芦笛岩	水晶宫	陶家台溶洞	石花水洞	芙蓉洞
小形态景观面积占比	6.931 4	5.446 1	4.455 9	4.951 0	3.960 8
中形态景观面积占比	2.382 6	2.815 8	1.732 8	2.382 6	3.032 4
大形态景观面积占比	1.292 8	1.163 5	0.808 0	1.050 4	0.969 6
植被覆盖度	0.471 4	0.393 7	0.357 4	0.253 8	0.481 7
洞顶土壤平均厚度	1.561 6	1.171 2	3.123 2	2.342 4	1.952 0
洞顶岩石平均厚度	1.953 0	2.161 3	2.213 4	1.562 4	2.343 6
区域年平均降雨量	3.033 0	2.830 8	2.022 0	2.931 9	2.527 5
洞穴容积	4.431 0	5.021 8	4.135 6	3.544 8	5.317 2
洞内年平均温度	0.215 5	0.222 3	0.290 7	0.198 4	0.239 4
洞穴年平均湿度	2.533 5	2.770 0	2.871 3	2.195 7	2.702 4
洞穴年平均二氧化碳	1.584 0	2.592 0	2.448 0	1.440 0	2.304 0
道路占洞穴面积比	1.861 0	3.163 7	2.791 5	2.605 4	2.977 6
洞穴游客密度	1.882 0	22.584 0	18.820 0	20.702 0	21.831 2
洞穴灯光功耗	1.331 0	11.313 5	10.648 0	2.662 0	5.324 0
洞穴废弃物	1.643 5	4.273 1	3.615 7	2.958 3	2.300 9
评价总分	33.107 2	67.922 8	60.333 5	51.781 1	58.264 3
脆弱性等级	高度脆弱	低度脆弱	低度脆弱	中度脆弱	中度脆弱

3.4 结果分析

1) 从旅游洞穴景观脆弱性指标体系权重分配看,人为脆弱性权重占比为61.246%,远大于本体脆弱性与自然脆弱性,在洞穴景观脆弱性评价影响因素中占绝对主体地位。其中,分指标洞穴游客密度因素权重占37.64%,洞穴灯光功耗因素权重占13.31%,是影响洞穴景观脆弱性最为重要的2个因素。

2) 从旅游洞穴景观自然脆弱性评价结果看,指标从大到小依次为芙蓉洞(17.867 8)、陶家台(17.461 6)、水晶宫(17.163 1)、芦笛岩(15.782 9)、石花水洞(14.469 4)。其中,芙蓉洞自然因素脆弱性最低,石花水洞自然因素脆弱性最高,这主要是因为芙蓉洞植被覆盖度高、洞穴空间容积量大、洞穴二氧化碳浓度高,而石花水洞植被覆盖度低、洞穴空间容积量小、洞穴二氧化碳浓度低。可见,增加洞穴植被覆盖度与洞穴二氧化碳含量有利于洞穴景观的可持续利用。

3) 从旅游洞穴景观本体脆弱性评价结果看,指标从大到小依次为芦笛岩(10.604 8)、水晶宫(9.425 4)、石花水洞(8.384 0)、芙蓉洞(7.962 8)、陶家台溶洞(6.996 7)。其中芦笛岩本体脆弱性最低,表明不易折损的大形态景观在芦笛岩中占比最重;相反,陶家台溶洞本体脆弱性最高,表明易损、易折的中小形态景观在陶家台溶洞中比重最大,这与实际调查相符。

4) 从旅游洞穴人为脆弱性评价结果看,指标从大到小依次为水晶宫(41.334 3)、陶家台溶洞(35.875 2)、芙蓉洞(32.433 7)、石花水洞(28.927 7)、芦笛岩(6.717 5),其中,水晶宫人为脆弱性评价结果最低,这主要是因为水晶宫溶洞游客较少,且灯光多为节能性LED冷光源;相反,芦笛岩受每年超过90万游客及大量高热光源使用影响,芦笛岩人为脆弱性评价结果最高。因此,适当控制旅游洞穴游客人数,洞穴灯光尽量使用节能性冷光源,是保持旅游洞穴景观可持续发展的重要措施之一。

5) 从旅游洞穴景观脆弱度评价结果看,水晶宫(67.922 8)、陶家台溶洞(60.333 5)为低度脆弱;芙蓉洞(58.264 3)、石花水洞(51.781 1)为中度脆弱;芦笛岩(33.107 2)为高度脆弱。这与水晶宫、陶家台溶洞、芙蓉洞、石花水洞、芦笛岩洞穴景观变黑、变暗、风化、折损程度调查结果相一致。

4 讨论

旅游洞穴景观脆弱性是洞穴旅游活动可持续发展的屏障,脆弱性越大就越不利于洞穴旅游的可持续发展。因此,本文在脆弱性相关研究成果的基础上,结合岩溶洞穴景观特点尝试提出旅游洞穴景观脆弱性的概念,并分析其内涵与特征,构建了旅游洞穴景观脆弱性定量评价指标体系,提出了一种计算旅游洞穴景观脆弱度的可行方法。从评价指标选择来说,由于影响旅游洞穴景观脆弱性的因素众多,各因素间关系复杂,因此很难完整描述洞穴景观脆弱性的实际发生情况,本文从影响洞穴景观脆弱性的本体因素、自然因素、人为因素出发,选择了主要的易于测量的指标因素,而一些不易测量的影响洞穴景观脆弱性的重要因素考虑较少,如地震、管理等因素,今后需要加强这方面的研究。从方法来说,利用主观赋权法AHP法与客观赋权法熵值法相结合的方法来确定旅游洞穴景观脆弱性指标权重,减少了单一主观赋权法带来的人为偏差,也减少了单一客观赋权法忽略指标重要程度带来的影响,使指标权重赋值相对客观合理,但这种组合赋权法仍然存在一定的人为偏差,如何进一步减少人为因素引起的偏差仍有待进一步研究。虽然本研究存在不足,但由AHP法和熵值法结合得到的典型洞穴景观脆弱性评价及等级划分结果在实际工作中仍具有积极意义。此外,由于不同旅游洞穴景观脆弱性的影响因素各异,各洞穴旅游景区部门在应对洞穴景观变异风险时,可以有针对性地制定决策方案,实现旅游洞穴景观的可持续发展。

参考文献:

- [1] 邓亚东, 陈伟海, 张远海, 等. 岩溶洞穴旅游开发影响因素综合分析 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10279-10281, 10284.
- [2] 陈伟海, 邓亚东, 唐立, 等. 桂林旅游洞穴可持续利用研究 [J]. 广西科学, 2018, 25(5): 579-589.
- [3] 邓亚东, 陈伟海, 张远海, 等. 岩溶洞穴旅游开发对生态环境影响分析——以巴马水晶宫为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(3): 412-417.
- [4] OZIMEC R. Ecology, Biodiversity and Vulnerability of Šipun cave (Cavtat, Dubrovnik, Croatia) [J]. Natura Croatica, 2012, 21(1): 86-90.
- [5] DUC T A, GUINEA J G. Vulnerability, Pressures, and Protection of Karst Caves and Their Speleothems in Ha Long Bay, Vietnam [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(11): 4899-4913.
- [6] LOBO H A S, TRAJANO E, MARINHO M D A, et al. Projection of Tourist Scenarios Onto Fragility Maps: Framework for Determination of Provisional Tourist Carrying Capacity in a Brazilian Show Cave [J]. Tourism Management, 2013, 35: 234-243.
- [7] CHRISTIANE R, ADAUTO S, LEANDRO S. A Conservation Status Index, as an Auxiliary Tool for the Management of Cave Environments [J]. International Journal of Speleology, 2014, 43(3): 315-322.
- [8] 邱丽. 基于环境脆弱性评价和情景分析的洞穴旅游容量测算——以重庆市芙蓉洞为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [9] 朱文孝, 李坡. 旅游洞穴次生 CaCO_3 沉积景观风化剥蚀、变色机理及其改善与保护 [J]. 贵州科学, 2000, 18(Z1): 134-138.
- [10] 杨明德. 喀斯特研究——杨明德论文选集 [M]. 贵州: 贵州民族出版社, 2003.
- [11] 王静. 旅游活动对溶洞碳酸钙沉积景观影响及保护性研究 [J]. 资源科学, 2006, 28(5): 140-144.
- [12] WHITE G F. Human Adjustments to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States [D]. Chicago: University of Chicago, 1945.
- [13] BIRKMANNN J. Measuring Vulnerability to Hazards of National Origin [M]. Tokyo: UNU Press, 2006.
- [14] ADGER W N. Vulnerability [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 268-281.
- [15] EAKIN H, LUERS A L. Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2006, 31(1): 365-394.
- [16] 方修琦, 殷培红. 弹性、脆弱性和适应——IHDP 三个核心概念综述 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 11-22.
- [17] 李莉, 王晓婷, 王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述 [J]. 中国渔业经济, 2010, 28(3): 161-169.
- [18] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [19] 徐君, 李贵芳, 王育红. 生态脆弱性国内外研究综述与展望 [J]. 华东经济管理, 2016, 30(4): 149-162.
- [20] 储毓婷, 苏飞. 国内外经济脆弱性研究述评 [J]. 生态经济(学术版), 2013(2): 122-125.
- [21] 刘凯, 任建兰, 孙雪, 等. 科技脆弱性内涵、评价与调控——基于山东省的实证研究 [J]. 科技管理研究, 2016, 36(21): 74-78.
- [22] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.
- [23] 王松华, 赵玲, 朱震旦. 城市脆弱性的内涵及评价体系 [J]. 河北联合大学学报(社会科学版), 2014, 14(3): 18-22.
- [24] 杨明德. 岩溶洞穴旅游资源特性与开发保护 [J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 83-88.
- [25] 汪训一, 杨日英. 旅游洞穴环境的变异与保护之研究 [J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 245-250.
- [26] 朱文孝, 李坡, 苏维词. 喀斯特旅游洞穴景观多样性特征及其保护 [J]. 经济地理, 2000, 20(1): 103-107.
- [27] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [28] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [29] 邓亚东, 罗书文, 孟庆鑫, 等. 盐津地质公园岩溶洞穴资源旅游开发时序与质量等级评价 [J]. 资源与产业, 2018, 20(6): 30-37.

Research of the Concept of “Landscape Vulnerability of Tourist Caves” and Its Evaluation

DENG Ya-dong, CHEN Wei-hai, LUO Shu-wen,
MENG Qing-xin, SHI Wen-qiang, LI Le-le

Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin Guangxi 541004, China

Abstract: This paper aims at discussing the concept, connotations and characteristics of landscape vulnerability of tourist caves, constructing the evaluation indicator system for it, and conducting an empirical research on vulnerability evaluation. Firstly, on the basis of understanding relevant research results on vulnerability development, this paper puts forward the concept of landscape vulnerability of tourist caves and analyzes its connotations and characteristics in combination with the features of the karst cave landscape system. Next, drawing upon the experience in developing and constructing already opened caves, this paper constructs an evaluation indicator system consisting of 15 specific indicators in three aspects of ontological vulnerability, natural vulnerability and artificial vulnerability. Then, combining the AHP method with the entropy method, this paper determines the weight for the indicator system, and adopts the linear weighted model to evaluate and classify the grade of landscape vulnerability of tourist caves. Finally, taking the examples of Stone Flower Water Cave, Crystal Cave, Reed Flute Cave, Furong Cave, and Taojiatai Cave, this paper evaluates the landscape vulnerability of these tourist caves. The results show that Reed Flute Cave is highly vulnerable; Stone Flower Water Cave and Furong Cave are moderately vulnerable; and Crystal Cave and Taojiatai Cave are mildly vulnerable. A field reconnaissance verifies that the evaluation results are consistent with the actual vulnerability performance of these caves.

Key words: tourist cave; landscape vulnerability; evaluation

责任编辑 胡 杨