

宋涛,邹胜章,张连凯,等.岩溶湿地退化评价指标体系构建初探[J].中国岩溶,2020,39(5):673-681.
DOI:10.11932/karst20200504

岩溶湿地退化评价指标体系构建初探

宋涛^{1,2,3},邹胜章^{1,2},张连凯^{1,2},周长松^{1,2},赵一^{1,2},沈利娜^{1,2}

(1. 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; 2. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:会仙岩溶湿地是热带和亚热带地区中最大的岩溶湿地之一,由于岩溶湿地脆弱性及人类活动的影响,其湿地面积萎缩,生态功能退化。为了更好地保护会仙岩溶湿地,保障湿地的健康和可持续发展,文章探究了造成会仙岩溶湿地退化的关键因子,并结合会仙湿地独特的岩溶特征,筛选出影响会仙湿地健康的指标,利用层次分析法(AHP)对主要指标赋予权重,再通过分析会仙湿地相关资料和标准,构建出一套涵盖3个层次18个评价指标的湿地退化评价指标体系,以此为基础建立了岩溶湿地退化评价方法。

关键词:岩溶湿地;退化;分级分类;指标体系

中图分类号:X826;P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)05-0673-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶湿地是分布在岩溶地区,具有富钙偏碱性、典型岩溶水土循环演化机制以及特殊生物群落结构特征的湿地类型^[1]。由于岩溶地区特有的双层水文地质结构,岩溶湿地系统也通常表现为储水结构的不稳定性^[2]。中国西南岩溶区分布着大面积岩溶湿地,现普遍退化严重,构建岩溶湿地退化评价指标体系对于保护脆弱的岩溶生态系统具有重要意义。

会仙湿地是目前中国低海拔、中纬度岩溶区最大的天然湿地,是桂林和漓江的“肾脏”,其对珠江上游的水资源调控和生态保护具有重要作用^[3]。会仙湿地具有独特的地质构造、生态结构,优美的自然环境及重要的生态功能,处于桂林岩溶世界遗产地的核心地段,对桂林的景观保护、经济发展都具有重要作用^[4-5]。近年来,会仙湿地的面积不断减少,已不足20世纪50年代的20%^[6],其生物多样性不断降低、水

土污染、河流干枯等一系列环境问题已成为当前人们关注的重点。建立符合会仙湿地岩溶特征的评价指标体系,定量评价会仙湿地的健康状况,可为湿地修复与保护提供科学支撑。

国内外学者在湿地退化评价方法、评价指标的选择和评价指标体系的构建与完善方面取得了较大进展^[7]。但针对岩溶湿地开展退化评价指标体系构建的研究较少。建立岩溶湿地退化评价指标体系,必须明确导致岩溶湿地退化的岩溶地质条件及其指标与其他影响因素指标所占的权重大小。欧阳志云等^[8-9]认为在湿地指标体系构建中需要建立符合区域特征的湿地评价指标体系,因此在进行岩溶湿地退化评价中不仅要结合一般湿地的评价方法,而且要充分考虑其岩溶特色进行综合评价。

本文在综合分析会仙岩溶湿地水文地质特征、退化现状及成因研究的基础上,利用层次分析法(AHP)对筛选出的主要影响因子赋予权重,结合相关

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0406104);中国地质调查局地质调查项目(DD20190502)

第一作者简介:宋涛(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为水生态环境。E-mail:414697541@qq.com。

通信作者:张连凯,E-mail:zhangliankai@karst.ac.cn。

收稿日期:2019-11-01

专家意见确定评价等级和评价标准,构建出较为完善的湿地退化评价指标体系,以期会为会仙岩溶湿地的保护和修复提供技术支持和决策依据。

1 研究区概况

会仙湿地位于桂林市临桂县会仙镇,处于全球最典型的岩溶峰林地貌区,其独特的水文地质条件与其他湿地差异巨大^[10]。研究区位于西江上游漓江

和柳江两大水系的分水岭地带,仅有良丰江河口和相思江下游凤凰岭峡谷两个排泄口,地表水及地下水排泄不畅通,在湿地内形成面积连片分布的众多湖泊、沼泽和水草地^[11]。会仙湿地核心区的水域主要集中于西北部,沼泽主要集中于核心区的中部,核心地段河流纵横交错,河溪密布,河道弯曲多变,湖泊众多,河、湖、沼泽交错相通,水域面积分布较广(图1)。

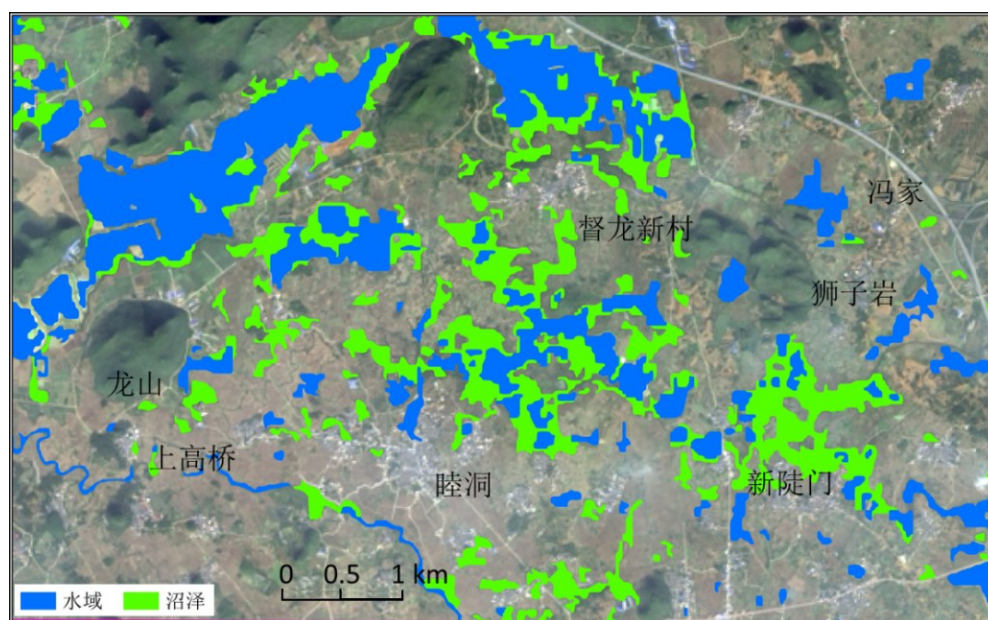


图1 会仙湿地核心区水域和沼泽分布图

Fig.1 Distribution of waters and swamps in the core area of Huixian wetland

2 退化因素分析

2.1 水文地质

会仙湿地属于晚白垩纪桂林内陆湖泊解体、缩小后遗留的湖泊沼泽。湿地周边为上泥盆统融县组(D_3r)纯碳酸盐岩,岩溶较发育^[12];中间为岩溶发育较弱的岩关阶(C_1y)和大塘阶(C_1d)不纯灰岩,为弱含水层;下部隔水底板为泥盆纪信都组碎屑岩(D_1x_1)^[13]。

会仙湿地融县组纯灰岩地层中有溶洞、岩溶泉、溶井、塌陷等形态发育,但管道状连通性岩溶数量少,且地下岩溶发育深度较弱,同时地下河的入口狭窄,通常呈现扁平型,较弱的水文过程导致会仙湿地对水资源的调蓄能力较低,旱季存水量不足,洪水季节排水不畅,易形成旱涝灾害,而严重的旱涝灾害会破坏湿地生态系统^[14]。

2.2 气候因素

会仙湿地的年降水量较丰富,但年内分布极不均匀。根据1952年到2014年近60年的气象资料统计,会仙湿地一年中降雨量主要集中在4-7月,占全年的60%以上。不均匀的降雨不但会加重旱涝灾害^[15],影响湿地生态健康,还会导致地下水位易暴涨暴落,湿地旱涝灾害频发,进而破坏湿地生态系统。另一方面,近60年来会仙湿地的气温数据显示,该区平均气温增加 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,逐渐升高的气温会加大蒸发量,从而导致湿地水资源减少。

2.3 水土流失与石漠化

运用LandsatTM影像资料解译出会仙湿地1973-2018年5期的石漠化面积,结果显示:1973年会仙湿地内的石漠化面积为 13.44 km^2 ,2004年的面积为 13.61 km^2 ,2018年的面积为 16.93 km^2 ,石漠化面积

在逐年增加。

石漠化会造成水土流失,大量泥沙进入湿地后,造成湿地淤积,容量减少,调蓄功能降低。前人对会仙湿地岩芯的元素分析结果表明,流域侵蚀和径流是湖泊沉积物化学组成的主要物源^[16]。李世杰等^[17]研究近代会仙湿地沉积速率的结果显示,1952年以来会仙寺湖底泥的平均沉积速率仅为 $1.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,但是在1952–1963年中国开展大规模大炼钢铁期间,其底泥的平均沉积速率达到 $3.1\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,说明植被破坏造成的石漠化及水土流失对湿地沉积底泥影响明显。

2.4 垂直裂隙发育

岩溶地区可看作一个布满“筛孔”的石头“筛子”,溶沟、溶槽和洼地为被土壤塞住的形状不一、大小不等的“筛孔”,“筛孔”内的土壤,通过地下漏失,充填土下化学溶蚀和管道侵蚀形成的孔隙和孔洞^[18],垂直裂隙发育程度越高,水土漏失越严重,从而会减少湿地水资源的补给。会仙湿地主要为上泥盆统融县组(D_3r)纯碳酸盐岩,垂直裂隙发育程度较高,水土漏失情况严重是导致会仙湿地退化的重要原因。

2.5 地下河管道堵塞

会仙湿地的地下河管道狭小,发育较浅(一般为 $0\sim 20\text{ m}$),很多进口较小,呈瓶颈型。上游水土流失携带的大量泥沙在进口附近沉积,导致地下河堵塞^[19]。同时,地下河管道的发育情况同样会影响湿地水资源补给。会仙湿地的岩溶发育较浅,岩溶地下水系统主要以管道、裂隙为主,较少有大型的岩溶地下河系统,而地下河系统管道狭窄,大量泥沙易在管道聚集且堵塞地下水径流,从而使地下水涌出地表排泄,外泄的水量直接汇入良丰河和相思江,导致湿地地表水的补给减少。

2.6 其他因子

湿地污染因子(水体污染、土壤污染等)、生物多样性因子等均在不同程度对湿地健康产生影响。湿地污染因子可体现为湿地水体富营养化程度、水质达标率以及有机物污染等,而生物多样性因子可体现为湿地浮游生物、鱼类、底栖动物的多样性等。近些年来会仙镇人口密度不断增大,对资源的需求量不断增大,大量开发原始湿地,导致湿地面积锐减;此外,湿地周边基本为农田,大量化肥、农药排入湿地,导致水体、土壤污染严重,同时大面积湿地被开发为水田,自然湿地逐步转变为鱼塘、农田等人工湿地,这进一步加剧了湿地的退化程度^[20]。

3 评价指标体系构建

3.1 指标选择原则

本文基于会仙湿地退化的原因和驱动因子,从众多驱动因子中找到关键的指标,构建出具体的评价指标体系^[21]。筛选原则如下:

(1) 整体性。会仙湿地生态系统是一个复杂且脆弱的复合生态系统,评价其退化程度不仅要从物理、生物、化学、社会经济、人类活动等方面综合考虑,还要抓住其岩溶特色,把握其岩溶特色与湿地退化之间的具体关系,选择能够更加具有代表性的指标,能客观反映会仙湿地退化的现状。

(2) 代表性。要求结合会仙湿地退化的现状和实际情况,既要少而精、突出重点,又要能综合、客观地反映会仙湿地退化的状况。

(3) 可操作性与可行性。选择的指标需要简单明了、易于操作,同时要具有可测定性,指标含义要求明确,具有较强的应用性。

(4) 定性与定量相结合。湿地退化表现在很多方面,有些评价指标难以定量描述,需要将定性与定量指标同时分析,进行综合评价。

3.2 指标体系确定

在筛选指标时,既要注重水文、水质、生态等常见湿地退化评价指标,还要把握会仙湿地的岩溶特征指标。基于上述湿地退化的原因及驱动因子,筛选出具有科学性、代表性、操作性的关键指标,并将指标层次结构分为目标层、准则层与指标层3个层次^[22](表1)。

会仙湿地的可溶性碳酸盐岩会发生溶蚀作用,形成大小不一的“筛孔”,筛孔可导致水分、土壤向地下渗漏。地下河管道一般分为圆筒型管道、瓶颈型管道、扁平型管道等,瓶颈型管道最容易造成地下河管道堵塞,排水不畅,上游洪涝灾害频繁时,下游干旱缺水;扁平型管道次之,在洪水季节容易堵塞,淹没农田、旱地生态系统,枯水期退水后部分旱地重新出露,周期性的淹水,使生态系统遭受破坏,很难恢复^[23]。石漠化程度加重代表湿地水域面积减少,且石漠化与水土流失相互影响、相互促进。因此选择水土流失程度、石漠化程度、垂直裂隙发育率、地下河管道发育情况作为会仙湿地退化的评价指标。另外,岩溶石灰土营养元素有效态含量低,不利于湿地植被的生长,而不合理的使用化肥农药,又会加重富

表1 会仙湿地退化评价指标体系

Table 1 Degradation evaluation index system of Huixian wetland

目标层	准则层	指标层
会仙湿地退化分级分类评价指标体系	岩溶特征	水土流失程度
		石漠化程度
		垂直裂隙发育率
		地下河管道发育情况
		岩溶土壤营养元素
		水位(地表河与地下河)
		径流量(地表河与地下河)
	气象指标	降雨量
		气温
	水质指标	水质综合指数(COD _{Cr} 、DO、氨氮、总磷、总氮)
		水功能区水质达标率
		浮游植物多样性(种类数、密度、优势种)
	生物特征	水生植被覆盖度
		鱼类多样性(种类数、密度、优势种)
		底栖动物多样性(种类数、密度、优势种)
	物理指标	水域面积
		湿地周围植被覆盖度
		农业利用土地面积
	感官指标	透明度
		垃圾量
		公众满意度

营养化程度,破坏水生态环境,岩溶石灰土营养元素同样可作为评价指标之一。

筛选出重铬酸盐指数(COD_{Cr})、氨氮、总磷(TP)、总氮(TN)作为最终的水质评价指标。像底质磷酸酶、底质脲酶、硝酸盐氮、叶绿素 a、磷酸盐等指标的数据虽能在很大程度上表征常见湿地健康状况,但这些指标的数据较难获取,现存数据获取量不足且代表性不明显。水体富营养化的程度是湿地水资源健康与否的重要表征,水体富营养化程度的加重破坏了水生生物的生存环境,导致大量水生生物死亡,甚至对人类的健康造成严重危害,氨氮、总磷、总氮都可以指示水体富营养化程度,现存数据较全且容易获得,又能很好表征湿地健康状况,因此选择氨氮、总磷、总氮作为最终指标。溶解氧(DO)作为影响水生生物生境和表征水体自净能力的重要指标,且与水体富营养化的表征指标氨氮、总磷、总氮等指标

相关联,水体富营养化使藻类等浮游植物大量繁殖,必然导致水体中 DO 下降,大量水生生物死亡,从而破坏生态系统,综合考虑后将 DO 加入评价体系中。COD_{Cr}可很好表征水体受有机物污染的程度,选择其作为评价指标之一。

生物特征指标中,需要将湿地中的浮游植物多样性、底栖动物多样性、鱼类多样性、水生植被覆盖度都考虑进去。其原因是当湿地受到影响时,湿地中生存的浮游植物、底栖动物、鱼类、水生植被的生存和分布都会受到影响,从而产生一系列的变化,因此,浮游植物、底栖动物、鱼类等生物种类与数量的变化可很好表征湿地的退化状况。

水资源是湿地的关键,水域面积减少是湿地退化的首要体现。随着社会经济的发展以及会仙镇人口的不断增加,农业、工业需要大量开垦、利用湿地,使大量湿地转化为农田、建筑物等,湿地原有植被被破坏,导致生态系统遭到严重破坏。因此,水域面积、湿地周围植被覆盖度和农业利用土地面积被纳入指标体系,其可最直接表示湿地目前的退化状况。

此外,会仙湿地水草丰沛、景观优美,是旅游胜地,不仅具有重要的生态功能,还具有一定的社会价值。会仙湿地生态系统不仅仅要考虑维持生态系统的结构与功能,还要综合考虑人类与社会价值。为更好表征湿地退化状况,以期给人类一个更安全、舒适的生存环境,在本次评价体系中还加入了感官指标(包括透明度、垃圾量、公众满意度)。

3.3 退化等级及其评价标准确定

评价标准直接影响评价结果的准确性。目前,对湿地退化评价尚无统一的标准。湿地退化评价具有相对性的特殊性,不同区域、不同类型、不同规模的湿地,以及不同湿地的生态功能和社会价值的不同,都会导致评价标准的不同。会仙湿地作为特殊的岩溶湿地,应综合考虑其岩溶特征,并与其他湿地退化评价方式相结,从而确定其评价标准^[24-25]。结合会仙湿地的实际情况,其湿地退化的评价等级可划分为:无退化、轻度退化、中度退化、严重退化和重度退化5个级别,并将评价等级标准化为4,3,2,1,0。对难以定量表达的指标,根据相应评价标准也以4,3,2,1,0的打分形式来表示,分别对应上述5个评价等级^[26]。

在参考国内外相关研究评价工作和咨询专家的基础上,制订了此次会仙湿地退化评价指标体系的评价标准表^[27-29](表2)。

表2 会仙湿地退化等级评价标准

Table 2 Evaluation standard of degradation grade of Huixian wetland

准则 层B	指标 层C	退化等级及分值				
		4(无退化)	3(轻度退化)	2(中度退化)	1(严重退化)	0(重度退化)
岩溶 特征	水土流失程度/ $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	微度(<50)	轻度(50~2 500)	中度(2 500~5 000)	强度(5 000~8 000)	极强(>8 000)
	石漠化程度	石漠化面积 减小	石漠化面积轻微 加大(<1%)	石漠化面积中等程 度扩大(<5%)	石漠化面积强度程 度扩大(<10%)	石漠化面积重度 扩大(>10%)
	垂直裂隙发育率	非常低	低	中	高	非常高
	地下河管道 发育情况	圆筒形发育, 管道体积增 大,不易堵塞	管道体积轻微减 小,不易堵塞	扁平型增多,管道体 积中度减小,洪水季 节容易堵塞	瓶颈型增多,管道 体积严重减小,容 易堵塞	基本都为瓶颈型,管 道体积非常小,很容 易堵塞
	岩溶土壤 营养元素	总量高,有效 态高	总量轻微变低,有 效态含量变低	总量,有效态含量中 等程度降低	总量、有效态含量 大量减少	总量严重降低、有效 态基本为0
	水位(湿地 核心区)/m	水位稳定或略 有升高	水位下降 (<0.5)	水位下降 (0.5~1.0)	水位下降 (1.0~1.5)	水位下降 (1.5~6.0)
	径流量(入湿地地表 径流量)/ $m^3 \cdot s^{-1}$	径流量变大或 稳定	径流量轻度减少 (<300)	径流量中度减少 (<500)	径流量大量减少 (<800)	径流量重度减少 (<1 200)
气象 指标	降雨量/mm	年平均降雨量 升高或稳定	年平均降雨减少 量少于100	年平均降雨减少量 (100~150)	年平均降雨减少量 (150~200)	年平均降雨减少量 大于200
	气温(标准:0.1℃)	气温稳定或低 于年平均气温	气温稍高于年平 均气温(<0.5)	气温高于年平均气 温(<1.0)	气温高于年平均 气温(<1.5)	气温高于年平均气 温(<2.0)
水质 指标	水质综合指数(包括 COD _{Cr} 、DO、氨氮、 TP、TN)	<0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
	水功能区水质达标率	>0.9	0.8~0.9	0.6~0.8	0.3~0.6	<0.3
生物 特征	浮游植物多样性	>3.0	2.5~3.0	2.0~2.5	1.0~2.0	<1.0
	底栖动物多样性	<3.5	2.5~3.5	1.5~2.5	1.0~1.5	>1.0
	鱼类多样性	鱼类数目较多 且种类繁多	鱼类数目和种类 中等	少量鱼类生存,种类 10~20种	偶见零星小鱼	无鱼类生存
物理 指标	水生植被覆盖度/%	>30	20~30	10~20	5~10	<5
	水域面积	水域面积不变 或加大	水域面积轻微减 小	水域面积中度减小	水域面积大量减 少,露出部分地面	水域面积严重减小, 露出大量地面
	湿地周围植被覆盖 度/%	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	农业利用土地面积	减少或不变	轻度增加(<3%)	中度增加(<10%)	大量增加 (<10%~20%)	严重增加(>20%)
感官 指标	垃圾量	无垃圾	个别、零星垃圾	少量垃圾	垃圾较多	垃圾很多,阻塞河道
	透明度/cm	>40	30~40	25~30	10~25	<10
公众 调查	公众满意度(公众调 查)/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20

(1)水土流失程度参照《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》,根据岩溶地区的土壤侵蚀模数和平均侵蚀厚度将危害等级划分为5个等级,分别为微度、轻度、中度、强度、极强,5个不同等级可分别表征岩溶区水土流失强度的大小,参照标准,选择 $50 t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 作为岩溶区允许土壤流失量,即在 $50 t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 土壤流失量以内对生态环境不会造成太大影响,流失量大于 $50 t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ 会对生态环境造成影响^[30-31]。

石漠化程度标准的确定是基于石漠化面积的增减,指标体系选择石漠化面积的变化情况来作为评价湿地退化的标准^[32]。石漠化程度与水土流失强度相互影响、密切相关,因而标准选择石漠化面积的增减变化进行制订,具体也可参考《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》和相关研究文献。垂直裂隙发育率在标准中划分为非常低、低、中、高、非常高5个等级,结合水土流失情况与垂直裂隙发育率之间的影响关系制订标准,选择地下河管道不同的发育状况作为评价标准。根据营养元素有效态含量对植物生长的关系,确定岩溶土壤营养元素评价标准;

(2) 气象指标中的降雨量和气温可表征会仙湿地的降雨补给情况和蒸发情况,在很大程度上决定了会仙湿地水域面积的变化情况。基于会仙湿地年平均降雨量和年平均气温变化情况,制订此评价标准;

(3) 水质指标参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中国国家地表水分类标准以及会仙湿地相关研究数据进行了分级,其中水质综合指数参考了罗斯(S. L. Ross)水质指数的计算方法及相关分级标准,水质达标率按照TN、TP、DO以及COD_{Cr}的达

标率进行计算,具体计算方法参照文献^[33]、^[34];

(4) 生物指标评价标准以《广西会仙湿地鱼类多样性》和《桂林会仙湿地生物多样性研究》文献为基础进行筛选;

(5) 基于《桂林会仙岩溶湿地近40年演变的遥感监测》文献和遥感解译,结合会仙湿地40年遥感影响的监测和解译结果,制订了物理指标的评价标准,其中水域面积指标以面积变化的大小作为评价标准,湿地周围植被覆盖度和农业利用土地面积基于遥感信息进行制订;

(6) 公众满意度、垃圾量和透明度指标结合公众调查结果确定。

3.4 评价指标权重设定

本文采用层次分析法(AHP)进行指标权重的计算^[35]。

3.4.1 层次模型构建

层次结构的建立对评价结果的有效性极其重要。基于目标层、准则层和指标层的设定,建立以下层次结构模型(图2)。

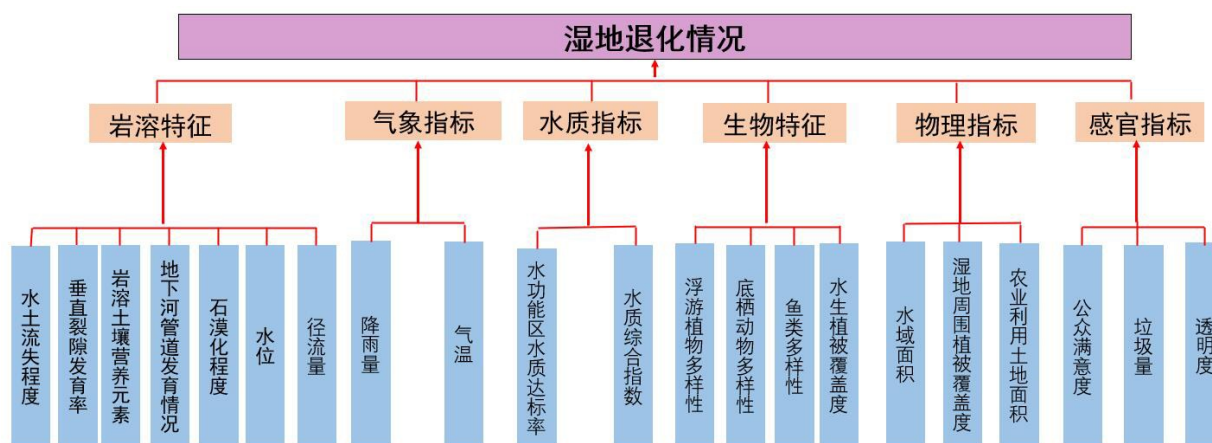


图2 层次模型构建

Fig.2 Hierarchical model construction

3.4.2 判断矩阵构建

判断矩阵的构建是层次分析法(AHP)的关键。层级结构中的各层元素可进行两两比较,从而建立判断矩阵。判断矩阵的元素值反映了人们对各因素相对重要性的认识,下层要素对于上次要素的相对重要性即为权重。假设有 n 个元素,一般采用A. L. Saaty引入的1~9及其倒数的标度方法进行重要性的确定^[36]。判断矩阵的标度如下表3所示。

判断矩阵 $C=(c_{ij})_{n \times n}$,其中 c_{ij} 表示因素 i 对因素 j

的相对重要性。

3.4.3 层次排序及一致性检验

采用“方根法”计算判断矩阵的特征向量和最大特征根,并进行判断矩阵的一致性检验。判断矩阵的一致性是指推求河流生态适宜性权重的前提,作一致性检验需确定其一致性指标 CI 、平均随机一致性指标 RI ,并通过 CI 与 RI 之比求出随机一致性比率^[37]:

$$CR=CI/RI \quad (1)$$

表3 判断矩阵的标度及其含义

Table 3 Scale of the judgment matrix and its meaning

重要尺度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	表示两个因素相比,后者比前者重要,取上述等级的倒数

式中:CR为判断矩阵的随机一致性比率。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$

(2)

式中:n为判断矩阵阶数; $\lambda_{\max}$ 为最大特征根。RI由大量试验给出,对于低阶判断矩阵,RI取值列于表4的1、2阶。

而对于高于1、2阶的判断矩阵,需要进一步查阅有关资料或采用近似方法检验。即令:

表4 随机一致性指标RI取值表

Table 4 Random consistency index RI value

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

$$CR=\frac{\lambda_{\max}-m}{m-1}$$

(3)

当上式计算值 $CR<0.10$ 时,判断矩阵具有满意的一致性。否则,应对判断矩阵予以调整。 $CR<0.10$,判断矩阵符合一致性要求,层次单排序结果有效可靠,这证明通过层次分析法得出指标层各指标的权重值可行,检验通过后确定准则层和指标层的层次单排序权重,最后再计算出指标层相对目标层的层次总排序权重。

3.4.4 权重计算

会仙湿地退化评价指标体系中各指标权重的确定主要分为两步,首先为专家打分确定权重,其次是利用AHP层次分析法进行权重确定。专家打分和指标权重计算结果如下表5。

表5 各指标权重值

Table 5 Weight values of each index

目标层	准则层	指标层	分权重	总权重	总权重排序
会仙湿地退化 分级分类评价 指标体系	岩溶特征(0.286 7)	水土流失程度	0.232 7	0.066 7	5
		石漠化程度	0.247 8	0.071 0	4
		垂直裂隙发育率	0.119 7	0.034 3	12
		地下河管道发育情况	0.131 4	0.037 7	10
		岩溶地球化学(土壤营养元素)	0.062 6	0.018 0	19
		水位(地表河与地下河)	0.098 1	0.028 1	16
		径流量(地表河与地下河)	0.107 6	0.030 9	15
	气象指标(0.081 4)	降雨量	0.666 7	0.054 3	9
		气温	0.333 3	0.027 1	17
	水质指标(0.172 4)	水质综合指数(COD _{Cr} 、DO、氨氮、总磷、总氮)	0.5	0.086 2	2
		水功能区水质达标率	0.5	0.086 2	3
	生物特征(0.171 0)	浮游植物多样性(种类数、密度、优势种)	0.141 8	0.024 2	18
		水生植被覆盖度	0.200 2	0.034 2	13
		鱼类多样性(种类数、密度、优势种)	0.329	0.056 3	8
		底栖动物多样性(种类数、密度、优势种)	0.329	0.056 3	7
	物理指标(0.229 4)	水域面积	0.588 9	0.135 1	1
		湿地周围植被覆盖度	0.159 3	0.036 5	11
		农业利用土地面积	0.251 9	0.057 8	6
	感官指标(0.059 0)	透明度	0.139	0.008 2	21
		垃圾量	0.285 3	0.016 8	20
		满意度	0.575 8	0.034 0	14

3.5 评价方法

各指标的权重系数确定后,应根据隶属度值的计算方法计算出各指标的隶属度值,然后建立评价模糊关系矩阵。模糊关系矩阵确定后,将其与计算出的权向量进行复合运算,从而得到各个准则层的评价值,从而确定湿地退化状况^[38]。本研究根据各指标对湿地退化的影响—响应关系,将评价指标分为正向指标和逆向指标。

4 结 论

(1) 岩溶水文地质条件、气候环境、石漠化、岩溶裂隙发育等自然因子及湿地污染、人为破坏等人为因子是导致会仙湿地退化的主要驱动因子;

(2) 建立的会仙岩溶湿地退化评价指标体系包括3个层次和21个评价指标,充分结合了会仙湿地的现实状况,突出了会仙的岩溶特征,形成了岩溶湿地的特色指标体系。评价指标体系准则层的岩溶特征、气象指标、水质指标、生物特征、物理指标以及感官指标的权重值分别为0.286 7、0.081 4、0.172 4、0.171 0、0.229 4、0.059 0,岩溶特征和物理指标所占权重较大,两者是评价岩溶湿地退化的主要指标。

参考文献

- [1] 蔡德所,马祖陆.会仙岩溶湿地生态系统研究[M].北京:地质出版社,2012:20-50.
- [2] 李世杰,蔡德所,张宏亮,等.桂林会仙岩溶湿地环境变化沉积记录的初步研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2009,27(2):94-100.
- [3] 吴协保.桂林会仙喀斯特湿地资源现状与保护恢复[J].湿地科学与管理,2014(2):20-22.
- [4] 袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1993.
- [5] 林栋材,魏宇,张新兴,等.从岩溶水文地质角度分析桂林会仙湿地修复问题[C].Proceedings of the 中国水利学会勘测专业委员会2008年学术年会,2008:221-222.
- [6] 张丽娜,谭伟福,王海京.桂林会仙喀斯特湿地公园湿地保护与恢复初探[J].广西林业科学,2012,41(3):303-305.
- [7] 杨波.我国湿地评价研究综述[J].生态学杂志,2004,23(4):146-149.
- [8] Brinson M M, Rheinhardt R. The Role of Reference Wetlands in Functional Assessment and Mitigation[J]. Ecological Applications, 1996, 6(1):69-76.
- [9] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [10] 程亚平,蒋亚萍,姚高峰.会仙湿地生态退化特征研究[J].工业安全与环保,2015,41(4):73-75.
- [11] 张定亨.中国最大的岩溶湿地——会仙[J].广西林业,2012(7):33-37.
- [12] Xu D, Wang Y, Zhang R, et al. Distribution, speciation, environmental risk, and source identification of heavy metals in surface sediments from the karst aquatic environment of the Lijiang River, Southwest China[J]. Environmental ence and Pollution Research, 2016, 23(9):9122-9133.
- [13] 朱丹尼,邹胜章,周长松,等.桂林会仙岩溶湿地水位动态特征及水文生态效应[C]//2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第四卷),2019.
- [14] 栗圆圆,郭纯青,马祖陆.桂林会仙岩溶湿地水文地质条件探讨[C]//中国水论坛,2007.
- [15] 莫崇勋,阮俞理,莫桂燕,等.变化环境下桂林市降雨趋势及周期特征分析[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(1):390-396.
- [16] 吴华英,覃小群,黄奇波,等.石漠化:地球的癌症[J].中国矿业,2019,28(S1):371-372.
- [17] 沈德福,李世杰,蔡德所,等.桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析[J].高校地质学报,2010,16(4):517-526.
- [18] 苏俊磊,罗为群,谷佳慧,等.岩溶峰丛洼地水土流失过程、机理及综合防治研究进展[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2019,37(2):16-22.
- [19] 卢玫桂.广西桂林石灰土的元素生物地球化学特征[D].桂林:广西师范大学,2005.
- [20] 吴应科,莫源富,邹胜章.桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策[J].中国岩溶,2006,25(1):85-88.
- [21] 陈颖,张明祥.中国湿地退化状况评价指标体系研究[J].林业资源管理,2012(2):116-120.
- [22] 余绍文,周爱国,孙自永.湿地退化的地质指标体系[J].地质通报,2011,30(11):1757-1762.
- [23] 蔡会德,胡宝清,农胜奇,等.广西石漠化治理现状及其分区施策[J].广西师范学院学报(自然科学版),2011,28(3):57-62.
- [24] 高士武,李伟,张曼胤,等.湿地退化评价研究进展[J].世界林业研究,2008,21(6):13-18.
- [25] 刘峰.黄河三角洲湿地水生态系统污染、退化与湿地修复的初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [26] 肖谋艳.生态功能区绿色发展绩效评价及其指标体系构建研究[J].环境科学与管理,2019,44(6):148-153.
- [27] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [28] 黄健,胡祎祥,黄亮亮,等.广西会仙湿地鱼类多样性[J].湿地科学,2017,15(2):256-262.
- [29] 李发文,王艳萍,夏超.桂林会仙湿地生物多样性研究[J].安徽农业科学,2017,45(35):64-66.
- [30] 中华人民共和国水利部. SL 461—2009 岩溶地区水土流失综合防治技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2010:3-4.

- [31] 类延忠,冯颖,周宝同,等.岩溶地区水土流失强度的等级划分研究:以毕节岩溶区为例[J].水土保持通报,2013,33(2): 221-225.
- [32] 李挺宇.我国石漠化土地5年减少1/6[J].生态经济,2019, 35(2): 9-12.
- [33] 伍晨,李洪兴.水质指数在水质综合评价中的应用研究进展[J].环境与健康杂志,2014,25(1):91-93.
- [34] 涂敏.基于水功能区水质达标率的河流健康评价方法[J].人民长江,2008,22(23):134-137.
- [35] 李文艳.天津滨海湿地生态系统退化指标体系的构建与评价研究[D].济南:山东师范大学,2011.
- [36] 张晓龙,刘乐军,李培英,等.中国滨海湿地退化评估[J].海洋通报,2014,33(1):112-119.
- [37] 王元云,何奕忻,鞠佩君,等.层次分析法在若尔盖湿地退化研究中的应用[J].应用与环境生物学报,2019,25(1): 46-52.
- [38] 朱洁,连新泽,柯爱英,等.模糊评价法在楠溪江水质评价中的应用[J].浙江水利科技,2018,46(6): 8-13.

Preliminary study on the construction of evaluation index system of karst wetland degradation

SONG Tao^{1,2,3}, ZOU Shengzhang^{1,2}, ZHANG Liankai^{1,2}, ZHOU Changsong^{1,2}, ZHAO Yi^{1,2}, SHEN Lina^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, MNR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract There are large quantity of wetlands over the karst areas in southwestern China. Among them, the Huixian karst wetland is one of the largest karst wetlands, a largest natural wetland developed in the area with low-altitude and mid-latitude in the tropical and subtropical region. This wetland has played an important role in preserving water and ecological resources in the karst area. In recent years, due to the vulnerability of the karst wetland and the impact of human activities, the total area of the Huixian wetland has gradually reduced. As a result, the ecosystem of the wetland has been seriously damaged, characterized by severe degradation in ecological function. Thus, the protection and restoration of the Huixian karst wetland has become the focus of human attention. In order to better protect the wetland resources and ensure the health and sustainable development of the wetland, it is of great significance to construct an evaluation index system in line with the characteristics of the Huixian wet karst, and to conduct an objective, scientific and quantitative evaluation of the degradation of the Huixian wetland. In this study, firstly, we examined the unique karst characteristics in relation to the wetland, and then screened out the main factors affecting the health of the wetland. On this basis, the index system for the wetland assessment was established, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) model in which the weight of each affecting factor was also determined. At the same time, through analyzing relevant research data and relevant standards associated with the wetland, the wetland degradation grades, together with evaluation methods, were proposed in this study. Finally a set of karst wetland degradation evaluation index system with 3 levels (target level, criterion level, index level) and 18 evaluation indexes was constructed. The construction of this index system fully combined the special hydrogeological driving factors of karst wetlands (rocky desertification, soil erosion, karst development, etc.) and the actual conditions of the wetland (geographical location, land use, etc.), with typical karst characteristics, which can be used in the health evaluation of typical karst wetlands and sustainable development protection, providing theoretical support for the protection and restoration of karst wetlands.

Key words karst wetland, degradation, grading classification, index system

(编辑 黄晨晖)