

张华,王波,高瑜,等.岩溶断陷盆地湿地成因类型及水流系统特征研究[J].中国岩溶,2023,42(4):672-684.

DOI: 10.11932/karst20230404

岩溶断陷盆地湿地成因类型及水流系统特征研究

张华^{1,2,3,4,5},王波^{3,4,5},高瑜^{3,4,5},康晓莉^{3,4,5},王宇^{3,4,6},
刘绍华^{1,2},康晓波^{3,4,5},罗为群^{1,2},赵勇⁷

(1. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站,广西平果 531406; 3. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,云南昆明 650216; 4. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹),云南昆明 650216; 5. 云南省地质环境监测院,云南昆明 650216; 6. 云南省地质调查局,云南昆明 650051; 7. 云南省地质调查院,云南昆明 650216)

摘要:云南断陷盆地岩溶湿地众多,是云南高原生态系统的重要组成部分,但因各种原因,造成湖泊淤积、水面面积缩小以至消亡,滇东地区的湖泊退化较为明显,近30年内有20多个天然湖泊过早消亡。文章开展滇东岩溶断陷盆地内具有代表性的通海湖泊退化型(杞麓湖湿地)、泸西地下水聚积型(黄草州湿地)、宣威地下河淤塞型(格宜串珠状湿地)三种类型典型岩溶湿地研究,主要研究湿地的成因类型及特征、湿地“三场”(径流场、水化学场、温度场)特征,分析岩溶断陷盆地内天然形成的湿地地质条件、水文地质条件、水环境影响因素及定量评价水环境质,以及岩溶湿地自然及人为影响因素、影响形式、作用强度、效应和水源减小、污染加剧、水质下降、湿地萎缩等及其生态环境问题。研究表明,通海湖泊退化型(杞麓湖湿地)受人为和自然因素影响较大,水质水量是其退化的主要原因;泸西地下水聚积型(黄草州湿地)受湿地内地下补给、净化、修复,水质总体较好;宣威地下河淤塞型(格宜串珠状湿地)受区域地下水水位变化影响,地下水总体丰富。文章研究成果为岩溶断陷盆地湿地的保护、科学研究、利用、生态修复提供地质依据。

关键词:湿地类型;湿地特征;水流系统;水环境;湿地修复;岩溶断陷盆地

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0672-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶断陷盆地(fault basin)是指在广袤的西南岩溶石山区,周围石山环绕、中间为新生界沉积平坝的盆状地形区域,当地俗称为“坝子”^[1]。

岩溶湿地(karst wetland)主要是指分布在岩溶地

区(地表、地下),或以岩溶水为主要补给水源,具有岩溶地区特有的富钙偏碱性水土特征、具有典型岩溶水土循环演化机制、以喜钙耐碱的湿地生物群落为主或与喜钙耐碱的生物群落相互依存为特征的内陆湿地,包括岩溶区地表或地下的湖泊、沼泽、河流或其他岩溶地下水文系统^[2]。

基金项目:自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金专项/广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题资助(KDL202101)、国家重点研发计划项目(2016YFC0502502)联合资助

第一作者简介:张华(1982—),男,本科,高级工程师,主要从事水工环地质调查研究。E-mail:ynddysghs.zhh@163.com。

通信作者:刘绍华(1986—),男,硕士,助理研究员,长期以来主要从事岩溶水文地质、生态地质、岩溶环境等方面调查研究。E-mail:liushaohua@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期:2023-01-20

湿地被称为“地球之肾”，是地球表层系统的重要组成部分，是自然界最具生产力、价值最高的生态系统之一^[3]。尽管湿地仅占全球陆地面积的5%~8%^[4]，却是很重要的自然资源，有着重要的生态功能^[5]。国内外对湿地的研究主要是围绕着退化湿地生态恢复与重建^[6]、湿地与全球变化关系研究^[7]、城市湿地的功能评价^[8-9]、湿地开发利用^[10]、湿地的水环境^[11]等领域，研究方法由过去的局限于湿地特征和质量定性评价，发展到湿地定量评价的3S技术和数学模型方法^[12-13]的广泛应用。云南岩溶高原湿地特征显著，与地下水和水文地质作用关系紧密，研究成果为岩溶湿地生态环境变化及驱动机制^[14]、湿地的功能研究^[15]、沉积物水质分析评价^[16]、水文特征分析^[17]。云南断陷盆地中岩溶湿地众多，湖泊湿地是云南高原上的明珠，但因各种原因造成湖泊淤积、水面面积缩小甚至消亡，湖泊退化严重。据20世纪50年代初统计至今，水面面积1 km²以上的湖泊由原来的50余个发展至今已不足30个。滇东岩溶区的湖泊湿地退化较为明显，如石屏县赤瑞湖、嵩明县嘉丽泽、陆良县中原泽、曲靖东湖、宣威迤谷海等均已干涸。人们对云南的自然岩溶湿地、湖泊湿地及裂隙构造湿地研究广泛，且对不同的地质环境、不同的海拔、不同的地貌类型岩溶湿地研究的理论水平较高。而从区域地质、水文地质演化方面的研究相对较低。本文通过野外调查、水位水量监测、水质分析等，采用水文地质学及岩溶学方法，深入研究岩溶断陷盆地湿地的成因类型、湿地形成的影响因素，并定量分析湿地水资源相关水量、水质等对湿地的控制因素，为岩溶断陷盆地湿地的保护、科学研究、利用以及生态修复提供地质依据。

1 岩溶断陷盆地地质环境概况

研究区的3个岩溶盆地为通海盆地、泸西盆地、宣威格宜洼地，3个典型岩溶盆地内形成的岩溶湿地各具特色，岩溶断陷盆地及湿地位置见图1、特征见表1。

1.1 通海岩溶断陷盆地

通海杞麓湖岩溶断陷盆地位于云南省中部，为云南山字形构造前弧发育的岩溶断陷盆地，杞麓湖位于岩溶断陷盆地的北东部。盆地底部延伸方向和

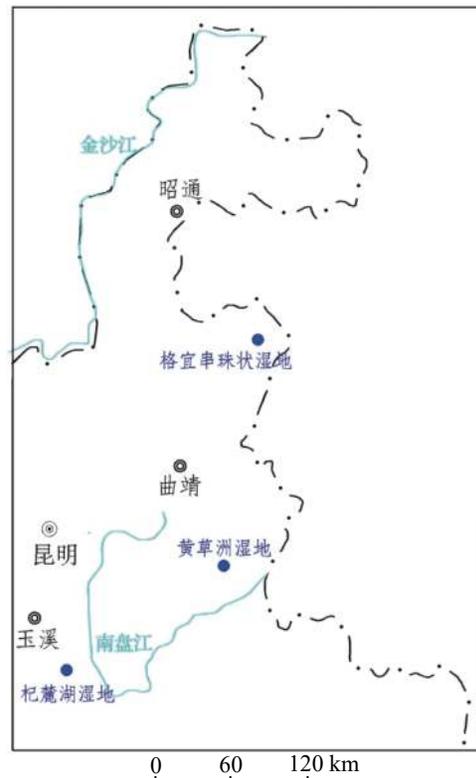


图1 研究区湿地分布图

Fig. 1 Distribution of wetlands in the study area

山字型构造前弧一致。盆底第四系湖积层，厚约280 m，以灰黑色砂质黏土、淤泥为主，夹细砂、砂砾螺蛳壳层，夹层最大厚度20 m，一般在5~15 m。盆地底部地势由南西向东北逐渐降低，海拔1 795~1 800 m，地势较为平坦^[18]。

杞麓湖岩溶断陷盆地孔隙水主要赋存于砂砾螺蛳壳层中，富水性很弱，动态变化不大，年变幅仅1 m。盆地周围出露碎屑岩，主要有三叠系干海子组(T_{3g})及侏罗系冯家河组(J_{1f})、张河组(J_{2z})和蛇店组(J_{2s})等砂岩、泥岩，在盆地西部出露面积较大，赋存裂隙孔隙层间水。岩溶水为盆地内主要地下水类型，含水层主要为二叠系(P)、泥盆系(D)、震旦系(Z)厚层状灰岩、白云岩，多呈块状分布于盆地南部，岩溶发育，富水性强。岩溶水在盆地外围岩溶山区接受大气降水渗入补给和基岩裂隙水侧向补给后，自四周向盆底径流，一部分在盆底边缘以泉点形式出露于地表，另一部分在盆底的北西部的四街和南部的九街、杨广形成富水块段。总的来说，在杞麓湖岩溶断陷盆地北部和西部，岩溶水埋藏浅，多沿盆地边缘呈线状以泉点的形式出露于地表，盆地中的钻孔出现承压自流现象；而东部岩溶水水位埋深大，泉水出露

表 1 断陷盆地地质环境特征
Table 1 Characteristics of geological environment of fault basins

岩溶断陷盆地	湿地类型	形态规模	地形地貌	主要含水层	主要构造	岩溶发育程度	湿地规模
通海盆地	杞麓湖湖泊退化型	半月形,呈近东西向,流域面积 345.95 km ² ,盆底面积 153.39 km ²	盆地四周侵蚀、溶蚀低中山地貌,海拔 1 900~2 200 m,坡度 20°~30°	二叠系(P)、泥盆系(D)、震旦系(Z)厚层状灰岩、白云岩,多呈块状分布于盆地南部,富水性较强	断裂构造为北东及北西向,多为张扭性断层,具有一定的导水富水作用	岩溶发育中等	杞麓湖形似葫芦,东西长 15 km,南北宽 5 km,湖水面积 42.3 km ² ,占盆地面积的 11.95%,最大水深 15 m,平均水深 4 m,蓄水量约 1.94×10 ⁸ m ³
泸西盆地	黄草州地下水聚积型	椭圆形,呈北东向,流域面积 1 009.28 km ² ,盆底面积 78.1 km ²	盆地四周侵蚀、溶蚀低中山地貌,海拔 1 700~2 100 m,坡度 20°~45°	三叠系永宁镇组下段(T ₃ ^v)、三叠系个旧组(T ₂ g)、法朗组下段(T ₂ ^f)灰岩、白云岩,富水性较强	构造以北东和北东东向的断裂和褶皱为主。主要发育雨龙断裂、白水向斜、杨梅山背斜	岩溶发育强烈	黄草洲湿地目前面积 0.26 km ² ,水平水深 1.5 m,最深处可达 5 m
宣威格宜洼地	格宜串珠状湿地地下河淤塞型	圆形和不规则型,呈南北向,流域面积 160.82 km ²	微地貌属溶丘洼地,海拔 1 940~1 950 m,坡度一般小于 25°	二叠系阳新组(P ₂ ^y)灰岩、白云质灰岩、白云岩、泥质灰岩,富水性较强。	格宜向斜构造	岩溶发育强烈	5个溶塘(启文湖、酒厂湖泊、格宜二中湖泊、文渊阁湖泊、崇明湖),呈“上”,呈北东—南西向和北西向串珠状分布,面积小于 0.01 km ² ,水深 0.6~2.14 m

少。岩溶水位埋深一般 3.17~45 m,承压性水位+0.8 m。

杞麓湖岩溶断陷盆地为一封闭的湖盆,汇集的大气降水分别以地表、地下自四周向盆地内径流至杞麓湖,汇水面积 345.95 km²。整个盆地的地表水通过位于盆地东南端的落水洞灌入岳家营暗河管道补给地下水,落水洞高程 1 786.27 m。根据地表岩溶发育特征推测暗河管道在岳家营首先向南发育,再偏南东方向,于罗庄充水落水洞转向东发育 16.5 km,受构造及碎屑岩控制地表发育较多干枯落水洞,再经咱乐充水落水洞,转向北沿断层带碎屑岩与碳酸盐的断层接触带径流 8.5 km,于华宁县宁州镇高寨村北西 400 m 处的暗河出口呈股状涌出^[19](图 2)。

1.2 泸西岩溶断陷盆地

泸西岩溶断陷盆地以地块断陷为主导,侵蚀及溶蚀共同作用形成,由里到外不同成因和组合形态的地貌呈现环带状分布,总体地势由低平递增至高耸,地形切割由浅到深,地貌分布和变化规律明显。构造控制了盆地地貌特征及地下水的分布,是北东

向暗河管道形成的主控因素,通常沿断裂走向出露泉点,发育串珠状的洼地、落水洞及溶洞等。出露地层以中生界三叠系为主,局部地段分布古生界二叠系、新生界下第三系。坝区、河谷区及山区洼地内分布有新生界第四系红黏土、砂质黏土、细砂、砂砾,一般厚度 0~30 m。

泸西喀斯特断陷盆地流域是一个具有完整的补给、径流、排泄过程的岩溶水系统,地表水、地下水转换频繁,地表水补径排特征主要以小江河径流过程体现,地下水在接受大气降水补给后,上层径流以泉、暗河的形式在泸西盆地底面排泄后转化成地表水,最终汇集于盆地南部、通过工农隧洞及落水洞排向小江;下层径流则以小江水面为基准,通过深层径流排泄^[20](图 3)。

1.3 宣威岩溶断陷盆地

宣威岩溶断陷盆地在区域上属北盘江三级流域,革香河四级流域,五级田边地下河系统。流域面积 160.82 km²,属裸露型岩溶系统,东西两侧以碎屑岩地表分水岭、地下分水岭为界,北部以碎屑岩地下分水岭边界为界,南部主要以 C₂w、Pe 碎屑岩为隔水边

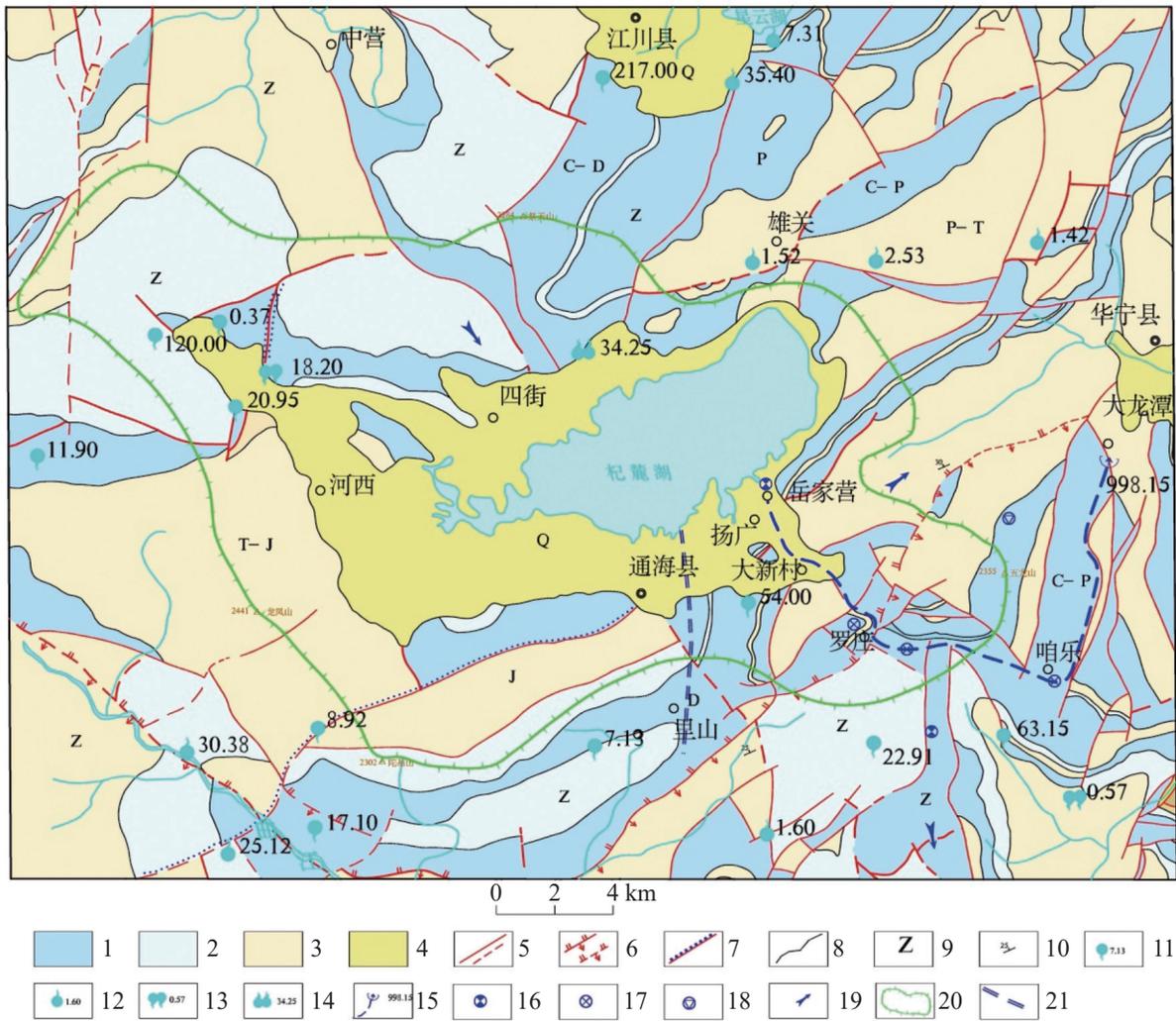


图 2 通海盆地流域水文地质图

1-纯碳酸盐岩类岩溶水 2-不纯碳酸盐岩类岩溶水 3-基岩裂隙水 4-松散岩类孔隙水 5-实测及推测断层 6-实测及推测逆断层 7-推测充水断层
8-岩组类型界线 9-地层代号 10-地层产状 11-下降泉, 流量(L·s⁻¹) 12-上升泉, 流量(L·s⁻¹) 13-下降泉群, 流量(L·s⁻¹) 14-上升泉群, 流量(L·s⁻¹)
15-暗河及出口中, 流量(L·s⁻¹) 16-充水落水洞 17-无水落水洞 18-无水岩溶漏斗 19-地下水流向 20-流域边界 21-调蓄水隧道工程

Fig. 2 Hydrogeological map of the watershed of Tonghai basin

界。碎屑岩裂隙含水组有 C_{1w} 、 P_2l 、 P_{3x} ，喷出岩裂隙含水层 Pe ，它们多呈条带状分布于系统西、南、东三侧，且构成隔水边界。 P_{2y} 中岩溶发育，地貌上多形成溶丘、洼地溶蚀槽谷、槽谷，洼地边缘发育 1-2 层干溶洞，在格宜长房子村、法夏村养猪场洼地底部发育充水落水洞及暗河管道，成为地下水运移的主要通道^[21]。系统西、南、东三侧为隔水边界， P_{2y} 下伏地层 P_2l 构成隔水底板，在空间上组合构成一个向斜储水构造。裸露的 P_{2y} 含水层，接受大气降水补给后，部分在洼地及槽谷边缘出露，之后沿沟谷或伏流进入洼地，灌入落水洞；部分沿溶蚀裂隙进入地下河管道。系统内地下水最终向南沿田边地下河管道径流，于革香河左岸谷底排泄。

整个田边暗河系统分为四级排泄基准面，一是溶丘洼地边缘格宜大龙潭，二是格宜镇周边溶丘洼地串珠状湖泊出露；三是五甲科洼地底部排泄，四是革香河最终排泄^[22]。

2 岩溶湿地成因类型及特征

2.1 湖泊退化型（杞麓湖）

由于泥砂淤塞暗河岩溶管道，岳家营落水洞最大泄流量不断减小，由 $6.73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1958 年 1 月) 逐渐减小为 $2.35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1998 年 9 月)。为了满足灌溉需求，落水洞处修建了人工闸门，人为地控制落水洞泄水量，雨季时湖蓄水，旱季时放水，40 年来湖水面积

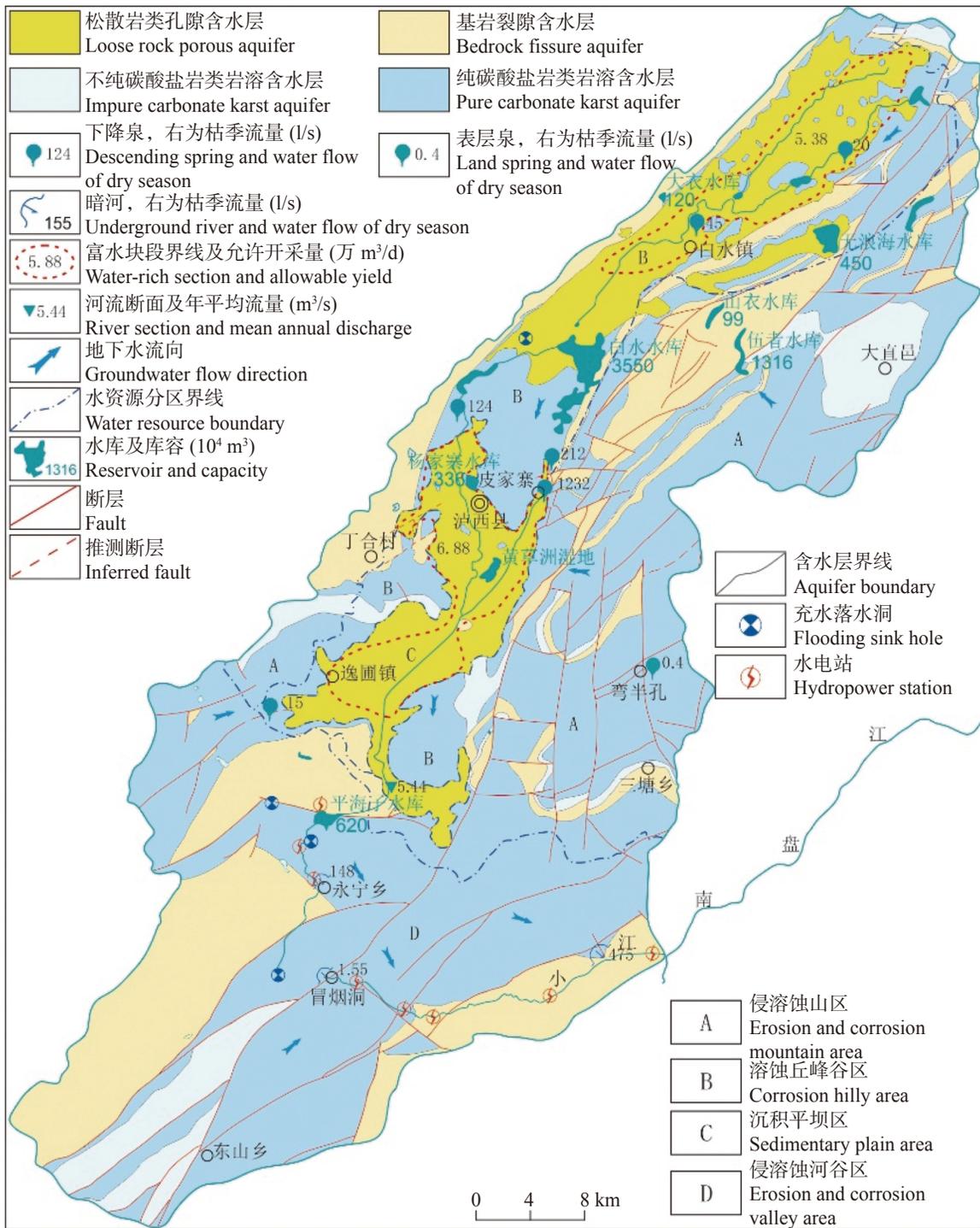


图 3 泸西岩溶断陷盆地流域水文地质图

Fig. 3 Hydrogeological map of Luxi karst fault basin

变化不大,但因落水洞最大泄流量的减小使杞麓湖调蓄功能逐渐减小,时常发生旱涝灾害。分析认为管道淤塞的主要原因是岩溶通道入口处的部分溶隙被淤积的泥砂堵塞,导致落水量不断减小,加上在岩溶管道沿线的落水洞相对附近海拔低,降雨时携带的泥砂、枯枝落叶、生活垃圾等被雨水冲入到落水洞,在发育相对狭窄的部位堆积起来堵塞岩溶管道,

导致落水洞泄流量变小。

因此修建了杞麓湖调蓄水隧道工程,长 9.97 km,北起东村北 1 500 m 杞麓湖边,途经东村、酱菜厂转南西,经梅子园、里山镇至下许家庄南东 500 m 的大河旁。工程设计底板标高 1 793.96 m,低于盆底 2 m,出口底板标高 1 767.86 m,低于盆底 28 m。

杞麓湖逐渐退化、萎缩的原因是多方面的,其一

降雨量分布不均,雨季降雨量大,其它时段降雨量小,难于维持湖泊水量;其二雨季易发生洪涝,岳家营落水洞和修建调蓄水隧道工程将汇集的湖水排泄到外流域,水多时外流,缺水时难补,水资源调蓄难度大;其三通海县作为蔬菜农业大县,蔬菜种植需要大量的用水保苗,因此杞麓湖既是灌溉水源地也是汇水地,以致杞麓湖的水位总是在下降,且水质在整个云南高原湖泊中最差;其四虽然盘溪大龙潭调水^[23]工程已经完工,但运行工程所需的电费、水资源费等资金缺口大,调水工程运行困难。

2.2 地下水聚积型 (黄草洲)

泸西黄草洲湿地东有皮家寨、坝心龙潭之水汇入东子河,西有泸源之水流入西河。这两部分水都是从暗河管道出露。古时候这两部分水的水量都很大,就像是两条玉带环绕着县城,称为“水抱”。1946年以前,黄草洲区域岩溶湖泊湖面南北、东西向都约 5 km,水面面积 25 km²,由于盆地底部常年淤积,蓄水量减少,导致洪水频发;1966 年建成工农隧道排洪,就此湖泊面积逐渐缩小;至 1980 年,水面面积 0.4 km²,现如今黄草洲湿地目前面积 0.25 km²,水平水深 1.5,最深处 5 m^[24]。黄草洲湿地不仅有外部地表水的汇入,同样也有湿地内的孔隙水和岩溶地下水出露,但来看自外部的地表水远远大于内部地下水,才使得黄草洲湿地一直存在,通过黄草洲湿地净化地表水后,水质总体有所提升。

2.3 地下河淤塞型 (格宜的串珠状湿地)

由于地质作用形成了格宜向斜构造,在漫长的地质历史过程中地表水及地下水对碳酸盐岩进行着

不同形式、不同强度的改造,2.50 亿年前以来西南地区仍处于提特斯海域,加上 2.50~2.05 亿年中国大部分地区仍处于潮湿热带亚热带或温带气候的控制下,对岩溶发育非常有利。阳新组灰岩的岩性普遍较纯,方解石含量较高,CaO 含量 54.34%,白云石成分相对较低,MgO 含量 1.59%,CaO/MgO 比值越大,岩石可溶性越强,溶蚀率相对较大。强烈的溶蚀作用形成了岩溶洼地、槽谷、溶洞、暗河管道等相伴的岩溶地貌景观,岩溶发育显示出垂向上的成层性,平面上的不均一性和分布上的方向,岩溶极其发育,地形相对高差小于 50 m。发育的格宜向斜就像一个“盆”,地下水向盆底部集中,而向斜的核部位处于启文湖附近的洼地溶蚀槽谷,东、西向岩溶地下水通过节理裂隙补给、径流的地下水水向向斜核部排泄(图 4),地下水水位埋藏浅,汇集于如启文湖一样的溶塘中,水资源丰富。

串珠状湿地成因与区域地下水位埋藏浅有关,受下部岩溶管道淤塞影响,水位波动缓慢,水位的波动也与降雨量的多少有关,水流动慢,动力作用弱,岩溶作用也减弱,使得在该区原来形成串珠状洼地变成了串珠状溶塘湿地。

3 岩溶湿地水流系统结构

三个岩溶断陷盆地湿地水流系统结构各有特征,共同点是在下游径流排泄区都与发育的地下岩溶管道为介质为转化通道,湿地是排泄区,也是补给地下河出口的径流区。

通海杞麓湖湖泊退化湿地分布于盆地的底部,

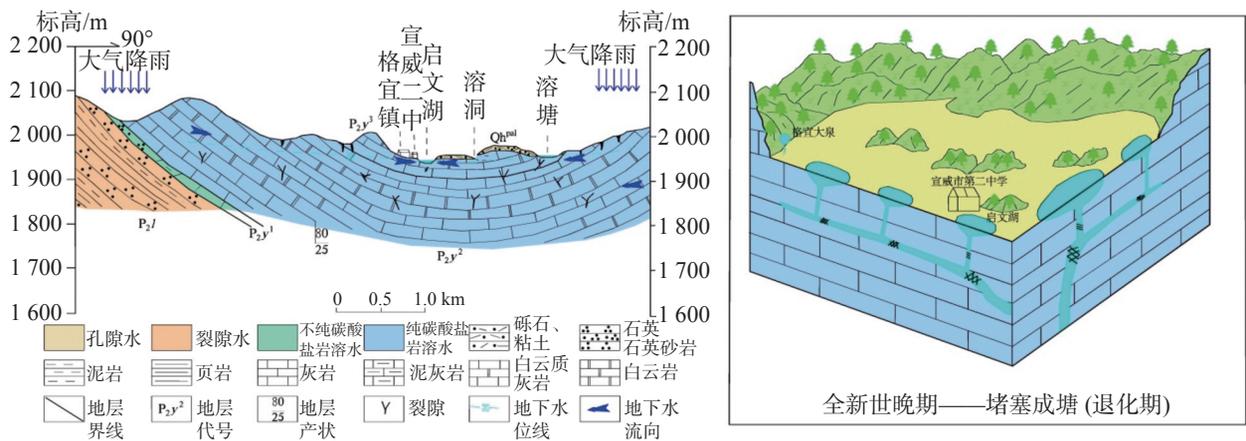


图 4 串珠状成因水文地质剖面及概化图

Fig. 4 Hydrogeological section and generalization of beaded genesis

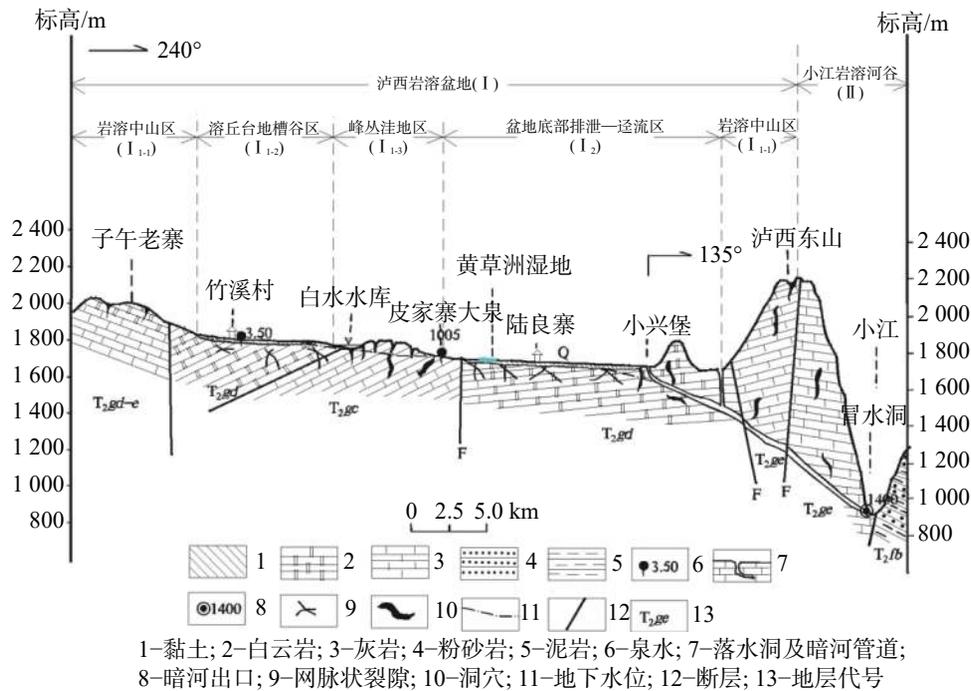


图5 泸西黄草洲湿地水流系统水文地质剖面

Fig. 5 Hydrogeological profile of flow system of Luxi Huangcaozhou wetland

通海盆地流域内的地下水、地表水最终汇入到杞麓湖,以汇集地表水为主,湿地分布面积大,以湖底的天然落水洞和人工隧道调蓄湖泊湿地的排泄。水流系统结构为地表水汇集→岩溶管道排泄型。

泸西黄草洲地下水聚积型湿地位于盆地中部,湿地有来自上游泸西岩溶断陷盆地流域的小江河径流,在盆地外围侵溶蚀山区主要接受大气降水补给,极少部分地下水以裂隙径流和季节泉排泄汇流的形式补给。在溶蚀丘峰谷地区,大气降水除少部分补给第四系松散含水层,大多转化成地表径流,流向下流的白水塘水库,而下伏岩溶含水层,主要接受来自东侧侵溶蚀山区的侧向补给,自北东向南西径流。下游白水塘水库至阿庐古洞出口、江头村一带,地表水通过洼地底部的漏斗、落洞以集中灌入式补给地下水,之后又以暗河出口、大泉形式排泄转入地表径流进入平坝区。在沉积平坝区,大气降水除少部分补给松散孔隙水外,大多转化为地表径流,沿西大河流向下游大兴堡、知府堂一带,于小兴堡村南东方向1.5 km处的落水洞、知府堂村附近的多个落水洞灌入转入暗河,岩溶水主要接受侵溶蚀山区下层径流的侧向补给,自北东向南西径流。整体上,在溶蚀丘峰谷地区,沉积平坝区,通过漏斗、落洞等方式补给下层(深层)地下水或以暗河、伏流等形式与上层

(浅层)地下水互相补给、转换,但以暗河出口或大泉在谷地底部、平坝边缘排泄的地下水补给小江河,这在该段地下水补给中占据主导地位。在侵溶蚀河谷区,小江河经落水洞潜入地下后,一部分通过伏流出口沿小江河涌出地表后向南盘江径流,另一部分汇同侧向补给的地下水,在冒水洞暗河出口排泄汇入地表流(图5)。地表水与地下转换较为频繁,由枯季测流分析,地下流量与地表转化地下流量相当。水流系统结构为地表径流+地下渗流→地表径流→岩溶管道排泄型。

宣威格宜串珠状湿地上部以地下水通过发育的裂隙径流补给,地下水位与湿地水面水位基本一致,由于下部岩溶管道堵塞,地下水在洼地底部形成富水块段,由于下一层岩溶管道堵塞,地下水以裂隙流形式向南部径流,以泉水排泄后再入落水洞呈管道径流。水流系统结构为地下裂隙渗流→泉排泄→岩溶管道排泄型。

4 岩溶湿地“三场”特征

4.1 “三场”(径流场、水化学场、温度场)特征

(1)径流场。通海杞麓湖湖泊湿地是整个通海盆地流域的地表水和地下水的排泄基准面,地表河

和大气降水为湖泊补给来源,雨季时湖泊水位上升,通过岳家营落水洞岩溶管道和人工修建的排洪隧道调蓄到华宁盆地和曲江河,旱季时未排水,抽水供农业保苗用水,湿地水位变化较大。泸西黄草洲湿地水源主要来自于上游的皮家寨大泉和坝心暗河出露的地下水,经河沟径流入湿地;另有部分来源于湿地自身出露的地下水,湿地成为地表水和地下水的混合场所,统一径流到盆地南东部入落水洞和人工排洪隧道汇入小江。格宜串珠状湿地发育的岩溶裂隙是地下水进入湿地的径流通道,串珠状湿地也是下游田边暗河的补给区,经地表地下转化后汇入革香河。

(2)水化学场。通过一年 4 次的监测调查(表 2),通海杞麓湖入湖河段基本被封堵,只有主河道红旗渠有大量河水汇入,其它河道只有少许渠道地表水汇入杞麓湖。入湖河道(监测点 13 处)的水参数与湿地差别不大,水体总体微绿。通海杞麓湖湿地(监测点 17 处):pH 7.40~9.71,平均 8.73,旱季 pH 大于雨季;氧化还原-137.40~-16.10 MV,平均-104.13 MV;O₂ 含量 0.17~19.71 mg·L⁻¹,平均 8.79 mg·L⁻¹;电导率 7.41~1358.00 μ·sm⁻¹,平均 902.55 μ·sm⁻¹;溶解性总固体 330.77~937.05 mg·L⁻¹,平均 626.63 mg·L⁻¹,电导率和溶解氧在湿地西部和南部值高,高值区靠近人口分布的主城区和农业生产区,水体总体微绿。泸西黄草洲湿地(监测点 7 处):pH 值 7.31~8.93,平均 8.21;氧化还原-106.40~-21.50 MV,平均-73.19 MV;电导率 288.80~533.00 μ·sm⁻¹,平均 393.22 μ·sm⁻¹;O₂ 含量 1.38~13.82 mg·L⁻¹,平均 8.54 mg·L⁻¹;溶解性总固体 223.86~319.30 mg·L⁻¹,平均 271.17 mg·L⁻¹,水

体总体清澈。入口处水质差,经湿地净化后水质好于入口^[25]。格宜串珠状湿地(监测点 5 个):pH 值 7.11~10.68,平均 8.40;氧化还原-35.90~-787.00 MV,平均-117.17 MV;电导率 196.00~626.00 μ·sm⁻¹,平均 306.65 μ·sm⁻¹;O₂ 含量 0.66~16.90 mg·L⁻¹,平均 7.18 mg·L⁻¹;溶解性总固体 132.97~431.00 mg·L⁻¹,平均 222.12 mg·L⁻¹;水体总体清澈。

(3)温度场。杞麓湖水温 12.70~29.70 °C,平均 21.12 °C,水温与气温关系紧密;黄草洲湿地水温 14.90~29.60 °C,平均 21.15 °C,以气温为主、湿地自产水温为辅;串珠状湿地水温 9.20~24.30 °C,平均 18.26 °C,由于面积小,气温和地下水温共同作用。

4.2 水环境影响因素

由于降雨量时空分布不均,雨季时降雨量大,易形成洪水,加之湿地因库容不足而排泄,极易造成自然灾害。旱季时降雨少,蒸发量大,因而湿地水位下降,这是影响湿地面积变化的自然因素。

杞麓湖湿地受自然和人为因素共同影响,雨季时淹没地势低的地段,旱季时因降雨量少和供给农业生产浇灌,用水量大于补给量,水位下降;雨季降雨时,地表径流通过红旗河入河,平时各支沟都没有地表水汇入,有的也是每秒几升的流量,大气降水对湖泊湿地地表河沟补给影响明显,同时也是改善水环境的有效途径。虽然采取调水入湖措施(1.1 m³·s⁻¹, 3 400 万 m³·a⁻¹),但因运行成本较大,实际的调水量不足,对水质改善的贡献不明显。

泸西黄草洲湿地受自然因素影响明显,上游皮

表 2 湿地水文参数监测表

Table 2 Monitoring table of wetland water parameters

湿地名称	月份	水温/°C	pH	氧化还原/MV	电导率/μ·sm ⁻¹	O ₂ /mg·L ⁻¹	溶解性总固体/×10 ⁻³	水位/m	流量/L·s ⁻¹
杞麓湖 湿地	3月	18.99	8.87	-113.59	1003.73	8.80		2.15	
	6月	24.30	8.18	-98.05	1015.54	8.16	675.35	2.46	
	9月	25.94	8.95	-95.89	911.67	8.83		1.55	
	12月	15.26	8.90	-108.98	679.28	9.39	577.91	1.25	
黄草洲 湿地	3月	18.82	7.94	-56.00	420.83	6.36		0.97	619.35
	6月	24.45	7.70	-69.38	405.00	7.55	267.86	1.10	612.77
	9月	24.97	8.47	-67.88	395.33	9.32		1.12	619.70
	12月	16.37	8.74	-99.49	351.72	10.96	274.48	1.12	626.48
格宜串珠 状湿地	3月	18.96	8.45	-83.01	343.71	6.09			
	6月	21.86	7.87	-79.18	326.01	6.13	227.40		
	9月	21.33	8.87	-138.24	312.38	7.43			
	12月	10.91	8.42	-168.25	244.50	9.06	216.85		

家寨大泉和坝心暗河通过地表进入湿地补给,也是主要湿地水源,补给水源的水质和湿地基本一致。

格宜串珠状湿地受自然因素和人为因素影响明显,湿地的水位与区域地下水位基本一致,格宜串珠状湿地周边就是乡镇驻地,人类的生产生活环境和排污对湿地起重要作用,对水环境起制约作用。

4.3 水环境质量评价

水源量直接决定了湿地是否存在及水体质量,串珠状湿地水位变幅 0.35~2.02 m,水位受地下水水位影响;黄草洲湿地出口流量 655.36~946.12 L·s⁻¹,受上游大泉、地下补给和湿地自产水补给影响,杞麓湖湿地水位埋深变幅 0.83~2.90 m,受地表河沟来水量影响。本次取宣威格宜串珠状湿地的启文湖、泸西黄草洲湿地入口处、泸西黄草洲湿地出口处、通海杞麓湖湿地南东、通海杞麓湖湿地北东、通海杞麓湖湿地西 6 处地表水进行测试分析。

按照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行单项水质评价,除启文湖水水质达到Ⅲ类以外,其他都为劣Ⅴ类,主要是 pH、COD、石油类、总氮超标,表现为生活污染对地表水水体污染较为严重。随着污染的加剧,从水环境和生态景观的作用难于发挥,水资源的有效开发受限。

由于人类工程活动,串珠状湿地和黄草洲湿地原有的湿地面积被占用为建筑用地,黄草洲湿地由 1964 年的 10 km² 缩小为现在的 0.25 km²,城市建设的不断扩展和河道围砌等人类活动,导致地下水径流路径不畅,破坏了地下水与湿地的相互交换,水流交换作用减少从而导致湿地萎缩。

串珠状湿地与地下水浅循环,受区域地下水水位变化而变化,黄草洲湿地有来自上游大泉、暗河的补给,也来自湿地内地下水的补给,串珠状湿地和黄草洲湿地的水不断循环交替、置换,水质和水环境质量相对较好。而杞麓湖湖泊是汇水区范围内降雨量和河沟地表水的补给,农业活动强烈、农业需水量大、降雨量时空不均、水生物大量生长和繁殖,污染物难于稀释扩散而不断累计,水体富营养化,严重威胁水环境和水生态,水质质量差^[26]。

5 问题分析及讨论

5.1 研究工作中存在的问题

本次研究过程未开展湿地周边钻孔的监测,地

下水质和量对湿地影响机制和程度未开展研究,特别是通海盆地的孔隙水。本次水质监测只开展了一次,未能按季度开展监测,在评价水质的结果不能更客观反应时间上的差异性。

5.2 湿地生态修复中与水有关的问题

一是开展湿地的质、水量、水位的长期监测,掌握其动态变化趋势^[27],根据不同时期的数据制定相关的水质修复措施和水体的污染防治措施;二是开展湿地周边绿化和乔灌木种植,美化湿地环境、涵养水源;三是开展调入置换工程,但工程造价和运行成本高,实施的调入置换工程效果缓慢;四是提升杞麓湖入湖地表水的处理净化能力,改善水体的富营养化现状,提升水质质量,改善水环境;五是改善农业种植肥料,使用绿色环保的有机肥,减轻农用药物对地下水污染^[28-30]。

6 结论

(1)岩溶断陷盆地内的三种岩溶湿地类型湖泊退化型(杞麓湖)、地下水聚积型(黄草州)、地下河淤塞型(格宜的串珠状湿地)。三种类型三个岩溶断陷盆地湿地岩溶特征较为相似,地表、地下水转化频繁,都与发育地下岩溶管道为转化通道,湿地是排泄区,也是补给地下河出口的径流区,都是通过发育的岩溶管道排泄到地表河。湖泊退化型(杞麓湖)在盆地底部汇集整个盆地地表水湖泊;地下水聚积型(黄草州)处于盆地中部的浅水位区,孔隙水和岩溶水也是湿地的补给源;地下河淤塞型(格宜的串珠状湿地)发育在峰丛洼地地形,早期地下水径流通道的岩溶管道堵塞转变为现在的岩溶裂隙径流;

(2)湖泊退化型(杞麓湖)湿地面积大,受自然和人为因素影响大,雨季排洪,旱季抽灌,水体污染严重,治理难度大;地下水聚积型(黄草州)受上游大泉、暗河补给和湿地自身出露的地下共同控制,水质相对较好;地下河淤塞型(格宜的串珠状湿地)受区域地下水影响和人类活动影响,分布区人口相对较少,影响程度低,水质相对较好;

(3)通过补径排特征研究三种类型的水系统结构,通海杞麓湖湖泊退化湿地水流系统结构为地表汇集→岩溶管道排泄;泸西黄草洲地下水聚积型湿地水流系统结构为地表径流+地下渗流→

地表径流→岩溶管道排泄型; 宣威格宜串珠状湿地水流系统结构为地下裂隙渗流→泉排泄→岩溶管道排泄型;

(4) 保护利用好湿地资源, 开展湿地的水质、水量、水位的长期监测, 同时采取调水、物理化学及生物措施进行湿地保护修复水环境, 并开展湿地周边绿化和乔灌木种植, 美化湿地环境、涵养水源以及改善农业耕种模式, 使用绿色环保农药。

参考文献

- [1] 王宇, 李燕, 谭继中, 张贵, 何绕生. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 1-4.
WANG Yu, LI Yan, TAN Jizhong, ZHANG Gui, HE Raosheng. Storage rule of karst water in fault basins[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Publishing House, 2003: 1-2.
- [2] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 101-106.
MA Zulu, CAI Desuo, JIANG Zhongcheng. About karst wetland classification system[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 27(2): 101-106.
- [3] 陈静, 罗明明, 廖春来, 马瑞, 周宏, 邹胜章, 陈植华. 中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 221-230.
CHEN Jing, LUO Mingming, LIAO Chunlai, MA Rui, ZHOU Hong, ZOU Shengzhang, CHEN Zhihua. Review of eco-hydrological process in karst wetlands of China[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 221-230.
- [4] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, Hedmark A. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review[J]. *Wetlands*, 2010, 30(1): 111-124.
- [5] Ghermandi A, van den Bergh J C J M, Brander L M, de Groot H L F, Nunes P A L D. Values of natural human-made wetlands: A meta-analysis[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): 137-139.
- [6] 李益敏, 李卓卿. 国内外湿地研究进展与展望[J]. *云南地理环境研究*, 2013, 25(1): 36-43.
LI Yimin, LI Zhuoqing. Progress and prospect of research on wetlands at home and abroad[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, 25(1): 36-43.
- [7] 栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛, 王义飞. 国外湿地生态系统碳循环研究进展[J]. *湿地科学*, 2012, 10(2): 235-242.
LUAN Junwei, CUI Lijuan, SONG Hongtao, WANG Yifei. Foreign research progress on carbon cycle in wetland ecosystems[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(2): 235-242.
- [8] 李春华, 江莉佳, 曾广. 国外城市湿地研究的现状、问题及前瞻[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(12): 25-30.
LI Chunhua, JIANG Lijia, ZENG Guang. Achievements, limitation and prospectives: overseas urban wetlands researches[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(12): 25-30.
- [9] 李晖, 蒋忠诚, 马祖陆, 杨奇勇, 罗为群, 尹辉, 王月. 桂林会仙岩溶湿地健康评价与补偿机制研究[J]. 中国水土保持, 2013(1): 61-64.
LI Hui, JIANG Zhongcheng, MA Zulu, YANG Qiyong, LUO Weiqun, YIN Hui, WANG Yue. Study on health evaluation and compensation mechanism of Huixian rock dissolved wetland in Guilin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(1): 61-64.
- [10] 樊连杰, 邹胜章, 卢海平, 裴建国, 卢丽. 岩溶湿地地下水资源高效开发利用示范[J]. 中国矿业, 2019, 28(Supp.2): 494-496.
FAN Lianjie, ZOU Shengzhang, LU Haiping, PEI Jianguo, LU Li. Demonstration of efficient development and utilization of groundwater resources in karst wetland[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(Supp.2): 494-496.
- [11] 毛德华, 夏军. 洞庭湖湿地生态环境问题及形成机制分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 444-451.
MAO Dehua, XIA Jun. Ecological and environmental problems and their causing mechanisms in Dongting lake wetland[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(4): 444-451.
- [12] 汤蕾, 赵冰梅, 许东, 尹德涛. 国外湿地研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(1): 299-301.
TANG Lei, ZHAO Bingmei, XU Dong, YIN Detao. Research progress on foreign wetland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(1): 299-301.
- [13] Luo M M, Chen Z H, Criss R E, Zhou H, Jakada H, Shi T T. Method for calibrating a theoretical model in karst springs: An example for a hydropower station in South China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(25): 4815-4825.
- [14] 田昆, 陆梅, 常凤来, 莫剑锋, 黎良才, 杨永兴. 云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 35-42.
TIAN Kun, LU Mei, CHANG Fenglai, MO Jianfeng, LI Liangcai, YANG Yongxing. The ecological environment degradation and degradation mechanism of Napahai karst wetland in southwestern Yunnan Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1): 35-42.
- [15] 肖羽芯, 王妍, 刘云根, 郭玉静, 张紫霞, 刘鹏. 典型岩溶湿地流域生态功能区划研究: 以滇东南普者黑流域为例[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 47-55.
XIAO Yuxin, WANG Yan, LIU Yungen, GUO Yujing, ZHANG Zixia, LIU Peng. Research on ecological function regionalization of typical karst wetland watershed: Take Puzhehei basin as an example[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 47-55.
- [16] 张紫霞, 刘鹏, 王妍, 张超, 刘云根, 杨波, 张叶飞. 普者黑岩溶湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1835-1842.
ZHANG Zixia, LIU Peng, WANG Yan, ZHANG Chao, LIU Yungen, YANG Bo, ZHANG Yefei. Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in

- Puzhehei karst wetland sediments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9): 1835-1842.
- [17] 袁梦. 哈尼梯田湿地水文特征研究[J]. 绿色科技, 2019(10): 16-18, 20.
YUAN Meng. Study on hydrological characteristics of Hani terrace wetland[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(10): 16-18, 20.
- [18] 张华, 康晓波, 杨文兴. 云南通海县岳家营暗河管道水质评价[J]. *云南地质*, 2014, 33(4): 588-593.
ZHANG Hua, KANG Xiaobo, YANG Wenxing. The assessment of tube water in Yuejiaying buried river in Tonghai, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2014, 33(4): 588-593.
- [19] 康晓波, 王宇, 张华. 杞麓湖泄水暗河淤塞的不良环境效应分析[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(6): 121-124.
KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua. An analysis of bad environmental effects of clogging of the discharging underground river of the Qilu Lake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(6): 121-124.
- [20] 王波, 张华, 王宇, 张贵, 张文鋈, 高瑜, 罗为群. 泸西喀斯特断陷盆地地表水与地下水流域边界与水动力性质[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 319-326.
WANG Bo, ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Wenjun, GAO Yu, LUO Weiqun. Watershed boundaries and hydrodynamic properties of surface water and groundwater in the Luxi karst fault-depression basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 319-326.
- [21] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.
- [22] 张华, 康晓莉, 彭淑惠, 黄钊, 高瑜, 黄琴辉, 刘绍华, 刘天伦. 云贵高原典型串珠状岩溶湿地水文地质演化研究[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(4): 532-541.
ZHANG Hua, KANG Xiaoli, PENG Shuhui, HUANG Zhao, GAO Yu, HUANG Qinhui, LIU Shaohua, LIU Tianlun. Hydrogeological evolution of typical moniform karst wetland in the Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 532-541.
- [23] 张贵, 何绕生, 王波, 张文鋈, 周翠琼. 云南华宁县盘溪大龙潭水文地质特征[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(5): 40-45.
ZHANG Gui, HE Raosheng, WANG Bo, ZHANG Wenjun, ZHOU Cuiqiong. Hydrogeological characteristics of Dalongtan, Panxi, Huaning county of Yunnan Province[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2020, 37(5): 40-45.
- [24] 苏博. 云南泸西黄草洲国家湿地公园湿地生态系统调查与评价[J]. *陕西林业科技*, 2018, 46(4): 47-53.
SU Bo. Investigation and evaluation of wetland ecosystem in Huangcaozhou National Wetland Park in Luxi of Yunnan[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2018, 46(4): 47-53.
- [25] 张华, 王波, 王宇, 张贵, 何绕生, 代旭升, 康晓波, 蓝芙宁. 云南泸西岩溶断陷盆地水循环系统及水资源循环利用方案[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 313-323.
ZHANG Hua, WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, HE Raosheng, DAI Xusheng, KANG Xiaobo, LAN Funing. The water circulation system and water resources recycling plan of the Luxi karst fault-depression basin in Yunnan[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2021, 42(3): 313-323.
- [26] 程亚平, 蒋亚萍, 姚高峰, 黄月群, 冯莉, 黄骏宇. 桂林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.
CHENG Yaping, JIANG Yaping, YAO Gaofeng, HUANG Yuequn, FENG Li, HUANG Junyu. Study on the ecological degradation characteristics of Guilin Huixian wetland[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2015, 41(4): 73-75.
- [27] 赵一, 邹胜章, 申豪勇, 周长松, 樊连杰, 朱丹尼, 李军. 会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 325-333.
ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, SHEN Haoyong, ZHOU Changsong, FAN Lianjie, ZHU Danni, LI Jun. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the karst groundwater system beneath the Huixian wetland[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 325-333.
- [28] 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.
WU Yingke, MO Yuanfu, ZOU Shengzhang. Ecologic problem and protection method of karst wetland in Huixian, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(1): 85-88.
- [29] 杜良梅, 张丽, 和丽萍, 陈静. 利用人工湿地处理云南高原湖泊入湖河水的净化效果分析[J]. *环境科学导刊*, 2013, 32(6): 44-47.
DU Liangmei, ZHANG Li, HE Liping, CHEN Jing. Purification effect of inflows of plateau lakes by constructed wetland in Yunnan[J]. *Environmental Science Survey*, 2013, 32(6): 44-47.
- [30] 卢蕾吉, 王兴楠. 杞麓湖流域水环境承载能力分析 & 综合对策[J]. *环境科学导刊*, 2021, 40(4): 28-30.
LU Leiji, WANG Xingnan. Analysis of environment carrying capacity and comprehensive countermeasures in the Qilu Lake basin[J]. *Environmental Science Survey*, 2021, 40(4): 28-30.

Research on genetic types and flow system characteristics of wetland in karst fault basin, China

ZHANG Hua^{1,2,3,4,5}, WANG Bo^{3,4,5}, GAO Yu^{3,4,5}, KANG Xiaoli^{3,4,5}, WANG Yu^{3,4,6},
LIU Shaohua^{1,2}, KANG Xiaobo^{3,4,5}, LUO Weiqun^{1,2}, ZHAO Yong⁷

(1. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Natural Resources, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China; 5. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 6. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China; 7. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract As an important part of the ecosystem of Yunnan Plateau, karst wetlands are widely distributed in Yunnan fault basin. However, due to various reasons, lakes are silted up; the water surface area shrinks and even disappears. Lakes in eastern Yunnan are degraded significantly, and more than 20 natural lakes have prematurely disappeared in the past 30 years. In this paper, three typical types of karst wetland in the karst fault basins in eastern Yunnan are studied. These types are Tonghai lake degradation type (Qiluhu wetland), Luxi groundwater accumulation type (Huangcaozhou wetland) and Xuanwei underground river silting type (Geyi beaded wetland). Tonghai Qiluhu karst depression basin is located in the central part of Yunnan Province. It is a karst depression basin developed in the front arc of Yunnan mountain structure. The basin is a closed lake basin with a bottom length of about 22 km, a width of 9 km and a catchwater area of 345.95 km². The drainage basin of Luxi karst fault basin is located in the marginal slope area of southeast Yunnan Plateau, covering an area of 1,009.28 km². The bottom of the basin is distributed to the northeast in an irregular oval shape, with a longitudinal length of 16-20 km and a transverse width of 4-5 km. The overall terrain is high in the east and low in the west, and high in the north and low in the south. Xuanwei Geyi karst fault basin belongs to Beipanjiang third-level basin, Gexianghe fourth-level basin, and fifth-level Tianbian underground river system. The whole Tianbian underground river system is divided into a four-level discharge datum. One is Geyi Dalongtan on the edge of Rongqiu Depression, and the other is the beaded lake in Rongqiu Depression around Geyi town. The third is the bottom discharge of the Wujia family depression, and the fourth is the final discharge of the Gexiang river, with a watershed area of 160.82 km². The research contents include the genetic types and characteristics of wetlands, and the characteristics of "three fields" (runoff field, hydrochemical field and temperature field) of wetlands. The geological conditions, hydrogeological conditions and influencing factors of water environment of naturally formed wetland in karst fault basin are analyzed and the quality of water environment is quantitatively evaluated. The natural and human influencing factors, forms, intensity and effects of karst wetland, water source reduction, pollution intensification, water quality decline, wetland atrophy and ecological environment problems are also analyzed.

The research results indicate that the karst characteristics of the three types of karst fault basin wetlands are relatively similar, with frequent transformation of surface and groundwater, both of which take underground karst pipelines as the medium for transformation channels. Wetlands are discharge areas and also runoff areas that supply the outlet of underground rivers. All of the three types of wetlands are discharged to surface rivers through developed karst pipes. The lake degradation type (Qilu lake) collects surface water lakes at the bottom of the basin from the whole basin; the groundwater accumulation type (Huangcaozhou) is located in the area at shallow water level in the middle of the basin, and pore water and karst water are also recharge sources of wetlands. For the underground river silting type, the karst pipe blockage in the early groundwater runoff channel changes to the present karst fracture runoff, due to the topography of peak-cluster depression. Second, the wetland of lake degradation type (Qilu lake) covers a large area,

which is greatly affected by natural and human factors. It is discharged by floods during the rainy season, and is used to irrigate during the dry season. Its severe water pollution is difficult to control with degradation of water quality and quantity. The groundwater accumulation type (Huangcaozhou) is controlled by the groundwater recharge of the upper spring, the underground river and the wetland itself, and the water quality is generally good. Although underground river of the silting type (Geyi beaded wetland) is affected by regional groundwater and human activities, the groundwater is generally abundant and relatively high in quality because the local population is relatively small with little impact. Thirdly, three types of water system structures are studied in terms of the characteristics of supplementation and drainage. The flow system structure of Qiluhu degraded wetland in Tonghai is, surface collection→karst pipe drainage. The flow system structure of groundwater accumulation wetland in Huangcaozhou of Luxi is: surface runoff+underground seepage→surface runoff→karst pipe discharge. The flow system structure of Xuanweigeyi beaded wetland is, underground fissure seepage→spring drainage→karst pipe drainage.

The study findings suggest that we should protect and utilize wetland resources, and carry out long-term monitoring of wetland quality, water quantity and water level. We should protect wetlands and restore water environment by water transfer and physicochemical and biological measures. We should carry out afforestation and shrub planting around wetland to beautify wetland environment and conserve water source. We should improve farming patterns and use green pesticides. This study will provide a geological basis for the protection, scientific research, utilization and ecological restoration of wetlands in karst fault basins.

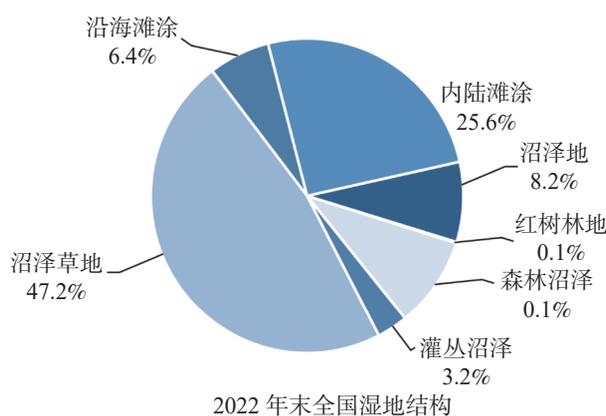
Key words wetland types, wetland characteristics, water flow system, water environment, wetland restoration, karst fault basin

(编辑 张玲 杨杨)

我国湿地资源概况

2022 年度全国国土变更调查初步汇总结果显示, 全国共有湿地 2 357.3 万公顷。其中, 红树林林地 2.9 万公顷, 森林沼泽 220.7 万公顷, 灌丛沼泽 75.4 万

公顷, 沼泽草地 1 112.9 万公顷, 沿海滩涂 149.9 万公顷, 内陆滩涂 602.4 万公顷, 沼泽 193.2 万公顷。



——据《2022 年中国自然资源统计公报》