

张华,康晓莉,彭淑惠,等.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.

DOI: 10.11932/karst20220403

云贵高原典型串珠状岩溶湿地水文地质演化研究

张华^{1,2,3},康晓莉³,彭淑惠³,黄钊⁴,高瑜³,黄琴辉⁵,刘绍华^{1,2},刘天伦⁶

- (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,广西桂林 541004; 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/云南省地质环境监测院,云南昆明 650216; 4. 云南省地质调查院,云南昆明 650216; 5. 云南国土资源职业学院,云南昆明 652501; 6. 宣威市第二中学,云南曲靖 655404)

摘要:位于云贵高原面上宣威岩溶断陷盆地北东部的格宜镇,地貌类型为岩溶丘峰谷区,广泛分布碳酸盐岩地层,由于岩石建造和外地质应力的复杂性,在强烈的溶蚀作用下形成了多种多样的地貌形态,既有溶蚀形成的溶洞、洼地、谷地、落水洞等地表岩溶地貌,又有地下河管道等。通过水文地质学、岩溶学方法,对湖泊型串珠状湿地的构造、水文地质、岩溶发育特征进行研究,云贵高原面上串珠状岩溶湿地演化过程经历了地壳抬升期、南地壳稳定期、地壳再次抬升期三个阶段,在新构造运动作用下,由于地壳抬升,侵蚀基准下切等原因,岩溶管道在漫长的时间内垮塌、淤泥堵塞及岩溶发育的不均匀条件下形成了地表串珠状湿地。针对目前湿地面积的不断萎缩、减小问题,提出了具体的保护建议。

关键词:云贵高原;岩溶湿地;水文地质;演化过程

中图分类号:P641.11 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2022)04-0532-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

湿地被誉为“地球之肾”,是生物多样性富集的生态系统和人类重要的生存环境之一,具有涵养水源、净化水质、维护生物多样性等重要生态功能,是地球表层系统的重要组成部分,也是自然界最具生产力、价值最高的生态系统之一^[1]。尽管湿地面积仅占全球陆地面积的5%~8%^[2],却是具有重要生态功能的自然资源^[3]。国内外研究湿地的课题较多,主要是围绕着退化湿地生态恢复与重建^[4]、湿地与全球变化关系研究、湿地温室气体与全球环境变化^[5-6]、城

市湿地的功能评价^[7-8]、湿地开发利用^[9]、湿地水环境^[10-12]保护与管理等领域对湿地开展了广泛的研究,研究方法由过去仅局限于湿地特征描述的定性评价,发展到湿地定量、定位研究,3S技术和数学模型方法^[13]在湿地研究中得到了广泛的应用。针对云南省内的湿地开展了岩溶湿地生态环境变化及驱动机制^[14]、湿地鱼类生活环境及成因^[15]、湿地的功能研究^[16]、沉积物水质分析评价^[17]、水文特征分析等研究^[18]。岩溶湿地与岩溶发育紧密联系,中国对岩溶的研究在世界上具有较高的研究水平,特别是针对西南岩溶山区的水文地质、生态地质、石漠化等学科的研究

资助项目: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(KDL202101);国家重点研发计划项目(2016YFC0502502)

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

通信作者:刘绍华(1986—),男,硕士,助理研究员,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:2022-03-10

究取得了显著成绩^[19-21],研究成果处于世界领先地位。如对自然岩溶湿地、湖泊湿地、裂隙构造湿地等研究广泛;对不同的地质环境、海拔、地貌类型条件下的湿地研究具有较高水平。云南断陷盆地岩溶湿地众多,湖泊湿地是云南高原上的明珠,但因诸多因素复合作用,出现了湖泊淤积、水面面积缩小以至消亡,湖泊退化严重。据20世纪50年代初统计,云南省水面面积在1 km²以上的湖泊有50余个,据1973-1974年的卫星照片统计只有30余个,时至今日已不足30个了。在近30年的时间内就有20多个天然湖泊过早消亡。在滇东地区,湖泊湿地退化较为明显,有的湖泊甚至干涸,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。本文通过野外调查、测试分析等手段,利用水文地质学、岩溶学方法,分析湖泊型串珠状湿地的地质构造、水文地质条件、岩溶发育特征,研究云贵高原面上串珠状岩溶湿地演化过程,为湿地的保护、科学研究、可持续开发利用、生态修复提供地质依据。

1 地质环境概况

云南省宣威市格宜镇地处云贵高原中部,宣威岩溶断陷盆地北东部,区域上属乌蒙山系,总体地势西南高北东低,山体走势多呈EN-SW向,地形起伏不大,相对高差多小于100 m,山体坡度一般小于25°,

地貌类型为岩溶丘峰谷区^[22],洼地规模大小不一,形态多呈不规则椭圆形,在平面上多呈串珠状分布,大者长轴在500~1 000 m,小者也在几十至200~300 m,底部表层多为厚度不等的冲洪积物,部分洼地边缘发育落水洞。外围冲沟来水大多通过落水洞转化为地下径流,少数因落水洞堵塞而积水成湖。属低纬高原季风气候,夏秋分别受海洋性和大陆性气团影响,具有年温差小,日温差大,四季不分明,冬春干旱,夏秋湿润,干湿分明的气候特点。格宜镇多年平均降雨量1 090 mm,多年平均气温约13.2℃,年平均日照2 050 h^[23]。城镇生活用水来源以地表水库为主,部分为浅井、民井开采利用地下水^[24]。

“格宜”为彝名,在汉语中为“放牛的洼塘”之意,格宜多水多湖泊,分布有启文湖、崇明湖、文渊阁湖泊、酒厂湖泊、格宜二中湖泊等5个主要的湖泊,而启文湖的风韵首屈一指。启文湖位于宣威市格宜镇启文村宣威市第二中学校区内,为地下水涌出自然形成,启文湖呈近圆形,直径164.25 m,面积约2.0万m²,湖最深6.25 m(图1),目前水位埋深0.2 m,枯季水位埋深约1.5 m,雨季水位上升约0.2 m。

2 地层及构造

研究区地处扬子准地台之滇中台褶带,出露地层由新至老依次有距今260万年以来形成的第四系

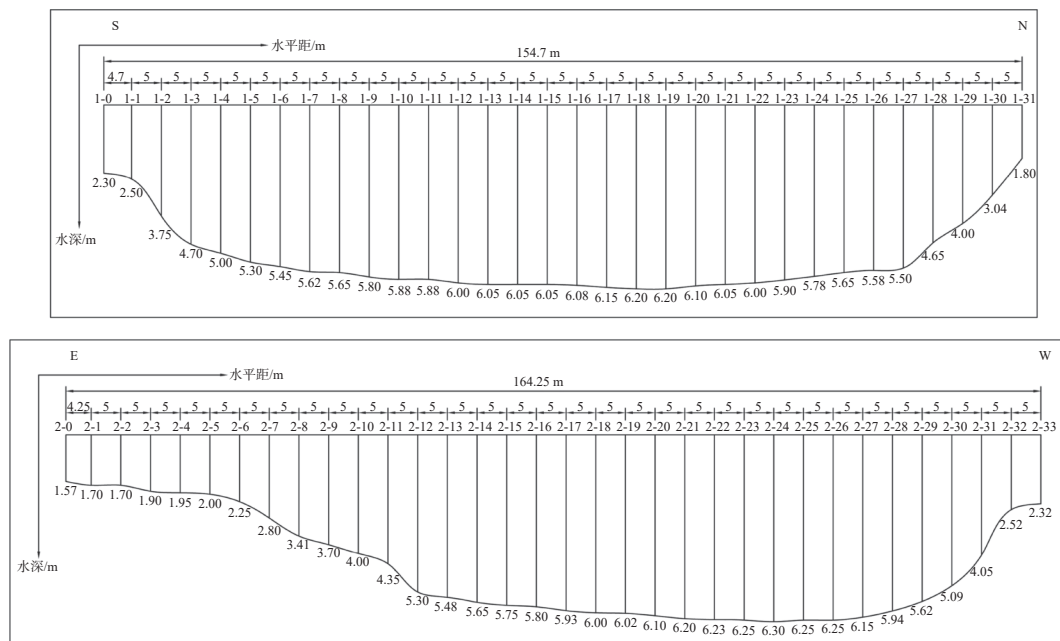


图1 启文湖湖底地形图

Fig. 1 Topographic map of Qiwen Lake bottom

(Qh^{pal})松散土层,中生界 2.50—2.05 亿年前的三叠系下统飞仙关组(T_1^f)粉砂质泥岩、页岩、砂岩、泥质粉砂岩与粉砂质泥岩互层;嘉陵江组(T_j)泥质灰岩与灰岩互层;三叠系中统关岭组(T_{2g})白云岩、灰岩、页岩夹泥质灰岩、泥灰岩;三叠系上统须家河组(T_{3x})泥质粉砂岩和粉砂质泥岩。古生界 2.95~2.50 亿年前的二叠系梁山组(P_2l)泥岩、页岩、石英砂岩、炭质页岩;阳新组(P_{2y})灰岩、白云岩、钙质页岩;峨眉山玄武岩组(Pe)玄武岩、灰岩或凝灰质泥岩;宣威组(P_{3x})砂岩,砂岩与泥(页)岩、粉砂质泥(页)岩、泥质粉砂岩、泥岩相间分布,夹炭质泥岩及煤层。古生界 3.54~2.95 亿年前的石炭系马平组(C_{pm})灰岩、白云质灰岩、白云岩;石炭系黄龙组(Ch)灰岩、夹灰质白云岩、白云岩;石炭系大埔组(Cd)白云岩夹含白云质灰岩;石炭系梓门桥组一段(Cz^1)灰岩、白云质灰岩,二段(Cz^2)灰岩、白云质灰岩;石炭系万寿山组(C_{1w})泥(页)、炭质泥(页)岩。古生界 4.10~3.54 亿年前的泥盆系炎方组(D_y)灰岩、白云岩、泥质灰岩;泥盆系宰格组(D_{3z})白云岩、灰质白云岩、白云岩。除上述地层外,还有海西期辉绿岩(βu)侵入岩,岩性为拉斑玄武岩性辉绿岩。

处于大地构造单元扬子滇东碳酸盐岩地台曲靖陆表海。构造格局以北东向展布的对冲式断层与挤压褶皱相间为主。发育格宜向斜,轴向 NNE,长度大于 10 km,核部露出地层 P_{2y}^3 - Pe^1 ,两翼地层 P_{2y}^2 - P_{2l} ,向斜核部为峨眉山玄武岩、阳新组,南东翼北端北断层破坏,南东翼相对较陡,枢纽在法嘎村附近扬起,内倾转折端较尖锐。

3 岩溶发育特征

区域广泛分布碳酸盐岩地层,在强烈的溶蚀、侵蚀作用下形成了多种多样的地貌形态,既有溶蚀形成的石芽、溶丘、洼地、谷地、槽谷、漏斗、溶洞、落水洞等地表岩溶地貌,和地下发育的地下河管道,又有侵蚀剥蚀形成的中山沟谷地貌。新构造运动总体上为间歇性隆升,即在强烈的抬升过程中存在短暂的宁静期,使区域内发育了多层的水平溶洞。根据统计,区内水平岩溶洞穴有四层,第一层分布高程为 2 120 m 左右;第二层在 2 020~2 050 m 之间;第三层在 1 780 m 左右;第四层在 1 580 m 左右。研究区分布在第二层,分布标高在 2 020~2 050 m 之间,典型

代表为格宜西侧高速公路入口附近的伏流(标高 2 020 m)、尖角洞(标高 2 020 m)。其中尖角洞规模较大,发育 2 个支洞,主洞斜长 210.5 m,宽度在 6~8 m,高 2.8~16 m,洞顶洞底及洞壁石钟乳、石笋、石幔、石柱等发育,该洞经考古部门鉴定为新石器时代中晚期古人类穴居遗址,出土了一批石器、陶器及大量共存动物遗骸,2003 年被公布为云南省第六批省级文物保护单位。

4 水文地质及富水特征

区域水系属北盘江三级流域,革香河四级流域,五级田边地下河系统。系统面积 160.82 km²,属裸露型岩溶系统类型,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^[25],南部主要以 C_{2w} 、 Pe 碎屑岩为隔水边界。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} 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、法戛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。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,灌入落水洞补给地下水;部分沿发育的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岩溶管道径流,于革香河左岸谷底排泄^[26](见图 2)。地下河出口处为一高 10 m,宽 5 m 溶洞,出水口高出革香河水面 4 m,地下水呈大股状流出,水声震耳,气魄雄伟壮观。地下河流量为 1 531 L·s⁻¹,计算地下水径流模数 13.1 L·s⁻¹·km²。据田边地下河连通试验结果,纵坡降达 44.4%,地下水流速达 0.6 m·min⁻¹。

根据地下水的赋存条件,水理化性质及水力特征,划分出含水层组:松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶水。松散岩类孔隙水含水层组(Qh^{pal})分布于格宜槽谷及洼地谷中,富水贫乏。基岩裂隙水含水层组包括三叠系须家河组(T_{3x})、飞仙关组一段(T_1^f)、二段(T_2^f),二叠系宣威组(P_{3x})、峨眉山玄武岩第一段(Pe^1)、侵入岩体($\beta\mu$)、梁山组(P_{2l})、石炭系万寿山组(C_{1w}),富水程度中等-贫乏。碳酸盐

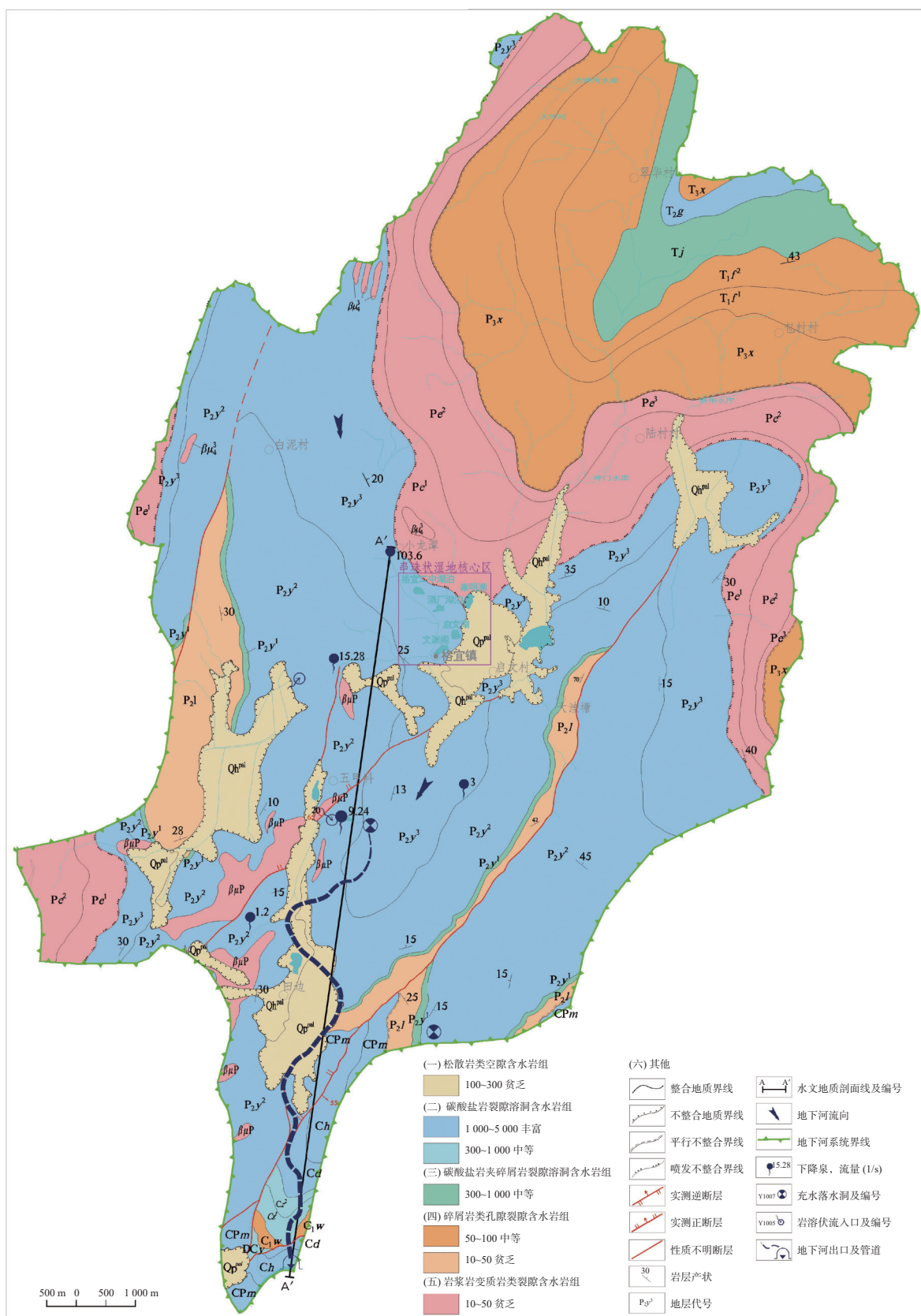


图2 田边地下河系统水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of Tianbian underground river system

岩岩溶水含水层组包括三叠系关岭组(T_2g)、嘉陵江组(T_j)、二叠系阳新组第一段(P_{2y}^1)、第二段(P_{2y}^2)、第三段(P_{2y}^3)、石炭系马平组(C_{pm})、黄龙组(Ch)、大埔组(Cd)、梓门桥组一段(Cz^1)、二段(Cz^2)、泥盆系炎方组(DCy)、宰格组(D_3z)，岩溶发育强烈，含水介质以岩溶管道、裂隙、溶洞为主，地下水主要以管道流形式集中径流、排泄，常出露有流量大、季节性强的地下河出口、岩溶大泉，地下河管道较发育。含水层富水性极不均匀，地下水水位埋藏较浅—深，水力坡度较大。富水性中等—强^[27]。

整个田边暗河系统包括四级排泄基准面，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湿地，三是五甲科洼地底部排泄，四是革香河排泄基准面(图3)。

取格宜大龙潭、酒厂湖泊、启文湖3组水样，总体呈无色、无味、无嗅、透明，格宜大龙潭和酒厂湖泊地下水化学类型为 HCO_3-Ca 型，表现为地下水出露点，而启文湖地下水化学类型为 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca$ 型，表现为地下水与地表水交互缓慢。按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)进行单项分析评价，所分析项都达到Ⅲ类水评价指标，总体水质较好。

5 湿地岩溶水文地质演化过程

格宜镇周边分布有5个溶塘，呈“ $\perp$ ”状分布，朝NE—SW向和NW向串珠状分布，区域上处于由云南向贵州过度的云贵高原斜坡高原面上，分布碳酸盐岩地层阳新组(P_{2y}^3)灰岩、白云质灰岩、白云岩、泥质灰岩，倾角小于 35° 。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，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洼地附近的洼地溶蚀槽谷，东、西两侧汇集的岩溶地下水通过节理裂隙向向斜核部径流排泄^[28](图4)，地下水水位埋藏浅，汇集于如启文湖一样的溶塘湖泊湿地中，水资源丰富^[29]。

之所以在格宜镇一带形成溶塘且水资源丰富，除了向斜构造外另一个原因在于下部发育串珠状溶塘^[30]，格宜镇一带串珠状溶塘的岩溶演化过程归纳为三个阶段：

第一阶段是南盘江一期。地壳抬升期，促使落水洞—岩溶管隙系统在构造裂隙基础上溶蚀发展。高原面解体，并伴随着强烈的河流下切作用。在此过程中，下切的河流成为地表地下水的排泄基准面，排泄基准面的降低，加大了地下水运动的水力坡度，增大了地下水流速，为地下水的径流提供了动力条件。对岩溶地下水而言，加快了“大气降水—地下水—地表水”循环转化过程。格宜镇一带地表水水资源分布于整个溶蚀槽谷，区域内土层薄、基岩裸露，地表水对碳酸盐岩构造裂隙进行着不同形式、不同强度的改造、溶蚀作用，形成了溶蚀洼地。研究区域分布洼地较多，洼地密度1~5个/ km^2 。

第二阶段是南盘江二期。为地壳稳定期，洼地、漏斗—溶洞地下河系统发育成熟。断层沿线、褶皱转折端以及构造的交叉复合部位岩层较为破碎，为地下水的赋存运移提供了空间，加速岩溶化作用，控

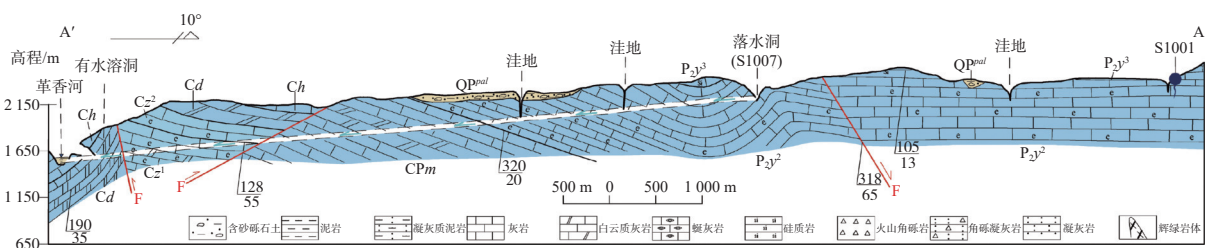


图3 田边地下河系统水文地质剖面图

Fig. 3 Hydrogeological section of Tianbian underground river system

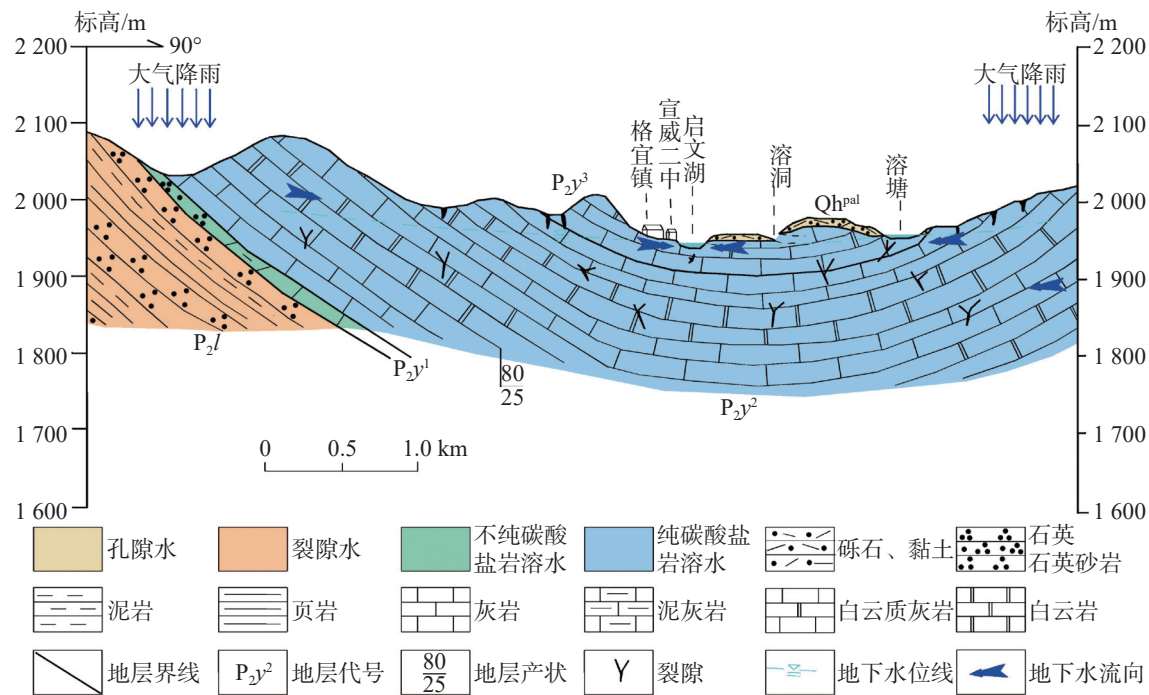


图 4 湿地成因水文地质剖面图

Fig. 4 Hydrogeological section of origin of wetland

制了岩溶发育方向。洼地的地表水不断对基岩进行岩溶作用,在地表水和地下水的共同作用下,岩溶作用强烈,纵向上发育形成落水洞,横向上发育形成岩溶管道,落水洞与岩溶管道相连,使得地表水与地下水转化频繁。如尖角洞(编号 Y0112)规模较大,发育 2 个支洞,主洞斜长 210.5 m,宽度在 6~8 m,高 2.8~16 m,洞顶洞底及洞壁石钟乳、石笋、石幔、石柱等发育。田边地下河系统管道发育长度 9 km。

第三阶段是石林期。为地壳再次抬升期,导致本层地下河被下面新发育的地下河系统袭夺而退化,出现垮塌、淤积堵塞。在新构造运动作用下,地壳抬升,侵蚀基准下切,由于溶蚀作用排泄基准面下切,深度近 300 m,形成了田边地下河管道系统。而连接启文湖等洼地、漏斗的这一层暗河的汇水、排泄功能被更低一层新的暗河系统代替,所以水动力减弱。其次地表的枯枝树叶等杂物随地表水灌入洼地底部的落水洞,随着时间推移,岩溶管道在漫长的时间内逐步被枯枝树叶、管道内垮塌物、淤泥等堵塞了地下水径流通道^[31],导致地表水与地下水转换缓慢,溶塘湖泊湿地的水始终保持相对稳定的水位,旱雨季变幅在 1 m 左右,形成了现在的串珠状湖泊湿地(图 5)。

洼地溶蚀槽谷区的湖泊湿地不仅作为排泄区也

作为南部田边地下河系统的补给区,保持着地下水与地表水紧密的水力联系,在湿地水文流场不变的情况下,地下水不断地补给—排泄—补给的循环过程,确保维持着湿地的水量平衡^[32],使得湖泊湿地的水流不断地置换而水质保持良好。

6 结 论

云贵高原面地貌总体为溶蚀丘峰谷区,岩溶发育,洼地、落水洞、溶洞、地下河管道发育,受地质、构造、岩溶发育的不均匀性影响,在格宜镇一带形成了水位埋藏浅,串珠状的岩溶湖泊湿地。湿地不仅作为地下水的排泄带,也作为下一级田边地下河系统的补给区。

格宜镇一带串珠状湖泊湿地的岩溶演化过程归纳为南盘江一期的地壳抬升期、南盘江二期的地壳稳定期、石林期的地壳再次抬升期三个阶段。在新构造运动作用下,地壳抬升,侵蚀基准下切,溶蚀加剧,岩溶管道在漫长的时间内经历垮塌、淤泥等堵塞,地下水径流不畅形成串珠状湖泊湿地。

随着当地人口增加、人类活动加剧,串珠状湖泊湿地面积也在不断地萎缩、减小,因此,为了更好地保护好湿地,提出以下建议:一是在补给范围内划定湿地水源涵养区,加大生态恢复力度,为湿地提供稳

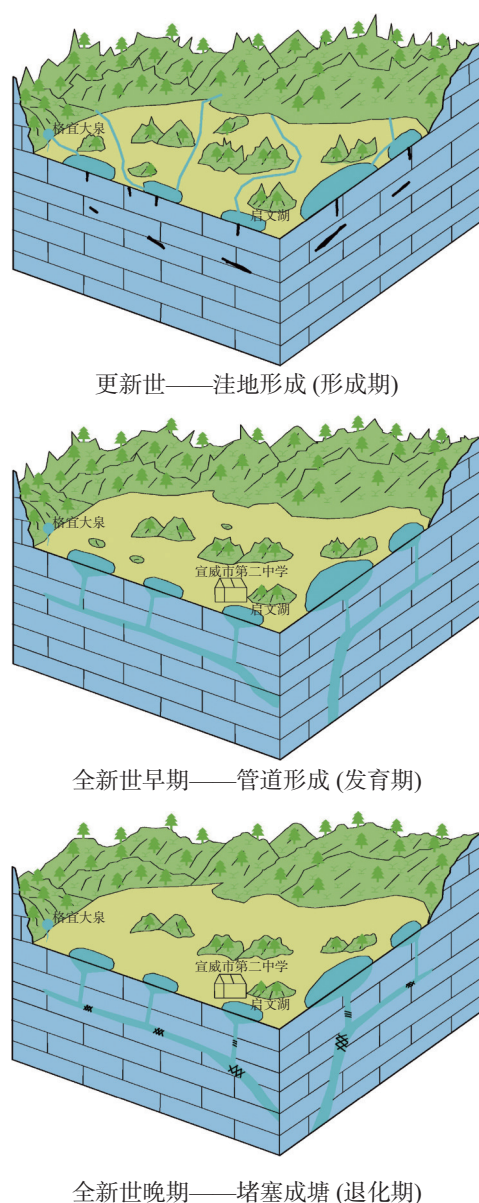


图5 典型串珠状湿地成因模型概化图

Fig. 5 Generalization of the genetic model of typical moniliform wetland

定的水资源补给;二是划定湿地核心区,禁止生产活用地占用,加大对湿地水质的保护;三是加大地方对湿地的保护和公益宣传,特别是对湿地周边的村民和学校的宣传,提高湿地保护意识;四是开展岩溶湿地演化研究,提升岩溶湿地科学研究水平,更好地保护退化的岩溶湿地;五是合理开发利用湿地资源,打造高原串珠状湿地公园,发挥湿地+红色基地的特色旅游活动。

参考文献

[1] 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 Intelligence, 2019, 38(6): 221-230.

[2] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review[J]. *Wetlands*, 2010, 30(1): 111-124.

[3] Ghermand A, van den Bergh J C J M, Brander L M, et al. Values of natural human-made wetlands: A meta-analysis[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): 137-139.

[4] 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 wetlands at home and abroad[J]. *Yunnan Geographical Environment Research*, 2013, 25(1): 36-43.

[5] 蒋忠诚,袁道先,曹建华,覃小群,何师意,章程.中国岩溶碳汇潜力研究[J].*地球学报*,2012,33(2):129-134.

JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua, QIN Xiaoqun, HE Shiyi, ZHANG Cheng. A Study of carbon sink capacity of karst processes in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(2): 129-134.

[6] 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.

[7] 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 perspectives: overseas urban wetlands researches[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(12): 25-30.

[8] 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.

[9] 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(S2):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(S2): 494-496.

[10] 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(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(4): 444-451.
- [11] 王育礼, 王烜, 杨志峰. 若尔盖湿地水资源变化特征及其成因分析[C]//. *Proceedings of Conference on Environmental Pollution and Public Health*. Scientific Research Publishing, 2010: 1428-1432.
- WANG Yuli, WANG Xuan, YANG Zhifeng. Water resources variation in zoige wetland and causes analysis [C]//. *Proceedings of Conference on Environmental Pollution and Public Health*. Scientific Research Publishing, 2010: 1428-1432.
- [12] 章程, 汪进良, 谢运球, 王松. 桂林会仙岩溶湿地水化学昼夜动态变化及其影响因素[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1235-1241.
- ZHANG Cheng, WANG Jinliang, XIE Yunqiu, WANG Song. Hydrochemical daily variations in a karst lake of Huixian wetland of Guilin and their influencing factors[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1235-1241.
- [13] 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(1): 299-301.
- TANG Lei, ZHAO Bingmei, XU Dong, YIN Detao. Research progress on foreign wetland [J]*Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008(1): 299-301.
- [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(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(1): 35-42.
- [15] 杨颖, 李旭, 崔瑰芬, 周伟, 付蕾. 云南沾益海峰湿地鱼类区系及地理成因分析[J]. *四川动物*, 2006(1): 7-11.
- YANG Ying, LI Xu, CUI Guifen, ZHOU Wei, FU Qiang. Ichthyofauna and analysis of geography formation in haifeng wetland of Zhanyi, Yunnan[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2006(1): 7-11.
- [16] 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 examle[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 47-55.
- [17] 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 Environment Sciences*, 2019, 28(9): 1835-1842.
- [18] 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.
- [19] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. *草业科学*, 2008(9): 40-50.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. *Pratacultural Science*, 2008(9): 40-50.
- [20] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. *生态学报*, 2016, 4(22): 7103-7108.
- CAO Jianhua, DENG Yan, YANG Hui, PU Junbing, ZHU Tongbin, LAN Funing, HUANG Fen, LI Jianhong. Rocky desertification evolution, treatment technology and demonstration in karst faulted basins, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 4(22): 7103-7108.
- [21] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 461-468.
- JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution characteristics and influencing factors of karst rocky desertification in southwest China in the 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468.
- [22] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong. Zoning of environmental geology and function in karst fault-depression basins [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36 (3) : 283-295.
- [23] 王波, 王劲, 李继洪. 云南草河流域宝山幅(G48E011010)1: 5万水文地质环境地质调查成果报告[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2019.
- WANG Bo, WANG Jin, LI Jihong. The results of hydrogeology and environmental geology survey in Gexiang river basin, Yunnan province (G48E011010) 1: 50, 000 [R]. Kunming: Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, 2019.
- [24] 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*, 201, 42(3): 313-323.
- [25] 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.

- [26] 张华. 宣威市格宜镇启文湖水文地质研究报告[R]. 昆明: 云南省地质调查局, 2020.
ZHANG Hua. Hydrogeological research report of Qiwen lake in Geyi town, Xuanwei City [R]. Kunming: Yunnan Institute of Geological Survey, 2020.
- [27] 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 Luxi karst fault-depression basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 319-326.
- [28] 曹建文, 赵良杰, 王喆, 栾崧, 张庆玉. 乌蒙山区革香河流域干旱成因及打井找水模式[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 439-448.
CAO Jianwen, ZHAO Liangjie, WANG Zhe, LUAN Song, ZHANG Qingyu. Causes of drought and models of drilling wells for water exploration in the Gexiang river basin of the Wumeng mountains[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 439-448.
- [29] 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 Dani, LI Jun. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the karst groundwater system beneath the Huixian wetland[J]. Carsologica Sinica, 40(2): 325-333.
- [30] 史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊演化及环境变化初步考察[J]. 地质力学学报, 2004(4): 344-350, 365.
SHI Zhengtao, MING Qingzhong, ZHANG Hucui. Investigation of the evolution and environment change of typical lakes in Yunnan[J]. Journal of geomechanics, 2004(4): 344-350, 365.
- [31] 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.
- [32] 何珊儒, 李伟荣, 刘旭文, 翟运雄. 滇湖湿地生态水文地质特征简述[A]//中国地质学会工程地质专业委员会2007年学术年会暨“生态环境脆弱区工程地质”学术论坛论文集[C], 2007: 530-536.
HE Shanru, LI Weirong, LIU Xuwen, ZHAI Yunxiong. Brief introduction to tonghu wetland bio-hydrogeology characteristics [A]// The 2007 Annual conference of Engineering Geology Committee of Geological Society of China and sym[C]. 2007: 530-536.

Hydrogeological evolution of typical moniliform karst wetland in the Yunnan-Guizhou Plateau

ZHANG Hua^{1,2,3}, KANG Xiaoli³, PENG Shuhui³, HUANG Zhao⁴, GAO Yu³,
HUANG Qinhuai⁵, LIU Shaohua^{1,2}, LIU Tianlun⁶

(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, Observation and Research Station, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR/Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming, Yunnan 650216, China; 5. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming, Yunnan 652501, China; 6. Xuanwei No.2 Middle School, Qujing, Yunnan 655404, China)

Abstract Geyi town, located in the northeast part of Xuanwei karst fault basin on the Yunnan-Guizhou Plateau, shows its geomorphic type of karst area of hump valley where carbonate strata are widely distributed. Because of the complexity of rock formations and external geological rock stress, various types of morphology are formed by strong dissolution in this area, not only including surface karst landforms such as karst caves, depressions, valleys and sinkholes, but also underground river pipelines and so on. The study area is intermittently uplifted during the neotectonic movement. A short quiet period during the intense uplifting process leads to the development of multi-layer (exactly four layers) horizontal karst caves in this karst area. The study area is distributed in the second layer with a distribution elevation between 2,020-2,050 m. In the typical moniliform wetland of this area, groundwater converges to the syncline structure of basin floor. The nuclear part of the syncline is located in the corrosion trough valley in the depression of the wetland. Eastward and westward groundwater, recharged through joint fissures and runoffs of karst

groundwater, discharges to the nuclear part of syncline and converges to the soluble pond or lake wetland like Qiwen lake. Due to the shallowly buried groundwater level, this kind of lake wetland is rich in water resource. As a discharge area as well as a recharge area of the southern underground river system, corrosion trough valley in the depression of the lake wetland maintains a close hydraulic link between groundwater and surface water in a constant cycle of supply-discharge-supply of underground water. Under the condition of the same hydrological flow field, keeping the water balance can guarantee the continuous water displacement, and hence maintaining a good water quality in the lake wetland.

Through the analysis of hydrological geology, a study on the structure, hydrological geology and karst development characteristics of moniliform lakes of lacustrine type has been conducted. The study shows that the moniliform wetland on the Yunnan-Guizhou Plateau surface experienced three stages. The first stage-the first phase of Nanpan river-is the stage of crustal uplift. In this stage, the sinkhole-karst tube fissure system was developed in terms of dissolution on the basis of structural fissure development. The second stage-the second phase of Nanpan river-is the stage of crust stability. In this stage, depressions and funnel-cave underground river systems were developed maturely. The third stage is the stage of stone forest in which the new karst uplift led to degradation of the underground river in the layer caused by the capture of a newly developed underground river system; consequently, collapse, siltation and blockage occurred. With the effect of neotectonic movement, the moniliform wetland on the surface was formed under the condition of karst pipeline collapse, silt blockage and uneven karst development in a long time due to crustal uplift and erosion base sapping. In view of the shrinking wetland area at present, protection suggestions are also put forward in this study. These suggestions involve delimiting the water conservation area and the core area of wetland, strengthening wetland protection and its publicity, conducting the study on the evolution of karst wetland to improve the level of wetland scientific research and developing the tourism with characteristics of wetland and "red revolution bases".

Key words Yunnan-Guizhou Plateau, karst wetland, hydrogeology, evolution process

(编辑 张玲 杨杨)