

王宇. 滇池湖底塌陷漏水隐患研究的问题与建议[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 1-11.

DOI: 10.11932/karst20240103

滇池湖底塌陷漏水隐患研究的问题与建议

王宇^{1,2,3}

- (1. 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;
2. 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, 云南昆明 650216;
3. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051)

摘要: 持滇池漏水隐患点急变临灾推论和漏水隐患不成立否定意见的双方都做了大量的分析论证工作, 并发表和提交了研究成果。但以地球系统科学、水工环地质学和地球探测技术科学的理论、原理和地质勘查认识问题的程序和规范来衡量, 均不同程度地存在着概念性、系统性、规范性的错误或不足, 主要表现在地质学概念及术语不清、水文地质调查研究不足、湖盆形成及演化历史研究薄弱、水文地质勘探验证欠缺等, 从而导致各方推断依据皆不够充分。对这些问题, 文章逐一进行了深入的分析, 并根据区域自然地理、地质、水工环地质等调查(勘查)研究程度及资料, 结合相关工作经验, 对今后的研究提出了规范地质学基本概念、开展湖底洼地钻探试验及监测、系统开展综合研究和野外查证的具体改进建议。明确指出滇池漏水隐患成立与否, 关键在于湖底洼地发生岩溶塌陷的风险, 必须实施钻探验证才能得出科学的定论。

关键词: 滇池湖泊; 断陷盆地; 岩溶洼地; 岩溶塌陷; 湖底漏水

创新点: 综述了滇池漏水隐患研究的动态、主要观点及认识, 分析了存在的问题和原因, 提出了进一步勘查研究的方向、重点及方法建议。明确指出湖底洼地岩溶塌陷是关键问题, 必须实施钻探验证才能得出科学定论。

中图分类号: P642 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0001-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

滇池是云南高原上的第一大湖泊, 国家三大重点保护湖泊之一。位于昆明喀斯特断陷盆地南部, 流域面积 2 920 km², 湖水位标高 1 885.2~1 887.5 m, 湖面积 309.5 km², 南北长 40 km, 东西宽平均 7 km, 平均水深 5.5 m, 最大水深 11.2 m, 容积 15.6×10⁸ m³^[1-4]。按湖泊发育阶段属老年期湖泊^[5-6]。滇池湖底存在地形洼地, 最初发现于 1938 年国立西南联合大学开展的滇池水下地形测量, 1983 年昆明市测绘管理处完成的滇池水下地形测量验证了洼地的存在。2009 年

云南兆晨数字测绘技术应用有限公司完成的滇池数字化水下地形测绘共发现湖底有 4 个比周边正常湖底平面要深的洼地, 主要分布在滇池南部、螳螂川与滇池长轴线垂直的地带上, 与 1983 年测量的高程相比无明显变化^[7]。近年来, 因云南大学张虎才研究团队(以下简称张虎才团队)2016 年 8 月在《地球科学进展》期刊第 8 期上发表了: “滇池构造漏水隐患及水安全”一文; 2021 年 7 月在 Catena 上以 “Potential catastrophic water outflow from Lake Dian, China: Possible hydrological and ecological risks” 为题在线发表了阶段性研究成果, 云南大学新闻网等作了报道,

资助项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502502); 云南省地质灾害综合防治体系建设(2013-2020)

作者简介: 王宇(1960—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工环地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2023-05-10

有关滇池构造漏水隐患点快速下沉变形和塌陷漏水风险剧增的推论,引发了公众的广泛关注和热议,也引起了省、市有关领导和管理部门的重视。昆明市由昆明滇池投资有限责任公司(以下简称滇投公司)委托中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司(以下简称昆明院)开展专题研究,2017年1月提交了专题研究报告。云南省自然资源厅安排云南省地质调查局(以下简称省地调局)组织地勘行业多学科专家进行研讨,2021年8月24日形成了研讨咨询意见书。笔者因主持省地调局的专题研讨和起草研讨咨询意见书,对各方工作和认识有一定程度的了解。为了给今后研究工作和管理决策提供科学依据,特根据40多年来在该区进行水工环地质调查、勘探及研究取得的认识和经验,结合区域地质调查研究成果,分析目前研究工作及成果中存在的问题,提出解决问题的建议。

1 现有认识

为了让读者了解滇池湖底塌陷漏水隐患研究的动态,引入后续对存在问题的分析,提出解决问题的建议,本文先简要介绍目前有关方面已做的主要研究工作和结论性认识。

1.1 高风险论

张虎才团队通过历史文献搜集研究、漏斗附近水下多波束声纳地形测量、浅层地震剖面探测、采取两组短岩心进行 ^{210}Pb - ^{137}Cs 和AMS ^{14}C 年代测定、有机质含量和 CaCO_3 含量分析等工作,以及多学科的综合研究取得了诸多认识^[8-10]。

(1)探测发现滇池中部在局部存在漏斗状下陷,所研究的2个漏斗状洼地,直径150~180 m,深约5 m。团队将其称之为“海眼”,认为湖水不是涌入湖中,而是通过这些漏斗漏出。

(2)从漏斗底部地形形态和沉积物变形特征分析,相对偏东侧的主漏斗M处于微弱活动或发展阶段,存在重新打开并发生漏水的可能;偏西侧的次级漏斗S处于休眠或者堵塞状态,有轻微下沉。通过历史记录、水下地形、区域地质构造和地层沉积年代学研究认为,滇池至少在1764年曾发生过非气候因素的构造漏水事件,可能与2个漏斗或其中之一相关。

(3)从高分辨率探测结果分析,2015年10月至

2019年9月期间,主漏斗最大下沉深度增加了60 cm,次级漏斗最大下沉深度增加了20 cm,表明滇池发生漏水的风险正在增加。新的构造漏水能量积累可能已达临界状态,一旦因水位上升水体压力增大或地震诱发地下断裂通道(包括喀斯特溶洞)贯通,滇池污染水体就必然扩散或有可能通过地下通道注入抚仙湖或者扒河(红河支流),由此不但威胁区域水安全,而且会造成重大生态环境事件。

1.2 无风险论

滇投公司先期委托和组织七五〇试验场对滇池主漏斗进行水下测量,委托昆明市水文水资源局对近年来滇池水资源量进行平衡分析,初步判定主漏斗不存在漏水问题。为补充深层次的地质环境依据,又委托昆明院开展系统的专题研究。昆明院搜集研究了区域地理、地质与水工环地质、地震、岩溶、水下探测及地形测量等资料,为“滇池漏水隐患”研究提供了较充分的地质环境依据。通过野外调查、遥感地质解译、主漏斗水下地形及浅层地震剖面探测、水量平衡分析和综合研究形成了较全面的认识^[7]。

(1)滇池与抚仙湖流域是分属金沙江和南盘江水系的相互独立的水文地质单元,其形成及演化进程中互无关联。二者间无贯通性深大断裂发育,也无连续的可溶岩地层和岩溶管道,滇池盆地底部和周围存在连续的上新统、更新统弱透水覆盖层,基底下伏层状储热层及隔水盖层,各类调查均未发现产生滇池向抚仙湖漏水成灾所需的巨大管道形迹。经地震地质构造影响机制解析,认为主漏斗要发生地表破裂,需普渡河断裂中段至少发生6.5级地震,要影响到抚仙湖流域,需7.4级以上地震,而昆明盆地历史最大震级为1696年官渡5(3/4)级地震,目前没有研究成果支撑可能发生超越历史的地震风险。

(2)玉溪盆地、扒河河谷虽高程低于滇池水位,但与滇池之间存在厚大的地形分水岭,两侧都有大量泉水出露,标志着玉溪盆地、扒河方向与滇池之间存在高地下分水岭,滇池水不能越过地下分水岭向玉溪盆地和扒河方向渗漏。

(3)主漏斗底部没有明显的凹凸起伏、断裂、滑塌等地表结构异常和沉积物变形现象,顶层淤泥和下伏土层连续无错断,也未发现空洞和与基岩连通的裂隙,且漏斗最深处水深仅10 m左右,水压约为0.1 MPa,远不足以穿透厚度超过200 m的隔水湖积层。

(4)1764年史料记载简单,不能判定是滇池底部漏水导致湖泊干涸,但该年确实出现过由于干旱导致滇池水位大幅下降的情况。经对1953年以来滇池水量平衡分析,表明滇池现状水资源量是平衡的,没有明显的外流域水量交换。若发生滇池水向抚仙湖渗漏,15.6亿 m^3 滇池水可导致面积约 215 km^2 的抚仙湖水位迅速上升7.26 m,如此巨大的灾变事件不可能毫无历史记载。

1.3 依据不足论

省地调局组织了在昆明地区长期从事调查、勘察研究的地质、水工环地质、地球物理、地质工程等专业的专家,根据长期积累的大量实地资料、认识和经验,结合上述工作成果,对“滇池漏水隐患”进行认真的研讨,形成了如下意见:

(1)张虎才团队对滇池湖底洼地(上述“漏斗”、“海眼”)的描述基本客观。但限于勘查的系统性、规范性和研究程度、内容及时空范围不足,支撑“海眼”“能量累积已经达到或即将达到临界点,存在再次发生灾害性漏水事件的隐患与危险”、“漏水极有可能流向抚仙湖”等结论的地质依据欠充分,推断不尽合理。

(2)喀斯特断陷盆地是随着新生代高原隆升产生的断裂活动所引起的断块差异沉降及溶蚀作用共同形成的山间盆地。理论上,盆地发展演化少不了地下河溶蚀搬运作用。最后当其底部相对下降,达到积水和沉积状态时,原发育于丘峰上的岩溶漏斗、落水洞、天窗等入口逐渐被沉积物堵塞覆盖。滇池湖底洼地很可能是对基底地形起伏的继承和反映,据浅层地震剖面探测,洼地沉积土层呈浅缓弯曲,中间厚而周边逐渐变薄,但无破裂形迹,应为基底起伏引起的蠕变和差异固结沉降所致。

(3)基于基本地震烈度区划、抗震设防烈度等规范性依据,昆明地区发生超越历史地震影响的可能性不大。结合云南高原杞麓湖、个旧湖等众多自然或人为堵塞的喀斯特断陷盆地或谷地泄水落水洞实例推断,由自然发展导致湖底已堵塞的落水洞再度疏通发生溃决性漏水的可能性极小。

2 问题讨论

从上述归纳介绍可见,各方认识大多相左,究其原因,还在于所做研究工作或多或少地存在部分概

念性的错误和勘查研究不够系统、规范性较差等问题或不足,致使论证依据欠充分。

2.1 地质学概念及术语不清

正确掌握地质学的概念,规范使用地质学术语,方能引导开展科学合理、切实有效的研究工作,取得正确的认识和结论,故已有研究成果中不清楚的地质学概念应予厘清。

“构造漏水”一词多见于建筑工程文献,张虎才团队首次用于滇池漏水隐患研究。但对其涵义缺少清晰的表述,从其发表的论文及其滇池漏斗区形成和演化概念图看,大意是如果昆明地区发生较强地震,很有可能引起断裂活动,导致滇池湖底漏斗发生岩溶塌陷,地下溶洞或断裂贯通,造成滇池灾害性漏水事件^[8-10],漏水灾害发生的源头和风险在于湖底岩溶塌陷。但通过断裂构造产生径流量如此巨大的漏水,以及溶洞管道与断裂之间径流的转换,有悖于水文地质学的基本知识和客观实际。理论上由断裂构造的物质组成、结构构造、胶结充填、力学性质、地应力及风化作用等因素所决定,断裂构造导水、含水空隙均为裂隙、孔隙,没有形成集中管道流的条件。注意不应把构造控制和影响形成的岩溶洞管及其径流与构造自身的水文地质特性相混淆。客观上断裂构造既有导水、透水的,也有阻水、隔水的,同一断裂若通过的地层(岩体)的岩性、力学性质和可溶性等不同,以及不同段的力学性质发生变化等都会导致断裂的地下水动力性质发生转变,这已为大量的勘探和挖(采)掘工程揭露所证实,实践中也尚未发现溶洞管道流与断裂带隙流对等连接转换的事证。地质构造形态类型繁多,如褶皱、断层、节理、劈理以及其它各种面状和线状构造等。采用“构造漏水”一词表示滇池漏水隐患及其机制,是不客观合理也不准确的。

漏斗是岩溶学术语,系指漏斗形或碟形的封闭洼地,直径一般在100 m以内,底部常有落水洞通往地下,起消水作用^[11-12]。而已发表的研究成果中,将形成于滇池湖底松散覆盖层上的浅缓低洼地貌形态称为“漏斗”显然是错用术语,无论其形成背景、成因作用和组成要素均与漏斗不符,这容易造成认知上的错误和学术交流障碍。

2.2 水文地质调查研究不足

滇东岩溶高原地质、水工环地质调查和勘查研

究程度很高,1:20万、1:5万的调查已覆盖全区,滇池流域还进行过许多更高精度的详查和勘探^[13-16]。但在已发表的研究成果中,对这些翔实可靠的成果资料搜集研究是远远不够的,因此对很多现象和问题的推断脱离了客观实际。如从水文地质普查成果图中可见(图1),滇池流域的东部、南部有厚大的地表分水岭、多层新生界黏性土层、玄武岩、碎屑岩和变质岩弱透水层阻挡,具有连续的地表分水岭和地下水流域边界^[17],而且自更新世以来在该区域金沙江的袭夺最为强烈^[18],因此在这两个方向不具备发育跨流域的巨大地下河通道的水文地质条件。

滇池流域地表分水岭和地下水流域边界的封闭或开放性、地下水动力性质及其变化等;导水断裂的存在与否,延伸和产状、物理力学性质、物质组成、结构构造、交切关系、水文地质特性等;地下河通道的发育方向,排泄出口等,通过已有资料的研究和野外追索查证是能够取得切实的依据和可信的结论的,但遗憾的是水文地质调查研究程度远不足以支撑所作推论。

2.3 湖盆地质历史研究薄弱

地质历史分析是认识地质演化过程和规律不可或缺的研究内容和基本方法,但在滇池漏水隐患研究中,这方面的研究非常薄弱,导致对湖底洼地的成因机制、滇池漏水途径的分析推断依据不足。

滇池湖泊乃喀斯特断陷盆地形成及演化的产物,其状态取决于喀斯特断陷盆地的发展阶段、新构造运动及岩溶发育特征^[19-22],自元代以来疏浚海口河、建松华坝水库等人类工程活动对其改造也非常强烈。中新世以来,随着间歇性的新构造运动,在普渡河断裂及其次级断裂的控制作用下,滇池经历了串珠状凹陷湖泊—湖泊断陷归并扩张—湖泊衰退萎缩等形成演化阶段^[23-25]。沉积形成了记录着期间各种地质事件、岩相古地理及生态环境等信息的新生界地层。只有通过深入系统的新生代地质历史研究,才能圆满解释滇池湖底洼地的成因机制及漏水隐患的各种问题。譬如“主漏斗”的成因和去向问题分析,按照地质学将今论古的基本原理,将基底地形地貌(图2)结合沉积年代及沉积相分析,可见上新世早期,滇池呈现为近南北向展布的晋宁凹陷、湖心凹陷、九甲凹陷、韩家村凹陷等串珠状的湖泊群(图3)。韩家村凹陷是最深的沉降中心,晋宁凹陷则相对独立。

从滇池及外围岩溶含水层展布、古地下河通道遗迹及古河道形态、走向分析,此时韩家村凹陷湖泊汇集的水流很可能是通过沿断裂带溶蚀形成的地下河经东村河、木板河流往普渡河,或者是经陡坡、头村至富民的小河流往螳螂川,陡坡至头村的峡谷两侧溶洞垮塌遗迹明显,右岸遗留的西游洞、仙桥洞、观音洞等应为东西向主干古地下河的支流溶洞。碧鸡关垭口也可能是曾经的溢流出口之一。晋宁凹陷湖泊的出口则为现在的海口河谷。前述“主漏斗”发育于两大凹陷之间的山岭岩溶水垂直入渗补给区,沿主干断裂走向及最大水力坡度方向,其下溶蚀发育通往韩家村凹陷湖泊的地下河。之后随着外围山体与断陷盆地底部沉陷区的间歇性升降运动,湖泊地下河外泄溶洞管道逐次被错断,外围山体形成多层水平干溶洞,沉陷区基底遗留对应的多层隐伏溶洞^[26-29]。上述过程导致湖泊外泄减缓、水面扩大、水体加深、沉积幅度加大,沉积掩埋范围和深度不断增大。至晚更新世,滇池地表水和地下水外泄通道主要就剩下海口河谷。如同今天处于发展阶段的泸沽湖、洱海、抚仙湖中所见,此时滇池“主漏斗”所在的山岭成了湖中的半岛及至孤岛,其下岩溶水径流通道转换为以螳螂川为侵蚀基准顺海口河谷、可溶岩层及断裂走向发育的溶洞管道,在海口河谷内所打供水钻孔多有揭露地下溶洞,滇池南部湖底的4个“海眼”表现为串珠状展布于螳螂川与滇池长轴线垂直的地带上。到了全新世,古岩溶山岭及其上发育的洼地、漏斗、落水洞等逐渐沉陷被湖泊沉积物堵塞覆盖。现在的“主漏斗”等湖底洼地应是松散覆盖层对基底地形起伏的继承,是受基底起伏影响导致差异固结沉降的结果。

2.4 水文地质勘探验证欠缺

由于地质现象的复杂性和地球物理探测结果的多解性,地球物理探测、地质推断结果未经钻探试验验证是难以定论的。滇池漏水隐患预测评价,最关键的湖底新生界覆盖层厚度,仅仅是根据区域重力测量结果作出的推测^[13]。洼地覆盖土层结构、物理力学性质、基底岩溶发育特征等缺乏钻探、实验测试验证。缺少钻探、试验测试数据,湖底沉积物固结沉降特征和机制无法进行计算分析。假若洼地基底存在岩溶漏斗和落水洞,在其形态、规模、堵塞物质特性及位置不明的情况下,也难以确切分析堵塞体

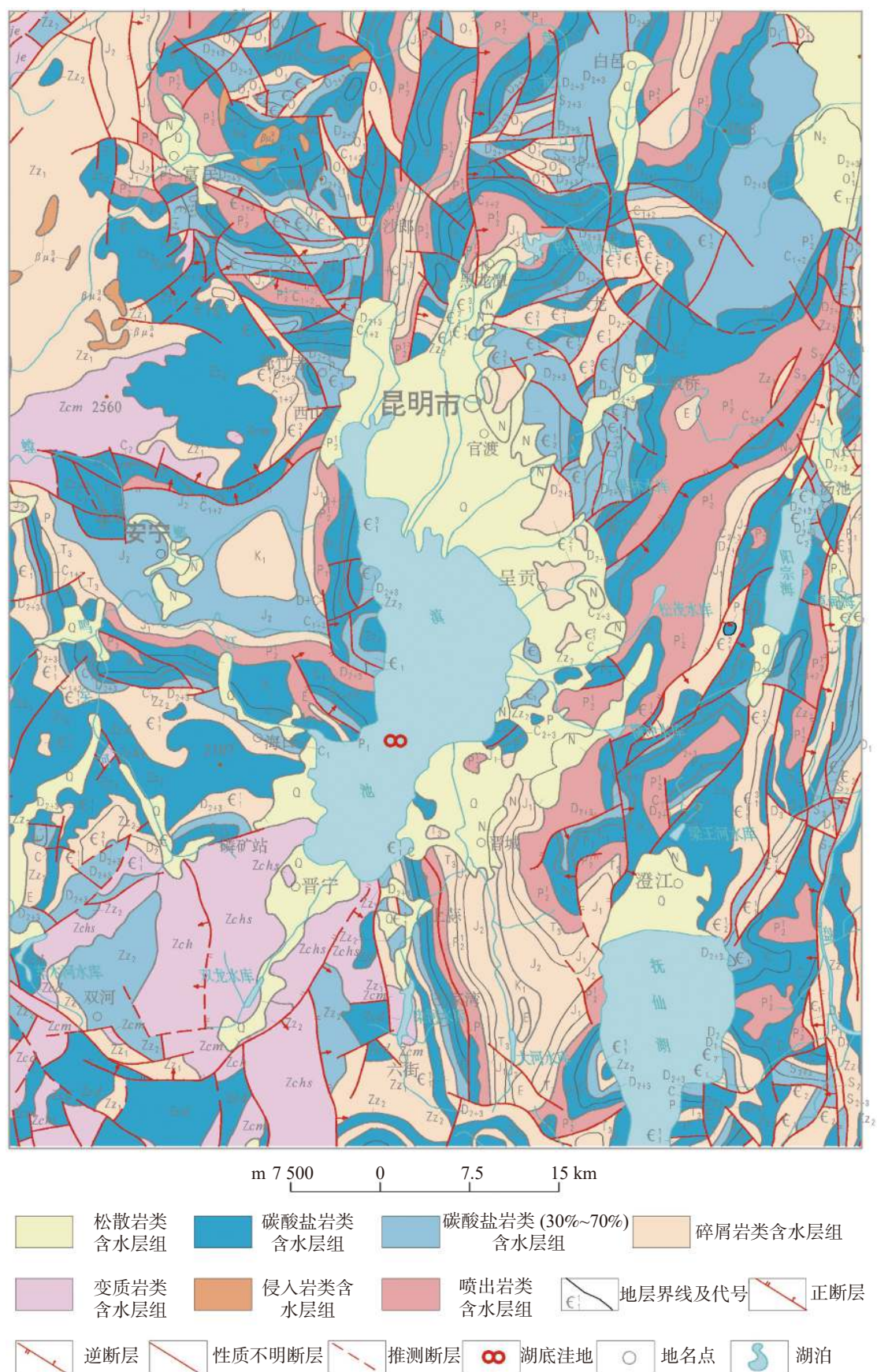


图 1 滇池区域水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the Dianchi lake area

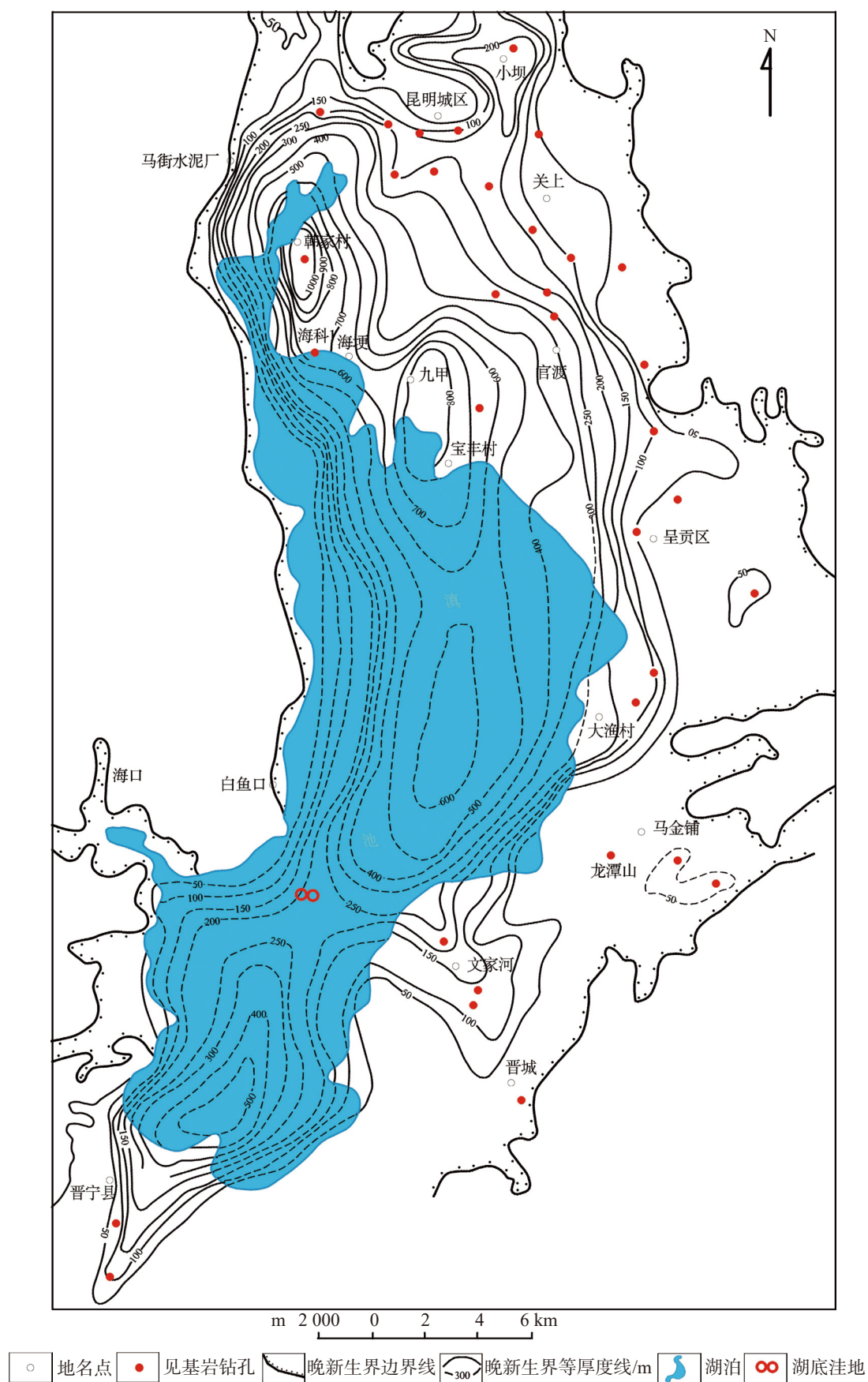


图 2 滇池及周边新生界覆盖层等厚线图

Fig. 2 Isopach map of Cenozoic overburden layer in Dianchi lake and its surrounding areas

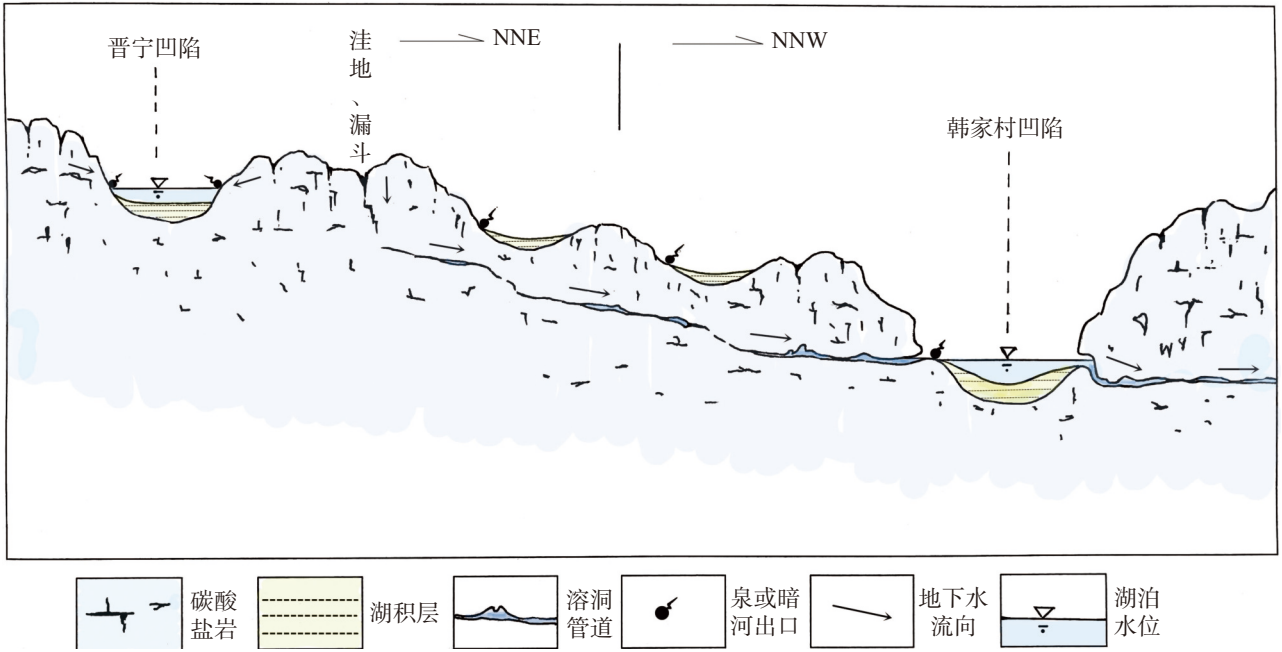


图 3 滇池上新世初期岩溶水流系统恢复示意图

Fig. 3 Schematic diagram of restoration of karst water flow system in the early Pliocene of Dianchi lake

的失稳机制,计算评价其稳定性及所谓的塌陷临界点。所以目前各方所作的推论均需钻探试验验证方可拍板定案。

3 工作建议

滇池漏水隐患的勘查研究仍在继续推进,为了弥补上述问题和不足,取得准确可靠的认识和结论,以支撑政府管理决策,需做好如下工作。

3.1 规范地质学基本概念

确定滇池漏水隐患的形式、成因机制及危害属于湖底岩溶塌陷产生集中管道漏水的范畴。引导勘查研究的重点集中于湖底洼地岩溶塌陷的形成条件^[30]、覆盖层稳定性、自然及人为诱发因素的勘查和量化评价。在岩溶塌陷风险成立的基础上,对漏水途径、排泄口位置等研究才有意义。在目前的技术条件下,只有对湖底洼地岩溶塌陷风险的勘查评价可得出探明的准确结论,其余研究只能取得推断的结论,因此只有在湖底洼地岩溶塌陷勘查评价之后才能得出最终定论。

前述“漏斗”在成因不明的情况下,依形态和松散沉积背景称为洼地较为合理。关于“海眼”,笔者1989年在滇池东岸进行水文地质调查填图期间,为了寻找地下水露头,在野外走访中,当地渔民所说的

“海眼”系指湖底出露的上升泉,他们描述的景象是在相对灰绿色的湖水中冒出一汪青色透亮的清水,他们在湖上划船捕鱼期间以之作为饮用水源,煮鲜鱼非常甜美。此种水下泉点在岩溶区的河湖中甚为常见。

3.2 开展湖底洼地钻探试验及监测

由于水下钻探试验技术难度较大,且不能过度扰动湖泊脆弱环境,故应周密计划,一孔多用。为有足够的代表性和针对性,宜对所研究的2个洼地,选择适用有效的方法和仪器设备,布置以洼地中心为交点,南北、东西向相交的十字形物探剖面,探测覆盖层厚度、物性分层、基底界面形态、岩性和构造、岩溶发育及各向异性等信息,据此在“主漏斗”洼地中岩溶强异常显示部位设计、实施钻探验证。

鉴于本项钻探试验的特殊性,应做到以下质量和安全要求。

(1)全孔连续取芯钻进,进行简易水文地质观测、岩芯编录、系统采取水、土、岩分析测试和鉴定样品,分段进行抽水试验。

(2)孔身和井管结构设计应结合地下水水位分层观测系统安装的需要。以便开展洼地处湖水、覆盖层孔隙含水层和基岩岩溶含水层水位的同步高分辨率自动化监测,确定湖水位和不同深度、不同层位地下水水位在垂向上的相互关系和动态变化规律。

(3)全孔分段跟管钻进,保障分段抽水试验,防止垮孔、缩径、漏水等事故。开孔钻入淤泥下固结土层 5~10 m 下不锈钢管护壁,以水泥做管外封闭止水及稳固井管,管口应高于最高湖水位,防止湖水灌入污染含水层和影响水文地质观测和试验。在钻探试验结束后可作为湖底覆盖层变形监测的标桩和安装 GNSS 接收机等仪器。

(4)孔深揭露完整基岩 5 m 终孔,终孔孔径 ≥ 110 mm,孔斜度 $\leq 1^\circ/100$ m。套管嵌岩段以水泥做管外封闭止水,扫通管底保持孔底进水。应做好基底钻见岩溶管道发生漏水潜蚀垮孔的应急处置预案和准备。监测结束后,认真做好全孔永久性封孔并处理掉孔口管。

3.3 系统开展综合研究和野外查证

系统开展滇池流域及外围区域水文气象、地质、水文地质及湖盆形成演化历史的综合研究和野外查证,查明区域地质构造、侵蚀基准、气候变化、岩溶发育规律,确定滇池地下水循环的途径和方向、通道特征、排泄基准、径流形式等,为滇池漏水隐患研究提供全面的水文地质依据。

湖盆形成及演化历史研究,应结合地貌组合形态分区,选择不同成因类型的典型地层测制地层剖面,采样分析鉴定古生物标志、古人类及古文化标志、古气候标志,测定绝对年龄等,提高新生界地质年代和地层划分的精度。应将第四纪沉积物作为岩溶地貌组合形态的有机组成部分,综合对比研究岩溶发育演化的历史,划分岩溶发育分带、分期。应将地表侵蚀地貌及流水沉积与溶洞、地下河对比研究,分析地表、地下河的转换及地下河的发育和变迁历史,为判定地下河的埋藏分布位置、流域边界性质提供依据。通过侵蚀基准升降幅度、盆地沉积厚度等分析,估计岩溶发育下限、地下水循环深度等。

从地形地貌、岩溶含水介质延伸和流场分析,滇池流域地下水向外排泄的途径最明显的为海口河谷(图 1,图 2),该地段无论断裂构造、岩溶发育及演化历史与湖底洼地的联系均较为紧密,而海口河谷和昆阳磷矿开采区地下水开采和矿坑排水强度也是该区域最大的。应通过地下水开采和矿坑排水情况调查,供水井抽水、矿坑涌水的水化学、同位素、微型生物分析测试,判定是否与滇池水相联系,从而确定湖底洼地发生变形的诱因及防治措施。区域水文地

质调查已经查明了所有大泉、地下河的分布和特征,对于研判可能源自滇池流域的排泄点,也可以采取同样的方法进行分析判定。

4 结 论

(1)目前滇池漏水隐患研究已发表和提交的成果,主要有急变临灾高风险和隐患不成立无风险两个相左的结论性认识,本文认为两者推断依据皆不充分,尚待进一步勘查研究。

(2)研究工作及成果中的主要问题和不足为地质学概念及术语不清、水文地质调查研究不足、湖盆形成及演化历史研究薄弱、水文地质勘探验证欠缺。

(3)今后研究应规范地质学基本概念、开展湖底洼地钻探试验及监测、系统开展综合研究和野外查证。本文明确了湖底洼地岩溶塌陷是关键问题,必须实施钻探验证才能得出科学定论。

参考文献

- [1] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 179-186.
YUAN Daoxian. On the karst environment system[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(3): 179-186.
- [2] 王宇, 张贵, 张华, 康晓波, 彭淑惠, 王波, 王劲, 周翠琼. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2014.
- [3] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何晓生, 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 functions in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 283-295.
- [4] 《云南大百科全书》编纂委员会. 云南大百科全书(地理)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2020.
- [5] 杨留法. 云南高原湖泊的成因类型及其分布规律的初步探讨[J]. 海洋湖沼通报, 1984(1): 34-39.
YANG Liufa. The preliminary study on the original classification and distribution law of lakes on the Yunnan plateau[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1984(1): 34-39.
- [6] 董仙, 赵磊, 陈异晖, 余艳红, 赵润, 杨广萍. 云南九大高原湖泊的演变与生态安全调控[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 185-191.
DONG Yunxian, ZHAO Lei, CHEN Yihui, YU Yanhong, ZHAO Run, YANG Guangping. Succession of nine plateau lakes and regulation of ecological safety in Yunnan Province[J]. Ecological Economy, 2015, 31(1): 185-191.

- [7] 专题研究项目组. 滇池向抚仙湖集中渗漏问题专题研究报告[R]. 昆明: 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 2017.
- [8] 张虎才. 滇池构造漏水隐患及水安全[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 849-857.
ZHANG Hucai. The potential endangers of the tectonic lake water leakage from Dianchi and water security[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 849-857.
- [9] 高原湖泊生态与治理研究院. 高原湖泊生态与治理研究院张虎才团队在滇池构造漏水隐患研究方面取得进展[EB/OL]. 昆明: 云南大学网页, 2021.7. 23.
<http://www.tzb.ynu.edu.cn/info/1029/1399.htm>.
- [10] Wu Han, Zhang Hucai, Zhang Xiaonan, Peng Wei, Liu Qi, Liu Fengwen, Zhang Yun, Duan Lizeng. Potential catastrophic water outflow from Lake Dian, China: Possible hydrological and ecological risks[J]. Catena, 2021, 207: 105589.
- [11] GB12329-90. 岩溶地质术语[S], 1990—04-19发布. .
GB12329-90. Karst geology terminology[S], 1990—04-19发布. .
- [12] 任美镠, 刘振中, 王飞燕, 俞锦标, 刘泽纯, 潘瑞鸿, 程俊贤. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- [13] 冯江, 张一强, 杨金山, 等. 云南省昆明地区滇池流域水文地质及工程地质普查报告[R]. 昆明: 云南省地矿局第一水文地质工程地质大队, 1985.
- [14] 王宇, 褚宏俊, 毕翔, 等. 云南省昆明地区螳螂江流域水文地质工程地质普查报告[R]. 昆明: 云南省地矿局第一水文地质工程地质大队, 1990.
- [15] 徐世光, 李俊文, 李文, 等. 云南省玉溪盆地水文地质、工程地质、环境地质普查报告[R]. 昆明: 云南省地矿局第一水文地质工程地质大队, 1993.
- [16] 张华, 康晓波, 彭淑惠, 等. 云南重点岩溶流域水文地质与环境地质调查报告(抚仙湖、星云湖、杞麓湖流域)[R]. 昆明: 云南省地质调查院, 2009.
- [17] 王宇. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 823-830.
WANG Yu. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 823-830.
- [18] 明庆中. 三江并流区地貌与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
MING Qingzhong. The landform development and environmental effects of three parallel rivers[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [19] 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.
WANG Yu, LI Yan, TAN Jizhong, ZHANG Gui, HE Raosheng. Occurrence law of karst water in fault basin[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003.
- [20] 中国科学院地质研究所. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [21] 袁道先. 论岩溶水的不均匀性[C]//岩溶地区水文地质及工程地质工作经验汇编(第二辑). 北京: 地质出版社, 1978: 1-19.
- [22] 王宇, 杨世瑜, 陆良彩色沙林成因[J]. 云南地质, 2006, 25(2): 193-198.
WANG Yu, YANG Shiyu. On the genesis of Luliang colourful sand forest[J]. Yunnan Geology, 2006, 25(2): 193-198.
- [23] 刘宝珺, 李希勤, 等. 昆明盆地晚新生代地质与沉积演化[M]. 重庆: 重庆出版社, 1990.
- [24] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geological record of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [25] 姚六三. 云南断陷岩溶盆地形成机理及模型的建立[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 48-55.
YAO Liusan. The formation mechanism and model of faulted karst basins in Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 1984, 3(2): 48-55.
- [26] 王宇. 滇东地区断陷岩溶盆地裸露—覆盖型岩溶水系统特征剖析: 以吴家营岩溶水系统为例[J]. 云南地质, 1993, 12(3): 301-316.
WANG Yu. Analysis of the characteristics of exposed and covered karst water systems in fault basins, east Yunnan: Example: Wujiaying karst water system[J]. Geology of Yunnan, 1993, 12(3): 301-316.
- [27] 刘曦翔, 淡永, 罗文军, 梁彬, 徐亮, 聂国权, 季少聪. 四川盆地高石梯地区灯影组四段顶岩溶古地貌、古水系特征与刻画[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 206-214.
LIU Xixiang, DAN Yong, LUO Wenjun, LIANG Bin, XU Liang, NIE Guoquan, JI Shaocong. Characterization of karst paleo-geomorphology and the paleo-water system on the top of the 4th member of the Dengying Formation in the Gaoshiti area, Sichuan basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 206-214.
- [28] 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.
- [29] 康晓波, 王宇, 张华, 代旭升, 朱广毅. 云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 50-58.
KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, DAI Xusheng, ZHU Guangyi. Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 50-58.
- [30] 康彦仁, 项式均, 陈建, 等. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1990.
KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, et al. Karst collapse in South China[M]. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishing House Co., Ltd., 1990.

Problems and suggestions on the study of collapse and water leakage at the bottom of Dianchi lake

WANG Yu^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming,

Yunnan 650216, China; 3. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract At present, there are two conflicting conclusions on the research of water leakage hazards in Dianchi lake. One is that the hidden danger points of water leakage in Dianchi lake have rapidly changed and is at a critical point, so there is a high risk of water leakage disasters. The other is that the view of hidden dangers of water leakage is not true, and hence there is no risk of water leakage disasters in Dianchi lake. Although people of both sides have done a large amount of analytic demonstration and published their research results. However, there are still more or less conceptual, systematic and normative errors or deficiencies. These deficiencies are mainly reflected as follows: unclear geological concepts and terms, insufficient hydrogeological investigation, weak research on the history of lake basin formation and evolution, and lack of verification by hydrogeological exploration, which may lead to insufficient basis for both sides to make a precise deduction.

First, the terminological phrase "structural leakage" needs a clear expression. If a strong earthquake occurs in the Kunming area, it is likely to cause faults, leading to karst collapse of the funnel at the bottom of Dianchi lake, and then leading to the probable fault and connection of underground karst caves. This process will contribute to the catastrophic water leakage in Dianchi lake. Therefore, the risk of water leakage disasters may be originated from karst collapses at the lake bottom. However, the idea that the occurrence of a huge water leakage through the fault structure and the conversion of runoff between karst pipelines and faults may contradict the basic knowledge and reality of hydrogeology. It is not objective, reasonable and accurate to use the phrase "structural leakage" to express the hidden danger and its mechanism of water leakage in Dianchi lake. In addition, "funnel" is a karst term of karstology, referring to a funnel-shaped or saucer-shaped closed depression usually with a diameter of less than 100 m. At the bottom of a funnel, there are usually sinkholes leading to the underground, which can play a role of water drainage. However, the previous studies refer to the shallow and gentle low-lying landform formed on the loose cover layer of Dianchi lake as "funnel", which is obviously misused. This kind of landform is inconsistent with a funnel regardless of its formation background, genesis and components. If "funnel" is misused in this case, it is likely to cause cognitive errors and barriers in academic communication. Second, the geology, hydrogeology, engineering geology and environmental geology of the karst plateau in eastern Yunnan have been fully investigated and explored. The surveys of 1 : 200,000 and 1 : 50,000 have covered the whole area, and many detailed surveys and exploration with high precision have been carried out in the Dianchi basin. However, previous studies are far from enough for us to collect the detailed and reliable results of these surveys, so the inference of many phenomena and problems deviates from the reality. For example, with continuous surface divide and groundwater basin boundary, the eastern and southern parts of the Dianchi basin are blocked by thick surface divides, multi-layer Cenozoic viscous soil layers, and weak permeable layers of basalt, clastic rock and metamorphic rock. Moreover, the Jinsha river has been the most strongly invaded in this region since Pleistocene. Therefore, there are no hydrogeological conditions for the development of huge underground river channels across basins in these two parts. Third, the analysis of geological history is indispensable to understand the process and law of geological evolution. For example, through the analysis of the development and evolution of the Dianchi lake basin since Miocene, it can be found that the development of karst underground river system related to the depression at lake bottom may initially take the Hanjiacun depression as the discharge basis, and

finally change to the Tanglang river as the discharge basis through the Haikou river. However, in the study of the hidden water leakage in Dianchi lake, the research in this aspect is very weak, leading to insufficiency of the basis for analysis and inference of the formation and evolution of depression at lake bottom, its genetic mechanism, and the water leakage path of Dianchi lake. Fourth, due to the complexity of geological phenomena and the multiplicity of geophysical exploration results, the conclusions drawn by geophysical exploration and geological inference are not final because they have not been verified by drilling tests. Although the thickness of Cenozoic overburden layer at the lake bottom is the key to the prediction and evaluation of water leakage hazards in Dianchi lake, it is speculated only based on the results of regional gravity measurement. The structure of overlying soil layer, physical and mechanical properties, and developmental characteristics of basement karst in the depression lack the drilling and experimental testing. The absence of drilling and testing data makes it impossible to calculate and analyze the characteristics and mechanisms of sediment consolidation of settlement at the lake bottom. If there are karst funnels and sinkholes in the basement of depression and their shapes, scales, and characteristics and locations of the blocking material are unknown, it is impossible to accurately analyze the instability mechanism of the blocking body, and thus it is also impossible to calculate and evaluate its stability and the so-called critical point of collapse. Therefore, the conclusion that "the hidden danger points of water leakage in Dianchi Lake have rapidly changed and is at a critical point of leakage disasters" is speculative. Currently, all deductions made need to be verified through drilling tests before they can be finalized.

For these problems, this study makes an in-depth analysis one by one. According to the current research and data of regional physical geography, geology, hydrogeology, engineering geology and environmental geology, and combined with practical work experience, this study puts forward specific suggestions for the improvement of future research, such as standardizing basic concepts of geology, carrying out drilling tests, monitoring the depression deformation at the lake bottom, and systematically carrying out comprehensive research and field verification. It is pointed out that in order to reach the final conclusion of the hidden danger of leakage in Dianchi lake, the key is to find out the possibility of the karst collapse of depression at the lake bottom, so drilling verification must be carried out. Because the technology of underwater drilling test is difficult and the fragile environment of plateau lake cannot be disturbed excessively, the conduction of drilling test should be carefully planned and one hole can be drilled for different purposes. For sufficient representativeness and pertinence, it is appropriate to carry out drilling tests, monitor the two depressions studied, and provide specific technical suggestions for geophysical exploration, drilling test, dynamic monitoring of lake water and groundwater, and monitoring of the deformation of lake overburden layer at the lake bottom.

Key words Dianchi lake, faulted basin, karst depression, karst collapse, lake leakage

(编辑 张玲)