

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.
DOI: 10. 11932/karst2019y08

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

王宇^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;
2. 云南省地质调查局, 昆明 650051)

摘要: 岩溶地区地表水流域与地下水流域边界的分异形式有三类, 即: 地表分水岭与地下水流域边界在平面分布上基本一致; 地表分水岭超出了地下水流域边界; 地下水流域边界超出了地表分水岭。岩溶区地表水与地下水耦合流域的顶界为地表水流域的水面及下垫面, 底界为浅循环潜水含水层或潜水—承压含水层下伏的隔水层顶面, 在大厚度岩溶含水层分布区, 可以弱岩溶发育带的顶面作为底界。其中地表水与地下水两个子系统间的次级边界, 为地表水流域的下垫面。结合专门调查(勘查)评价和区域调查评价的特性, 提出评价单元划分的原则及方法。这有助于在新一轮自然资源调查评价中, 以流域为单元系统地开展水资源及环境调查评价, 实行地表水和地下水资源及环境的统一管理。

关键词: 水资源; 环境; 地表水; 地下水; 流域边界; 径流系统

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2019)06-0823-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

地表水流域是地表分水线所包围的河流集水区域。而地下水流域^[1]是地下水流系统的集水范围, 对应于地下水资源评价中划分的地下水补给、径流、排泄单元。地下水流域与地表水流域有相似之处, 但也有显著的差异。地表水在地面流动主要受地形控制, 流域范围是以地形分水岭、江河湖海为边界的地表集水区, 通过地形测量和遥感测量容易得到确认。而地下水的流动涉及地下很深的层次, 除了地形地貌的影响, 地质结构及地质作用是主要控制因素, 因此, 边界类型及水动力特性要复杂得多, 有地形地貌、江河湖海、地层构造、地下水流域之间的地下分水岭等多种边界类型, 且隐蔽而复杂多变。虽然地表水流域分水岭与地下水流域边界基本一致是较为

多见的, 但二者的分异也在每一个流域都不同程度地存在。受此前管理机构责权划分的影响, 地表水与地下水资源及环境调查评价往往是分开进行的, 这就人为割裂了自然水循环连续的系统过程, 带来了水资源量计算重叠、水资源及环境开发利用与保护规划的系统性差、地表水和地下水开采的相互影响常常被忽略等问题。自然资源管理机构的改革, 实现了地表水和地下水资源及环境的统一管理, 为此必然要求对地表水和地下水资源及环境实行统一调查和评价, 以提交系统、完整、准确的水资源及环境调查评价成果。一直以来, 以流域为单元系统地开展水资源及环境调查评价已是水文学、水文地质学及环境科学领域大多数专家学者的共识^[2-6], 但在成因多元的岩溶区践行这一要求, 首先必须要面对和研究解决地表水流域与地下水流域边界的分异

资助项目: 国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”(2016YFC0502500)

作者简介: 王宇(1960—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水工环地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2019-03-11

问题,以及地表水与地下水资源计算的下限,即水资源评价单元的底部边界确定问题,本文试图对以上问题进行研究,以期新一轮自然资源调查评价提供帮助。

1 地表水流域与地下水流域边界的分异形式

在中国西部广袤的高原山区,由于时空上地层岩相多变,断裂褶皱发育,新构造运动强烈且区间差异大,导致地形强烈起伏,造成了地表水流域分水岭多变,流域由高级向低级分化强烈;而地下水流域的边界条件则复杂多样,边界类型除了与地表分水岭和地表水体一致的地段,多存在不同程度的分异,在岩溶区这种分异更为普遍,在分异严重的地段,需采用水文地质手段详细勘查,才能避免水资源及环境评价产生显著的误差。这主要是由于含水层与隔水层界面、阻水断层面、完整的侵入岩体等地质因素形成的隔水边界,以及岩溶地下河系之间由侵蚀溶蚀基准控制形成的分水线,与不同地表水系之间相向侵蚀形成的地表分水岭及地表水体边界是很少相互吻合的所致。

虽然地表水流域与地下水流域边界的分异是客观事实,并且已有大量文献进行了研究和论证^[7-12],在国家水文基本术语和符号标准中^[1],已定义了地表水分水线与地下水分水线不重合的流域为不闭合流域,反之为闭合流域。但对于地表水流域与地下水流域边界的分异形式,尚需进一步分析研究、归纳和分类,以为研究不同类型的边界分异形式产生的水资源及环境影响打下基础。

通过研究1:20万和1:5万水文地质调查的成果资料,岩溶地区地表水流域与地下水流域边界的分异形式,按照靠近所进行水资源或环境调查(勘查)评价区所在流域(以下简称本流域)内部的距离远近,可归纳为三种类型(图1、图2),即:(1)地表分水岭与地下水流域边界在平面分布上基本一致;(2)地表分水岭超出了地下水流域边界;(3)地下水流域边界超出了地表分水岭。

(1)地表分水岭与地下水流域边界在平面分布上基本一致。在平面上二者走向基本一致,但垂向上还是分离的,分离的距离为地表分水岭上地下水潜水位埋藏深度。这种情况通常存在于侵蚀溶蚀山区,岩溶潜水含水层厚度大,近水平产状连续分布,导储水空隙以溶隙网络为主,主干洞管不发育。

(2)地表分水岭超出了地下水流域边界。平面

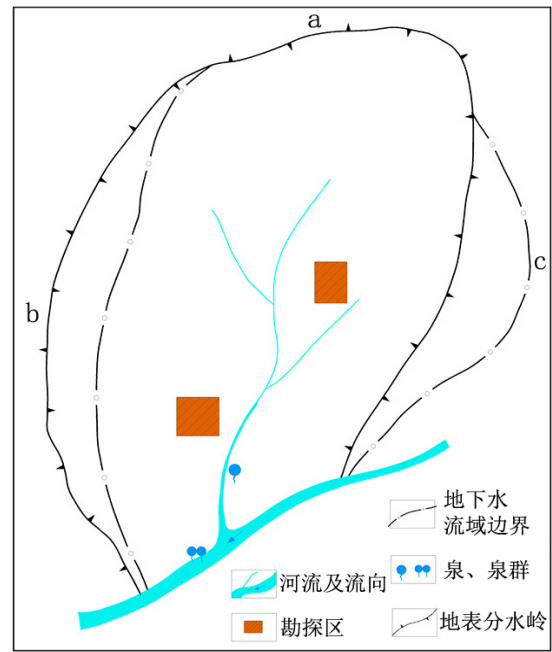


图1 地表水流域与地下水流域边界的分异形式平面图
Fig. 1 Plan of the differentiation of boundary between surface and groundwater basins

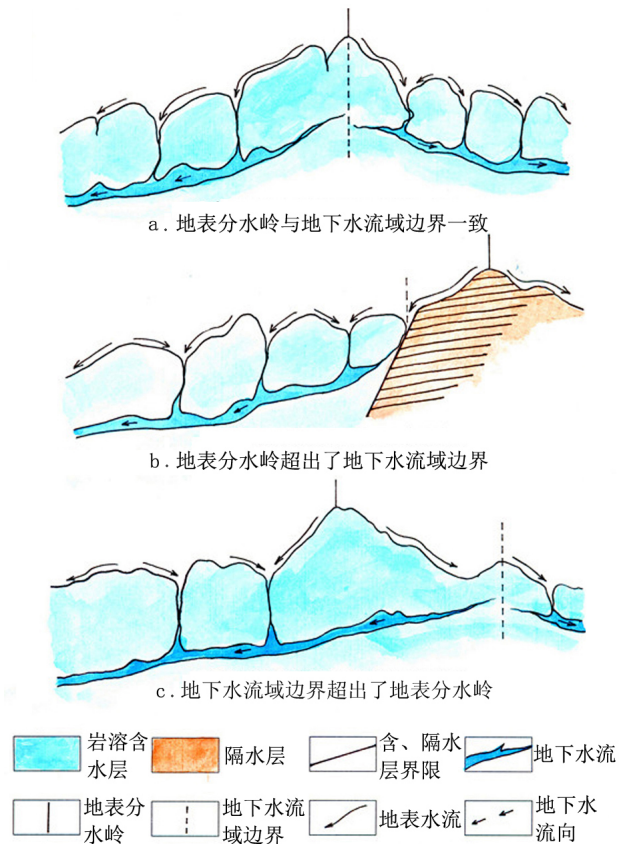


图2 地表水流域与地下水流域边界的分异形式剖面图
Fig. 2 Profile of the differentiation of boundary between surface and groundwater basins

上地下水流域边界较地表分水岭更近于本流域内,在三维空间上二者都是分离的。这种状态一是由于构成地下水流域边界的含水层与隔水层(体)分界面或者阻水构造面位于本流域地表分水岭之内所致;二是本流域地表河流的侵蚀袭夺强度胜过地下河所形成。

(3)地下水流域边界超出了地表分水岭。平面上地表分水岭较地下水流域边界更近于本流域内,在三维空间上二者也都是分离的。这种状态一是由于构成地下水流域边界的含水层与隔水层(体)分界面或者阻水构造面位于本流域地表分水岭之外所致;二是本流域地下河的侵蚀袭夺强度胜过地表河流所形成。

当地下水流域边界为隔水层(体)分界面或者阻水构造面时,地表分水岭与地下水流域边界位置始终是固定的。当地下水流域边界为地下分水岭时,本流域内地下水位因超采、排水而导致大幅下降或因建设水库产生回水、外源调水大量注入而引起大幅上升均可能导致地下分水岭发生位移,在大厚度、近水平大面积展布的含水层条件下,分水岭位置受两侧水位高差变化的影响,往往向水位相对较高的一侧偏移^[13]。

2 含、隔水层的互层结构与界面

在地壳演化的历史进程中,周期性的升降运动造成的沉积旋回,形成了岩溶区垂向上可溶岩与非可溶岩相间互层的间互状结构。由此地质背景决定了地下含水系统的含、隔水层互层结构。在岩溶区,岩溶含水层是透水性和富水性最强的含水层;碎石

类土、砂性土孔隙含水层以及砂岩、砾岩、玄武岩、花岗岩等类硬脆性的碎屑岩或火成岩裂隙含水层,一般情况下富水性可达较弱—中等,为次级含水层,常视为相对隔水层;黏性土及其他柔性岩层或完整岩体是间夹在其中的隔水层。

由于新构造运动的间歇性,使得岩溶发育形成了间断性的分层状态,发育了多级夷平面或溶蚀台面以及缓倾斜的溶洞层,对应着成层分布的岩溶强发育带。在大厚度的碳酸盐岩分布区,多层强岩溶发育带与之间的弱岩溶发育带,也构成了特定的岩溶含水系统含、隔水层的互层结构。例如,滇中高原的抚仙湖、星云湖、杞麓湖分布区,发育五级夷平面及溶蚀台面,分布高程分别为:2 400~2 600 m(I级)、2 200~2 300 m(II级)、2 000~2 100 m(III级)、1 800~1 900 m(IV级)、1 600~1 700 m(V级),第V级与玉溪、华宁等盆地底面的高程相当。相对应的是以成层溶洞为标志的五层岩溶发育带,各层之间被岩溶弱发育带所分隔,仅有少量孤立的垂向或陡倾斜洞管相连。I、II级溶洞抬升位置最高,未见地下河出露;III级溶洞抬升位置较高,偶见地下河出露,成为局部排泄点;IV级溶洞层可见较多沿可溶岩与非可溶岩接触带、山间盆地边缘出露的地下河、大泉;V级溶洞在盆地及河谷中地下河出露多且流量大,例如,玉溪市九龙池暗河流量达728.36~2 735.00 L·s⁻¹,华宁县盘溪大龙潭平均流量达1 880~10 900 L·s⁻¹。各地还可进一步划分较小时间跨度和幅度的岩溶发育分带,例如,曲靖盆地东山边缘,根据野外调查及钻探资料统计分析,该区段可划分出三个不同程度的岩溶发育带(表1)。

表 1 曲靖盆地东山边缘岩溶垂向发育程度分带

Table 1 Vertical karst development degree zoning in Dongshan edge of Qujing basin

垂向分带		指标及特征			地下水动力特征	
岩溶发育分带	代号	下限深度/m	岩溶率/%	钻孔遇洞率/%	岩溶空隙形态	
强	A	60	15.5	77.5	溶洞、暗河发育较多,径流通道以洞管为主干,旁侧树枝状溶隙、垂向溶隙系统发育	洞管快速急变流
中	B	100	5.0	47.5	发育小型洞管、溶隙和密集的蜂窝状溶孔,径流通道主要为脉状溶隙	管隙慢速缓变流
弱	C	150	3.7	15.0	主要发育溶隙、零星溶孔,渗流空隙为溶隙、溶孔	溶隙、溶孔慢速缓变流

对于上述含水层组为可溶岩与非可溶岩互层的情况,岩溶潜水含水层的底界面便是下伏非可溶岩

隔水层(体)的顶面,岩溶承压含水层的顶、底界面即为上覆非可溶岩隔水层的底面和下伏非可溶岩隔水

层(体)的顶面。而大厚度可溶岩分布区,例如,扬子准地台区的二叠系中统栖霞—茅口组(P_1q+m)、华南褶皱系滇东南褶皱带的三叠系中统个旧组(T_2g)分布区,碳酸盐岩组厚达数百至千米以上,含水层组为强岩溶发育带与弱岩溶发育带互层,岩溶潜水含水层的底界面常为弱岩溶化岩层相对隔水层的顶面,岩溶承压含水层的顶界面多为上覆弱岩溶化岩层相对隔水层的底面,而底界面常为弱岩溶化岩层相对隔水层的顶面^[14]。岩溶含水系统含、隔水层的互层结构导致地下水流域底界面出现了多重性,这就需要研究确定在什么情况下、以何种界面作为流域划分的底界面,能够保证以流域为单元的水资源及环境评价结果是准确和完整的,本文后续也将对此进行具体的分析研究。

3 水资源评价单元周围边界划分

以流域为单元进行地表水和地下水资源及环境评价,通过调查测量、勘探试验合理划分流域的平面边界、侧向边界是决定性的关键步骤。流域边界划分不仅要做到科学合理、位置确切,且应针对不同要求,合理处置地表水流域与地下水流域边界的分异问题。

3.1 专门调查(勘查)评价单元的边界划分

为满足社会需求开展的水资源及环境评价工作,主要是针对具体的供水、排水及解决环境问题而实施的专门调查(勘查)评价工作。专门调查(勘查)评价单元的边界划分,就是针对水源地、排水工程、环境保护或治理区块(图1所示勘探区)所处流域的地表水流域与地下水流域边界分异的三种类型,合理确定评价单元边界。

(1)地表分水岭与地下水流域边界在平面分布上基本一致的类型(图2a),地表水和地下水的产流、汇流范围平面上是一致的,以便于识别的地表分水岭确定统一的流域边界、圈定评价单元即可满足要求。

(2)地表分水岭超出了地下水流域边界的类型(图2b),设定图3中的A流域作为本流域,则地下水流域边界至地表分水岭之间,存在一片不重叠的地表产流、汇流区,即图示的①区。此种情形,对于地表水源地的水资源评价,以地表分水岭为评价单元边界圈定的产流、汇流过程是完整的、流域面积是全面的。对地下水源地的水资源评价也应如此,因为

①区产生的地表径流进入本流域地下水流域边界后,也会部分或全部通过落水洞、溶隙、溶管灌入或渗入补给岩溶地下水(图2b)。对于矿坑、隧道、基坑等地下空间开凿的涌水量评价,同样也应以地表分水岭为评价单元边界,才能全面囊括所有可能的充水来源和充分评估最大涌水量。对于水环境影响评价,因为①区产生的地表污染物照样会随着地表径流进入本流域的地表水、地下水中,故也应以地表分水岭为评价单元边界,才能保证评价结果完整、准确,提出的环境保护和治理措施及方案全面、系统、不留缺口。

(3)地下水流域边界超出了地表分水岭的类型(图2c),亦如图3所示,A流域作为本流域,则地表分水岭至地下水流域边界之间,存在一片不重叠的地下产流、汇流区,即图示的②区。对于地表水源地的水资源评价,以地表分水岭为评价单元边界圈定的产流、汇流过程是完整的、流域面积是全面的。但对地下水源地的水资源评价则必须以地下水流域边界为评价单元边界圈定的产流、汇流过程才是完整的、流域面积也才全面,因为②区产生的地下径流并不受地表分水岭限制,是穿越分水岭进入本流域的(图

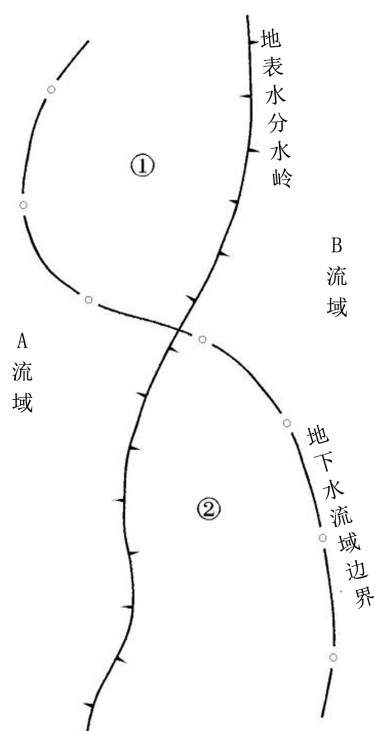


图3 地表水流域与地下水流域边界分异产生的非重叠区
Fig. 3 Boundary differentiation between surface water basin and groundwater basin produces non-overlapping area

2c)。同理,对于矿坑、隧道、基坑等地下空间开凿的涌水量评价,也应以地下水流域边界为评价单元边界。对于水环境影响评价,因为②区产生的地下水污染会随着地下径流进入本流域的地下水中乃至转换到地表水中,故也应以地下水流域边界为评价单元边界。这种边界分异类型产生的环境问题较多,主要原因在于地下水流域边界通过地表观测难以准确确定,而水文地质勘探试验技术难度和经费投入水平都较高。例如,昆明某大型水源地,其是在断陷盆内建设的大型水库,水库汇水区地表分水岭明确,圈闭形态呈长轴近南北向的椭圆状,水源保护区范围即依地表分水岭圈定。水库所处区域地层为碳酸盐岩与碎屑岩和玄武岩相间分布,受断裂和褶皱构造控制,地层走向为北北东向,故分水岭与地层表现为交切的关系,经调查确定有14处分水岭横切或斜交碳酸盐岩地层,其中有6处是地下水流域边界超出了地表分水岭的区段,存在外围岩溶地下水流入保护区内排泄的情况。2016年11月发现库水局部化学需氧量、氨氮、总磷、挥发酚污染现象,经追踪调查发现是因为保护区外农村在多个岩溶洼地内堆积的生活垃圾及腐烂菜叶被降雨淋滤下渗污染地下径流后,通过岩溶泉流传递到库水中。为预防再次出现类似事件,委托专业队伍补充开展了水库地表流域外岩溶地下水影响范围调查和保护区边界调整论证。

3.2 区域调查评价单元的边界划分

基础性的区域水资源及环境评价因无具体的服务对象,因而没有本流域与它流域之别。假若按照上述专门调查(勘查)评价单元的边界划分原则,某单元的边界在存在地表分水岭与地下水流域边界分异的区段,以最外围的地表分水岭或地下水流域边界作为评价单元的边界,则起始单元边界确定之后,接下来相邻单元的边界就只能有相反的选择了。区域水资源及环境评价单元边界的圈定需要不同的原则和方法。

水资源最重要的属性之一,就是可通过自然界的水循环不断得到补充或更新。而水资源的利用价值,也是不断地在水循环的过程当中产生和消亡的。高原地区尤为明显,当雨雪降落到山颠之上而形成径流后,高原面和高原斜坡之上的水源,具有与耕地和人居的距离近,可以就地开发就地供水,输水和水处理投资极少的优势。但随着径流由高向低的运

动,水流所处位置越来越低,利用价值逐渐消失,深切河谷中的江河水源开发成本已是非常昂贵。因此,在对水源地的选择上,人们首先考虑的是尽可能地就高而不就低,而且环境的影响主要也是上游的污染或改变传递影响到下游,反之影响较弱,这就是势能优先准则^[6]。根据这一准则,为了顺应水资源的循环途径和环境影响的趋势,在区域水资源及环境评价中,应由干流向支流、由下游向上游划分评价单元,单元边界分异的区段应以靠近上游的外围地表分水岭或者地下水流域边界圈定评价单元边界,从而避免区域编图时流域划分的混乱及多个流域之间发生重叠。

4 水资源评价单元顶、底边界划分

地表水流域的水面及下垫面即为其顶底边界,这都是明显和便于观测认定的。但地下水流域则因为含水层的多层结构、岩溶发育的成层性、地下水循环的深远而变得复杂多样,需要根据水文地质条件及人类活动影响的强度和深度具体分析确定。地下水径流根据循环周期长短、与大气降水和地表水联系的密切与否、循环深度和流程长短,最基本的可分为浅循环径流和深循环径流两大类^[14]。由于浅循环径流流域开放或半开放,与大气降水、地表水存在密切的联系,具有循环交替快,恢复迅速的可开采资源特性^[15],因此服务于水资源及环境评价,通常考虑的主要是浅循环径流,需要关注的就是浅循环径流带的顶、底边界划分。工程涌水的评价底界则需根据开凿影响深度及影响范围而定,但基本原则和方法是一致的。

4.1 单元顶界的划分

浅循环径流流域主要以地表河流、湖泊为排泄基准,循环深度浅、流程较短,循环周期同步于一个水文年,受降水的季节变化影响明显。故含水层主要是开放或半开放的裸露型潜水含水层、裸露—覆盖型或裸露—埋藏型的潜水—承压含水层^[16],也主要是地表以下的第一个岩溶含水系统。浅循环径流流域的顶界便是地表水流域的下垫面。

4.2 单元底界的划分

地下水流域的顶界对于进行地表水与地下水资源及环境统一评价的岩溶流域而言,只是岩溶流域

水文网双层结构系统内部的子系统边界,而地下水流域的底界却是整个流域的底部边界,也是最为隐蔽和复杂的水文地质界面,需要更加认真地对待。

依据岩溶区地下水系统的结构面类型及特征,对于层状结构的含水层系统,通常以地面以下浅循

环的潜水含水层或潜水—承压含水层之下的隔水层顶面为底界划分水资源及环境评价单元底界是既明确合理又便于勘探控制的。例如,昆明地区岩溶含水系统的层状结构较为稳定(表2),普遍采取这样的方式确定评价单元底界。

表2 昆明地区含(隔)水层钻探综合成果表

Table 2 Comprehensive drilling results of water-bearing (isolated) aquifer in Kunming area

系	地层系统		代号	钻孔铅直厚度/m		含水层类型	富水性等级
	统	组		区间值	平均值		
二叠系	中统	茅口组	P_2m	69.8 ~ 148.8	105.1	碳酸盐岩岩溶含水层	较强—强
		栖霞组	P_2q	98.6 ~ 142.9	113.2		
	下统	倒石头组	P_1d	1.8 ~ 98.8	13.4	碎屑岩隔水层	弱
石炭系	中统	威宁组	C_2w	38.1 ~ 166.2	76.7	碳酸盐岩岩溶含水层	中等—较强
	下统	上司组	C_1d	16.3 ~ 139.6	79.0		
		万寿山组	C_1w	0.6 ~ 28.1	8.5	碎屑岩隔水层	弱
泥盆系	上统	宰格组	D_3zg	18.5 ~ 133.3	73.4	碳酸盐岩岩溶含水层	中等—较强
	中统	海口组	D_2h	11.5 ~ 107.2	35.3	碎屑岩相对隔水层	较弱—中等
寒武系	中统	双龙潭组	ϵ_2s	35.8 ~ 66.8	48.8	碳碎互层岩溶含水层	中等
		陡坡寺组	ϵ_2d	12.2 ~ 132.5	59.0	碎屑岩隔水层	弱
	下统	龙王庙组	ϵ_1l	17.8 ~ 334.0	116.6	碳酸盐岩岩溶含水层	较强
		沧浪铺组	ϵ_1c	62.7 ~ 331.8	187.8	碎屑岩相对隔水层	较弱—中等
		筇竹寺组	ϵ_1q	40.0 ~ 601.8	264.1	碎屑岩隔水层	弱
震旦系	上统	灯影组	Z_2dn	202.2 ~ 561.6	337.0	碳酸盐岩岩溶含水层	较强—强
		陡山沱组	Z_2d	25.6 ~ 83.2	54.4	碎屑岩相对隔水层	较弱—中等

但在大厚度碳酸盐岩分布区,有时地下水资源的开采影响深度或工程排水影响深度不至于达到整个岩溶含水层的底界,从经济技术的合理性考虑,实践中常根据岩溶发育的成层性特征,通过钻探岩芯的岩溶率统计,结合孔间物探剖面及抽水或压水试验资料,划分岩溶发育强度分带,以弱岩溶发育带的顶面作为评价单元的底界。对于供水水资源评价,常用的划分标准为:钻孔岩芯统计岩溶率 $>10\%$ 的段为强岩溶发育带,岩溶率为 $10\% \sim 5\%$ 的段为中等岩溶发育带,岩溶率 $<5\%$ 的段为弱岩溶发育带。而对于地下开凿空间的涌水量计算,又多以岩溶率 $<3\%$ 的标准划分弱岩溶发育带。例如,滇池流域东侧的呈贡吴家营水源地供水详查,经钻探、抽水试验及物探

成果分析,分区划分了岩溶发育垂向分带(表3),以弱岩溶发育带的顶面作为评价单元的底界进行了水资源计算与评价^[17]。总结勘查实践经验,进行岩溶发育强度分带,勘探孔应视情况以控制性构造走向或流域主流向为坐标布置为纵、横剖面,采用连续取芯钻进,通过岩芯的岩溶率测量统计,结合钻探编录的孔内水位、冲洗液消耗、钻进速度、掉钻、空洞充填情况等信息,综合分析划分岩溶发育垂向分带是最基本和直观的方法。如果条件允许,应尽可能增加钻孔分段压水(注水)或抽水试验、井下电视观测、综合物探测井、物探剖面或跨孔物探测量等勘探试验工作,使岩溶发育强度分带划分依据更充分、结果更准确,以此作为地下水流域的底部边界也更加可靠。

表 3 呈贡吴家营水源地岩溶发育垂向分带特征

Table 3 Features of vertical zoning of karst development in Chenggong Wujiaying water source area

分区	岩溶发育分带	碳酸盐岩顶板埋深/m	岩溶发育分带底界埋深/m	岩溶发育特征			岩溶水位埋深/m			
				岩芯体积岩溶率/%	溶洞发育段/m	溶洞高度/m		充填情况		
大新册 吴家营	强	5.0~145.0	251.0	21.12	67.18~158.25	0.20~7.50	黏土充填 2.87~17.85			
	中		283.0	5.61						
	弱		314.5	3.37						
吴家营 中庄	强	27.55~92.84	219.0	16.92	31.39~145.04	4.80~8.98	黏土、砂砾充填 24.33~34.24			
	中		238.0	8.40						
	弱		256.7	2.83						
中庄 雨花	强	8.55~42.70	185.1	21.19	20.50~167.63	0.50~2.63	黏土充填,部分无充填 黏土、砂及少量碎石充填			
	中		245.0	8.95				229.47~237.63	4.13~15.72	1.54~33.76
	弱		253.2	3.00						
雨花 小海晏	强	5.0~68.75	85.0	15.00			0~0.97			
	中		153.0	8.20						
	弱		184.3	4.63						

5 结 论

(1)岩溶地区地表水流域与地下水流域边界的分异形式有三类:第一类型为地表分水岭与地下水流域边界在平面分布上基本一致;第二类型为地表分水岭超出了地下水流域边界;第三类型为地下水流域边界超出了地表分水岭。

(2)岩溶区地表水与地下水耦合流域的顶界为地表水流域的水面及下垫面,底界为浅循环潜水含水层或潜水一承压含水层下伏的隔水层顶面,在大厚度岩溶含水层分布区,可以弱岩溶发育带的顶面作为底界。其中地表水与地下水两个子系统间的次级边界,为地表水流域的下垫面。

(3)专门调查(勘查)评价单元的边界划分,第一类型以地表分水岭为边界;第二类型也以地表分水岭为界;第三类型则以地下水流域边界为界。

(4)区域调查评价应由干流向支流、由下游向上游划分评价单元,以最靠近上游的外围地表分水岭或地下水流域边界圈定评价单元边界。

(5)通常以地面以下浅循环的潜水含水层或潜水一承压含水层下伏的隔水层顶面为评价单元的底界。大厚度岩溶含水层分布区则以弱岩溶发育带顶面作为评价单元底界较为合理。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准.水文基本术语和符号标准(GB/T50095-98)[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [2] 杨明德,谭明,梁虹.喀斯特流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,1998.
- [3] 陈梦熊,刘成琦,陈昌礼,等.地下水资源图编图方法指南[M].北京:地质出版社,2001.
- [4] 中华人民共和国国家标准.供水水文地质勘察规范(GB50027-2001)[S].北京:中国计划出版社,2001.
- [5] SL/Z322-2005.建设项目水资源论证导则(试行)[S].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [6] 王宇.云南泸西小江流域岩溶水有效开发模式研究[D].昆明:昆明理工大学,2006.
- [7] 周善生,马学尼,叶镇国,等.水文学[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [8] 张卓元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1981.
- [9] 杨明德.论贵州岩溶水赋存规律的地貌规律性[J].中国岩溶,1982,1(2):81-90.
- [10] 沈照理,刘光亚,杨成田,等.水文地质学[M].北京:地质出版社,1985.
- [11] Engelen G B, Jones G P. Developments in the analysis of groundwater flow systems[M].IAHS Publication,1986.
- [12] 吴乔枫,刘曙光,蔡奕,等.流域非闭合特性对岩溶地区水文过程模拟的影响[J].水利学报,2017,48(4):457-466.
- [13] 胡强,肖先焯,袁文杰,等.入渗时地下水位变动下的分水岭移动规律[J].实验室研究与探索,2017,36(2):14-17.
- [14] 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.
- [15] 王宇. 裂隙含水层的储存调节功能评价[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2010,35(1):29-32.
- [16] 彭淑惠,王宇,张贵,等. 昆明盆地土地利用对岩溶水质的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(6):1-7.
- [17] 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.

Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas

WANG Yu^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract There are three types of boundary differentiation between surface water basins and groundwater basins in karst areas, that is, the surface watershed and groundwater basin boundary are basically the same in plane distribution; surface watersheds extend beyond the boundaries of groundwater basins. The boundaries of groundwater basins extend beyond surface watersheds. The top boundary of surface water and groundwater coupling basin in karst area is the surface and underlying surface of surface water basin, and the bottom boundary is the top surface of shallow circulating groundwater aquifer or aquifer between aquifer and confined aquifer. In the karst aquifer distribution area with large thickness, the top surface of weak karst development zone can be regarded as the bottom boundary. The secondary boundary between the two sub-systems of surface water and groundwater is the underlying surface of the surface water basin. Combined with the characteristics of specialized (investigation) exploration and regional investigation evaluation, the principle and method of evaluation unit division are put forward. In the new round of natural resources investigation and evaluation, it is helpful to systematically carry out the investigation and evaluation of water resources and environment with watershed as a unit, and implement the unified management of surface water and groundwater resources and environment.

Key words water resources, environment, surface water, groundwater, watershed boundaries, runoff system

(编辑 吴华英 黄晨晖)