

西南岩溶山区地下水资源承载能力评价 ——以贵州省七星关区为例

唐佐其¹, 李瑞敏², 谯文浪³, 殷志强², 刘 琼², 陈 武¹, 赵德刚⁴
TANG Zuoqi¹, LI Ruimin², QIAO Wenlang³, YIN Zhiqiang², LIU Qiong², CHEN Wu¹,
ZHAO Degang⁴

1. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 贵州省地矿局 102 地质大队, 贵州 遵义 563000;

4. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050011

1. Guizhou Geological Survey, Guiyang 550081, Guizhou, China;

2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China;

3. No.102 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zunyi 563000, Guizhou, China;

4. Institute of Geological Environment Monitoring of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, Hebei, China

摘要:以国家扶贫攻坚重点地区——贵州乌蒙山七星关区为例,参考“全国地质资源环境承载能力评价与监测预警”形成的评价理论和方法,结合岩溶石山区地下水资源水文地质条件及开发利用实际,探索构建岩溶石山区县域范围内地下水资源承载能力评价方法。通过系统评价七星关区地下水资源承载能力,认为该区地下水资源承载能力较大,但资源、开采强度、劣质水分布不均,降低了部分区域地下水资源承载能力。评价结果为区域国土空间规划及“三区三线”划定提供了依据。同时,该评价方法亦为岩溶地区地下水资源承载能力评价提供了借鉴。

关键词:地下水资源;承载能力;岩溶山区;七星关区

中图分类号:P642.25;P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)01-0124-07

Tang Z Q, Li R M, Qiao W L, Yin Z Q, Liu Q, Chen W, Zhao D G. A study of the environmental carrying capacity of groundwater resources in Southwest karst mountain areas: A case study of Qixingguan District of Guizhou Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 124–130

Abstract: Exemplified by the national poverty alleviation crucial area of Qixingguan District in Wumengshan of Guizhou Province, referring to the evaluation theory and method for “national geological resources and environment carrying capacity evaluation and monitoring and early warning”, and combined with the hydrogeological conditions of groundwater resources of the karst mountain area and the practical development and utilization situation, the authors explored the construction of water resources carrying capacity

收稿日期:2019-04-11; **修订日期:**2019-08-10

资助项目:中国地质调查局项目《全国地质资源环境承载能力评价与监测预警》(编号:DD20160328)、《乌蒙山典型地区资源环境承载力评价试点》(编号:12120115051401)、《乌蒙山连片贫困缺水区 1:5 万水文地质调查》(编号:DD20160285)和贵州省科技厅科研项目《毕节市白甫河流域水资源承载力研究》、贵州省地矿局科研项目《贵州独山地区“张家界地貌”地质景观成因研究》(编号:黔地矿科合[2017]29号)、《威宁草海一带生态地质调查与资源环境承载能力评价》(编号:黔地矿科合[2019]25号)

作者简介:唐佐其(1987-),男,硕士,高级工程师,从事地质资源环境承载能力、城市地质调查研究。E-mail: tangxing369264034@qq.com

通讯作者:李瑞敏(1964-),女,博士,教授级高工,从事地质资源环境承载能力研究工作。E-mail: lirm@mail.sigem.gov.cn

evaluation method for counties in the karst mountain area. The carrying capacity of groundwater resources in Qixingguan area was systematically evaluated, and it is concluded that the carry capacity of groundwater resources in this area is relatively large, but the uneven distribution of inferior water and resource exploitation intensity reduce the carrying capacity of groundwater resources in some places. The evaluation results provide the basis for regional land space planning and "three districts and three lines" designation. At the same time, the evaluation method also provides reference for the evaluation of carrying capacity of groundwater resources in karst areas.

Key words: ground-water resource; carrying capacity; karst mountain area; Qixingguan District

资源环境承载能力关系到地区乃至国家综合实力的提升,对调整产业结构、发展经济社会具有举足轻重的意义,党的十八大提出“建立资源环境承载力监测预警机制”,充分体现了国家重视生态文明建设,寻求资源环境禀赋与经济社会统一协调发展的决心。地质资源环境承载能力指在一定时期和空间内,维系自然资源环境系统稳定或向良性发展,地质资源禀赋和环境容量所承载的人类各种经济社会活动的能力^①。近年来,国内外学者在资源环境承载能力方面做了大量研究,建立了各有侧重的评价理论与方法体系^[1-5]。针对水资源承载力研究,在基本内涵、概念、研究方法上都取得了重要进展^[6-10],地下水资源作为水资源的重要组成部分,其承载力研究是在中国水资源承载力研究的基础上发展起来的^[11]。地下水资源承载能力是在一定时期和技术水平下,在保障地下水系统的资源、生态环境功能稳定且良性发展的前提下,评价区域地下水系统支撑当地各种经济社会活动的的能力^③。学者们在岩溶地区开展过地下水资源承载力研究^[12-13],主要以地市为基本评价单元,以贵州省为例对岩溶地区地下水资源承载力进行了方法探索,认为人口、经济发展、地下水资源量、岩溶区面积与地下水资源承载力具有一定关系。然而,针对该类型区县域范围内地下水资源承载能力评价讨论较少,在评价时对岩溶山区特殊的地质环境条件、水资源开发利用实际情况考虑不足,导致上述评价方法难以应用于县域范围地下水资源承载能力评价。本文以贵州乌蒙山区近年开展的水文地质环境地质调查成果为依据,在参考“全国地质资源环境承载能力评价与监测预警”地调项目形成的地质资源环境承载能力评价理论和方法的基础上,以毕节市七星关区为例,探讨构建典型岩溶山区县域范围内的地下水资源承载能力评价方法,为该区国土空间规划及“三区三线”划定提供了依据,为类似岩溶地区地下水资源承载能力评价提供借鉴。

1 区域地质环境及社会经济背景

贵州乌蒙山区为典型的岩溶山区,是国家级扶贫重点工作区,区内地质环境条件脆弱——缺水少土、旱涝频繁、石漠化严峻、环境容量低。岩溶地区特殊的双层空间结构导致的水资源时空分布不均且开发困难,已成为制约区域经济与生态环境发展的瓶颈,严重影响了农村脱贫工作。研究区毕节市七星关区位于贵州乌蒙山腹地,为川滇黔渝四省市结合部,是毕节市的政治、经济、文化及交通物流中心,面积 3412.2 km²。区内出露寒武纪—侏罗纪地层,碳酸盐岩地层组广泛分布且沉积厚度巨大,碳酸盐岩岩溶含水岩组分布总面积达 2916.4 km²,占总面积的 85.5%^④;地形地貌处滇东高原向黔中山原丘陵过渡的斜坡地带,为典型的岩溶山区地貌;气候属亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 954 mm。截止 2013 年底,七星关区年末总人口数为 154.9 万人,其中农业人口 136.4 万人;全区国内生产总值 219.4 亿元,三产比例 16:39:45。

研究区水文地质调查程度较高,完成了 1:5 万精度调查面积达 2904.5 km²,占行政区总面积的 85.1%^{⑤⑥⑦⑧⑨}。调查评价水点 1500 余处,枯季资源量约为 5.6×10⁴ m³/d;供水人口数大于 500 人的地下水水源点 174 处,资源量达 1.9×10⁴ m³/d;水文钻孔成井 98 口,建议开采量 2.7×10⁴ m³/d。县域内可供利用地下水资源量较为丰富,但区内地下水分布不均、开发成本高、开采难度大等工程性缺水现象严峻。按照毕节市农村饮水安全用水情况需求统计,评价区农村缺水人数达 27.6 万人,人口净需水量 2.3×10⁴ m³/d,毛需水量达 2.7×10⁴ m³/d。

2 评价单元划分

为细化县域范围内地下水资源承载本底评价,划分出评价区地下水系统作为地下水资源承载能力评价的自然单元。地下水系统主要依据地下水

的补、径、排条件划分。岩溶山区地下水的补、径、排受地质构造的控制,也受地表水文网的制约。经资料整理分析,划分出了 56 个分散排泄系统、18 个地下河系统及 18 个富水块段,共计 92 个自然单元(图 1)。此外,为方便应用,将城区(算作城关镇)及各乡镇作为状态评价单元,按照各乡镇界划分 36 个行政单元。

3 地下水资源承载能力评价

3.1 评价指标选取

按照地质资源环境承载能力评价方法体系,将区域地下水资源特征、地下水水源地、矿泉水资源作为地下水资源承载能力的 3 类主要评价因子,分别从承载本底和承载状态 2 个方面来构建评价指标体系。岩溶山区地下水资源承载能力研究需以保持岩溶区生态环境可持续发展为准绳,因此,在评价时需充分考虑生态用水、水环境条件。此外,结合本区地下水分布不均造成开发成本高、开采难度大的现状,开发利用条件、供给对象条件等因素也需充分考虑。最终,构建岩溶山区地下水资源承载能力评价指标体系如表 1 所示。本底评价用允许开采资源模数、资源保障程度作为区域评价指标,地下

表 1 岩溶山区地下水资源承载能力评价指标

Table 1 Evaluation index of carrying capacity of groundwater resources in karst mountain areas

评价因子	评价指标	
	本底评价	状态评价
区域地下水资源	允许开采资源模数	开采程度
	资源保证程度	缺水程度
地下水水源地	允许开采资源量	开发利用程度
矿泉水资源	矿泉水资源量	矿泉水矿权状态

水水源地允许开采资源量、矿泉水资源量作为单点评价指标,反映地下水资源禀赋;状态评价采用地下水开采程度、缺水程度等指标反映地下水资源开发利用现状。

允许开采资源模数指单位面积上的地下水允许开采资源量;针对岩溶山区实际,地下水允许开采资源量为利用枯季径流模数计算出的地下水可开采资源量,去除生态用水、劣质水等能获取的允许被开采的资源量。针对岩溶区工作实际,允许开采资源模数适当考虑地下水开发利用难易程度,主要考虑区域地下水埋深,天然水点密度、资源量、可利用性,开采井密度、资源量、可利用性及相关地下

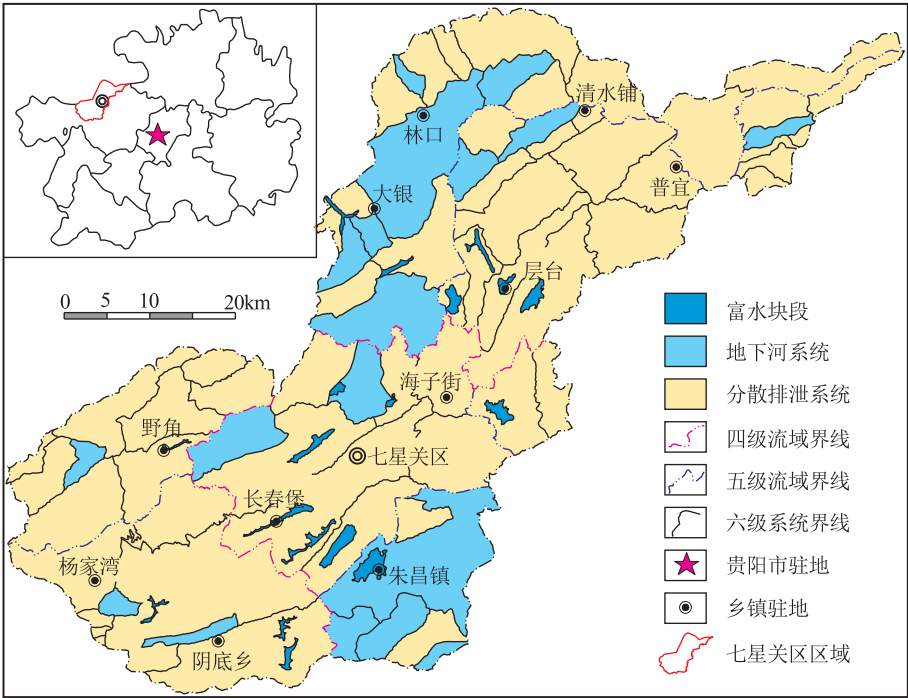


图 1 七星关区地下水系统

Fig. 1 Groundwater system of Qixingguan District

水开发利用工程建设等因素,根据评价区实际进行调整得出允许开采资源量。允许开采资源模数计算公式:

$$M_e = \frac{Q_e}{S} \tag{1}$$

式中: M_e 表示允许开采资源模数($10^4\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$); Q_e 为允许开采资源量($10^4\text{m}^3/\text{a}$); S 表示评价单元面积(km^2)。

资源保证程度指评价单元内地下水允许开采资源量与 95%降雨保证率天然补给资源量比值,比值越高说明保证率越低。

地下水开采程度指地下水开发利用量与地下水允许开采资源量之比;岩溶山区地下水开采以天然水点为主,井采为辅,除有准确资料支撑开发利用量外,评价单元地下水开发利用量主要以开发利用人口、牲畜、灌溉、工业用水定额进行计算^⑩。公式:

$$r_u = \frac{Q_u}{Q_e} \times 100 \tag{2}$$

式中: r_u 表示开采程度(%); Q_e 表示允许开采资源量(m^3/a); Q_u 表示开发利用量(m^3/a)。

缺水程度:为评价单元内各因素引起的缺水总量与区内地下水需求总量比值,比值越高说明缺水程度越强烈;缺水总量指一定时期内人口、牲畜、灌溉、工业等的缺水总量,主要依据地方水务局统计数据获得。

3.2 指标阈值验算

利用评价区最新水文地质资料,专家会商确定

水文地质参数,在此基础上开展承载力评价指标参数计算。依据岩溶山区实际,本次生态用水系数依据植被、评价单元水文系统特征等因素取 0.50~0.67,降雨量采用近 20 年区域数据计算 95%保障率,降雨量为 604.9mm,劣质水为已有地下水水质达Ⅳ、Ⅴ类水枯季资源量,缺水总量依据地方水务局提供的缺水统计数据得出,对于地下水资源量计算方法主要有大气降雨入渗系数法、地下(枯季)径流模数法、枯季泉流量汇总法等。

研究区 95%降雨量保障率地下水天然补给资源量 $6.05 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,采用枯季径流模数法算出可开采资源量为 $4.21 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,考虑到生态用水、劣质水、开发利用难易程度等因素其允许开采量为 $2.75 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。按照前述对评价单元的划分,自然单元允许开采资源模数为 $0.42 \sim 12.87 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$,资源保障程度为 4.86%~60.90%。行政单元地下水允许开采资源模数 $3.71 \sim 11.54 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$ 、资源保障程度 29.73%~52.07%、开采强度为 6.35%~40.59%、缺水程度为 8.0%~33.7%。据现有调查资料显示,供水人口数大于 500 人的地下水源地共计 174 处,其允许开采资源总量为 $7517.54 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,开采利用量为 $741.40 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,普宜镇境内有一处天然饮用矿泉水,资源储量为 $6.94 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a}$,现阶段未开发利用。

经多次验算,并参照近年完成的区域资源环境承载力评价结果,对本底及状态指标划分出区间并赋予相应指标取值^{⑪⑫}(表 2)。

表 2 评价指标区间及赋值
Table 2 Evaluation index interval and valuation table

指标分类	评价指标	指标区间及赋值				
		5	4	3	2	1
本底指标	指标取值					
	允许开采资源模数/($10^4\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$)	≥ 10	[7.5, 10)	[3.5, 7.5)	[2, 3.5)	<2
	资源保障程度/%	<50	[50, 60)	[60, 70)	[70, 80)	>80
	水源地允许资源量/($10^4\text{m}^3/\text{a}$)	≥ 30	[20, 30)	[10, 20)	[5, 10)	<5
状态指标	矿泉水资源量/($10^4\text{m}^3/\text{a}$)	≥ 30	[20, 30)	[10, 20)	[5, 10)	<5
	指标取值		5	3		1
	开采程度/%		[0, 30)	[30, 50)		≥ 50
	缺水程度/%		[0, 30)	[30, 50)		≥ 50
	水源地开发利用程度/%		[0, 30)	[30, 50)		≥ 50
	矿泉水矿泉水状态		未占用	—		已占用

3.3 地下水资源承载能力评价方法

区域性地下水资源承载能力运用专家会商及层次分析法(AHP)确定各指标体系比重,承载本底采用公式 $I_{\text{本底}} = 0.8 \times I_{\text{允许开采资源模数}} + 0.2 \times I_{\text{资源保障程度}}$ 计算,根据结果划分为(4,5],(3,4],(2.2,3],(1.5,2.2],[0,1.5],分别对应承载能力本底高、较高、中、较低、更低5个等级。承载状态则采用 $I_{\text{状态}} = 0.7 \times I_{\text{开采程度}} + 0.3 \times I_{\text{缺水程度}}$ 计算,根据结果划分(3.5,5],(1.5,3.5],[0,1.5]为盈余、均衡、超载3个等级。

针对地下水水源地、矿泉水资源等非均一性指标,采用对单点进行评价,按照阈值范围将承载本底划分为5个等级,承载状态划分为3个等级。

按上述方法得出各单元及各评价点承载本底及状态,最终按照判断矩阵进行承载能力评价(表3)。利用评价结果适当考虑地表水、外地调水、水利设施供用情况等因素对评价结果作出合理研判。

3.4 评价结果

按照前述指标体系及阈值范围可知,区内大银、林口、对坡等6个乡镇承载本底高,朱昌、岔河、长春堡等18个乡镇承载本底为较高,鸭池、燕子口、放珠等11个乡镇承载本底为中,南东梨树镇则为较低级(图2-a)。承载状态为盈余级为朱昌、大银、林口等15个乡镇;均衡级的为鸭池、田坝、对坡等20个乡镇;超载级的为梨树镇(图2-c)。已知的174处地下水水源地,有86处呈超载状态、21处呈均衡状态、67处呈盈余状态。由此可见,七星关区地下水资源总体较丰富、开发利用潜力大,但资源分布不均、开发利用率高、工程性缺水突出等造成局部承载状态呈超载。

根据地下水承载本底和状态评价结果,得出七星关区地下水资源承载能力评价结果(图2-b)。地下水资源承载能力大的区域有朱昌、大银、林口等13个乡镇;承载能力较大的有田坝、对坡、生机、何

官屯等15个乡镇;承载能力中等的有鸭池、燕子口、放珠等7个乡镇;承载能力小的区域为梨树镇。

另一方面,区内地下水水源地承载能力大的有36处、较大24处、中等13处、较小14处、小87处。

本次评价的主要思路及技术方法与自然资源部现行技术要求基本一致,在岩溶区使用允许开采资源模数、水源地允许开采资源量作为基础本底,强调了岩溶区生态用水、劣质水、开发利用难易程度等因素影响;状态评价中引入并定义了缺水程度等细致指标;经评价验算及野外核实情况看^{①②},其评价成果更符合县域实际。

由此可见,七星关区地下水资源承载能力总体较强,其地下水允许开采资源量、资源保障程度均较高,地下水水源点数量多、资源量大,但分布不均;人口及产业布局的不均一性导致区内地下水开采强度较悬殊,同时岩溶山区工程性缺水凸显,原生劣质水及受污染水质未能有效节制,使区域性地下水承载能力减弱。区域国土空间规划及“三区三线”划定应充分考虑区内地下水资源承载能力条件,在产业布局方面应对水依赖程度较高的产业布局在县域北西长春堡至田坝桥一带,同时需进一步防治朱昌—鸭池—梨树一带的水环境污染问题,提升该区域内地下水资源承载本底。

4 结 论

(1)确立了岩溶石山区市县级地下水资源承载能力评价本底及状态指标体系,包含了区域地下水资源、地下水水源地、矿泉水资源评价,经反复验算确立指标阈值范围,为岩溶山区地下水资源承载能力评价提供借鉴。

(2)评价指标使用允许开采资源模数、水源地允许开采资源量、缺水程度等,强调了岩溶区生态用水、劣质水、开发利用难易程度等因素影响,评价成果更符合县域实际。

(3)开展了七星关区地下水资源承载能力评价试点,总体地下水资源承载能力较大,但资源分布、开采强度、劣质水分布不均一降低了部分区域地下水资源承载能力。

(4)结合本次评价,为国土空间规划及产业布局提供基础地质依据,宜结合地下水资源承载能力合理部署需水型产业至县域北西长春堡至田坝桥一带,同时需进一步防治朱昌—鸭池—梨树一带的水

表3 地下水资源承载能力等级

Table 3 Carrying capacity grade of groundwater resources

承载能力等级		承载本底等级				
		高	较高	中	较低	低
承载状态等级	盈余	大	大	较大	中	较小
	均衡	大	较大	中	较小	小
	超载	较大	中	较小	小	小

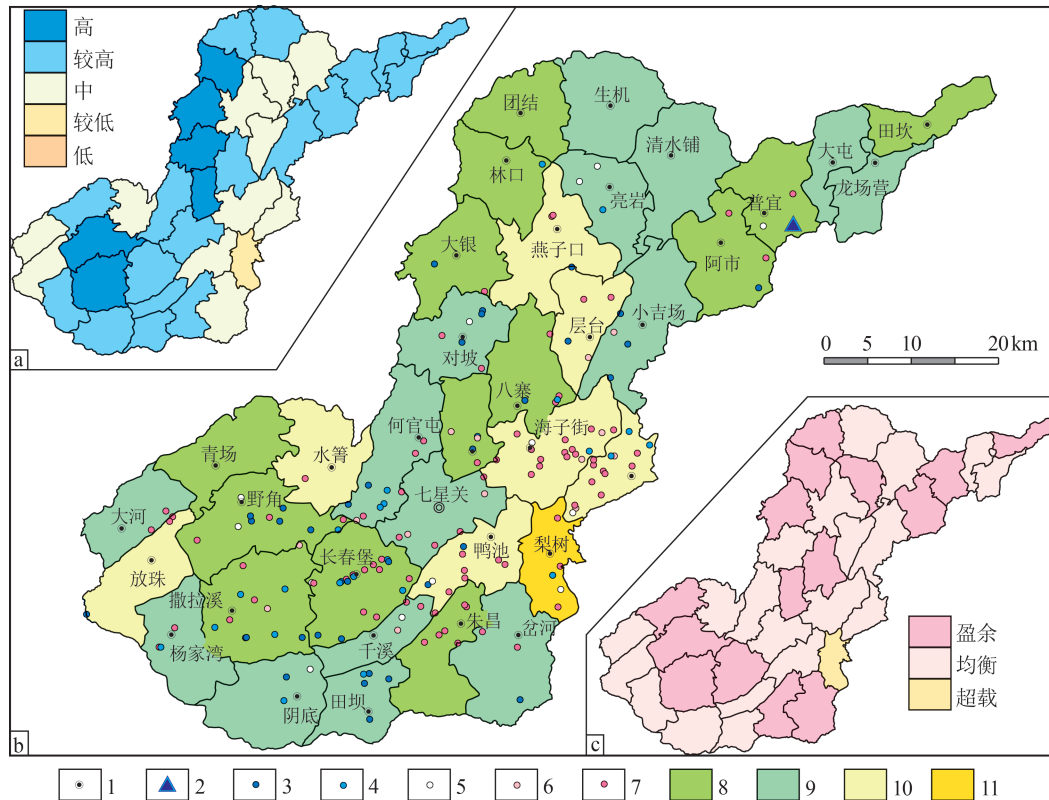


图2 七星关区地下水资源环境承载能力评价成果图

Fig. 2 Evaluation results of environmental carrying capacity of groundwater resources in Qixingguan District

a—承载本底评价图;b—承载能力评价图;c—承载状态评价图。1—乡镇驻地;2—矿泉水点;3—水源点承载能力大;4—水源点承载能力较大;5—水源点承载能力中;6—水源点承载能力较小;7—水源点承载能力小;8—区域承载能力大;9—区域承载能力较大;10—区域承载能力中;11—区域承载能力小

环境污染问题,提升该区域地下水资源承载本底。

致谢:成文过程中得到贵州省地质调查院陈革平研究员、华兴高级工程师及乌蒙山典型地区资源环境承载力评价项目组的指导和帮助,审稿专家提出了具体的修改意见,在此致以衷心的感谢。

参考文献

- [1] 周洪, 古树忠, 姚予龙. 区域资源承载力的测算与规划——以贵州省毕节市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(1): 58-64.
- [2] 秦如培, 张绍辉. 基于生态足迹的毕节试验区生态承载力动态分析[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(1): 86-91.
- [3] 李瑞敏, 鞠建华, 王铁, 等. 地质环境问题的地质指标体系框架及其构建方法[J]. 地质通报, 2011, 30(11): 1738-1743.
- [4] 石开国. 新时期西南喀斯特地区资源的开发利用与可持续发展——以毕节试验区为例[J]. 贵州师范大学学报(社会科学版), 2010, 27(2): 67-71.
- [5] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
- [6] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等. 水资源承载力理论基础探析: 定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409.
- [7] 杨志远, 杨建, 杨秀春. 典型喀斯特城市水资源利用与经济发展关系分析——以铜仁市为例[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 105-113.
- [8] 何仁伟, 刘邵权, 刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1376-1382.
- [9] 罗为群, 蒋忠诚, 曹建华. 西南岩溶石漠化区水资源承载力研究——以贵州省清镇市为例[J]. 中国水土保持, 2009, 1: 27-30.
- [10] Li R M, Yin Z Q, Wang Y, et al. Geological Resources and Environmental Carrying Capacity Evaluation Review, Theory and Practice in China[J]. China Geology, 2018, 1(4): 556-565.
- [11] 殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 等. 地质资源环境承载力研究进展与发展方向[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1103-1115.
- [12] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 喀斯特地区地下水资源承载力综合评价研究——以贵州省为例[J]. 水文, 2010, 30(3): 22-27.
- [13] 周涛, 梁虹, 焦树林, 等. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区地下水资源承载力评价[J]. 水科学与工程, 2016, 4: 16-19.

①李瑞敏, 孟晖. 市县地质资源环境承载力评价技术要求. 自然资源部.

- ②李瑞敏,李小磊.全国地质资源环境承载能力评价与监测预警年度成果报告.中国地质环境监测院,2017.
- ③李瑞敏,孟晖.国土资源环境承载力评价技术要求(试行)(地质部分).国土资源部,2016.
- ④王明章,陈革平,杨秀忠,等.贵州岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告.贵阳:贵州省地质调查院,2003: 105-255.
- ⑤段竹,邹银先,等.贵州省岩溶泉及地下河枯季测流总结报告.贵阳:贵州省地质矿产勘查开发局,2012: 10-35.
- ⑥王伟,张林,杨建华,等.贵州重点岩溶流域水文地质与环境地质调查报告——白甫河、野纪河岩溶流域.贵阳:贵州省地质调查院,2009: 46-254.
- ⑦唐建生,李兆林,李庆松,等.贵州重点地区岩溶流域水文地质及环境地质调查报告——六冲河流域.桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2009: 122-144.
- ⑧陈革平,华兴,白平,等.乌蒙山区(贵州)水文地质环境地质调查(毕节县幅、响水幅)报告.贵阳:贵州省地质调查院,2009: 60-186.
- ⑨潘晓东,曾洁,任坤,等.乌蒙山连片贫困缺水1:5万水文地质调查评价报告.桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2019.
- ⑩黄秋强,商崇菊,马荣宇,等.贵州省行业用水定额.贵阳:贵州省质量技术监督局,2011.
- ⑪陈武,谯文浪,唐佐其,等.毕节市七星关区地质资源环境承载力评价成果报告.贵阳:贵州省地质调查院,2017: 36-68.
- ⑫陈武,唐佐其,付勇,等.乌蒙山地区试点市县国土空间规划建议成果报告.贵阳:贵州省地质调查院,2018: 28-71.