

岩溶地区水资源—环境系统服务功能评价修正 ——以贵州省为例^{*1}

杨振华¹ 宋小庆² 屈秋楠² 苏维词^{1, 3*} 吴克华¹

(1. 贵州省山地资源研究所, 贵州贵阳 550001;

2. 贵州地质工程勘察设计院, 贵州贵阳 550081;

3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400047)

【摘要】:常规水资源—环境系统服务功能评价系数既不能反映“二元三维”水文地质状况,也忽略了水环境状况对服务功能的影响,导致评价结果与实际存在较大偏差。故结合岩溶发育强度和水环境特征确定服务功能价值修正系数,并对贵州省的服务功能评价结果进行修正。结果表明:(1)贵州省水资源—环境系统服务功能以水文调蓄与水力航运、环境调节与净化为主,两者价值量分别为 789.22×10^8 元和 742.66×10^8 元,两者共占全省价值总量的 69.48%;(2)水资源—环境系统的服务功能价值量主要取决于区域对水资源量的供需条件、水域面积及水域旅游景观开发,且区域对水资源—环境系统的利用率越高,则价值量就越大,其最大值为贵阳市,达 292.65×10^8 元,最小值为毕节市,仅 74.35×10^8 元;(3)修正系数分为水量型、水质型和复合型,其平均值分别为 0.81、0.86 和 0.84,与各地州水循环特征、水环境质量基本吻合。上述表明,利用岩溶发育强度和水环境因子为依据的修正系数对评价结果进行修正,不仅突显出岩溶发育特征对水资源—环境系统服务功能的影响,也使评价结果更加符合实际水生态环境状况。

【关键词】:水资源—环境系统;服务功能;评价;修正

【中图分类号】:F062.2 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2018)06-1259-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806009

岩溶地区“二元三维”^[1]水循环结构(地表裂隙、竖井、落水洞与地下暗河形成的联通网络),严重影响着水资源—环境系统的服务功能,其具体表现为:岩溶孔裂隙促使地表水快速转化成地下水,地表水资源漏失严重,导致水资源对社会、经济、生

¹ 收稿日期:2017-10-15; 修回日期:2017-11-22

基金项目:贵州省喀斯特山区水资源环境系统服务功能科技创新人才团队(黔科合人才团队[2014]4014号);喀斯特山区地下水资源保障与利用关键技术及示范(2014BAB03B03)

作者简介:杨振华(1991~),男,硕士,助理研究员,研究方向为水资源开发与评价. E-mail:yangzh750@sina.com*通讯作者 E-mail:suweici@sina.com

态系统的保障力度有限；地表—地下水资源连通网络不仅削弱了地表水资源消纳污染物的能力，也使地表污染物迅速运移到地下河网，导致水生态系统的脆弱性加剧，同时，在城市化过程中，点源、非点源污染排放大量水体污染物，直接影响地表—地下水资源的生态服务功能稳定性及其服务质量。因此，如何从岩溶发育和水环境质量的角度，综合分析两者对水资源—环境系统服务功能的影响，成为水生态系统领域亟待解决的问题。

水资源—环境系统服务功能源于 20 世纪 90 年代的生态系统服务功能的研究^[2, 3]，作为水生态与社会经济学的重要研究内容之一，其定量化评价指标体系与方法逐渐引发国内外学者的关注。Wilson^[4]和 Sa^[5]根据生态服务功能的内涵和评价指标体系核算了流域水生态系统服务功能价值，揭开了流域水资源系统服务功能价值研究的序幕。而 Zander 等^[6]，Foley 等^[7]则对不同水体的水资源系统服务功能类型进行划分及其价值评估，极大的完善水资源系统的服务功能。相比于国外，随着赵同谦等^[8]对水生态系统服务功能进行首次评价以来，其他学者也对河流^[9]、水库^[10]、湖泊^[11]、湿地^[12]等不同类型的生态系统的服务功能进行研究，其评价方法涵盖了市场价值法、旅行费用法、影子工程法、碳税法和造林成本法等直接或间接方法^[13, 14]，为区域水生态环境状况评估提供重要依据。然而，以往的相关研究认为不同区域用水量、水源涵养、环境净化等方面价值当量是相同的^[15, 16]，并忽略了不同水环境系统状况对水生态系统服务功能的影响，导致评价结果与实际生态环境状况不符。

岩溶地区水资源—环境系统的服务功能评价的核心在于确定岩溶发育特征、水环境质量对服务功能影响，本研究结合贵州省岩溶发育特征和地表水环境状况，对常规水资源—环境系统服务功能指标评价结果进行修正，初步探讨基于岩溶发育特征的水资源—环境系统服务功能价值量修正方法，以期为区域水生态功能区划、水资源—环境系统的优化调控提供决策依据。

1 研究区概况

贵州省地处我国西南岩溶集中连片典型发育区，峰丛(林)洼地、谷地广泛分布，地势西高东低，山地和丘陵地貌面积比重达 90%以上，且岩溶面积比重达 60%以上(图 1)。全省位于亚热带季风气候区，雨热同期，多年平均降雨量达 1178.6mm，地表径流中上游水流湍急，下游河谷深切狭窄，水力资源丰富。截止 2015 年，全省拥有大中型水库 92 座，其年末蓄水量达到 299.75 亿 m³，总供水量达 97.49 亿 m³。但由于地表峰丛洼地、落水洞以及地下孔隙、裂隙、管道发育，形成地表—地下“二元三维”水循环结构，导致地表蓄水能力弱，区域性、季节性干旱显著，其水资源利用率也仅有 32.5%，地表可利用水资源相对缺乏。

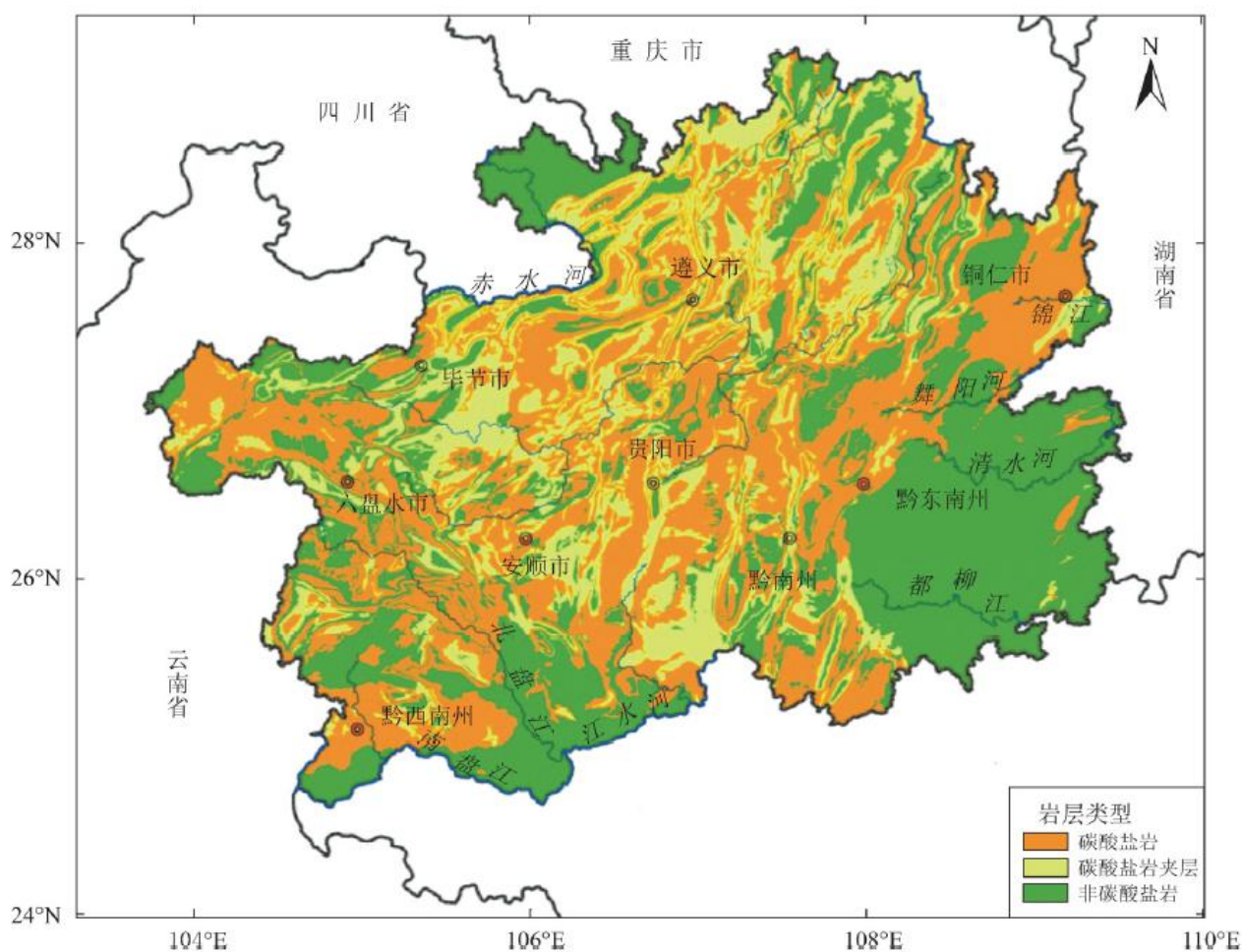


图 1 贵州省岩溶发育空间分布特征

Fig. 1 Spatial characteristics of Karst development in Guizhou Province

2 数据来源与方法

2. 1 数据来源

本研究涉及的数据包括地表—地下水资源量、区域水资源供用量、径流水质、各行业产值等，其中水资源量等系列数据来源于 2015 年《贵州省水资源公报》；水环境系列数据来源于 2015 年《贵州省环境状况统计公报》等公开资料整理；渔业产值数据则来源于 2015 年《贵州省国民经济发展与社会发展统计公报》整理；土地利用类型面积来源于 2015 年《贵州省国土资源公报》等相关资料整理。另外，岩溶发育程度数据是在参考以往研究^[17]的基础上确定的，用于厘定水资源—环境系统服务功能价值评估的修正系数。

2. 2 研究方法

2. 2. 1 评价指标体系

依据系统功能完整性、主导性原则，结合水资源—环境系统服务内涵及各个指标的服务功能，构建出水资源—环境系统服

务功能评价指标体系(表 1)，同时根据评价指标的主要影响因素，将评价指标属性供用水量主导的评价指标属性分为复合型、水质型、水量型，其中复合型代表其服务功能受水质、水量的影响均均显著，二者缺一不可；水质型其服务功能受水环境质量的影响为主，水环境污染成为其主要限制因素；水量型代表其服务功能受水资源量影响为主，以往服务功能减弱多表现为干旱供水不足，具体分类如表 1 所示。

表 1 水资源—环境系统服务功能价值评价指标体系

评价准则	评价指标	释义及选取依据	修正属性
生态系统维持 (q)	生态用水量 (I ₁)	维持生态系统(生物、土壤等圈层)物质、能量循环的用水量，其水质达 V 类以上即可	水量型
	林地覆盖 (I ₂)	水资源对林地生态系统的维持以及水源涵养，其水质达 V 类以上即可	水量型
	生境重要性 (I ₃)	水资源对生物栖息环境重要性的影响，其水质达 V 类以上即可	水量型
	生活供水 (I ₄)	提供人类生存发展的用水量，对水质、水量均有严格要求	复合型
	农业供水 (I ₅)	提供农作物生长过程的用水量，其水质须达 V 类以上即可	水量型
	工业供水 (I ₆)	提供工业生产过程中的用水量，其水质达 IV 类以上即可	水量型
生态产品供给 (c ₂)	服务业供水 (I ₇)	提供服务业发展过程中的用水量，对水质、水量均有比较严格的要求	复合型
	渔类产品 (I ₈)	人类对水生态系统中生物量的利用，受水质影响为主，尤其是贵州 珍稀鱼类	水质型
	地表水蓄积 (I ₉)	地表河川径流、湖库水域对水量的涵养能力，	水量型
水文调蓄与水力航运 (c ₃)	地下水蓄积 (I ₁₀)	地下岩层、裂隙等含水介质对水量的存储能力	水量型
	水力发电 (I _n)	地表径流的水力资源开发与利用，受径流量影响显著	水量型
	航运价值 (I ₁₂)	通航河段的客运、货运能力利用，受径流量影响显著	水量型
	水域景观旅游 (I ₁₃)	水域旅游景点对旅游总收入的贡献，对水质、水量均有一定的要求	复合型
景观休闲与旅游 (c ₄)	景观休闲娱乐 (I ₁₄)	公益性水域景观对居民休闲娱乐的贡献，对水质、水量均有一定的要求	复合型
	气候调节 (I ₁₅)	对气候起增加湿度、降低温度的作用，受水量影响为主	水量型
	空气净化 (I ₁₆)	雨水资源产生负离子和吸收尘埃的作用，受水质影响为主	水质型
环境调节与净化 (c ₅)	水质净化 (I ₁₇)	水资源对 P、N 等水体污染物的吸纳能力，受原水水质、水量的共同影响	复合型
	河道输沙 (I ₁₈)	对气候起增加湿度、降低温度的作用，受水量影响为主	水量型
	石漠化治理 (I ₁₉)	对气候起增加湿度、降低温度的作用，受水量影响为主	水量型

2.2.2 评价方法

结合不同评价指标属性以及涉及数据的可获取性，采用替代成本法、旅行费用法、恢复费用法、影子价格法、市场价值法等方法^[13]对研究区水资源—环境系统服务功能进行价值计算(表2)。

表2 水资源—环境系统服务功能评价方法

评价指标	方法	公式	参数含义及选取依据
I1	影子价格法	$V_1 = q_e * p_d$	V_1 代表生态用水量价值； q_e 代表生态用水量(m^3)； p_d 代表单位生态用水量价格(元/ m^3)，采用贵州省生活用水单价3.7元/ m^3 代替
I2	恢复费用法	$V_2 = s_{r1} * p_{r1}$	V_2 代表水资源的林地生态系统维持价值； s_{r1} 代表林地覆盖面积； p_{r1} 为单位面积的林地水源涵养价值，参考相关研究值 ^[18, 19] 取值为12 932.8元/($hm^2 * a$)
I3	恢复费用法	$V_3 = s_h * p_h$	V_3 代表水资源的生物多样性的价值； s_h 代表重要生物保护区的面积，包括珍稀动渔业资源保护区，自然保护区等生态功能区。 p_h 代表单位面积生物保护区价值，采用水体的生物多样性价值为1 598.8元/($hm^2 * a$) ^[20]
I4	市场价值法	$V_4 = q_d * p_d$	V_4 代表生活用水量价值； q_d 代表生活用水量； p_d 代表单位生活用水量价格(元/ m^3)，采用贵州省第一档生活用水单价平均值2.01元/ m^3
I5	市场价值法	$V_5 = q_i * p_i$	V_5 代表农业用水量价值； q_i 代表农业用水量； p_i 代表单位农业用水量价格(元/ m^3)，采用贵州省第一档生活用水单价平均值2.01元/ m^3
I6	市场价值法	$V_6 = q_i * p_i$	V_6 代表工业用水量价值； q_i 代表工业用水量； p_i 代表单位工业用水量价格(元/ m^3)，采用贵州省第一档工业用水单价平均值2.56元/ m^3
I7	市场价值法	$V_7 = q_s * p_s$	V_7 代表服务业用水量价值； q_s 代表服务业用水量； p_s 代表单位服务业用水量价格(元/ m^3)，采用贵州省第一档服务业用水单价平均值3.27元/ m^3
I8	市场价值法	$V_8 = q_{r2} * p_{r2}$	V_8 代表渔业产品价值，直接采用统计年鉴的渔业产值； q_{r2} 代表渔业产量； p_{r2} 代表单位渔产品价格(元/ m^3)
I9	替代成本法	$V_9 = q_{sw} * p_{sw}$	V_9 代表地表水调蓄价值； q_{sw} 代表地表水资源调蓄量(含河流、湖库水量)； p_{r2} 代表单位调蓄水量价格，考虑到地表水主要用途，则采用第一档工业用水单价平均值2.56元/ m^3
I10	替代成本法	$V_{10} = q_{gw} * p_{gw}$	V_{10} 代表地下水调蓄价值； q_{gw} 代表地下水资源调蓄量(含伏流、岩层裂隙、孔隙水量)； q_{gw} 代表单位调蓄水量价格，由于地下水作为生活水源为主，故采用第一档生活用水单价平均值2.01元/ m^3
I11	替代成本法	$V_{11} = q_{hp} * p_{hp}$	V_{11} 代表水力发电价值； q_{hp} 代表水力发电量(已开发)； p_{hp} 代表单位水力发电价格，采用三档电费平均价格0.57元/($kW * h$)

I12	替代成本法	$V_{12} = \frac{q_{ft} * p_{ft} + q_{pt} * p_{pt}}{p_{pt}}$	V_{12} 代表水力航运价值，由货运、客运价值组成； q_{ft} 、 q_{pt} 分别代表货运量； p_{ft} 、 p_{pt} 分别为货运均价 0.12 元/kg、客运均价 2 元/人，两者取值源于贵州省水运公报中运输量与行业收入的比值
I13	旅游收入法	$V_{13} = c_{t1} * i_{t1}$	V_{13} 代表营业性水域景观的旅游价值； c_{t1} 为该类水域景点所占比重，取全省旅游资源大普查的平均值 11.1%； i_{t1} 为区域旅游总收入
I14	旅游收入法	$V_{14} = c_{t2} * i_{t2}$	V_{14} 代表非营业性水域景观的旅游价值； c_{t2} 为非营业性水域景观（公园、广场等）面积； i_{t2} 为单位水域面积的娱乐文化价值 3840.2 元/（ $hm^2 * a$ ） ^[21]
I15	替代成本法	$V_{15} = \frac{q_h * p_h}{\alpha} + \beta * q_w * p_h$	V_{15} 代表水资源的气候调节功能价值； q_h 、 q_w 分别为水资源蒸发过程中所吸收的热量和多年蒸发量 ^[20, 22] ，其数值源于 2015 年贵州省主要站点的年度蒸发量； p_h 为对应的吸热、蒸发过程中单位耗电量，其价格为 0.45 元/（kW* h）
I16	替代成本法	$V_{16} = c_a * s_{sw} * p_a + c_d * p_d$	V_{16} 代表水资源的空气净化价值； c_a 、 c_d 分别为水体产生的负离子和降尘含量 ^[22] ； s_w 代表水域面积； p_a 、 p_d 代表产生单位负离子价格降尘价格，参考工业处理标准 2.8 元/1010 个和 0.15 元/kg ^[23]
I17	恢复费用法	$V_{17} = q_c * p_c$	V_{17} 代表水资源水质净化价值； q_c 为水体中排放污染物（COD、氨氮）总量， p_c 为单位污染物净化价格，参考生活污水处理成本得到 COD 去除单价为 15161 元/t，氨氮去除单价为 24497 元/t ^[24]
I18	替代成本法	$V_{18} = s_{sc} * p_{sc}$	V_{18} 代表径流的河道输沙价值； s_{sc} 为河道年输沙量（t/a）； p_{sc} 为单位淤积的清理成本投入 3.1 元/t ^[25]
I19	恢复费用法	$V_{19} = s_{re} * p_{re}$	V_{19} 代表水资源的石漠化治理价值； s_{re} 为石漠化综合治理面积； p_{re} 代表石漠化治理成本 62.83 万元/km ² ^[26] ，系各治理模式成本均值

表 3 水资源—环境系统服务功能修正因子

行政分区	岩溶发育强度（%）					地表水环境状况（%）			
	弱发育	中等发育	较强发育	强烈发育	非岩溶	≥Ⅺ类	Ⅲ类	Ⅳ类	≤Ⅴ类
贵阳	5.46	—	79.63	—	14.90	65.3	—	1.0	33.7
遵义	—	—	65.77	—	34.23	73.4	13	13.6	—
六盘水	—	22.97	40.21	—	36.82	55.6	44.4	—	—
安顺市	21.71	36.96	7.18	5.35	28.51	81.4	7.5	8.6	2.5
毕节	—	47.25	26.01	—	26.74	97.8	—	2.2	—

铜仁	-	-	60.56	-	39.44	50.2	1.1	47.9	0.8
黔南州	19.31	5.08	-	57.01	18.59	90.2	-	7.2	2.6
黔西南州	-	10.79	5.37	44.16	39.68	91.3	-	8.7	-
黔东南州	0.79	-	22.54	-	76.67	60.9	-	-	39.1

注：表中“-”代表该数值为空或为零。

2.2.3 修正系数

根据水资源—环境服务功能的修正类型，以岩溶发育程度、水环境状况等因子作为服务功能价值量的修正依据(表3)。本文在参照岩溶水循环过程特殊性^[27]的基础上，采用 AHP 法对不同岩溶发育等级和水环境状况的影响力进行赋权。权重越接近于 0，代表对服务功能的负面影响越小，反之越接近于 1，则对服务功能的负面影响就越大。其修正系数公式如下^[28]：

$$E = 1 - \sum_{i=1}^m P_i * W_i$$

式中:E 代表修正因子的影响力(修正系数)；P_i为第 i 类修正因子数量比重，i 为两类修正因子的分级数；W_i为第 i 类修正因子权重，其计算结果为岩溶修正系数 W_k=(0.134、0.200、0.267、0.334、0.067)；水环境修正系数 W_{we}=(0.077、0.153、0.308、0.461)；计算复合型服务功能修正系数时，将岩溶发育强度和地表水环境的因子进行依次叠加平均即可(表4)，其水量型、水质型和复合型修正系数平均值分别为 0.81、0.86 和 0.84，各修正系数与各地州水循环特征、水环境质量基本吻合，故取值相对合理。

表 4 贵州省各项水资源—环境系统服务功能修正系数

行政分区	贵阳市	遵义市	六盘水市	安顺市	毕节市	铜仁市	黔南州	黔西南州	黔东南州
水量型	0.78	0.80	0.85	0.89	0.87	0.81	0.67	0.71	0.89
水质型	0.78	0.93	0.96	0.93	0.96	0.83	0.94	0.95	0.75
复合型	0.78	0.87	0.90	0.91	0.91	0.82	0.80	0.83	0.82

3 评价结果与分析

依据修正前后水资源—环境系统服务功能价值量(表5)比较可知，修正后各地州各项服务功能价值量融入了水质、水量等属性，其差异系数也由 0.49 缩小至 0.46。从各地州的各类服务功能价值量排序可知:生态系统维持(C1)功能价值修正后，贵阳市与毕节市的排序调换，其因为毕节市虽石漠化面积大，但总体森林覆盖面积达 129×10⁴hm²，同比贵阳市多 92.8×10⁴hm²，生态系统维持的价值量较大；生态产品供给(C2)价值修正后，黔南州与毕节市的调换，两地区总用水仅相差 0.43 亿 m³，但毕节市工业用量是黔南州的 1.79 倍，且全州位于赤水河上游珍稀鱼类保护区，故毕节市的生态产品供给(C2)价值应当高于黔南州；景观休闲与旅游(C4)价值修正后的排序，仅黔南州与黔东南州调换，缘于黔东南州近年来旅游产业的发展，一大批水域旅游景区(剑

河温泉、舞阳河景区)建设,旅游产业价值快速攀升,年均增长率达 20%以上,因此,黔东南州的景观休闲与旅游(C4)价值应高于黔南州,综上所述,修正后的价值量,弥补了原始明显不合理的排序误差,与实际水资源—环境系统状况的吻合度增加,评价结果更加科学。

表 5 贵州省修正前后的水资源—环境系统服务功能价值量及其排序

行政分区		贵阳市	遵义市	铜仁市	黔西南州	黔南州	黔东南州	六盘水	毕节市	安顺市
生态系统维持 (C ₁)	修正前	0.71	1.19	0.53	0.32	0.65	0.82	0.40	0.70	0.28
	排序	3	1	6	8	5	2	7	4	9
	修正后	0.55	0.96	0.43	0.26	0.50	0.73	0.33	0.57	0.23
	排序	4	1	6	8	5	2	7	3	9
生态产品供给 (C ₂)	修正前	43.52	90.26	39.69	33.12	47.07	60.28	32.63	45.17	36.43
	排序	5	1	6	8	3	2	9	4	7
	修正后	33.64	73.41	32.20	27.08	36.63	52.25	26.96	37.47	30.90
	排序	5	1	6	8	4	2	9	3	7
水文调蓄与水力航运 (C ₃)	修正前	38.25	201.41	133.16	126.81	128.49	184.74	29.69	79.50	45.69
	排序	8	1	3	5	4	2	9	6	7
	修正后	29.48	161.53	108.18	100.24	97.85	164.03	24.42	65.07	38.43
	排序	8	2	3	4	5	1	9	6	7
景观休闲与旅游 (C ₄)	修正前	115.80	61.01	27.02	16.03	47.33	43.09	8.44	34.77	42.02
	排序	1	2	7	8	3	4	9	6	5
	修正后	89.23	48.93	21.95	12.67	36.04	38.26	6.94	28.45	35.35
	排序	1	2	7	8	4	3	9	6	5
环境调节与净化 (C ₅)	修正前	106.22	252.14	77.18	92.79	87.92	112.15	55.50	80.83	45.30
	排序	3	1	7	4	5	2	8	6	9
	修正后	82.23	202.42	62.64	74.34	68.44	98.09	47.89	68.08	38.55
	排序	3	1	7	4	5	2	8	6	9

通过对贵州省各地州水资源—环境系统服务功能价值进行修正(表 4、表 5)得到,全省水资源—环境系统服务功能中生态系统维持价值为 4.55×10^8 元,主要价值在于陆地生态系统维持和用水量供给,尤其是森林覆盖区的生态用水量;生态产品供给价值为 350.54×10^8 元,在用水量提供中以农业、工业用水为主,两者比重达 74.36%,其因为生产用水量比重较大,尤其是低用水效率的农业;水文调蓄与能源利用的价值侧重于地表—地下水资源蓄积量,两者调蓄价值总量达 529.1×10^8 元,为各类功能价值量之最,另外,水力发电价值量也有 170.2×10^8 元,是航运价值的 1.89 倍,充分说明地表起伏度大的岩溶山地区水力资源丰富,但河道弯曲、狭窄,航运条件差;岩溶山区水域景观结合多样化自然、文化旅游资源,使其旅游价值量达到 360×10^8 元;环境调节与净化功能价值则以气候调节和水质净化为主,受地表蒸发显著的影响,全省气候调节价值量为 609.37×10^8 元,也与

贵州年均气温相对较低的现象吻合,水质净化则缘于生活、农业污水直接排放的影响较大,导致水质净化价值亦达 114.61×10^8 元。

3.1 生态系统维持

修正结果表明,遵义市、贵阳市生态用水量价值分别为 0.5×10^8 元和 0.46×10^8 元,价值比重之和达 43.50%(表 5、图 2),而其余地州均低于 0.3×10^8 元,其主要原因在于前者林草地覆盖面积为全省最大,后者城市人工生态系统则以 111.15 km^2 远超过其他城市的绿化面积,其中对陆地生态系统的维持价值(林地)以黔东南州和遵义市居多,两者价值比重分别占全省的 18.86% 和 21.59%,其因为两地区的林地面积大,森林覆盖率高。而水域生态系统受河流干流的水域面积影响较大,特别是赤水河和乌江干流流经的遵义市,仅该市水生态系统价值就达 0.02×10^8 元,价值比重就有 44.92%。

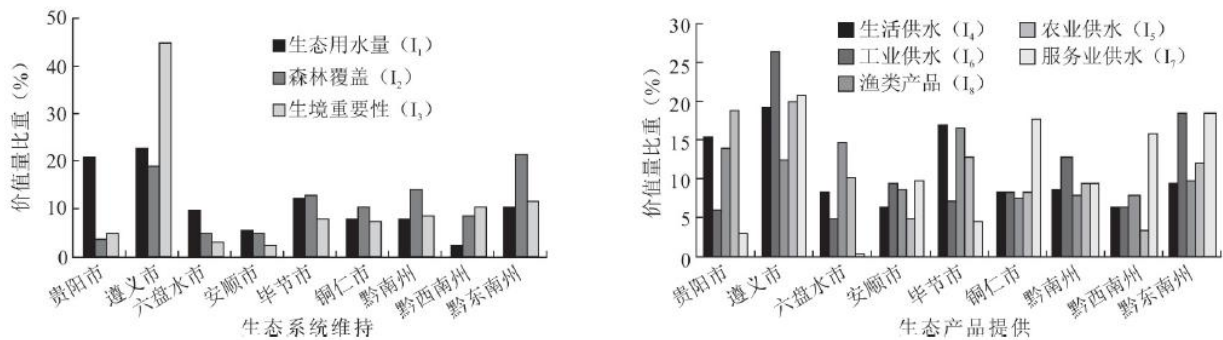


图 2 各地州生态系统维持和生态产品供给价值量比重

Fig. 2 Each city or prefecture's proportion of ecosystem maintenance and supply of ecological products value

3.2 生态产品供给

从各部门水资源利用特征可以看出,工业相对发达或工业用水效率低下地区工业用水量均超过农业用水量(图 2),如六盘水市和毕节市,其余地区均以农业用水量为主,如遵义市农业用水量为 $14.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过工业用水量的 3.58 倍,其农业用水量价值也达到 26.53×10^8 元,占全省农业用水价值量的 26.53%,这也是其作物种植面积达 12943.4 km^2 ,超过全省各地州平均值 09 倍的结果。另外,渔类产品价值也是水域面积较大的遵义市、黔东南州和黔西南州的比重大,三者价值量分别为 7.84×10^8 元、 5.88×10^8 元和 6.99×10^8 元。由此可见,决定生态产品供给价值量关键在于水资源的利用情况,因此,其利用量越大则代表价值量也越大。

3.3 水文调蓄与能源利用

地表岩溶越发育,则地表水资源漏失越严重,单位面积地下水资源量则越大,但对于非岩溶地区,由于土层厚度大,岩土层吸水能力强,使得地下水资源量丰富。如岩溶最为发育的黔南州地下水资源产水模数达 $6535.07 \text{ m}^3/\text{km}^2$,超过其他岩溶面积大的其他地州,而非岩溶地区为主的黔东南州地下水产水模数竟达 $7636.97 \text{ m}^3/\text{km}^2$,两者对应的地表一地下水资源调蓄总价值 91.13×10^8 元、 132.98×10^8 元。全省水力航运价值也集中于乌江中下游的遵义市、铜仁市以及南北盘江中下游的黔西南州,其中水力发电量最大的是遵义市,其价值量比重为 52.69%(图 3),如总装机 $63 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$,年发电量达 $33.4 \text{ 亿 kW} \cdot \text{h}$ 的乌江水电站。其次为黔西南州水力发电 43.02×10^8 元,但比重仅占 25.28%;航运价值量则以铜仁市为主,其价值量 42.76×10^8 元,比重将近全省航运价值量的 1/2。

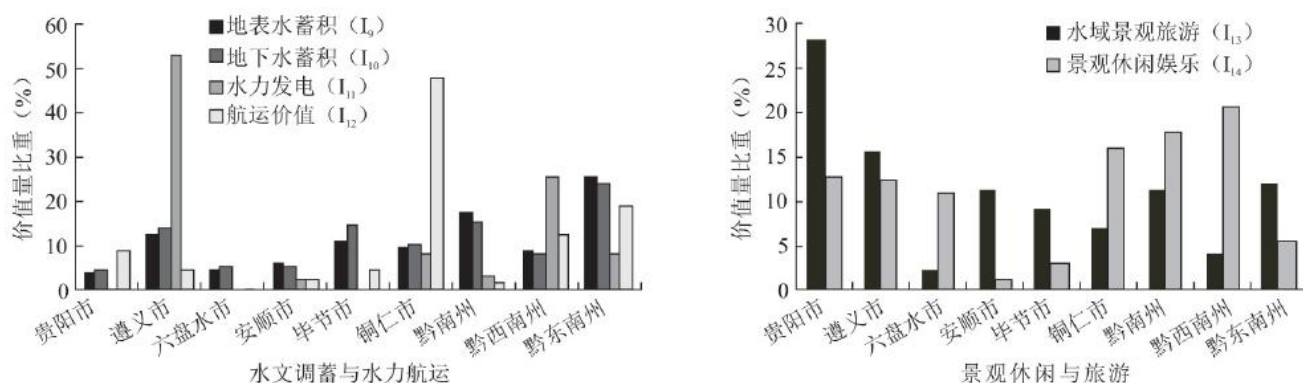


图3 各地州水文调蓄与水力航运、景观休闲与旅游价值量比重

Fig. 3 Each city or prefecture's proportion of hydrological regulation, hydraulic navigation, landscape recreation and tourism value

3.4 景观休闲与旅游

水体旅游资源往往分布于水域形态奇特、水域面积大、水质良好的水源涵养区，但景观休闲与旅游价值的评价还受区域旅游资源开发条件、配套旅游设施、区域地理位置等因素影响。贵阳市依托省会城市的交通等设施优势，景观休闲与旅游价值量总计 89.23×10^8 元，属全省价值量最高的地区(比重为 28.08%)，其次为景观休闲与旅游 48.93×10^8 元的遵义市，相应比重仅有 15.39%，约为贵阳市的 1/2(图 3)。

3.5 环境调节与净化

从各地州环境调节与净化价值结构(图 4)可以发现，气候调节与空气净化价值量集中于遵义市，两者价值量比重分别为 32.61%和 43.54%，其余地州比重基本上不足 10%；六盘水的水质净化价值比重为全省最高，其比重为 26.13%，而其他各地州的平均值却仅有 9.23%；河道输沙价值量相对均衡，最大价值量比重为毕节市(18.29%)，最小比重的地区为贵阳市(6.16%)；石漠化治理价值则主要体现在石漠化比较严重的黔西南州、黔南州、毕节市，三者价值量比重依次为 25.82%、25.19%和 22.04%。综上所述，水资源—环境系统的调节与净化价值主要体现在水域面积较大的遵义市和生态环境比较脆弱的毕节市、黔南州和黔西南州。

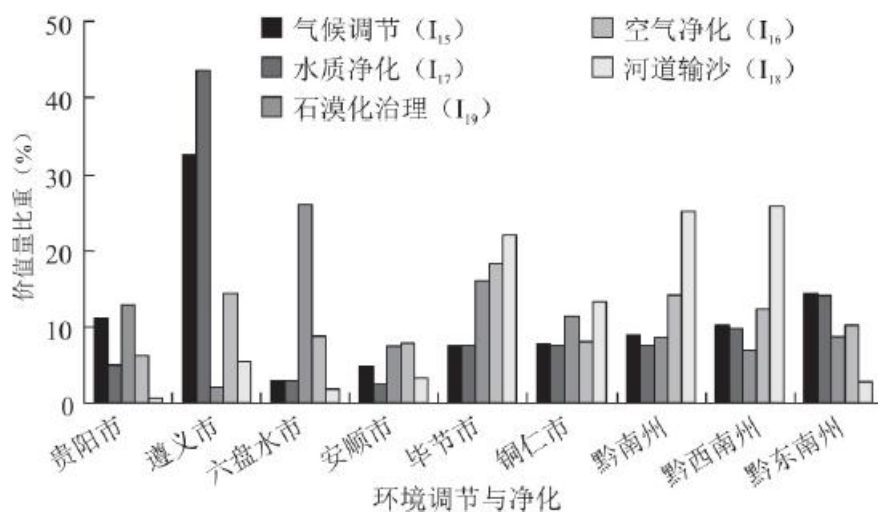


图 4 各地州环境调节与净化价值量比重

Fig. 4 Each city or prefecture's proportion of environmental regulation and purification value

4 结论与讨论

(1) 贵州省水资源—环境系统的服务价值量不仅地州差距较大，且同一地区的不同服务功能的价值量、比重差异也很明显。遵义市的水资源—环境系统的服务价值总量达 487.23×10^8 元，属于全省价值量最大的地州，且主要由水力发电、空气调节、地表水蓄积功能价值构成，但价值量占全省比重达 45% 的为生境重要性和水力发电功能。而价值量最小的地州为六盘水市，其价值总量仅有 106.54×10^8 元，全市水力发电、航运价值占全省比重均不足 0.1%，仅水质净化价值比重达 26.13%，也是全市价值量最大的服务功能项目。

(2) 水资源—环境系统的服务价值量高低主要取决于区域对水资源量的蓄积、利用状况和水域面积及水域旅游景观开发，且各项服务功能价值量差异较大，如贵州省空气调节价值达 609.37×10^8 元，为各项服务功能价值量最大的项目，其次为地表水资源蓄积和水域景观旅游价值量，分别只有 443.64×10^8 元和 316×10^8 元。另外，水资源—环境系统的服务价值量受评价方法和系数的影响也较大，且区域对水资源—环境系统的利用率越高，则价值量就越大，其最小值为毕节市，仅 74.35×10^8 元，最大值为贵阳市，达 292.65×10^8 元，是毕节市的 3.93 倍，说明水资源—环境系统对社会经济的发展和生态系统的稳定性都具有不可替代的价值。

(3) 常规的水生态系统价值量评价方法多认为水生态服务功能与水环境质量无关，不考虑水质对水资源服务功能的影响^[29]，使评价结果过于理想化，与实际状况存在较大偏差。本文结合岩溶发育强度和水环境特征，采用 AHP 法确定修正系数，对水资源—环境系统的生态服务功能价值量进行修正，通过定性与定量结合(排序)的方法对修正后价值量进行排序验证，发现修正后的数值纠正了明显性的错误，使得评价结果更加科学合理。但评价结果与实际水资源—环境系统的验证目前暂无权威的验证方法，且大部分研究缺乏验证，直接套用 Daily^[3] 或谢高地^[19] 的功能评价系数，对于系数的合理性缺乏探讨，尤其是岩溶特殊水文地质与生态环境区，因缺乏服务功能价值评价的统一系数^[30]，导致不同系数计算得到的水资源—环境系统服务功能价值差异显著，有待于进一步深入的校正。另外由于本次评价涉及的数据量庞大，部分缺值区采用全省平均值代替，难免造成一定的偏

差。因此，对于修正系数、插值数据以及修正后的价值量，其取值的合理性需要进行验证，这也是本研究需要进一步深入的方向。

参考文献:

- [1] 郑长统, 梁虹, 舒栋才, 等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域 SCS 产流模型应用 [J]. 地理研究, 2011, 30(1) : 185—194.
- ZHENG C T, LIANG H, SHU D C, et al. Study of karst basin SCS runoff model based on GIS and RS [J]. Geographical Research, 2011, 30(1) : 185—194.
- [2] DAILY G C. Nature' s services: societal dependence on natural ecosystems [J]. Pacific Conservation Biology, 1997, 6 (2) :220—221.
- [3] COSTANZA R, D' ARGE R, GROOT R D, et al. The value of the world' s ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1999, 387(1) : 3—15.
- [4] WILSON M A, CARPENTER S R. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the united states: 1971 — 1997 [J]. Ecological Applications, 1999, 9(3) : 772—783.
- [5] SA JANSSON, FOLKE C, ROCKSTR M J, et al. Linking freshwater flows and ecosystem services appropriated by people:the case of the Baltic Sea Drainage Basin [J]. Ecosystems, 1999, 2(4) : 351—366.
- [6] ZANDER K K, STRATON A. An economic assessment of the value of tropical river ecosystem services: heterogeneous preferences among aboriginal and non-aboriginal australians. [J]. Ecological Economics, 2010, 69(12) : 2417—2426.
- [7] FOLEY J A, ASNER G P, COSTA M H, et al. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin [J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 2007, 5(1) : 25—32.
- [8] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(4) : 443—452.
- ZHAO T Q, OUYANG Z Y, WANG X K, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4) : 443—452.
- [9] 王欢, 韩霜, 邓红兵, 等. 香溪河河流生态系统服务功能评价 [J]. 生态学报, 2006, 26(9) : 2971—2978.
- WANG H, HAN S, DENG H B, et al. A preliminary assessment on the Xiangxi river ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9) : 2971—2978.
- [10] 黄润, 王升堂, 倪建华, 等. 皖西大别山五大水库生态系统服务功能价值评估 [J]. 地理科学, 2014, 34 (10) :1270—1274.

HUANG R, WANG S T, NI J H, et al. Ecosystem service functions of the five reservoirs in Dabie mountain, west Anhui Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(10) : 1270—1274.

[11] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 等. 青海湖湖泊水生态系统服务功能的使用价值评估 [J]. *生态经济*, 2013 (9) : 163—167.

CAO S K, CAO G C, CHEN K L, et al. Evaluation of use value of water ecosystem service functions in the Qinghai Lake [J]. *Ecological Economy*, 2013(9) : 163—167.

[12] 徐婷, 徐跃, 江波, 等. 贵州草海湿地生态系统服务价值评估 [J]. *生态学报*, 2015, 35(13) : 4295—4303.

XU T, XU Y, JIANG B, et al. Evaluation of the ecosystem services in Caohai Wetland, Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13) : 4295—4303.

[13] 王浩, 陈敏建, 唐克旺. 水生态环境价值和保护对策 [M]. 北京交通大学出版社, 2004: 80—110.

WANG H, CHEN J M, TANG K W. Water ecological environment value and protection countermeasure [M]. Beijing Jiaotong University press, 2004: 80—110.

[14] 张翼然, 周德民, 刘苗. 中国内陆湿地生态系统服务价值评估——以 71 个湿地案例点为数据源 [J]. *生态学报*, 2015, 35(13) : 4279—4286.

ZHANG Y R, ZHOU D M, LIU M. Ecosystem service valuation research of Chinese inland wetlands based on case study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35: 4279—4286.

[15] PING Z, LIANG H, XIN F, et al. Ecosystem service value assessment and contribution factor analysis of land use change in Miyun County, China. [J]. *Sustainability*, 2015, 7 (6) : 7333—7356.

[16] 叶延琼, 章家恩, 陈丽丽, 等. 广州市水生态系统服务价值 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5) : 1303—1310.

YE Y Q, ZHANG J E, CHEN L L, et al. Value evaluation of aquatic ecosystem services in Guangzhou, South China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013.

[17] 王明章. 贵州省地质调查院. 贵州岩溶石山生态地质环境研究 [M]. 地质出版社, 2005.

WANG M Z. Study on the ecological geological environment of karst rock mountain in Guizhou [M]. Geological Publishing House. 2005

[18] ZHANG B, LI W, XIE G, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its Value [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7) : 1416—1426.

[19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化 [J]. *资源科学*, 2008, 30(1) : 93—99.

XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Supply, consumption and valuation of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2008, 38(38) : 1152—1161.

[20] 梁鸿, 潘晓峰, 余欣繁, 等. 深圳市水生态系统服务功能价值评估 [J]. 自然资源学报, 2016, 31 (9) : 1474—1487.

LIANG H, PAN X F, YU X F, et al. Valuation of water ecosystem services in Shenzhen City [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9) : 1474—1487.

[21] 姚玲, 廖和平, 邓春燕, 等. 基于土地利用变化的三峡库区生态服务价值损益分析——以重庆市巫山县为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(5) : 91—96.

YAO L, LIAO H P, DENG C Y, et al. Analysis of the gains and losses of the ecosystem service function values of three gorges reservoir region based on land use change——a case study of Wushan county in Chongqing [J]. Journal of Southwest University, 2012, 34(5) : 91—96.

[22] 毛亚昆, 穆彪, 李静, 等. 贵州省不同生态旅游区空气负离子资源研究初报 [J]. 农业与技术, 2012(2) : 118—120.

MAO Y K, MU B, LI J. A preliminary report on the air negative ion resources in different ecotourism areas of Guizhou [J]. Agriculture and Technology, 2012 (2) : 118—120.

[23] 张振明, 刘俊国, 申碧峰, 等. 永定河(北京段) 河流生态系统服务价值评估[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (9) : 1851—1857.

ZHANG Z M, LIU J G, SHEN B F, et al. Evaluation of ecosystem services of the Yongding River in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9) : 1851—1857.

[24] 李烨楠, 卢培利, 宋福忠, 等. 排污权交易定价下的 COD 和氨氮削减成本分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014(3) : 50—53.

LI Y, LU P, SONG F, et al. Analysis on elimination costs of COD and Ammonium for emission trade price determination [J]. Environmental Science & Management, 2014(3) : 50—53.

[25] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价 [J]. 生态学报, 2004, 24 (10) : 2091—2099.

OUYANG Z Y, ZHAO T Q, WANG X K, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (10) : 2091 —2099.

[26] 曾春花, 韩杰. 珠江流域贵州段石漠化生态修复管理机制研究 [J]. 广西师范大学学报(哲学社会科学版), 2016, 52(2) : 25—30.

ZENG C H, HAN J. Research on the management mechanism of ecological restoration of the stony desertification in the Pearl River Basin in Guizhou [J]. Journal of Guangxi Normal University, 2016, 52(2) : 25—30.

[27] 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性 [J]. 地球学报, 2006, 27 (5) : 393—402.

LU Y R, ZHANG F E, LIU C L, et al. Karst water resources in typical areas of china and their eco—hydrological characteristics [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5) : 393—402.

[28] 杨美玲, 马鹏燕. 银川市水生态系统服务功能价值评价 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(26) : 239—244.

YANG M L, MA P Y. Service function analysis and value evaluation of aquatic ecosystem in Yinchuan [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(26) : 239—244.

[29] 闫人华, 高俊峰, 黄琪, 等. 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值 [J]. 生态学报, 2015, 35(15) : 5197—5206.

YAN R H, GAO J F, QI H, et al. The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15) : 5197—5206.

[30] 周传艳, 陈训, 刘晓玲, 等. 基于土地利用的喀斯特地区生态系统服务功能价值评估——以贵州省为例 [J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(2) : 174—179.

ZHOU C Y, CHEN X, LIU X L, et al. Assessment of karst regional ecosystem service functions based on land use change: a case study in guizhou, China [J]. Chinese Journal of Applied &Environmental Biology, 2011, 17(2) : 174—179.