

贵州省水资源脆弱性时空变化特征分析

杨大方¹, 周旭¹, 张继¹, 杨江州², 罗雪¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省地质矿产
勘查开发局 117 地质大队, 贵州 贵阳 550018)

摘要: 对水资源脆弱性的时空变化分析可为水资源的规划管理、缓解水资源脆弱程度提供重要依据。通过压力-状态-响应模型,用组合权重法分析贵州省 2004-2017 年的水资源脆弱状况。结果表明:2004-2017 年间贵州省水资源脆弱指数总体呈波动下降的趋势,全省脆弱指数平均值为 0.486,属于中度脆弱;基于 PSR 模型计算结果为:压力指数 > 状态指数 > 响应指数;脆弱指数存在明显的空间差异性,各市(州)面临的水资源脆弱性问题仍十分严峻;导致全省脆弱指数部分地区偏高的原因主要是水资源面临的压力过大,现阶段水环境状况较差;废污水排放总量、农用地化肥施用量、降雨量和水资源总量是影响全省水资源脆弱性的重要因素。总体而言,贵州省水资源属于中度脆弱,脆弱性空间差异明显,水资源脆弱性的形势较为严峻。因此,研究贵州省水资源脆弱性可为贵州水资源的保护和管理提供理论依据,也为喀斯特地区水资源脆弱性的探索提供参考。

关键词: 水资源脆弱性; 时空变化; PSR 模型; 组合权重法; 贵州省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0070-10

Spatio-temporal variation characteristics of water resources vulnerability in Guizhou Province

YANG Dafang¹, ZHOU Xu¹, ZHANG Ji¹, YANG Jiangzhou², LUO Xue¹

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;
2. 117 Geological Brigade of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, China)

Abstract: Spatio-temporal variation analysis of water resources vulnerability can provide theoretical support for the planning and management of water resources and the mitigation of water resources vulnerability. Based on the pressure-state-response (PSR) model, the water resources vulnerability in Guizhou Province from 2004 to 2017 was analyzed using a combined weighting method. The results showed that the water resources vulnerability index of Guizhou Province showed a downward trend in fluctuation from 2004 to 2017. The average vulnerability index of the whole province was 0.486, which was classified as moderately vulnerable. The calculation results based on the PSR model were pressure index > state index > response index. The vulnerability index presented obvious spatial differences, and the water resources vulnerability problems faced by the cities (states) in this province remained severe. The main reason of the over high vulnerability index in some areas of the province was caused by the high pressure on water resources, which resulted in poor water environment. Total waste water discharge, agricultural fertilizer application, rainfall and total water resources were important factors affecting the vulnerability of the province's water resources. In general, the vulnerability of water resources in Guizhou was moderately vulnerable with obvious spatial differences which posed a great threat to the water resources. Therefore, studying the vulnerability of water resources in Guizhou Province can provide a theoretical basis for the protection and management of water resources in Guizhou, and also serve as a reference on exploring the

收稿日期:2019-08-27; 修回日期:2019-12-25

基金项目:贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2017]2855);贵州省科学技术项目(黔科合基础[2017]1195);贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目;贵州师范大学创新创业训练计划项目(201710663042)

作者简介:杨大方(1996-),女,贵州遵义人,硕士研究生,研究方向为土地资源管理与生态水文。

通讯作者:周旭(1981-),男,四川古蔺人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为遥感水文与流域管理。

vulnerability of water resources in karst areas.

Key words: water resources vulnerability; spatio-temporal variation; pressure – state – response (PSR) model; combined weight method; Guizhou Province

1 研究背景

水资源是关系区域经济发展、社会福祉与可持续发展决策的重要基础性战略资源^[1-3]。水资源脆弱性是指受气候变化、极端事件和人类活动等因素的影响,水资源系统正常的结构和功能受到损坏并难以恢复到原有状态的倾向或趋势^[4]。由于气候变化及人类活动的时空变异,导致不同地区、不同时段的水资源脆弱性存在一定差异。这就要求区域分析、空间规划与水资源管理等应该重视水资源脆弱性的时空变化基础研究。

国内外对水资源脆弱性模型的研究从最初采用 DRASTIC 模型对区域的水资源脆弱性进行研究^[5],随后出现了 GOD、SINTACS、SEPPAGE^[6-8]模型以及当前使用较多的灰色关联 – TOPSIS 模型^[9]、BP 神经网络模型^[10]和 PSR 模型^[11]及其变形的 DPSIR 模型^[12],这些方法为不同区域的水资源脆弱性的研究打开了新思路,也为水资源研究的工作者提供了可靠的方法和实践的理論支撑。而当前研究中更多的学者采用 PSR 模型及其变形的 DPSIR 模型并逐步完善^[13]。如 Men^[11]、Chen^[14]和吕文凯^[15]等分别对黑河流域、塔里木河流域以及滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性进行了综合评价,并指出各自研究区中所存在的水资源问题。随着全球气候变化和人类活动对水环境的刺激,造成水资源问题日益突出,水资源脆弱性的研究视角也逐步从地下水扩展到地表水。国外学者 Pawitan^[16]和 Koutroulis 等^[17]从气候变化及人口增长的角度对地表水资源脆弱性进行了详细的分析和探讨。国内学者邹君等^[18]和夏军等^[19]多位学者在应对气候变化和人类活动对地表水资源脆弱性影响上展开了多方面的讨论和研究。而近年来,对水资源的需求和管理程度越来越受到重视,更多的学者注重对水资源脆弱性定量化的研究,从最开始理论上定性研究转向结合区域数据的定量研究,如 Chen^[20]等选取 12 个评价指标分析了 2000 – 2015 年黄淮海 3 个流域水资源脆弱性的变化趋势和原因,并对 2020 年和 2030 年的情景进行了预测。

中国西南喀斯特地区具有石漠化面积较大^[21]、地形破碎、土层薄^[22]、蓄水能力差、水资源可利用量

少、工程性缺水严重^[23]等特征,其中以贵州最具代表性。目前对喀斯特地区的水资源脆弱性的探索和研究成果较少^[15,24-28],因此,对中国西南喀斯特地区水资源脆弱性展开研究具有重要的现实意义。同时,西南喀斯特地区较长时间序列的水资源脆弱性区域分异规律及其影响因素研究还较匮乏,难以揭示其较长时期的变化特征。因此,本文基于 PSR 模型,选取 22 个指标建立水资源脆弱性评价指标体系,采用层次分析法^[29]与熵权法^[10]共同构成组合权重法确定指标权重,运用综合指数法计算贵州省 2004 – 2017 年的水资源脆弱性指数并对其进行时空变化分析,以揭示贵州省水资源脆弱性的时空变化差异。从而为贵州水资源管理、生态环境保护及可持续发展决策等提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

贵州省位于我国西南部,是世界上三大集中连片分布喀斯特地区的东亚片区中心^[22]。境内地势西部高、东部低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔 1 000 m 以上,贵州省概况见图 1。全省位于亚热带地区,属亚热带季风气候,年均降水量 1 100 mm 以上,是长江、珠江两江上游重要水源涵养区,河网密度大,水量丰富。

但由于喀斯特多孔介质造成地表 – 地下二元水文结构,降水渗漏量大,导致地下水储量大,而地表水资源量相对匮乏,生态环境本底十分脆弱^[30],区域经济相对欠发达,水利工程开发建设难度大且成本高,导致贵州省成为全国工程性缺水十分严重的省份。全省有贵阳市、遵义市和黔南州等 9 个地级市(州)。2017 年,全省人均用水量为 289 m³,仅占全国人均用水量的 66%,人均水资源拥有量低于全国平均水平。同时,环境污染治理投资资金仅占全国的 1.8%,水资源浪费等问题也还存在。在新时代“以水定城、以水定人、以水定地、以水定产”的背景下,水是促进区域可持续发展的关键要素,也是限制地方经济社会发展的重要因素。因此,以贵州省为例,开展水资源脆弱性的时空变化研究具有很强的代表性。

2.2 数据来源

数据来源于《贵州省统计年鉴》(2005 – 2018)、

《贵州省水资源公报》(2004 - 2017)、《贵州省环境统计公报》(2004 - 2017)和《贵州省环境状况公报》(2004 - 2017)。

2.3 指标体系构建

PSR (pressure - state - response) 模型是为研究生境与人类社会活动之间的影响关系而提出的一个较为简单、全面的评价模型,能够很好地表示出两者之间的因果关系^[31]。PSR 系统分别为压力、状态和响应。为准确揭示贵州省的水资源系统在特定的压力作用下所呈现出的状态特征及其响应能力,在梳理水资源脆弱性评价指标的基础上,选取 CNKI 数据库中采用率最高的 9 项指标,并结合研究区水资源特点,按照因地制宜的原则,选取能够反映喀斯特区域特征的森林覆盖率、生态环境用水量等 13 项指标,共计 22

项指标,建立起贵州省水资源脆弱性评价指标体系,贵州省水资源脆弱性评价指标体系见表 1。

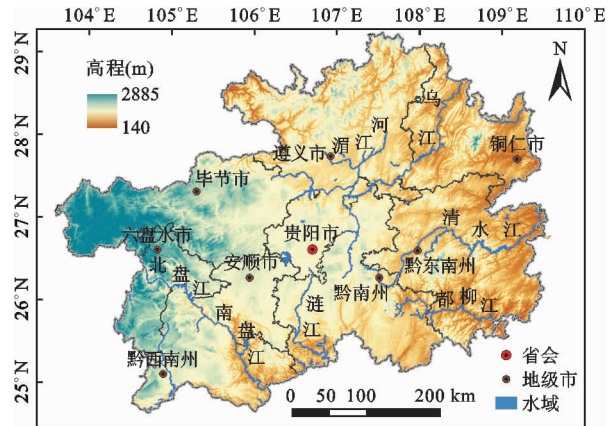


图 1 贵州省概况图

表 1 贵州省水资源脆弱性评价指标体系

准则层		指标层			
指标	权重	指标	含义	属性	权重值
压力 P	0.273	农业灌溉每公顷均用水量 P_1	农作物单位面积的灌溉用水量	+	0.034
		人均生活用水量 P_2	人均每天用水量	+	0.037
		废污水排放总量 P_3	废污水对水资源产生的影响	+	0.065
		万元 GDP 用水量 P_4	工业生产消耗水资源量	+	0.041
		农用作肥施用量 P_5	农业生产给水资源产生直接影响	+	0.051
		人口密度 P_6	反映地区人口的密集程度	+	0.045
		年平均降雨量 S_1	水资源的年降雨状况	-	0.073
		地下水资源量 S_2	地下水资源的状况	-	0.059
		人均水资源占有量 S_3	人均拥有水资源量,表明水资源的丰富程度	-	0.034
		可更新水资源总量 S_4	地表和地下的可更新的水资源总量	-	0.056
状态 S	0.547	森林覆盖率 S_5	地表的森林覆盖程度	-	0.032
		水资源总量 S_6	水资源数量的自然状态	-	0.085
		V 类水质的河长比例 S_7	水质较差占河道总长比例	+	0.053
		水资源开发利用程度 S_8	水资源开发利用程度	-	0.037
		耗水量 S_9	反映研究区内土壤的耗水情况	+	0.032
		输沙模数 S_{10}	反映研究区内的侵蚀产沙程度	+	0.040
		产水系数 S_{11}	反映研究区内水资源总量与降雨量的关系	-	0.046
		环保系统人员比例 R_1	政府对环保人员的投入状况	-	0.032
		环境保护投入占 GDP 比例 R_2	政府对环保资金的投入状况	-	0.038
响应 R	0.180	城市污水处理率 R_3	城市的污水处理情况	-	0.033
		人均 GDP R_4	反映研究区内潜在资金投入水平	-	0.034
		生态环境用水量 R_5	城镇和农村自然生态环境的用水量	-	0.043

注:“+”表示正向指标,该指标值越大,则水资源脆弱性越强;反之为负向指标,用“-”表示。

2.4 数据处理方法

2.4.1 指标数据标准化 因指标体系中各项指标

对水资源脆弱性的影响趋向不同,数据类型和大小也有差异,为消除指标量纲和趋向不同对评价结果

的影响,需对指标数据进行标准化处理。在此,参考相关文献[32-33],正向指标用公式(1)进行标准化处理,负向指标用公式(2)进行标准化处理。

$$\text{正向指标: } r_{ij} = \frac{X_{ij} - X_i(\min)}{X_i(\max) - X_i(\min)} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } r_{ij} = \frac{X_i(\max) - X_{ij}}{X_i(\max) - X_i(\min)} \quad (2)$$

式中: X_i 为第 i 个指标的实际值; r_{ij} 为数据标准化处理后第 i 个参评对象相对于第 j 个参评指标的数值; X_{ij} 为数据标准化处理后第 i 个参评对象相对于第 j 个参评指标的实际值; $X_i(\min)$ 和 $X_i(\max)$ 分别为第 i 个参评对象中的最小值和最大值。

2.4.2 指标权重确定 组合权重法是指将主观赋权法和客观赋权法结合使用的一类权重确定方法。该方法既可适当减小主观赋权法引入的主观误差,又可适当降低客观赋权法计算结果的机械性。在此,将层次分析法(主观)和熵权法(客观)计算得到的权重值带入特定的公式计算得到相应的组合权重值。计算过程如下:

首先,用层次分析法计算主观权重值 W_1 。层次分析法在确定指标权重时,能明显地区分出各指标间的相对重要程度。根据参考文献[34]计算得到各指标的主观权重值 W_1 。

其次,用熵权法计算客观权重值 W_2 。熵权法主要是利用各指标的具体数值进行计算,得到的权重值真实可靠,在一定程度上能减小指标权重的主观随意性。计算方法如公式(3)~(6)。

$$W_2 = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{i=1}^m H_j} \quad (3)$$

$$H_j = -K \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln Y_{ij} \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{\ln m} \quad (6)$$

式中: W_2 为熵权法计算得到的权重值; H_j 为评价指标的熵值; K 为与评价对象个数有关的系数; m 为评价对象的个数。

最后,用公式(7)~(9)算出组合权重值 W 。

$$W = fW_1 + (1-f)W_2 \quad (7)$$

$$f = \frac{S_{En} \cdot n}{n-1} \quad (8)$$

$$S_{En} = \frac{2}{n} (1X_1 + 2X_2 + \cdots + nX_n) - \frac{n+1}{n} \quad (9)$$

式中: W 为组合权重值; W_1 和 W_2 分别为层次分析法和熵权法所得权重值; S_{En} 为差异程度系数, n 为指标的个数; $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为按照升序排列的各指标的层次分析法权重。

2.4.3 脆弱性综合评价 为揭示水资源系统脆弱性综合特征,参照生态环境综合评价指数法,将基于PSR模型构建的水资源脆弱性量测指标体系,用公式(10)和(11)所示的综合指数法进行量化评价。

$$VI = \{V_P, V_S, V_R\} = V_P + V_S + V_R \quad (10)$$

$$\begin{cases} V_P = \sum_{j=1}^6 W_{Pj} r_{Pij} \\ V_S = \sum_{j=1}^{11} W_{Sj} r_{Sij} \\ V_R = \sum_{j=1}^5 W_{Rj} r_{Rij} \end{cases} \quad (11)$$

式中: VI 为水资源脆弱性指数; V_P, V_S 和 V_R 分别为压力指数、状态指数和响应指数; W_{Pj} 和 r_{Pij} 分别为压力层的组合权重值和指标标准化数值; W_{Sj} 和 r_{Sij} 分别为状态层的组合权重值和指标标准化数值; W_{Rj} 和 r_{Rij} 分别为响应层的组合权重值和指标标准化数值。

2.4.4 脆弱性变化分析 为分析不同指标对水资源脆弱性的影响,可直接比较不同指标的组合权重值的大小来制作权值差异图。为分析不同年份、不同准则层(含压力层、状态层和响应层)及脆弱性指数的时序变化特征,可以年份为横坐标制作不同年份的相应数值变化统计图。为分析整段研究期内,不同行政单元的水资源系统压力、状态、响应和脆弱性整体平均状况,可统计整段研究期内、不同年份的相应评价结果的平均值。为分析整段研究期内,不同行政单元的水资源系统压力、状态、响应和脆弱性的整体变化是呈现增加还是减弱趋势,可以将整段研究期内、不同年份的相应评价结果进行一元线性回归分析,模拟所得回归系数为趋势系数,回归系数为正表示呈增加趋势,反之则呈减弱趋势。为比较不同年份间的水资源脆弱性等级特征差异,在脆弱性综合评价的基础上,参考相关文献[1]、[4]将脆弱指数划分为不脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱5个等级,再根据研究区实际数据计算结果情况,将结果的最大值与最小值的极差进行5等分得到4个等分点,从结果的最小值开始进行分等累加,最后再依据现阶段已有的文献资料[18]、[35]进行适当调整,得到表2所示的水资源脆弱性评价分级标准。

表2 水资源脆弱性评价分级标准

水资源脆弱性指数范围	脆弱程度	划分等级
$0 \leq VI < 0.387$	不脆弱	I
$0.387 \leq VI < 0.431$	轻度脆弱	II
$0.431 \leq VI < 0.530$	中度脆弱	III
$0.530 \leq VI < 0.591$	重度脆弱	IV
$0.591 \leq VI \leq 1$	极度脆弱	V

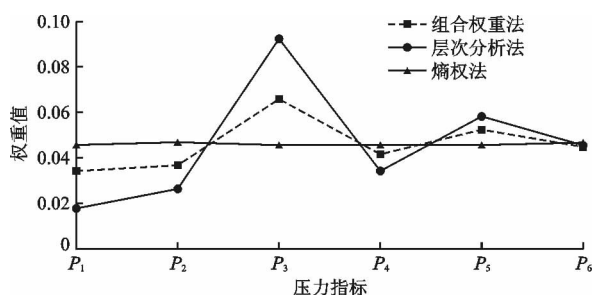
3 结果与分析

3.1 压力特征分析

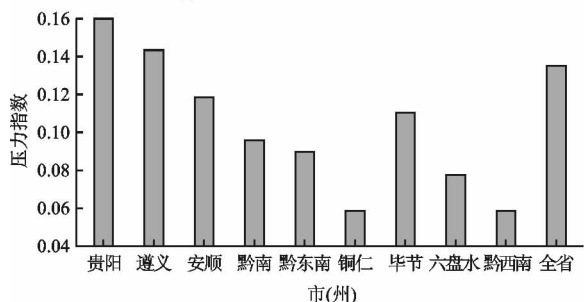
采用组合权重法、层次分析法和熵权法3种方法对各压力指标进行权重计算,不同方法计算的指标权重及2004–2017年贵州省及各市(州)压力指数变化特征计算结果见图2。

图2(a)表明,基于层次分析法所得到的各压力指标的权重值相差最大,差值为0.075,运用熵权法所得结果相差较小,差值约为0.001,组合权重法将两者相结合,使计算结果更为科学。由图2(a)还可看出,权重值最大的为废污水排放总量(P_3)和农用化肥施用量(P_5),表明两者对压力指数的影响较大,同时对整个区域水资源脆弱性的影响较大。

由图2(b)可见,2004–2017年全省压力指数



(a) 3种方法计算的各压力指标权重

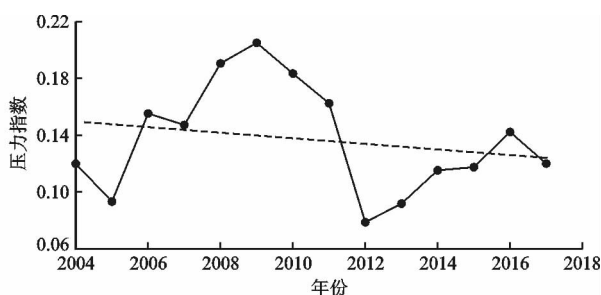


(c) 2004–2017年各市(州)和全省压力指数均值

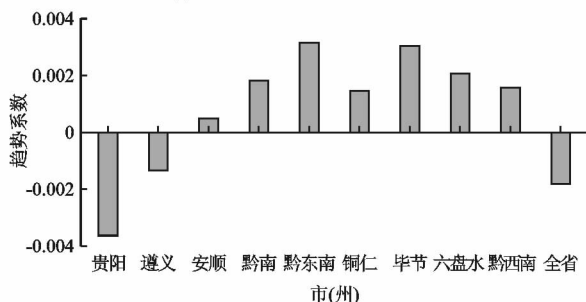
变化波动较大,但总体呈现减小趋势。其中,2004–2009年间呈增大趋势,2009–2012年间呈快速减小趋势,2012–2017年又逐步增大。造成全省压力指数变化明显的主要原因是研究时段内压力层的各项指标在不同年份的变化较大,且各个指标有增有减。例如在压力指标中,全省各地的人均生活用水量除贵阳市呈下降状态以外(下降率为45%),其余地区均有不同程度的增加,其中六盘水市的增长率最大(增长率为58%)。

由图2(c)可见,2004–2017年全省压力指数平均值为0.135,各市(州)压力指数的平均值在0.057~0.160之间。压力产生的影响存在明显的区域差异,其中对贵阳和遵义的影响最大,表明压力是影响该两市水资源脆弱性的重要因素;铜仁和黔西南的压力指数均值较小,反映出压力指数对该两市水资源脆弱性的威胁较小。

由图2(d)可看出,贵阳、遵义的水资源受到的压力属于下降趋势,其中贵阳的下降率最大,为-0.0037,表明贵阳等地水资源受到的压力在研究时段内逐渐减小;黔东南、黔南、六盘水及毕节等市(州)呈明显上升趋势,表明在研究时段内水资源状况受到压力的影响在增大,在今后的发展中压力层指标极有可能成为影响这些地区水资源脆弱性的重要因素。



(b) 2004–2017年全省压力指数变化特征



(d) 2004–2017年各市(州)和全省压力指数变化趋势

图2 不同方法计算的指标权重及2004–2017年贵州省及各市(州)压力指数变化特征

3.2 状态特征分析

采用组合权重法、层次分析法和熵权法3种方法对各状态指标进行权重计算,不同方法计算的状

态指标权重及2004–2017年贵州省及各市(州)状态指数变化特征计算结果见图3。

图3(a)表明,状态层中11个指标的权重值相

差较大,其中,层次分析法计算的权重最大值(S_6)与最小值(S_5)的差值为0.071,表明在主观判断下状态层中各指标对状态指数的影响相差较大;在熵权法中指标权重值最大差值仍为0.001,表明在利用原始数据计算下得到的结果更贴近实际的数值,而利用组合权重法计算的结果在两种方法结果之间,表明组合权重法减小了由专家打分产生的主观性和直接数据计算结果的机械性,在一定程度上增加了评价结果的客观性和准确性。11个指标中年平均降雨量(S_1)和水资源总量(S_6)的权重值最大,表明降雨量与水资源总量对状态层产生的影响较大,并对脆弱指数的影响也较大。

由图3(b)可见,2004–2017年间全省的状态指数呈下降状态,各年份间的值变化较大。其中2011–2014年状态指数急剧减小,由0.404下降到0.124,表明这段时间内状态指数对水资源脆弱指数的贡献率减小,水环境状况转好。这是由于状态层

表征的是水资源对现状的支持能力,对于水资源脆弱指数而言,其值越大,脆弱指数越大,而对于实际的水资源环境而言,其值越大,则环境状况越差。从2014年开始,状态指数有上升的趋势,可能在未来的时间内会对水资源状况造成威胁,在今后的管理中应注重状态层中的相关指标的变化,以防水资源出现不可逆转的不利情况。

由图3(c)可见,2004–2017年黔南和黔东南两地的平均状态指数偏小,表明两地的水环境状况良好,其余地区的平均状态指数值均超过0.2;贵阳市和六盘水市的值分别为0.368和0.384,状态指数偏大,表明两地区的水环境状况不佳。

由图3(d)可看出,2004–2017年全省的状态指数呈下降状态,下降趋势系数为-0.0075,表明在研究时段内贵州省的水资源状况有所提升,部分地区有转好的现象,如黔东南、铜仁,而部分地区有待加强,如贵阳和遵义。

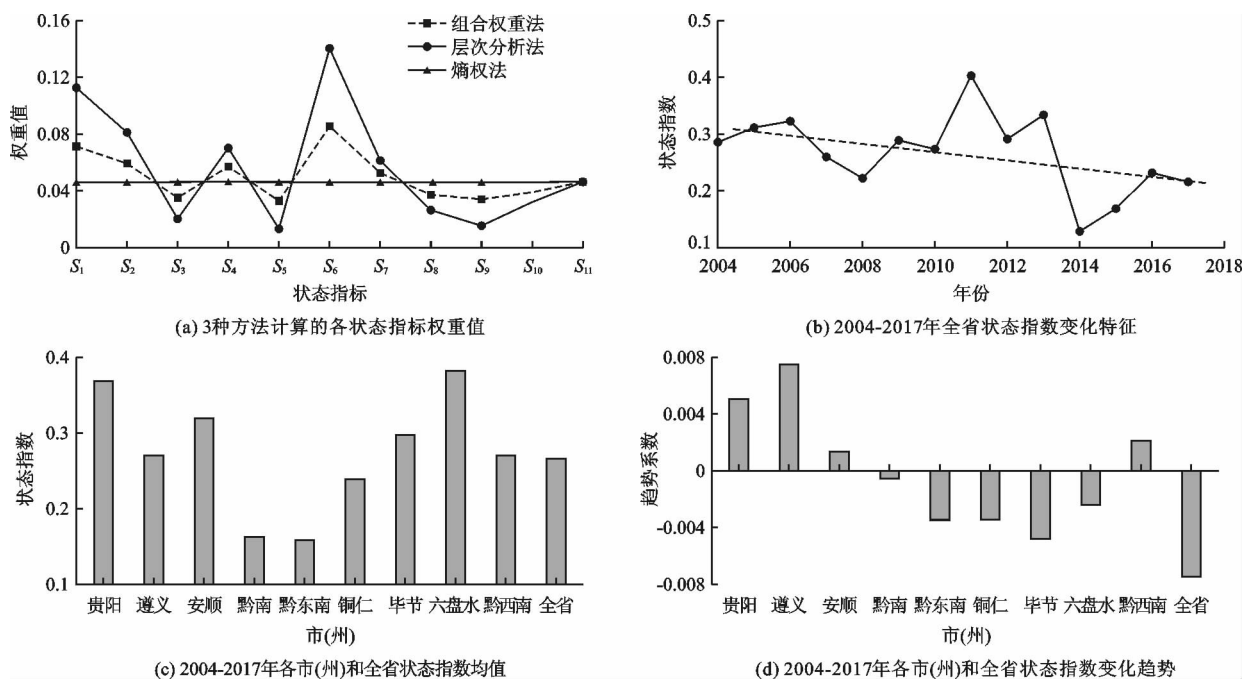


图3 不同方法计算的状态指标权重及2004–2017年贵州省及各市(州)状态指数变化特征

3.3 响应特征分析

采用组合权重法、层次分析法和熵权法3种方法对各响应指标进行权重计算,不同方法计算的响应指标权重及2004–2017年贵州省及各市(州)响应指数变化特征计算结果见图4。

图4(a)表明,采用组合权重法得到的各响应指标权重值居于其余两种方法之间,有效避免了熵权法计算结果的单一性和层次分析法权重值相差较大的影响。状态层中生态环境用水量(R_5)的权重值

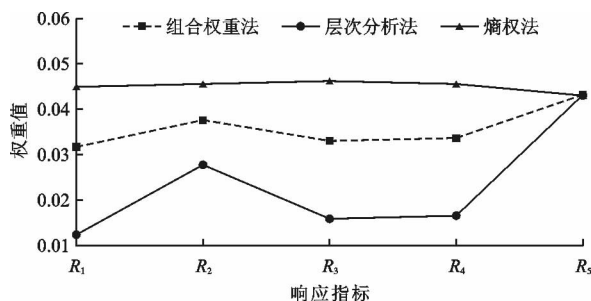
最大,说明在响应指标和评价模型当中生态环境用水量对于水资源脆弱性而言影响较大。

由图4(b)可见,2004–2017年全省响应指数在逐渐下降,表明该时段响应指数对脆弱指数的贡献率越来越小,反映出在研究时段内对于环境的治理措施在加强,因为响应层中均为负向指标,其值越大,响应指数和脆弱指数越小,表明治理力度越大。未来可通过各种治理措施来减小对水环境的影响。

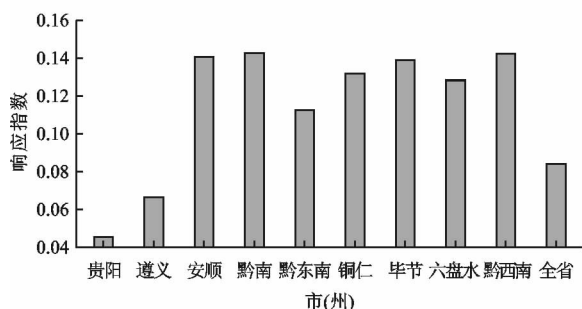
由图4(c)可见,2004–2017年全省及各市

(州)响应指数平均值在 0.045 ~ 0.142 之间,总体值偏小,表明其对脆弱指数产生的作用较小。其中贵阳、遵义的响应指数值最小,表明在该地区环境投入及保护措施的程度要大于其他地区,其余地区的响应指数值相差不大,因而全省各地区在水资源保护工作方面的重视程度相近。

由图 4(d)可看出,全省大部分地区的响应指数



(a) 3种方法计算的各响应指标权重

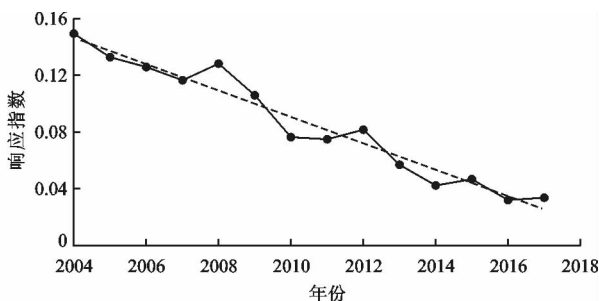


(c) 2004-2017年各市(州)和全省响应指数均值

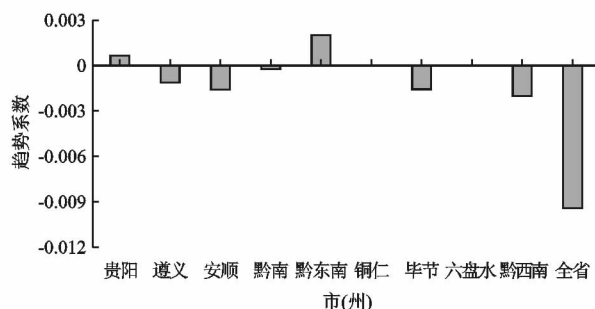
在下降,但仍有局部地区在上升,如贵阳和黔东南两地,在今后的水资源管理中应该更加重视水资源保护的投入。

3.4 脆弱性特征分析

通过公式(10)和(11)计算得出 2004 - 2017 年贵州省及各市(州)水资源脆弱指数均值和趋势变化特征,见图 5。



(b) 2004-2017年全省响应指数变化特征



(d) 2004-2017年各市(州)和全省响应指数变化趋势

图 4 不同方法计算的响应指标权重及 2004 - 2017 年贵州省及各市(州)响应指标变化特征

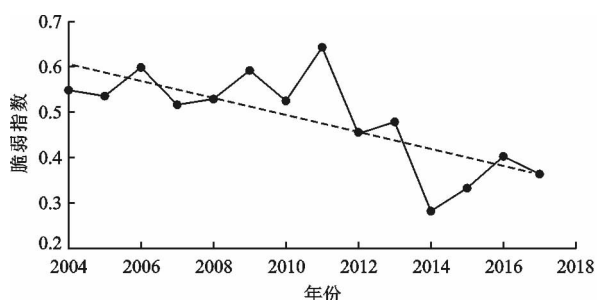
由图 5 (a) 可以看出,2004 - 2017 年间水资源脆弱指数总体呈波动下降的趋势,变化过程大致可分为 3 个阶段:2004 - 2010 年平稳变化阶段;2011 - 2014 年快速下降阶段;2015 - 2017 年缓慢上升阶段。其间 2011 - 2014 年脆弱指数从 0.642 下降到 0.280,2014 年后脆弱指数有缓慢上升的趋势,未来全省的水资源脆弱指数可能会持续升高。在评价年份中,属极度脆弱的有 2006、2009 和 2011 年,其中 2011 年的脆弱指数最高(0.642),该年份脆弱指数出现异常主要是因为 2010 年各地气象数据年际变化剧烈,平均气温普遍偏高,冬季大部分地区均高于多年平均气温,蒸发量急剧增加,而降雨总量有所下降,且时空分布不均,造成绝大部分地区出现干旱、洪涝等现象,同时污水排放量和人均生活用水量明显增大,而气候对整体水环境影响有一定的滞后性,导致脆弱指数在 2011 年出现偏高现象。2011 年后气候因素有所缓解,在政府及相关部门的政策管理下,大部分正向指标大幅度减小,负向指标中由

于气候因素变化(年平均降雨量、水资源总量、地下水资源量均有增加),使脆弱指数在一定程度上有所降低。对比夏军等^[36]、陈亚宁等^[37]和杨振华等^[38]的研究发现,气候因素是影响水资源的重要原因,与文章中 2011 年的气候数据变化异常导致脆弱指数增大的结果相似。

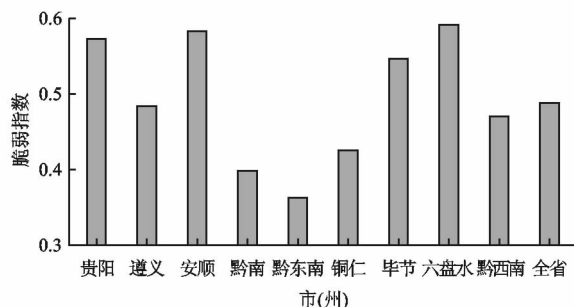
如图 5 (b) 所示,2004 - 2017 年贵州省及市(州)的水资源多年平均脆弱指数在 0.362 ~ 0.589 之间,其中脆弱指数值偏大的有贵阳、安顺、毕节和六盘水市,其值均超过 0.530,属于重度脆弱(IV 级),通过与其他研究对比发现,水资源脆弱指数偏高的地区的人类活动强度大、经济发展速度快,周奉等^[39]在黔中地区水资源脆弱性状况的对比,与本文所得的人类经济活动频繁、区域经济快速发展造成水资源脆弱性较高的评价结果一致。黄垒等^[40]对保定市地表水资源脆弱性评价表明,人为脆弱性是导致局部区域脆弱性突出的重要原因,与本文在分析贵阳、遵义和六盘水等地人为作用造成水资源

脆弱指数较高的结果相似。相对而言,本文的计算结果和评价分析具有一定的可靠性和合理性。贵州省全省的水资源脆弱指数平均值为 0.486,属于中度脆弱(Ⅲ级),与郭晓娜^[25]的研究成果相比,本文中的均值偏小,但对比脆弱性等级,两者均为中度脆弱。黔南和黔东南两地的水资源脆弱指数最低,均未超过 0.4,属于轻度脆弱,是脆弱等级当中的Ⅱ级,水环境状况总体良好。铜仁和黔西南的脆弱指数在 0.427~0.468 之间,属于中度脆弱,是脆弱等级当中的Ⅲ级。

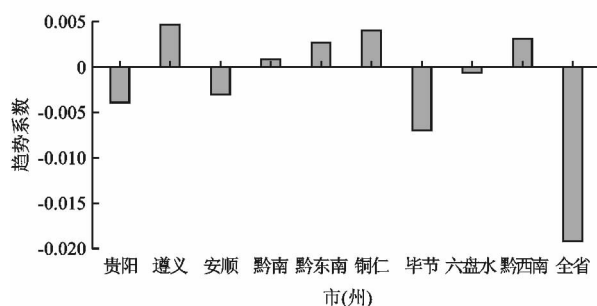
由图 5(c)可知,2004~2017 年遵义、黔南、黔东南、铜仁和黔西南地区的脆弱指数有不同程度的增大,表明在这些地区水资源脆弱性有所上升,在今后的管理上应特别注意。贵阳、安顺、毕节和六盘水市的脆弱指数呈下降趋势,表明在研究时段内这些地区的水资源状况有所好转。



(a) 2004-2017 年全省脆弱指数变化特征



(b) 2004-2017 年各市(州)和全省脆弱指数均值



(c) 2004-2017 年各市(州)和全省脆弱指数年际变化趋势

图 5 2004~2017 年贵州省及各市(州)水资源脆弱指数均值和趋势变化特征

4 结 论

贵州省地处亚热带季风气候区,降水量比较丰富,但是由于地表崎岖破碎、土壤保水性差,强烈的人类活动作用于脆弱的喀斯特生态环境,导致贵州省是我国工程性缺水极为严重的省份。本文用组合权重法对贵州省 2004~2017 年间水资源脆弱性综合指数的时空变化特征进行计算与分析,得到如下几点结论:

(1)将层次分析法和熵权法组合计算得到组合权重法,不同的权重计算方法得出的权重各不相同,组合权重法能够减小层次分析法的主观性,也能避免熵权法计算结果的单一性,从研究结果上看,组合权重法计算的权重值更贴近客观事实,更具科学性和合理性。

(2)基于 PSR 模型计算得出贵州省压力、状态、响应指数,其结果表明,压力指数>状态指数>响应指数,且 3 个指数均为下降状态,在贵州省不同市(州)的 3 个指数或增或减。

(3)脆弱指数存在明显的空间差异性,脆弱指数较高的地区主要集中在贵阳、安顺、毕节和六盘水市,脆弱指数较低的地区主要集中在黔南、黔东南以及铜仁等地,各地区所面临的水资源脆弱性问题仍然十分严峻。

(4)2004~2017 年间贵州省水资源脆弱指数总体呈波动下降的趋势,变化情况分为 3 个阶段:2004~2010 年平稳变化阶段;2011~2014 年快速下降阶段;2015~2017 年缓慢上升阶段。全省脆弱性指数平均值为 0.486,属于中度脆弱(Ⅲ级),水环境维持在可控范围之内。2006、2009 和 2011 年为极度脆弱,其余年份为重度、中度及轻度脆弱,研究时段内属于重度和中度脆弱的年份较多,水资源状况不容乐观。

(5)导致全省脆弱指数较高的原因主要是水资源面临的压力过大,且现阶段水环境状态较差,废水、污水排放总量、农用地化肥施用量、降雨量和水资源总量是影响全省脆弱性的重要因素。未来水资源管理应特别重视在气候变化条件下合理地调控水资源开发利用和生态环境保护等人类活动。

综上所述,对贵州省水资源脆弱性进行了综合且较为全面的评价,能够在水资源管理方面提供一定的理论参考。但本文也存在诸多不足之处,如文中数据仅来源于统计数据,而部分指标值以地貌单元(流域)统计更为合理,从研究结果上看可能与实

际情况存在一定误差;在指标选取上,虽做了大量统计,也结合区域特点,但是否能真实全面地反映研究区水资源的全部状况,还有待进一步研究。未来在评价单元上可尝试按照地貌单元进行分析,在保障数据的可获得性的同时能够尽可能多地选取相关指标进行研究。

参考文献:

- [1] 夏军,邱冰,潘兴瑶,等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443–451.
- [2] MOHAMMED A K, MARTIN P, ASMA A, et al. Vulnerability assessment of environmental and climate change impacts on water resources in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman[J]. water, 2014, 6(10): 3118–3135.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 夏军,翁建武,陈俊旭,等. 多尺度水资源脆弱性评价研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(S1): 1–14.
- [5] ALLER L T, BENNETT T, LEHR J H, et al. DRASTIC: Standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings[J]. Journal of the Geological Society of India, 1987, 29(1): 38–57.
- [6] FOSER S, HIRATA R. Groundwater pollution risk assessment a methodology using available data[M]. Lima, Peru: Pan American Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), 1988.
- [7] FU Surong, WANG Yanxin, CAI Hesheng, et al. Vulnerability to contamination of groundwater in urban regions[J]. Earth Science, 2000, 25(5): 482–486.
- [8] IBE K M, NWANKWOR G I, ONYEKURU S O. Assessment of ground water vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri, Southeastern Nigeria[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(3): 323–360.
- [9] 魏光辉. 基于改进灰色关联-TOPSIS模型的乌鲁木齐市水资源脆弱性评价[J]. 浙江水利水电学院学报, 2017, 29(1): 63–67.
- [10] 刘倩倩,陈岩. 基于粗糙集和BP神经网络的流域水资源脆弱性预测研究——以淮河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(9): 1317–1327.
- [11] MEN Baohui, LIU Haoyue. Water resource system vulnerability assessment of the Heihe River Basin based on pressure-state-response (PSR) model under the changing environment[J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2018, 18(6): 1956–1967.
- [12] ZHAO Y, SU X H, WANG M H, et al. Evaluation of water resources system vulnerability based on co-operative co-evolutionary genetic algorithm and projection pursuit model under the DPSIR framework[C]//China, Qingdao, 2017.
- [13] 常乐冉. 区域水资源脆弱性评价方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [14] CHEN Hongmei, LI Qing. Assessment and analysis on the water resource vulnerability in arid zone based on the PSR model[J]. Advanced Materials Research, 2014, 955–959: 3757–3760.
- [15] 吕文凯,周金星,万龙,等. 滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J/OL]. 地球学报, 2020: 1–11[2020–09–03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20200824.1307.002.html>.
- [16] PAWITAN H. Climate change impacts on availability and vulnerability of Indonesia water resources[C]//Indonesia, Solo City, 2018.
- [17] KOUTROULIS A G, PAPADIMITRIOU L V, GRILLAKIS M G, et al. Global water availability under high-end climate change: A vulnerability based assessment[J]. Global and Planetary Change, 2019, 175: 52–63.
- [18] 邹君,郑文武,杨玉蓉. 基于GIS/RS的南方丘陵区农村水资源系统脆弱性评价——以衡阳盆地为例[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1010–1017.
- [19] 夏军,雒新萍,曹建廷,等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 8–14.
- [20] CHEN Yan, FENG Yazhong, ZHANG Fan, et al. Assessing and predicting the water resources vulnerability under various climate-change scenarios: A case study of Huang-Huai-Hai River Basin, China[J]. Entropy, 2020, 22(3): 333.
- [21] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878–888.
- [22] 张信宝,王世杰,孟天友,等. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J]. 地球与环境, 2010, 38(2): 123–128.
- [23] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等. 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.
- [24] 章程. 贵州普定后寨地下河流域地下水脆弱性评价与土地利用空间变化的关系[D]. 北京: 中国地质科学院, 2003.
- [25] 郭晓娜. 西南喀斯特区水资源脆弱性评价[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017.

- [26] 张倩. 喀斯特水资源系统脆弱性评价方法、比较及其研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2018.
- [27] 穆瑾,赵翠薇. 变化环境下2000-2015年贵阳市水资源脆弱性评价[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 12-17+28.
- [28] 张凤太,赵卫权,苏维词. 面源污染视角下的岩溶区地下水脆弱性评价——基于PSR物元可拓模型的分析[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 12-19.
- [29] 张成凤,粟晓玲,蔡焕杰. 基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 1053-1063.
- [30] 陈清惠. 喀斯特生态环境脆弱性特征及其生态防治——以贵州省为例[J]. 山地农业生物学报, 2007, 26(3): 244-247+260.
- [31] 王崑,许新宜,王红瑞,等. 基于PSR与DCE综合模型的水资源短缺程度及变化趋势分析——以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1725-1734.
- [32] 杨法暄,郑乐,钱会,等. 基于DPSIR模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 77-84.
- [33] 刘丽颖,杨清伟,曾一笑,等. 喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用——以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 203-210.
- [34] 周念清,赵露,沈新平,等. 基于压力驱动模型评价长株潭地区水资源脆弱性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1061-1066.
- [35] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [36] 夏军,雒新萍,曹建廷,等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 8-14.
- [37] 陈亚宁,李稚,方功焕,等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26.
- [38] 杨振华,苏维词,李威. 基于PESBR模型的岩溶地区城市水资源安全评价——以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(5): 1-9.
- [39] 周奉,苏维词,郑群威. 基于DPSIR模型的黔中地区水资源脆弱性评价研究[J]. 节水灌溉, 2018(8): 59-65.
- [40] 黄垒,张礼中,朱吉祥,等. 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 68-73.

(上接第69页)

- [8] 彭少明,尚文绣,王煜,等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1187-1198.
- [9] 王海霞,张弛,周惠成,等. 引水条件下水库生态调度方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 1-6.
- [10] 张飒,班璇,黄强,等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 34-43.
- [11] 郭文献,陈鼎新,李越,等. 基于IHA-RVA法金沙江下游生态水文情势评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 158-165.
- [12] 吴小宏,刘招,李强,等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144-149.
- [13] 杨思雨,姜仁贵,解建仓,等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 37-42.
- [14] 于泽兴,胡国华,陈肖,等. 降水变化和人类活动对浏阳河流域径流的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11): 6-11.
- [15] 周沙,黄跃飞,王光谦. 黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力[J]. 中国环境科学, 2014, 34(03): 766-773.
- [16] 王海霞. 考虑生态目标的水库引水与供水联合调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [17] FREDERICKS J W, LABADIE J W, ALTENHOFEN J M. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 1998, 124(2): 69-78.
- [18] 黄草,黄梦迪,胡铁松,等. 拉萨河干流梯级水库库容-径流响应关系[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 64-70.
- [19] 王强,张继军. 旁多-直孔水库群联合优化调度方案研究[J]. 东北水利水电, 2018, 36(12): 1-3+10+71.