

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190440

水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载能力评价

于 钊¹, 尚熲廷², 姚 梅³, 刘佩贵⁴

(1.水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心),北京 100053;

2.合肥工业大学 汽车与交通工程学院,安徽 合肥 230009;3.安徽省水文局,安徽 合肥 230022;

4.合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

摘 要:通过耦合水足迹理论与主成分分析方法,构建基于水足迹的新疆地区水资源承载力评价指标体系,分析研究区 2010~2015 年间水资源承载能力变化情况。结果表明:2010~2015 年间新疆地区的水资源承载力呈先增大后减小的现象,2014 年水资源承载力最差,供水压力最大。其中,研究区的承载力主要受水资源和社会因素以及进出口贸易中虚拟水的影响,贡献度分别为 56.791%、22.724%。另外,外部水足迹约占水足迹总量的 10%,表明研究区出口产品中的水约占总水资源量的 10%。

关键词:水资源承载力;水足迹;主成分分析;虚拟水

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2021)01-0049-06

1 引言

水资源承载力是水资源开发利用领域研究的重要内容,也是衡量区域社会经济发展与水资源匹配程度的关键指标。目前国内外有关水资源承载力的研究方法主要有模糊综合评价法、多目标分析法、系统动力学法、人工神经网络、主成分分析法等^[1-5]。这些方法用于水资源承载力评价时各有优缺点,模糊综合评价法可以综合处理主观产生的离散过程但是模型信息利用率低;多目标分析法求解过程较为复杂、收敛速度慢,但具有自适应性且能有效解决水资源系统中的非线性问题;主成分分析法可以客观的确定各个指标的权重,解决了不同量纲的指标之间的综合性问题,但评价参数的分级标准受主观因素影响较大。

上述这些评价方法在数据选取方面仅体现了农业、居民生活和生态环境用水量等方面的信息,没有反映与研究区居民消费相对应的水资源真实需求量^[6],实际上,水资源的消耗和污染与商品消费类型和数量以及提供消费者产品和服务的全球经济的结构密不可分^[7]。2007 年,Hoekstra 结合虚拟水理论和生态足迹理论提出的水足迹理论^[8],充分反映了人类活动与水资

源系统的相互作用关系,用该方法研究水资源承载力可以更客观真实地反映研究区内的社会、经济或生态对水资源的需求和占用情况,且能计算得到进出口贸易中虚拟水的比例,进而揭示水资源的消耗状况,弥补了前述评价方法中的不足。

水资源承载力的评价对象社会、经济和生态环境系统具有复杂性、综合性、时效性等特点,很难用某个单一指标刻画。为此,本文综合考虑主成分分析法和水足迹法的优点,结合新疆地区的实际条件,构建基于水足迹理论的水资源承载能力综合评价指标,通过建立两种方法下的耦合模型,评价新疆 2010~2015 年的水资源承载状况,反映研究区水资源的主要用水环节和占比以及虚拟水的情况,以期增大水资源承载力评价结果的信息量。

2 研究区概况

新疆地区位于亚欧大陆腹地,远离海洋,气候干燥少雨,属于温带大陆型干旱气候。1956~2015 年多年平均降水量 154.6mm,其中南部平原区在 70mm 以下,最小的托克逊只有 7mm。水面蒸发量为 1 500~3 400mm,平均干旱指数达到 7 以上。境内分布有湖泊 100 多

收稿日期:2019-12-09

基金项目:水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金(2018nkms06)

作者简介:于钊(1973-),男,江苏南京人,高级工程师,主要研究方向为水资源管理与地下水。E-mail: yupo@mwr.gov.cn

通讯作者:尚熲廷(1981-),男,山东金乡人,博士,主要研究方向为水文物理规律。E-mail: hfut_smt@163.com

个、大小河流共 570 条,较大的有伊犁河、额尔齐斯河、塔里木河、玛纳斯河、乌伦古河、开都-孔雀河等 20 多条,除伊犁河、额尔齐斯河外,其它河均属于内流河。高山冰川和积雪分布普遍,储量丰富,是大部分河流的主要补给来源。根据《新疆统计年鉴》2010~2015 年全疆水资源条件及社会经济状况如表 1 所示。

表1 2010~2015年新疆社会经济及水资源量统计

Table1 The statistics of social economy and water resources in Xinjiang during 2010-2015

指标	年份					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
国内生产总值/亿元	5 437.47	6 610.05	7 570.31	8 443.84	9 273.46	9 325
城镇化率/%	42.79	43.54	44	44.47	46.07	47.23
万元 GDP 用水量/m ³	984	792	728	648	628	619
人均用水/m ³	2 453	2 370.2	2 705.9	2 594.5	2 505	2 461
降水量/10 ⁸ m ³	3 729	2 745	2 999	3 036	2 394	2 942
水资源总量/10 ⁸ m ³	1 124	885.7	903.2	951.3	726.9	917.6
生产用水量/10 ⁸ m ³	510.69	507.19	577.29	574.86	567.28	561.37
生活用水量/10 ⁸ m ³	7	7.63	8.82	9.16	9.28	10.02
生态用水量/10 ⁸ m ³	17.39	8.69	4.02	4.05	5.27	5.79
废污水排放总量/10 ⁴ t	11.586	10.349	10.663	10.825	10.825	10.777
农业综合亩均用水量/m ³	568.9	645.7	640	619.8	601.5	595
总人口/万人	2 185	2 209	2 233	2 264	2 298	2 360

3 基本理论

3.1 水足迹

水足迹定义为任何一个国家、一个地区或一个人在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源量^[7]。该定义从社会消费角度出发,兼顾了社会水资源消费的物质以及社会价值,是衡量某个国家或者特定区域的实际水资源消耗量的方法。一个国家或地区的实际水资源使用量不仅包括区域内产品生产或者服务所需的本地水资源总量,还包括区域进口产品和服务的虚拟水总量。本文采用自上而下法计算区域水足迹总量,表达式为:

$$WFP=IWF+EWFP \quad (1)$$

式中:WFP 表示一个地区水足迹总量;IWF 为内部水足迹,表示区域内商品与服务所利用的水资源总量;

EWFP 为外部水足迹,表示该地区从其他国家或地区进口的虚拟水总量。

内部水足迹和外部水足迹总量计算公式分别为:

$$IWF=A W U+I W W+D W W+E W W-V W E_{\text{出口}} \quad (2)$$

$$EWFP=V W I-V W E_{\text{进口再出口}} \quad (3)$$

式中:A W U 为农业生产需水量;I W W 为工业生产需水量;D W W 为居民生活需水量;E W W 为生态需水量;V W E_{出口} 为出口虚拟水量;V W I 为研究区从其它地区或国家进口的虚拟水量,V W E_{进口再出口} 为进口后再出口的虚拟水总量。

因工业行业众多,且生产流程复杂,而产品中的虚拟水含量与生产流程紧密相关,现阶段关于工业产品中的虚拟水含量还没有科学有效的解决办法。目前虚拟水计算中最主要的部分是农作物产品的虚拟水和动物产品的虚拟水。

农作物生产过程中的水主要消耗于蒸散发,因此,农作物和水之间的关系较清晰,但如果涉及到农产品的深加工,则一般采用价值构成比例和产品重量比例因子来进行虚拟水含量计算。单一农作物产品虚拟水含量可以根据公式(4)计算^[9]:

$$V_{cn}=\frac{W_{cn}}{Y_{cn}} \quad (4)$$

式中:V_{cn} 为作物单位重量的虚拟水含量;W_{cn} 为作物的需水;Y_{cn} 为作物的产量。

计算动物产品的虚拟水含量需要将活动物的虚拟水含量在动物产品间进行分配。因此将产品按状态划分为两类,直接由活动物提供的产品称为第一类动物产品,第一类产品经进一步加工变成第二类动物产品。第一类动物产品的虚拟水含量用产品比例因子和价值比例因子计算;第二类初级产品间用水的分配可以采用同第一类动物一样的产品比例因子和价值比例因子进行分配^[9]。

新疆主要出口产品为棉纱、肠衣、番茄酱、药材;进口产品为纸与纸板、食用植物油、羊毛及条、牛皮革及马皮革、锯材、原木。根据公式(4),并参考文献[11]中的部分数据,得到研究区每种产品的虚拟水含量^[10](见表 2)。

3.2 主成分分析法

主成分分析法是一种把多个变量划分为少数几个综合指标的多元统计方法,其本质是对高维变量空间进行降维处理,以使原来的多个变量达到最佳综合简化^[11]。阐述该方法原理及的研究成果较多,本文不再

表2 新疆主要进出口产品虚拟水含量

Table2 The virtual water quantity of Xinjiang's main import and export products

主要出口产品	虚拟水含量 /m ³ ·t ⁻¹	主要进口产品	虚拟水含量 /m ³ ·t ⁻¹
棉纱	9713.9	纸与纸板	4693.7
肠衣	3576	食用植物油	3065.4
番茄酱	270.5	羊毛及条	18005
		牛皮革及马皮革	20069
药材	147.6	锯材	1843.5
		原木	1418.1

过多分析,仅将该方法的主要计算过程综合为图 1。

用主成分分析法评价水资源承载力评价时,其变量均是考虑水资源、经济和社会三个方面,这些变量的数值仅反映了农业、居民生活和生态环境的绝对用水量,实际上,水资源的消耗与商品类型和数量以及提供消费者的产品和服务有关。为此,先将水足迹中的内部水足迹与外部水足迹的计算分别引入到相关的变量中,再通过降维的方法确定主成分,从而实现将水足迹与主成分分析方法进行耦合。

4 水资源承载力评价结果与分析

4.1 构建基于水足迹理论的评价指标体系

水资源承载力评价指标既要反映社会经济、生态环境和资源等系统的发展指标,又要有反映上述系统的相互协调程度的指标,以尽量全面反映水资源承载力评价系统各方面的发展特征,且为避免单一指标

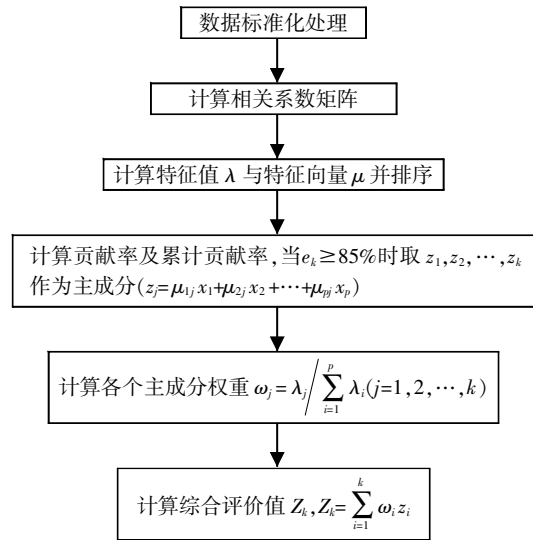


图 1 主成分分析法流程

Fig.1 The flowchart of principal component analysis

评价结果的片面性。本文根据水足迹的原理、构成以及与水资源利用之间的关系,围绕研究区的社会、经济和环境因素的影响,结合进出口产品,构建了 10 项水足迹指标用以综合评价区域水资源承载力,这些水足迹指标不仅反映了水资源组成情况,水资源的利用情况以及紧缺程度,表明了区域水资源战略结构,还体现了区域水资源的社会价值、对社会经济的贡献率以及进出口贸易中虚拟水的比例,因此,这些指标具有一定的代表性及合理性^[2]。每项指标的表达式及意义如表 3 所示。

表 3 基于水足迹理论的水资源承载力评价指标

Table3 The evaluation index system for water resources carrying capacity based on water footprint theory

影响因素	评价指标	表达式	表征意义
社会系统	单位面积水足迹 X ₁	单位面积水足迹 = $\frac{WFP}{A}$	单位面积水资源承载能力(A 表示区域面积)
	人均水足迹 X ₂	人均水足迹 = $\frac{WFP}{N}$	水资源支撑人口能力(N 表示总人口数)
	水足迹增长率 X ₃	水足迹增长率 = $\frac{WFP_{现} - WFP_{前}}{WFP_{前}} \times 100\%$	水足迹增长幅度
经济系统	水足迹经济效益 X ₄	水足迹经济效益 = $\frac{GDP}{WFP}$	万元 GDP 所消耗的水足迹量
	水足迹净贸易值 X ₅	水足迹净贸易量 = $VWE - EWFP$	水资源贸易地位及作用
	水足迹价值兑换率 X ₆	水足迹价值兑换率 = $\frac{\text{进口贸易值}/EWFP}{\text{进口贸易值}/VWE}$	水足迹贸易价值对比
水环境系统	生态水足迹比率 X ₇	生态水足迹比率 = $\frac{EW}{WFP} \times 100\%$	对生态环境重视程度
	水足迹废弃率 X ₈	水足迹废弃率 = $\frac{WV}{WFP} \times 100\%$	水资源有效利用程度
	水资源匮乏度 X ₉	水资源匮乏度 = $\frac{WFP}{WA}$	水资源紧缺状态(WA 表示水资源总量)
	水资源压力指数 X ₁₀	水资源压力指数 = $\frac{IWFP + VWE_{出口}}{WA}$	对水资源的需求程度

4.2 水资源承载力评价结果分析

(1)水足迹方法。用水足迹理论评价水资源承载力时最常用的评价指标是水资源匮乏度和水资源压力指数,指标值越小,表明压力越小,水资源承载状况越好。根据表 2 的计算表达式得到 2010~2015 年评价指标值,由图 2 可以看出,这两个指标值在 2010~2015 年间呈先增大后减小的趋势,2010 年两指标值最小,均为 0.48;2014 年指标值达到最大,分别为 0.82 和 0.80,表明在该研究时段内,2010 年水资源承载状况最好,而 2014 年水资源承载状况最差。表明 2010~2014 年间新疆地区的水资源匮乏度和压力均在增加,即供需矛盾较突出。由图 2 和表 1 的水资源总量、降水量数据可以看出,实际条件下 2010 年降水量最多,水资源总量最大,到了 2014 年降水量比 2010 年减少了 35.80%,水资源总量最少,需水量基本不变,相应的水资源压力会增大。由此可见,水足迹评价结果与实际条件一致,也验证了水足迹评价结果的合理性。

研究区 2010~2015 年的内部水足迹、外部水足迹

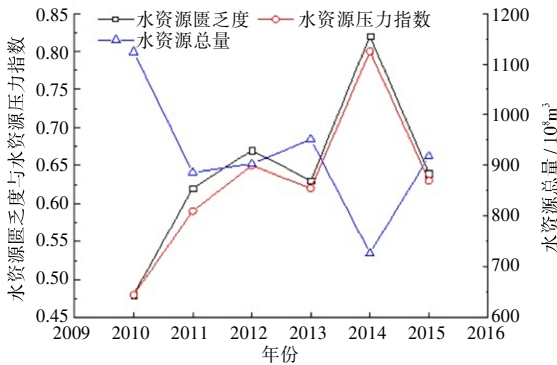


图 2 水资源匮乏度和水资源压力指数及水资源总量变化过程
Fig.2 The change processes of water scarcity, water resources press index and gross amount of water resources

和水足迹总量见图 3。由图 3 可知,计算时间段水足迹总量呈现先递增至 2012 年后又开始缓慢递减的现象,表明 2010~2012 年间的用水量逐年递增。其中内部水足迹占水足迹总量的 90%以上,内部水足迹揭示的是区域内商品与服务所利用的水资源总量,外部水足迹反映的则是该地区从其他国家或地区进口的虚拟水总量,表明研究区绝大部分的水资源是消耗于区内,约有 10%左右的水是随着产品进口引入的,这与新疆地区大部分都是内陆河相吻合。

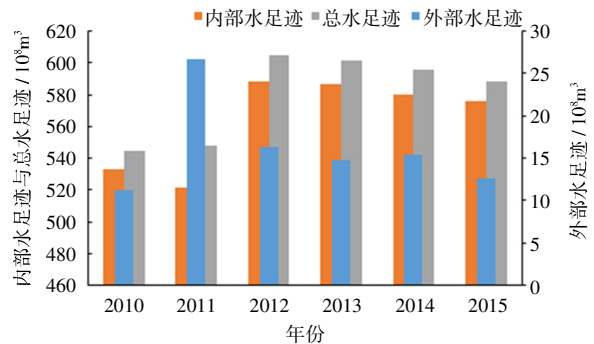


图 3 水足迹变化

Fig.3 The variation of water footprint

(2)水足迹与主成分分析法耦合。为了便于比较,将评价指标中逆向指标 X_4, X_8, X_9, X_{10} 转化为正向指标,并经标准化后,借助 SPSS 软件计算得到中各个指标间的相关系数矩阵(见表 4)和主成分特征值及贡献率(见表 5)。从表 4 数据可以看出各因子之间存在显著的相关关系,其中, X_1 与 X_2, X_1 与 X_7, X_1 与 X_8, X_5 与 X_6, X_7 与 X_8 之间的相关系数均超过 0.8, 间接表明主成分分析方法可以客观分析研究区 2010~2015 年间的水资源承载状况。

表 5 的数据表明前三个因子的累计贡献率达到

表 4 相关系数矩阵
Table4 The correlation coefficients matrix

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1									
X_2	0.808	1								
X_3	-0.576	-0.739	1							
X_4	-0.691	-0.165	-0.011	1						
X_5	0.284	0.139	-0.092	-0.105	1					
X_6	-0.009	0.013	-0.089	0.264	0.921	1				
X_7	0.879	0.646	-0.455	-0.765	-0.164	-0.446	1			
X_8	-0.856	-0.652	0.519	0.718	0.219	0.479	-0.994	1		
X_9	0.661	0.410	-0.223	-0.760	-0.185	-0.527	0.748	-0.739	1	
X_{10}	0.689	0.420	-0.215	-0.782	-0.105	-0.459	0.741	-0.725	0.996	1

表5 主成分特征值和贡献率

Table5 The principal component eigenvalues and contribution rates

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.679	56.791	56.791
2	2.272	22.724	79.515
3	1.346	13.457	92.972

了 92.972%,达到了超过 85%的要求,可以较全面地反映新疆地区水资源承载力变化的驱动因素,因此,选取前三个因子作为主成分来分析新疆地区的水资源承载力状况。

主成分荷载矩阵反映了各主成分与变量之间的关系,相关系数值越大,说明该变量对主成分的影响越大。从表 6 的数据可以看出第一主成分主要与 X_1 、 X_2 、 X_7 、 X_9 和 X_{10} 呈显著正相关,与 X_8 呈负相关,因此定义第一主成分为反映水资源受环境和社会因素的影响;其贡献度达到了 56.791%,体现了区域水资源及社会因素对水资源承载力影响的占比;第二主成分主要与 X_5 、 X_6 呈正相关关系,定义第二主成分为刻画水资源受经济贸易的影响,体现了进出口贸易中虚拟水的地位和作用,其贡献率为 22.724%;第三主成分主要与 X_3 呈正相关关系,定义其揭示水资源的发展状况,它的贡献率为 13.457%。

根据主成分计算过程得到水资源承载力综合评价得分值(见图 4,因原始数据小于均值的数据标准化后

表6 主成分荷载矩阵

Table6 The principal component load matrix

变量	1	2	3
X_1	0.894	0.424	0.058
X_2	0.676	0.495	-0.428
X_3	-0.487	-0.512	0.601
X_4	-0.771	0.099	-0.583
X_5	-0.117	0.86	0.495
X_6	-0.432	0.863	0.26
X_7	0.963	-0.016	-0.053
X_8	-0.959	0.033	0.137
X_9	0.88	-0.24	0.219
X_{10}	0.877	-0.179	0.275

为负,所以最后的得分有正负值)。该分值反映了计算时间段所处的相对位置,综合得分越高,说明水资源承载力越好,开发潜力越大,反之,表征水资源承载力越差。由图 4 可以看出,第一主成分与综合得分变化趋势基本一致,说明综合得分受第一主成分影响较大,表明

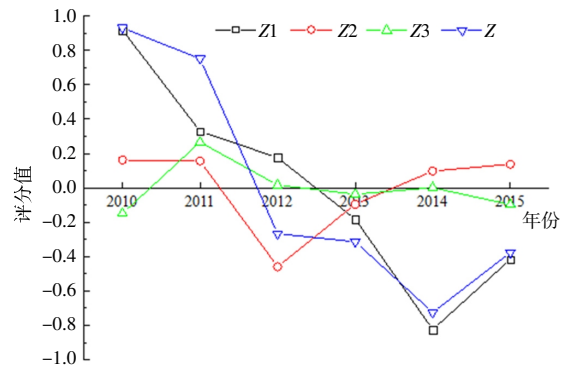


图 4 水资源承载力综合评价得分值

Fig.4 The comprehensive evaluation scores of water resources carrying capacity

新疆地区水资源承载力与水资源环境和社会因素的影响较大。另外 2010~2014 年间 Z 值逐年减小,2014 年达到最低值,表明新疆水资源承载力状况越来越差,2014 年达到最差状态。分析主要原因是由于随着新疆社会经济的发展,各行业用水量的不断增大,其次 2014 年降水量比 2010 年减少了 35.80%,致使水资源供给面临的压力越来越大,但随着国家实施最严格水资源管理,特别是制定的“三条红线”,水资源用水总量得到了有效控制,节水水平提高,也增大了水资源的利用效率,2015 年水资源压力有所缓解,水资源承载力得分值也开始增大。综上可以看出,基于水足迹与主成分分析法耦合的承载力评价结果与研究区实际水资源供需状况一致。

综合对比水足迹、水足迹与主成分分析法耦合的评价结果可以看出,两种方法的评价结果完全一致,新疆地区 2010~2015 年间的水资源承载力均是呈先增大后减小的现象,且在 2014 年水资源承载力最差,供水压力最大。但水足迹的评价指标是水资源匮乏度和水资源压力,仅能定量反映研究区水资源的压力情况,二者均不能揭示影响水资源承载力的因素。而水足迹与主成分分析法耦合后,在综合考虑社会经济水环境系统下各项指标的相关性基础上,不仅可以明确主要影响因素,揭示水资源组成情况、水资源的利用情况以及紧缺程度,还可以揭示进出口贸易中虚拟水所占的比例,得出的评价结果信息量更大。

5 结论

水资源承载力是保障水资源可持续利用的重要研究内容,特别在西北干旱地区,掌握水资源的利用状况,摸清其影响因素的重要性尤为突出。本文将水

足迹理论与主成分分析法的优点进行耦合,构建了基于水足迹的水资源承载力评价指标体系,借助自上而下的水足迹计算方法计算新疆地区 2010~2015 年间的水足迹构成及水足迹评价指标数值,同时,评价得到了耦合方法下的水资源承载力结果。综合对比分析结果表明其评价结果与新疆地区的实际情况一致,2014 年承载力状况最差,这与前人研究成果一致,也表明了水足迹与主成分分析法耦合后用于水资源承载力评价的正确性与可行性。在影响因素方面,主要受控于区域水资源环境和社会因素以及经济贸易的影响,其贡献度分别达到了 56.791%、22.724%。另外,评价结果还揭示出研究区的外部水足迹约占水足迹总量的 10%,说明研究区内约有 10%左右的水是消耗于出品产品。

传统的水资源承载力评价结果仅反映出了评价指标的用水量以及由此评价得到的承载状况,而实际上用水量与产品的类型、数量、结构等有关,但一般的评价方法或结果很难得出不同产品水的消耗情况。本文提出的水足迹与主成分分析法耦合后,不仅可以评价得到承载力的状况,还可以真实地反映研究区内的社会、经济或生态等对水资源的需求和占用情况,计算出进出口贸易中虚拟水的比例,从产品角度深入了解水资源的占用及消耗情况,丰富了水资源承载力的评价结果。

参考文献:

- [1] 李娜, 范海梅, 许鹏, 等. BP 神经网络模型在象山港水环境承载力研究中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2019,28(1):125-133. (LI Na, FAN Haimei, XU Peng, et al. Application of BP neural network model in water environmental carrying capacity research of Xiangshan Bay [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019,28(1):125-133. (in Chinese))
- [2] 曹虎. 基于多目标模型的大凌河流域水环境承载力研究[J]. 水利规划与设计, 2019,(4):44-46. (CAO Hu. Research on water environmental carrying capacity of Daling River basin based on multi-objective model [J]. Water Resources Planning and Design, 2019,(4):44-46. (in Chinese))
- [3] 赵强, 李秀梅, 高倩, 等. 基于模糊综合评判的山东省水资源承载力评价[J]. 生态科学, 2018,37(4):188-194. (ZHAO Qiang, LI Xiumei, GAO Qian, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Shandong province based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Ecological Science, 2018,37(4):188-194. (in Chinese))
- [4] 杨光明, 时岩钧, 杨航, 等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估—以重庆市为例[J]. 人民长江, 2019,50(8):6-13. (YANG Guangming, SHI Yanjun, YANG Hang, et al. Assessment of sustainable development of water resources carrying capacity based on system dynamics model: case of Chongqing City [J]. Yangtze River, 2019,50(8):6-13. (in Chinese))
- [5] 赵自阳, 李王成, 王霞, 等. 基于主成分分析和因子分析的宁夏水资源承载力研究[J]. 水文, 2017,(2):64-72. (ZHAO Ziyang, LI Wangcheng, WANG Xia, et al. Study on water resources carrying capacity in ningxia based on principal component analysis and factor analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2017,(2):64-72. (in Chinese))
- [6] 张斌, 黄显峰, 方国华, 等. 基于水足迹理论的连云港市水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2012,(6):61-64. (ZHANG Bin, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Evaluation of water resources security in Lianyungang based on water footprint theory [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012,(6):61-64. (in Chinese))
- [7] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007,21(1):35-48.
- [8] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions, 2005,15(1):45-56.
- [9] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北 4 省(区)虚拟水实证研究[J]. 地球科学进展, 2004,19(4):577-584. (LONG Aihua, XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang. Theory and method of virtual water: a case study of northwest China [J]. Advances in Earth Science, 2004,19(4):577-584. (in Chinese))
- [10] 程中海. 干旱区绿洲农产品虚拟水贸易足迹实证研究——以新疆为例[J]. 国际贸易问题, 2013,(10):77-89. (CHENG Zhonghai. Virtual water trade footprint of agricultural products in oases in arid areas: an empirical case study of Xinjiang Province in China [J]. Journal of International Trade, 2013,(10):77-89. (in Chinese))
- [11] 李小冰, 胡滨. 基于主成分分析法的陕西省水资源承载力评价[J]. 地下水, 2017,(5):161-163. (LI Xiaobing, HU Bin. Evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province based on principal component analysis [J]. Ground Water, 2017,(5):161-163. (in Chinese))
- [12] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011,(3):486-495. (QI Rui, GENG Yong, ZHU Qinghua. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method [J]. Journal of Natural Resources, 2011,(3):486-495. (in Chinese))

Water Resources Carrying Capacity Evaluation Based on Water Footprint and Principal Component Analysis in Xinjiang

YU Po¹, SHANG Manting², YAO Mei³, LIU Peigui⁴

(下转第 34 页)

- China, 2010,29(4):603–609. (in Chinese))
- [16] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安:陕西科技出版社, 2004. (MA Zhiyuan. Environmental Isotope Groundwater Literature [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [17] Yurtservea Y. Worldwid survey of stableisotopes in percipitation[R]. Vienna: Isotope Hydrology International Atomic Energy Agency,1975.
- [18] 王东升. 中国大气降水氢氧同位素浓度场的时间-空间展布及其环境效益[M]. 天津:天津大学出版社, 1993. (WANG Dongsheng. Time-Space Distribution and Environmental Benefits of Hydrogen-Oxygen Isotope Concentration Field of Meteoric Precipitation in China [M]. Tianjin: Tianjin University Press,1993. (in Chinese))
- [19] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京:地质出版社, 1991. (WANG Hengchun. Introduction to Isotope Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Press,1991. (in Chinese))
- [20] 宋小庆,彭钦,段启杉,等. 黔东南地区地热水化学特征及起源[J]. 地球科学, 2019,44(9):2874–2886. (SONG Xiaoqing, PENG Qin, DUAN Qishan, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of geothermal water in northeastern Guizhou [J]. Earth Science, 2019,44(9):2874–2886. (in Chinese))
- [21] 苏艳,马致远,刘方,等. 西安咸阳地下水热水氘过量参数研究[J]. 煤田地质与勘探, 2007,(3):39–41. (SU Yan, MA Zhiyuan, LIU Fang, et al. Deuterium excess parameter features study on thermal groundwater of Xi'an and Xianyang [J]. Coal Geology and Exploration, 2007,(3):39–41. (in Chinese))

Analysis of Geothermal Water Source by H and O Isotopes in Shiqian Area

LI Yongkang^{1,2}, CHEN Zhengshan^{1,3}, WANG Ganlu¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Sichuan Zhide Geotechnical Engineering Co. LTD, Chengdu 610041, China;

3. Guizhou Geology and Mineral Exploration and Development Bureau 117 Geological Brigad, Guiyang 550018, China)

Abstract: Based on the analysis of geothermal and geological conditions, chemical composition, hydrogen and oxygen isotopes of geothermal water, cold springs and rivers in the Shiqian area, Guizhou Province, this paper studied the hydrochemical characteristics, sources and recharge modes. Hot spring water belongs to the weak alkaline water with low and medium salinity. Ca^{2+} and Mg^{2+} are the major cations while SO_4^{2-} and HCO_3^- are the main anions in hot spring group, and the main hydrochemical types are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{SO}_4\text{.HCO}_3\text{-Ca}$. The values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD are -9.32‰ – -6.81‰ and 64.4‰ – 44.9‰ respectively in hot water, and 7.51‰ – 6.00‰ and -50.7‰ – -38.2‰ respectively in cold springs and rivers, which are distributed near the atmospheric precipitation line and the local atmospheric precipitation line in China. It is speculated that the recharge area could be the exposed carbonate rock area near the Paomuzhai anticline and the Hongshi strike-slip fault and its fault bundle. Deuterium surplus parameter d indicates characteristics of shallow depth in most geothermal water, short time of circulation runoff, relatively weak water-rock reaction and the geological environment is between open and semi-open in the Shiqian area.

Key words: Shiqian, Guizhou; geothermal water; H and O isotopes; deuterium surplus parameter d ; recharge sources

(上接第 54 页)

(1. Information Center (Hydrological Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

2. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Hydrological Bureau of Anhui

Province, Hefei 230022, China; 4. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: By coupling the water footprint theory and principal component analysis method, this paper constructed an evaluation index system of water resources carrying capacity (WRCC) in Xinjiang and analyzed the changes in WRCC during 2010–2015. The results show that the WRCC increased first and then decreased from 2010 to 2015. The WRCC was the worst while the water supply pressure was the largest in 2014. The carrying capacity is mainly affected by water resources and social factors, as well as virtual water in import and export trade. The corresponding contributions are 56.791% and 22.724% respectively. In addition, the external water footprint accounts for about 10% of the total water footprint. It reveals that the water in the export products of the study area accounts for about 10% of the total water resources.

Key words: water resources carrying capacity; water footprint; principal component analysis; virtual water