

宁夏全区及5市水循环健康状况分析

贾易周¹, 田宇哲¹, 唐莲^{1,2,3}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学 旱区现代农业水资源高效利用教育部创新团队, 宁夏 银川 750021)

摘要: 针对水环境及水资源基础条件变化下的水循环健康问题,以宁夏全区及其所辖5个地级市为研究对象,收集2010-2018年的相关基础数据资料,结合当地区域水资源实际状况,筛选出15个评价指标,利用主成分分析法对宁夏及5市水循环健康状况进行评价分析。结果表明:宁夏全区及5市的水循环健康状况均呈现整体上升的趋势,但由于各地区在经济发展及水环境治理政策之间的差异,因此在影响因素方面存在明显的地区差异性。银川市水循环健康状况主要受农业用水量和污水处理的影响,石嘴山市的主要影响因素是当地水资源量及污水处理能力,吴忠市主要取决于当地的生态投资及排水管道建设,固原市主要受当地水资源总量限制,中卫市的主要影响因素是农业用水量和绿化率。

关键词: 水循环健康评价; 主成分分析; 水资源; 影响因素; 宁夏回族自治区

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)06-0109-07

Analysis of water cycle health status in Ningxia Hui Autonomous Region and its five subordinate cities

JIA Yizhou¹, TIAN Yuzhe¹, TANG Lian^{1,2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Research Team of Efficient Utilization of Modern Agriculture Water Resources in Arid Areas, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming at the impact of changes in water environment and basic water resources conditions on the water cycle health, the whole region and five individual cities of Ningxia were taken as the research objects, and relevant basic data from 2010 to 2018 were collected. Based on the actual situation of local water resources, 15 evaluation indices were selected to evaluate the health status of the water cycle in the whole region and five cities, using principal component analysis. The results show that the health of the water cycle in the whole region and five individual cities of Ningxia showed an overall upward trend. However, due to the differences in economic development and water environment governance policies in various cities, there were obvious regional differences in influencing factors. The water cycle health of Yinchuan City was mainly affected by agricultural water consumption and sewage treatment; the main influencing factors in Shizuishan City were the amount of local water resources and sewage treatment capacity; Wuzhong City was bound by local ecological investment and drainage pipeline construction; Guyuan City was mainly limited by the total amount of local water resources; and the main influencing factors in Zhongwei City were agricultural water consumption and greening rate.

Key words: water cycle health; principal component analysis; water resources; influencing factor; Ningxia Hui Autonomous Region

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-07-07

基金项目: 2018年宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BEG03008); 宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)建设项目(NXYLXK2017A03)

作者简介: 贾易周(1996-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为水资源调控。

通讯作者: 唐莲(1975-), 女, 宁夏银川人, 博士, 教授, 研究方向为旱区水资源调控理论及技术。

1 研究背景

宁夏回族自治区是我国极度干旱缺水的省区之一,作为唯一全境属于黄河流域的省区,宁夏得黄河之利而久享盛名,黄河安澜则宁夏安康。但宁夏生态脆弱,由水资源短缺而伴生的环境生态问题一直是区域亟待解决的问题。目前,宁夏被委以建设黄河流域生态保护和高质量发展的先行区的重任,全区围绕生态环境保护及可持续发展积极开展研究,力求实现科学研究支撑科学决策,水健康循环状况研究是其中重要的课题。宁夏下辖银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市和固原市5个地级市,5市分别处于中部平原北部引黄灌区、中部干旱及南部山区,不同地区的降雨量及水资源禀赋条件不同,社会发展条件也不同,造成各区域的水循环状况差异明显。

水资源的再生、循环分为自然循环以及社会循环,这两种状态相互影响、相互响应,要求人类社会对水资源的利用必须处于一个满足自然规律、符合人类需求的良性循环系统中。由此,张杰等^[1-2]最早提出了水健康循环的概念,建立了较为系统的城市水系统健康循环理论,提出对水资源进行合理充分地使用,最大程度减少上游用水循环对下游水体功能的影响,使水的社会循环不干扰其自然循环,从而实现水资源的可持续利用。该理论要求首先要合理用水,确保国民在未来能够享受到健全水循环带来的益处,其次要维持健全的水循环^[3]。因此,要实现最佳的水循环,应重点考虑水的数量资源、生态环境、水质和用水效率,在水污染严重的地区应侧重考虑生态环境及水质,在水资源短缺且生态问题突出地区应侧重考虑水量及用水效率、生态保障等。

水循环健康一直是国内外研究的热点问题,但相应的成果比较分散,系统的理论成果不丰富。在国际上,各个专家学者分别从社会水循环的不同方面来进行分析,如Linton等^[4]更精确地定义了社会水循环的概念并且提出了一个水政治生态的理论框架,以此来阐明社会水循环对社会结构和关系的塑造以及其在空间和时间上产生的影响;Furumai^[5]分析了东京的社会水循环,并指出雨水与再生废水对实现东京可持续发展的重要作用;Viglione等^[6]指出社会水循环在减少洪水危险上的重要作用;Zhang等^[7-8]基于水循环主要存在的问题对北京的水循环状况进行了分析并寻找其造成差异的原因,同时基于最佳水循环的定义建立了可对京津冀地区的水资源承载力进行分析

的模式。在国内,莫谡谡^[9]结合社会经济发展,首次在水循环健康理论体系中引入城市生态文明建设,丰富了城市社会水循环健康理论内容;王富强等^[10]阐释了区域健康水循环内涵,指出近10年京津冀地区水循环健康状况总体呈逐步向好趋势,但水循环健康状况依然主要受水资源短缺的影响;栾清华等^[11]通过对天津市水循环健康状况进行评价,得出目前天津市水循环状况正处于亚健康平稳期,须重点关注水体治理、污水处理等方面的问题,才能促进区域水循环转向健康运行;王浩等^[12]指出在全球城市化的趋势下,可通过城市治水来提高水循环健康程度,提出了城市水循环演变机理分析方法;唐继张等^[13]以西安市为例,以城市水循环内涵为基础构建了城市水循环健康评价体系,指出只有提高水资源开发利用的合理性、缓解水资源供需矛盾才能改善西安市水循环健康状况。上述研究表明,通过水循环健康状况的评价能为解决区域水问题提供指导作用。但这方面的研究还需要更丰富的实践。因此,本文拟采用主成分分析法对宁夏的水循环健康状况进行初步研究,并对宁夏全区及其所辖5市的水循环健康状况进行比较评价。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于我国西北内陆的黄河中上游流域,气候干旱少雨,蒸发量大,平均年水面蒸发量为1 250 mm,变幅在800~1 600 mm之间。降水量由南向北依次递减,固原市年均水面蒸发量最大,石嘴山市最小,在150~600 mm之间。全区平均年径流深为18.3 mm,是黄河流域平均值的1/3,是全国均值的1/15,全区径流深分布极不均匀,由南向北逐渐递减。

2.2 数据来源

构建城市水循环健康评价体系需要客观有效地反映研究区域水循环的健康程度,并能显示研究区域水循环健康的主要特点。从健康循环的内涵看,应该包括自然条件和社会水循环各环节的利用及水资源禀赋条件下的水循环健康状况的体现,健康循环是自然循环水生态良好、水环境质量高的状态;是社会循环状态水资源利用高效率、高效性的体现,无论是自然还是社会水循环,都要受到水资源禀赋条件约束的影响,因此本文从水生态水平、水环境质量、水资源丰度、水资源利用等4个方面^[13-16]选择了15个评价指标,同时将多个指标有机结合起来,从水生态水平、水环境质量、水资源丰度和水资源利

用等 4 个维度全面评价水循环健康状况。宁夏全区水循环健康评价指标体系见表 1。宁夏在全国属于水资源稀缺地区,因此在指标选择时侧重于利用水质、水量和水资源利用效率来反映宁夏地区的水循环健康状况。

本文研究数据主要来源于 2010 - 2018 年的《中国城市建设统计年鉴》^[17]《中国城市统计年鉴》^[18]《宁夏统计年鉴》^[19]《宁夏水资源公报》^[20]《中卫统计年鉴》^[21]《银川统计年鉴》^[22]《石嘴山统计年鉴》^[23]。在数据收集过程中由于个别年份数据受其可获得性限制,因此在处理过程中以其相邻两年份的平均值代入。

2.3 研究方法

水循环健康评价的主成分分析法是将初始变量通过降维来重组出一组新的综合变量,新变量相互无关,之后提取出几个较少的综合变量来尽可能多地反映原变量信息的统计方法。它主要研究变量之间的相关关系,找出对所有变量影响较大的几个主成分,能够使研究更简单、高效^[24]。

3 结果与分析

3.1 宁夏水循环健康状况分析

本文采用 SPSS25.0 软件对表 1 中各评价指标

所收集到的相关数据进行主成分分析,可以得出 15 个指标的相关系数矩阵、主成分贡献率及累积贡献率,分别见表 2、3;表 4 为各主成分与各影响因子之间的相关系数矩阵及特征向量矩阵。

表 1 宁夏全区水循环健康评价指标体系

目标层	维度层	指标层/单位	属性
城市水循环健康	水生态水平 A	城镇绿化覆盖率 $a_1 / \%$	自然
		地下水开采利用率 $a_2 / \%$	社会
		生态投资率 $a_3 / \%$	社会
	水环境质量 B	水功能区达标率 $b_1 / \%$	自然
		污水处理率 $b_2 / \%$	社会
		排水管道密度 $b_3 / (\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	社会
水资源丰度 C	人均水资源量 c_1 / m^3	自然	
	地下水占供水比例 $c_2 / \%$	社会	
	亩均水资源量 c_3 / m^3	自然	
水资源利用 D	万元工业增加值用水量 d_1 / m^3	社会	
	城市公共管网漏失率 $d_2 / \%$	社会	
	农业用水比重 $d_3 / \%$	社会	
	农业亩均耗水量 d_4 / m^3	社会	
	污水处理回用率 $d_5 / \%$	社会	
	城镇自来水普及率 $d_6 / \%$	社会	

表 2 水循环健康评价指标相关系数矩阵

相关系数	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
a_1	1														
a_2	0.778	1													
a_3	0.682	0.555	1												
b_1	0.641	0.762	0.561	1											
b_2	0.458	0.468	0.580	0.850	1										
b_3	0.458	0.478	0.360	-0.056	-0.385	1									
c_1	0.489	0.719	0.124	0.635	0.463	0.084	1								
c_2	0.813	0.969	0.526	0.774	0.494	0.401	0.802	1							
c_3	0.296	0.487	-0.146	0.372	0.287	-0.035	0.929	0.602	1						
d_1	0.591	0.739	0.766	0.859	0.883	-0.009	0.551	0.719	0.295	1					
d_2	-0.715	-0.478	-0.278	-0.413	-0.091	-0.501	-0.447	-0.527	-0.286	-0.153	1				
d_3	-0.785	-0.835	-0.814	-0.769	-0.633	-0.406	-0.608	-0.860	-0.380	-0.821	0.451	1			
d_4	-0.686	-0.720	-0.836	-0.834	-0.822	-0.144	-0.561	-0.748	-0.328	-0.916	0.321	0.952	1		
d_5	0.703	0.553	0.823	0.334	0.261	0.638	0.258	0.585	0.108	0.491	-0.413	-0.84	-0.729	1	
d_6	0.116	0.221	0.113	-0.047	-0.212	0.472	0.271	0.168	0.128	0.072	-0.445	-0.079	0.004	0.117	1

表3 主成分贡献率及累积贡献率

主成分	贡献率/%	累计贡献率/%
1	55.922	55.922
2	16.264	72.186
3	13.318	85.504

表4 因子载荷矩阵和特征向量矩阵

指标	因子载荷矩阵			特征向量矩阵		
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分1	主成分2	主成分3
a_1	0.852	0.240	-0.079	0.294	0.154	-0.056
a_2	0.902	0.130	0.162	0.311	0.083	0.115
a_3	0.754	0.049	-0.626	0.260	0.031	-0.443
b_1	0.850	-0.373	0.062	0.293	-0.239	0.044
b_2	0.690	-0.670	-0.107	0.238	-0.429	-0.076
b_3	0.341	0.881	-0.145	0.118	0.564	-0.103
c_1	0.715	-0.076	0.676	0.247	-0.049	0.478
c_2	0.925	0.091	0.238	0.319	0.058	0.168
c_3	0.471	-0.110	0.796	0.163	-0.070	0.563
d_1	0.863	-0.374	-0.148	0.298	-0.239	-0.105
d_2	-0.543	-0.527	-0.227	-0.187	-0.337	-0.161
d_3	-0.965	-0.028	0.155	-0.333	-0.018	0.110
d_4	-0.927	0.229	0.217	-0.320	0.147	0.154
d_5	0.721	0.366	-0.419	0.249	0.234	-0.296
d_6	0.166	0.606	0.263	0.057	0.388	0.186

由表4可知,主成分1与 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_5 有较强的正相关关系,与 d_3 、 d_4 有较强的负相关关系,基本涵盖了社会与自然的主要指标,综合性较强。近年来,宁夏工业园区得到了迅速的发展,工业增加值不断增长,其中会产生较大耗水量、排污量的企业。因此,建成区绿化覆盖率、生态投资率、水功能区达标率、污水处理率以及污水处理回用率均为影响宁夏水循环健康状况的重要因素。 d_3 、 d_4 反映了宁夏的农业用水情况,作为国内农业用水效率及用水占比均较高的省区,随着经济人口的不断增长,农业用水也不断增加,对水循环健康产生的影响不可忽略。主成分2与 b_3 、 d_6 有较强的正相关关系,反映城镇用排水的普及对水健康循环的影响;主成分3与 c_1 、 c_3 有较强的正相关关系,反映的是宁夏境内的水资源禀赋状况,对水循环健康状况有直接影响。

将数据标准化后可以分别计算出主成分1、2、3的得分(分别记为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3),然后将其按照方差贡

献率加权平均得到2010-2018年宁夏全区水循环健康状况的综合得分(记为 Y),得分结果见图1。

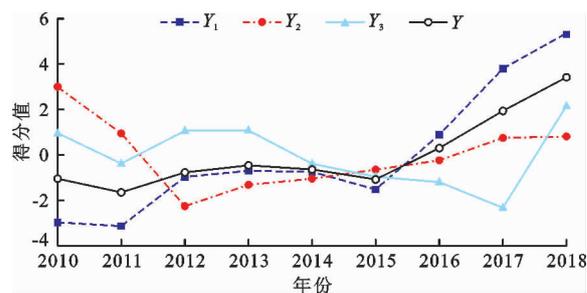


图1 2010-2018年宁夏水循环健康状况主成分得分及综合得分变化趋势

由图1可知,水循环健康状况主成分得分的值有正有负,但其正负值并不代表水循环健康状况的真实水平^[25],只是表示水循环健康状况的相对水平,正值表示水资源被评价年份的水循环健康状况高于平均水平,负值表示被评价年份的水循环健康状况低于平均水平,综合得分越高表示其水循环健康状况越好,得分越低则表示其状态越差。由于主成分1所占比重较大,所以其得分与综合得分趋势相近,但综合得分变化率比主成分1得分变化率小,主成分2、3的变化是一种不规则的折线形,它们具有较低的贡献率,对综合得分的影响不大。总体来看,宁夏水循环健康状况在2010-2018年呈上升的趋势,但在2015年之前的上升趋势不明显,并且在2013-2015年还有所下降,这主要是因为2013-2015年其污水处理回用率并不高,这一期间宁夏8条重点入黄排水沟水质为劣V类,其中5条水质部分指标在当时仍在恶化。但自2016年以来,宁夏环保部门加强水环境治理,开展工业污染防治整治专项行动,严格工业污染防治,加强了直接入河湖排污口监管和饮用水水源保护,实施流域水生态修复治理,开展宁夏节水行动,保障河湖湿地生态补水。资料显示,2010年黄河出境断面全年水质类别为IV类,主要污染指标为化学需氧量,而到2018年出境断面全年水质类别提升到了II类,而且宁夏山区主要河流的水质也有了明显改善,清水河各河段水质从2010年的劣V类、IV类、劣V类分别提高到了2018年的II类、IV类、II类,而苦水河水质则从劣V类提高到了V类。随着宁夏对水环境的重视,减少了多个入黄直排口,建成了13条重点入黄排水沟适宜地段的人工湿地,其中多条排水沟水质得到明显改善。宁夏还在全区范围内加大水污染防控力度,对水源地进行重点保护,使多个地级城市集中式饮

用水水源水质达到或优于Ⅲ类标准。近些年宁夏绿地覆盖率也明显增加,一系列水利民生措施极大地改善了宁夏水循环健康状况。

3.2 宁夏 5 市水循环健康状况分析

以上是对宁夏水循环健康状况的整体平均水平进行的分析,而宁夏所辖 5 个地级市的水资源地理条件、经济社会发展等均表现出不平衡的特征,存在明显的区域差异,为了对宁夏 5 市水循环健康状况有更进一步的了解,在上文分析的基础上再对宁夏

5 市 2010 - 2018 年的水循环健康状况分别进行对比分析。由于部分地区的水功能区达标率这一指标已连续多年达到了较高水平,无法有效地反映水循环健康状况,因此在对 5 市进行分析时采用除水功能区达标率以外的 14 个指标。用 SPSS25.0 进行主成分分析后选取累积贡献率达到 85% 的若干个成分,通过计算其得分可得到各市水循环健康状况变化趋势,结果见图 2,图 2 中主成分 1、2、...、5 的得分分别记为 Y_1 、 Y_2 、...、 Y_5 ,综合得分记为 Y 。

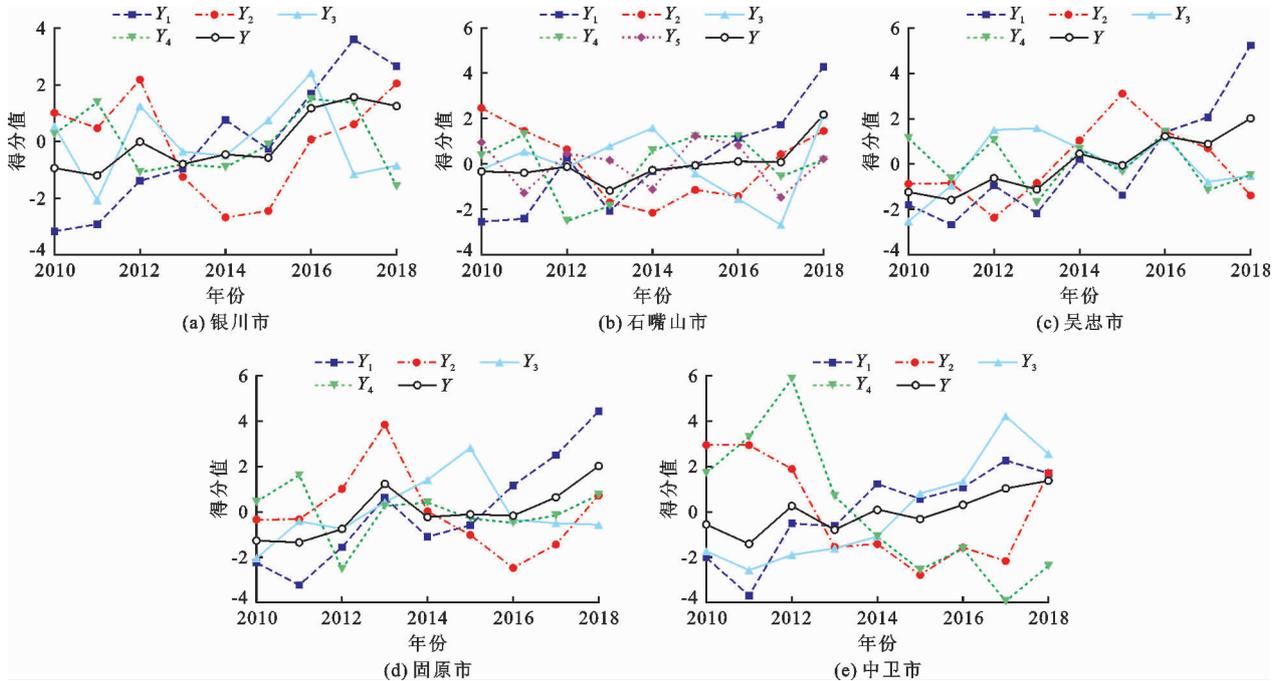


图 2 2010 - 2018 年宁夏所辖 5 个地级市水循环健康状况主成分得分及综合得分变化趋势

现对图 2 中所示的宁夏 5 市水循环健康状况分析如下:

银川市(图 2(a))主成分综合得分与主成分 1、2 密切相关,通过分析主成分 1、2 中载荷较高的原始数据可以看出,主成分 1 中的 a_2 、 a_3 、 b_2 、 c_2 、 d_1 指标与银川市水循环健康呈正相关, d_3 、 d_4 呈负相关。随着时间的推移,农业用水量不断减少,降低了银川地区水循环的压力,而主成分 2 中 a_1 、 c_1 、 c_3 荷载较大。近年来银川市加大了生态投资力度,城市绿化面积明显增加,同时加强了对污水排放的管理,改善了水环境。主成分 3、4 所占贡献率较小,可以忽略不计。银川市主成分综合得分在 2013 年有小幅减小,但总体呈增大趋势,2017 年的得分最高。分析基础数据可以发现,2017 年银川市的地下水开采利用率、生态投资以及污水排放处理均达到最优,而农业耗水量为历年最低,因此 2017 年的水循环健康

状态达到最优。

石嘴山市(图 2(b))主成分综合得分与主成分 1 密切相关,主成分 2、3 次之。通过分析其中载荷较高的原始数据可以看出,主成分 1 中 b_2 、 c_1 、 c_3 指标与水循环健康呈正相关, d_3 、 d_4 、 d_5 指标与其呈负相关,这是因为石嘴山市作为老工业基地,水资源量直接决定了该地区的水循环健康状况;主成分 2 中 a_1 指标与水循环健康呈正相关, b_2 指标与其呈负相关,表明了与城镇绿化覆盖率和污水处理的关系;主成分 3 中 a_2 指标与水循环健康呈正相关, a_3 指标与其呈负相关,表明了石嘴山市的环境保护程度。主成分 4、5 对水循环健康的影响可以忽略不计。石嘴山市主成分综合得分总体上依然呈上升趋势,但在 2013 年有突然的减小。分析基础数据发现,2013 年时石嘴山市工业用水较多,污水处理率低于其他年份的污水处理水平,因此造成了当年水循环健康状

况的下降,2015年以前其水循环健康状况低于研究时间段平均水平,且发展趋势呈波动变化,2015年以后其水循环健康状况高于平均水平,且在2018年提升幅度较大,这是由于在2015年以前污水处理相关指标波动幅度较大,影响了其水循环健康状态的稳定,而在2018年其数据有了较大幅度的增长。

吴忠市(图2(c))主成分综合得分由主成分1、2决定,主成分1中 a_2 、 b_2 、 c_1 、 c_3 、 d_6 指标与水循环健康呈较强的正相关, d_1 指标与其呈较强的负相关,这些指标表现了城市排污能力对水健康循环状况的影响,城市排水管道系统投资的加大,有效改善了城市水循环健康状况;主成分2中 a_1 、 d_5 的逐步提高,对水循环健康起着促进的作用,而万元工业增加值用水量(d_1)呈现逐年下降趋势,万元工业增加值用水量越多,则水资源短缺性越高,相应的水循环健康压力越大。吴忠市水循环健康状况依然呈总体上升的趋势,但其变化却出现升一年降一年的情况,2011、2013、2015、2017年相比前一年均有所下降。分析基础数据可知,这是由于这些年份相关性较强的数据相较上年有一定的下降而造成的。吴忠市得分上升趋势相较其他4个地级市来说比较平稳,这是因为吴忠市积极采取相关措施,保障了其生态环境的持续健康发展。

固原市(图2(d))综合得分与第1、2主成分密切相关,主成分1中 a_1 、 a_3 、 b_3 、 c_1 、 d_1 指标与水循环健康状况呈正相关,指标 d_2 、 d_3 、 d_5 与其呈较强的负相关;主成分2中 c_1 、 c_2 、 c_3 、 d_4 指标与水循环健康状况呈正相关, b_2 指标与其呈负相关。由于固原市的地理位置不属于沿黄城市带,且蒸发量较大,因此水生态环境与天然水资源的变化对固原市水循环健康状况影响较大。固原市水循环健康状况总体呈上升趋势,其中2013年的得分在5市中排名第二,随后2014-2016年由于自然水资源量减少,固原市水循环健康状况有所下降,2016年之后又开始上升。

中卫市(图2(e))主成分综合得分与主成分1、2密切相关,通过分析主成分1、2中载荷较高的原始数据可以看出,主成分1中 a_1 、 d_3 、 d_4 、 d_5 为主要的影响因素;主成分2中 a_2 、 c_3 、 d_1 为主要影响因素。中卫市水循环健康状况也呈上升趋势,因为农业用水的减少,缓解了当地水循环的压力,同时城市绿化覆盖率的大幅度提升和工业万元增加值用水量的减少有效地改善了城市水资源状况。中卫市的水环境治理政策主要从饮用水源地安全、农村环境整治、湿地保护修复、河湖生态绿化等方面入手,抓好全市水

生态环境治理,发展趋势比较稳定。

由主成分分析结果可以发现,2010-2018年宁夏5个地级市的水循环健康状况得分趋势总体均呈现上升趋势,说明随着经济社会的发展,5市的水循环健康状况也越来越好,这与5市近几年的社会发展以及一些水利政策的实施密切相关。2010-2018年期间,银川市人口增加了24.6万,石嘴山市人口增加了7.7万,吴忠市人口增加了13.3万,固原市人口增加了0.9万,中卫市人口增加8.5万,人口数量的增长导致了日常用水需求的增大,突出了5市水资源的供需矛盾。宁夏自2011年开始大力推进节水型社会建设后,加强了防洪减灾体系、节水提效、水土保持与河湖生态恢复、地下水限制利用等7个方面的建设及措施,极大地改善了宁夏5市的水循环健康状况,水循环健康状况得分也从2011年起逐步提高。

4 讨论

(1)应用主成分分析法对宁夏省区水循环健康状况进行评价,可以比较全面地反映宁夏全省区和各市的水循环健康状况及其变化趋势,通过对结果的分析可以发现,不同地区的水循环健康状况具有不同的影响因素,其中与污水处理相关的指标对水循环健康状况的影响比较普遍,因此必须对污水处理技术以及再生水回用给予重视。

(2)宁夏整体水循环健康状况处于上升趋势,适宜的水利政策对改善当地水循环健康状况具有较为明显的作用,但充分高效地开发水资源,坚持节流为主,大力推广节水技术,最大限度提高工农业用水效率依然是未来实现健康水循环的有效途径。

(3)宁夏水资源主要依靠黄河过境水,因此对黄河的保护与治理也是提高水循环健康状况的重要途径,要进一步加强相关水利工程建设,制订相应的保护政策。

5 结论

首先采用主成分分析法对宁夏2010-2018年的水循环健康状况进行分析,然后基于对宁夏5个地级市发展差异较大的考虑,分别计算了银川市、石嘴山市、吴忠市、固原市和中卫市的综合得分并进行了分析,得到了以下结论:

(1)构建了水循环健康评价指标体系,以城市水循环健康为目标层,以水生态水平、水环境质量、水资源丰度、水资源利用4个环节为维度层,以城镇

绿化覆盖率、地下水开采利用率、生态投资率等15个指标为指标层。

(2)通过主成分分析将15个指标分别降维成若干个主成分,分别对宁夏及其5个地级市的水循环健康状况进行分析,结果表明,2010-2018年宁夏水循环健康状况处于上升的趋势,2018年5市的水循环健康状况相比于2010年虽然均有不同程度的提高,但存在一定的地区差异。银川市的水循环健康状况主要受农业用水量和污水处理的影响,在未来应当大力发展农业节水,严格控制污水处理及排放;石嘴山市主要受当地的水资源量以及污水处理能力影响,作为老牌工业基地,应进一步提升污水处理能力以提高水循环健康状况;吴忠市的水循环健康状况多年变化趋势比较平稳,生态投资率与排水管道建设较好,应当继续保持;固原市的水循环健康状况主要取决于当地的天然水资源变化量,建议加大水资源保护以及水环境治理,以地下水开采与地表水利用相结合的方式发展;中卫市的水循环健康状况则主要取决于农业用水量及城镇绿化覆盖率,作为宁夏最年轻的城市,中卫市发展非常迅速,在此过程中更应该注重节水以及环境保护,进一步促进发展。

参考文献:

- [1] 张杰,熊必永.城市水系统健康循环的实施策略[J].北京工业大学学报,2004,30(2):185-189.
- [2] 张杰,熊必永,李捷.水健康循环原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] 郝天,桂萍,龚道孝.日本城市水系统发展历程[J].给水排水,2021,47(1):84-89.
- [4] LINTON, BUDD S J. The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water[J]. Geoforum, 2014, 57: 170-180.
- [5] FURUMAI H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, 33(5): 340-346.
- [6] VIGLIONE A, DI BALDASSARRE G, BRANDIMARTE L, et al. Insights from socio-hydrology modelling, on dealing with flood risk—Roles of collective memory, risk taking attitude and trust[J]. Journal of Hydrology, 2014, 518(Part A): 71-82.
- [7] ZHANG Shanghong, FAN Weiwei, YI Yujun, et al. Evaluation method for regional water cycle health based on nature-society water cycle theory[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 352-364.
- [8] ZHANG Shanghong, XIANG Mengshi, YANG Jiasheng, et al. Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity

models for water resources based on optimal water cycle theory[J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 432-443.

- [9] 莫谍谍.城市社会水健康循环研究——以重庆市两江新区为例[D].重庆:重庆大学,2015.
- [10] 王富强,马尚钰,赵衡,等.基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):67-74.
- [11] 栾清华,张海行,褚俊英,等.基于关键绩效指标的天津市水循环健康评价[J].水电能源科学,2016,34(5):38-41.
- [12] 王浩,王佳,刘家宏,等.城市水循环演变及对策分析[J].水利学报,2021,52(1):3-11.
- [13] 唐继张,夏伟,周维博,等.基于关键绩效指标的西安市水循环健康评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):39-45+60.
- [14] 郝小宇,张鑫,雍志勤.榆林市水资源承载力空间分异[J].排灌机械工程学报,2019,37(12):1037-1043.
- [15] 陈炯利.银川市水循环健康评价初步研究[D].银川:宁夏大学,2020.
- [16] 范威威.京津冀水循环健康评价与水资源配置研究[D].北京:华北电力大学(北京),2018.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城市建设统计年鉴(2010-2018年)[M].北京:中国统计出版社,2010-2018.
- [18] 国家统计局城市社会经济调查司.中国城市统计年鉴(2010-2018年)[M].北京:中国统计出版社,2010-2018.
- [19] 宁夏回族自治区统计局.宁夏统计年鉴(2010-2018年)[M].北京:中国统计出版社,2010-2018.
- [20] 吴洪相,白耀华.宁夏水资源公报(2010-2018年)[R].宁夏:宁夏回族自治区水利厅,2010-2018.
- [21] 中卫市地方志编审委员会办公室.中卫统计年鉴(2010-2018年)[M].北京:阳光出版社,2010-2018.
- [22] 银川市统计局.银川统计年鉴(2013-2018年)[M].北京:中国统计出版社,2013-2018.
- [23] 石嘴山市统计局.石嘴山统计年鉴(2015-2018年)[M].宁夏:宁夏人民出版社,2015-2018.
- [24] 陈炯利,唐莲,齐娅荣,等.宁夏5市城镇居民生活用水量需求影响分析[J].中国农村水利水电,2020(2):158-163+174.
- [25] 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,2017,37(2):64-72.
- [26] 段娜.邯郸市主城区水循环健康评价与演变分析[D].邯郸:河北工程大学,2019.
- [27] 李燕,张兴奇.基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J].水土保持通报,2017,37(4):172-178.
- [28] 王海叶.城市生活水循环调查与健康评价研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2017.

(下转第124页)

- Journal, 2013, 21(7): 1619 - 1631.
- [13] 于苗,邢立亭,吴吉春,等. 基于时间序列分形的济南岩溶大泉动态研究[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2509 - 2519.
- [14] GENTY D, LABUHN I, HOFFMANN G, et al. Rainfall and cave water isotopic relationships in two South-France sites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 131: 323 - 343.
- [15] LAMBERT W J, AHARON P. Oxygen and hydrogen isotopes of rainfall and dripwater at DeSoto Caverns (Alabama, USA): Key to understanding past variability of moisture transport from the Gulf of Mexico [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 74(3): 846 - 861.
- [16] 曾成,刘再华,赵敏,等. 基于谱分析的岩溶地下河系统短时间尺度水化学变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 39 - 44 + 50.
- [17] 庞丽伟. 老黄龙洞穴岩石微形态及洞穴发育演化研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [18] ARBEL Y, GREENBAUM N, LANGE J, et al. Infiltration processes and flow rates in developed karst vadose zone using tracers in cave drips [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 35(14): 1682 - 1693.
- [19] 殷建军,郭小娇,姜光辉,等. 桂林硝盐洞穴滴水示踪及气候环境意义研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 18 - 23 + 67.
- [20] LAROCQUE M, MANGIN A, RAZACK M, et al. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France) [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3): 217 - 231.
- [21] DELBART C, VALDES D, BARBECOT F, et al. Temporal variability of karst aquifer response time established by the sliding-windows cross-correlation method [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 580 - 588.
- [22] KOVACIC G. Hydrogeological study of the Malenica karst spring (SW Slovenia) by means of a time series analysis [J]. *Acta Carsologica*, 2010, 39(2): 201 - 215.
- [23] MANGIN A. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale [J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 67(1 - 4): 25 - 43.
- [24] 郑雪,陈喜,张志才. 贵州普定陈旗喀斯特泉的降雨-径流响应特征分析[J]. 地球与环境, 2014, 42(2): 221 - 227.
- [25] KUHTA M, STROJ A, BRKIĆ M. Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia [J]. *Geologia Croatica Survey*, 2012, 65(1): 41 - 51.
- [26] FIORILLO F, DOGLIONI A. The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(8): 1881 - 1895.
- [27] 周丹,张勃,安美玲,等. 黄河流域不同时间尺度干旱对 ENSO 事件的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 753 - 762.
- [28] 张钰,唐颖丰,韩克明,等. 洮河流域径流年内分配变化规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 71 - 74.
- [29] 廉耀康,柳小龙,周润田,等. 黑河出山口径流与源区降水特征及匹配度分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 14 - 17.
- [30] 孙天青,张鑫,梁学玉,等. 秃尾河径流特性及人类活动对径流的影响分析[J]. 人民长江, 2010, 41(8): 47 - 50.
- [31] 李艳,陈晓宏,王兆礼. 北江流域径流量分布规律及其变异性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 14 - 17.
- [32] 罗玉,秦宁生,周斌,等. 1961 - 2016 年长江源区径流量变化规律[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 123 - 128.
- [33] 涂新军,陈晓宏,张强,等. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 493 - 501.
- [34] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,海米提·依米提,马蓉. 1956 - 2010 年新疆焉耆盆地径流变化特征及驱动力分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 670 - 677.
- [35] 郭小娇,龚晓萍,袁道先,等. 典型岩溶包气带洞穴滴水水文过程研究——以桂林硝盐洞为例[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 537 - 548.
- [36] 张美良,朱晓燕,林玉石,等. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 1 - 10.
- [37] 迟光耀,邢立亭,主恒祥,等. 大气降水与济南泉水动态变化的定量关系研究[J]. 地下水, 2017, 39(1): 8 - 11.
- [38] 张军以,王腊春,苏维词,等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1125 - 1135.

(上接第 115 页)

- [29] 张静,唐莲,刘子西,等. 宁夏水环境承载力变化趋势及影响因素研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 281 - 285.
- [30] 曹丽娟,张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906 - 912.
- [31] 许朗,黄莺,刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(12): 1468 - 1474.
- [32] 童纪新,顾希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 122 - 125.
- [33] 李高伟,韩美,刘莉,等. 基于主成分分析的郑州市水资源承载力评价[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(3): 139 - 142.
- [34] 沈卓夫. 基于主成分分析的长沙市水资源承载力评估研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.