

阿克苏地区水资源承载力变化及 驱动力生态脆弱性分析

王晶¹, 薛联青^{1,2}, 张洛晨³, 魏光辉³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学文天学院, 安徽
马鞍山 243000; 3. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆库尔勒 841000)

摘要:以塔里木河源流区阿克苏地区为研究对象,分析区域水资源承载力变化及引起变化的驱动力因素。采用主成分分析法分析了2004-2014年水资源承载力水平,提取了社会经济和生态2个系统的主成分,并进一步选取生态脆弱性作为生态评估指标,采用模糊层次分析对驱动力生态环境的动态变化进行了分析。结果表明:自2004年到2014年,阿克苏地区的水资源承载力总体呈下降趋势,承载 F 值从-2.99增加到4.69,人口与GDP、生态用水率是承载力变化的主要驱动因素;生态系统的脆弱度整体呈上升态势,生态脆弱性由I级的轻度脆弱区上升至III级强度区,其中森林覆盖率和垦殖率影响因子为分别0.29和0.12,通过调整可降低生态破坏程度以增加水资源的可持续性。

关键词: 水资源承载力; 生态脆弱性; 主成分分析; 模糊层次分析; 阿克苏地区

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)02-0104-06

Analysis on the changes of water resources carrying capacity and its driving force ecological vulnerability in Akesu Region

WANG Jing¹, XUE Lianqing^{1,2}, ZHANG Luochen³, WEI Guanghui³

(1. Hydrology and Water Resources College, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wentian College Hohai University, Ma'anshan 243000, China; 3. Tarim River Basin Administration, Korla 841000, China)

Abstract: In order to evaluate the changes of water resources carrying capacity and its driving force in the Tarim River, taking the Aksu region as the research object, the principal component analysis method was used to analyze the water resources carrying capacity level from 2004 to 2014 and two principal components of socio-economic and ecological development level were extracted. The ecological vulnerability was selected as the ecological evaluation index and the dynamic change of the driving force ecological environment was analyzed by fuzzy hierarchy analysis. The results show that the water carrying capacity of Akesu area is declining with time from 2004 to 2014 and the F value is increased from -2.99 to 4.69. Its population, GDP and ecological water consumption rate are the main influencing factors. The ecological vulnerability is on the rise and increased from the mildly vulnerable zone of grade I to the mightily vulnerable zone of grade III. The most influencing factor values of its forest cover and cultivating rate are 0.29 and 0.12, and by adjusting them, the ecological damage can be reduced to enhance the sustainability of water resources in the Aksu Region.

Key words: water resources carrying capacity; ecological vulnerability; principal component analysis; fuzzy analytic hierarchy process; Aksu Region

收稿日期:2017-09-15; 修回日期:2017-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51779074、41371052); 水利部公益性行业专项经费项目(201501059); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404304); 江苏省水利科技项目(2017027); 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目(苏教师[2015]35号)

作者简介:王晶(1993-),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者:薛联青(1973-),女,新疆石河子人,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境水文及生态水文。

水资源承载力一般指地区的水资源在不破坏社会经济和生态系统时最大可承载的工、农业规模和人口水平^[1],关系到区域人口、资源、经济和环境的协调发展^[2],是水资源可持续发展研究中的重要组成部分^[3]。但随着资源与环境问题的突出,生态文明建设被提高到前所未有的高度^[4-5],区域资源与环境的压力及其可持续性生态文明建设首先要考虑的关键问题^[6]。针对水资源利用与经济社会生态相关性问题的研究涵盖水资源供需平衡^[7-8]、水资源持续利用^[9-10],着重研究水资源与生态系统有生态需水^[11-12]、生态水足迹^[13-14]等。评估生态的生态环境脆弱性是指生态环境受到外界干扰作用超出自身的调节范围,而表现出对干扰的敏感程度^[15],是随着气候变化和人类活动对生态系统造成严重影响应运而生的可持续发展研究热点^[16]。在一定程度上,不仅水资源短缺会加剧生态环境破坏,区域的生态状况也会反作用于水资源承载力,即生态的脆弱程度可直接作用到区域水资源承载力上。基于生态脆弱性的水资源承载力分析实质上是在生态脆弱性的降低可提高水资源承载力的关系基础上,通过现状生态破坏状况评价找出影响因素,并加以调整以实现生态系统协调性的增加和水资源承载力的提高。

塔里木河是我国最长的内流河^[17],自身不产流,其水资源主要来自源流和地下水的补给^[18],水是其自然生态系统和人类社会赖以存在的核心制约要素^[19]。近年来随着人口增长、城镇化推进和社会经济发展,塔里木河流域受到水资源短缺和生态环境脆弱的多重胁迫^[20],加速了水资源承载力的降低,因此科学地评价塔里木河源流区水资源承载力和生态情况发展十分有必要。本文根据阿克苏绿洲地区的2004-2014年水资源状况,结合主成分分析和模糊层次分析,研究水资源承载力及其驱动因素生态脆弱性的变化趋势,并指出提高生态防御力是提高水资源承载力的关键。

1 研究区概况

阿克苏地区位于塔里木河的上游,全区总面积 $31.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,属暖温带干旱气候区,年均气温 10°C ,光热充足,蒸发强烈、降雨稀少,年均降水量 75 mm 左右。境内共有1293条冰川,由16条主要干流及大小60多条主要泉水河流组成昆玛力克河、阿克苏河、渭干河三大水系,地表水年径流量 $129.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水总储量 $106.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[21]。阿克苏地区注重农业发

展,土地多为耕地,灌溉模式落后,耗水量巨大,水资源量的相对匮乏限制了经济社会的可持续发展,阿克苏地区行政区及水系分布如图1所示。

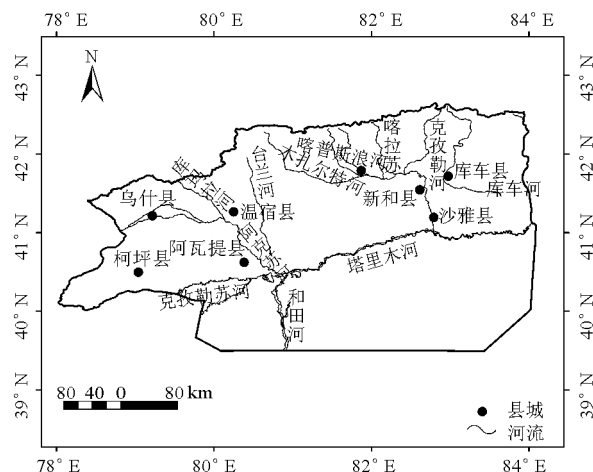


图1 阿克苏地区行政区及水系分布

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

文中选取新疆阿克苏地区2004-2014年的12个国民经济发展指标数据来自新疆维吾尔自治区统计年鉴和阿克苏地区水资源公报,阿克苏地区国民经济和社会发展统计公报。

2.2 水资源承载力评价方法

选择主成分分析法评价水资源承载力。主成分分析法是一种将高维变量空间降维处理的多元统计方法,目前在水文水资源领域应用较多。该方法主要基于指标间的相互关系,在损失很少原始信息的前提下通过计算协方差将多个影响因子综合为几个相互独立的主成分^[22]。其中贡献率计算方法为^[23]:

$$r_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

本研究在计算历年水资源承载力得分时采用每个主成分的特征值占总特征值之和的比例作为计算主成分综合得分模型^[21]:

$$F = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \times F_i) / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2)$$

式(1)、(2)中: r_i 为第 i 个主成分的贡献率,累积贡献率达到85%即可确定为主成分; λ_i 为第 i 个主成分的特征值; F_i 为第 i 个主成分得分。

经济、社会、生态等多方面的因素会影响水资源承载力,要结合地区实际状况,按照科学性、全面性、系统性和可行性原则^[24],构建阿克苏地区水资源承

载力指标体系,具体包括 12 个指标^[21]:人口 X_1 , 10^4 人;GDP X_2 , 10^8 元;固定资产投资 X_3 , 10^8 元;工业总产值 X_4 , 10^8 元;农业总产值 X_5 , 10^8 元;城镇居民消费总值 X_6 , 10^8 元;土地面积 X_7 , 10^3 hm^2 ;水资源总量 X_8 , 10^8 m^3 ;耕地面积 X_9 , 10^3 hm^2 ;生产用水量 X_{10} , 10^8 m^3 ;生态环境用水量 X_{11} , 10^8 m^3 ;生活用水量 X_{12} , 10^8 m^3 。

2.3 生态脆弱性评价方法

本次研究阿克苏地区的生态脆弱性采用综合指数法,综合因子得分即生态环境脆弱度主要考虑经

模糊层次分析法计算的权重和极差法标准化处理后的指标。

2.3.1 计算权重 采用模糊层次分析法确定指标权重。将生态脆弱性分解为目标、准则、指标 3 个层次,建立递阶层次结构,结合影响因素构造模糊关系矩阵,计算具体指标权重(表 1)。考虑到研究区生态环境内部结构不稳定,易对外界干扰异常敏感的特点,结合收集的数据选择能真实反映研究区生态脆弱性的评价指标,搭建“成因及结果表现”综合评价指标体系。

表 1 生态脆弱性评价指标权重结果

目标(A)	准则层(B)	指标(C)	指标层含义	综合权重	排序	类别
阿克苏生态脆弱性评价	自然成因 (B ₁)	$\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温(C_1)	干燥情况	0.0501	7	正
		年降水量(C_2)	降水条件	0.0856	5	负
		森林覆盖率(C_3)	绿化程度	0.2929	1	负
	经济社会成因 (B ₂)	垦殖率(C_4)	耕地规模	0.0444	8	正
		人均 GDP(C_5)	经济发展水平	0.0705	6	负
		恩格尔系数(C_6)	居民生活水平	0.0280	9	正
		废水排放达标率(C_7)	污水处理能力	0.0277	10	负
	结果表现 (B ₃)	人均水资源量(C_8)	水资源人均拥有量	0.1225	3	负
		农业依赖度(C_9)	农业发展程度	0.0866	4	正
		生态环境用水率(C_{10})	生态环境保障程度	0.1917	2	负

2.3.2 等级划分 生态环境脆弱度是用来量化研究区生态环境脆弱性程度,根据其数值大小可比较分析不同年份的生态脆弱度。

极差法:选取的指标对生态脆弱性有正向和负向影响(表 1),正向影响是脆弱性随着评价指标值增大而增加,不利于生态保护,负向影响是脆弱性随着评价指标减小而增加,促进生态保护。

为方便综合比较分析,采用不同处理计算公式如下^[23]:

正向评价指标:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

负向评价指标:

$$Z_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

$$I = \sum_{i=1}^n (Z_i \times W_i) \quad (5)$$

式中: Z_i 是第 i 个指标的标准化处理后的无量纲值; x_i 是第 i 指标的实际数值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 是 2004—2014 年实际数值中的最大、最小值; I 为生态脆弱度数值;

W_i 为模糊分析法得出的指标权重(表 1), n 为指标个数。

分等级赋值法:根据研究区的具体特征,参照赵跃龙等^[25]脆弱度分级方法将阿克苏地区的生态脆弱度划为 4 个等级,分为轻度、中度、强度和极强度脆弱区^[15](表 2)。

表 2 阿克苏地区生态脆弱性分级标准

脆弱度	等级	脆弱性
< 0.4	I	轻度脆弱
$0.4 \sim 0.5$	II	中度脆弱
$0.5 \sim 0.65$	III	强度脆弱
≥ 0.65	IV	极强度脆弱

3 结果与分析

3.1 水资源承载力评价

3.1.1 主成分综合评价 对阿克苏地区水资源承载力评价指标进行主成分分析,由公式(1)得到表 3 主成分特征值及贡献率。

表 3 主成分特征值及贡献率

成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率 %
1	8.878	73.980	73.980
2	1.512	12.599	86.579
3	0.659	5.488	92.067
4	0.476	3.968	96.035
5	0.257	2.142	98.177
6	0.144	1.202	99.379

表 3 前面两行数据表明其前两个主成分的累计贡献率达到 86.579%, 可以选取为第一、第二主成分, 反映水资源指标多数信息(表 4), 可进一步分析阿克苏地区水资源承载力的变化。

表 4 主成分载荷矩阵

变量	第一主成分	第二主成分
总人口 X_1	0.928	-0.04
GDP X_2	0.983	0.055
固定资产投资 X_3	0.973	-0.055
工业总产值 X_4	0.964	0.096
农业总产值 X_5	0.994	0.034
城镇居民消费总值 X_6	0.985	0.021
土地面积 X_7	-0.660	-0.568
水资源总量 X_8	-0.704	0.441
耕地面积 X_9	0.856	-0.021
生产用水 X_{10}	0.730	-0.349
生态环境用水 X_{11}	0.323	0.902
生活用水 X_{12}	0.956	-0.202

表 4 中, $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 与第一主成分正相关性很大, 是与经济社会发展相关的指标; X_{11}, X_8 与第二主成分有较大的正相关。且在干旱地区, 生态用水量的多少将直接影响地区生态系统结构的优劣, 所以这两个指标切实关系到生态环境的保障。因此, 经济发展和生态保障可归纳为影响阿克苏地区水资源承载力的主要因素。

根据式(2) 计算阿克苏地区综合主成分值, 其中, $\lambda_1 = 8.878, \lambda_2 = 1.512$ 。为了可以直观地反映出阿克苏地区 2004 - 2014 年水资源承载力的动态变化情况, 根据综合得分画出各年水资源承载力变化趋势图见图 2, F 值越小, 说明当年的水资源承载力越大^[24]。

总体上, 2004 - 2014 年阿克苏地区水资源承载力随时间变化呈下降趋势。2004 年最高, 此后逐年下降, 至 2014 年最低, 这段期间水资源不断被开发利用, 并且强度逐年增加。分析主成分, 水资源承载

力的总体变化趋势与第一主成分即经济社会发展成分大体相同, 说明第一主成分对水资源承载力的影响大, 即以农为主的快速社会经济发展对阿克苏地区的水资源压力较大。而第二主成分变化较复杂, 分值交替升降, 说明地区生态用水保障具有不稳定性, 与当地水热条件和用水结构变化相关。干旱少雨的自然条件使得水资源愈加匮乏, 灌溉效率的低下增加了农业用水量, 这就导致生态用水量迅速降低, 生态保障减少, 违背了区域可持续发展的耗水需求, 限制了区域水资源承载力的提高。

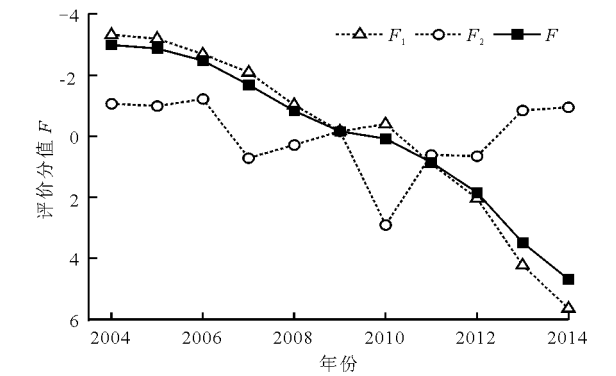


图 2 阿克苏地区水资源承载力主成分及综合得分趋势图

3.1.2 第一主成分分析 第一主成分主要体现社会经济发展, 对主成分有 73.98% 的贡献率, 属于主控驱动因子。据图 3 分析阿克苏地区的人口和经济发展, 人口 10 年间增长 30.29×10^4 , 其中农村人口增加 10.43×10^4 , 并有持续增加的趋势, 而城镇化率上升缓慢, 因为阿克苏地区农业发达, 农业的发展导致人口的集聚效应, 农村人口多于城市人口, 带来城镇化较慢的问题。同时人口作为对资源可持续发展的外界持久压力, 与水资源承载力的动态变化密切相关。人口的快速增长使得水足迹迅速增加, 耕地面积从 $33.632 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 $61.494 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 一产用水量也从 $98.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $109.11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 由此产生水资源承载压力巨大的问题, 供需矛盾越发突出。GDP 在 10 年间约增加 3.7 倍, 年均增长率为 16.76%, 其中农业总产值约占 50%, 可见阿克苏地区的经济增长多依赖于农业, 但农业占用最大比重的水量, 这就使得工业、生活和生态等用水量不断减少。因此, 农业的大幅发展虽带来一定程度的经济发展但也大大加深了人与土地、水资源的矛盾。

3.1.3 第二主成分分析 生态环境用水率主要影响第二主成分, 反映地区生态用水保障对水资源承载力的影响。整体上, 阿克苏地区生态环境用水量

较少,时间上分布不均匀,是根据实际农业用水情况剩余分配的,极不利于河道两岸的生态保护和地区生态的长远发展。且阿克苏地区作为典型的塔里木河源流区,自然降水稀少,基础的生态环境脆弱性强且破坏后恢复困难,如果生态水量没有保障,生态破坏将愈加严重,因此进行生态恢复重建显得尤为重要。但无论基于生态保护还是恢复生态破坏都需增加生态用水量,这与实际分配少量的生态用水情况相差较远,使得供需水矛盾更加突出,所以不理想的生态条件对水资源承载力的作用是负面消极的。

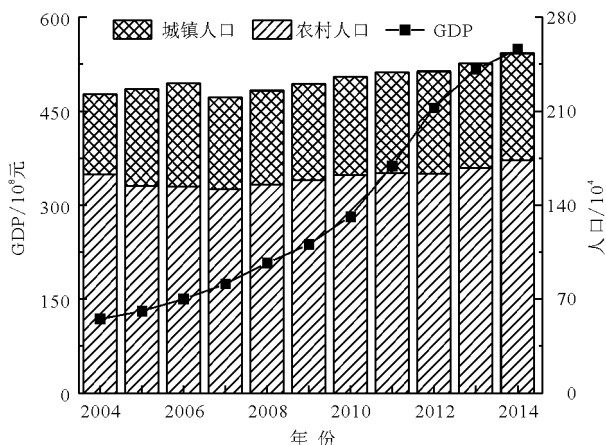


图3 阿克苏地区社会经济发展情况

3.2 驱动力生态脆弱度分析

3.2.1 生态脆弱度与水资源承载力关系 生态发展对水资源的可持续利用影响较大,且由上述主成分分析出生态用水保障是影响阿克苏地区水资源承载力的第二主成分,不理想的生态条件会对水资源承载力产生消极作用,可见,生态保护对该区水资源承载力有较大的影响。要缓解地区水资源承载力压力,就要提高生态防御性,而阿克苏地区本身脆弱的生态环境易受人类活动影响,所以深入研究其生态脆弱性,科学地评价其生态脆弱性的变化情况有利于协调阿克苏地区今后生态与社会经济共同发展,进一步提高区域水资源承载力。

3.2.2 生态脆弱度现状分析 根据公式(3)~(5)计算阿克苏地区2004~2014年生态脆弱度,具体计算结果见图4。

分析图4,阿克苏地区2004~2014年生态脆弱度大体呈上升态势,水资源承载力呈直线下降趋势,环境不断被破坏的同时引起水资源承载力的急剧下降。根据表2的脆弱度划分,2004~2006年处于轻度脆弱区;2007~2008年处于中度脆弱区;2009、2011~2014年在强度脆弱区内波动,2010年高达极

强度脆弱区。水资源承载力情况不理想,尤其近年来水资源承载能力极差,开发利用已接近极限。

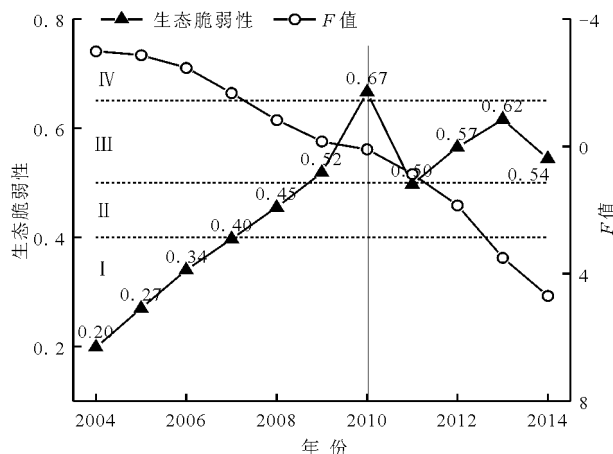


图4 阿克苏地区2004~2014年生态脆弱度及水资源承载力变化趋势

2004~2010年阿克苏地区的生态脆弱度缓慢上升,水资源承载力不断下降。这段时期国家开始实施西部大开发战略,积极开拓周边国家市场,新疆正处于“十一五”建设,阿克苏地区经济得到持续快速增长,农业高速发展,工业化扩大,环境资源需求消耗也不断增长。且由于深处西北内陆,缺乏高科技产业链,粗放的高投入低产出增长方式增加了经济成本,大大破坏了经济与生态的和谐性,使得生态脆弱性不断加大,间接导致地区水资源承载力的持续下降。2011~2014年生态脆弱度有小幅波动,此时新疆地区开始“十二五”规划建设实施,经济高速增长的同时综合实力不断增强,农业和工业的进一步发展导致生态与经济社会发展脱轨,环境资源遭到无限制的使用,生态脆弱度大幅上升,带来水资源承载力接近承载极限,水资源和生态成为阻碍经济社会发展的瓶颈因素。

3.2.3 基于生态脆弱性评价的水资源承载力影响因素 由表1准则层权重可知,自然成因和结果表现是影响阿克苏地区生态脆弱性主要因素,社会成因影响相对较小。分析指标层权重,自然成因中权重较高的指标有森林覆盖率和年降水量。植被覆盖率体现植物生长茂盛状况,降水量是植被生长的条件,地区绿化程度是最为影响生态脆弱性的;结果表现中生态环境用水和农业依赖度权重较高,强调生态要有保障即要增加生态用水量,控制农业用水量,产业结构要优化调整;分析社会方面,人均GDP权重较高,经济发展导致生态环境承载力超载,生态脆弱性增加。综合纵向比较分析权重,森林覆盖率比

重占的最多,加强森林植被建设对降低脆弱度至关重要。

自然和人为因素综合作用导致阿克苏地区的生态环境日渐恶化,气候条件干燥,水资源和森林资源有限,所以生态环境先决条件较差,不利于形成生态环境持续发展的良好基础。近年来又因该地区的经济社会发展与生态发展脱轨,以农为主经济发展方式单一而粗放,不仅经济效益增加少,生态环境也受到大范围地破坏。选择生态破坏最严重的2010年绘制生态影响因子的雷达图(图5)。分析图5,2010年影响因子中除有关生态保障的森林覆盖率与生态用水影响较大,农业的发展是生态脆弱性上升的主要原因。过高的农业依赖度虽可促进经济发展,但加大了水资源承载压力,农业用水严重负载;居高不下的垦殖率使得人与资源的矛盾更加突出,粗放低效的土地使用方式导致资源浪费,环境污染加重,同时对当地的气候影响严重,加剧了暴雨、春旱等极端气候现象的出现频率,陷入了自然生态互相作用的恶性循环中。

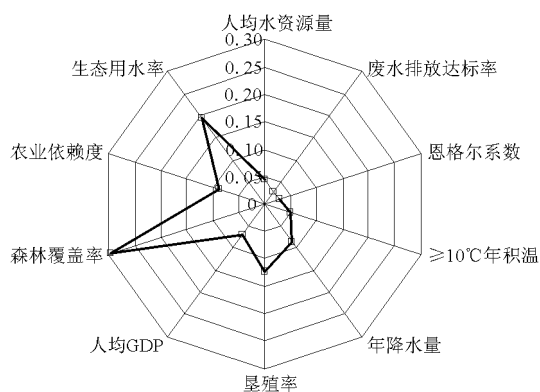


图5 阿克苏地区2010年生态脆弱性因子影响程度雷达图

4 结 论

本文基于主成分分析的阿克苏地区水资源承载力评价,对驱动力因素生态脆弱性进行探究分析,得出如下结论:

(1)2004-2014年阿克苏地区的水资源承载力呈现明显下降趋势,人口增加与以农为主的经济增长和低保障的生态用水率是引起水资源承载力下降的主要驱动力。

(2)生态脆弱性增加会加剧水资源承载力下降,阿克苏地区2004-2014年生态脆弱性逐年上升,通过保障生态用水量、提高森林覆盖率、控制耕地面积的措施可降低生态脆弱性,实现水资源承载力的回升。

(3)本文选取的评价指标体系需进一步完善。因数据有限,选取的指标具有代表性但不够全面且有一定的区域局限性,如何确定合适的生态指标有待探讨。

参考文献:

- [1] 王丽,毕佳成,向龙,等. 基于“五水共治”规划的水资源承载力评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 21-25.
- [2] 赵军凯,张爱社. 水资源承载力的研究进展与趋势展望[J]. 水文, 2006, 26(6): 47-50+54.
- [3] 王睿,周立华,陈勇,等. 基于模糊综合评判的杭锦旗水资源承载力评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 320-324+329.
- [4] 周宏春. 生态文明建设的路线图与制度保障[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 157-162+172.
- [5] 孙新章,王兰英,姜艺,等. 以全球视野推进生态文明建设[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 9-12.
- [6] 赵先贵,马彩虹,赵晶,等. 生态文明视角的陕西省资源环境压力评价[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 19-25.
- [7] SHANG Yizi, LU Shibao, LI Xiaofei, et al. Balancing development of major coal bases with available water resources in China through 2020[J]. Applied Energy, 2017, 194: 735-750.
- [8] GUO Ying, SHEN Yanjun. Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in the arid region of northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540:257-273.
- [9] CAI Yanpei, YUE Wencong, XU Linyu, et al. Sustainable urban water resources management considering life-cycle environmental impacts of water utilization under uncertainty[J]. Resources Conservation & Recycling, 2016, 108:21-40.
- [10] KOTIR J H, SMITH C, BROWN G, et al. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. [J]. Science of the Total Environment, 2016, 573:444-457.
- [11] 孙栋元,杨俊,胡想全,等. 基于生态保护目标的疏勒河中游绿洲生态环境需水研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 1008-1020.
- [12] 张华,张兰,赵传燕. 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2102-2108.
- [13] 杨倩,孙铖,李山勇,等. 湖北水资源生态承压能力的时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 289-295+302.

(下转第115页)

- computational fluid dynamics modeling to disinfection clearwells [C]// World Water and Environmental Resources Congress, 2001: 1–10.
- [28] DEMIREL E, ARAL M. Unified analysis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency evaluation based on vorticity field. Part II: Transport analysis [J]. *Water*, 2016, 8 (11): 495.
- [29] VAN DER HELM A W C, SMEETS P W M H, BAARS E T, et al. Modeling of ozonation for dissolved ozone dosing [J]. *Ozone Science & Engineering*, 2007, 29 (5): 379–389.
- [30] BARTRAND T A, FAROUK B, HAAS C N. Countercurrent gas/liquid flow and mixing: Implications for water disinfection [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35 (2): 171–184.
- [31] KIM D, CHO J. Obtaining real-time kinetic parameters on ozone decay from a full-scale ozone contactor using the axial dispersion reactor model [J]. *Ozone Science & Engineering*, 2014, 36 (1): 100–109.
- [32] 戚圣琦. 臭氧接触氧化模型及臭氧接触池优化研究 [D]. 北京:清华大学, 2015.
- [33] HUANG T H, BROUCKAERT C J, PRYOR M, et al. Application of computational fluid dynamics modelling to an ozone contactor [J]. *Water S A*, 2004, 30 (1): 51–56.
- [34] TANG G, ADU-SARKODIE K, KIM D, et al. Modeling cryptosporidium parvum oocyst inactivation and bromate formation in a full-scale ozone contactor [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39 (23): 9343–9350.
- [35] ZHANG Jianping. An integrated design approach for improving drinking water ozone disinfection treatment based on computational fluid dynamics [D]. Canada: University of Waterloo, 2006.
- [36] ZHANG Jian, HUCK P M, ANDERSON W B, et al. A computational fluid dynamics based integrated disinfection design approach for improvement of full-scale ozone contactor performance [J]. *Ozone Science & Engineering*, 2007, 29 (6): 451–460.

(上接第109页)

- [14] 刘子刚,郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究——以浙江省湖州市为例 [J]. *资源科学*, 2011, 33 (6): 1083–1088.
- [15] 钟晓娟,孙保平,赵岩,等. 基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20 (1): 109–113.
- [16] 徐广才,康慕谊,贺丽娜,等. 生态脆弱性及其研究进展 [J]. *生态学报*, 2009, 29 (5): 2578–2588.
- [17] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45 (3): 189–196.
- [18] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化 [J]. *水资源保护*, 2017, 33 (3): 31–37.
- [19] 余国安,李志威,黄河清,等. 人类活动影响下的干旱区河流地貌演变——以塔里木河为例 [J]. *水科学进展*, 2017, 28 (2): 183–192.
- [20] XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China [J]. *Sci Rep*, 2017, 7 (1).
- [21] 王文欣. 基于生态足迹法的阿克苏地区水资源承载力研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.
- [22] 钱程,穆文平,王康,等. 基于主成分分析的地下水水质模糊综合评价 [J]. *水电能源科学*, 2016, 34 (11): 31–35.
- [23] 马骏,李昌晓,魏虹,等. 三峡库区生态脆弱性评价 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (21): 7117–7129.
- [24] 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.
- [25] 赵跃龙,张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究 [J]. *地理科学*, 1998, 18 (1): 73–79.