

王太祥,王 腾. 西北干旱半干旱区水贫困测度及驱动因素分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(10):238-241.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.10.065

# 西北干旱半干旱区水贫困测度及驱动因素分析

王太祥<sup>1,2</sup>, 王 腾<sup>2</sup>

(1. 新疆生产建设兵团屯垦经济研究中心,新疆石河子 832000; 2. 石河子大学农业现代化研究中心,新疆石河子 832000)

**摘要:**通过构建水贫困评价指标体系,运用水匮乏指数(WPI)模型对西北干旱半干旱区2010—2014年水贫困状况进行测度,并进一步运用LSE模型对水贫困的驱动因素进行分析。结果表明,2010—2014年西北干旱半干旱区水贫困程度加重,水贫困呈明显的省、区分异特征,即甘肃省和宁夏回族自治区最为严重,其次是新疆维吾尔自治区,内蒙古自治区的水贫困程度相对最弱;西北干旱半干旱区的水贫困空间驱动类型为“资源-设施-能力-使用-环境”5因素联合型,不同地区因水资源禀赋、设施建设等差异,水贫困驱动因素有所不同。

**关键词:**层次分析法;熵权法;WPI模型;LSE模型;水贫困;驱动因素

**中图分类号:** F323.213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)10-0238-04

受气候变暖、产业结构和经济发展等因素影响,我国成为水资源供需矛盾最为突出的地区之一。如何采取有效措施缓解水资源短缺,促进西北干旱半干旱区经济、社会、生态三者协调发展是当前亟待解决的一项重大课题。传统上认为,解决水资源短缺问题应侧重于技术和水利工程建设等手段,但这类解决方案往往忽视了制度变化、经济激励等其他非技术和工程手段的应用。水贫困理论将人们对水资源短缺问题的研究视角由水文工程领域扩展到经济领域,为缓解水资源短缺问题提供了新的思路。早在1989年,瑞典水文学家 Falkenmark 提出以人均水资源量来衡量一个地区的缺水程度,并形成水文地质水压力指数(HWSI)评价指标体系<sup>[1]</sup>,而这一指标体系的非全面性导致评价结果存在一定偏差。为克服HWSI评价方法的弊端,德国学者 Ohlsson 进一步考虑了人类福利与社会发展间的关系,通过引入人文发展指数(HDI)指标形成了改进的SWSI体系<sup>[2]</sup>,但因缺乏与水资源开发、利用、管理有关的人类活动度量指标,SWSI体系也未能真实反映一国的水资源盈亏状况。

水匮乏指数(WPI)模型<sup>[3]</sup>以多学科交叉的视角,综合考虑水资源禀赋、水利工程、经济发展及人类福利等因素<sup>[4]</sup>,为一国或地区内的水资源合理评价提供了一个标准化的框架<sup>[5]</sup>。目前,国内外学者运用WPI模型对水贫困问题进行了广泛而深入的探讨,分国家、流域和社区3个层次进行研究。在国家层次上,孙才志等将WPI与ESDA、LSE等模型<sup>[6-7]</sup>相结合,在定量评价中国水贫困状况的基础上,测度了水贫困的空间关联格局,并划分出水贫困的驱动类型。从流域尺度看,

Manandhar 等对尼泊尔河西部的卡利甘达基河流域的水贫困状况及原因进行了系统阐述<sup>[8]</sup>;陈莉等在WPI指标框架下,结合流域水资源管理的实际情况,分别对石羊河流域、赣江流域的水贫困状况进行了合理评价<sup>[9-10]</sup>。在社区尺度上,Sullivan 等将WPI应用到坦桑尼亚、斯里兰卡及南非等12个城市或乡村社区的水资源管理评价中,对不同社区的水贫困状况进行了对比分析,明确了各社区在水资源管理中的优、劣势<sup>[3]</sup>。此外,有不少学者将水贫困研究进一步拓展到经济贫困以及与城市化、工业化进程的耦合关系等研究领域<sup>[11-12]</sup>,为有效缓解区域水贫困、促进经济社会的健康发展提供了理论依据。但是,基于特定视角对水贫困问题的探讨仍存在一定的拓展空间,一是现有研究多集中于用某一年的截面数据来评价一个国家、地区或流域的水贫困程度,对基于时间序列数据分析水贫困动态变化的研究尚有不足;二是虽将特定区域的水贫困评价纳入研究体系,但多针对具体的省(区)或流域,对区域特性相似的连片地区进行水贫困评价的文献相对较少。基于此,本研究在构建西北干旱半干旱区水贫困评价指标体系的基础上,综合运用熵权法、层次分析法确定各指标的权重,测度2010—2014年西北干旱半干旱区的水贫困状况,分析其演变规律,并借助LSE模型探究水贫困的驱动因素,以期对西北干旱半干旱区水资源的可持续利用与有效管理提供理论支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 指标数据的无量纲化

鉴于获取的原始数据存在量纲上的差异,须先对数据进行标准化处理。借鉴 Heidecke 等的研究成果<sup>[1]</sup>,本研究将指标数据的最大值乘以1.05、最小值除以1.05,以避免数据标准化过程中出现0和1边界值的问题。正向指标处理公式:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})/1.05}{\max_j(x_{ij}) \times 1.05 - \min_j(x_{ij})/1.05};$$

负向指标处理公式:

$$r_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) \times 1.05 - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) \times 1.05 - \min_j(x_{ij})/1.05}^{\circ}$$

收稿日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:71563040);新疆维吾尔自治区普通高校人文社会科学重点研究基地项目(编号:XJEDU020215C05)。

作者简介:王太祥(1980—),男,安徽怀宁人,博士,副教授,主要从事涉农产业经济研究。E-mail:wtx8007@126.com。

通信作者:王 腾,硕士研究生,从事涉农产业经济研究。E-mail:wangtengqau@163.com。

式中: $x_{ij}$ 为各指标获取的原始数据; $r_{ij}$ 为各指标无量纲化处理后的数据。

### 1.2 主客观综合赋权法

层次分析法(AHP)是一种定性定量相结合的决策方法<sup>[13]</sup>,依据专家经验准则和已有知识将各指标按重要程度排序,然后计算各指标的权重,主观性较强;熵权法(EVM)作为一种典型的客观赋权法,依据各指标的变异程度,利用信息熵确定权重<sup>[14]</sup>,避免了人为因素的干扰,但缺乏真实可靠性<sup>[15]</sup>。为更加合理地评价西北干旱半干旱区的水贫困状况,本研究综合2种方法的优缺点,将层次分析法、熵权法相结合来确定各指标的权重,得到第*i*个指标的综合权重<sup>[16]</sup>:

$$W_{ij} = \frac{w_{1ij}w_{2ij}}{\sum_{j=1}^n w_{1ij}w_{2ij}}$$

式中: $w_{1ij}$ 为层次分析法得到的指标权重; $w_{2ij}$ 为熵权法得到的指标权重; $W_{ij}$ 为主客观综合权重。

### 1.3 WPI模型

WPI是包括资源系统、设施系统、能力系统、使用系统、环境系统5个子系统在内的1组综合性评价指标,用以定量评价国家、流域、社区内的相对缺水程度。资源系统是指区域内可被利用的水资源量及水资源的可靠性;设施系统主要考虑人们对清洁水源的可获得性及用水安全性,涵盖用水普及率、灌溉普及率等指标;能力系统综合考虑政府财政状况、教育及健康等的水管理能力;使用系统主要体现农业、工业、生活等的用水效率;环境系统主要指水资源利用对生态环境的影响,包括反映水环境压力、土地退化程度等指标。在5个子系统下,每个子系统又包含多个评价指标,从而形成相对完整的评价体系。WPI值计算公式:

$$WPI_i = \sum_{j=1}^m W_{ij}r_{ij};$$

$$WPI = W_R WPI_R + W_A WPI_A + W_C WPI_C + W_U WPI_U + W_E WPI_E。$$

式中: $WPI_i$ 为第*i*个子系统的水贫困得分; $r_{ij}$ 为各指标标准化后的数值; $W_{ij}$ 为各指标的综合权重; $W_R$ 、 $W_A$ 、 $W_C$ 、 $W_U$ 、 $W_E$ 分别对应资源系统、设施系统、能力系统、使用系统、环境系统5个子系统的权重。

### 1.4 LSE模型

LSE是美国地理学家Weaver提出的一种定量分析方法,其基本原理是将1组数据的方差先由大变小,再由小变大,并根据这一变化特性获得1组数据的最小方差数,该数值即是理论分布与实际分布之间偏差最小的数,最能体现一个地区的实际情况<sup>[17]</sup>。方差计算表达式:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})。$$

式中: $S^2$ 为方差; $\omega_i$ 为样本数值; $\bar{\omega}$ 为样本均值; $n$ 为样本数,个。

根据Weaver的方法,确定一个子系统的WPI值占多大的比例才是主要驱动因素。“单因素驱动型”只有1个子系统的WPI值占总WPI值的100%,其他子系统的WPI值均为0;“双因素驱动型”是有2个子系统的WPI值各占总WPI值的50%,其余3个子系统的WPI均为0;依此类推,可获得“3因素驱动型”“4因素驱动型”“5因素驱动型”的理论标准。但是,WPI值的构成并不完全符合上述理论标准中的任意1

种。因此,本研究首先计算加权后子系统的WPI值占总系统WPI值的比重,获得子系统水贫困对总系统的贡献率,并按贡献率大小依次排序;再将子系统的贡献率(现实分布)与理论标准(理论分布)进行比较,利用方差公式依次求出驱动因素数量为由1~5个时的方差;最后,根据方差最小者就是距离理论分布标准最近的现实分布状况这一理论,判定水贫困的驱动类型。

### 1.5 数据来源

本研究所需原始数据来自2011—2015年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、干旱半干旱区各省份统计年鉴、水资源状况公报、环境状况公报及国家统计局网站。个别省份的少数指标数据存在缺失,本研究依据相近年份的数据采取插值法予以填补。

## 2 WPI评价指标体系的构建及权重的确定

借鉴国内外水贫困相关理论与实践经验,结合西北干旱半干旱区实际情况,构建包括资源系统、设施系统、能力系统、使用系统、环境系统5个准则层、20个指标层在内的水贫困评价指标体系(表1)。

在指标权重的确定中,先对各指标进行无量纲化处理,为体现WPI值越高、水贫困程度越严重,本研究将数值越大、水贫困程度越高的指标进行正向处理,将数值越小、水贫困程度越高的指标进行负向处理。然后,运用层次分析法、熵权法分别确定各指标的权重,并获得各指标的综合权重,计算出各准则层的权重(表1)。

## 3 结果与分析

### 3.1 西北干旱半干旱区水贫困时序变化及特征分析

由图1可见,西北干旱半干旱区水贫困呈“S”形变动趋势,2010—2011年,其WPI值由0.524上升至0.537,增加2.481%,主要是使用系统和环境系统共同作用的结果;2013年,西北干旱半干旱区的水贫困得到大幅度改善,WPI值由2011年的0.537降至0.505,3年内年均降低1.986%,能力系统对水贫困改善的贡献率相对最高,能力系统WPI值由0.540下降至0.464,下降了14.074%;2014年西北干旱半干旱区的WPI值再次上升至0.535,较2013年增加了5.941%,资源系统WPI值的明显增加是干旱半干旱区WPI值反弹的主要原因;5个子系统中,资源系统的WPI值相对最高,说明水资源匮乏是导致区域水贫困的根本原因;在时序变化上,资源系统的WPI值2010—2013年为持续下降阶段,2013—2014年为快速上升阶段;设施系统、能力系统及环境系统的WPI值相差不大,其中设施子系统WPI值整体呈上升态势,能力系统的WPI值波动幅度相对较大,变动轨迹与干旱半干旱区整体水平基本一致,环境系统的WPI值呈“快速上升—快速下降—缓慢上升”变动趋势。

### 3.2 西北各省(区)水贫困的时序变化特征

由图2可见,2010—2014年,内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区的WPI值均呈上升态势,水贫困程度加重,其中宁夏回族自治区WPI值为持续上升,新疆维吾尔自治区WPI值为波动上升,内蒙古自治区与甘肃省的WPI值变化轨迹基本一致,WPI值先缓慢上升,再缓慢

表1 西北干旱半干旱区水贫困评价指标体系及权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	AHP 权重	EVM 权重	综合权重		
西北干旱区水贫困评价	资源系统(R)	0.304	人均地表水资源量( $\text{m}^3/\text{人}$ )	0.409	0.221	0.373		
			人均地下水资源量( $\text{m}^3/\text{人}$ )	0.289	0.226	0.270		
			降水量(mm)	0.205	0.308	0.260		
			主要城市年降水量变异系数	0.096	0.246	0.098		
			设施系统(A)	0.133	总供水量( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	0.453	0.080	0.189
	城市用水普及率(%)	0.167	0.295		0.257			
	城市污水处理率(%)	0.118	0.398		0.245			
	节水灌溉率(%)	0.262	0.226		0.308			
	能力系统(C)	0.126	文盲率(%)		0.289	0.410	0.467	
	居民消费水平(元)		0.453	0.165	0.295			
	人均GDP(元)		0.107	0.173	0.073			
	环境污染治理投资占GDP的比例(%)		0.167	0.251	0.165			
	使用系统(U)	0.297	农田 $667 \text{ m}^2$ 平均灌溉用水量( $\text{m}^3$ )	0.453	0.156	0.313		
			万元工业增加值用水量( $\text{m}^3$ )	0.141	0.412	0.257		
			万元GDP用水量( $\text{m}^3$ )	0.262	0.299	0.347		
			人均日常生活用水量(L)	0.141	0.133	0.083		
			环境系统(E)	0.140	生态环境需水量( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	0.530	0.145	0.375
			化肥施用强度( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )		0.091	0.190	0.084	
	水土流失治理面积( $\times 10^3 \text{ hm}^2$ )	0.138	0.492		0.332			
	森林覆盖率(%)	0.247	0.173		0.208			

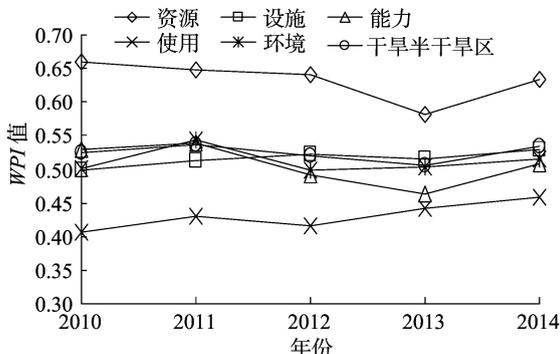


图1 西北干旱半干旱区水贫困的时序变化

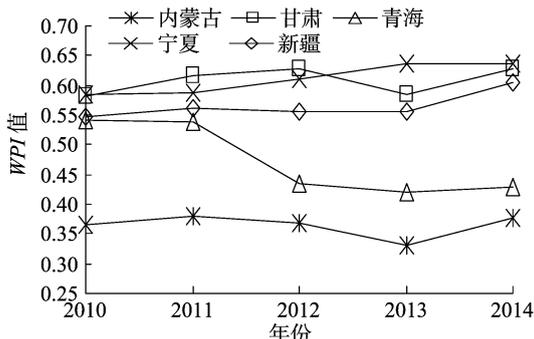


图2 西北各省(区)水贫困的时序变化

下降,后快速上升;青海省的水贫困状况5年内得到缓解,WPI值由2010年的0.541下降至2014年的0.428,年均下降4.177%;从水贫困的空间分布状况看,西北干旱半干旱区水贫困程度较为严重的是甘肃省、宁夏回族自治区,WPI值在0.580~0.640区间段内波动,其次是新疆维吾尔自治区,WPI值略低于甘肃省、宁夏回族自治区,内蒙古自治区的水资源贫困程度相对最轻,这与孙才志等基于国家尺度测算的水贫困得分排名<sup>[6]</sup>存在高度的一致性。

### 3.3 西北干旱半干旱区水贫困驱动因素分析

借助LSE模型,对2014年我国西北干旱半干旱区的水贫困驱动因素进行定量分析。由表2可见,整体上看,干旱半干旱区的水贫困由资源、设施、能力、使用、环境5个因素共同作用导致,主要基于3个方面:一是西北干旱半干旱区降水量少、蒸发量大,水资源总量较少;二是该区域在我国经济社会发展较为落后,尽管随着西部大开发战略的实施,中央和地方政府加大了对水利设施的投入力度,但因历史欠账较多,水利设施仍不完善,加上该地区农业粗放经营、农业用水占比高且效率低,导致使用系统成为区域水贫困的第2大驱动因子;三是西北干旱半干旱区生态环境脆弱,对水资源的依赖性较大,而前几年大规模的水土资源开发,引发了水土流失加剧、耕地沙化、盐渍化和水体污染等一系列环境灾害,而环境问题又促进了西北干旱半干旱区水贫困的发生与发展。

从各省(区)看(表2),内蒙古自治区的水贫困以资源、设施、环境3因素驱动为主,其累积贡献率高达92.077%;新疆自治区水贫困也是3因素驱动型,以资源、使用、环境驱动为主;甘肃省、宁夏回族自治区、青海省的水贫困驱动为4因素协同型,其中甘肃省水贫困驱动因素以资源、设施、能力、使用为主,而宁夏回族自治区水贫困驱动因素以资源、设施、使用、环境为主,青海省的水贫困驱动因素以设施、能力、使用、环境为主。

## 4 结论与讨论

内蒙古自治区西部多个盟市的人均水资源量仅占世界水平的1/2,是水资源严重短缺的地区之一<sup>[18]</sup>,加上粗放式经济增长方式对生态环境形成的巨大压力,土地沙化、水土流失等问题未得到根本性解决,地下水超采引发的河道断流、草场退化趋势仍在蔓延,严重影响该区域内水资源的可持续利用。新疆自治区作为农业大省,农业用水所占比重维持在90%以

表2 西北干旱半干旱区水贫困驱动因素

因素驱动类型	驱动因素	省(区)	WPI 值	各子系统 WPI 值占总 WPI 值比重(%)				
				资源(R)	设施(A)	能力(C)	使用(U)	环境(E)
3 因素驱动型	R - A - E	内蒙古自治区	0.378	62.492	14.978	5.587	2.336	14.607
	R - U - E	新疆维吾尔自治区	0.604	37.554	4.456	6.259	33.961	17.770
4 因素协同型	R - A - C - U	甘肃省	0.628	38.497	12.955	14.351	25.965	8.232
	R - A - U - E	宁夏回族自治区	0.637	34.375	13.267	9.936	31.573	10.849
	A - C - U - E	青海省	0.428	9.189	23.876	25.139	23.716	18.080
5 因素联合型	R - A - C - U - E	干旱半干旱区	0.535	36.003	13.143	11.960	25.411	13.484

上,且高耗能产业的发展导致工业需水量居高不下,而有限的治污投入资金,使污水未能得到有效处理,区域水质明显下降,加上西部在承接东部产业转移时因区域经济发展的有限性,导致短期内新疆地区承接的产业仍以粗放型为主,这无形加剧了区域内的用水压力,而有水则绿洲、无水则沙漠的区域发展特性,导致生态需水量占比较高,也对自治区的水资源构成严峻挑战。甘肃省和宁夏回族自治区深居内陆,降水不足,水资源严重短缺,随着经济的不断发展、人口规模不断增加,对区域内的水资源造成巨大压力,严重超出水资源的承载能力<sup>[19]</sup>,且2省作为引黄灌溉区,水利工程老化失修,未得到根本性改善,导致洪水频发、干旱持续,排水设施建设须得以进一步提升<sup>[20]</sup>,而近年来,甘肃省坚持推进退耕还林工程,水土流失问题得到有效遏制,生态环境也得到明显改善,因此环境系统未对甘肃省的水贫困产生明显的驱动效应。相较于其他省(区),青海省湖泊星罗棋布,水资源充沛,资源压力较小,青海省作为三江源核心区,近年来,国务院陆续启动一期、二期三江源生态保护和建设工程,使该区域生态环境恶化趋势得到有效控制,生态环境状况得以局部改善,水利设施投入得到加强,水资源贫困程度有所缓解,但青海省属于高海拔地区,地广人稀,在设施建设、水资源管理、利用能力和生态环境保护等方面均具有较大的提升空间。

在已有水贫困测度研究的基础上,结合西北干旱半干旱区水资源状况,构建了5个子系统20个具体指标在内的水贫困评价指标体系,并运用WPI模型对2010—2014年西北干旱半干旱区的水贫困状况进行评价,对2014年的水贫困驱动因素进行分析。结果表明,2010—2011年,西北干旱半干旱区的WPI值由0.524波动上升至0.537,水贫困程度加重,同年份内资源系统的WPI值得分相对最高,说明水资源的先天性匮乏是导致区域内水贫困的根本原因;2010—2014年,内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区的WPI值呈波动上升态势,水贫困程度加剧,而青海省的WPI值有所下降,水贫困状况趋于好转;西北干旱半干旱区整体水贫困驱动因素为5因素联合型,不同省(区)因资源禀赋、设施建设等差异,导致水贫困驱动因素也有所不同,其中内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区为3因素驱动型,甘肃省、宁夏回族自治区、青海省为4因素协同型。

#### 参考文献:

- [1]张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.
- [2]Ohisson L. Water conflicts and social resource scarcity[J]. Physics

& Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere, 2000,25(3):213-220.

- [3]Sullivan C A, Meigh J R, Giacomello A M, et al. The water poverty index: development and application at the community scale [J]. Natural Resources Forum, 2003, 27(3):189-199.
- [4]何栋材,徐中民,王广玉. 水贫困测量及应用的国际研究进展[J]. 干旱区地理,2009,32(2):296-303.
- [5]张辉,丁继新,王继峰. 水贫困指数在河西走廊三大内陆河流域的应用[J]. 人民黄河,2012,34(7):42-44.
- [6]孙才志,王雪妮. 基于WPI-ESDA模型的中国水贫困评价及空间关联格局分析[J]. 资源科学,2011,33(6):1072-1082.
- [7]孙才志,王雪妮,邹玮. 基于WPI-LSE模型的中国水贫困测度及空间驱动类型分析[J]. 经济地理,2012,32(3):9-15.
- [8]Manandhar S, Pandey V P, Kazama F. Application of water poverty index (WPI) in nepalese context: a case study of Kali Gandaki River Basin (KGRB) [J]. Water Resources Management, 2012, 26(1):89-107.
- [9]陈莉,石培基,魏伟,等. 干旱区内陆河流域水贫困时空分异研究[J]. 资源科学,2013,35(7):1373-1379.
- [10]曹茜,刘锐. 基于WPI模型的赣江流域水资源贫困评价[J]. 资源科学,2012,34(7):1306-1311.
- [11]王雪妮,孙才志,邹玮. 中国水贫困和经济贫困空间耦合关系研究[J]. 中国软科学,2011(12):180-192.
- [12]孙才志,汤玮佳,邹玮. 中国农村水贫困与城市化、工业化进程的协调关系研究[J]. 中国软科学,2013(7):86-100.
- [13]王珊珊,张广胜. 农户低碳生产行为评价指标体系构建及应用[J]. 农业现代化研究,2016,37(4):641-648.
- [14]杨磊. 我国粮食安全风险分析及粮食安全评价指标体系研究[J]. 农业现代化研究,2014,35(6):696-702.
- [15]延玮辰,何俊仕,董克宝,等. 基于组合权重方法对渭河流域水资源承载能力模糊综合评价[J]. 节水灌溉,2014(7):34-37,41.
- [16]郝洋,梁秀娟,孟凡傲,等. 基于AHP-熵权法的地下水水质模糊综合评价以白城市为例[J]. 节水灌溉,2016(6):51-54,55.
- [17]张耀光. 最小方差法在农业类型(或农业区)划分中的应用[J]. 经济地理,1986,6(1):49-55.
- [18]曹珊珊,刘欣. 内蒙古自治区水资源承载力评价研究[J]. 资源开发与市场,2014,30(3):311-313.
- [19]刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [20]李琳斐,薛惠峰. 宁夏水资源管理情况的系统分析和建议[J]. 山东社会科学,2015(5):266-268.