

黑河流域水资源压力定量评价

唐霞^{1,2}, 张志强¹, 尉永平³, 熊永兰¹, 王勤花¹

(1. 中国科学院兰州文献情报中心, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000; 3. 澳大利亚墨尔本大学澳中水资源研究中心, 墨尔本 3010)

摘要: 从流域水资源开发利用条件、经济发展与用水以及流域水环境压力 3 个角度出发选取 6 个指标构建了水资源综合压力指数, 对 2000—2010 年黑河流域的水资源压力状况进行了定量分析。结果表明, 黑河流域近 11 a 来水资源综合压力指数较高, 但总体上呈下降态势, 从 2000 年的 0.58 逐步降到 2010 年的 0.28。多年来黑河流域的综合治理包括节水型社会建设等措施卓有成效, 但地下水位不断下降, 生态环境缺水严重, 农业用水比重过高等问题仍未缓解。建议今后仍要继续加强节水型社会建设, 促进水资源高效利用, 压缩农业用水量, 以不断减轻流域水资源压力, 促进流域水资源可持续利用。

关键词: 水资源压力指数; 评价方法; 黑河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0219-06

中图分类号: TV211.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.046

Quantitative Evaluation of Water Resources Pressure in Heihe River Basin

TANG Xia^{1,2}, ZHANG Zhi-qiang¹, Wei Yong-ping³, XIONG Yong-lan¹, WANG Qing-hua¹

(1. Lanzhou Center for Literatures and Information, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Australia-China Centre on Water Resources Research, University of Melbourne, Melbourne 3010, Australia)

Abstract: The indicators system of water resources pressure were developed according to water resources quantity pressure, water resources economic pressure and water environmental pressure. Then, this indicator system was used for calculating water resources pressure index in Heihe River from 2000 to 2010. Results showed that the water resource pressure index in Heihe River was high, but overall, it showed a decreasing tendency. The index of water pressure had fallen from 0.58 in 2000 to 0.28 in 2010. This was attributed to the integrated river basin management including the water-saving society construction. However, It is still necessary to reduce water use in agriculture and increase ecological water use, to reduce the pressure and promote sustainable utilization of Heihe River basin water resources.

Keywords: water resources pressure index; water resource assessment method; Heihe River basin

随着人口增长和经济发展, 全球水资源供需矛盾十分突出, 水资源短缺已成为制约经济社会发展的重要因素之一。在一定的自然地理背景和时空尺度下, 人类满足自身需求以及维持整个社会经济活动而对其赖以生存和发展的水资源和水生态环境产生的影响和冲击, 简称水资源压力; 水资源压力的大小受到自然条件, 人口规模, 生活质量, 经济总量, 经济结构, 技术条件, 污染程度等多重因素的影响^[1]。国内外学者已经应用 Falkenmarke 指数^[2]评价了不同区域的

水资源压力现状, 并预测了未来水资源供应安全^[3-5]; 也有很多学者^[6-10]从水资源与人口、经济、环境等协调发展的角度出发, 通过构建水资源压力指标体系对全国各省级行政区以及部分城市的水资源压力状况进行了探讨。然而已有的区域水资源压力的研究, 多数是从人口和经济的角度分析区域水资源的承载能力, 而对生态环境需水与水资源利用的动态关系重视不足, 不能客观地反映水资源是否能够维护生态环境安全的需求。另一方面, 水资源压力的研究尚不完

收稿日期: 2013-12-03

修回日期: 2013-12-27

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“流域文化变迁与生态演化相互作用对流域生态政策影响的机理研究: 黑河与澳大利亚墨累—达令河流域对比研究”(91125007); 澳大利亚研究理事会探索项目(DP120102917)

作者简介: 唐霞(1985—), 女(藏族), 甘肃省兰州市人, 博士研究生, 研究方向为干旱区环境与水资源。E-mail: tangxia@llas.ac.cn.

通信作者: 张志强(1964—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 研究员, 主要从事生态经济学与区域可持续发展、地球科学战略等研究。E-mail: zhangzq@lzb.ac.cn.

善,依据现有的研究经验选取的指标体系或单一或缺乏可比性和通用性,因此需要开展更加深入的研究。

黑河流域是我国西北地区第二大内陆河流域,据统计,2010年该流域人口约为197.3万人,耕地面积占 $3.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。新中国成立以来,中游地区大规模的垦荒种粮,成为每年出口粮食达 $2.0 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ t}$ 的商品粮基地^[11]。中游过度用水已导致下游额济纳绿洲的生态环境急剧恶化,同时水事纠纷不断发生、流域内省际水事矛盾也日益突出。黑河流域水资源和生态环境问题已经危及全流域的社会经济发展。本研究以黑河流域为例,从流域水资源开发利用条件、经济发展与用水以及流域水环境压力出发构建水资源综合压力指数,通过定量分析水资源压力状况随着时间变化的规律,为流域水资源可持续利用管理与规划提供量化动态指导。

1 水资源压力分析理论

1.1 水资源评价的指标体系

水资源评价是对区域/流域水资源的数量、质量、

时空分布特征和开发利用条件进行全面分析和评估的过程,其稀缺性是推动水资源评价发展的主要动力^[12]。

由表1可以看出,过去的20 a里,相关研究者^[13]相继提出了定量评价水资源脆弱性、水资源压力、水资源紧缺性的指标,用于科学表征区域水资源的稀缺性。Falkenmark和Lundqvist^[14]最早呼吁人们关注全球水资源短缺问题,并提出“水资源压力指数”(WSI)作为区分气候和人类活动导致水短缺的一种手段。Gleick^[15]首次量化了生活基本日均需水量(BWR)为50 L(不包括食物生产)。Raskin^[16]将水资源可靠性和社会经济支撑能力纳入区域水资源脆弱性评价指标中。Sullivan^[17]应用矩阵方法计算“水资源贫困指数”(WPI),引入了生态系统服务、社会福利、人类健康和经济福利等指标。这些水资源评价指标(指数)因研究内容、评价空间尺度而异,其中水资源压力指数能够直观、简单易行地定量评价流域水资源状况与该区域人口经济环境状况的关系是否协调而被更多研究所采纳。

表1 国际上有关水资源状况的评价指标体系

指标	空间尺度	研究者
水资源压力指数	国家	Falkenmarke等 ^[2] , Falkenmark和Lundqvist ^[14]
供水系统的脆弱性	流域	Gleick ^[18]
基本生态需水量	国家	Gleick ^[15]
水资源脆弱性指数	国家	Raskin ^[16]
水资源稀缺指标	国家、地区	Heap等 ^[19]
水资源可获取性指数	地区	Meigh等 ^[20]
水资源稀缺指数	国家、地区	经济合作与发展组织(OECD) ^[21]
水资源贫困指数	国家、地区	Sullivan ^[17]
流域指示生物指数	流域	美国环境保护署(EPA) ^[22]
相对水资源压力指数	国家	水系统分析研究小组(WSAG) ^[23]
流域可持续发展指数	流域	Chavez等 ^[24]

1.2 水资源压力指标的内涵与研究进展

目前,国际上广泛接受的宏观衡量水资源压力的指标有3个:一是区域人均水资源量^[2],二是水资源开发利用程度^[5],三是水资源承载力^[25](表2)。1989年,瑞典水文学家Falkenmark^[2]定义人均水资源量为水资源压力指数(water stress index, WSI),以衡量区域水资源稀缺程度。1993年国际人口行动组织^[3](PAD)确定的水资源紧缺评价指标的标准与Falkenmark指数相似。近年来部分国内学者在水资源压力的概念、内涵、定量评估方法等方面做了有益的探索。贾绍凤等^[5]基于水资源压力指数概念建立了水资源安全评价指标体系。韩宇平等^[6]提出了“水资源综合

压力指数”,着重从水资源需求角度考虑,包括水资源数量压力、经济水资源压力和水环境压力。吴佩林^[7]通过计算人口压力指数、生态压力指数、经济发展压力指数和水资源紧缺指数,划分出我国水资源紧缺的不同类型区。刘玉龙等^[8]、朱法君等^[9]及廖乐等^[10]分析评价了不同城市的水资源利用压力。然而,这些水资源压力指数或指标存在3方面的问题:(1)生态问题考虑不足,水资源压力评价过程中仅考虑社会经济方面的水资源量供应指标,未考虑生态环境需水方面的指标;(2)缺乏长时间系列的数据,国内的研究仅采用个别年份资料评价中国各省区的水资源压力^[6-7],不能给出各区域水资源压力的动态变化值曲

线,从而难以定量预测未来水资源压力的变化趋势; (3) 国内流域水资源压力评价的研究较少,之前研究者已构建的指标体系能否直接应用于流域水资源压力评价还有待探讨。

表 2 水资源压力指标的 3 种评价方法

指标	内涵	计算方法	特征分析	阈值
人均水资源量	按用水主体人口来平均水资源量	水资源总量与人口数量之比	指标简明易用,方便数据获取;但未考虑生态用水的差异、水资源需求对水安全的影响、水资源的质量	<1 700 m ³ 出现水资源压力 <1 000 m ³ 慢性水资源短缺 <500 m ³ 出现严重缺水
水资源开发利用程度	流域/区域用水量占水资源可利用量的比率	年取用淡水资源量占可更新淡水总量的百分率	隐含考虑了生态用水;但水资源开发利用程度与紧缺程度不完全对应;无法全面反映水资源开发利用强度的时空差异;资料数据要求较高,不易获取	<10% 时为低水资源压力; 10%~20% 时为中低水资源压力; 20%~40% 时为中高水资源压力; >40% 时为高水资源压力
水资源承载力	水资源对社会经济发展和生态环境的综合承载能力,具有时空属性	趋势法、综合评价法、系统动力学法、多目标分析法	综合表征区域“水—生态—社会经济”的关系;但多学科交叉,约束因素较多,数据的获取与分析处理较难,具有高度复杂性与不确定性	阈值集合:水资源阈值,生态健康阈值,水环境阈值以及社会经济阈值

2 黑河水资源压力指标体系

2.1 指标体系构建

为了对黑河流域的水资源压力进行全面地分析,现从流域水资源开发利用程度、经济发展与用水以及流域水环境所面临压力的角度出发,选取 6 个指标作为评价黑河流域水资源综合压力的分项指标(表 3)。其中,人均水资源量、地均水资源占有量用来衡量区域发展的水资源条件。在经济方面,选取万元 GDP 用水量来反映区域经济发展产出的水资源利用效率;同时,为了量化农业用水效率反映区域节水能力,选取单位粮食产量用水量作为评价指标。在水环境压力方面,由于资料所限,选取废污水排放量和地下水水位的平均变幅来表示水资源系统所承受的压力。

表 3 黑河流域水资源压力指标体系

指标类型	具体指标
水资源开发利用程度	人均水资源量(m ³ /人)
	地均水资源占有量/(m ³ ·km ⁻²)
区域经济发展用水程度	万元 GDP 用水量(m ³ /万元)
	单位粮食产量用水量/(m ³ ·10 ⁻⁴ t ⁻¹)
水环境压力	废污水排放量/10 ⁸ t
	地下水水位平均变幅/m

由于黑河流域地处干旱内陆河流域,流域水资源系统循环和水资源利用具有十分鲜明的特征。黑河流域是西北地区的重要灌溉农业区,水资源状况直接决定灌溉农业的发展状况;干旱内陆河流域的特点决定了水资源系统的自净能力十分有限,废污水的排

量直接造成对水资源系统的压力;流域地下水位的变化状况,直接反映出流域水资源的压力状况。因此,这 6 个关键指标就可以很好地评价流域水资源压力状况。

用上述 6 个指标计算水资源压力时,为了便于比较,所有指标都以下述公式进行标准化处理,如果是正向指标,即属性值越大水资源压力越小,则使用公式(1),如人均水资源量;若为逆向指标,对于属性值越大水资源压力越大的指标,则使用公式(2),比如万元 GDP 用水量、单位粮食产量用水量等。

$$E_{ij} = (y_{jmax} - y_{ij}) / (y_{jmax} - y_{jmin}) \quad (1)$$

$$E_{ij} = (y_{ij} - y_{jmin}) / (y_{jmax} - y_{jmin}) \quad (2)$$

式中: y_{ij} ——各指标的具体值; E_{ij} ——各指标的量化值; y_{jmax}, y_{jmin} ——指标的最大、最小值; i ——指标序列; j ——时间序列。

2.2 指标权重的确定及水资源综合压力指数的推求

权重赋值方法可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法包括层次分析法、德尔菲法、判断矩阵分析法等,主要依据专家学者的知识和经验来确定权重因而客观性较差;客观赋权法是根据原始数据运用统计方法计算获得权重,其客观性较强,其中均方差法主要反映属性值的离散程度,一致性较高^[26-28]。本研究采用均方差法确定各指标权重。假设各单项为 x_j ,再算 x_j 的权重:

$$\mu(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ij}$$

$$\sigma(x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [E_{ij} - \mu(x_j)]^2}$$

$$\omega_j = \sigma(x_j) / \sum_{j=1}^n \sigma(x_j)$$

式中： E_{ij} ——指标 x_j 均值； $\sigma(x_j)$ ——指标 x_j 的均方差； ω_j ——指标 x_j 的权重。

有了指标权重后再对各单项指数按公式(3)进行计算得到水资源综合压力指数。

$$S = \sum_{k=1}^{11} E_{ij} \omega_j \quad (3)$$

式中： S ——区域水资源综合压力指数； ω_j ——各因素的权重分配； E_{ij} ——区域水资源分项压力指标的

量化值。

3 结果与讨论

3.1 结果分析

根据上述流域水资源压力计算方法,基于《甘肃省水资源公报(2000—2010年)》历时 11 a 的数据计算了黑河流域各项水资源压力指数,然后计算出各指标的权重系数(表 4),最终获取了水资源综合压力指数(表 5)。

表 4 黑河流域水资源压力指数标准化计算

年份	人均水资源压力指数	单位面积(hm ²)平均水资源压力指数	万元 GDP 用水量压力指数	单位粮食产量用水压力指数	废污水排放量压力指数	地下平均水位变幅压力指数
2000	0.134 2	0.256 5	0.974 8	0.780 2	0.811 3	0.390 7
2001	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.000 0	0.551 2
2002	0.329 8	0.404 4	0.573 0	0.965 4	1.000 0	0.988 4
2003	0.605 7	0.643 8	0.565 2	0.898 1	0.326 8	1.000 0
2004	0.698 9	0.719 9	0.323 3	0.874 7	0.817 6	0.575 5
2005	0.220 0	0.295 0	0.319 2	0.663 1	0.361 4	0.305 2
2006	0.241 8	0.276 9	0.169 1	0.599 7	0.834 2	0.259 8
2007	0.000 0	0.000 0	0.092 8	0.622 2	0.967 0	0.000 0
2008	0.322 7	0.338 3	0.061 3	0.585 6	0.985 4	0.475 2
2009	0.133 7	0.141 9	0.025 5	0.520 0	0.987 5	0.348 5
2010	0.073 1	0.114 9	0.000 0	0.000 0	0.989 1	0.411 8
权重	0.161 9	0.157 0	0.192 3	0.148 7	0.182 5	0.157 6

注:人口、经济、水资源等原始数据来源于《甘肃省水资源公报(2000—2010年)》。

表 5 水资源综合压力指数分级

综合压力指数	压力类型	具体特征
0~0.2	压力低	水资源与经济环境发展较均衡
0.2~0.4	压力中等	水资源短期内可以支持人口与经济发展并能够保证生态需水
0.4~1.0	压力高	人口与经济发展挤占生态需水,环境日益恶化,水资源危机严重

为了更直观地进行水资源压力的评价,参照 Rasi Nezami^[29]在伊朗南部 Maharlou—Bakhtegan 流域所做的研究,对水资源综合压力指数进行定量化分级(表 5)。从图 1 可看出,黑河流域近 11 a 的水资源综合压力指数均在 0.2 以上,水资源压力均属于高的等级。这说明当地人口与经济发展严重挤占了流域的生态需水,仍存在明显的水资源短缺危机。刘争胜^[30]研究得出 2000—2008 年黑河地表水开发率为 90.9%,中游部分地区已严重超采地下水。袁伟^[31]利用水资源承载压力指数计算了 2004 年黑河流域水资源承载压力度,研究得出黑河流域水资源承载能力属于超负荷承载。总体而言,2000—2010 年水资源综合压力指数呈下降态势,从 2000 年的 0.58 逐步降到 2010 年的 0.28。

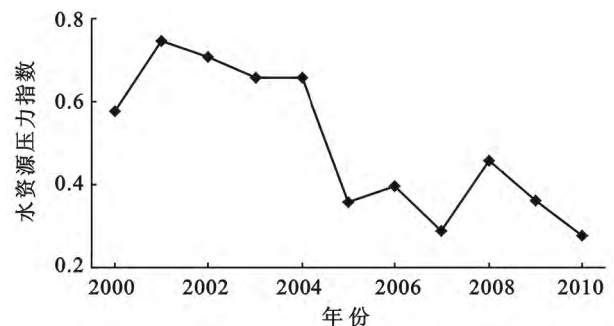


图 1 黑河流域 2000—2010 年水资源综合压力指数动态

3.2 结果讨论

从总的趋势来看,过去 11 a 来黑河流域水资源综合压力指数呈显著的下降趋势,表明黑河流域的水资源综合压力有所减缓。同时,也有研究表明 2004—2010 年黑河流域总水资源生态足迹整体上呈

现出下降趋势^[32]。黑河流域水资源压力的减缓,显然与两方面的因素密切相关:(1)2001年国务院批复《黑河流域近期治理规划》,启动了近10a的黑河干流水量统一调度管理,有效改善了流域水资源配置、生态保护和社会经济协调发展;(2)2002年3月国家水利部批准张掖地区开展节水型社会建设试点工作,大力促进了节水技术的推广利用和流域水资源的优化配置。主要包括:①黑河中游地区优化种植结构,开展灌区节水改造。张掖将粮、经、饲种植结构调整调整为70:25:5,在2003年全部取消6667hm²高耗水的水稻的种植^[33]。特别是2012年该市玉米制种、啤酒大麦、马铃薯、牧草、中草药等低耗水作物的种植面积已达到 1.33×10^5 hm²,年节水可达 $1.60 \sim 2.40 \times 10^8$ m³,有效缓解了水资源压力^[34]。其中,2000和2005年全流域的水资源总量相当,均到达了 2.50×10^9 m³,但是与2000年相比,2005年水资源综合压力指数下降了38%。加之,自2000年以来黑河流域中游地区通过推广喷滴灌、微灌、低压管灌、渠道防渗等节水技术,不断增加节水灌溉面积。2008年之后,张掖和酒泉地区的节水灌溉面积增加至约 1.00×10^5 hm²。②工业节水措施逐步加强,初显节水成效。随着“工业强市”战略的实施,张掖水务、环保和资源管理部门通过加强对企业用水量的严格考核和对水污染治理采取强制性措施;多渠道增加节水投入,引进先进的技术和设备,争取水重复利用率达到65%。对重点行业(化工、建材、造纸、冶金等)的单位产品实行用水定额管理。在用水效率上,近11a来黑河流域各行政区单位产值用水量持续降低,用水效率逐年提高。2000—2010年,黑河流域万元GDP用水量减少了1153.7m³。

节水型社会建设试点对于缓解黑河分水后张掖市的水资源紧张起到了一定的积极作用。但是从全流域的用水情况来看,黑河流域用水结构仍然不合理(图2)。农业用水排第一,近11a来农业用水比例略有减少,但多年平均用水量高达84.7%;生态用水居于末位仅为0.8%。张军^[32]等利用生态足迹法进行研究,结果表明2004—2010年平均农业用水生态足迹占总生态足迹的92.37%,生态环境用水生态足迹仅占1.17%^[32]。农业灌溉用水大量挤占了生态用水,是黑河下游生态环境恶化的根源之一^[35]。虽近几年略有增加,但是黑河流域留给生态用水的比例还是较低,这些水量对于中下游生态恢复还远远不够,应该从更长远角度综合考虑生态安全,严格控制农业用水需求,将农业挤占的水量归还给流域生态环境,实现生态和社会经济协调发展的目标。

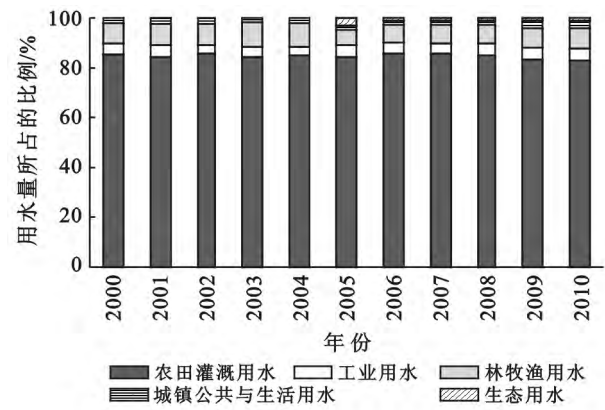


图2 黑河流域用水结构比例

自2000年国家实施黑河水资源统一调度以来,共采取了20次“全线闭口,集中下泄”措施,有效增加了进入下游河段的水量。尤其是2001年中游地区在遭遇60年一遇的特大干旱的情况下,仍然使黑河水到达额济纳旗首府达莱湖,当时全流域的水资源总量仅为 1.42×10^9 m³,可利用的水量骤减,此时水资源综合压力指数达到11a来的最大值0.75。在保证顺利完成省际分水任务的前提下,也加剧了黑河中游地区的用水压力。同时,可见极端天气事件等对年度评价指标有较大影响,今后的研究应考虑这些噪音的影响。本研究也未考虑流域水资源分布不均的特点,将来在评价过程中应考虑流域内部的空间变异性,以确定水资源压力“峰值”地区。最后本研究提出的水资源压力评价指标如能与水文生态模型进行集成,就可定量分析不同情景条件下通过调控关键因子将水资源的压力分项指标以及综合压力指数调整到期望的状态,指导流域管理调控的方向和措施。

4 结论

针对目前采用的评价指标不能够全面客观地反映水资源压力状况,以及所构建的指标体系在应用过程中存在“重区域轻流域”、“重经济轻生态”的问题,选取了6个关键指标对2000—2010年黑河流域水资源综合压力指数进行了定量分析。结果表明,黑河流域的水资源压力较高;但通过流域治理、节水、调水等一系列措施,水资源综合压力指数逐年下降,整体情况向好转变。所以,今后仍应继续加强节水型社会建设,促进水资源高效利用,压缩农业用水量,优化调整用水结构。另外,今后亟需加强干旱半干旱地区长时间序列的水资源压力状况评价,建立长时间序列的相应的指标数据集,为生态用水科学评价提供可靠的数据资料。

[参 考 文 献]

[1] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2007 中国可持续发展

- 展战略报告:水治理与创新[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] Falkenmark M. The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed [J]. *Ambio*, 1989,18(2):112-118.
- [3] Robert E, Pamela L. Sustainable Water: Population and the Future of Renewable Water Supplies[M]. Washington D C: Population Action International, 1993.
- [4] Downs T, Mazari-Hiriart M. Sustainability of least cost policies form meeting Mexico City's future water demand [J]. *Water Resources Research*, 2000,36(8):2321-2339.
- [5] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. *地理科学进展*,2002,21(6):538-545.
- [6] 韩宇平,阮本清. 中国区域发展的水资源压力及空间分布[J]. *四川师范学院学报:自然科学版*,2002,23(3):119-224.
- [7] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*,2005,33(10):143-149.
- [8] 刘玉龙,杨丽. 区域水资源利用压力分析评价[J]. *水利水电技术*,2009(11):1-4.
- [9] 朱法君,邬扬明. 浙江省各地市水资源压力指数评价[J]. *长江科学院院报*,2010(9):14-16.
- [10] 廖乐,吴宜进,毕旭. 湖北省各主要地市水资源压力指数评价[J]. *环境保护科学*,2012,38(3):82-86.
- [11] 徐中民,张志强,程国栋. 生态经济学理论方法与应用[M]. 河南 郑州:黄河水利出版社,2003.
- [12] 王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. *水利学报*,2006,37(12):1496-1502.
- [13] Norman E S, Dunn G, Bakker K, et al. Water security assessment: Integrating governance and freshwater indicators[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(2): 535-551.
- [14] Falkenmark M, Lundqvist J. Towards water security: Political determination and human adaptation crucial [J]. *Natural Resources Forum*, 1998, 22(1):37-51.
- [15] Gleick P H. Basic water requirements for human activities; Meeting basic needs [J]. *Water International*, 1996, 21(2): 83-92.
- [16] Raskin P. Water futures; assessment of long-range patterns and problems background document to the comprehensive assessment of the freshwater resources of the world report[R]. Stockholm; Stockholm Environmental Institute, 1997.
- [17] Sullivan C. Calculating a water poverty index [J]. *World Development*, 2002, 30(7):1 195-1 210.
- [18] Gleick P H. Vulnerability of water systems[M] // Waggoner P E, ed. *Climate Change and US Water Resources*. New York: Wiley, 1990.
- [19] Heap C, Kemp-Benedict E, Raskin P. Conventional worlds technical description of bending the curve scenarios[R]. Boston; Stockholm Environmental Institute, 1998.
- [20] Meigh J, McKenzie A, Austin B, et al. Assessment of global water resources-phase II: Estimates of present and future water availability in Eastern and Southern Africa[R]. DFID Report 98/4, Wallingford; Institute of Hydrology, 1998.
- [21] Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD). Aggregated environmental indices; review of aggregation methodologies in use[R]. Paris; Organisation of Economic Cooperation and Development, 2002.
- [22] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Index of watershed indicators; An overview[R]. Washington; Office of Wetlands, Oceans and Watersheds, 2002.
- [23] Water Systems Analysis Group(WSAG). Relative water stress index [R]. Durham; University of New Hampshire, 2005.
- [24] Chaves H M L, Alipaz S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(5): 883-895.
- [25] 朱一中,夏军,谈戈,等. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. *地理科学进展*,2000,21(2):180-188.
- [26] 王明涛. 多指标综合评价中权重确定的离差、均方差决策方法[J]. *中国软科学*,1999,8(8):100-107.
- [27] 何倩,顾洪,郭晓晶,等. 多种赋权方法联合应用制定科技实力评价指标权重[J]. *中国卫生统计*,2013,30(1): 27-30.
- [28] 袁子勇,梁虹,罗书文. 基于指标权重的喀斯特地区水资源承载力评价[J]. *水资源与水工程学报*,2009,20(1):85-87.
- [29] Rasi N S, Nazariha M, Moridi A, et al. Environmentally sound water resources management in catchment level using DPSIR model and scenario analysis [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2013, 7(3):569-580.
- [30] 刘争胜,贾新平,赵银亮. 西北诸河水资源开发利用调查评价[J]. *人民黄河*,2011,33(11):85-87.
- [31] 袁伟,郭宗楼,吴军林,等. 黑河流域水资源承载力分析[J]. *生态学报*,2006,26(7):2108-2114.
- [32] 张军,周冬梅,张仁陟. 黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J]. *中国沙漠*,2012,32(6):1779-1785.
- [33] 张掖市水务局. 张掖市节水型社会建设试点资料汇编[R]. 甘肃 张掖:水务局,2004.
- [34] 郭晓东,陆大道,刘卫东,等. 节水型社会建设背景下区域节水措施及其节水效果分析:以甘肃省河西地区为例[J]. *干旱区资源与环境*,2013,27(7):1-7.
- [35] 任建华. 黑河流域水资源开发对生态环境的影响[J]. *水土保持通报*,2005,25(4):94-96.