

引用格式: 苏贤保, 李勋贵, 赵军峰. 水资源-水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 1016-1025. [Su X B, Li X G, Zhao J F. carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1016-1025.] DOI: 10.18402/resci.2018.05.14

水资源-水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究

苏贤保^{1,2}, 李勋贵^{1,2}, 赵军峰^{1,2}

(1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学干旱区与沙漠研究中心, 兰州 730000)

摘要: 水资源承载力研究对水资源可持续开发和合理规划意义重大。针对目前水资源系统承载力研究中存在研究重点考虑不足, 研究方法存在误差等问题, 以甘肃省17个流域为评价单元, 从水资源和水环境的阈值入手, 提出新的相对水资源承载力方法来量化研究区2015年、2020年、2030年的水资源系统承载力。结果表明: 本研究所用的水资源系统承载力计算方法较现有的相对水资源承载力方法更符合实际; 甘肃省大部分区域的水资源系统承载力呈超载状态, 超载的流域集中在西北, 不超载的流域集中在东南, 承载力、承载规模和开发潜力均呈现东南高、西北低的分布格局; 综合来看, 河西内陆河流域和湟水流域不具备开发潜力, 黄河干流区间和泾河流域开发潜力较小, 嘉陵江、渭河、洮河、大通河流域水资源系统开发潜力最大, 其他流域开发潜力居中; 水资源对水资源系统综合承载力的影响较水环境更强; 对比甘肃省水资源承载力评价结果和水资源系统开发潜力与水资源系统脆弱性评价结果, 发现三者的分布格局基本吻合, 这一现象揭示了三者之间的内在联系。研究结果可为区域水资源系统承载力计算, 以及水资源合理规划和可持续开发利用提供科学依据。

关键词: 水资源; 水环境; 相对水资源承载力; 开发潜力; 甘肃省

DOI: 10.18402/resci.2018.05.14

1 引言

进入21世纪以来, 随着人口增长和社会经济快速发展, 水资源迅速成为影响区域可持续发展的战略资源^[1], 水资源短缺成为全球面临的棘手问题, 全球近24亿人的用水得不到保障, 近40亿人面临缺水^[2-4]。中国西北地区也是典型的缺水地区之一, 加之近年来气候变化和人类活动的影响加剧^[5-7], 使得该区域资源性缺水和水质性缺水问题突出^[8], 水资源系统能否支撑经济社会的发展成为亟待解决的问题^[9]。

水资源承载力研究可以量化水资源系统对经济社会发展的支撑能力, 有助于合理规划区域未来

的水资源开发战略^[10,11]。目前对水资源承载力的研究中, 在研究重点上, 侧重于水资源数量的承载力^[12,13], 将流域的水资源承载力与水环境承载力两者单独研究, 没有考虑水利工程的供水能力和水环境容量对水资源系统承载力的影响; 将水资源承载力现状评价、规模预测、整体优化单独研究^[14,15], 致使研究成果难以比较分析。在研究方法上, 近年来广泛应用的系统动力学法、模糊综合评价法等传统常规方法^[16-19]主要从影响水资源承载力的因素或供需平衡的角度进行现状评价或规模预测, 研究中没有从可利用水资源量中剔除劣V类及以下水质的水量, 没有将可利用水资源量进行水质类别划分就全部用

收稿日期: 2017-09-08; 修订日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679115, 51109103); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2016-173)。

作者简介: 苏贤保, 男, 云南楚雄人, 硕士生, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: 1974069979@qq.com

通讯作者: 李勋贵, E-mail: lixung@lzu.edu.cn

2018年5月

于生活和生产中,致使计算的水资源承载力偏大;而现有的相对水资源承载力方法^[20,21](*carrying capacity of relative water resources*),计算研究区各评价单元的承载力时,均用全国平均的人均生活用水量和单位GDP用水量,各评价单元之间用水效率和排污情况以及水质标准的差异导致各流域的综合承载力偏大或偏小。

传统的水资源单一数量承载力已不能满足水资源规划与管理的需求,综合考虑水资源与水环境双重约束下的水资源系统承载力,对水资源极度匮乏的甘肃省的社会经济与生态环境可持续发展意义重大。本研究以甘肃省17个三级流域为研究区,采用新的相对水资源承载力方法,从水资源和水环境的阈值入手^[22],将二者综合承载的人口和GDP规模作为水资源系统的综合承载规模,并结合静态和动态研究,对水资源系统的承载力进行现状评价、规模预测和整体优化一体化研究,得出一个综合性和量化的研究成果,探究甘肃省水资源系统承载力的变化及其开发潜力,据此为全省未来的水资源合理规划管理和水资源可持续开发利用提供科学依据。

2 研究区概况、研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况

甘肃省地处青藏、蒙新和黄土高原的交汇处,地域狭长,介于北纬32°11'N—42°57'N和东经92°13'E—108°46'E之间,东西长1655 km,南北宽530 km,面积42.58万km²。全省气候从东南到西北包括北亚热带湿润区、高寒区、干旱区的各种气候类型,如图1a所示。年平均降雨量36.6~734.9 mm,年均温0~16℃。地貌类型齐全,山地、高原、平川、河谷、沙漠交错分布。植被类型丰富,囊括草原、草甸、沼泽、针叶林、阔叶林、荒漠、灌丛等多种类型。2015年,全省人口2599.5万,GDP总量6790.32亿元,水资源总量198.81亿m³,水资源开发利用率59.94%,人均水资源量458m³,缺水量10.72亿m³,缺水率8.3%,劣V类水质的河段比例18.3%,资源型缺水、水质型缺水和工程型缺水并存。全省共3个一级流域,6个二级流域,18个三级流域,分别用代码1~18表示于流域分区图1b中,由于苏干湖流域没有数据,故本研究仅以其它17个三级流域为评价单元。

2.2 水资源系统承载力

本研究在参考前人水资源承载力概念基础上^[23,24],认为水资源承载力的承载主体是整个水资源系统,遂将其定义为水资源系统承载力。区域水资源系统承载力是指在一定社会经济技术水平下,在保证生态环境系统和水资源系统维持自身正常功能的前提下,以社会经济系统可持续发展与生态环境系统良性循环相协调为原则,不受区域内其他资源的限制,不考虑区域间物质流通引起的虚拟水转移为条件,在区域内水资源合理开发利用情况下,水资源系统能维持社会经济系统持续稳定健康发展的最大承载水平,即人口和GDP规模。水资源系统承载力包括水资源承载力和水环境承载力两个方面,取其综合承载力作为水资源系统的承载力。

2.3 水资源系统承载力模型

2.3.1 水资源系统阈值分析

(1)水资源阈值分析。水资源阈值 W_{max} 取可利用水资源量 $W_{可\text{利用}}$ 和可供水能力 $W_{可\text{供水能力}}$ 的最小值,其中居民生活用水阈值不能超过可利用水资源量中Ⅲ类以上水质的水资源量 $W_{max\circ}$

$$W_{可\text{利用}} = W_{地表} + W_{地下} + W_{过境} \pm W_{调水} - W_{洪水} - W_{Emin} - W_{劣水} \quad (1)$$

$$W_{可\text{供水能力}} = W_{蓄引提} \pm W_{调水} + W_{取水泵站} + W_{配套机电井} + W_{其它供水} \quad (2)$$

式中 $W_{地表}$ 表示自产地表水资源总量(包含汛期弃水量); $W_{地下}$ 表示地下水可开采量; $W_{过境}$ 表示过境水可利用量; $W_{调水}$ 表示跨流域调水; $W_{洪水}$ 表示汛期难控制利用洪水,采用汛期来水量扣除蓄水量和耗水量^[25]; W_{Emin} 表示非汛期河道最小生态环境需水,计算参照《全国水资源综合规划》^[26]取非汛期径流的15%,汛期由洪水担当河道最小生态环境需水,不再重复计算; $W_{劣水}$ 表示劣V类及以下水质的水量; $W_{蓄引提}$ 表示水库等水利工程的蓄水、引水和提水; $W_{调水}$ 表示跨流域调水; $W_{取水泵站}$ 表示取水泵站供水; $W_{配套机电井}$ 表示配套机电井供水; $W_{其它供水}$ 表示其他工程供水。

(2)水环境容量阈值分析。计算水环境容量时,取COD和氨氮作为甘肃省各流域的水环境容量指标,其浓度参照地表水环境质量标准(GB3838-2002)^[27],水环境能容纳的COD排放阈值如公式(3)所示:

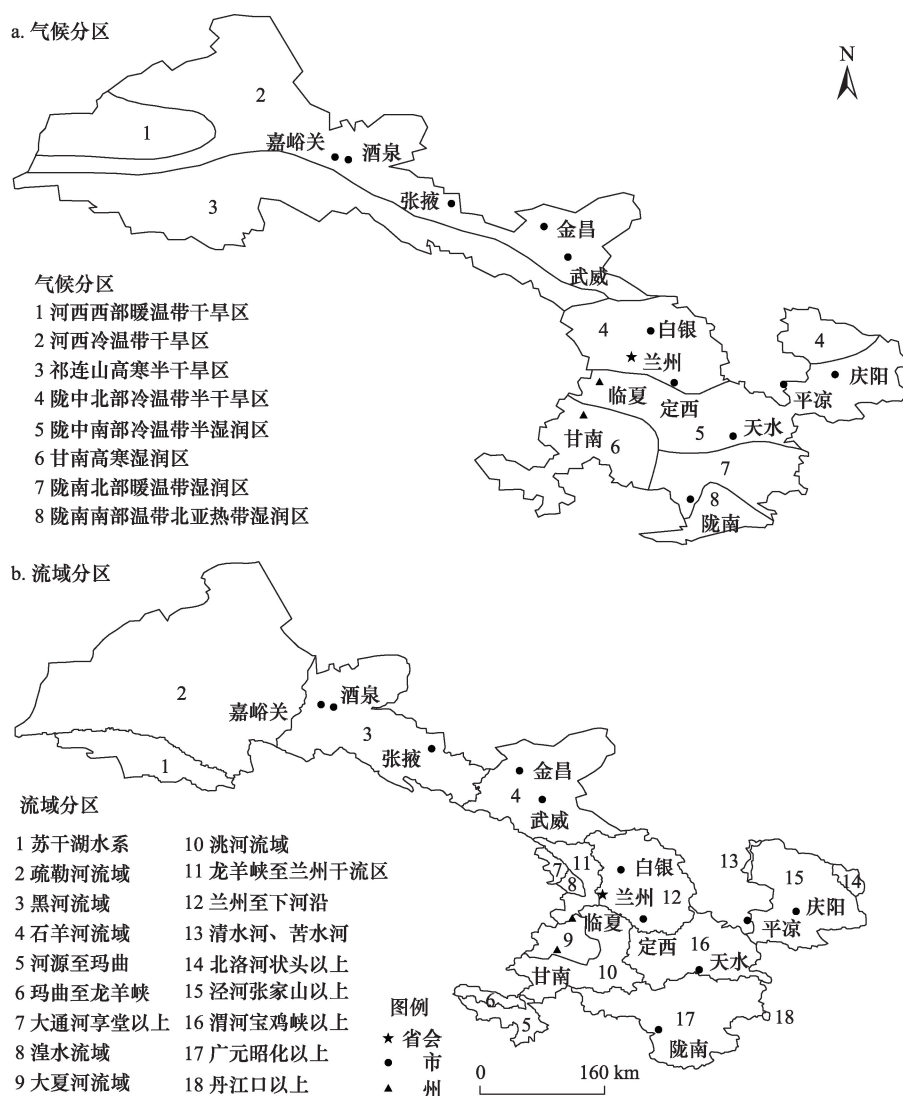


图1 甘肃省气候分区、流域分区

Figure 1 Climate and drainage basin partition of Gansu Province

$$COD_{max} = \sum_{i=1}^n C_{i目标} V_i = (C_{入境} V_{入} + COD_{max排污}) - (C_{取水} V_{取} + C_{出境} V_{出}) \quad (3)$$

式中 COD_{max} 表示流域的理论 COD 容量; n 为河段数; $C_{i目标}$ 、 V_i 分别表示流域的水质目标 COD 浓度和水量; $C_{入境}$ 、 $V_{入}$ 分别表示入境水 COD 浓度和水量; $COD_{max排污}$ 表示人类排放入河的 COD; $C_{取水}$ 、 $V_{取}$ 分别表示人类取水的 COD 浓度和水量; $C_{出境}$ 、 $V_{出}$ 分别表示出境水 COD 浓度和水量, 据此计算出人类排放的 COD 阈值 COD_{max} 排污, 同理可计算出水环境能承受的氨氮排放阈值 $N_{max排污}$ 。

2.3.2 水资源系统承载力模型

水资源和水环境所能承载的人口计算公式为:

$$P_1 = \frac{W_{max}}{w_p + w_g G_g}, P_1 \leq \frac{W_{maxp}}{w_p} \quad (4)$$

$$P_2 = \text{Min} \left(P_c = \frac{COD_{max排污}}{C_p + C_g G_g}, P_n = \frac{N_{max排污} G_g}{N_p + N_g G_g} \right) \quad (5)$$

式中 P_1 表示水资源承载人口; w_p 表示人均生活用水; w_g 表示单位 GDP 用水; G_g 表示人均 GDP。 P_2 表示水环境承载人口; P_c 表示 COD 承载人口; P_n 表示氨氮承载人口; C_p 表示人均生活排 COD; C_g 表示单位 GDP 排放 COD; N_p 表示人均生活排氨氮的量; N_g 表示单位 GDP 排氨氮的量, 取 P_1 、 P_2 的最小值为综合承载人口, 同理可计算出水资源和环境承载的 GDP 规模及综合承载规模。由实际人口和 GDP 规

2018年5月

模分别与综合承载的人口和GDP规模的比值 CI_p 、 CI_g 决定水资源系统是否超载,据此将其分为8个等级^[21],如表1所示。

表1 水资源系统承载力分级

Table 1 Classification of water resource system carry capacity

CI_p, CI_g	人口、GDP 承载力等级	CI_p, CI_g	人口、GDP 承载力等级
$CI_p, CI_g \leq 0.5$	低承载	$1.4 < CI_p, CI_g \leq 1.7$	中超载
$0.5 < CI_p, CI_g \leq 0.9$	高承载	$1.7 < CI_p, CI_g \leq 2.0$	强超载
$0.9 < CI_p, CI_g \leq 1.1$	承载平衡	$2.0 < CI_p, CI_g \leq 2.3$	高超载
$1.1 < CI_p, CI_g \leq 1.4$	弱超载	$CI_p, CI_g > 2.3$	极超载

最大承载规模即不考虑水环境对水资源系统承载力的影响,采用上述水资源系统承载力模型进行计算。

2.4 数据资料来源

本研究采用的2015年水资源数据来源于甘肃省水利厅《水资源公报》^[28],2015年供水能力数据来源于甘肃省水利厅《水利发展统计公报》^[29],水环境数据来源于《甘肃省环境统计公报》^[30],经济发展数据来源于《甘肃省统计年鉴》^[31]。2020年、2030年各流域水资源阈值中地表水、地下水可开采量、过境水可利用量、汛期难控制利用洪水、河道最小生态环境需水量用2001—2015年均值,跨流域调水量、供水能力用2015年值。人均生活用水量、单位GDP用水量、人均生活排污量、单位GDP排污量等参数以2001—2015年的变化进行趋势外推。各流域人

口和GDP增长率、排污下降率均来源于《甘肃省十三五国民经济发展规划》^[32]的各个专题规划,水环境阈值中水质目标来源于《甘肃省水污染防治工作方案(2015—2050)》^[33]。甘肃省气候分区图和流域分区图分别由甘肃省测绘局和甘肃省水利厅提供。

3 结果分析

采用水资源系统承载力模型对甘肃省17个三级流域2015年、2020年、2030年的水资源系统承载力进行研究,给出采用不同用水标准(人均生活用水量、单位GDP用水量、人均生活排污量、单位GDP排污量)计算出的承载规模差异(如图2所示),以及各流域承载力的“定性”评价结果、承载规模的“定量”计算结果,分别如图3、图4(见1021页)所示。

3.1 不同用水标准承载规模对比

从图2a中可以看出,所有流域均用全国平均用水标准时计算的承载人口较实际人口偏大,均用全省平均用水标准时偏小,每个流域采用各自用水标准时承载人口与实际人口的差异最小。从图2b可以看出,以全国、全省用水标准时计算的承载GDP较实际规模在西北部流域偏大,在东南部流域偏小,各流域用各自用水标准时承载GDP与实际规模的差异最小,本研究所用方法较现有的相对承载力方法计算的承载规模更符合实际。

3.2 水资源系统承载力变化

从图3中可以看出,甘肃省大部分区域的人口

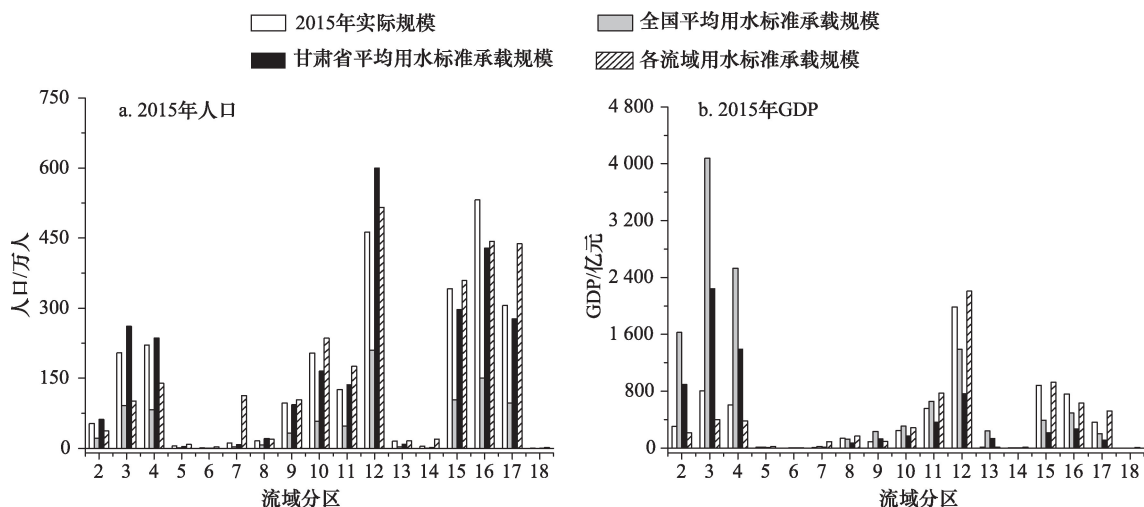


图2 不同用水标准的水资源承载规模对比

Figure 2 Comparison of water resource carry scale between different water consumption standard

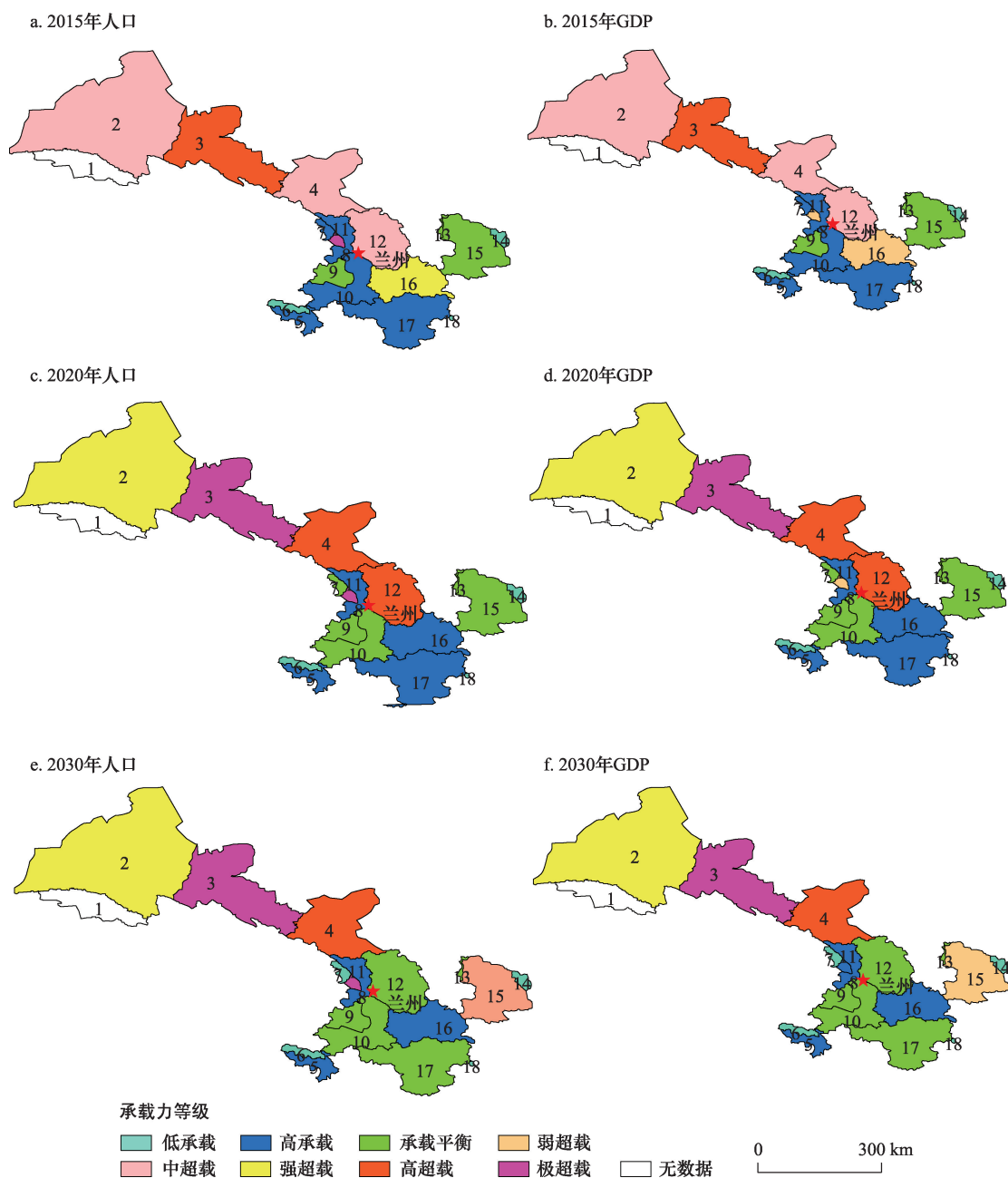


图3 甘肃省水资源系统承载力评价结果

Figure 3 Water resource system carrying capacity evaluation results of Gansu Province

注:数字1—18表示三级流域代码,详见图1b。

和GDP处于超载状态,这与巫春平等^[34]的评价结果相似。全省水资源系统承载力呈现东南高、西北低的分布格局,承载力自东南向西北递减,超载的流域集中在西北,不超载的流域集中分布在东南。从图3a、图3c、图3e对比人口的变化,疏勒河流域、石羊河流域、泾河流域、嘉陵江流域承载力下降,湟长流域、黑河流域保持严重超载状态,兰州至下河沿、

渭河流域承载力上升。对比图3b、图3d、图3f中GDP的变化,湟水流域、渭河流域的GDP承载力相较人口更高,其他变化与人口的变化一致。从图4中可以看出,全省水资源系统承载的人口和GDP规模亦出现东南高、西北低的趋势,这与图3的“定性”评价结果相同。对比图4a、图4c、图4e中最大承载人口与实际人口,除河西内陆河三个流域外,所有

2018年5月

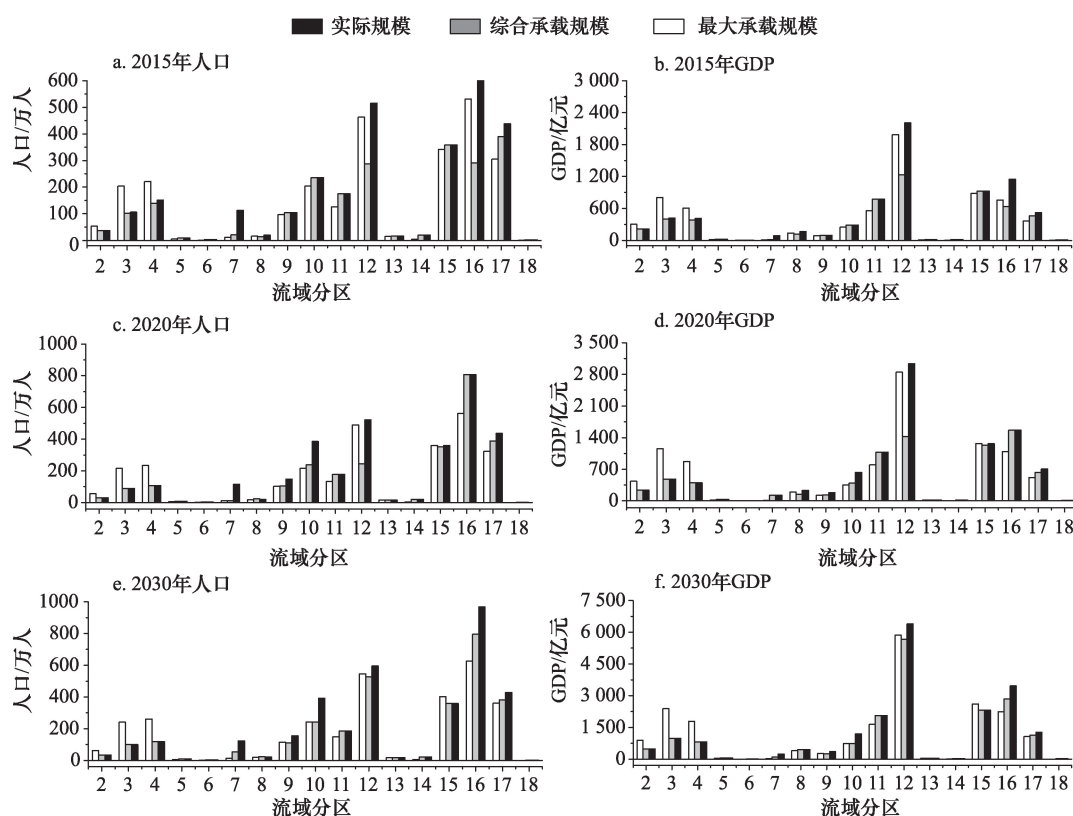


图4 甘肃省水资源系统承载力规模

Figure 4 The scale of water resource system carrying capacity of Gansu Province

流域的人口规模均小于实际规模,在2030年之前能保持不超载。对比图4b、图4d、图4f中最大承载GDP与实际GDP,除河西内陆河三个流域外,所有流域GDP规模均小于实际规模,在2030年之前能保持不超载。

4 讨论

4.1 方法可行性分析

现有的相对水资源承载力^[20,21]用全国平均用水标准计算承载力,但甘肃省的用水标准与全国平均用水标准存在差异,对此,选用甘肃省平均用水标准,但仍不能消除研究区内各流域间用水标准差异造成的承载力计算误差,本研究每个流域采用各自的用水标准,结合水资源和水环境阈值计算出水资源系统综合承载规模,将各流域的实际规模和这三种用水标准计算的承载规模进行对比,如图2所示。现有的相对水资源承载力用全国用水标准时承载规模与实际规模差异最大,出现人口规模偏小,GDP规模偏大的情况,用甘肃省平均用水标准为参考时与全

国平均用水标准时情况基本一致,只是差异减小。这两种用水标准的计算结果在西北部的流域差异最大,东南部的流域次之,中部的流域差异最小,三大区域用水效率的差异放大承载规模与实际规模的差异,也揭示了现有的相对水资源承载力方法的局限性。更重要的是,现有的相对水资源承载力方法计算的承载力与实际情况不相符,水资源匮乏,用水效率低的西北部流域不超载,用水效率高的中部流域超载,而本研究用每个流域各自的用水标准计算的承载规模与实际规模的差异最小,得出的承载力和承载规模与实际情况(图3、图4)最相符。

综上所述,现有的相对水资源承载力方法只适用于研究区内部区域差异较小的研究区,本研究所用的水资源系统承载力计算方法相较现有的相对水资源承载力方法更符合实际,它能消除研究区内各流域间用水标准差异造成的承载力计算误差,适用面更广。

4.2 水资源系统开发潜力分析

对比图4中实际人口和GDP与最大承载规模

的差距和变化趋势,以及图3中承载力的变化,发现从2015年到2030年,除河西内陆河流域和湟水流域外,全省大部分流域的实际人口和GDP规模距离最大承载规模均有一定差距,即还有进一步的开发潜力,且开发潜力呈现为东南高、西北低,人口开发潜力大于GDP开发潜力的趋势。河西内陆河流域现有的用水量已经超出了水资源阈值,水资源开发利用率高达115.3%,缺水率8.3%,且用水效率低,农业用水占总用水量比例高达83%,万元GDP用水量高达455m³,2015—2030年均保持严重超载状态,实际规模已经超过最大承载规模。湟水全河段为V类水,发展规模亦受到水环境的限制,现有的发展是在牺牲水资源和水环境的代价下取得的,2015—2030年均保持严重超载状态,两个区域均不具备开发潜力。嘉陵江流域的开发潜力最大,可利用水资源量和GDP分别占甘肃省36%、5.6%,尽管崎岖地形限制水利工程的供水能力,水资源开发利用率仅3.8%,但仅凭现有的供水能力仍能保持承载不超载状态,适宜大力开发。渭河、洮河、大通河流域的开发潜力在逐渐增大,尽管渭河和大通河受到水环境限制,渭河流域Ⅲ类及以上水质河段12.1%,大通河流域甘肃段处于大通河下游,上游和中游调水严重减小了下游的径流量,致使下游的水环境容量减小^[35],综合承载规模较小,但随着水质改善,2020年和2030年,实际规模与最大承载规模的差距增大,开发潜力很足。洮河受到供水能力限制,随着引洮供水工程相继投入使用,开发潜力会逐渐增大。大夏河、河源至玛曲、玛曲至龙羊峡、龙羊峡至兰州、北洛河状头以上、清水河和苦水河流域、汉江丹江口以上流域均保持不超载状态,具有一定的开发潜力,但承载规模有限,维持现有开发力度即可。泾河、黄河干流区间的水量有限,水质轻微污染,Ⅲ类及以上水质河段分别占33.7%、29.06%,实际规模很接近最大承载规模,流域的开发潜力基本消耗殆尽,由承载平衡逐渐变成弱超载,但承载规模均很可观,应合理规划,优化开发。

综合来看,河西内陆河流域和湟水流域不具备开发潜力,黄河干流区间和泾河流域开发潜力较小,嘉陵江、渭河、洮河、大通河流域开发潜力最大,其他流域居中。

4.3 水资源和水环境对水资源系统承载力的影响

水资源系统承载力受到水资源和水环境的双重约束,但水资源的约束作用是硬性约束^[36],短期之内无法改善,水环境的约束作用相对较弱,净化后仍然可以使用,只是增加了开发利用的成本,通过人类的治理可以短期内恢复,提高水资源系统承载力。从图3中发现,嘉陵江、洮河水量和水质俱佳,可“开源节流”,但供水能力不足使承载力下降,只要供水能力跟上,可以快速增加水资源系统承载力;渭河、湟水流域水量充足,但水质较差,水环境承载力较小,致使水资源系统承载力小,可以“缓慢开源节流”,从图4中可以看出,随着水质改善,承载规模大幅提升;泾河和黄河干流区间水量有限,水质轻微污染,限制了该流域的进一步发展,只能“节流不能开源”,在有限的水量下,通过节约用水、优化产业结构、提高用水效率、降低排污率来增加承载规模;河西内陆河流域,尽管水质很好,但用水量超过水资源阈值,从图3中可以看出,2015—2030年均保持高超载状态,丧失了开发潜力。

综上所述,水资源是绝对约束,水环境是相对约束,水资源对水资源系统承载力的影响较水环境更强。

4.4 水资源系统承载力与水资源系统开发潜力和水资源系统脆弱性的联系

将图2的水资源系统承载力评价结果与甘肃省水资源系统脆弱性评价结果^[37],以及上述水资源系统开发潜力的分析结果进行对比,发现水资源系统的承载力与水资源系统的脆弱性和开发潜力的分布格局基本吻合,脆弱性高的流域均位于水资源系统超载且开发潜力小的流域,脆弱性低的流域其水资源系统不超载且开发潜力大,这一现象揭示了水资源系统承载力与水资源系统开发潜力和水资源系统脆弱性之间的内在联系。从定义看,人口和GDP规模超载程度反映人类活动对水资源系统的干扰程度,当人口和GDP规模不大于水资源系统承载规模时,水资源系统的抗干扰性强,自身调节能恢复系统稳定,水资源系统呈不脆弱、开发潜力大的状态。人口和GDP规模大于水资源系统的最大承载规模,过度开发致使水资源和水环境受到强烈干扰,超载不严重能恢复到现有的性质、能恢复承

2018年5月

载平衡;但超载严重的流域其水资源系统稳定性遭到不可逆的破坏,强烈的干扰使其难以恢复到原来的性质,则水资源系统的脆弱性高,失去进一步开发的潜力,反之亦然。

5 结论

综合水资源和水环境研究甘肃省水资源系统承载力,便于水资源合理规划和可持续开发利用,本研究结合水资源和水环境阈值,以相对水资源承载力方法分别对甘肃省2015年、2020年、2030年17个流域的水资源系统承载力进行研究,主要得出以下结论:

(1)本研究所用的水资源系统承载力计算方法较现有的相对水资源承载力方法更符合实际,它充分考虑各流域间用水标准的差异,能消除研究区内各流域间用水标准差异造成的承载力计算误差。但该方法仅选取人口和GDP规模两个宏观指标表征承载力大小,存在一定的片面性。

(2)甘肃省大部分区域的水资源系统承载力呈现超载状态,承载力和承载规模均呈现东南高、西北低的分布格局,超载的流域集中分布在西北,不超载的流域集中分布在东南。

(3)综合来看,河西内陆河流域和湟水流域不具备开发潜力,黄河干流区间和泾河流域开发潜力最小,嘉陵江、渭河、洮河、大通河流域水资源系统开发潜力最大,其他流域开发潜力居中。

(4)水资源对水资源系统综合承载力的约束是绝对约束,而水环境是相对约束,水资源对水资源系统承载力的影响较水环境更强,在考虑二者的综合承载力时,应更注重水资源的承载力。

(5)对比甘肃省水资源承载力评价结果与水资源系统开发潜力和水资源脆弱性评价结果,发现三者的分布格局基本吻合,这一现象揭示了三者之间的内在联系。

参考文献(References):

[1] Zhou D Y, Zhang Z Y, Shi M J. Where is the future for a growing metropolis in North China under water resource constraints?[J]. *Sustain Sci*, 2015, 10(1): 113-122.

[2] Charles J V, Pamela G, Joseph S, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. *Science*,

2000, 289(5477): 284-288.

- [3] Taikan O, Shinjiro K. Global hydrological cycles and world water resource[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [4] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. *Science*, 2016, doi: 10. 1126/sciadv. 1500323.
- [5] Huang S Z, Huang Q, Chen Y T. Quantitative estimation on contributions of climate changes and human activities to decreasing runoff in Weihe River Basin, China[J]. *Chin. Geogra. Sci*, 2015, 25 (5): 569-581.
- [6] Guo Y, Li Z J, Mark A B. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River[J]. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2014, 28(2): 333-346.
- [7] Pei Y. Book review: water resources research in Northwest China helps to deal with water issues in the context of climate change and human activity[J]. *Environ. Process*, 2015, 2(2): 441-444.
- [8] 黄维东, 牛最荣, 赵治文. 甘肃省主要河流水环境质量分析评价 [J]. 水文, 2010, 30(2): 33-35. [Huang W D, Niu Z R, Zhao Z W. Analysis and assessment of water environment quality in main rivers in Gansu Province[J]. *Journal of Chain Hydrology*, 2010, 30 (2): 33-35.]
- [9] Zhu Y D, Drake S, Xia L J, et al. Analysis of temporal and spatial differences in eco-environmental carrying capacity related to water in the Haihe River Basins, China[J]. *Water Resources Manage*, 2010, 24(6): 1089-1105.
- [10] Yang J F, Lei K, Khu S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City China[J]. *Water Resources Manage*, 2015, 29(3): 885-899.
- [11] Hering J G, Ingold K M. Water resources management: what should be integrated[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1234-1235.
- [12] Ait-Aoudia M N, Berezowska E. Water resources carrying capacity assessment: the case of Algeria's capital city[J]. *Habitat International*, 2016, 58: 51-58.
- [13] Li X G, Wei X, Lu Y D. Optimising the allocation of groundwater carrying capacity in a data-scarce region[J]. *Water S A*, 2010, 36 (4): 451-460.
- [14] Yang J F, Kun L, Meng W, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. *Water Resour Manage*, 2015, 29(3): 885-899.
- [15] Yang J F, Lei K, Meng W, et al. Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a coupled system dynamics approach applied to the Tieling of the Liao River Basin, China[J]. *Environ Earth Sci*, 2015, 73(9): 5173-5183.
- [16] Zhao G Q, Lin D H, Ping Z R. The balance between supply and demand of water resource and the water-saving potential for agricul-

- ture in the Hexi Corridor[J]. *Chinese Geographical Science*, 2002, 12(1): 23–29.
- [17] Feng H L, Huang C F. A risk assessment model of water shortage based on Information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources[J]. *Water Resource Manage*, 2008, 22(5): 621–633.
- [18] Li G, Jin C L. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. *Water Resource Manage*, 2009, 23(12): 2505–2513.
- [19] Meng L H, Chen Y I, Li W H, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. *Chin Geogra. Sci*, 2009, 19(1): 89–95.
- [20] Yang Q Y, Zhang F W, Jiang Z C, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China[J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75(1): 1–8.
- [21] Song X M, Kong F Z, Zhang C S. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. *Water Resource Manage*, 2011, 25(3): 857–873.
- [22] Gan H, Wang L, Cao Y B, et al. Multi-dimensional overall regulatory modes and threshold values for water cycle of the Haihe River Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(27): 3320–3339.
- [23] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341–348. [Dang L J, Xu Y. Review of research progress in carrying capacity of water resource[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 341–348.]
- [24] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 1–6. [Zuo Q T. Review of research methods of water resource carrying capacity[J]. *Advance in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 1–6.]
- [25] 周琦, 池飞, 逢勇, 等. 可利用水资源量正逆向联合计算方法[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 42–46. [Zhou Q, Chi F, Feng Y, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation[J]. *Water Resource Protection*, 2016, 32(5): 42–46.]
- [26] 中华人民共和国水利部. 全国水资源综合规划[EB/OL]. (2002–08–31)[2017–09–08]. <https://wenku.baidu.com/view/655999d6-76a20029bd642dd9.html>. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. National Comprehensive Water Resources Plan[EB/OL]. (2002–08–31)[2017–09–08]. <https://wenku.baidu.com/view/655999d676a20029bd642dd9.html>.]
- [27] 中华人民共和国环境保护部, 国家市场监督管理总局. 地表水环境质量(GB3838–2002)[EB/OL]. (2002–04–28)[2017–09–08]. <https://wenku.baidu.com/view/28486860e87101f69e319570.html>. [The Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Environmental Quality Standards Surface Water(GB3838–2002)[EB/OL]. (2002–04–28)[2017–09–08]. <https://wenku.baidu.com/view/28486860e87101f69e319570.html>.]
- [28] 甘肃省水利厅. 2015年甘肃省水资源公报[EB/OL]. (2016–03–02)[2017–09–08]. http://www.gssl.gov.cn/xxgk/gkml/nbgbszygb/201703/t20170317_73649.html. [Gansu Provincial Department of Water Resources. 2015 Water Resources Bulletin[EB/OL]. (2016–03–02)[2017–09–08]. http://www.gssl.gov.cn/xxgk/gkml/nbgbszygb/201703/t20170317_73649.html.]
- [29] 甘肃省水利厅. 2015年甘肃省水利发展统计公报[EB/OL]. (2017–05–05)[2017–09–08]. http://www.gssl.gov.cn/xxgk/gkml/nbgbsltjzl/201705/t20170505_77397.html. [Gansu Provincial Water Resources Department. 2015 Water Development Statistics Bulletin[EB/OL]. (2017–05–05)[2017–09–08]. http://www.gssl.gov.cn/xxgk/gkml/nbgbsltjzl/201705/t20170505_77397.html.]
- [30] 甘肃省环境保护厅. 2015年甘肃省环境统计公报[EB/OL]. (2016–06–05)[2017–09–08]. <http://www.gsep.gansu.gov.cn/info/1076/32252.htm>. [Gansu Provincial Environmental Protection Department. 2015 Gansu Province Environmental Statistics Bulletin [EB/OL]. (2016–06–05)[2017–09–08]. <http://www.gsep.gansu.gov.cn/info/1076/32252.htm>.]
- [31] 甘肃省统计局. 2015年甘肃省统计年鉴[EB/OL]. (2016–06–07)[2017–09–08]. <http://www.gstj.gov.cn/tjnj/2015/index.asp?classid=70>. [Gansu Bureau of Statistics. 2015 Gansu Province Statistical Yearbook[EB/OL]. (2016–06–07)[2017–09–08]. <http://www.gstj.gov.cn/tjnj/2015/index.asp?classid=70>.]
- [32] 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省十三五国民经济发展规划[EB/OL]. (2016–10–09)[2017–09–08]. http://www.360doc.com/content/16/1009/17/6162620_597109668.shtml. [Gansu Provincial People's Government General Office. The Thirteenth National Economic Development Plan of Gansu Province[EB/OL]. (2016–10–09)[2017–09–08]. http://www.360doc.com/content/16/1009/17/6162620_597109668.shtml.]
- [33] 甘肃省环境保护厅. 甘肃省水污染防治工作方案(2015–2050)[EB/OL]. (2015–10–03)[2017–09–08]. <http://www.zzguifan.com/webarbs/book/102951/3182749.shtml>. [Gansu Provincial Water Resources Department. Gansu Water Pollution Prevention Work Plan (2015–2050)[EB/OL]. (2015–10–03)[2017–09–08]. <http://www.zzguifan.com/webarbs/book/102951/3182749.shtml>.]
- [34] 巫春平, 张济世. 甘肃省水资源承载力评价[J]. 人民长江, 2007, 38(11): 135–136. [Wu C P, Zhang J S. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(11): 135–136.]
- [35] 黄维东, 牛最荣, 马正耀, 等. 大通河流域水能水资源开发对河流水文过程和环境的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1573–1581. [Huang W D, Niu Z R, Ma Z Y, et al. Impact of hydrology and water resource development on hydrological processes and ecology in the Da Tong River basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1573–1581.]
- [36] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域

- 水 环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1338–1344. [Li X, Shi J P, Cao H. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1338–1344.]
- [37] 苏贤保, 李勋贵, 刘巨峰, 等. 基于综合权重法的西北典型区域

- 水资源脆弱性评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 112–118. [Su X B, L X G, Liu J F, *et al.* Vulnerability assessment of water resources in the northwest typical area based on comprehensive weighting method[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(3): 112–118.]

Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds

SU Xianbao^{1,2}, LI Xungui^{1,2}, ZHAO Junfeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Research Center for Arid and Desert, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Water resource carry capacity have great significance to the sustainable development of water resources and management. Current research methods in this field contain errors. Here, we adopted 17 basins in Gansu, China as an evaluation unit and developed a new carrying capacity of relative water resources method. Quantitative analyses for 2015, 2020 and 2030 water resource system carry capacity were done using a threshold value of water resources and water environments. We found that the calculation method of water resource system carry capacity is more consistent than current carrying capacity of relative water resources methods. Most area water resource system carrying capacity shows an overload state in Gansu. Overloaded river basins are concentrated in the northwest, non- overloaded river basins are concentrate in the southeast, The carrying capacity, load size and development potential all show a distribution pattern of high in the southeast and low in the northwest. On the whole, the river basin in the Hexi corridor and Huangshui basin do not have development potential; the Yellow River main stream and Jinghe development potential is smaller; Jialingriver, Weihe, Taohe and Datong river basin water resource system development potential is maximal; and other river basins are in the middle. Water resources have more powerful effects on water resource system comprehensive carry capacity than the water environment. We found that their distribution pattern is basically consistent after comparing the Gansu water resource system carry capacity results and development potential with other water resource system vulnerability evaluation results. These results provide a scientific basis for regional water resource system carrying capacity calculation, rational plan management and sustainable development

Key words: water resources; water environment; carrying capacity of relative water resources; development potential; Gansu Province