

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0078

WANG Penglong, SONG Xiaoyu, XU Bingxin, et al. Evaluation and advancement of water resources carrying capacity of Zhangye Prefecture in Heihe River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):1057-1066. [王鹏龙, 宋晓谕, 徐冰鑫, 等. 黑河流域张掖段水资源承载力评价及提升对策研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):1057-1066.]

# 黑河流域张掖段水资源承载力评价及提升对策研究

王鹏龙<sup>1,2</sup>, 宋晓谕<sup>1</sup>, 徐冰鑫<sup>1,2</sup>, 王勤花<sup>1</sup>, 王 宝<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 水资源是干旱区内陆河流域环境与发展的主导因素, 其承载力是评判水资源与经济社会及生态环境之间协调发展的重要依据。从承载程度和承载能力两方面构建评价指标, 对黑河流域张掖市县区尺度的水资源承载力进行评价, 结果表明: 承载程度方面, 张掖市从2015-2017年用水总量承载状况整体好转, 但民乐县用水总量面临超载, 各县区地下水承载状况明显改善, 地下水超采得到有效管控与治理。从2015-2017年, 张掖市水资源的承载状况整体上改善, 从2015年甘州区、临泽县、高台县、山丹县4县区的超载转变为2017年临泽县、高台县、山丹县、肃南县4县区的临界超载状况, 反映出张掖市近年来水资源开发利用的管理成效初步显现; 承载能力方面, 全市各县区2020年和2030年水资源可承载人口均小于2017年水平, 可承载的经济规模约是2017年90%; 提出了农业节水效率提升和耕地灌溉面积缩减两种未来水资源承载力提升情景, 并以此提出了张掖市水资源承载力提升的对策建议。

**关键词:** 承载力; 水量; 水资源; 黑河流域; 张掖市

**中图分类号:** TV213.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)03-1057-10

## 0 引言

水资源作为一种基础性自然资源和战略性经济资源, 尤其在水资源短缺的干旱区, 是生态环境和经济社会发展的重要控制要素。2015年, 联合国将水资源的可持续利用确定为2030全球可持续发展目标(SDGs)的17个目标之一。水资源问题自20世纪后半叶逐渐引起关注<sup>[1]</sup>, 伴随人口增长、城市化、农业和工业快速扩展和人们生活的改善, 人类从水量和水质等方面对水资源需求提出了更高要求, 水资源问题日益受到国际社会重视<sup>[2]</sup>。城市化将进一步加剧水资源压力, 到2050年, 全世界对水的需求预计增长40%以上<sup>[3]</sup>。联合国《2018年世界水资源开发报告》指出, 全球水资源需求在以每年1%的速度增长<sup>[4]</sup>。当前, 水资源短缺已是影响我国可持续发展的一个严重挑战。我国是世界上13个贫水国之一<sup>[5]</sup>, 水资源自然禀赋区域差异

加剧了水资源供需矛盾, 占国土总面积约一半的北方和西北干旱和半干旱地区, 其可用水资源仅占全国总量的20%。如果按当前我国的发展模式, 水资源安全问题可能导致GDP到2050年下降6%, 严重影响经济社会可持续发展<sup>[6]</sup>。十八届三中全会《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》提出, “建立资源环境承载能力监测预警机制, 对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”。因此, 以水资源承载力为抓手, 加强水资源管控, 强化水资源刚性约束, 对促进水资源-经济社会-生态系统协调发展具有重要意义。

黑河是我国西北地区第二大内陆河流域, 横跨青海、甘肃和内蒙古三省区, 上游祁连山区为产水区, 中游张掖绿洲和下游额济纳绿洲是水资源利用和消失区。张掖市是黑河中游最大的绿洲城市, 水

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2020-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100102); 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19040502)资助

作者简介: 王鹏龙(1986-), 男, 甘肃泾川人, 馆员, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在职博士研究生, 从事生态经济与可持续发展研究。E-mail: wangpl@llas.ac.cn.

资源是绿洲可持续发展的主要保障,有限的水资源既要保证上中游工农业生产的正常需求,又要考虑下游的生态恢复与维持。当前,黑河流域水资源短缺,供需矛盾突出,按照水利部《黑河水量分配方案》确定的正义峡下泄水量,中游张掖市人均水资源量只有  $1\,250\text{ m}^3$ ,为全国平均的61%,随人口的增长还将下降<sup>[7]</sup>。黑河当前处于偏丰水期,径流呈现小幅增加趋势<sup>[8]</sup>,土地利用变化和暖湿化气候情景有可能在未来2024年前一定时间内导致径流增加<sup>[9]</sup>,但这并非持续增加。张掖市围绕虚拟水的生态经济之路探索<sup>[10]</sup>,以及水权水价制度建设<sup>[11-12]</sup>等措施有助于提升水资源承载力,但考虑到当前和未来的发展趋势,则满足未来工农业生产、生活、生态的水资源承载力问题将愈发突出。因此,正确评估张掖市水资源状况,开展水资源承载力研究,进而有针对性地采取“开源”与“节流”相结合的方式,是有效地保证水资源的可持续利用与管理的基础。本文在对水资源承载力内涵与评价方法进行梳理的基础上,以张掖市为研究对象,基于政府水资源管理规划目标,在开展黑河流域水资源承载力评价的基础上,提出水资源承载力提升的措施建议,以支持管理决策。

## 1 水资源承载力内涵与评价

承载力最初由生态学家借鉴物理学概念而提出了生态承载力。马尔萨斯的资源有限并影响人口增长的理论,随后学者以逻辑斯蒂方程对其进行数学表达<sup>[13]</sup>,以及早在1922年生态学领域提出的容纳能力等是资源环境领域承载力研究的起源<sup>[14]</sup>。自20世纪60年代开始,世界人口和经济快速增长引发了资源枯竭和环境破坏问题,承载力在资源环境领域引发广泛的研究。“罗马俱乐部”学者Meadows等利用系统动力学模型对世界范围内的资源(包括土地、水、粮食、矿产等)环境与人的关系进行评价,构建了“世界模型”,分析人口增长、经济发展同资源过度消耗、环境恶化和粮食生产的关系<sup>[15]</sup>。Slessor<sup>[16]</sup>提出了一种的动态的投入-产出模型ECCO模型,用以分析经济系统在不同资源环境等限制因素下的发展潜力,可为国家和区域制定长期可持续发展规划提供定量依据,被广泛应用于相关资源环境承载力研究。联合国教科文组织(UNESCO)和联合国粮食及农业组织(FAO)较早提出了资源环境承载力定义,并采用ECCO模型开

展了肯尼亚资源环境承载力的试点研究<sup>[17]</sup>。在国内,率先开展了土地、矿产等资源承载力研究。中国科学院自然资源综合考察委员会研究项目提出了土地承载力的定义<sup>[18]</sup>,邓永新等<sup>[19]</sup>开展了新疆塔里木盆地的土地资源人口承载力研究,徐强<sup>[20]</sup>提出了矿产资源承载能力的概念。可以说,土地和水资源是资源环境承载力研究的重要领域。2016年,国家发改委印发了《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》,使得资源环境承载力评价成为区域规划的一项基础工作,在推动我国资源环境承载力与预警技术方法的运用时,也使其成为热点命题。

水资源承载力是资源环境承载力研究的重要组成部分,很好地将水资源的自然-社会二元属性联系起来。水资源承载力的概念主要由我国学者提出并开展研究,国外相关研究主要集中在水安全等方面研究<sup>[21-24]</sup>。目前,水资源承载力研究可分为水资源承载程度和承载能力两个方面。水资源承载程度是评价区域水资源对经济社会的支撑状态,即是否超载或超载程度,更多是一种水资源利用的监测和预警技术<sup>[25-27]</sup>。国家《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》中有关水资源的评价就采用了此思路,可以得出不同区域(省、市、县)水资源利用是否超载,超载严重程度。水资源承载能力是测算区域水资源能支撑的经济、人口等发展规模<sup>[28-30]</sup>。水资源承载能力当前并未形成公认的概念,施雅风、许新宜、程国栋、夏军、左其亭、樊杰等观点较有代表性<sup>[31-37]</sup>,据此,可将水资源承载力内涵概括为“在特定区域、时间内,保护生态环境前提下,水资源系统支撑的经济社会的最大规模”。水资源承载力的计算方法概括起来包括经验公式法、综合评价法和系统分析法等,各方法各有优缺<sup>[33,38]</sup>。经验公式法主要采用某些经验公式或统计分析,选择单项或多项指标判断区域水资源承载力大小。综合分析方法是在构建指标体系的基础上,通过模糊综合评价法、主成分分析法等方法将指标体系进行综合,得到评价结果以进行承载力评价。系统分析法是将水资源承载力的主体和客体作为整体一并考虑,通过系统研究,计算得到水资源承载力。当前,水资源承载力研究逐渐开始从评价转向预警研究,缺少对承载程度和承载能力两个方面的综合研究。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

2015—2017年地表水和地下水利用量以及不同部门用水数据来自张掖市水务局《水利综合统计年报》,2020年和2030年用水总量和用水效率控制目标值取自张掖市最严格的水资源管理制度确定的“三条红线”目标。灌溉面积及相关经济社会等数据来源于《张掖综合年鉴》及各县区统计年鉴,相关发展目标来自区域经济社会发展规划。作者于2019年6月以张掖为重点,开展了黑河流域水资源利用的专项野外考察,并与市县相关部门开展了座谈调研,对黑河流域张掖市水资源利用与管理的现状及问题进行了评估,并收集了相关数据与资料。

### 2.2 水资源承载程度评价

水量、水质作为水资源的重要属性<sup>[39]</sup>,是水资源承载程度评价的重点要素,前者事关资源消耗,后者决定环境好坏,而两者共同影响水生态。黑河流域张掖段水功能区达标率基本满足水资源管理控制指标,而与水相关的生态环境变化又与水资源量是否满足生态用水紧密相关。本文按照可操作、可度量、可监测等原则,以水量要素为评价关键因子,开展张掖市水资源承载程度评价。从现状年区域用水总量和地下水开发利用量两个方面开展水量要素评价,将区域评价结果划分为水资源超载、临界超载和不超载三种类型,借鉴国家发改委《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》中阈值划定标准(表1)。对用水总量和地下水开发利用量进行单指标评价的基础上,采用“短板法”对水量要素开展综合评价,当两个指标中“短板”指标为超载、临界超载和不超载时,水量要素评价结果与该指标是否超载状态对应。

表1 水资源承载程度评价标准

Table 1 Evaluation criteria for overloading status of water resources carrying capacity

评价指标	评价结果		
	超载	临界超载	不超载
用水总量	$W \geq W_0$	$0.9 \times W_0 \leq W < W_0$	$W < 0.9 \times W_0$
地下水开发利用量	$G \geq G_0$	$0.9 \times G_0 \leq G < G_0$	$G < 0.9 \times G_0$

注:①用水总量:  $W_0$ 为用水总量控制目标,  $W$ 为县区实际用水量;②地下水开发利用:  $G_0$ 为地下水开发利用控制目标(实际获取中以2017年各县区地表和地下水实际用水比例,将规划用水总量控制目标同比例分解得出地下水开发控制目标值),  $G$ 为县区地下水实际开发利用量。

### 2.3 水资源承载能力评价

以2017年为规划水平年,以2017年经济社会发展技术水平为基础,结合最严格的水资源管理制度中初始水权,分析在2017年发展水平下,2020年和2030年水资源所能承载的人口和经济规模。具体计算方法如下各式<sup>[32]</sup>:

$$\text{水资源平衡: } L + D + E \leq W \quad (1)$$

$$\text{可承载的人口: } P = (W_0 - E)/R \quad (2)$$

$$\text{可承载的经济规模: } GDP = D/D_a \quad (3)$$

$$R_{2017} = (W_{2017} - E)/P_{2017} \quad (4)$$

式中:  $P$ 表示人口数;  $R$ 为人均综合用水量;  $L$ 为在特定情境下,民众日常生活用水量;  $D$ 为经济运行发展用水量,  $E$ 为生态环境用水量;  $W_0$ 即表示水资源可利用量值,文章中为用水总量控制目标;  $D_a$ 为万元GDP用水量。

在计算2020和2030年可承载人口规模时,人均综合用水量  $R$ 采用2017年水平,即  $R_{2017}$ ,  $W_0$ 采用规划中的用水总量控制目标值。生态用水亦保持2017年水平不变。万元GDP用水量  $D_a$ 采用2017年实际数据测算,并据此计算2020和2030年可承载经济规模。以上具体计算过程省略。

本文假设生态用水基于2017年水平不变,同时假设2017年生活用水和经济发展(一产、二产、三产)实际用水量比例在今后一段时间不变,在保证生态用水量下,从2020和2030年用水总量控制规划目标中得出可用于经济发展的用水总量。

## 3 结果与分析

### 3.1 水资源承载程度

以水量要素对张掖市2015—2017年的水资源承载状况进行了评价(图1~3)。从用水总量看,2015年,张掖市的民乐县和肃南裕固族自治县用水总量界于用水总量控制目标的90%~100%,承载状况表现为临界超载,其余甘州区、临泽县、高台县及山丹县超过用水总量控制目标的100%,均处于超载状况。2016年,甘州区、临泽县和民乐县用水总量处于临界超载状况,其余3县区处于超载状况。2017年,仅民乐县超过了用水总量控制目标,其余县区均处于临界超载状况。2015—2017年,张掖市经济社会发展用水总量持续下降,用水总量承载状况整体好转,但民乐县用水总量面临超载,水资源供需矛盾愈发严重。

通过对地下水开发利用控制目标与地下水实际开采量对比,以此评价张掖市各县区地下水承载





图1 2015年张掖市地下水承载状况(a)、用水总量承载状况(b)及综合评价(c)

Fig. 1 Overloading status of water resources carrying capacity on ground water use (a), total water consumption (b), aggregated evaluation (c) in 2015



图2 2016年张掖市地下水承载状况(a)、用水总量承载状况(b)及综合评价(c)

Fig. 2 Overloading status of water resources carrying capacity on ground water use (a), total water consumption (b), aggregated evaluation (c) in 2016



图3 2017年张掖市地下水承载状况(a)、用水总量承载状况(b)及综合评价(c)

Fig. 3 Overloading status of water resources carrying capacity on ground water use (a), total water consumption (b), aggregated evaluation (c) in 2017

状况。2015年,张掖市仅濒临山区的民乐县和肃南县地下水开发利用量未超过控制目标,处于临界超载。2016年,临泽县地下水承载状况从超载转变为临界超载,而肃南县从临界超载转变为超载。2017年,除甘州区地下水承载状况依然超载外,其余县区均处于临界超载或不超载状况,民乐县地下水开发利用量不足控制目标水量的90%。2015-2017年,张掖市各县区地下水承载状况明显好转,地下水超采得到了有效管控与治理。

采用上文提及的“短板法”对张掖市水量要素开展综合评价发现,2015年,仅濒临山区的民乐县和肃南县水资源承载状况处于临界超载。到2016年,临泽县水资源承载状况有所好转,而肃南县有

所恶化。2017年,除了甘州区和民乐县外,张掖市其余县区均处于临界超载状况。结合单指标及综合评价结果看,从2015-2017年,张掖市水资源的承载状况整体上好转,从2015年大部分县区超载转变为2017年大部分县区的临界超载状况,反映出张掖市近年来对水资源开发利用的管理成效初步显现。此外,甘州区作为张掖市政府驻地,经济社会发展对水资源的需求远大于其他县区,且未来发展潜力大,水资源近年来一直处于超载状况,未来亦难以改善。民乐县位于山前区域,本身主要以地表水利用为主,地下水开发利用较少,近年随着经济社会的发展,其用水需求增大,水资源供需矛盾将加剧。

3.2 水资源承载能力及提升

根据上文提及方法，测算得到在 2017 年发展水平下，2020 年和 2030 年的水资源可承载的人口与经济规模(表 2)。可以看出，由于用水总量控制目标值减小，2020 年全市水资源可承载的人口数将比 2017 年减少 8%，2030 年可承载人口减少 5%，全市各县区水资源可承载人口均小于 2017 年水平。

2020 年和 2030 年水资源可承载的经济规模约是 2017 年 90%。可见，在水资源目标控制下，若按照 2017 年水资源利用水平，未来城市化及经济社会发展规模均将受到极大的约束。因此，在水资源总量受限的情况，要突破水资源对经济社会发展的约束，水资源的利用结构和相关节水技术需进一步发展与应用。

表 2 县区水资源承载能力分析

Table 2 Water resources carrying capacity in various counties

行政区	2017 年				2020 年		2030 年	
	人口/万人	GDP/亿元	人均综合用水量/m <sup>3</sup>	万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>	承载人口/万人	承载经济规模/亿元	承载人口/万人	承载经济规模/亿元
甘州区	51.74	173.94	1 232.53	388.43	47.45	148.34	49.15	153.67
临泽县	13.7	49.12	3 157.09	874.25	12.63	45.28	13.01	46.64
高台县	14.58	55.92	2 479.90	646.08	13.41	51.27	13.81	52.82
山丹县	16.91	50.55	811.05	269.51	15.51	45.48	16.00	46.93
民乐县	22.53	51.13	1 686.02	738.83	20.92	46.77	21.57	48.23
肃南县	3.47	21.01	2 689.51	426.27	3.26	19.62	3.34	20.06

为了分析用水总量控制规划目标和技术进步规划目标下，未来水资源承载能力提升潜力，本文根据张掖市水资源利用实际，提出在保证生活与生态用水前提下，以逐步缩减第一大用水部门农业(主要是种植业)用水，优化产业结构，将水资源从用水效率较低的领域合理配置到用水效率较高的生产领域的思路，并提出以下两种承载能力提升情景。

农业节水效率提升情景。利用规划农田灌溉水有效利用系数提高节约的水资源，测算节约水可灌溉耕地面积，结合 2020 年和 2030 年万元工业增加值用水量规划值，以及 2017 年三产(服务业)用水效率，分析其在二产、三产行业的潜在经济价值

(表 3)。计算中假设单位农田实际灌溉需水一定，则灌溉水有效利用系数提升会节约灌溉用水，采用此公式：节约用水量=用水量<sub>2017</sub>×(1-农田灌溉水有效利用系数<sub>2017</sub>/农田灌溉水有效利用系数<sub>2020</sub>)。张掖市 2017 年农田灌溉水有效利用系数为 0.58，若依据张掖市最严格的水资源管理指标(2020 年达到 0.6，2030 年达到 0.65)规划要求，仅依靠灌溉效率提升，张掖市灌溉用水 2020 年将节水 3% 以上，2030 年将节水 10.5% 以上。节水量若用以灌溉，2020 年和 2030 年估计可扩大灌溉面积 9.18 和 34.69 万亩。节水量若用以二三产业发展，二三产在 2020 年和 2030 年增加的经济价值分别约是 2017 年的 2 倍和 10 倍。

表 3 农业节水效率提升情景下水资源承载能力分析

Table 3 Water resources carrying capacity in the scenario of improving agricultural water-saving efficiency

行政区	灌溉用水量/ 万 m <sup>3</sup>	万亩灌溉用 水量/万 m <sup>3</sup>	灌溉效率提高节约 水量/万 m <sup>3</sup>		灌溉面积扩大量/ 万亩		二产经济增长预估/ 亿元		三产经济增长预估/ 亿元	
	2017 年	2017 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
甘州区	64 897.00	662.08	1 914.99	6 686.36	2.98	11.26	71.88	290.71	118.15	412.52
临泽县	42 425.90	1 017.65	1 251.91	4 371.15	1.27	4.79	39.53	190.05	195.14	681.36
高台县	35 526.00	992.07	1 065.78	3 716.57	1.11	4.18	32.47	161.59	137.10	478.09
山丹县	13 046.63	331.98	419.36	1 454.38	1.31	4.93	19.60	60.60	34.69	120.32
民乐县	36 924.00	558.52	1 186.84	4 116.12	2.20	8.29	36.23	187.10	63.19	219.16
肃南县	8 630.80	861.36	272.55	946.60	0.33	1.23	7.71	43.03	27.08	94.06

耕地灌溉面积缩减情景。单位耕地灌溉面积缩减所腾挪出的水资源，结合 2020 年和 2030 年

万元工业增加值用水量规划值，以及 2017 年三产(服务业)用水效率，分析其在二产、三产行业的

潜在经济价值(表4)。其中2020年和2030年每亩灌溉用水利用此公式计算:每亩用水=每亩用水<sub>2017</sub>×(灌溉系数<sub>2017</sub>/灌溉系数<sub>2020</sub>或灌溉系数<sub>2030</sub>)。耕地灌溉面积缩减1万亩所节约的水资源用以发

展经济,产生的二产经济效益在2020年和2030年预计是2017年全年二产生总值的1.59和2.03倍,产生的三产经济效益也将达到2倍以上。

表4 耕地灌溉面积缩减情景下水资源承载力分析  
Table 4 Water resources carrying capacity in the scenario of reducing arable irrigation area

行政区	万亩灌溉用水量/m <sup>3</sup>			二产经济增长预估/亿元		三产经济增长预估/亿元	
	2017年	2020年	2030年	2020年	2030年	2020年	2030年
甘州区	662.08	642.54	593.86	25.66	28.79	39.64	36.64
临泽县	1 017.65	987.62	912.80	34.30	44.25	153.95	142.28
高台县	992.07	962.31	888.28	32.47	43.13	123.79	114.27
山丹县	331.98	321.30	294.97	15.09	13.83	26.58	24.40
民乐县	558.52	540.57	496.26	18.45	25.39	28.78	26.42
肃南县	861.36	834.16	766.89	26.69	39.15	82.89	76.20

4 结论

在对水资源承载力内涵及评价进行梳理的基础上,从便于操作、可度量等原则,以“短板法”对水量要素进行了水资源承载程度方面评价,从可承载的人口与经济规模角度对承载能力进行了评价。水资源承载程度方面,张掖市从2015-2017年用水总量承载状况整体好转,但民乐县用水总量面临超载,各县区地下水承载状况明显好转,地下水超采得到有效管控与治理。整体上,从2015-2017年,张掖市水资源的承载状况整体上改善,反映了张掖市近年来对水资源开发利用的管理措施有效;水资源承载能力方面,全市各县区2020年和2030年水资源可承载人口均小于2017年水平,可承载的经济规模约是2017年90%;同时,提出了农业节水效率提升和耕地灌溉面积缩减两种未来水资源承载力提升情景。研究结果表明此承载力评价方法合理可行,与实际政策管理目标结合紧密,有利于支撑决策。

5 水资源承载力提升建议与讨论

综上,近年来黑河流域张掖市水资源承载情况虽有所改善,但各县区用水量基本上已超过用水量控制目标的90%,面临超载,地下水开采压力大。若按照当前发展水平,未来水资源超载情况将加剧,城市化与经济发展的水资源约束将加剧,生态用水的挤占更有可能引起若干绿洲生态环境问题。本文基于上述分析与相关研究成果,以及与张掖市各级政府、企业、农户开展调研的基础上,提

出该地区水资源承载力的提升建议:

(1) 强化地表水-地下水综合调度利用。张掖市地下水超采导致的水资源超载状况严重[图1(a)、图2(a)、图3(a)]。黑河流域地表水和地下水之间转化关系复杂,张掖市水资源重复计算量占到总量60%以上,而全流域约达到90%。同时地表水灌溉中约有30%的水资源重新补给地下水,而这些地下水有可能被以打井的方式重新开发利用。为解决中游张掖及下游地下水补排失衡的“跷跷板”现象,需综合考虑地下水与地表水之间的相互转换特点。地表-地下水联合调度可以提供稳定的可供水量并控制地下水位,从而减少干旱区水资源时空差异。需开发综合水循环过程和生态安全的集成模型以及联合调度信息和管理模式,科学评估丰枯年份流域水资源变化及调控途径。争取中游实现“细水长流”方式,促进地表-地下水相互转换,提高水资源重复利用率,并进行地下水系统更新和利用强度分区,制定区域、季节和年际间地下水人工回补制度,实现地下水采补平衡。

(2) 以水资源承载力刚性约束促进以水定发展。据前文分析,张掖市水资源的承载状况整体改善,但供需压力仍较大(图1、图2、图3)。未来的水资源状况不足以支持平均状况下分配给下游9.5亿m<sup>3</sup>水量的同时,依然维持扩张的中游绿洲。中游张掖市需要严格执行水资源承载力刚性约束,深入实施以水定发展的原则。以县域为单元开展水资源承载力评价,建立预警体系,发布预警信息,强化水资源承载力对经济社会发展的刚性约束。健全规划和建设项目水资源论证制度,完善规划水



资源论证相关政策措施。各县区政府需重点推进重大产业布局和各类开发区规划水资源论证,严格建设项目水资源论证和取水许可管理,从严核定许可水量,对取水总量已达到或超过控制指标的地区暂停审批新增取水,地下水超采区禁止新增地下水取水。

(3) 优化流域调水方案并进行精细化综合管理。通过调水方案动态优化与调整,适量增加用水效率较高的中游张掖地区水权分配,有助提高流域水资源承载力。在当前黑河来水处于连续偏丰的情况下,中游张掖市勉强完成向下游的分水指标,而分水方案已执行多年,已不能完全符合上下游及中游区域内的经济社会发展需求。且下游水资源的利用率低,有专家观点表明<sup>①</sup>,分水后(2010年)下游耕地面积较分水前(2000年)增加了61%,水资源消耗增加了1.5亿m<sup>3</sup>。若将额济纳盆地耕地耗水投入中游农业生产可产出6.1倍的经济效益,若投入中游农业、工业等整体利用,经济效益是下游的18.79倍。需根据未来上游来水条件以及黄藏寺水利枢纽工程实施情况,综合考虑流域与区域间发展需求,动态调整优化分水方案。综合发挥行政手段、市场激励和大众参与等多种手段,以流域全局视野加强流域区域间、部门间调度协调,形成整体联动机制。以张掖市为主体,统筹上、中、下游关系,协调经济、社会及生态间关系,使水资源系统实现良性循环。

(4) 农业生产依然有可观的节水潜力。农业是张掖市当前第一大用水部门,尽管全市水资源利用效率已有较大提高,据分析,2017年农田灌溉亩均用水达692 m<sup>3</sup>,但仍远高于甘肃省(亩均551 m<sup>3</sup>)和全国(亩均404 m<sup>3</sup>)平均水平,农业节水潜力较大。张掖市2017年农田灌溉水有效利用系数为0.58,根据上文分析,若依据其最严格的水资源管理指标(2020年达到0.6,2030年达到0.65)规划要求,在保持农田面积不扩大的前提下,张掖市灌溉用水2020年将节水3%以上,2030年将节水10.5%以上(表3)。此外,若农业节水效率达到全省或国家水平,且再压缩灌溉农业耕作比重,还可减少一部分农田用水。目前全市主要节水灌溉方式有喷滴灌、微灌、低压灌溉、渠道防渗等,全市2017年节水灌溉面积达到280.97万亩。喷滴灌方式节水效果最好,但由于成本高昂而面积最小。从节水灌溉示范

看,以色列的喷滴灌和微灌技术可将亩均灌溉用水节约至360 m<sup>3</sup>。建议在面向“一带一路”国际市场和国内高端市场的有机附加值农产品方面,先开展一批示范项目,如有机蔬菜、瓜果、花卉等,中远期逐步推广。

(5) 优化产业结构以提升水资源经济效益。张掖市二三产业规模小,且农业节水潜力大,但由于工业体量小,工业发展短期内并不能利用额外的水资源,而用于生态所产生的有形经济价值也非常有限。因此,张掖市农业节水很重要,但提升二三产规模,利用农业节约的水资源更为迫切。据上文分析,按照张掖市工业用水控制规划目标及三产现状用水效率,若将缩减1万亩农田的灌溉用水用于发展二三产业,在2020年,其二产的经济效益将是2017年全年二产总值的1.59倍,2030年将达到2倍。若用于发展三产,1万亩灌溉用水的三产的生产总值也将是2017年全年2倍以上(表4)。因此,在调整农产品结构、提高节水技术以及缩减耕地等措施下,要将农业用水转换至二三产业。同时,二产在发展农产品加工、医药化工、智能制造等绿色低碳耗水产业时,也可布局适度规模的较高耗水产业。三产可重点聚焦生态旅游、通道物流业等领域发力。

(6) 优化水权交易以促进水资源高效配置。在用水初始水权分配的基础上,深化水权制度改革,培育水权交易市场,完善水权交易和水权转换制度,建立健全归属清晰、权责明确、保护严格、流转顺畅的现代水权制度,真正促使水权能够市场流通。创新水权转换方式:流域内,中游张掖市可与下游额济纳旗开展流域内水权转换;区域内,县区之间、灌区之间可开展区域内的水权交易;行业间,农业用水向工业用水或生态用水转换。其次,规范农民用水者协会运行。通过水费、各级财政补贴等渠道筹集建立水利激励基金,对发展高效节水农业的农民用水者协会或用水户给予补贴、奖励。推进农民用水者协会的标准化、规范化建设,加强培训,调动农民积极性。

#### 参考文献(References):

- [1] Hou Chunmei, Zhang Zhiqiang, Chi Xiuli. The United Nations World Water Development Report calls for enhanced integrated water resources management [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1211-1214. [侯春梅, 张志强, 迟秀丽.《联

<sup>①</sup>根据中科院西北生态环境资源研究院原院长王涛研究员在首届《环境与发展智库论坛》上的报告《中国绿洲和绿洲化》观点整理。

- 联合国世界水资源开发报告》呼吁加强水资源综合管理[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1211-1214. ]
- [2] Hong X, Guo S, Wang L et al. Evaluating water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin based on an integrated optimal water resources allocation model[J]. Water, 2016, 8(9): 364.
- [3] Eliasson J. The rising pressure of global water shortages[J]. Nature News, 2015, 517(7532): 6.
- [4] Hounbo, F G. The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water [R]. Paris: UNESCO, 2018.
- [5] Huang Xiuhao, Gao Feng, Wang Xianjie. Water-saving Irrigation and sustainable utilization of water resources in the 21st century[J]. Irrigation and Drainage, 2001(3): 1-5. [黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J]. 灌溉排水, 2001(3): 1-5. ]
- [6] Kim S. Water scarcity can lower GDP by 6 percent in some regions, report warns: growing populations and climate change are factors, the World Bank warns [N]. ABC News, 2016-03-04 [2017-09-12]. <https://abcnews.go.com/Business/water-scarcity-lower-gdp-percent-regions-report-warns/story?id=38840833>.
- [7] Sun Dongyuan, Li Yuanhong, Hu Xiangquan, et al. Study on balance and configuration of water resources supply and demand in Heihe River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 217-221. [孙栋元, 李元红, 胡想全, 等. 黑河流域水资源供需平衡与配置研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 217-221. ]
- [8] Cheng Jianzhong, Lu Zhixiang, Zou Songbing, et al. Variation of the runoff in the upper and middle reaches of the main Heihe River and its causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 123-129. [程建忠, 陆志翔, 邹松兵, 等. 黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 123-129. ]
- [9] Zhang L, Nan Z, Xu Y, et al. Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe River basin, Northwest China[J]. PloS one, 2016, 11(6): e0158394.
- [10] Xu Zhongmin, Song Xiaoyu, Cheng Guodong. A new explanation of virtual water strategy[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 490-495. [徐中民, 宋晓谕, 程国栋. 虚拟水战略新论[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 490-495. ]
- [11] Deng X, Xu Z, Song X et al. Transaction costs associated with agricultural water trading in the Heihe River basin, Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 186: 29-39.
- [12] Deng X, Song X, Xu Z. Transaction costs, modes, and scales from agricultural to industrial water rights trading in an inland river basin, Northwest China [J]. Water, 2018, 10(11): 1598.
- [13] Seidl I, Tisdell C A. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity[J]. Ecological Economics. 1999, 31(3): 395-408.
- [14] Hardin G. Cultural carrying capacity: a biological approach to human problems[J]. Focus, 1992, 2(3): 16-24.
- [15] Meadows D, Randers J. The limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind[M]. New York: Universe Books, 1972.
- [16] Slesser M. Enhancement of carrying capacity options-ECCO: simulation software for assessing national sustainable development[M]. London: the Resource Use Institute, 1990.
- [17] UNESCO, FAO. Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: population-resources-environment-development: a resource accounting methodology for exploring national options for sustainable development [M]. Rome: Isric Library, 1986.
- [18] Chen Baiming. An outline of the research method of the project "The productivity and population carrying capacity of the land resource in China"[J]. Journal of Natural Resources, 1991, 6(3): 197-205. [陈百明. "中国土地资源生产能力及人口承载力"项目研究方法概论[J]. 自然资源学报, 1991, 6(3): 197-205. ]
- [19] Deng Yongxin. The human-carrying-capacity-system and its study: a case study in Tarim Basin [J]. Arid Zone Research, 1994, 11(2): 28-34. [邓永新. 人口承载力系统及其研究——以塔里木盆地为例[J]. 干旱区研究, 1994, 11(2): 28-34. ]
- [20] Xu Qiang. An exploration of several problems about the analysis of regional mineral resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 1996, 11(2): 135-141. [徐强. 区域矿产资源承载力分析几个问题的探讨[J]. 自然资源学报, 1996, 11(2): 135-141. ]
- [21] Srinivasan V, Konar M, Sivapalan M. A dynamic framework for water security[J]. Water Security, 2017, 1: 12-20.
- [22] Siwar C, Ahmed F. Concepts, dimensions and elements of water security [J]. Pakistan Journal of Nutrition, 2014, 13(5): 281.
- [23] Cook C, Bakker K. Water security: debating an emerging paradigm [J]. Global Environmental Change, 2012, 22(1): 94-102.
- [24] Falkenmark M, Lundqvist J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum, 2010, 22(1): 37-51.
- [25] Li Yunling, Guo Xuning, Guo Dongyang, et al. An evaluation method of water resources carrying capacity and application [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 342-349. [李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 342-349. ]
- [26] Liu Jiajun, Dong Suocheng, Li Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. [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. ]
- [27] Xi Danchi, Xu Xinyi, Han Dongmei, et al. Evaluating water resources-carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(5): 575-581. [席丹墀, 许新宜, 韩冬梅, 等. 京津冀地区水资源承载力评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 575-581. ]
- [28] Qu Yaoguang, Fan Shengyue. Water resources capacity and developing strategies in Heihe River basin[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 2-9. [曲耀光, 樊胜岳. 黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 2-9. ]
- [29] Wang Hao, Qin Dayong, Wang Jianhua, et al. Study on carrying capacity of water resources in inland arid zone of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(2): 151-159. [王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 西北内陆干旱区水资源承载力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151-159. ]
- [30] Xu Zhongming, Cheng Guodong. A study on the water resources carrying capacity by using the method of multiobjective opti-



- mization model: taking the Heihe River as an example [J]. Journal of Lanzhou University, 2000, (2): 122-132. [徐中民, 程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报, 2000, (2): 122-132.]
- [31] Shi Yafeng. Influences of climate changes about water resources in North and Northwest China Plain [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1995. [施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.]
- [32] Department of Housing and Urban-rural Development of Gansu Province, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS. Researches on the new urbanization strategy of Hexi Corridor in Gansu Province in the Silk Road Economic Belt [M]. Beijing: Science Press, 2017. [甘肃省住房和城乡建设厅, 中国科学院地理科学与资源研究所. 丝绸之路经济带甘肃河西走廊新型城镇化战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [33] Cheng Guodong. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in Northwest of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 361-367. [程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 361-367.]
- [34] Wang Shucheng. Analysis and regulation of water environment carrying capacity [J]. Water Resources Development Research, 2002(1): 2-6. [汪恕诚. 水环境承载能力分析与调控[J]. 水利发展研究, 2002(1): 2-6.]
- [35] Xia Jun, Zhu Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269. [夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.]
- [36] Zuo Qiting, Zhang Peijuan, Ma Junxia. Calculation model and key problems of water resources carrying capacity [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(2): 5-8. [左其亭, 张培娟, 马军霞. 水资源承载力计算模型及关键问题[J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 5-8.]
- [37] Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yawei. Basic point progress in technical methods of early-warning of the nation resource and environmental carrying capacity (V 2016) [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 266-276. [樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 266-276.]
- [38] Zuo Qiting. Summary and rethinking of the research methods of water resources carrying capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 1-6. [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.]
- [39] Jia Z, Cai Y, Chen Y, et al. Regionalization of water environmental carrying capacity for supporting the sustainable water resources management and development in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 134: 282-293.

## Evaluation and advancement of water resources carrying capacity of Zhangye Prefecture in Heihe River basin

WANG Penglong<sup>1,2</sup>, SONG Xiaoyu<sup>1</sup>, XU Bingxin<sup>1,2</sup>, WANG Qinhu<sup>1</sup>, WANG Bao<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In inland river basin in arid regions, water resource is the dominant factor for care of the environment and economic developing. Carrying capacity is a sound basis for judging the coordinated development of water resources and economic, social and ecological environment. The evaluation indicators are constructed from two aspects, i. e. , overloading status and carrying capacity. The water resources carrying capacity in the counties of Zhangye Prefecture in Heihe River basin is evaluated. The results show that: (1) In terms of overloading status, the overloading status of total water consumption in Zhangye Prefecture overall had been improved form 2015 to 2017, but the total water consumption of Minle County was overloaded, and the overloading status of groundwater use of all counties was significantly improved, and groundwater over-exploitation had been effectively controlled. Overall, from 2015 to 2017, the overloading status of water resources in Zhangye Prefecture had been improved overall, from the overloading of four counties (Ganzhou, Linze, Gaotai, Minle) in 2015 to critical overloading of the other four counties (Linze, Gaotai, Shandan, Sunan) in 2017, which reflected that the management of water resources utilization had been effective; (2) In terms of water resources carrying capacity, the number of population with overload of water resources of all counties in the prefecture were all less than in the 2017 level, and the economic scale that can be carried by water resources in 2020 and 2030 will be about 90% of 2017; (3) according to the regional development plan, two scenarios of future water resources carrying capacity improvement, i. e. , scenario of agricultural water-saving efficiency improvement and scenario of reduced arable irrigation area, respectively, were proposed. Based on the above analyses, countermeasure for improving the water resources carrying capacity in Zhangye Prefecture is suggested.

**Key words:** carrying capacity; water quantity; water resources; Heihe River basin; Zhangye Prefecture

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 周成林)