

基于SD模型的张掖盆地水资源生态足迹核算与预测

秦欢欢^{1,2}, 黄丽想²

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 根据水资源生态足迹模型,通过构建张掖盆地水资源利用SD模型,设计5类不同情景来核算和预测现状(2000—2020年)和未来(2021—2050年)张掖盆地水资源生态足迹和生态承载力。结果表明:对于现状,人均水资源生态足迹、生态承载力和生态盈亏均值分别为3.517、0.272和-3.245 hm²/人,水资源生态压力指数和生态足迹强度均值分别为12.969和2.822 hm²/10⁴元;农业用水在张掖盆地水资源生态足迹核算中占绝对优势但占比在下降,农业领域是节水的重点且潜能较大;水资源生态足迹强度明显下降(降幅90.21%),证明了张掖盆地用水效率的上升;张掖盆地的水资源利用压力较大。平均而言,预测期内张掖盆地不同情景中人均水资源生态足迹均大于人均水资源生态承载力,由此导致人均水资源生态亏损的出现;各情景下水资源生态压力指数和生态足迹强度均值分别为12.932、13.483、10.055、12.698和9.846及0.281、0.206、0.201、0.281和0.196 hm²/10⁴元,未来时间里张掖盆地的水资源利用仍然处于不安全的状态。2021—2050年张掖盆地无法有效缓解水资源利用紧张的状况,需采用经济发展与水资源保护兼顾的发展方案,推荐政府部门采用情景ZS₅。因此,张掖盆地未来水资源利用需要全社会、各部门的通力合作,不断提高水资源利用效率,大力推进节约用水措施和技术的普及与应用,才能确保水资源的可持续利用。

关键词: 水资源生态足迹;水资源生态承载力;可持续水资源利用;系统动力学;SD模型;张掖盆地
中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2024)01-0037-10

Calculation and prediction of water resources eco-footprint in Zhangye Basin based on SD model

QIN Huanhuan^{1,2}, HUANG Lixiang²

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: According to the water resources eco-footprint model, the SD (system dynamics) model of water resources utilization of the Zhangye Basin (hereinafter referred to as ZB) is constructed, with which five different scenarios are designed to evaluate and predict the water resources eco-footprint and biocapacity of status quo (2000–2020) and future (2021–2050) in ZB. The results show that as for status quo, the average values of per capita water resources eco-footprint, biocapacity and ecological gains and losses are 3.517, 0.272 and -3.245 hm²/capita, and the average values of water resources ecological stress index and eco-footprint intensity are 12.969 and 2.822 hm²/10⁴ RMB, respectively. The agricultural water use occupies an dominant portion in the calculation of the water resources eco-footprint in ZB, but the proportion is decreasing. Therefore, the focus of water conservation in ZB lays in the agricultural field, as it has a great water-saving potential. The eco-footprint intensity of water resources shows a significant downward trend, with a drop rate of 90.21%, indicating that the water resources utilization efficiency in ZB is improving; however, its water resources utilization pressure is relatively high. On average, the per capita ecological footprint of water resources in different scenarios of the ZB during the prediction period is greater than the per capita ecological carrying capacity of water resources, resulting in

收稿日期:2022-09-22; 修回日期:2023-02-11

基金项目:东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2016104)

作者简介:秦欢欢(1986—),男,江西南昌人,博士,副教授,研究方向为水文学与水资源。

ecological losses of per capita water resources. The average values of water resources ecological stress index and eco-footprint intensity under the five scenarios are 12.932, 13.483, 10.055, 12.698 and 9.846, and 0.281, 0.206, 0.201, 0.281 and 0.196 $\text{hm}^2/10^4$ RMB, respectively. In the future, the water resources utilization in ZB will still in an unsafe situation. From 2021 to 2050, the ZB cannot effectively alleviate the shortage of water resource utilization, and a development plan that balances economic development and water resources protection needs to be adopted. It is recommended that the relevant government departments should adopt scenario ZS₅. In the future, the development of water resources utilization in ZB requires the joint efforts of all society and various departments. Continuous improvement of water resources utilization, vigorous promotion of the popularization and application of water conservation measures and technologies are the key to the sustainability of water resources utilization.

Key words: water resources eco-footprint; water resources biocapacity; sustainable water resources utilization; system dynamics(SD); SD model; the Zhangye Basin

1 研究背景

目前,在针对某个区域可持续水资源利用问题的研究中,生态足迹相关概念与方法的应用是学者们采用的重要手段^[1-7],水资源生态足迹是指特定区域具有生物生产力的水域面积能满足区域内居民对水资源的需求的水平^[8-13];水资源生态承载力是指某区域的水资源对区域社会整体发展的支撑与维持能力的大小^[14]。通常而言,采用一定方法研究、比较区域水资源的生态足迹与生态承载力,是从另外一个视角研究区域水资源的供需,能够获取一段时期内该区域水资源利用的盈亏情况,这有助于政府部门制定相关用水管理政策,促进对区域水资源利用的管理。

目前,已有学者针对我国不同区域水资源生态足迹与生态承载力进行研究,对于我国北方地区(如北京市^[15]、陕西省^[16]、黄河流域诸省^[17]、辽宁省^[18]等)亦有诸多研究,多数研究针对的是区域现状的核算与分析,缺少对未来情况下区域水资源生态足迹等相关方面的预测与分析,仅有少量学者进行了预测工作^[4,19]。对区域水资源生态足迹进行科学合理的预测,除了有助于掌握区域水资源利用的现状与发展趋势外,也可以为政府部门的水资源管理提供一些前瞻性的科学建议,有利于促进区域可持续水资源利用与管理^[4]。区域水资源不平衡和水环境污染等问题在社会经济发展过程中逐渐显现并不断恶化^[20],生态文明建设的重要性已得到社会各界的认同,水资源生态足迹与承载力在人们的重视中获得了较大的发展。目前,区域水资源生态足迹预测常用的方法有BP(back propogation)神经网络模型法^[4]、GRNN(generalized regression neural net-

work)模型法^[21]、灰色预测模型法^[22]、ARIMA(auto-regressive integrated moving average)模型法^[23]、系统动力学(system dynamics,SD)模型法^[19]等,这些方法各有优劣,各自在不同区域获得了成功应用。相比而言,SD模型法能定量考虑影响水资源生态足迹预测中核心变量(需水量)的各种水文、气象、社会、工程、经济和科技等因素,能进行较准确的需水量和水资源生态足迹计算。

张掖盆地是黑河流域中游典型的干旱半干旱区域,集中了全流域88.47%的总人口和87.93%的GDP,具有降水少蒸发大的特点^[24],是我国缺水问题最严重的地区之一,随着经济社会的快速发展,水资源承载力已无法满足各部门的用水需求,缺水问题已成为张掖盆地经济社会发展的关键限制因素之一^[25-26]。张掖盆地水资源利用过程中存在水资源供需矛盾突出、供用水结构不合理、用水效率低、水生态问题严重、水资源管理体制不健全等问题^[27],已对生态文明经济发展产生了显著影响^[28]。目前针对水资源生态足迹的研究主要集中在经济发达的湿润半湿润地区^[1-2,4-5,9-11],对干旱半干旱且经济落后地区的预测研究相对较少^[8,29]。鉴于此,为了从生态足迹的角度对张掖盆地可持续水资源利用情况进行分析与预测,非常有必要进行生态足迹相关指标的核算与预测。

基于已构建、校准的SD模型^[24],本文核算了2000—2020年张掖盆地水资源的生态足迹与承载力,选取水资源的3个相关指标(包括生态盈余、生态压力指数以及生态足迹强度)进行探讨,研究张掖盆地可持续水资源利用情况,进而预测2021—2050年张掖盆地水资源在5类情景下的生态足迹与生态承载力,为张掖盆地可持续水资源利用提供科学的建议。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

地处黑河中游、面积 9 000 km²、历来有“金张掖”之称的张掖盆地位于河西走廊中段,地理位置为 38°24'~39°48'N,98°54'~100°00'E。该盆地具有悠久的农牧业开发历史,东西起讫于永固隆起与清水-盐池断陷盆地,南北被祁连山与合黎山、龙首山所夹,是一个东南-西北向的半封闭大型山间断陷盆地^[24]。

张掖盆地属大陆性气候,具有昼夜温差大、降水量小及水面蒸发量大的特点,年降水量和水面蒸散发量分别为 140 和 1 410 mm,两者相差约 10 倍,是典型的干旱半干旱地区。在行政区划上,研究区隶属于张掖市管辖,囊括甘州区、山丹县、民乐县、高台县和临泽县等区县,是黑河流域最主要的人口集聚地和经济发展区,其用水量约占全流域的 87%,其中农业灌溉用水占 97%,工业生产和居民生活用水仅占不到 3%。

2.2 水资源生态足迹和承载力

水资源生态足迹的计算^[30]见公式(1):

$$EF_w = TP \cdot ef_w = \sum_{i=1}^4 EF_{w_i} = \sum_{i=1}^4 \frac{\chi_w \cdot WU_i}{P_w} \quad (1)$$

式中: EF_w 为水资源的生态足迹, hm^2 ; ef_w 为人均水资源生态足迹, $\text{hm}^2/\text{人}$; TP 为区域总人口; EF_{w_i} 为部门 i ($i = 1 \sim 4$ 分别表示生活、工业、农业和环境)的水资源生态足迹, hm^2 ; χ_w 为全球水资源平衡因子, $\chi_w = 5.19$ ^[19]; WU_i 为部门 i 的耗水量, m^3 ; P_w 为全球平均水资源生产率, m^3/hm^2 , $P_w = 3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ ^[1,19]。

水资源生态承载力的计算^[31]见公式(2):

$$\begin{aligned} EC_w &= TP \cdot ec_w = 0.4 \chi_w \cdot \lambda \cdot \frac{WR_T}{P_w} \\ &= 0.4 \chi_w \cdot \lambda \cdot \frac{WR_S + WR_G + WR_R}{P_w} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: EC_w 为水资源的生态承载力, hm^2 ; ec_w 为人均水资源生态承载力, $\text{hm}^2/\text{人}$; λ 为张掖盆地的水资源产量因子^[30,32], $\lambda = 0.22$; WR_T 、 WR_S 、 WR_G 和 WR_R 分别为水资源量、地表水量、地下水量和污水回用量, m^3 ; 0.4 为除去生态用水后水资源的可用比例^[33]。

2.3 水资源可持续利用评价指标

区域水资源利用中的供需失衡是产生缺水问题的根源^[34],而生态足迹与承载力是模型中影响最大的参数。因此,本文选取以下 3 个相关参数作为评价指标,计算见公式(3)、(4)、(5):

$$D_w = EC_w - EF_w = TP \cdot d_w \quad (3)$$

$$I_w = \frac{EF_w}{EC_w} \quad (4)$$

$$ES_w = \frac{EF_w}{GDP} \quad (5)$$

式中: D_w 为水资源的生态盈亏, hm^2 ; d_w 为人均的生态盈亏, $\text{hm}^2/\text{人}$, 正负分别表示盈余及赤字; I_w 为水资源的生态压力指数, $I_w > 1$ 及 $0 < I_w < 1$ 分别表示供不应求与供大于求,相应情况下水资源处于非安全及安全的状态; ES_w 为水资源的生态足迹强度, $\text{hm}^2/10^4$ 元, ES_w 越小意味着用水的效率越高; GDP 为国内生产总值, 万元。

2.4 张掖盆地水资源利用 SD 模型

本研究是在文献[24]构建并校准的张掖盆地水资源利用 SD 模型基础上进行的。图 1 为定量展示 SD 模型中变量间的因果关系图。2000—2050 年为 SD 模型的仿真周期,包括现状仿真(2000—2020 年)与未来预测(2021—2050 年)2 个阶段,模型的时间步长为 1 a,利用历史数据对模型进行校准,主要流位变量相对误差在 $\pm 5\%$ 以内,说明模型构建和校准是成功的,可用于张掖盆地的相关核算与预测中。

根据已校准的模型及研究区的现状,本文设计了 5 类情景对研究区的水资源生态足迹进行计算与预测(表 1),分别是情景 ZS_1 (保持现状的发展模式)、情景 ZS_2 (强调经济发展重要性的发展模式)、情景 ZS_3 (强调城镇化发展重要性的发展模式)、情景 ZS_4 (考虑节约用水的发展模式)和情景 ZS_5 (考虑可持续水资源利用的发展模式)。这 5 类情景设计充分考虑了研究区未来经济社会发展过程中影响水资源可持续利用的因素,依据研究区水资源利用和经济发展现状设定各类情景下的相关参数值,是具有合理性和科学依据的。

2.5 数据来源

本文包含的模型参数有常数(主要包括用水定额数据)、表函数(主要包括经济数据、增长率数据和水资源数据)与初值(主要包括模型中流位变量的初始数据),它们搜集自《2001—2021 年甘肃省统计年鉴》及《2000—2020 年甘肃省水资源公报》。在此基础上综合考虑研究区张掖盆地的用水特点和情景发展要求来确定预测期模型中的各类参数值。

3 结果分析与讨论

3.1 现状水资源生态足迹

图 2 为现状年份张掖盆地 4 部门(生活、工业、

农业和环境)水资源生态足迹账户和总账户随时间变化曲线图,图3为张掖盆地水资源生态足迹组成比例。从图2,3中可以看出,2000—2020年张掖盆地农业用水生态足迹占水资源生态足迹的比重(均值95%)最高且呈明显波动趋势,从2000年的 $5.362 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比97.6%)变为2020年的 $5.911 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比95.3%);工业和生活用水生态足迹占水资源生态足迹比重(均值分别为2.3%和1.8%)次之,其中工业用水生态足迹呈较快增长趋势,从2000年的 $0.072 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比1.3%)增至2020年的 $0.169 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比2.7%),生活用

水生态足迹呈平稳增长趋势,从2000年的 $0.061 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比1.1%)增至2020年的 $0.090 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比1.5%);生态环境用水生态足迹占比(均值0.9%)虽最低但增速较大,从2003年的 $0.003 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比0.1%)(2000—2002年数据缺失)上升为2020年的 $0.035 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占比0.6%)。2000—2020年张掖盆地水资源生态足迹主要由农业用水决定,均值为 $4.446 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其变化曲线形状与农业用水生态足迹变化曲线形状相似,呈明显的波动趋势,总用水的水资源生态足迹从2000年的 $5.495 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 变为2020年的 $6.205 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

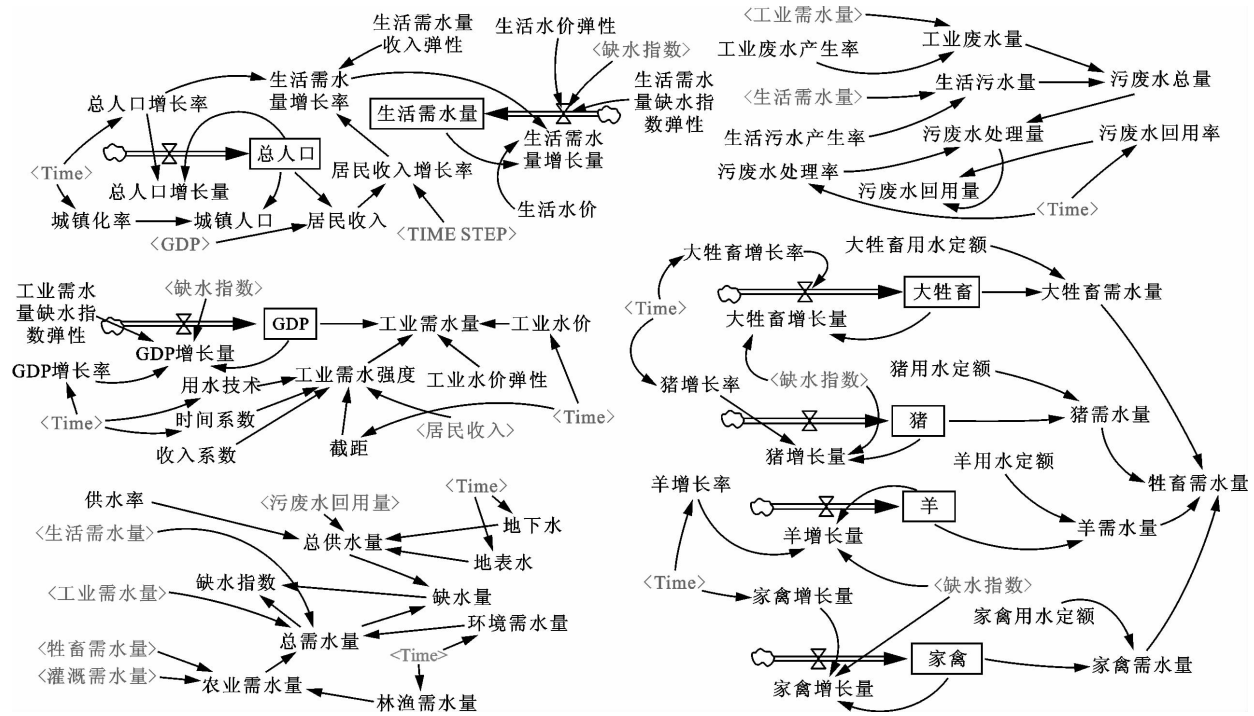


图1 张掖盆地水资源利用SD模型变量关系图

表1 张掖盆地水资源利用SD模型情景设计

情景名称	情景描述	主要参数	
		2030年	2050年
现状保持型(ZS ₁)	保持现状的发展趋势、系统结构和模型参数	GDP增速为5%,城镇化率为55%,总人口增速为2.0‰	GDP增速为3%,城镇化率为70%,总人口增速为1.0‰
经济发展型(ZS ₂)	经济发展是重中之重,GDP增速保持较高水平,人口增长也有提高	GDP增速为10%和12%,总人口增速为5.0‰和7.0‰	GDP增速为12%,总人口增速为7.0‰
城镇化发展型(ZS ₃)	响应“一带一路”倡议,加快城镇化的发展	作物种植面积减少30%,GDP增速为7%,总人口增速为5.0‰	作物种植面积减少30%,GDP增速为10%,总人口增速为7.0‰
水资源节约型(ZS ₄)	强调节约用水、采取节水措施	4种牲畜的用水定额减少40%	4种牲畜的用水定额减少40%
可持续发展型(ZS ₅)	同时考虑经济发展、“一带一路”倡议下的城镇化加速发展、节水措施的实施	GDP增速为7%,总人口增速为4.5‰,作物种植面积减少30%,4种牲畜的用水定额减少40%	GDP增速为10%,总人口增速为6.0‰,作物种植面积减少30%,4种牲畜的用水定额减少40%

以上分析说明,农业用水部门在张掖盆地水资源生态足迹核算中占绝对优势,张掖盆地节水重点在农业生产领域且节水潜能较大。但在现状年份,农业用水生态足迹占比在波动中下降,这可能与张掖盆地农业部门节水措施的实施和用水效率的提高有关,也从一定层面上说明张掖盆地水资源生态与

经济社会的关系在不断改善。虽然生态环境用水生态足迹所占比重很低,但其值却呈较快速度增长,说明张掖盆地用水结构正在趋向合理。

图 4 为张掖盆地人均水资源生态足迹与水资源生态盈亏、人均水资源生态承载力、水资源生态压力指数和生态足迹强度曲线图。

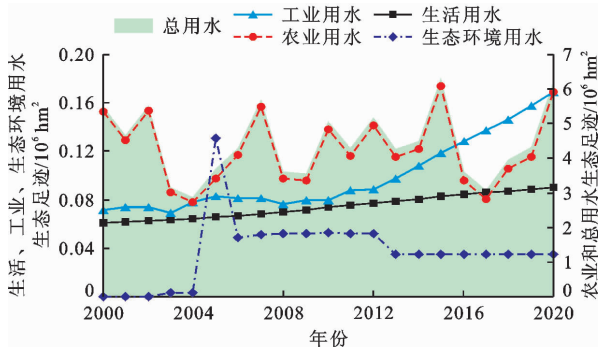


图 2 张掖盆地现状年水资源生态足迹曲线

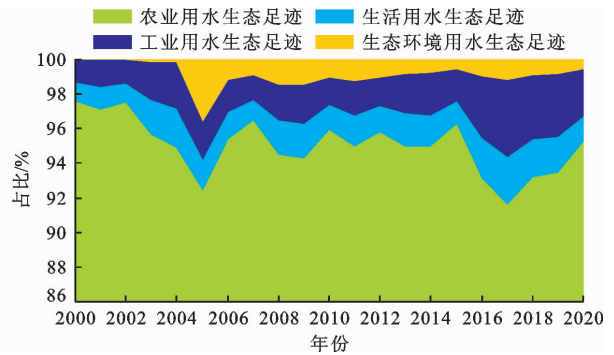
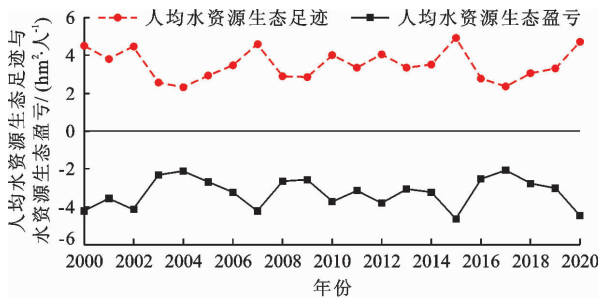
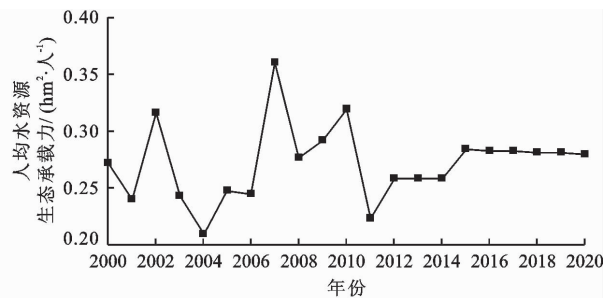


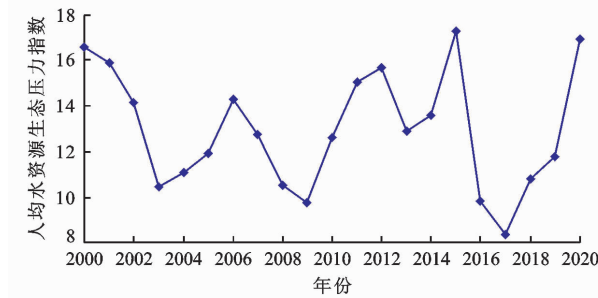
图 3 张掖盆地现状年水资源生态足迹构成



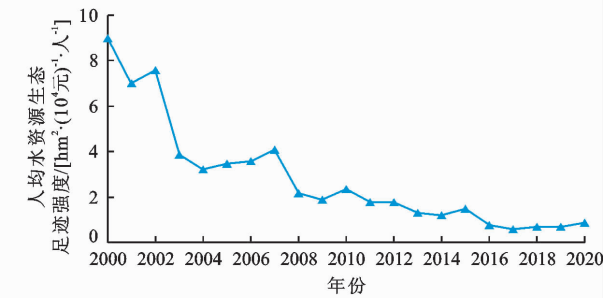
(a) 人均水资源生态足迹与水资源生态盈亏



(b) 人均水资源生态承载力



(c) 人均水资源生态压力指数



(d) 人均水资源生态足迹强度

图 4 张掖盆地现状年人均水资源生态足迹及各项指标曲线

从图 4 中可以看出,2000—2020 年张掖盆地水资源生态足迹远大于水资源生态承载力,由此导致该区域产生了较大的水资源生态亏损。在现状年,张掖盆地人均水资源生态足迹呈波动上升趋势,由 2000 年的 $4.497 \text{ hm}^2/\text{人}$ 提高到 2020 年的 $4.737 \text{ hm}^2/\text{人}$,上升幅度为 5.33% ,其最大值、最小值和均值分别为 $4.918(2015 \text{ 年})$ 、 $2.322(2004 \text{ 年})$ 和 $3.517 \text{ hm}^2/\text{人}$;人均水资源生态承载力呈缓慢上升趋势,由 2000 年的 $0.271 \text{ hm}^2/\text{人}$ 提高到 2020 年的 $0.280 \text{ hm}^2/\text{人}$,上升幅度为 3.32% ,其最大值、最小值和均

值分别为 $0.360(2007 \text{ 年})$ 、 $0.209(2004 \text{ 年})$ 和 $0.272 \text{ hm}^2/\text{人}$;人均水资源生态盈亏为亏损状态且亏损量呈波动上升趋势,亏损量由 2000 年的 $4.226 \text{ hm}^2/\text{人}$ 提高到 2020 年的 $4.457 \text{ hm}^2/\text{人}$,亏损量上升幅度为 5.47% ,亏损量最大值、最小值和均值分别为 $4.634(2015 \text{ 年})$ 、 $2.088(2017 \text{ 年})$ 和 $3.245 \text{ hm}^2/\text{人}$,其变化趋势与人均水资源生态足迹基本一致,说明水资源生态足迹对水资源生态亏损的影响较大,张掖盆地水资源利用状况在恶化。在现状年,张掖盆地水资源生态压力指数每年都超过 1 且逐年增大,由

2000年的16.585提高到2020年的16.917,上升幅度为2.00%,其最大值、最小值和均值分别为17.311(2015年)、8.397(2017年)和12.969,说明张掖盆地水资源利用是不安全的,面临较大的压力;水资源生态足迹强度均值为 $2.822 \text{ hm}^2/10^4$ 元,处于明显下降的状态,由2000年的 $8.989 \text{ hm}^2/10^4$ 元降到2020年的 $0.880 \text{ hm}^2/10^4$ 元,下降幅度为90.21%,说明张掖盆地水资源利用效率在提高。

表2 不同区域人均水资源生态足迹、承载力和盈亏均值 $\text{hm}^2/\text{人}$

区域	计算周期	生态足迹	生态承载力	生态盈亏量
青海 ^[17]	2005—2018	1.107	2.679	1.572
北京 ^[15]	2010—2019	0.296	0.081	-0.215
甘肃 ^[17]	2005—2018	0.898	0.099	-0.799
陕西 ^[16]	2000—2017	0.372	0.457	0.085
宁夏 ^[17]	2005—2018	2.197	0.006	-2.191
内蒙 ^[17]	2005—2018	1.411	0.155	-1.256
辽宁 ^[22]	2010—2019	0.509	0.431	-0.078
山西 ^[17]	2005—2018	0.448	0.037	-0.411
河南 ^[17]	2005—2018	0.523	0.184	-0.339
山东 ^[17]	2005—2018	0.554	0.113	-0.440
中国 ^[3]	2000—2020	0.720	1.280	0.560
张掖盆地 (本研究)	2000—2020	3.517	0.272	-3.245

与我国北方地区相比(表2),张掖盆地人均水资源生态足迹在计算周期内的平均值($3.517 \text{ hm}^2/\text{人}$)显著高于其它地区和全国平均水平,而人均水资源生态承载力($0.272 \text{ hm}^2/\text{人}$)处于偏低水平,高于北京($0.081 \text{ hm}^2/\text{人}$)、甘肃($0.099 \text{ hm}^2/\text{人}$)、宁夏($0.006 \text{ hm}^2/\text{人}$)、内蒙古($0.155 \text{ hm}^2/\text{人}$)、山西($0.037 \text{ hm}^2/\text{人}$)、河南($0.184 \text{ hm}^2/\text{人}$)和山东($0.113 \text{ hm}^2/\text{人}$),而显著低于青海($2.679 \text{ hm}^2/\text{人}$)、陕西($0.457 \text{ hm}^2/\text{人}$)、辽宁($0.431 \text{ hm}^2/\text{人}$)和全国平均水平($1.280 \text{ hm}^2/\text{人}$),由此导致人均水资源生态盈亏($-3.245 \text{ hm}^2/\text{人}$)处于较高的亏损状态,显著高于其它地区和全国平均水平。以上分析说明,张掖盆地水资源利用面临着较大的生态亏损压力。

3.2 张掖盆地水资源生态足迹预测

在前文情景设计的基础上,根据系统动力学的仿真结果获取张掖盆地在预测期各年份的需水量数值,由此计算张掖盆地在预测期的水资源生态足迹相关结果。图5、6分别为预测期张掖盆地各类水资

源生态足迹变化和构成图。从图5、6中可以看出,预测期内张掖盆地各用水部门生态足迹及占水资源生态足迹比重变化情况各异。

由图5、6可知,5类情景下各类用水生态足迹及占比呈现不同的变化趋势,其中生活用水生态足迹及其占比呈平稳上升趋势,上升幅度分别为30.43%、75.00%、54.95%、29.35%和53.85%;工业用水生态足迹及其占比呈大幅上升趋势,上升幅度分别为145.81%、545.81%、383.24%、136.46%和387.93%;农业用水生态足迹呈波动上升趋势,上升幅度分别为1.68%、1.68%、2.36%、0.97%和1.36%,而其占比呈波动下降趋势;生态环境用水生态足迹保持不变($0.035 \times 10^6 \text{ hm}^2$),其占比呈波动变化趋势。产生此种不同变化趋势的原因在于各情景有不同的发展侧重点,由此导致了各情景下不同用水部门的水资源生态足迹预测值的差异。

表3为预测期内张掖盆地平均水资源生态足迹,从表3中可以看出,5类情景下张掖盆地水资源生态足迹分别为 4.821×10^6 、 5.147×10^6 、 3.776×10^6 、 4.730×10^6 和 $3.697 \times 10^6 \text{ hm}^2$,大小排序为 $ZS_2 > ZS_1 > ZS_4 > ZS_3 > ZS_5$ 。由此看出,在预测期内张掖盆地水资源利用的趋势是合理的,技术的进步与效率的提高是导致农业用水生态足迹比重下降的重要原因,生活与工业用水生态足迹比重的提高则归因于整个社会的不断发展与进步,而生态用水生态足迹则呈较稳定的状态。

表3 预测期内张掖盆地平均水资源生态足迹 10^6 hm^2

情景	农业用水	工业用水	生活用水	生态环境用水	总用水
ZS ₁	4.348	0.331	0.107	0.035	4.821
ZS ₂	4.348	0.643	0.121	0.035	5.147
ZS ₃	3.213	0.415	0.113	0.035	3.776
ZS ₄	4.267	0.322	0.107	0.035	4.730
ZS ₅	3.132	0.418	0.112	0.035	3.697

不同情景的设计带来的内在发展趋势的差异导致预测期内张掖盆地水资源生态足迹预测结果存在着差异(图7)。从图7(a)可看出,预测期内张掖盆地人均水资源生态足迹表现出减小的趋势,但各情景具有不同的减小规律(相比于2021年而言),其中均值最大的是情景ZS₂的人均水资源生态足迹(均值 $3.633 \text{ hm}^2/\text{人}$),下降了0.7%;情景ZS₄的人均水资源生态足迹(均值 $3.479 \text{ hm}^2/\text{人}$)次之,下降

了 8.55% ;情景 ZS_1 的人均水资源生态足迹(均值 $3.546 \text{ hm}^2/\text{人}$)为第 3,下降了 5.74% ;情景 ZS_3 的人均水资源生态足迹(均值 $2.596 \text{ hm}^2/\text{人}$)为第 4,下降了 0.7% ;情景 ZS_5 的人均水资源生态足迹(均值 $2.630 \text{ hm}^2/\text{人}$)最小,下降了 0.4% 。与此同时,张掖盆地人均水资源承载力呈下降趋势且远小于人均水资源生态足迹(图 7(b)),均值分别为 0.274、0.270、0.266、0.274 和 $0.267 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。综合考虑以上分析,预测期内张掖盆地人均水资源生态盈亏呈波动变化趋势且均为亏损(图 7(c)和 7(e)),平均亏损量分别为 3.272、3.364、2.402、3.205 和 $2.363 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。由以上分析可知,张掖盆地在预测期内水资源生态承载力始终小于生态足迹的情况意味着该地区水资源使用将保持一个较大的压力状态,其中以情景 ZS_2 (经济发展居优先地位)下的压力最大。

对于可持续水资源利用 2 个评价指标,在预测期内张掖盆地水资源生态压力指数在大于 1 的范围内随时间增长而增大,水资源生态足迹强度则逐年减小(图 7(d)和 7(e))。预测期内张掖盆地水资源生态压力指数的平均值分别为 12.932、13.483、10.055、12.698 和 9.846,情景 ZS_2 最大,情景 ZS_5 最小,说明张掖盆地在预测期内的水资源利用处于不安全的状态且存在较大的压力。预测期内张掖盆地平均水资源生态足迹强度分别为 0.281、0.206、0.201、0.281 和 $0.196 \text{ hm}^2/10^4 \text{ 元}$,分别由 2021 年的 0.599、0.600、0.467、0.588 和 $0.458 \text{ hm}^2/10^4 \text{ 元}$ 降至 2050 年的 0.124、0.028、0.050、0.125 和 $0.047 \text{ hm}^2/10^4 \text{ 元}$,下降幅度分别为 79.30%、95.33%、89.29%、78.74% 和 89.74%,说明张掖盆地水资源利用效率在提高。

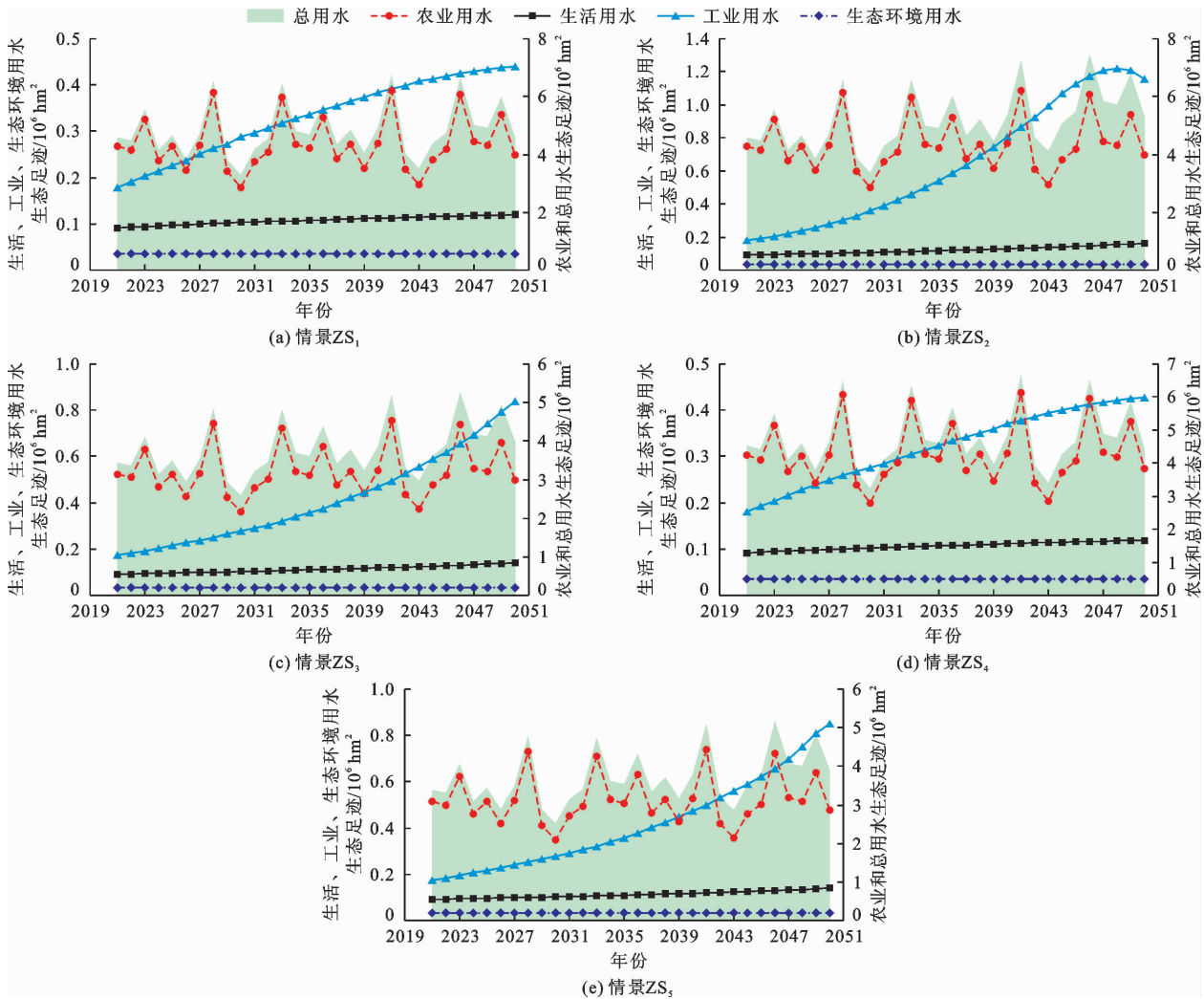


图 5 预测期内张掖盆地水资源农业、生活、工业、生态环境用水生态足迹变化过程

3.3 情景比较与分析

表 4 对比了预测期内张掖盆地水资源利用的可

持续性指标。平均来看,将经济作为重点发展方向的情景 ZS_2 将会导致张掖盆地的水资源具有最大的

生态足迹人均值(3.633 $\text{hm}^2/\text{人}$)、生态亏损人均值(3.364 $\text{hm}^2/\text{人}$)和生态压力指数(13.483),这种以牺牲水资源保护为代价的情景是张掖盆地不可接受的。无论是情景 ZS_1 、情景 ZS_3 或情景 ZS_4 ,其在人均水资源生态足迹、人均水资源生态盈亏、水资源生

态压力指数和水资源生态足迹强度等方面均无法做到最优。对于情景 ZS_5 ,张掖盆地的水资源具有最小的生态足迹人均值(2.630 $\text{hm}^2/\text{人}$)、生态亏损人均值(2.363 $\text{hm}^2/\text{人}$)、生态压力指数(9.846)和生态足迹强度(0.196 $\text{hm}^2/10^4$ 元)。

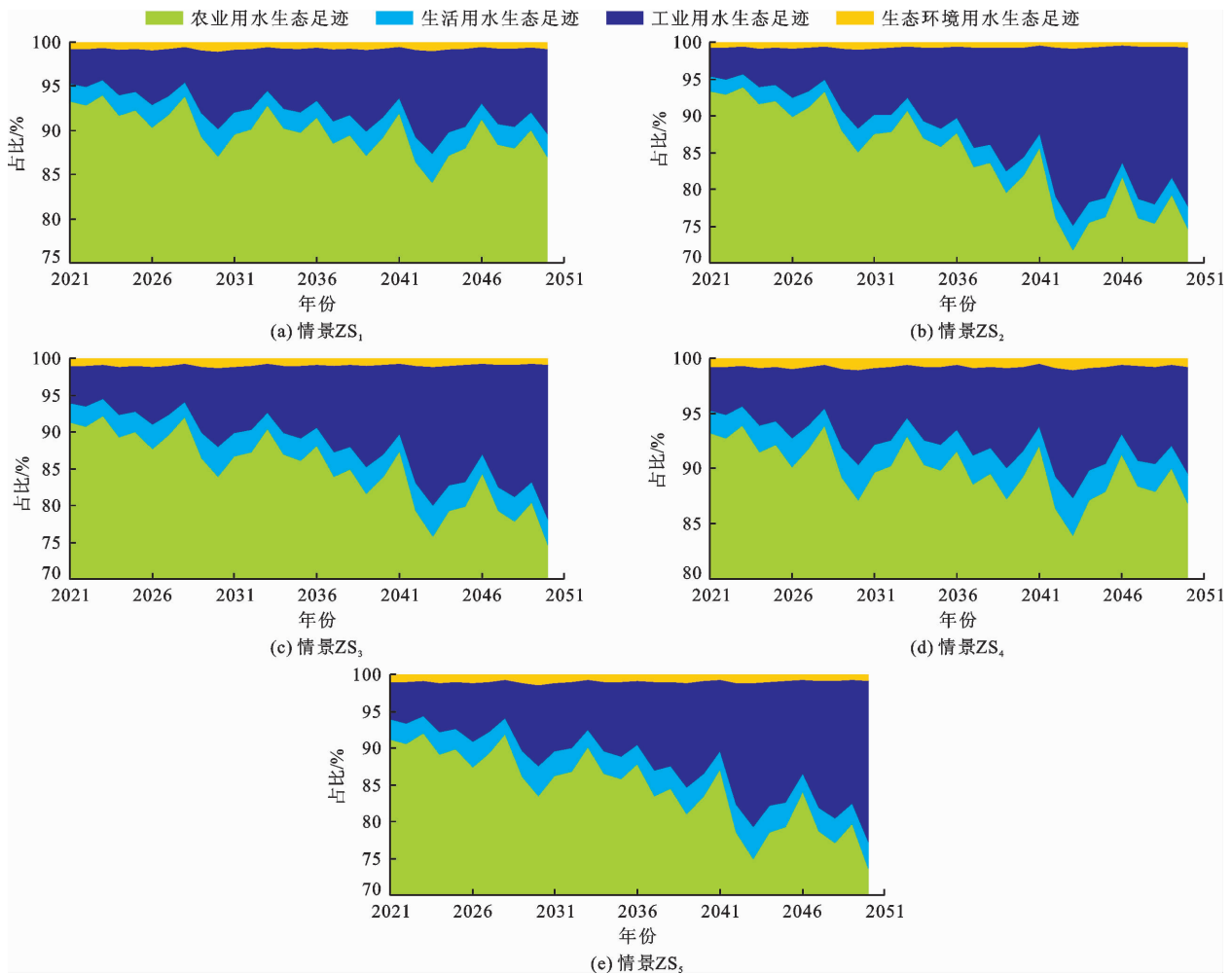


图6 预测期内张掖盆地水资源农业、生活、工业、生态环境用水生态足迹占比

从表4及前面分析可看出,未来各类情景下张掖盆地均会持续面临较大的水资源生态亏损和压力,但这种情况在情景 ZS_5 中将得到较大的缓解。相比而言,情景 ZS_5 既兼顾了社会经济发展对水资源的需求,又能够较大程度地缓解水资源利用的压力,是张掖盆地政府部门应采纳的方案。同时,在全社会、各部门的通力合作下,通过提高用水效率、普及节水技术及推进节水措施,张掖盆地未来水资源的可持续利用将得到实现。

3.4 讨论

现有研究表明,区域水资源利用问题本质上是经济社会发展的需求和水资源可持续发展之间的矛盾^[4],水资源生态足迹和生态承载力是衡量水资源

供需平衡及可持续利用的重要指标。随着经济社会和科学技术的发展,整个社会对水资源的需求量会随之增大,导致人均水资源生态足迹的增大^[4],故降低区域水资源生态足迹的人均值意味着区域水资源在未来能够可持续地被利用。与传统研究方法相比,通过采用量化的SD模型方法对于干旱半干旱区域的水资源生态足迹进行核算和预测,能够掌握该区域用水的结构与变化情况、水资源供需平衡与可持续利用状态以及节水措施实施的重点所在,进而为区域水资源可持续利用提供科学的建议和依据,这是本文的创新性所在。

对于干旱半干旱区域,农业部门在现状与未来均是用水大户,也是重点节水对象,存在较大的节水

空间。为此,此类区域需要在节水设施的推广、节水栽培技术的采用、用水效率的提升等方面投入大量的人力和物力。

在生活用水方面,随着人口的不断增长,需要在

民众节水意识的培养、对保护现有水资源的大力宣传及节水措施在全社会的普及和推广等方面加大力度,让节约用水的意识和行为深入人心,才能更好更有效地促进区域水资源的可持续利用。

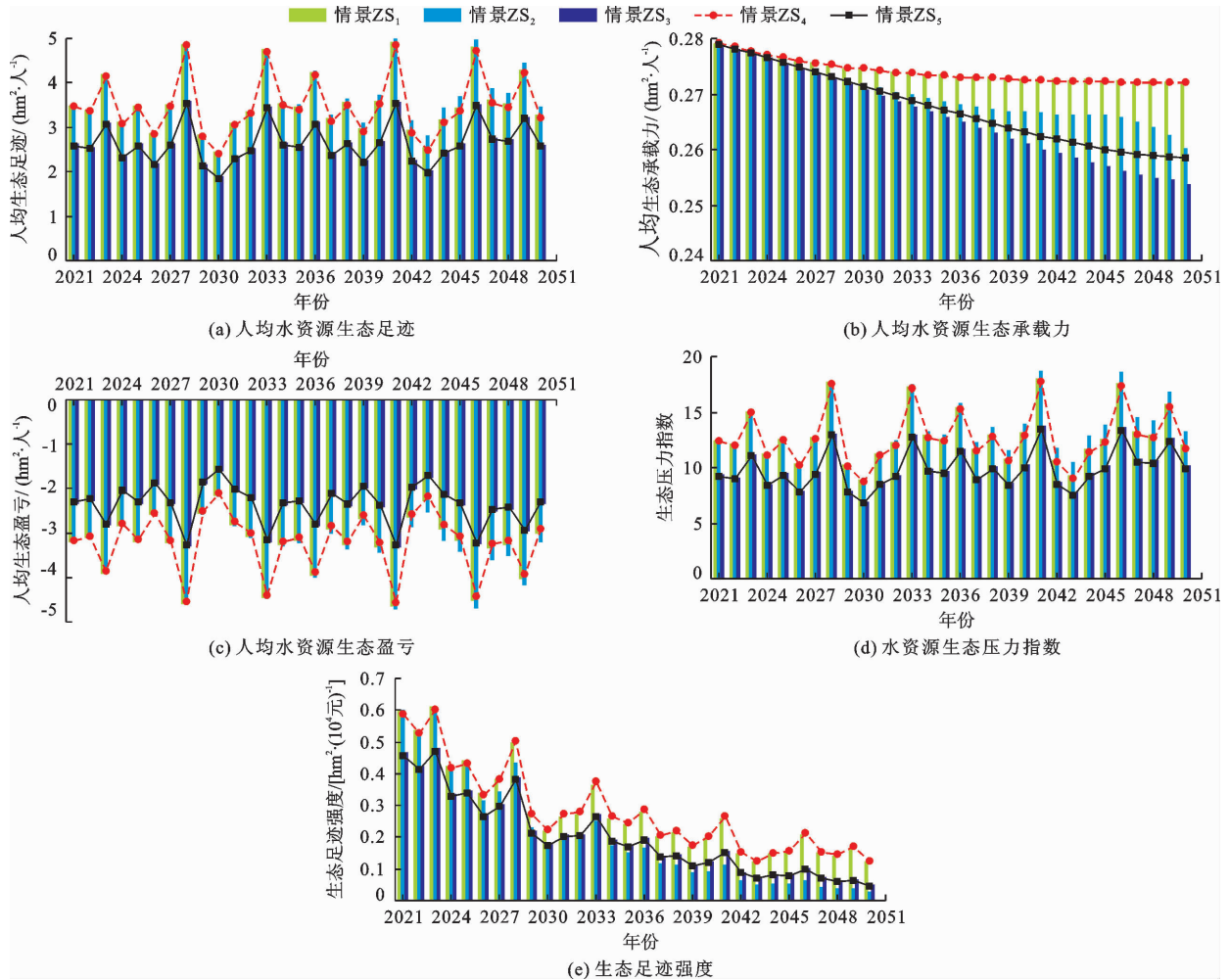


图 7 预测期内张掖盆地水资源生态足迹比较

表 4 预测期内张掖盆地可持续水资源利用对比

项目	情景 ZS ₁	情景 ZS ₂	情景 ZS ₃	情景 ZS ₄	情景 ZS ₅
人均水资源生态足迹均值/($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	3.546	3.633	2.668	3.479	2.630
人均水资源生态盈亏均值/($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	-3.272	-3.364	-2.402	-3.205	-2.363
平均水资源生态压力指数	12.932	13.483	10.055	12.698	9.846
平均水资源生态足迹强度/[$\text{hm}^2 \cdot (10^4 \text{元})^{-1}$]	0.281	0.206	0.201	0.281	0.196
水资源生态亏损的年数/a	30	30	30	30	30
水资源生态压力指数 > 1 的年数/a	30	30	30	30	30

4 结 论

(1)2000—2020 年,张掖盆地各部门的用水生态足迹占比大小排序为农业 > 工业 > 生活 > 生态环境,节水重点在农业领域且节水潜能较大;人均水资

源生态足迹、承载力和盈亏的均值分别为 3.517、0.272 和 $-3.245 \text{ hm}^2/\text{人}$,水资源利用状况在恶化;水资源生态压力指数均值为 12.969,呈波动上升趋势,水资源利用压力极大;水资源生态足迹强度(均值 $2.822 \text{ hm}^2/10^4 \text{元}$)呈显著下降趋势,说明水资源

利用效率在提高。

(2)2021—2050年,5类情景下张掖盆地人均水资源生态足迹均小于人均水资源生态承载力,由此导致人均水资源生态亏损的出现;5类情景下水资源生态压力指数均大于1且呈波动上升趋势,而水资源生态足迹强度则呈波动下降趋势。张掖盆地未来的水资源利用将处于较大压力状态。

(3)经过对比,情景ZS₅下张掖盆地的水资源生态足迹、亏损和压力指数的均值最小,同时兼顾了经济社会的需求和水资源的保护,是应该推荐给政府管理部门的方案。在采纳情景ZS₅的基础上,张掖盆地还应在节水技术和措施的助力下,不断提高用水效率,在全社会 and 各部门的共同努力下实现水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 夏军,刁艺璇,余敦先,等.鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J].水资源保护,2022,38(3):1-8+24.
- [2] 邵骏,卢满生,杜涛,等.长江流域水资源生态足迹及其驱动因素[J].长江科学院院报,2021,38(12):19-24+32.
- [3] 马晓蕾,郭婷文.中国水生态足迹与承载能力时空演化研究[J].人民黄河,2022,44(6):81-87.
- [4] 安慧,范历娟,吴海林,等.基于BP神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1076-1087.
- [5] 王刚毅,刘杰.基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价:以中原城市群为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(1):80-90.
- [6] YANG Yafeng, WANG Hongrui, LI Yiyang, et al. New green development indicator of water resources system based on an improved water resources ecological footprint and its application[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110115.
- [7] LI Donglin, ZUO Qiting, JIANG Long, et al. An integrated analysis framework for water resources sustainability considering fairness and decoupling based on the water resources ecological footprint model: a case study of Xinjiang, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135466.
- [8] 李菲,张小平.甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J].干旱区地理,2020,43(6):1486-1495.
- [9] 张羽,左其亭,曹宏斌,等.沁蟒河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):50-57.
- [10] 杨晓霖,潘玉君,李晓莉.西南地区水资源生态足迹及承载力动态特征与预测分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2022,47(6):58-67.
- [11] 周飞,邱卫国.2013—2019年上海市水资源可持续利用程度评价[J].人民黄河,2022,44(S1):51-53.
- [12] WANG Huan, HUANG Jiejun, ZHOU Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: a case study of Hubei Province, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.
- [13] HU Mianhao, YUAN Juhong, CHEN La. Water ecological footprint size, depth and its spatial pattern correlation in the "Four-city Area in Middle China" [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108387.
- [14] 刘文铮.区域水资源生态承载力耦合模型研究[J].海河水利,2022(3):98-101.
- [15] 岳晨,刘峰,杨柳,等.北京市2010—2019年水资源生态足迹和生态承载力[J].水土保持通报,2021,41(3):291-295+304.
- [16] 张淑兰,张海军,张盍傲,等.陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J].人民长江,2021,52(4):130-136.
- [17] 朱向梅,王子莎.黄河流域水足迹公平性分析研究[J].环境生态学,2022,4(2/3):83-89.
- [18] 朱正如,湛雅琪,曹永强,等.辽宁省水资源生态足迹时空特征及其影响因素分析[J].长江科学院院报,2022,39(11):29-34.
- [19] 欧阳兴涛,廖浩宇,姜秋香,等.基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控[J].环境科学,2023,44(3):1368-1377.
- [20] 张凯,吴凤平,成长春.三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J].环境科学,2021,42(12):5757-5767.
- [21] 郭晓娜,苏维词,杨振华,等.城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J].灌溉排水学报,2017,36(2):69-75.
- [22] 郭荣中,申海建,杨敏华.基于灰色模型的长沙市生态足迹与生态承载力预测分析[J].水土保持研究,2015,22(4):195-200.
- [23] 张振龙,孙慧,苏洋.新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测[J].环境科学研究,2017,30(12):1880-1888.
- [24] 秦欢欢,郑春苗.基于宏观经济模型和系统动力学的张掖盆地水资源供需研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):9-17.
- [25] 姚俊强.干旱内陆河流域水资源供需平衡与管理[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [26] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [27] 刘柱.干旱区城镇化对水资源、水生态的影响及对策研究:以鄯善县为例[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.

(下转第56页)

利科技(中英文),2022,20(4):660-669+747.

- [26] LI Jianchun, YUAN Wenhua, QIN Xiaonan, et al. Coupling coordination degree for urban green growth between public demand and government supply in urban agglomeration; a case study from China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 304: 114209.
- [27] WENG Qingqing, LIAN Hanghua, QIN Quande. Spatial disparities of the coupling coordinated development among the economy, environment and society across China's regions[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109364.
- [28] FENG Yingjie, ZHU Aikong, LIU Pei, et al. Coupling and coordinated relationship of water utilization, industrial development and ecological welfare in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134824.
- [29] 刁艺璇,左其亭,马军霞. 黄河流域城镇化与水资源利用水平及其耦合协调分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):326-333.

(上接第46页)

- [28] 雒占福,张金,刘娅婷,等. 2000—2017年中国城市绿化水平的时空演变及其影响因素研究[J]. 干旱区地理,2020,43(2):481-490.
- [29] 雷亚君,张永福,张敏惠,等. 新疆水资源生态足迹核算与预测[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(5):142-150.
- [30] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报,2008,28(3):1279-1286.
- [31] NICCOLUCCI V, GALLI A, REED A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [32] 张义敏,张晓琳,陈畅. 基于水资源生态足迹模型的广东省及珠三角九市水资源可持续利用研究[J]. 人民珠江,2022,43(4):31-40.
- [33] 岳晨,钱永,崔向向,等. 福建省2010—2019年水资源生态足迹与生态承载力[J]. 水土保持通报,2021,41(6):282-287.
- [34] 高洁,吴普特,谢朋轩,等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报,2021,37(5):105-112.

