

# 咸海流域社会经济用水分析与预测

刘 爽<sup>1,2</sup>, 白 洁<sup>1</sup>, 罗格平<sup>1,2</sup>, 吕娜娜<sup>3</sup>, 吴 淼<sup>4</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

4. 中国科学院新疆分院文献信息中心, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 1960年以来咸海流域大规模的水土资源开发使得社会经济用水激增,致使至1990年咸海面积萎缩50%,引发咸海生态危机。目前对引起咸海生态危机的社会经济用水的时空变化特征和趋势尚不清楚。本文在整合了多途径获取的1960—2016年咸海流域国家/州级水资源和社会经济数据的基础上,利用系统动力学模型,仿真模拟和分析了1960—2016年咸海流域社会经济和用水时空变化特征,并多情景预测2016—2030年咸海流域社会经济用水。1960—2016年咸海流域人口增幅267%,GDP增幅1100%,社会经济用水量从410亿m<sup>3</sup>增长至910亿m<sup>3</sup>。咸海流域的工农业用水效益在1991年苏联解体后明显增加,但仍处于较低水平。对未来的情景预测表明:若延续现有社会经济用水效率、农作物种植面积持续扩张(S1),至2030年咸海流域社会经济用水量达到962亿m<sup>3</sup>;而在滴灌普及率达到70%、种植面积不变的情景下(S10),社会经济用水量降至681亿m<sup>3</sup>,可有效缓解咸海危机。

**关键词:** 咸海流域;水资源;社会经济用水;系统动力学

DOI: 10.11821/dlxb202105016

## 1 引言

干旱和半干旱区占全球陆地表面积30%,水是干旱区绿洲存在和发展的主要限制因素<sup>[1]</sup>。干旱区社会经济用水和生态环境用水此起彼伏的竞争关系,是干旱区生态环境质量下降甚至恶化的主要原因,最为著名的例子是咸海生态危机。构成咸海流域的两大流域——阿姆河流域和锡尔河流域水资源时空分布不均,且受气候变化影响,全球升温加剧该区域水资源供给和利用的不确定性<sup>[2-3]</sup>。位于流域上游的塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦是水资源主要形成区,产水量占流域水资源总量的80.4%<sup>[4]</sup>,而依据苏联解体前制定的水量分配方案,位于流域下游的哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的分水比例占整个流域水量的82%<sup>[5]</sup>。水资源时空分布及苏联解体后开发利用的不均衡性使得水资源问题上升到国家间政治层面,中亚各国水资源利用矛盾激化,导致生态环境问题突出。1960年以来,咸海流域大规模水土开发,致使咸海入湖水量大幅减少、土壤盐碱化加剧、水污染频发、生物多样性减少、盐尘肆虐,逐步造成咸海生态危机,引起国际社会高度关注<sup>[6]</sup>;

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2020-11-16

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060302); 国家自然科学基金项目(U1803243) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20060302; National Natural Science Foundation of China, No.U1803243]

**作者简介:** 刘爽(1994-),女,江苏沭阳人,硕士生,主要从事社会经济用水分析、遥感与GIS应用研究。

E-mail: liushuang174@mailsucas.ac.cn

**通讯作者:** 罗格平(1968-),男,湖南湘乡人,博士,研究员,主要从事土地变化及其生态效应、遥感与GIS应用研究。

E-mail: luogp@ms.xjbi.ac.cn

而苏联解体后, 流域内的大规模水土开发甚至进一步加剧, 到2009年咸海面积萎缩90%。

针对咸海流域水资源不合理利用及其引发的咸海生态危机, 国际社会以水资源利用为切入点开展了许多相关研究。在水资源管理方面, 乌兹别克斯坦水资源一体化管理体系(Integrated Water Resource Management, IWRM)逐渐取代传统的、以国家为中心的水资源管理模式<sup>[7]</sup>, IWRM发起的用水户协会(Water Users Associations, WUAs)为该国农业灌溉用水合理分配做出贡献<sup>[8]</sup>; 哈萨克斯坦南部区域通过灌溉管理权转让和WUAs对水资源管理制度进行改革<sup>[9]</sup>。目前, 咸海流域各国的水资源一体化管理, 尽管能提高局部区域的水资源利用效率, 但针对全流域的水资源协调管理需要更高级别的一体化宏观权限, 才能有效解决咸海流域用水矛盾。针对水资源利用中出现的生态与环境问题, 一些学者在灌区尺度上对土壤次生盐渍化开展研究, 认为过高灌溉定额和不完善的排水系统是土壤次生盐渍化的主导因素<sup>[10-11]</sup>。此外, 针对咸海流域的粮食安全、生态耗水和水资源跨界合作利用等方面开展研究, 如通过选择适宜作物类型和灌溉方式提高粮食安全、经济效益和水资源利用效率<sup>[12]</sup>; 对阿姆河流域土库曼斯坦的列巴普州开展生态耗水评价分析<sup>[13]</sup>; 采用流域水文经济模型和博弈论概念分析锡尔河流域跨界水资源和能源分配<sup>[14]</sup>。

苏联解体后, 中亚5国仍然沿用苏联时期的分水比例, 但由于苏联时期的水资源统一管理的相关调配体系不复存在, 上、下游国家各自为政, 经常因水量分配、上游发电与下游灌溉、水质污染等矛盾而引发争端<sup>[14-18]</sup>, 因此中亚各国没有完全公开水资源利用与管理的相关数据。因咸海流域跨界河流复杂性和无法系统获取相关数据, 上述研究多局限于咸海流域内一些支流或单个国家灌区的水资源利用与管理, 缺乏覆盖咸海流域全境的水资源利用和效率分析以及咸海流域中亚5国社会经济用水的宏观研究, 研究视角未能从单一支流或单个国家扩大到整个咸海流域, 难以从整体上描述该地区水资源利用状况, 无法全面客观地揭示1960年以来咸海流域社会经济用水规律<sup>[19]</sup>。

为此, 本文以整个咸海流域为研究区, 通过系统整合咸海流域及其境内中亚5国的各类相关文献(中、英、俄文)数据, 建立1960—2016年咸海流域各国社会经济和水土资源利用空间数据集, 为该研究资料匮乏地区提供数据支持。在此基础上构建社会经济用水SD模型, 对咸海流域中亚5国社会经济发展状况和社会经济用水量进行仿真模拟和预测评估, 为咸海生态危机治理和咸海流域水资源合理开发利用提供参考。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

咸海流域深处亚欧大陆腹地, 流域面积约141万 $\text{km}^2$ , 地跨哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦5国<sup>[20-21]</sup>①。咸海流域整体地势东高西低, 东部为天山山脉及帕米尔高原山地, 西部及西北部是卡拉库姆沙漠和克孜勒库姆沙漠。受西伯利亚高压影响, 该区域呈典型的温带大陆性气候<sup>[22]</sup>, 多年平均气温约11 $^{\circ}\text{C}$ , 年降水量约236 mm。东部山区降水多(1000~2000 mm/a), 西部平原区降水少(< 100 mm/a), 降水多发生在冬春季节<sup>[3]</sup>, 年蒸发量高达1700 mm<sup>[17]</sup>。

发源于帕米尔高原和天山山脉的阿姆河和锡尔河将咸海流域划分为2个子流域(图1)。其中, 阿姆河流域面积86万 $\text{km}^2$ , 跨塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦3个国家; 锡尔河流域面积55万 $\text{km}^2$ , 跨吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克

① 咸海流域还包括阿富汗、伊朗部分地区, 因所占比重小且缺乏数据, 不列入本文研究范围。

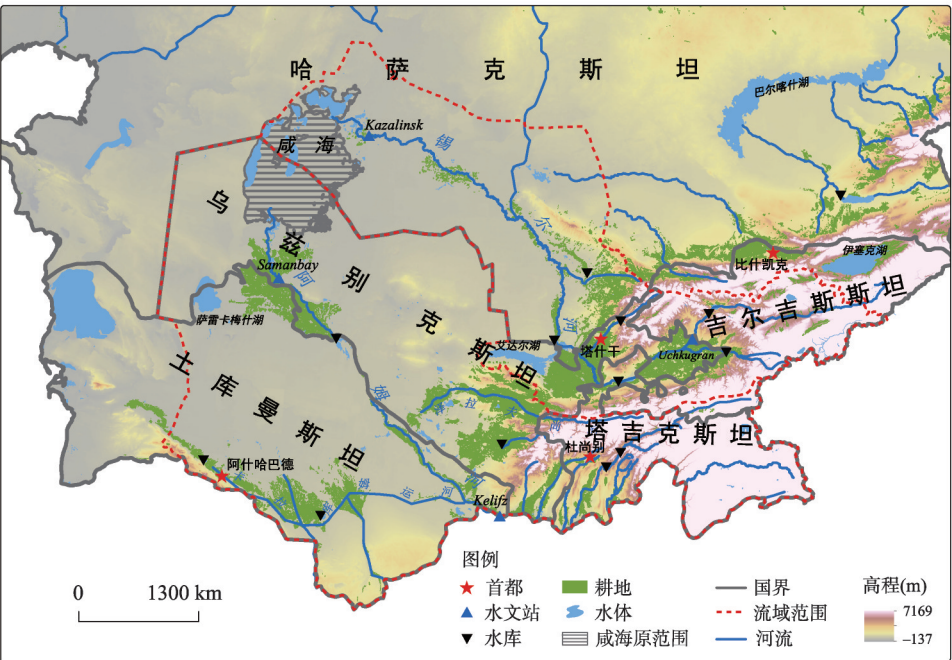


图1 研究区概况图  
Fig. 1 Map of the Aral Sea Basin

斯坦4国(表1)。山区降水和冰雪融水是咸海流域河流的主要补给水源,总年均地表径流量约1165亿m<sup>3</sup>,阿姆河和锡尔河分别为793亿m<sup>3</sup><sup>[23]</sup>和372亿m<sup>3</sup>。咸海流域的地下水储量约435亿m<sup>3</sup>,但是抽取成本较高,年均实际抽取量约110亿m<sup>3</sup><sup>[24]</sup>,主要用于居民生活和工业生产。咸海流域每年取水量约1100~1300亿m<sup>3</sup>,90%用于绿洲农业灌溉<sup>[25]</sup>。由于大规模水土开发,目前阿姆河已无地表径流注入咸海南部,锡尔河每年流入咸海北部的水量约30~80亿m<sup>3</sup><sup>②</sup>。咸海流域总人口5233.1万,其中农村人口占64.5%,约60%的人口分布在乌兹别克斯坦。咸海流域各国经济发展差距较大,人均国内生产总值约2662美元,其中,哈萨克斯坦、土库曼斯坦人均国内生产总值较高,分别是7715美元和6389美元,吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦人均国内生产总值较低,分别是1120美元和919美元<sup>③</sup>。

表1 中亚5国在咸海流域的空间分布和面积构成

Tab. 1 Spatial distribution and area composition of five Central Asian countries in the Aral Sea Basin				
子流域	国家	面积(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	流域占比(%)	州名
锡尔河	吉尔吉斯斯坦	12.5	22.7	巴特肯州、奥什州、贾拉拉巴德州、纳伦州
	乌兹别克斯坦	6.1	11.1	安集延州、纳曼干州、费尔干纳州、塔什干州、锡尔河州、吉扎克州
	塔吉克斯坦	2.5	4.5	粟特州
	哈萨克斯坦	34.0	61.7	南哈萨克斯坦州、克孜勒奥尔达州
阿姆河	塔吉克斯坦	11.7	13.5	国家直辖区、哈特隆州、山地—巴达赫尚自治州
	乌兹别克斯坦	39.8	46.0	卡拉克帕克共和国、花刺子模州、纳沃伊州、布哈拉州、撒马尔罕州、卡什卡河州、苏尔汉河州
	土库曼斯坦	35.1	40.5	达绍古兹州、阿哈尔州、马雷州、列巴普州

② 数据来源: [http://cawater-info.net/data\\_ca/?action=login&do=&lang=Eng](http://cawater-info.net/data_ca/?action=login&do=&lang=Eng).  
③ 数据来源: <https://data.worldbank.org/cn/>.

2.2 数据

本文所用数据包括地图、社会经济数据和水资源数据 3 个部分（表 2），时间序列 1960—2016 年。所有统计资料均以咸海流域内中亚 5 国国界或州界为行政单元统计，由

表 2 咸海流域社会经济用水 SD 建模所用数据

Tab. 2 Data used in the SD modeling of socio-economic water use in the Aral Sea Basin

数据类型	数据项	数据名称	空间尺度	年份	数据来源/方法
地图		苏联解体前地图	国家/	1990	苏联社会主义共和国地图集 <sup>a</sup>
		中亚 5 国行政区划数据	州界	2010	世界分国地图
社会经济 产值数据	GDP	国家		1960—1964	依据 1965—2013 年数据线性趋势外推
				1965—2013	Agricultural Statistical Database of Transition Countries
				2014—2016	世界银行
		农业产值	国家	1960—1964	依据 1965—2013 年数据线性趋势外推
				1965—2013	Agricultural Statistical Database of Transition Countries
				2014—2016	世界银行
	工业产值	国家		1960—2016	GDP 与农业产值之差
				1960—1979	苏联社会主义共和国统计年鉴
				1980—1990	独联体统计委员会
				1991—2016	中亚 5 国统计年鉴 <sup>b</sup> 、统计局网站 <sup>c</sup>
	人口	城市人口、农村人口	分州	1960—1987	苏联社会主义共和国统计年鉴 <sup>d</sup>
				1988—1990	独联体统计委员会 <sup>e</sup>
				1991—2016	中亚 5 国统计年鉴 <sup>b</sup> 、统计局网站 <sup>c</sup>
		果园面积	国家	1960—1987	苏联社会主义共和国统计年鉴 <sup>d</sup>
				1988—1990	独联体统计委员会 <sup>e</sup>
				1991—2016	中亚 5 国统计年鉴 <sup>b</sup> 、统计局网站 <sup>c</sup>
	牲畜量	牛、羊头数	分州	1960—1987	苏联社会主义共和国统计年鉴 <sup>d</sup>
				1988—1990	依据 1987、1991 年数据线性插值
				1991—2016	中亚 5 国统计年鉴 <sup>b</sup> 、统计局网站 <sup>c</sup>
水资源数据	用水量	工业、农业、生活用水量	国家	1980—2016	ICWC
					文献[28-31]
		灌溉定额	国家	1962、1966—1980	文献[32]
				1992—2008	ICWC
	水利工程	水库面积、库容			ICWC
	径流量	阿姆河、锡尔河径流量		1960—2016	ICWC
	入湖水量	阿姆河、锡尔河入湖水量		1960—2016	水文站 <sup>f</sup>

注：a. 《苏联社会主义共和国地图集》由中国科学院新疆分院文献信息中心提供；b. 《哈萨克斯坦统计年鉴》(2005、2012)、《乌兹别克斯坦统计年鉴》(2013)、《塔吉克斯坦统计年鉴》(2016)；c. 哈萨克斯坦国家统计局网站 (<http://stat.gov.kz>)、吉尔吉斯斯坦国家统计局统计网站 (<http://www.stat.kg>)、乌兹别克斯坦国家统计局统计网站 (<https://stat.uz/uz>)；d. 苏联 1960—1987 年逐年发布的《国民经济统计年鉴》由中国科学院新疆分院文献信息中心提供；e. 独联体统计委员会建立的官方数据库(The Database Official Statistics of the Countries of the Commonwealth of Independent States)以 CD 形式发布的年统计数据；f. Kelifz 水文站位于阿姆河流域喷赤河和瓦赫什河汇流处 ([http://www.cawater-info.net/water\\_quality\\_in\\_ca/amu\\_e.htm](http://www.cawater-info.net/water_quality_in_ca/amu_e.htm))、Uchkugran 水文站位于锡尔河流域纳伦河和卡拉河汇流处 ([http://www.cawater-info.net/water\\_quality\\_in\\_ca/syr\\_e.htm](http://www.cawater-info.net/water_quality_in_ca/syr_e.htm))，1960—2016 年阿姆河入湖水量来自乌兹别克斯坦水文局提供的该河流下游三角洲的 Samanbay 站数据，1960—2000 年锡尔河入湖水量来自该河流下游三角洲的 Kazalinsk 站的文献数据<sup>[33-34]</sup>，2001—2016 年入湖水量来自 ICWC 每年发布的公告 ([http://www.icwc-aral.uz/icwc\\_bulletins.htm](http://www.icwc-aral.uz/icwc_bulletins.htm))。



于这些国家或地区的行政边界和名称有所变更,使得苏联解体前后的统计资料在行政单元上出现前后不一致现象,因此本文以2010年中亚5国行政边界为标准,并结合1990年《苏联社会主义共和国地图集》中的行政区划地图,参考历史文献<sup>[26]</sup>,将苏联解体前后威海流域内发生变化的行政单元(州界)边界和名称进行统一处理,全部转换为基于2010年中亚5国的行政单元。

社会经济数据主要包括GDP、人口(城市和农村人口)、农作物种植结构(谷物、棉花、饲料、果园和其他作物),主要来自公开出版的英文或俄文的中亚5国统计年鉴、苏联社会主义共和国统计年鉴和独联体统计委员会、世界银行以及哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦统计局网站公布的数据。对于GDP数据,1991年以前原苏联加盟共和国用概念上等同于GDP的物质生产净值(Net Material Product, NMP)进行国民经济核算。Lerman等<sup>[27]</sup>统一了中亚5国1965—2013年NMP和GDP指标,因此本文中1965—2013年中亚5国GDP数据由Lerman提供;1960—1964年数据通过1965—2013年GDP数据的线性趋势外推获得;2014—2016年GDP数据来自世界银行,整个时间序列以2005年不变价美元为标准。1960—1990年的人口(城市和农村人口)和农业(种植业和畜牧业)资料来自《苏联社会主义共和国统计年鉴》,而对应1991—2016年的资料来自中亚5国统计年鉴和统计局网站。中亚地区的主要农作物种类包括小麦、棉花、玉米、苜蓿、向日葵、甜菜、蔬菜、葡萄等。由于各时期、各国的农作物统计分类有所差异,为保证数据的时间序列连续性,本文将农作物分为谷物、棉花、饲料、果园和其他作物,其中:谷物包括小麦、大麦、粮用玉米、粮用豆类、水稻等,饲料包括苜蓿、青贮玉米及其他一年生或多年生饲草,果园主要包括葡萄、苹果、杏等,其他作物包括向日葵、甜菜、蔬菜等除棉花外所占比例小的经济作物。

水资源数据来自中亚水资源协调委员会(Intestate Commission for Water Coordination of Central Asia, ICWC)的数据库、文献及河流水文站点。灌溉定额参考地区包括吉尔吉斯斯坦<sup>[28]</sup>、乌兹别克斯坦的布哈拉州<sup>[29]</sup>和花刺子模州<sup>[30]</sup>、哈萨克斯坦的南哈萨克斯坦州<sup>[31]</sup>,灌溉作物种类涉及棉花、小麦、水稻、豆类。

## 2.3 研究方法

**2.3.1 系统动力学模型构建** 国际上常用的社会经济用水研究方法包括:函数分析方法(库兹涅茨曲线、科布一道格拉斯生产函数等)、人工神经网络、投入产出模型、可计算一般均衡模型,以及系统动力学(System Dynamics, SD)模型<sup>[35]</sup>。社会经济用水涉及资源环境、生产生活、经济发展等诸多因素,各因素之间存在相互制约、此消彼长的关系<sup>[36]</sup>,形成复杂系统,而系统动力学是研究复杂系统最有效的方法。系统动力学已被广泛应用于水资源系统集成建模<sup>[37]</sup>、水资源开发利用<sup>[38]</sup>、水资源承载力<sup>[39]</sup>、水资源规划与管理<sup>[40]</sup>、城市环境和环境经济<sup>[41]</sup>等方面的研究。

本文借助系统动力学方法建立威海流域社会经济用水模型,从社会经济角度解析威海流域的用水情况,模型建立通过软件Vensim-PLE实现。总用水量包括生活用水量、工业用水量、农业用水量,并考虑水库水面蒸发、蓄容和泄洪过程对流域内可用水量的影响,建模过程中将水库用水量加入总用水量中;可用水量取河流出口径流量与威海入湖水量之差。总用水量和可用水量通过缺水系数表征流域内水资源短缺程度。考虑到威海流域实际情形,水资源短缺主要影响农业灌溉定额、单位工业产值耗水量,在本模型中通过缺水系数进行调控(图2a)。

本模型包括4个子系统:生活用水子系统、工业用水子系统、农业用水子系统、供水子系统(图2b)。农业用水约占威海流域总用水量的90%,因此农业子系统是模型的重



点。农业用水量由种植业用水量和畜牧业用水量两部分组成, 本模型根据作物类型设置不同的灌溉定额, 模拟种植业用水量。畜牧业用水通常包括畜禽生产养殖环节用水和饲料作物生产环节用水<sup>[42]</sup>, 饲料作物生产用水已计入种植业用水, 因此本文中畜牧业用水仅包括畜禽生产养殖环节用水, 主要指牲畜饮用水。本文以咸海流域主要牲畜类型牛、羊指代牲畜量, 参考FAO畜牧业用水量标准按每头牛 27 L/d、每只羊 5 L/d 计算<sup>④</sup>。生活用水子系统依据城乡差异, 设置不同的人均用水定额, 并加入人口增长率、城市化率, 确保合理计算生活用水量。工业用水子系统主要通过工业产值及单位工业产值耗水量来估算工业用水量, 区分不同国家间工业产值增长率、单位工业产值耗水量。模型主要参数及方程见表3。

表3 SD模型主要参数及方程  
Tab. 3 Main parameters and equations in the SD model

变量	单位	方程
人口	千人	人口=INTEG(人口增长量, 人口初始值)
人口增长量	千人	人口增长量=人口×人口增长率/1000
生活用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	生活用水量=(农村人口×农村居民用水定额+城市人口×城市居民用水定额)/1000
工业产值	10 <sup>6</sup> 美元	工业产值=INTEG(工业产值增长量, 工业产值初始值)
工业用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	工业用水量=工业产值×单位工业产值耗水量/1000
牲畜头数	千头	牲畜头数=INTEG(牲畜增长量, 牲畜初始值)
畜牧业用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	畜牧业用水量=(牛数量×牛用水定额+羊数量×羊用水定额)/1000
灌溉面积	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	灌溉面积=INTEG(灌溉面积增长量, 灌溉面积初始值)
种植业用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	种植业用水量=[(谷物面积+果林面积+其他农作物面积)×灌溉面积比例×灌溉定额+棉花面积×灌溉定额×1.2]/1000
灌溉量	m <sup>3</sup>	灌溉量=(每公顷灌溉量+供水变化量)×灌溉系数
水库用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	水库用水量=水库面积×蒸发量+水库蓄容量+水库泄洪量
可用水量	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	可用水量=径流量-入湖水量
缺水系数	%	缺水系数=总用水量/供水量×100%

**2.3.2 模型参数率定** 依据1980—2010年中亚5国总用水量及生活用水、工业用水占比, 结合人口、工业产值计算居民生活用水定额和单位工业产值耗水量。经计算, 中亚5国居民生活用水定额约为每人 93~98 m<sup>3</sup>/a, 国家间无明显差异。考虑到城市居民生活用水定额略高于农村, 本模型统一采用城市居民每人 105 m<sup>3</sup>/a、农村居民每人 95 m<sup>3</sup>/a 作为生活用水定额。中亚5国单位工业产值耗水量通过工业用水量除以工业产值计算。对各国单位工业产值耗水量进行拟合, 选取拟合效果最佳的对数拟合(表4)作为模型1960—2016年咸海流域各国单位工业产值耗水量输入参数。

本模型中对种植业用水量的计算基于种植面积, 但种植面积并不等于灌溉面积, 需要通过灌溉面积比例将种植面积换算为灌溉面积(表5)。

**2.3.3 预测情景设计** 以2016年为基准年, 对咸海流域社会经济用水进行模拟分析。模拟步长为1 a, 模拟时间为2016—2030年。考虑咸海流域社会经济

表4 单位工业产值耗水量计算(m<sup>3</sup>/千美元)

Tab. 4 Calculation of water consumption per unit of the industrial output value (m<sup>3</sup>/10<sup>3</sup> USD)

国家	单位工业产值耗水量拟合函数	判定系数
哈萨克斯坦	$y = -97.85 \ln(x-1959)+428.32$	$R^2 = 0.93$
吉尔吉斯斯坦	$y = -313.6 \ln(x-1959)+1269.5$	$R^2 = 0.98$
塔吉克斯坦	$y = -115.1 \ln(x-1959)+534.63$	$R^2 = 0.92$
土库曼斯坦	$y = -174.8 \ln(x-1959)+792.07$	$R^2 = 0.95$
乌兹别克斯坦	$y = -99.06 \ln(x-1959)+412.61$	$R^2 = 0.97$

④ FAO. Water use of livestock production systems and supply chains: Guidelines for assessment. 2018.

表 5 咸海流域灌溉面积比例  
Tab. 5 Irrigation area ratio in the Aral Sea Basin

国家	种植面积( $10^3\text{ hm}^2$ )			灌溉面积( $10^3\text{ hm}^2$ )			灌溉面积比例		
	1960	2000	2010	1962	2000	2010	1960	2000	2010
哈萨克斯坦	28561	16195	21438	1145	3556	3556	0.04	0.22	0.17
哈国咸海流域部分	951	701	858				0.80	0.90	1.00
吉尔吉斯斯坦	1196	1212	1146	875	978	978	0.73	0.81	0.85
塔吉克斯坦	724	864	839	418	719	722	0.58	0.83	0.86
土库曼斯坦	446	1484	1561	450	1800	1800	1.00	1.00	1.00
乌兹别克斯坦	3149	3778	3708	2568	4223	4223	0.82	1.00	1.00

用水以农业灌溉用水为主，灌溉面积及灌溉定额决定了灌溉用水总量，因此本文分两种假设考虑咸海流域社会经济用水变化，一种假设是流域内 5 国农作物种植面积持续扩张，至 2030 年达到各国历史最高水平（土库曼斯坦除外，因土库曼斯坦的农作物种植面积保持持续扩张，因此对土库曼斯坦农作物种植面积增长率的设定参考邻近国家乌兹别克斯坦），即情景 S1~S5；另一种假设是流域内农作物种植面积不变，维持现状，即情景 S6~S10。在这 2 种假设情景下分别考虑无滴灌与 2016—2030 年咸海流域各国滴灌普及率由低及高不同水平下社会经济用水量的变化，共计 10 个预测情景（表 6）<sup>⑤</sup>。考虑到水资源较丰富的上游国家吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦与下游的哈萨克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦在水资源紧缺程度与经济发展水平等方面存在差异，因此在 S1~S10 中设定吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的滴灌普及率均比其他 3 国低 10%。每公顷滴灌用水量参考新疆地区平均滴灌水平（ $5000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ），同时考虑中亚地区实际情形，最终选择设置为  $6000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，未实施滴灌地区仍保持原有灌溉量不变。

表 6 咸海流域各国社会经济用水系统预测情景及参数  
Tab. 6 Forecast scenarios and parameters of the socio-economic water use system in the Aral Sea Basin

情景参数	哈萨克斯坦		吉尔吉斯斯坦		塔吉克斯坦		土库曼斯坦		乌兹别克斯坦		
	2016	2030	2016	2030	2016	2030	2016	2030	2016	2030	
人口增长率(‰)	13	7	15	9	22	15	17	10	15	8	
GDP增长率(%)	1.1	4.4	3.8	3.5	6.9	5.0	6.2	6.2	7.8	5.5	
农作物种植面积增长率(%)	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	1	1	1	1	
滴灌普及率(%)	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	S2	0	20	0	10	0	10	0	20	0	20
	S3	0	30	0	20	0	20	0	30	0	30
	S4	0	50	0	40	0	40	0	50	0	50
	S5	0	70	0	60	0	60	0	70	0	70
	S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S7	0	20	0	10	0	10	0	20	0	20
	S8	0	30	0	20	0	20	0	30	0	30
	S9	0	50	0	40	0	40	0	50	0	50
	S10	0	70	0	60	0	60	0	70	0	70

⑤ 滴灌普及率的设定参考了节水灌溉技术处于较高水平且同为干旱区的中国新疆地区。统计资料显示，新疆地方系统滴灌普及率约 55%（2011 年），农田管理水平更高的兵团系统滴灌普及率达到了 71%（2016 年），因此本文选取 50%、70% 设定滴灌普及率，而考虑到在咸海流域普及滴灌相对困难，要在 10 年内达到新疆标准属于理想情景，因此同时选取较容易实现的 20%、30% 滴灌普及率作为参考。



人口增长率的设定参考联合国2017年修订的世界人口预测的中等发展情景<sup>⑥</sup>, 同时依据美国丹佛大学的全球综合评价模型(International Futures, IFs)<sup>⑦</sup>对中亚5国GDP的预测设置经济发展速度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 1960—2016年咸海流域社会经济发展分析

1960—2016年咸海流域人口总体呈快速增长趋势(图3a)。1960—2016年咸海流域人口由1424.4万增长至5233.1万, 年均增长率23.5‰。乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦分别占咸海流域人口的60.3%、16.3%、9.9%、6.8%、6.6%(2016年)。咸海流域以农村人口为主, 其中塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦农村人口占比均为74%, 其余3国农村人口比例相对较低, 但也在50%~65%之间。

1960—2016年咸海流域农作物种植面积由571.2万 $\text{hm}^2$ 增长至776.5万 $\text{hm}^2$ , 增幅35%(图3b)。哈萨克斯坦在苏联解体后农作物种植面积急剧下降, 该国2000年农作物种植面积仅为1990年的51%, 2000年以后农作物种植面积略有回升。乌兹别克斯坦1960—1990

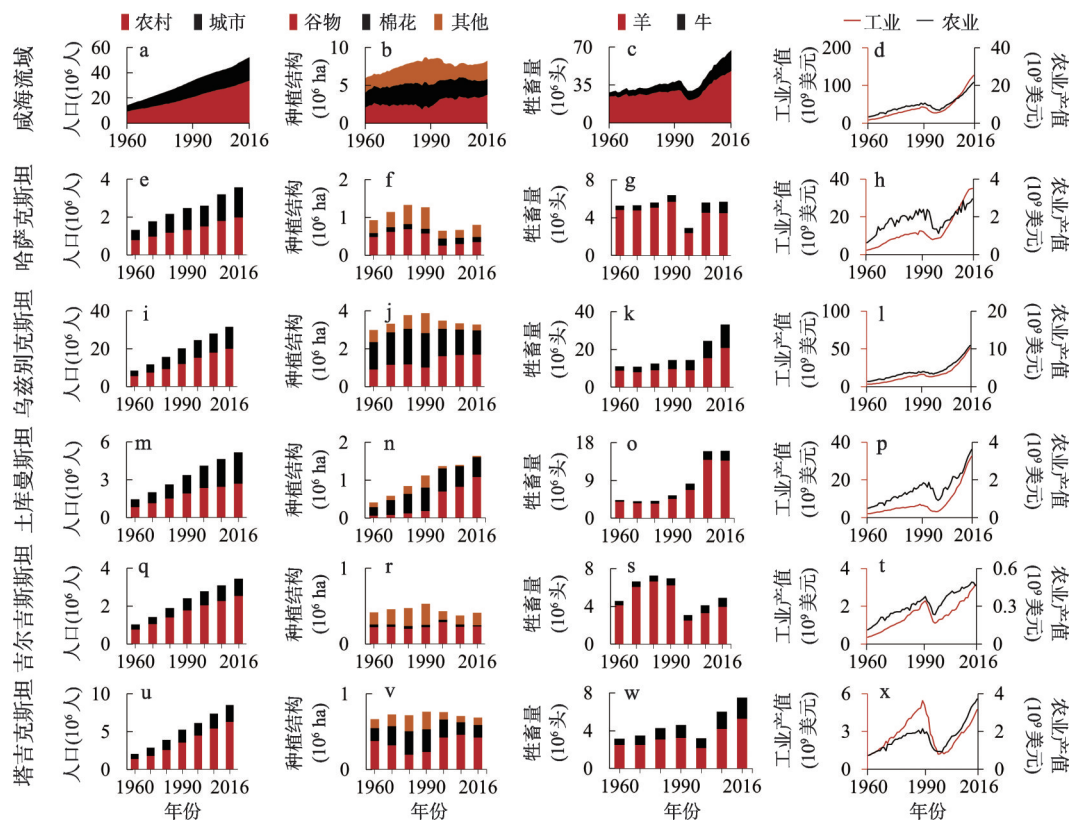


图3 1960—2016年咸海流域及各国的人口、种植结构、牲畜量和工农业产值变化

Fig. 3 The changes of each country in the Aral Sea Basin from 1960 to 2016 including population, cropland structure, livestock, and output value of industry and agriculture

⑥ World Population Prospects: The 2017 Revision, <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population>.

⑦ <http://www.ifs.du.edu>.

年农作物种植面积呈增长趋势(增幅29%),而1990—2016年呈减少趋势(减少15%)。1960—2016年土库曼斯坦农作物种植面积整体呈上升趋势,是咸海流域农作物种植面积增幅最大的国家(增幅298.3%)。吉尔吉斯斯坦农作物种植面积在1960—1990年间增加了26%,1990—2016年间减少21.6%。塔吉克斯坦农作物种植面积在1960—1990年间增加了14.8%,1990—2016年间减少9.7%。除农作物种植面积变化外,1960—2016年间咸海流域的种植结构也发生了显著变化。1960—1990年整个流域内棉花种植面积增加(增幅46.4%),1990—2016年棉花种植面积呈减少趋势(减少27%)。1960—1990年间谷物种植面积仅增加7.7%,而在1990—2016年谷物种植面积增幅达到70.6%。

咸海流域的牲畜量在1960—1992年间增加38.6%,1992—1997年间减少25%,1997—2016年间增加128%(图3c)。乌兹别克斯坦、土库曼斯坦的牲畜量在1960—1990年间分别增加30.8%、25%,苏联解体后未见明显下滑,在2002—2016年间乌兹别克斯坦牛、羊的年均增长率均达到6%,在1998—2016年间土库曼斯坦牛、羊的年均增长率分别达到4.4%、5.4%;哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦的牲畜量在1960—1990年间分别增加21.4%、52.3%、45%,苏联解体后牲畜量明显减少,1990—2000年间3国牲畜量分别减少54%、55.8%、30%,2000—2016年间恢复增长,增长幅度分别为94%、59%、133%。

尽管各国的各阶段时间节点不同,咸海流域内各国的GDP(工业产值与农业产值之和)均经历了增长、下滑、恢复3个阶段(图3d)。就整个流域而言,1960—1988年间GDP增长328.5%,1988—1996年间GDP减少35%,1997年起GDP开始恢复增长,1996—2016年间GDP增加328%(年均增长率7.5%)。2000年以来咸海流域的工农业产值均呈快速增长趋势,工业产值(年均增长率8.6%)增长速度高于农业产值(年均增长率6.2%)。苏联解体前,GDP增幅最大的是吉尔吉斯斯坦(433%);在下滑阶段,塔吉克斯坦的GDP下滑幅度最大(71.7%),哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦的GDP下滑幅度分别为37%、18.8%、53.8%、47.5%;2000年以来咸海流域各国的GDP均恢复增长,土库曼斯坦的增长速度最快(年均增长率12%),哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦的年均增长率分别为7.6%、7.3%、4.4%、7.7%。对比各国工业产值和农业产值,哈萨克斯坦的农业产值在解体后下滑幅度高于工业,原因是哈萨克斯坦在苏联解体后农作物种植面积大幅缩减、牲畜量急剧减少;在下滑阶段,塔吉克斯坦的工业产值下滑幅度大于农业,与该国独立后爆发内战(1992—1997年)密切相关。

### 3.2 SD模型验证

社会经济要素的仿真模拟是社会经济用水模拟与预测的基础,通过已构建SD模型对咸海流域社会经济要素进行模拟与验证。验证社会经济要素包括:人口、工业产值、牲畜量、农作物种植面积。历史数据与模拟结果拟合的相对误差均小于10%(图4a),因此本模型能较为真实地模拟咸海流域各国社会经济要素。

为保证社会经济用水模拟结果可靠,除社会经济要素以外,还需对子流域的用水量进行验证。本文选取阿姆河、锡尔河上游出山水文站径流量与入湖水量的差值作为各子流域中下游实际用水量的观测值。其中,阿姆河径流量数据来自上游出山口的Kelifz站、入湖水量数据来自该河流下游三角洲的Samanbay站;锡尔河径流量数据来自上游出山口的Uchkugran站、入湖水量数据来自该河流下游三角洲的Kazalinsk站。模拟值为SD模型模拟的2个子流域中下游总用水量,除生产生活用水外还包括水库蓄容、泄洪水量。

锡尔河、阿姆河模拟值与实测值 $R^2$ 分别为0.78、0.85,均方根误差(RMSE)分别为3.0和4.2(图4b~4c)。用水量模拟结果可以判定该模型具有良好的模拟效果及系统稳定性。

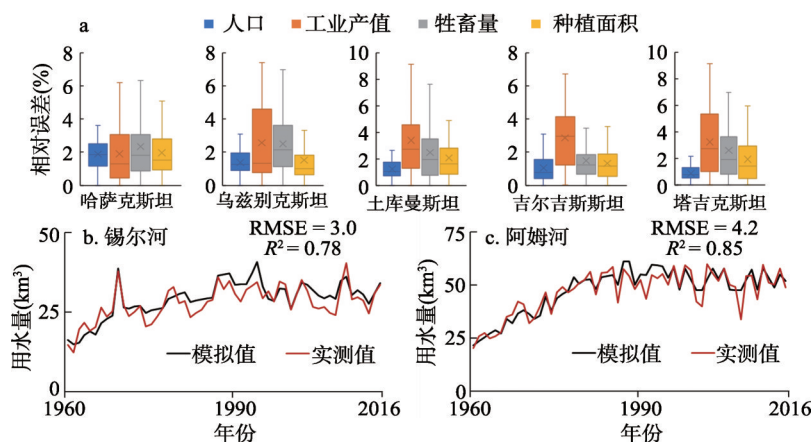


图4 咸海流域各国社会经济要素模拟结果与统计数据的相对误差及锡尔河和阿姆河子流域的用水量模拟值与观测值对比

Fig. 4 The relative error between the simulation results and statistical data of social and economic factors in the Aral Sea Basin, and comparison of simulated and observed values of water use in the Syr Darya and Amu Darya subbasins

### 3.3 基于SD模型的1960—2016年社会经济用水分析

本文从模拟的咸海流域社会经济用水量、农业灌溉定额、农业用水效益、工业用水效益4个方面(图5)对1960—2016年咸海流域社会经济用水总量、用水结构、用水效益进行分析。对咸海流域各国1960—2016年社会经济用水量时间序列做MK趋势检验,在0.05置信水平上,1960—1994年咸海流域社会经济用水量上升趋势明显,1994年以后无明显变化趋势,至2016年咸海流域社会经济用水量为910亿 $\text{m}^3$ 。哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦1960—1994年社会经济用水量持续增加,1995—2016年社会经济用水量减少(主要是农业用水量减少)。吉尔吉斯斯坦在1960—1973年社会经济用水量持续增加,1974—2016年相对稳定。土库曼斯坦、塔吉克斯坦1960—2016年社会经济用水量呈持续增长趋势。整个流域与流域内各国的用水结构相似,农业用水占比从1960年的94%降至2016年的86.9%,生活用水占比从1960年的3.4%增至2016年的5.9%,工业用水占比在苏联解体后一段时间内随经济下滑一度减少,但总体呈上升趋势(图5a)。

就整个咸海流域而言,1960—2000年灌溉定额呈增加趋势,2000—2016年灌溉定额开始减少(图5b)。咸海流域各国灌溉定额变化存在差异,1960—2016年土库曼斯坦( $12961 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )和乌兹别克斯坦( $12332 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )的灌溉定额明显高于塔吉克斯坦( $8411 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )、吉尔吉斯斯坦( $7634 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )和哈萨克斯坦( $8657 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )。对各国灌溉定额做MK趋势检验,结果表明虽然各国灌溉定额变化的节点时间略有差异,但基本都在苏联解体前增加,解体后减少。灌溉定额变化的节点时间较早的出现在土库曼斯坦(1989年);较晚出现在乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦(分别为1996年和1994年)。哈萨克斯坦的灌溉定额在2005以前保持稳定,之后呈减少趋势。吉尔吉斯斯坦灌溉定额1960—1973年呈增加趋势,之后则无明显变化趋势。

咸海流域各国的用水效益(工业用水效益加农业用水效益)总体处于较低水平,2016年仅为0.9~5美元/ $\text{m}^3$ ,同期世界平均用水效益<sup>⑧</sup>约10美元/ $\text{m}^3$ ,发达的北美地区用水效益约40美元/ $\text{m}^3$ ,发展滞后的非洲撒哈拉地区用水效益约5美元/ $\text{m}^3$ ,与咸海流域相邻

⑧ 参考地区用水效益数据来自世界银行:<https://data.worldbank.org/indicator/ER.GDP.FWTL.M3.KD?page=4>。



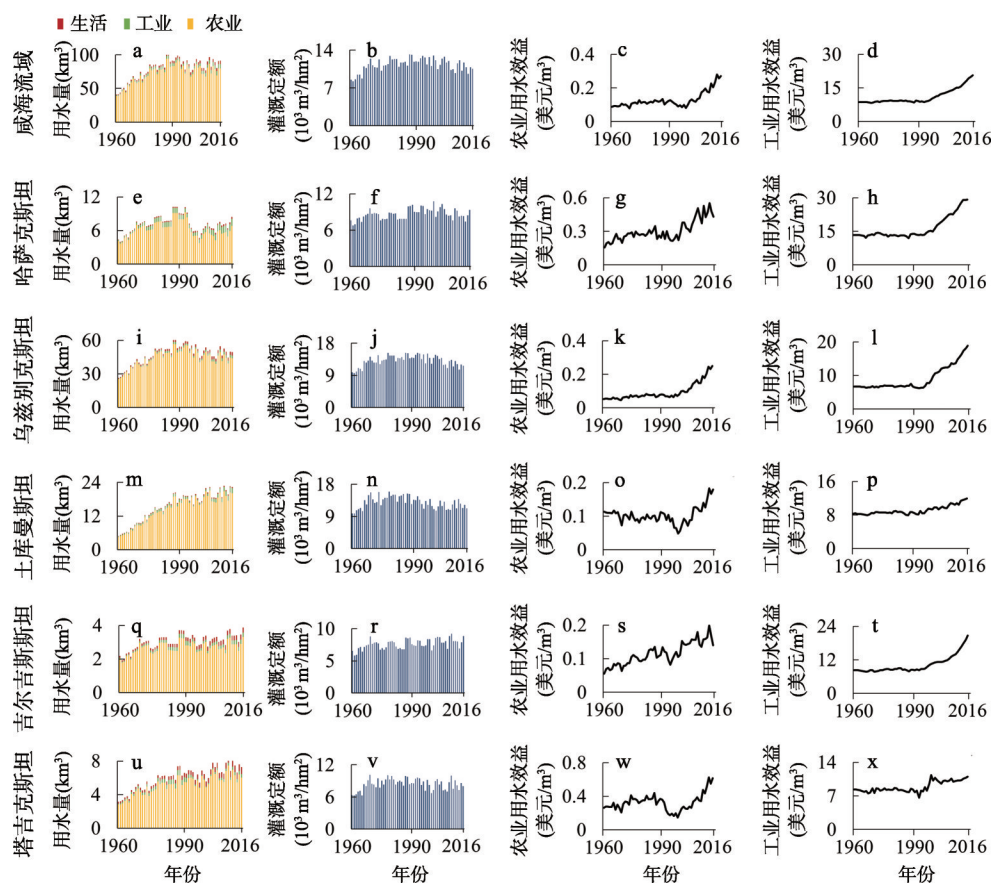


图5 1960—2016年咸海流域社会经济用水、灌溉定额、农业用水效益和工业用水效益分析

Fig. 5 Analysis of socio-economic water use, irrigation quota, agricultural water productivity, industrial water productivity in the Aral Sea Basin from 1960 to 2016

的中国用水效益 15 美元/ $\text{m}^3$ ，俄罗斯 27.7 美元/ $\text{m}^3$ 。1960—2016 年哈萨克斯坦用水效益明显高于其余 4 国。从整个咸海流域的用水效益变化来看，1960—2003 年相对平稳，始终低于 0.6 美元/ $\text{m}^3$ ，而在 2004—2016 年期间用水效益呈显著增长趋势，2016 年已达到 1.6 美元/ $\text{m}^3$ 。就农业用水与工业用水两部分而言，整个咸海流域的农业用水效益（图 5c）、工业用水效益（图 5d）分别为 0.3 美元/ $\text{m}^3$ 、20.7 美元/ $\text{m}^3$ （2016 年），工业用水效益远大于农业用水效益。1960 年至苏联解体前，土库曼斯坦农业用水效益呈减少趋势，其余 4 国农业用水效益有所增加但增幅相对较小，1998 年起流域内 5 国农业用水效益均呈显著增长趋势。1960 年至苏联解体前咸海流域各国的工业用水效益保持平稳，自 1992 年起哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦的工业用水效益增长较快，而土库曼斯坦、塔吉克斯坦的工业用水效益增长相对缓慢。从用水效益的分析结果可知，咸海流域的用水效益有很大提升潜力，用水效率亟待提高，应合理调整产业结构，增加用水效益较高的工业用水所占比重，同时注重提高农业用水效益。

### 3.4 基于 SD 模型的 2016—2030 年社会经济用水预测

依据联合国人口预测中等发展情景，至 2030 年咸海流域人口增长至 62976.9 万人，较 2016 年增长 20.3%。依据 IFs 对中亚 5 国经济发展速度的预测，至 2030 年咸海流域 GDP 较 2016 年增加 115%。工业、生活用水量必然增加，因此只能通过提高工业用水效



率、提倡生活节水等方法降低用水量增长幅度。农业是咸海流域社会经济用水主要部门, 农业用水主要用于灌溉, 只有减少灌溉用水才能有效缓解咸海流域用水紧张局面。本文考虑在农作物种植面积扩张和农作物种植面积不变的2种假设下, 通过调节滴灌普及率来降低用水量(图6)。

假设咸海流域农作物种植面积持续扩张, 在S1情景下(无滴灌), 2030年咸海流域社会经济用水量达962亿 $\text{m}^3$ , 较2016年增加52亿 $\text{m}^3$ , 若按此方案发

展, 咸海无法获取径流补给, 地下水开采量扩大, 在可预见范围内水资源供给不可持续。在S2~S5情景下社会经济用水总量分别达924亿 $\text{m}^3$ 、870亿 $\text{m}^3$ 、788亿 $\text{m}^3$ 、710亿 $\text{m}^3$ 。对于咸海流域内各国而言, S5情景较S1情景, 仅2030年吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、哈萨克斯坦可分别节水4亿 $\text{m}^3$ 、12亿 $\text{m}^3$ 、14亿 $\text{m}^3$ , 乌兹别克斯坦、土库曼斯坦可分别节水126亿 $\text{m}^3$ 、69亿 $\text{m}^3$ 。

假设咸海流域农作物种植面积不变, 在S6情景下(无滴灌), 2030年整个咸海流域社会经济用水量为941亿 $\text{m}^3$ ; 在S7~S10情景下社会经济用水量分别为867亿 $\text{m}^3$ 、834亿 $\text{m}^3$ 、755亿 $\text{m}^3$ 、681亿 $\text{m}^3$ 。由模拟结果可知, 若想实现2030年咸海流域社会经济用水总量低于现状, 滴灌普及率需高于20%。对于流域内各国而言, S10情景较S6情景, 仅2030年吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、哈萨克斯坦可分别节水4亿 $\text{m}^3$ 、13亿 $\text{m}^3$ 、18亿 $\text{m}^3$ , 乌兹别克斯坦、土库曼斯坦可分别节水142亿 $\text{m}^3$ 、77亿 $\text{m}^3$ 。

对比2种假设的10种预测情景, 按2030年咸海流域社会经济用水量由低到高排序:  $S10 < S5 < S9 < S4 < S8 < S7 < S3 < S2 < S6 < S1$ 。2030年S10情景将比S1情景节水281亿 $\text{m}^3$ 。由预测情景可知, 在农作物种植面积持续扩张条件下, 滴灌普及率越高, 灌溉用水量越低, 社会经济用水量随之降低。在农作物种植面积占有量大的乌兹别克斯坦、土库曼斯坦推广滴灌具有重要意义, 在70%的滴灌普及率条件下, 可为这2个国家分别节约28%、33%的社会经济用水量。对比农作物种植面积持续扩张与农作物种植面积保持不变2种假设, 控制农作物种植面积扩张对于咸海流域节水亦具有重要意义。咸海流域农业节水需从提高滴灌普及率和控制农作物种植面积扩张两方面着手。

### 3.5 讨论

将1960—2016年咸海流域社会经济用水量模拟结果与咸海面积<sup>⑨</sup>、入湖水量对比发现: 1960—1991年社会经济用水量与咸海面积呈显著负相关, 相关系数达到-0.93, 1991年的入湖水量相比1960年减少了72%; 1991—2016年咸海流域社会经济用水量、入湖水量相对稳定, 但咸海面积持续萎缩(图7)。基于过去社会经济用水量和咸海面积的变化, 可以推测在未来供水不增加情景下, 若不减少社会经济用水量、增加入湖水量, 咸海(主要指南咸海部分)可能消失。基于本文对咸海流域社会经济用水的预测, 在咸海流域滴灌普及率达到高水平时(70%), 可节水281亿 $\text{m}^3$ (2030年), 即上游来水量稳定

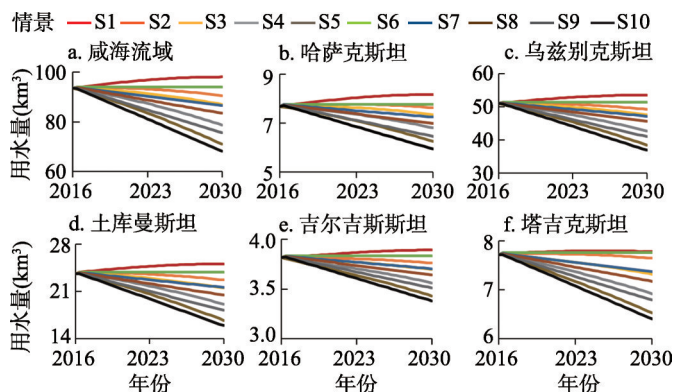


图6 2016—2030年咸海流域社会经济用水量预测  
Fig. 6 Forecast of socio-economic water use in the Aral Sea Basin from 2016 to 2030 under the ten hypotheses

⑨ 咸海面积数据来自 ICWC: [http://cawater-info.net/aral/data/index\\_e.htm](http://cawater-info.net/aral/data/index_e.htm)。

前提下,通过在该流域推广滴灌可为咸海入湖水量增加 281 亿  $\text{m}^3$ ,而当咸海入湖水量增加 281 亿  $\text{m}^3$  时,咸海大约可恢复至 90 年代初面积。

## 4 结论

咸海流域各国特殊的历史背景与实际情况造成该区域统计数据时空不连续和不一致,导致目前咸海流域长时序社会经济用水研究存在不足。针对此问题,本文在建立 1960—2016 年咸海流域社会经济及水土资源利用空间数据集的基础上,构建系统动力学仿真模型,充分考虑工业、农业、人口等社会经济部门和要素,以州为统计对象,以流域内各国为分析单元,首次对咸海流域进行了全流域、长时序的社会经济用水时空变化分析,对咸海流域社会经济和用水进行历史仿真模拟与未来情景预测,得到以下结论:

(1) 1991 年苏联解体后,咸海流域的中亚国家经济普遍下滑,表现为工业产值下降、牲畜量减少、农作物种植面积缩减、种植结构变化(谷物面积增加、棉花面积缩减)。

(2) 在 1960—1994 年咸海流域水资源大规模开发时期,社会经济用水量大幅增长(增幅 135%),同时期,两河入湖水量急剧减少(减少 72%),咸海补给水量大幅减少。咸海流域社会经济用水主要部门为农业,占该流域社会经济用水量的 85%,农业用水占比呈逐渐下降趋势。虽然生活和工业用水占比小,但总体呈上升趋势,由 1960 年的 7% 增长至 2016 年的 15%。

(3) 咸海流域各国用水效益普遍较低,其中用水效益最高的哈萨克斯坦也明显低于周边国家(中国、俄罗斯)。工业用水效益是农业用水效益的数十倍,因此调整产业结构,提高工业占比,将水资源从用水效益较低的农业部门转移到工业部门,有利于提高总体用水效益。

(4) 未来咸海流域用水紧张状况不断加剧,工业用水、生活用水呈增长趋势。控制咸海流域社会经济用水量的增加主要依靠减少农业用水的途径实现。提高农民节水意识,通过相关政策改进以漫灌、沟灌为主的灌溉方式,推进滴灌普及的同时控制农作物种植面积的扩张可有效减少农业用水量。2030 年咸海流域滴灌普及率达到 70%、农作物种植面积不变的情景下(S10),相较无滴灌且种植面积持续扩张情景(S1),咸海流域可节水 281 亿  $\text{m}^3$ ,节约的水资源可以被生态环境所利用,进而有效缓解咸海生态危机。

本文对咸海流域未来社会经济用水的情景预测尚存在一定不确定性。咸海流域一直沿用传统灌溉方式,短时期内(10 年)在该地区全面推广滴灌的可行性还需进一步评估。对未来的情境预测仅考虑农作物种植面积变化,而伴随人口增长及粮食自给的需求,未来咸海流域种植结构很可能发生变化,种植结构变化对农业用水的影响尚需探讨。此外,咸海流域的社会经济用水量受供水影响较大,上游河流径流量的丰枯直接影响农业灌溉定额,将水文模型与本模型结合考虑未来供水变化情景下社会经济用水变化是本文的下一步研究方向。要深入探究咸海流域水资源利用状况,生态环境用水也是必不可少的一部分,在以后的研究中考虑增加该部分。

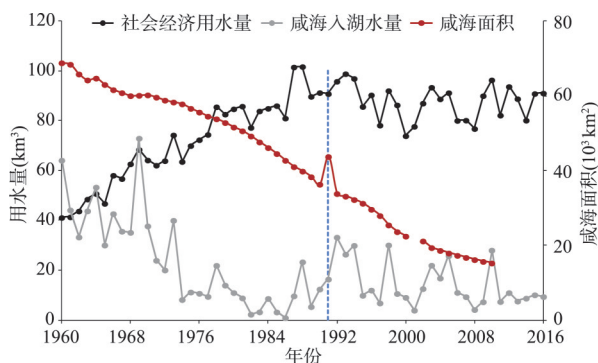


图7 1960—2016年咸海流域社会经济用水量变化与咸海面积、入湖水量对比

Fig. 7 The comparison between the socio-economic water consumption change in the Aral Sea Basin and the area of the Aral Sea and the amount of water entering the lake from 1960 to 2016

## 参考文献(References)

- [1] Cheng Guodong, Zhao Chuanyan. An integrated study of ecological and hydrological processes in the inland river basin of the arid region, China. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(10): 1005-1012. [程国栋, 赵传燕. 干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究. *地球科学进展*, 2008, 23(10): 1005-1012.]
- [2] Sorg A, Mosello B, Shalpykova G, et al. Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia. *Environmental Science & Policy*, 2014, 43(SI): 68-77.
- [3] Yu Y, Pi Y Y, Yu X, et al. Climate change, water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(1): 1-14.
- [4] Ablekim Abdimijit, Ge Yongxiao, Wang Yajun, et al. The past, present and future of the Aral Sea. *Arid Zone Research*, 2019, 36(1): 7-18. [阿布都米吉提·阿布力克木, 葛拥晓, 王亚俊, 等. 咸海过去、现在与未来. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 7-18.]
- [5] Tian Xiangrong, Wang Guoyi, Fan Yanfang. Aral Sea basin transboundary water cooperation: History, present situation and reflections. *Journal of Boundary and Ocean Studies*, 2017, 2(6): 90-104. [田向荣, 王国义, 樊彦芳. 咸海流域跨界水合作历史、形势及思考. *边界与海洋研究*, 2017, 2(6): 90-104.]
- [6] Chen Y N, Li Z, Fang G H, et al. Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(10): 5059-5069.
- [7] Abdullaev I, Rakhmatullaev S. Transformation of water management in Central Asia: From state-centric, hydraulic mission to socio-political control. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 849-861.
- [8] Veldwisch G J A, Mollinga P P. Lost in transition? The introduction of water users associations in Uzbekistan. *Water International*, 2013, 38(6): 758-773.
- [9] Zinzani A. Irrigation management transfer and WUAs' dynamics: Evidence from the South-Kazakhstan province. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 765-777.
- [10] Kulmatov R, Rasulov A, Kulmatova D, et al. The modern problems of sustainable use and management of irrigated lands on the example of the Bukhara region (Uzbekistan). *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7(12): 956-971.
- [11] Kulmatov R, Groll M, Rasulov A, et al. Status quo and present challenges of the sustainable use and management of water and land resources in Central Asian irrigation zones: The example of the Navoi region (Uzbekistan). *Quaternary International*, 2018, 464: 396-410.
- [12] Lee S O, Jung Y. Efficiency of water use and its implications for a water-food nexus in the Aral Sea basin. *Agricultural Water Management*, 2018, 207: 80-90.
- [13] Thevs N, Ovezmuradov K, Zanjani L V, et al. Water consumption of agriculture and natural ecosystems at the Amu Darya in Lebap province, Turkmenistan. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 731-741.
- [14] Teasley R L, McKinney D C. Calculating the benefits of transboundary river basin cooperation: Syr Darya basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137(6): 481-490.
- [15] Elhance A P. Conflict and cooperation over water in the Aral Sea Basin. *Studies in Conflict & Terrorism*, 1997, 20(2): 207-218.
- [16] Murthy S L, Mendikulova F. Water, conflict, and cooperation in Central Asia: The role of international law and diplomacy. *Vermont Journal of Environmental Law*, 2017, 18(3): 400-454.
- [17] Granit J, Jgerskog A, Lindström A, et al. Regional options for addressing the water, energy and food nexus in Central Asia and the Aral Sea Basin. *International Journal of Water Resources Development*, 2012, 28(3): 419-432.
- [18] Groll M, Opp C, Kulmatov R, et al. Water quality, potential conflicts and solutions: An upstream-downstream analysis of the transnational Zarafshan River (Tajikistan, Uzbekistan). *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 743-763.
- [19] Karthe D, Abdullaev I, Boldgiv B, et al. Water in Central Asia: An integrated assessment for science-based management. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(20). DOI: 10.1007/s12665-017-6994-x.
- [20] Micklin P. The past, present, and future Aral Sea. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2010, 15(3): 193-213.
- [21] Aus der Beek T A, Voß F, Flörke M. Modelling the impact of global change on the hydrological system of the Aral Sea basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, 36(13): 684-695.
- [22] Conrad C, Schorcht G, Tischbein B, et al. Agro-Meteorological trends of recent climate development in Khorezm and implications for crop production//Martius C, Rudenko I, Lamers J P A, et al. *Cotton, Water, Salts and Soums*. Dordrecht: Springer, 2012: 25-36.

- [23] Olsson O, Bauer M, Ikramova M, et al. The role of the Amu Darya dams and reservoirs in future water supply in the Amu Darya basin//Qi J, Evered K T. Environmental Problems of Central Asia and Their Economic, Social and Security Impacts. Dordrecht: Springer, 2008: 277-292.
- [24] Rakhmatullaev S, Huneau F, Kazbekov J, et al. Groundwater resources of Uzbekistan: An environmental and operational overview. Open Geosciences, 2012, 4(1): 67-80.
- [25] Abdullaev I. Effects of large scale irrigation on drinking water quality in the Bukhara and Kashkadarya provinces of Uzbekistan. Water International, 2002, 27(2): 266-270.
- [26] Yu Changqia. Handbook of the Five Central Asian Countries. Urumqi: Xinjiang Science, Technology and Health Press, 1992. [于长千. 中亚五国手册. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1992.]
- [27] Lerman Z, Sedik D. Transition to smallholder agriculture in Central Asia. Journal of Agrarian Change, 2018, 18(4): 904-912.
- [28] Duyunov I. Measures to increase the efficiency of irrigated lands in Kyrgyzstan//Bos M G. The Inter-Relationship between Irrigation, Drainage and the Environment in the Aral Sea Basin. Netherlands: Springer, 1996: 125-128.
- [29] Shirokova Y I, Morozov A N. About ways for improvement of water use in irrigation of Uzbekistan//Pahl- Wostl C, Kabat P, Möltgen J. Adaptive and Integrated Water Management: Coping with Complexity and Uncertainty. Netherlands: Springer, 1996: 357-379.
- [30] Scott J, Rosen M R, Saito L, et al. The influence of irrigation water on the hydrology and lake water budgets of two small arid-climate lakes in Khorezm, Uzbekistan. Journal of Hydrology, 2011, 410(1/2): 114-125.
- [31] Ospanbayev Z O, Kurmanbayeva M S, Abdukadirova Z A, et al. Water use efficiency of rice and soybean under drip irrigation with mulch in the south-east of Kazakhstan. Applied Ecology and Environmental Research, 2017, 15(4): 1581-1603.
- [32] Information Office of Central Asia Research Institute, Xinjiang Academy of Social Sciences. A Compilation of Economic Statistics of Five Central Asian Republics of the Soviet Union. Urumqi: 1983. [新疆社会科学院中亚研究所资料情报室. 苏联中亚5个加盟共和国经济统计资料汇编. 乌鲁木齐: 新疆社会科学院, 1983.]
- [33] Cai X M, McKinney D C, Rosegrant M W. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. Agricultural Systems, 2003, 76(3): 1043-1066.
- [34] Cretaux J F, Letolle R, Berge-Nguyen M. History of Aral Sea level variability and current scientific debates. Global and Planetary Change, 2013, 110: 99-113.
- [35] Li Wei. Study on theory and method of water use drivers by economic and societal changes: A structural decomposition analysis [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2018. [李伟. 社会经济驱动用水的理论与方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.]
- [36] Xiong Ying, Li Jingzhi, Jiang Dingling. Optimized decision-making of water resources supply and demand system in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on the analog simulation. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1225-1239. [熊鹰, 李静芝, 蒋丁玲. 基于仿真模拟的长株潭城市群水资源供需系统决策优化. 地理学报, 2013, 68(9): 1225-1239.]
- [37] Zomorodian M, Lai S H, Homayounfar M, et al. The state-of-the-art system dynamics application in integrated water resources modeling. Journal of Environmental Management, 2018, 227: 294-304.
- [38] Gastelum J R, Krishnamurthy G, Ochoa N, et al. The use of system dynamics model to enhance integrated resources planning implementation. Water Resources Management, 2018, 32(7): 2247-2260.
- [39] Yang Z Y, Song J X, Cheng D D, et al. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an city, China. Journal of Environmental Management, 2019, 230: 221-233.
- [40] Gohari A, Mirchi A, Madani K. Erratum to: System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in Central Iran. Water Resources Management, 2017, 31(13): 4367-4368.
- [41] Ghasemi A, Saghaian B, Golian S. System dynamics approach for simulating water resources of an urban water system with emphasis on sustainability of groundwater. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(18). DOI: 10.1007/s12665-017-6887-z.
- [42] Huang Dengying, Yang Hong. Should water-saving animal husbandry be developed? An example from Xinjiang. Water Saving Irrigation, 2018(3): 77-78, 83. [黄登迎, 杨红. 应该发展节水型畜牧业吗? 来自新疆的例证. 节水灌溉, 2018(3): 77-78, 83.]



## Analysis and prediction of socio-economic water use in the Aral Sea Basin

LIU Shuang<sup>1,2</sup>, BAI Jie<sup>1</sup>, LUO Geping<sup>1,2</sup>, LYU Nana<sup>3</sup>, WU Miao<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Document and Information Center of Xinjiang Branch of Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Since 1960, water and land resource development in the Aral Sea Basin has led to a surge in socio-economic water consumption and resulted in about 50% shrinkage of the Aral Sea until 1990, which is also known as the Aral Sea Crisis. However, the spatial and temporal changes in socio-economic water consumption are still unclear. Based on the multi-source acquisition of Aral Sea Basin national/state water resource and socio-economic data during 1960-2016, this paper used the system dynamics model to simulate and analyze the characteristics of the socio-economic and water use changes in the Aral Sea Basin and forecasted the socio-economic water use in 2016-2030 under multi-scenarios. The population and GDP in the Aral Sea Basin increased rapidly, by 267% and 1100% respectively, during the study period. The socio-economic water consumption increased from 41 km<sup>3</sup> in 1960 to 91 km<sup>3</sup> in 2016. The socio-economic water consumption of Kazakhstan and Uzbekistan increased rapidly before the collapse of the Soviet Union, and decreased afterwards. The socio-economic water consumption in Turkmenistan and Tajikistan continued to grow in the past 60 years. The benefits of industrial and agricultural water use in the basin increased significantly after the collapse of the Soviet Union, but remained at a relatively low level. The future forecasts show that if the existing socio-economic water use efficiency and cropland continue to increase (S1), the socio-economic water consumption in the Aral Sea Basin will reach 96.2 km<sup>3</sup> by 2030. Under the S10 scenario that the drip irrigation penetration rate reaches 70% and the cropland remains unchanged, the socio-economic water consumption will drop to 68.1 km<sup>3</sup>, which can effectively alleviate the crisis in the study area.

**Keywords:** Aral Sea Basin; water resources; socio-economic water; system dynamics