

基于系统动力学的青铜峡灌区农业用水效率调控研究

贾易周^{1,2}, 刘子西¹, 唐莲^{1*}

(1.宁夏大学, 银川 750021; 2.黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000)

摘要:【目的】提出青铜峡灌区合理有效的节水政策。【方法】基于作物蒸发蒸腾量, 计算青铜峡灌区主要粮食作物的蓝水足迹、绿水足迹, 建立青铜峡灌区农业用水效率系统动力学模型, 研究青铜峡灌区内的农业用水效率, 对其水资源利用效率的可变影响因素进行调控。【结果】青铜峡灌区的农业种植需水来源主要是灌溉水, 形成了以蓝水为主、绿水为辅的生产用水格局, 同时当作物需水量被满足时, 蓝水足迹和绿水足迹表现出相反的变化趋势; 在保证青铜峡灌区内粮食作物蓝水用水量不变的前提下, 选取绿水利用系数和灌溉水利用系数为主要参数对模型进行仿真模拟, 当绿水利用系数从0.7增加为0.8时, 2020年小麦产量增加了0.27万t, 水稻产量增加了0.2万t, 玉米产量增加了0.55万t; 当灌溉水利用效率增加10%时, 2020年小麦产量增加了0.47万t, 水稻产量增加0.35万t, 玉米产量增加0.77万t; 当绿水利用系数和灌溉水利用系数同时增加时, 2020年小麦产量增加0.75万t, 水稻产量增加0.55万t, 玉米产量增加1.32万t。【结论】青铜峡灌区农业种植用水应增加对绿水的利用率, 通过各种工程或非工程措施提高灌区内的农业用水效率。

关键词: 水足迹; 系统动力学; 农业用水效率; 青铜峡灌区; 灌溉水利用系数

中图分类号: TV213

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022461

OSID:



贾易周, 刘子西, 唐莲. 基于系统动力学的青铜峡灌区农业用水效率调控研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 137-144.
JIA Yizhou, LIU Zixi, TANG Lian. Using System Dynamics to Improve Agricultural Water Use Efficiency in Qingtongxia Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 137-144.

0 引言

【研究意义】中国水资源严重短缺, 水资源不足是社会经济发展的瓶颈^[1], 农业节水战略对保障水安全与粮食安全问题至关重要。灌区灌溉节水是农业节水的重中之重。对灌区发展而言, 首要前提应是保障灌区生态环境健康, 重点发展高效节水灌溉技术的应用, 优化农业用水效率与提升作物品质^[2], 农业虚拟水战略的科学建立有利于解决我国水资源供需矛盾以及时空分布不均问题, 也是水资源可持续利用定量评价的基础^[3]。水足迹概念及其相关研究成果为全面评价农业用水效率提供了全新的方法。【研究进展】在以往对农业水足迹分析中, 大多数成果都集中在对作物水足迹的量化以及时空分布特征, 不能全面反映农业生产过程中对不同来源水资源依赖程度以及实际用水效率^[4]。能够给农业用水管理提供的有效建议不多, 随着基于水足迹的农业用水和节水评价研究的探索, 作物水足迹在农业用水效率评价中的优势正在

逐渐显现^[4-9]。采用水足迹的研究思路对灌区的作物生产用水进行合理评价, 明确作物对蓝水、绿水的消耗总量, 以及其调控策略, 有助于分析灌区主要粮食作物的用水形势, 实现水资源高效利用。而在气候变化和人工干预双重影响的背景下, 对水资源系统来说, 在评估现状的基础上预测未来的需水情势非常迫切。农业用水受气候变化、经济发展、科技进步等多种因素的影响, 系统动力学方法可研究多个因素对同一变量的影响, 通过建立不同的情景, 控制不同变量, 比较各因素的影响程度, 从而提出适应性管理策略。水足迹和系统动力学都是研究水资源优化问题的有效方法, 在研究过程中可以将二者有机结合, 能取得较好效果。王倩等^[10]基于系统动力学模型研究发现, 农业用水量主要受经济发展和科技进步调控策略的影响, 农业用水量对科学管理水资源的分配、提高灌溉水利用系数极其敏感; 王方剑^[11]构建了关中地区水足迹系统动力学方法仿真模型, 在设置的4种不同农业发展及用水模式中, 引入降水入渗和灌溉水利用系数作为关键调控因子, 实现关中地区水足迹预测; 黄会平等^[12]基于系统动力学模拟蓝水足迹、绿水足迹调控对农业水资源承载力变化影响, 通过工程技术手段同时提高绿水入渗系数及灌溉水利用效率, 结果表明蓝水、绿水资源的进一步有效利用能提高灌区粮食安全生产保障率。李新生^[13]构建京津冀农业生产系统动力

收稿日期: 2022-10-13

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC03093); 宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)项目(NXYLXK2021A03); 宁夏2018重点研发计划项目(2018BEG03008)

作者简介: 贾易周(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源调控研究。

E-mail: 287714265@qq.com

通信作者: 唐莲(1975-), 女, 教授, 主要从事旱区水资源调控理论及技术研究。E-mail: nxdxtl@126.com

学模型,探讨京津冀农业水资源管理中通过调控降水入渗系数及灌溉水利用系数,可以针对性地提出具体的调控措施,取得较好效果;刘宁^[14]则尝试从水足迹角度构建京津冀地区水资源配置系统动力学模型。以上研究表明,尝试将蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹引入降水入渗及灌溉水利用系数的研究,结合系统动力学模型构建,可针对农业水资源承载力、农业水资源管理等问题开展研究,实现预测与调控。【切入点】在以往的农业水足迹研究中,研究者重点分析了农作物水足迹及其空间的分布特征,对农业生产过程中的农业用水效率多关注蓝水足迹,针对蓝水、绿水综合调控的研究还不多见。

【拟解决的关键问题】本文综合考虑作物对灌溉水和降水的利用特征,从同时提高灌溉水资源(蓝水)和降水资源(绿水)利用效率出发,将水足迹研究与系统动力学模型相结合,首先明确青铜峡灌区农业生产对灌溉即降水资源的真实占用情况,进一步从蓝绿水综合角度探讨青铜峡灌区主要粮食作物农业用水效率的调控潜力,为提升青铜峡灌区的节水潜力,科学提高灌区内农作物的用水效率提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 研究区域

青铜峡灌区地处宁夏中北部,在行政区划上主要包括银川、石嘴山、吴忠3个地级市和青铜峡、利通区、灵武、永宁、银川郊区、贺兰、平罗、惠农、陶乐、盐池、同心等11个县市及13个国营农、林、牧、渔场。地理位置介于东经105°37'—106°39',北纬37°49'—39°23'之间,南始于黄河青铜峡水利枢纽,东接盐灵台地,西抵贺兰山脉,北至石嘴山,位于宁夏平原地势最低处。灌区多年平均降水量为180~220 mm,年内分布不均,主要集中在每年7、8、9月,年均蒸发量1 000~1 500 mm,年均气温8.5℃, >10℃的年平均积温3 630~3 830℃,无霜期达到174 d。水资源的基本特征是蒸发强烈、降水稀少,农业发展过于依赖过境黄河水。地下水资源总量为9 877万m³,其中大气降水补给6 377万m³,贺兰山山前侧向径流以及山洪入渗补给3 500万m³。青铜峡灌区基本均以引黄水灌溉为主。

1.1.2 数据来源

青铜峡灌区作物种植主要为水稻、小麦和玉米,再辅种其他豆类、薯类以及油料、蔬菜等经济作物,受数据收集限制,本文水足迹主要计算1993—2020年粮食作物的水足迹,且由于灌区统计资料不足,因此计算方式是收集1993—2020年灌区内行政区划的

相关数据,包括气象、农业统计和作物等数据。

气象数据源于中国气象网,包括青铜峡灌区行政区划内的各气象站点的经纬度和海拔等地理数据,以及气温、风速、日照时间和平均相对湿度等气象数据。农业统计数据主要来自于1993—2020年的《宁夏统计年鉴》,主要包括水稻、小麦、玉米的产量以及播种面积等数据。作物数据包括生育期数据和作物系数,参考《FAO-56作物需水量计算指南》。

1.2 研究方法

1.2.1 水足迹计算方法

由于本文仅考虑田间作物的耗水过程,为了评价田间尺度水分利用效率,因此选择的方法为基于作物蒸发蒸腾量的计算方法^[15]。该方法主要计算式为:

$$WF_{\text{green}} = \frac{CWU_{\text{green}}}{Y} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{lgp}} ET_{\text{green}} / Y, \quad (1)$$

$$WF_{\text{blue}} = \frac{CWU_{\text{blue}}}{Y} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{lgp}} ET_{\text{blue}} / Y, \quad (2)$$

式中: WF_{green} 和 WF_{blue} 为作物绿水足迹和蓝水足迹; CWU_{green} 和 CWU_{blue} 为农作物绿水和蓝水消耗量(m³/hm²); 常数10为单位转换系数,将单位由水深(mm)转化为单位面积水容量(m³/hm²); ET_{green} 和 ET_{blue} 分别为每种农作物绿水和蓝水的蒸散发量(mm); Y 为单位面积农作物的产量(kg/hm²)。

每种农作物绿水和蓝水的蒸散发量计算式为^[16]:

$$ET_{\text{green}} = \min(ET_C, P_{\text{eff}}), \quad (3)$$

$$ET_{\text{blue}} = \max(0, ET_C - P_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中: ET_C 为农作物蒸散发量(mm); P_{eff} 为有效降水量(mm)。由于无法计算污染物水资源体积,本文只计算蓝水足迹和绿水足迹。

参考作物蒸散发和作物系数的乘积为农作物蒸散发量,使用Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散发量^[17]:

$$ET_C = ET_0 \times K_C, \quad (5)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}, \quad (6)$$

式中: ET_C 为作物蒸散发总量(mm/d); ET_0 为参考腾发速率(mm/d); K_C 为作物系数; R_n 为作物表面上的净辐射(MJ/(m² d)); G 为土壤热通量(MJ/(m² d)); T 为2 m高处日平均气温(℃); u_2 为2 m高处的气速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线的倾率; γ 为湿度计常数(kPa/℃)。

P_{eff} 计算式为:

$$P_{\text{e(dec)}} = \begin{cases} P_{\text{dec}} \times \frac{125 - 0.6 \times P_{\text{dec}}}{125} & P_{\text{dec}} \leq \left(\frac{250}{3}\right) \text{ mm} \\ \frac{125}{3} + 0.1 \times P_{\text{dec}} & P_{\text{dec}} > \left(\frac{250}{3}\right) \text{ mm} \end{cases}, \quad (7)$$

式中： P_{dec} 为旬降水量 (mm)； $P_{e(dec)}$ 为旬有效降水量，作物生育期内的有效降水量可由各旬有效降水量累加得到^[18]。

农作物水足迹的计算式为：

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} \quad (8)$$

WF_{green} 和 WF_{blue} 主要由农作物产量以及各气候因素决定。农作物水足迹是绿水足迹、蓝水足迹的总和，因此，可以通过不同的途径来控制农业用水量。

1.2.2 系统动力学模型

系统动力学方法可以把水资源、社会、经济、生态等融合成一个系统整体，通过微分方程组模拟预测相关指标变化情况，来进一步研究农业用水效率^[19]。系统动力学模型的建立是一个迭代的过程，在这个过程中需要将流程循环往复，可以概括为反馈-分析-迭代-拟合的过程，基本步骤如下：

1) 收集相关数据资料，由于资料可获取性的限制，将系统边界确定为 2011—2020 年。

2) 确定模型内含的变量，同时找出影响关键变量的可控因素为绿水有效利用系数和灌溉水利用系数，根据假设绘制模型相关结构图。

3) 确定模型参数，建立模型的相关方程，利用 Vensim 来进行模型的建立。

4) 对模型进行测试，查看模型是否能够拟合系统，将相关参数进行调整，对模型进行优化调整。

本文利用系统动力学模型，主要是把区域典型农作物生产过程作为研究系统，选取一定的要素建立农业用水效率仿真模型，引入蓝水足迹、绿水足迹，从更广泛的角度讨论调控灌区农业种植水资源利用效率的可能性。首先要确定系统模型与外界环境之间的边界范围，边界建立范围大，系统所能包含的影响因素就多^[20]。本文的系统空间边界选择青铜峡灌区行政区划，由于相关数据无法全部收集，因此系统动力学模型时间边界为 2011—2020 年，时间步长为 1 a。之后选择影响力较大的相关因素进行调整，对模型进行模拟调控，讨论青铜峡灌区内农业用水效率的合理调控政策，提升灌区农业用水效率。

2 结果与分析

2.1 水足迹计算结果

青铜峡灌区作物的绿水足迹和蓝水足迹见表 1、表 2。由表 1 可知，2002 年青铜峡灌区绿水足迹最大，其次为 2012 年，2005 年最低。这是因为 2002 年灌区内 3 种主要粮食的种植面积最大，同时说明 2002 年降水量最高，为 260.52 mm，其次为 2012 年，降水量为 259.97 mm，2005 年最低，降水量为 80.86 mm。2002 年各主要作物绿水足迹排序为玉米<水稻<小麦，其值

分别为 0.281、0.290、0.641 m^3/kg ，分别占 2002 年总绿水足迹的 23.2%、23.9%、52.9%。2012 年各主要作物绿水足迹排序同样为玉米<水稻<小麦，其值分别为 0.266、0.319、0.484 m^3/kg ，占比分别为 24.9%、29.8%、45.3%。2005 年中各主要作物的总绿水足迹仅为 0.198 m^3/kg ，说明 2005 年青铜峡灌区降水量偏少，各主要作物绿水足迹都受到较大的影响。结合气候数据可知，降水量是影响作物绿水足迹的主要因素，呈显著的正相关关系。

表 1 青铜峡灌区 1993—2020 年各主要粮食作物绿水足迹

Table 1 Green water footprint of major food crops in Qingtongxia irrigation district from 1993 to 2020

年份	水稻/ ($m^3 kg^{-1}$)	小麦/ ($m^3 kg^{-1}$)	玉米/ ($m^3 kg^{-1}$)	合计/ ($m^3 kg^{-1}$)	排序
1993	0.174	0.097	0.143	0.413	27
1994	0.176	0.247	0.169	0.593	18
1995	0.294	0.383	0.259	0.935	3
1996	0.184	0.310	0.152	0.646	12
1997	0.142	0.274	0.154	0.570	22
1998	0.193	0.359	0.160	0.712	10
1999	0.173	0.321	0.114	0.609	17
2000	0.175	0.302	0.112	0.590	19
2001	0.206	0.169	0.143	0.517	24
2002	0.290	0.641	0.281	1.212	1
2003	0.223	0.427	0.215	0.864	5
2004	0.178	0.249	0.207	0.633	14
2005	0.079	0.060	0.059	0.198	28
2006	0.173	0.260	0.191	0.623	15
2007	0.222	0.395	0.199	0.816	8
2008	0.218	0.198	0.168	0.584	21
2009	0.170	0.129	0.155	0.455	25
2010	0.191	0.285	0.158	0.634	13
2011	0.165	0.161	0.125	0.452	26
2012	0.319	0.484	0.266	1.069	2
2013	0.177	0.292	0.142	0.611	16
2014	0.217	0.300	0.178	0.695	11
2015	0.202	0.218	0.114	0.533	23
2016	0.208	0.357	0.208	0.773	9
2017	0.177	0.244	0.168	0.588	20
2018	0.261	0.431	0.203	0.895	4
2019	0.175	0.502	0.148	0.825	7
2020	0.231	0.411	0.189	0.831	6

由表 2 可知，2005 年青铜峡灌区的蓝水足迹最高，表明 2005 年的灌溉用水量最高，是因为该年降水量比其他年份降水量少，为了保证作物的正常生长，增加了灌溉用水量。2005 年，小麦的蓝水足迹最大，为 2.225 m^3/kg ，占 2005 年总蓝水足迹的 52.0%，这主要是由于在青铜峡灌区主要种植小麦为春小麦，而在其生育期内宁夏区域降水并不充足，因此灌溉水量增加，而水稻蓝水足迹为 0.973 m^3/kg ，玉米的蓝水足迹为 1.079 m^3/kg ，分别占 2005 年总蓝水足迹的 22.8%、25.2%，虽然水稻的种植面积远不如玉米，但水稻需水量大，另外，宁夏地区降水量偏少，因此，二者蓝水足迹相差不大。2003 年各主要作物中，水稻的蓝水足迹为 0.879 m^3/kg ，占 2003 年总蓝水足迹的 20.9%，小

麦的蓝水足迹最高，占当年总蓝水足迹的 58.3%，玉米的蓝水足迹占当年总蓝水足迹的 20.8%。2016 年的总蓝水足迹为 2.418 m³/kg，该年青铜峡灌区降水量较高，作物生长发育条件较好，因此所需灌溉水量不多。小麦的蓝水足迹一直较大，可能与其种植面积较大有关。结合相关气象数据可知，降水量与蓝水足迹负相关，而平均风速与蓝水足迹正相关，各气象因素在不同时期的综合作用能够影响作物的生长状况，对蓝水足迹、绿水足迹的影响程度也不同。

表 2 青铜峡灌区 1993—2020 年各主要粮食作物蓝水足迹

Table 2 Blue water footprint of major food crops in Qingtongxia irrigation district from 1993 to 2020

年份	水稻/ (m ³ kg ⁻¹)	小麦/ (m ³ kg ⁻¹)	玉米/ (m ³ kg ⁻¹)	合计/ (m ³ kg ⁻¹)	排序
1993	1.251	0.960	0.993	3.205	13
1994	1.043	2.218	0.877	4.138	3
1995	0.984	1.684	0.799	3.467	10
1996	0.902	1.394	0.777	3.072	20
1997	0.988	1.601	0.876	3.465	11
1998	0.860	1.307	0.619	2.786	25
1999	0.840	1.500	0.665	3.004	22
2000	0.947	2.392	0.664	4.002	5
2001	0.924	1.868	1.046	3.838	6
2002	0.678	2.070	0.824	3.571	9
2003	0.879	2.450	0.874	4.203	2
2004	0.912	2.123	1.004	4.038	4
2005	0.973	2.225	1.079	4.277	1
2006	0.832	1.371	0.908	3.111	19
2007	0.808	1.552	0.794	3.154	17
2008	0.777	1.576	0.814	3.166	16
2009	0.822	1.567	0.790	3.178	15
2010	0.770	1.415	0.772	2.957	23
2011	0.814	1.693	0.830	3.337	12
2012	0.645	1.263	0.625	2.533	27
2013	0.792	1.611	0.733	3.137	18
2014	0.776	1.568	0.684	3.029	21
2015	0.802	2.077	0.799	3.679	7
2016	0.641	1.226	0.550	2.418	28
2017	0.801	1.110	0.693	2.604	26
2018	0.679	1.927	0.598	3.204	14
2019	0.808	2.293	0.517	3.618	8
2020	0.776	1.430	0.679	2.885	24

在研究时段内，除 2005 年降水量最少，其对应的绿水足迹最低，蓝水足迹最高，符合蓝绿水此消彼

长的规律外，2002 年降水量最大时，其对应的绿水足迹最大，但蓝水足迹却并不是最小；2012 年也是如此。说明蓝绿水的此消彼长过程中，不同年份的绿水利用率、蓝水利用率都没有达到较好的匹配性^[11]，还有提高潜力。

青铜峡灌区 1993—2020 年主要农作物总水足迹中，绿水足迹占比为 16.9%，蓝水足迹占比为 83.1%。可以看出蓝水足迹占比更多，且要远高于绿水足迹，这意味着青铜峡灌区的农业用水主要是灌溉水，在农作物生产中主要以蓝水为主，但充分利用绿水可降低灌区农作物生产中灌溉水的使用量，有效改善对灌溉水资源的浪费情况。

2.2 灌区农业用水效率系统动力学模型

青铜峡灌区农业用水效率优化系统以优化灌区农业蓝水、绿水用水效率，从而能够更合理的使用灌区水资源并提高产量为最终目的，在模型建立中选择可用的变量，分析变量之间的相关关系，以此来反馈系统内部的信息。根据资料选择具有代表性的变量，将变量分为 4 个类型，包括常量(C)、状态变量(L)、速率变量(R)、辅助变量(A)。表 3 为系统模型选取变量。

表 3 青铜峡灌区农业用水效率模型变量

Table 3 Model variables of agricultural water use efficiency in Qingtongxia irrigation district

Qingtongxia irrigation district			
小麦/玉米/水稻		其他	
变量	变量类型	变量	变量类型
单产量变化速度	A	农作物虚拟水蓝水用水量	R
单产年变化量	R	灌溉水利用系数	A
单产量	L	绿水足迹	A
产量	L	绿水利用系数	C
种植面积变化速度	A	绿水利用量	R
单位面积蓝水变化速度	A	作物蓝水利用量	R
单位质量蓝水	R	作物总利用水量	R
蓝水用水量	R	农业水资源供需比	R
-	-	作物需水量	L

根据变量与系统之间的联系，可以得到青铜峡灌区的农业用水效率系统动力学模型如图 1 所示。

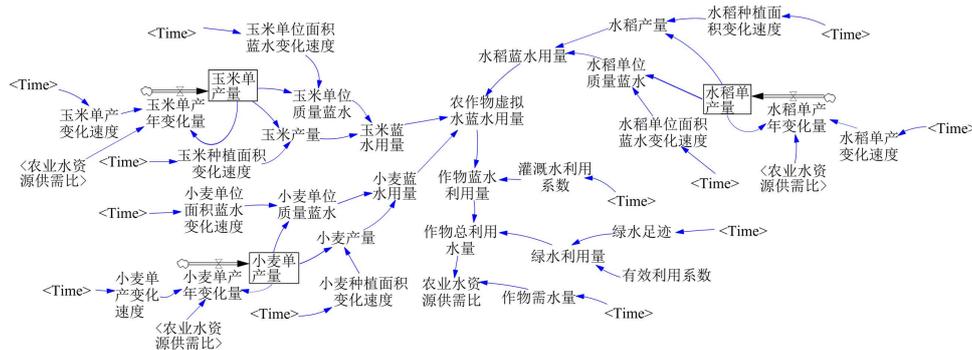


图 1 青铜峡灌区农业用水效率系统动力学结构

Fig.1 Dynamic structure diagram of agricultural water use efficiency system in Qingtongxia irrigation area

对青铜峡灌区农业用水效率系统动力学进行仿真模拟，将灌区内主要粮食产量的模拟结果用来检验模型。本文将 2011 年作为基准年，选择 2011、2015、2020 年 3 种粮食作物产量的实际值与模拟值来检验，

可以得到表 4。由表 4 可知，3 种粮食作物的产量模拟值与实际值最大误差为 6.72%，其绝对值不超过 10%，满足要求。

表 4 模型误差检验和模拟结果

Table 4 Model error checking and simulation results

作物	产量模拟值/万 t			产量实际值/万 t			误差/%		
	2011 年	2015 年	2020 年	2011 年	2015 年	2020 年	2011 年	2015 年	2020 年
小麦	39.71	23.02	14.46	39.72	21.57	14.21	-0.03	6.72	1.76
水稻	61.06	58.48	46.39	61.08	55.12	45.39	-0.03	6.10	2.20
玉米	114.96	140.48	148.69	114.94	141.98	148.05	0.02	-1.06	0.43

根据所建立的模型以及青铜峡灌区的现实情况来看，主要可以进行调控的因素有农作物蓝水用量、绿水有效利用系数和灌溉水利用系数。

1) 绿水利用系数的仿真调控

为了保证青铜峡灌区粮食作物的正常生长，需要充分满足作物需水量，而青铜峡灌区属于北方干旱地区，水资源短缺问题明显，节水灌溉是当地的一项重要政策，因此需要通过不同方式来增加农作物对绿水的利用率，减少灌溉用水的消耗量，有助于增加农业用水效率。提升土壤持水能力的途径包括深松耕作、地膜覆盖等耕作措施，以此来增加农作物对绿水的利用效率，保证即使灌溉用水不足时也能满足作物正常发育的需水量，充分贯彻节水灌溉政策。

绿水有效利用系数的提高可以通过各种工程或者非工程措施，在本文中绿水利用系数初始值为 0.7，在综合考虑青铜峡灌区内各种技术措施的施行后，在模拟调控时将绿水利用系数提升为 0.8。控制其他值不变，将绿水利用系数进行相应调控得到表 5。

表 5 绿水利用系数调整下模型模拟结果

Table 5 Model simulation results under the adjustment of green water use coefficient

年份	作物			水资源供需比
	小麦	水稻	玉米	
2011	39.72	61.07	114.98	0.45
2015	23.08	58.55	140.7	0.51
2020	14.73	46.59	149.24	0.59

在青铜峡灌区 3 种粮食作物的蓝水用水量不变的前提下，提升绿水利用系数，可以看出各种粮食作物产量均有一定程度的提升，与同年未进行调控时的模拟值相比，2020 年小麦产量增加了 0.27 万 t，水稻产量增加了 0.2 万 t，玉米产量增加了 0.55 万 t，说明此时农业用水效益也有了一定的提升。

2) 灌溉水利用系数

灌溉水的损失主要包括输送损失和灌溉损失量，因此通过减少渠系输水损失、增加灌溉时的节水意识可以有效提高灌溉水利用系数，大力向农户宣传节水政策，提高农户自主节水意识，合理使用各种节水灌

溉技术，如渠道防渗、喷灌等，优化作物灌溉用水管理政策，积极研制优良作物品种，保证作物对水资源充分利用。

通过《宁夏回族自治区农田灌溉水有效利用系数测算分析成果报告》可知，青铜峡灌区的灌溉水利用系数在 0.4~0.55 之间，规划是 2025 年前达到 0.65 以上，灌溉水利用系数跟国内平均水平及规划水平相比仍有很大差距，依然有较大的提升空间，在系统动力学的仿真模拟中，将灌溉水利用系数每年提升 10%，灌溉水系数调整后模拟结果见表 6。

表 6 灌溉水利用系数调整下模型模拟结果

Table 6 Model simulation results under the adjustment of irrigation water use coefficient

年份	作物			水资源供需比
	小麦	水稻	玉米	
2011	39.72	61.08	114.98	0.47
2015	23.13	58.6	140.72	0.54
2020	14.93	46.74	149.46	0.61

在青铜峡灌区 3 种粮食作物的蓝水用水量不变的前提下，提高灌溉水利用系数，可以看出各种粮食作物产量均有一定程度的提升，与同年调控前的模拟值相比，2020 年时小麦产量增加 0.47 万 t，水稻产量增加 0.35 万 t，玉米产量增加 0.77 万 t，说明此时农业用水效益增加。

3) 绿水利用系数和灌溉水利用系数综合仿真调控

在系统动力学模型中同时对绿水有效利用系数和灌溉水利用系数进行调控，将绿水有效利用系数提升至 0.8，灌溉水利用系数提升 10%，分析在二者的综合作用下，青铜峡灌区农业用水效率的变化，可以得到表 7。

表 7 综合性调控措施下模型模拟结果

Table 7 Model simulation results under comprehensive control measures

年份	作物			水资源供需比
	小麦	水稻	玉米	
2011	39.74	61.12	115.02	0.48
2015	23.2	58.68	140.95	0.55
2020	15.21	46.94	150.01	0.63

在青铜峡灌区 3 种粮食作物的蓝水用水量不变的前提下,提高绿水利用系数和灌溉水利用系数,可以看出各种粮食作物产量均有一定程度的提升,与同年调控前的模拟值相比,2020 年小麦产量增加 0.75 万 t,水稻产量增加 0.55 万 t,玉米产量增加 1.32 万 t,说明此时农业用水效益有一定提升,且增加幅度大于单一参数的调整。

3 讨论

青铜峡灌区 1993—2020 年主要粮食作物水足迹及其变化趋势表明,青铜峡灌区灌溉水利用效率逐年提高,实现了有效节水^[21]。而其主要粮食作物的生产水足迹均以蓝水足迹为主,这与赵芮^[22]在宁夏中部扬黄灌区研究相同,因此,对青铜峡灌区当前的灌溉模式进行适当的调整能够有效节约资源浪费和提高粮食产量,应该结合农田实际情况加强节水灌溉建设,规范用水管理,改善农艺措施,提高灌溉水利用效率来实现节水增产^[23]。

降水和灌溉用水同时在作物生产和粮食生产中发挥非常重要的作用^[13,24]。从青铜峡灌区农业用水效率系统动力学模型的模拟结果来看,提高绿水有效系数和灌溉水利用系数也能够有效增加粮食作物产量,二者相结合对粮食作物产量的提升有更加明显的作用。因此对于青铜峡灌区这类干旱缺水地区,应保证在不增加灌溉水量的前提下,通过节约蓝水、提高绿水利用效率来进一步提高灌溉效益,可以将各种管理及技术、工程措施相结合的方式增加当地的水资源承载力水平,满足作物生长需水过程中蓝水和绿水需求,共同保证其正常生长。

与此同时,青铜峡灌区主要粮食作物农业用水效率的进步空间依然很大,主要表现在蓝水资源有限,灌溉水利用系数依然较低,规划水平为 2025 年达到 0.65;对降水资源的利用在引黄灌区目前则没有明确的利用规划。因此母彩霞^[25]提出可以通过提高灌溉水利用系数的方式来增加青铜峡灌区对水资源的利用,主要调控措施是通过减少渠系输水损失、增加灌溉节水意识来有效提高灌溉水利用系数,加大灌区节水改造,优化种植结构,减少高耗水作物的种植面积,大力向农户宣传节水政策,提高农户自主节水意识,以及合理使用各种高效节水灌溉技术,如渠道防渗、喷灌、滴灌等,优化作物灌溉用水管理政策^[26],保证作物对水资源充分利用,科学提高农业用水效率。同时在灌区管理上,引导农民深松耕作、地膜覆盖、秸秆还田、免耕种植等耕作措施,改善土壤持水性能,降低土层体积质量^[13],增加土壤总孔度,提高土壤饱和导水率,从而提高绿水利用效率,在灌溉用水短缺时

保障作物生长发育。

本文采用的是通用性方法,得出的主要结论同样适用于主要种植小麦、玉米、水稻的其他北方大型灌区,但对于南方地区而言,其灌溉系统结构差异使得各影响因素对灌区的作用程度不一样,因此需要另外开展研究,同时节水会对灌区区域生态环境影响如何还有待进一步研究。

4 结论

1) 青铜峡灌区主要粮食作物蓝水足迹占总水足迹的 83.1%,绿水足迹占总水足迹的 16.9%,1993—2020 年蓝水足迹最大年份为 2005 年,最小年份为 2008 年,绿水足迹历年最大年份为 2002 年,历年最小年份为 2005 年。蓝水足迹总体呈下降趋势,绿水足迹整体不变,可以看出灌区总体用水效率有所提升,但对降水利用率不高。

2) 在作物需水量被满足的前提下,蓝水足迹、绿水足迹的变化趋势相反,但同年的互补关系并不完全匹配,如 2002、2005、2012 年,说明存在灌溉绿水利用不充分、蓝水利用不合理现象。

3) 提升绿水有效利用系数或灌溉水有效利用系数均可以有效提高青铜峡灌区内的粮食作物产量,而在同时对 2 种参数进行调控时,其对产量的提升明显高于对单一参数的调控。

参考文献:

- [1] 纪晓玲, 王小林, 张静, 等. 榆林市黄土丘陵沟壑区农业节水潜力分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 130-135.
JI Xiaoling, WANG Xiaolin, ZHANG Jing, et al. Analysis on agricultural water-saving potential in loess hilly-gully district of Yulin[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(3): 130-135.
- [2] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1-12.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao irrigation district of Inner Mongolia: Prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 1-12.
- [3] 吴兆丹, 赵敏, UPMANU Lall, 等. 关于中国水足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 73-80.
WU Zhaodan, ZHAO Min, UPMANU Lall, et al. A review of researches on Chinese water footprint[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 73-80.
- [4] 姜秋香, 李鑫莹, 王子龙, 等. 黑龙江省农业水足迹时空分布及用水效率分析[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(11): 87-96.
JIANG Qiuxiang, LI Xinying, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution of agricultural water footprint and analysis of water use efficiency in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(11): 87-96.
- [5] 钱逸颖, 董会娟, 田旭, 等. 应对水资源危机的中国水足迹研究综述[J]. 生态经济, 2018, 34(7): 162-166, 173.

- QIAN Yiyang, DONG Huijuan, TIAN Xu, et al. A review of the research on China's water footprint responding to water crisis[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(7): 162-166, 173.
- [6] KONAR M, MARSTON L. The water footprint of the United States[J]. *Water*, 2020, 12(11): 3 286.
- [7] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 680-688.
WANG Lichuan, HOU Baodeng, ZHOU Yuyan, et al. Evaluation of water resources utilization based on water footprint theory in Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 680-688.
- [8] SIDHU B S, SHARDA Rakesh, SINGH Sandeep, et al. Water footprint of crop production: A view[J]. *Indian Journal of Ecology*, 2021, 48(2): 358-366.
- [9] ZHAI Y J, BAI Y Y, WU Z, et al. Grain self-sufficiency versus environmental stress: An integration of system dynamics and life cycle assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112 153.
- [10] 王倩, 黄凯. 基于系统动力学的北京市农业水足迹模拟与影响因素分析[J]. *系统工程*, 2021, 39(3): 13-24.
WANG Qian, HUANG Kai. Simulation of agricultural water footprint and analysis of influencing factors in Beijing based on system dynamics[J]. *Systems Engineering*, 2021, 39(3): 13-24.
- [11] 王方剑. 基于系统动力学的关中地区水足迹模拟与调控研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
WANG Fangjian. Simulation and countermeasures of water footprint based on system dynamics in Guanzhong area[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [12] 黄会平, 王如厂, 李新生, 等. 农业水足迹生产和消费协调度评价及调控研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 66-75.
HUANG Huiping, WANG Ruchang, LI Xinsheng, et al. Evaluation and regulation of agricultural water footprint coupling production and consumption coordination degree[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(2): 66-75.
- [13] 李新生. 京津冀农业水足迹协调度与调控研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
LI Xinsheng. Study on coordination and regulation of agricultural water footprint in Beijing, Tianjin and Hebei[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [14] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
LIU Ning. Research on water resources optimal allocation in Beijing-Tianjin-Hebei region based on water footprint[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [15] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 651-660, 669.
WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 651-660, 669.
- [16] 金谦, 桂东伟, 高霄鹏, 等. 新疆主要农作物生产水足迹研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 243-249.
JIN Qian, GUI Dongwei, GAO Xiaopeng, et al. Water footprints of primary crop production in Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 243-249.
- [17] 徐鹏程, 张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 232-237.
XU Pengcheng, ZHANG Xingqi. Study on water footprint of main crops production in Jiangsu Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(1): 232-237.
- [18] 高海燕, 李王成, 李晨, 等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3): 110-118.
GAO Haiyan, LI Wangcheng, LI Chen, et al. Water footprints of main crops and their change in Ningxia[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 110-118.
- [19] 赵欢欢. 宁夏水资源承载力预警研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
ZHAO Huanhuan. Research on early warning of water resources carrying capacity in Ningxia[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [20] 海洋. 基于 SD 模型的南疆地区节水发展及水资源承载力模拟评估[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
HAI Yang. Evaluation of water saving development and water resources carrying capacity in southern Xinjiang based on SD model[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [21] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹时空分布量化分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 105-112.
GAO Jie, WU Pute, XIE Pengxuan, et al. Distributed quantification of blue and green water resources and water footprint of crop production in an irrigation district at multiple temporal scales[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5): 105-112.
- [22] 赵芮. 基于水足迹的宁夏中部干旱带扬黄灌区种植业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
ZHAO Rui. Optimization of planting structure based on water footprint at the Yellow River pumping irrigation area in the middle arid zone of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [23] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠. 宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 269-277.
FENG Dongpu, WEI Xiaomei, JIANG Yanan. Temporal and spatial variation characteristics and attribution analysis of wheat water footprint in baojixia irrigation area, China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 269-277.
- [24] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于 DEA 的灌区生产效率分析: 以江苏省为例[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(2): 173-178.
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Analysis of production efficiency of irrigation districts based on DEA method: Take Jiangsu Province as an example[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(2): 173-178.
- [25] 母彩霞. 青铜峡灌区灌溉用水有效利用系数测算及影响因素研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
MU Caixia. The estimation of effective utilization coefficient of irrigated water of Qingtongxia irrigation area and research of impact factors[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [26] 谢朋轩. 黄河流域蓝绿水资源、水足迹和水短缺评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
XIE Pengxuan. Estimating blue and green water resources, water footprints and water scarcities in the Yellow River Basin[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

Using System Dynamics to Improve Agricultural Water Use Efficiency in Qingtongxia Irrigation District

JIA Yizhou^{1,2}, LIU Zixi¹, TANG Lian^{1*}

(1. Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Xifeng Management Supervision Bureau of Yellow River Soil and Water Conservation, Qingyang 745000, China)

Abstract: **【Objective】** Qingtongxia irrigation district is one of the irrigation districts in northwestern China which rely on Yellow River water for irrigation. Using the water footprint concept, this paper proposes a system dynamic model to help improve agricultural water use efficiency in this district. **【Method】** Blue and green water footprints of major crops in the district were calculated from their evapotranspiration and transpiration. A system dynamics model for agricultural water use efficiency was then established, and the model was solved using the Vensim software. **【Result】** Irrigation water is the primary water source for agriculture in the district, forming a production water use pattern in which blue water is the main source and green water is a supplementary source. The blue and green water footprints vary oppositely in order to meet the demand of crops for water. On the premise to ensure constant blue water use for the crops, we selected the green water use coefficient and irrigation water use coefficient as parameters in the modelling. The model results show that increasing green water utilization coefficient from 0.7 to 0.8 can increase wheat production by 2.7×10^5 t, rice production by 2×10^5 t, and corn production by 5.5×10^5 t. We also found that increasing the irrigation water utilization efficiency by 10 can increase wheat production by 4.7×10^5 t, rice production by 3.5×10^5 t, and corn production by 7.7×10^5 t. Collectively, increasing green water utilization coefficient and irrigation water utilization coefficient simultaneously can increase wheat production by 7.5×10^5 t, rice production by 5.5×10^5 t, and maize production by 1.32×10^7 t. **【Conclusion】** Agricultural production in Qingtongxia irrigation area should consider increasing utilization of green water and improving agricultural water use efficiency by improving engineering and non-engineering facilities to increase crop yields.

Key words: water footprint; system dynamics; agricultural water efficiency; Qingtongxia irrigation district; water use efficiency

责任编辑：白芳芳

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部