doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.013

面向农业-生态多维协同的石羊河流域水土资源韧性配置研究

韩昕泽[1]　武连洲[1,2]　粟晓玲[1]　孔祥磊[1]　穆乃涵[1]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学水土保持与荒漠化治理全国重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:针对变化环境下内陆河流域水资源供需矛盾尖锐、极端不利情景频发等水土资源安全问题的严峻挑战,以甘肃省石羊河流域为对象,从稳定性、鲁棒性和可靠性 3 方面构建了不确定性情景下面向农业-生态多维协同的水土资源韧性配置模型,提出了一种基于韧性视角的农业-生态多维协同水土资源配置方案,研究了不同来水情景下用水比例调控策略。结果表明:石羊河流域农业韧性与生态韧性间竞争严峻,变化环境下水资源条件与现有耕地规模适配性较差,建议通过轮作休耕调整 11.8% 的耕地规模,将现有耕地规模控制在 1.893×10^5 hm^2;与常规优化配置相比,韧性配置平水年农业产量存在 1.55% 损失,但在极端枯水年与丰水年农业产量分别提升 4.90% 和 1.32%;推荐极端枯水年优先提升农业用水比例至 88.50% 以上,丰水年适度增加生态配水。研究成果为变化环境下内陆河流域水土资源配置提供新思路,对石羊河流域农业与生态协同可持续发展具有重要实践意义。

关键词:系统韧性;水土资源;石羊河流域;变化环境;优化配置

中图分类号:TV213.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)22-0154-08　　**OSID**:

Resilient Allocation of Land and Water Resources in Shiyang River Basin Oriented Toward Multi-dimensional Synergy between Agriculture and Ecology

Han Xinze[1]　Wu Lianzhou[1,2]　Su Xiaoling[1]　Kong Xianglei[1]　Mu Naihan[1]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming to address acute water supply-demand conflicts and frequent extreme unfavorable scenarios in inland river basins under changing environments, a resilient allocation approach for achieving sustainable agriculture - ecology coordination was developed. Taking the Shiyang River Basin in Gansu Province as the research object, a resilient allocation model of land and water resources oriented toward agriculture - ecology synergy was constructed incorporating stability, robustness, and reliability under uncertainty scenarios. Efficient allocation schemes were proposed, and regulation strategy curves for water-use proportions under different inflow scenarios were derived. The results indicated that severe competition existed between agricultural and ecological resilience, and the existing cultivated land scale was not adapted to water resource conditions under changing environments; it was recommended to adjust 11.8% of cultivated land through crop rotation and fallowing, controlling the existing cultivated land scale at 1.893×10^5 hm^2. Compared with conventional optimal allocation, the resilient allocation showed a slight performance loss of 1.55% in normal years but significant advantages in extreme dry and wet years, with agricultural production increased by 4.90% and 1.32%, respectively. Agricultural water-use proportion should be preferentially raised to 88.50% in extreme dry years, while ecological water allocation should be moderately increased in wet years. The research result can provide an allocation approach for inland river basins to cope with uncertainty risks and achieve sustainable agriculture -

收稿日期:2026-05-29　修回日期:2026-06-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3213700)

作者简介:韩昕泽(2001—),男,硕士生,主要从事水资源优化配置研究,E-mail:wshanxinze@163.com

通信作者:武连洲(1990—),男,副教授,博士,主要从事水网运行与水资源调配研究,E-mail:wulianzhou@nwafu.edu.cn

ecology coordination.

Key words: system resilience; land and water resources; Shiyang River Basin; changing environment; optimal allocation

0　引言

受气候变化影响,水循环过程发生变化,极端不利情景频发,水资源承载力与土地资源开发利用程度间矛盾逐渐激化,流域水土资源安全问题面临全新挑战。2023 年 5—9 月,甘肃省河西走廊流域发生 60 年一遇高温干旱,农作物受灾面积达 2.11×10^5 hm^2,直接经济损失达 10.62 亿元,对区域粮食安全和流域生态安全构成严重威胁[1]。灌溉农业与绿洲生态保护对水资源的刚性需求,使得内陆河流域的水资源禀赋面临巨大压力。2025 年 12 月,国务院办公厅印发《落实水资源刚性约束制度考核办法》,提出把水资源开发利用控制在承载能力范围内,使有限的水资源有效支撑和保障高质量发展[2],政府管理和产业发展等对缺水地区水土资源配置提出新的要求。

内陆河流域常规水土资源优化配置以水资源为核心,缓解或解决农业与生态、水资源承载力与土地资源开发利用程度之间的基本矛盾。Li 等[3]构建变化环境下农业水土资源综合配置模型框架,在实现农业水土资源可持续管理的同时提供针对不同变化环境的农业水土资源管理替代方案。Zhang 等[4]从气候变化与土地利用耦合视角出发,构建基于作物适应的多目标农业规划模型,实现黑河流域农业水土资源多目标优化配置。Qin 等[5]通过预估未来气候情景下黄淮海流域水土资源系统网络风险,构建了面向风险缓解的水土资源最优配置模型,最终获得不同情景模式下黄淮海流域最优水土资源配置方案。靳世鑫等[6]构建面向生态-经济-社会目标的水土资源联合配置框架,为促进区域水土资源协同开发、保障社会经济与生态可持续提供支撑。以往水土资源均衡配置多聚焦于以水土资源互馈为基础、基于特定情景的优化配置研究,然而在气候变化与人类活动愈发激烈的综合影响下,绿洲区社会经济发展与生态环境保护的韧性响应已是无法忽视的重要问题,传统水土资源配置方案的适配性面临新的挑战。

“韧性”一词最早源于物理学,表示系统经历冲击后仍能恢复状态的能力,并在生态学、心理学、工程管理学等领域得到广泛使用[7-10]。在水资源领域,韧性理念为解决不确定影响下系统优化问题提供了新的思路。王煜等[11]构建水资源系统复杂网络图,使用系统动力学方法剖析水资源系统韧性演变过程,识别泾河流域系统韧性主要驱动因素。万芳等[12]利用混沌理论与 Logistic 方法,构建水网的水资源系统韧性评价模型,并在汾河流域进行验证。郑小康等[13]以黄河流域为研究对象,构建了 3Rs 韧性内涵框架,提出黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略。黄生志等[14]从抵抗性、恢复性、适应性 3 个角度构建水资源系统韧性评价指标体系,研究了陕西省关中地区水网韧性提升的水库群优化调配方案。然而,上述研究多集中于水资源系统韧性评估,关于水土资源韧性配置的研究尚处于起步阶段,如何揭示变化环境下水土资源韧性配置原理,构建不确定性情景下农业-生态优化目标,识别极端不利情景下系统农业-生态综合表现较优的内陆河流域水土资源配置方式,是本研究解决的核心问题。

石羊河流域是阻挡巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠合拢的重要生态屏障,流域以绿洲农业经济为主,主要种植小麦、玉米、棉花等作物,农业生态用水供需矛盾突出[15-17]。因此,本研究以河西走廊典型内陆河流域——石羊河流域为研究对象,围绕变化环境下内陆河流域农业生产与生态保护之间水土资源配置矛盾,将系统韧性理论引入农业-生态协同配置过程,构建面向不确定来水情景的水土资源韧性配置模型。研究关注配置方案在多情景扰动下整体适应能力和极端不利情景下功能保持能力,进而提出兼顾农业产出稳定、生态需水保障和耕地规模调控的韧性配置方案。以期支撑内陆河流域农业高质量发展与生态环境保护,为促进内陆河流域水土资源韧性管理提供理论依据与决策支撑。

1　原理与方法

1.1　变化环境下水土资源韧性配置原理

归纳不同领域对系统韧性的描述,采用性能函数曲线刻画系统韧性[18],如图 1 所示。在系统韧性性能函数中,压力、状态、响应是系统韧性性能函数着重关注的 3 项要素,压力是以外界环境以及系统内部(如气候变化、应急调度)扰动为输入变量作用于系统状态,而响应则是状态的反应结果。系统状态是系统固有属性,由系统内在属性与结构决定。根据系统状态水平不同,系统韧性性能函数存在可接受状态与最低状态 2 种状态阈值。

在无强烈外界扰动情况下,系统状态处于秩序

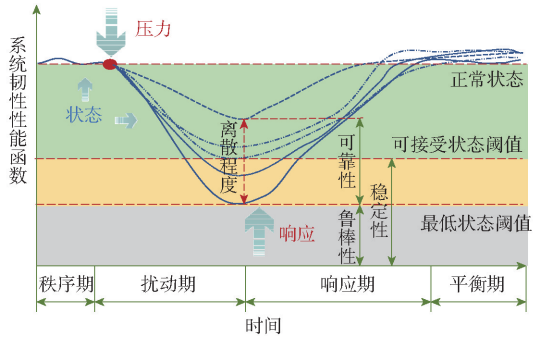


图 1 系统韧性性能函数曲线

Fig. 1 System resilience performance function curves

期,韧性性能在正常性能状态范围内。在强不确定性扰动下,系统性能因压力胁迫而下降,进入扰动期。选用稳定性、鲁棒性和可靠性反映扰动期系统韧性性能的不同韧性特征。

(1)稳定性:体现系统经历扰动过程仍能维持系统基本状态与一定程度功能水平的特征能力,可以通过量化可接受状态阈值对应的系统韧性性能函数值予以表征。

(2)鲁棒性:体现系统经历扰动过程后系统基本状态遭到破坏、系统功能失效,但破坏与失效程度有限,经响应过程仍能抑制性能退化与恢复性能的特征能力,可通过量化最低状态阈值对应的系统韧性性能函数值予以表征。

(3)可靠性:体现系统在经历不同程度扰动过程,尽可能维持基本状态与功能变幅较小、具有可预测性的特征能力,可以通过量化系统韧性性能曲线在不同压力扰动下离散程度予以表征。

变化环境下水土资源韧性配置就是将不确定性情景作为水土资源配置的一个重要变量,以稳定性、鲁棒性、可靠性为原则,寻找系统应对不同扰动强度表现最佳的水土资源配置方案。通过水土资源韧性配置,提高系统韧性在扰动期性能水平,最终实现有限的水资源与土地资源利用效率最大化,推进流域水土资源的可持续利用与生态环境的绿色发展。

1.2 内陆河流域水土资源韧性配置模型

内陆河流域水土资源配置模型的核心目标是识别不同区域间合理的农业-生态用水分配比例与耕地规模,以缓解农业用水与生态用水用水矛盾[15,19-21]。常规水土资源配置模型以单一情景下农业与生态效益为目标实现优化配置。韧性配置模型通过重构目标函数,计算决策变量在所有情景下农业与生态效益结果,并采用数理统计方法提取农业、生态效益结果集的分布特征,将统计指标作为韧性目标纳入优化分析,从而替代单一情景目标,实现多情景下韧性配置。此外,在不确定性情景下,生态用户往往重点关注是否满足生态最低状态供水阈值,所以仅选取生态鲁棒性目标作为不确定性情景下生态韧性优化目标。

(1)稳定性目标

数学期望是反映数据一般水平的统计指标,系统关键指标目标期望越高,表明一般水平越易满足可接受状态与最低状态,系统稳定性越高。因此,选用不同情景下平均农业产量最大作为农业稳定性优化目标。计算式为

$$\overline{A}=\frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S}A_s \tag{1}$$

式中 $\overline{A}$——平均农业产量,t

S——不确定性情景数量,个

A_s——情景 s 所对应的农业产量,t

(2)鲁棒性目标

分位数是反映数据在分布中特定位置集中趋势和分布情况的统计指标,系统第 1 分位数的平均值越高,表明在最差情景下表现越好,系统鲁棒性越高。因此,将来水情景第 1 十分位数(所有情景中来水量最小的 10% 情景)作为系统极枯情景,选用极枯情景下农业产量与生态系统服务价值最大作为农业与生态的鲁棒性目标。极枯情景农业产量计算式为

$$A_R=\frac{1}{10\%S}\sum_{s=1}^{10\%S}A_s \tag{2}$$

式中 A_R——极枯情景农业产量,t

极枯情景生态系统服务价值计算式为

$$E_R=\frac{1}{10\%S}\sum_{s=1}^{10\%S}E_s \tag{3}$$

式中 E_R——极枯情景生态系统服务价值,亿元

E_s——情景 s 所对应的生态系统服务价值,亿元

(3)可靠性目标

变差系数是衡量数据离散程度的统计指标,系统关键指标变差系数越低,表明离散程度越低,系统可靠性越高。因此,选用不同情景下农业产量变差系数最小作为农业可靠性优化目标。所有情景农业产量变差系数计算式为

$$v_A=\frac{\sigma_A}{\overline{A}} \tag{4}$$

式中 v_A——所有情景下农业产量变差系数

σ_A——所有情景下农业产量标准差,t

(4)约束条件

水量平衡约束条件为

$$W_t=\sum_{i=1}^{I}W_{i,t}+\sum_{j=1}^{J}W_{j,t}\quad(t=1,2,\cdots,12) \tag{5}$$

式中 W_t——t 月用水量,m^3

I——农业用户数量，户

J——生态用户数量，户

$W_{i,t}$——农业用户 i 在 t 月用水量，m^3

$W_{j,t}$——生态用户 j 在 t 月用水量，m^3

土地面积约束条件为

$$L_i^{\min} \leqslant L_i \leqslant L_i^{\max} \quad (i=1,2,\cdots,I) \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{I} L_i \leqslant L_{\text{total}} \tag{7}$$

式中　L_i——农业用户 i 耕地面积，hm^2

$L_i^{\min}$——农业用户 i 最小耕地面积阈值，hm^2

$L_i^{\max}$——农业用户 i 最大耕地面积阈值，hm^2

L_{total}——流域最大耕地面积阈值，hm^2

最小需水量约束条件为

$$W_i \geqslant D_i^{\min} \quad (i=1,2,\cdots,I) \tag{8}$$

$$W_j \geqslant D_j^{\min} \quad (j=1,2,\cdots,J) \tag{9}$$

式中　W_i、W_j——农业用户和生态用户用水量，m^3

$D_i^{\min}$、$D_j^{\min}$——农业用户和生态用户最小需水量，m^3

非负约束：除作物水分生产函数系数外，式中所有变量非负。

1.3　模型求解

1.3.1　不确定性情景生成

采用马尔可夫链蒙特卡罗方法生成不确定性情景。通过构建 1 个马尔科夫链，使系统平稳分布收敛于目标分布（如来水序列的联合分布），并通过蒙特卡洛方法模拟生成可以反映石羊河流域历史径流变化统计特性的 45 年（丰、平、枯水年各 15 年）不确定月径流模拟序列，表征水土资源配置面临的不确定性环境[22-23]。

1.3.2　农业作物产量与生态系统服务价值量化

（1）农业作物产量量化

内陆河流域农业作物产量目标与农业用水量、耕地面积以及作物水分生产系数密切相关。通过统计资料建立水-作物产量定量关系[24-25]，表达式为

$$A = \sum_{i=1}^{I} L_i Y_i \tag{10}$$

其中

$$Y_i = \begin{cases} \alpha_i C_i^2 + \beta_i C_i + \gamma_i & (C_i \geqslant C_i^{\min}) \\ 0 & (C_i < C_i^{\min}) \end{cases} \tag{11}$$

式中　A——农业作物产量，t

Y_i——农业用户 i 单位面积产量，t

γ_i——农业用户 i 作物水分生产函数常数项系数，t

β_i——农业用户 i 作物水分生产函数一次项系数，t/mm

α_i——农业用户 i 作物水分生产函数二次项系数，t/mm^2

C_i——农业用户 i 种植作物单位面积实际耗水量，mm

$C_i^{\min}$——农业用户 i 种植作物生长单位面积所需最低耗水量，mm

各作物水分生产函数系数取值参照文献[24，26-27]。

（2）生态系统服务价值目标

使用生态水量计算不同生态用户可保证的生态面积，并使用生态系统服务价值当量统一价值量纲，将生态系统服务总价值作为生态系统的效益量化指标[28-29]，计算式为

$$E = \sum_{j=1}^{J} \lambda_j L_j \tag{12}$$

其中

$$L_j = \begin{cases} \dfrac{W_j}{r_j} & (W_j \geqslant W_j^{\min}) \\ 0 & (W_j < W_j^{\min}) \end{cases} \tag{13}$$

式中　E——生态系统服务价值，亿元

λ_j——生态用户 j 生态系统服务单位面积价值，亿元

L_j——生态用户 j 可保证生态面积，m^2

r_j——生态用户 j 单位面积生态需水量，mm

1.3.3　模型求解

使用 NSGA-Ⅲ多目标优化算法求解多目标优化模型。NSGA-Ⅲ多目标优化算法是一种进化算法，在遗传算法基础上延伸发展而来[30-31]。通过不断迭代获取 1 组非支配解的集合，将集合中每个解作为最优解的近似，并通过集合中非支配解进行筛选以迭代获取下一代集合，最终得到 1 组最优解集，即帕累托最优解集。

2　研究区概况与数据来源

2.1　石羊河流域概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部北纬 37°02′～39°27′，东经 100°57′～104°12′，是河西走廊三大内陆河流域之一，如图 2 所示。流域内多年平均降水量 211.8 mm，水资源总量约 1.58×10^9 m^3。石羊河流域面积 4.16×10^4 km^2，流域主要行政区划包括武威市古浪县、凉州区、民勤县，金昌市永昌县、金川区。流域地势自西南向东北倾斜，发育有 8 条主要河流，民勤县尾闾湖泊青土湖承担着阻挡巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠合拢的关键生态作用。

2.2　数据来源

数据主要涉及石羊河流域可供水量数据、土地利用数据、社会经济统计数据以及其他数据，主要来

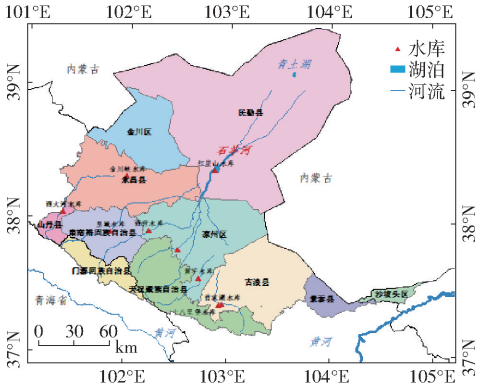


图 2 石羊河流域概况

Fig. 2 Overview of Shiyang River Basin

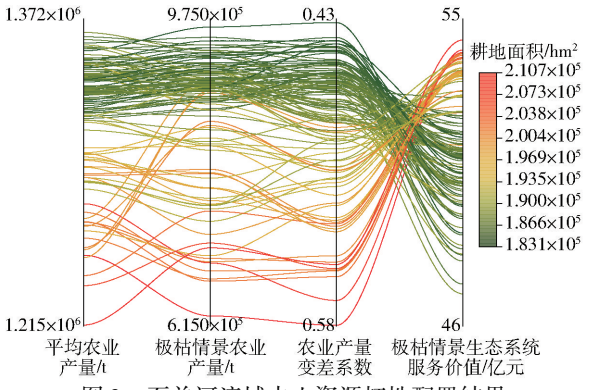


图 3 石羊河流域水土资源韧性配置结果

Fig. 3 Results of resilient allocation of land and water resources in Shiyang River Basin

源于水资源公报、统计年鉴、参考文献以及实际调研:①可供水量数据:主要参考《石羊河流域水资源公报》及石羊河流域水资源利用中心提供的民勤县 2019—2022 年河水灌溉情况。②土地利用数据及社会经济数据:主要参照《武威统计年鉴 2021》《2020 年金昌市国民经济和社会发展统计公报》。③其他数据:参照已有研究确定石羊河流域作物水分生产函数系数[25-28]及单位面积生态系统服务价值当量系数[29-30]。

3 结果分析

3.1 不确定性情景下水土资源均衡韧性配置

使用 MCMC 方法,生成长度为 45 年(丰水年、平水年、枯水年各 15 年)的石羊河流域月径流模拟序列,表征水土资源配置面临的不确定性环境。使用石羊河流域 4 个农业用户(凉州、民勤、古浪、金昌)以及 2 个生态用户(青土湖、其他生态用户)的月配水比例作为决策变量,以农业稳定性、农业鲁棒性、农业可靠性与生态鲁棒性作为目标函数,构建石羊河流域水土资源均衡韧性优化配置模型。统计全情景下农业产量与生态系统服务价值结果,计算农业产量与生态系统服务价值结果集的分布特征,分析平均农业产量、极枯情景农业产量、农业产量变差系数、极枯情景生态系统服务价值等韧性目标,筛选出 127 组最优解,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,石羊河流域水土资源韧性配置中,农业目标(稳定性、鲁棒性、可靠性)与生态目标(鲁棒性)存在强竞争关系,随着农业目标的增大,极枯情景生态系统服务价值从 54.37 亿元逐渐减小到 49.94 亿元,生态韧性变幅达 8.15%;在同一极枯情景生态系统服务价值水平基础上,农业稳定性、鲁棒性、可靠性之间并非完全协同变化,生态鲁棒性水平越高,农业用水量就越低,农业韧性目标间的竞争关系就越显著。在所有情景下,平均农业产量在 1.216×10^6 ~ 1.365×10^6 t 之间,极枯情景农业产量在 6.27×10^5 ~ 9.65×10^5 t 之间,极枯情景农业产量较平均农业产量下降显著。农业产量变差系数在 0.43 ~ 0.58 之间,不同情景下农业产量的离散程度较显著。石羊河流域现有水浇地面积与作物产量存在负相关关系,韧性配置中平均适宜水浇地耕地面积为 1.893×10^5 hm^2,对于现状 2.147×10^5 hm^{2}水浇地,推荐通过轮作休耕形式调整约 11.8% 的耕地规模。

3.2 石羊河流域水土资源韧性配置性能

为进一步分析石羊河流域水土资源韧性配置模型的性能,选取典型平水年(2021 年)作为代表年,构建只考虑代表年来水情景的常规水土资源优化配置模型。分析常规配置模型与韧性配置模型在代表年来水情景与不确定性情景下农业产量与生态系统服务价值结果,进而评价水土资源韧性配置模型与常规模型在各种情景下性能。

3.2.1 代表年来水情景下常规与韧性配置

分别计算石羊河流域水土资源韧性配置方案集与常规水土资源配置下农业产量与生态系统服务价值,结果如图 4 所示。

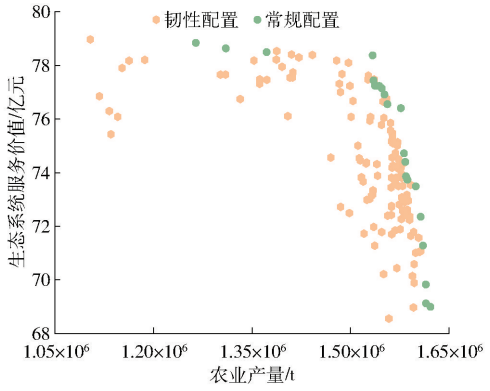


图 4 代表年情景下常规配置与韧性配置结果

Fig. 4 Conventional and resilient allocation results under representative-year scenario

由图 4 可知,代表年条件下,石羊河流域水土资

源常规配置农业产量水平在 1.264×10^6 ~ 1.622×10^6 t 之间，生态系统服务价值水平在 69.00 ~ 78.84 亿元之间。石羊河流域韧性配置代表年农业产量平均值为 1.505×10^6 t，生态系统服务价值平均值为 74.51 亿元。与常规配置相比，水土资源韧性配置结果在代表年情景下存在 3.3×10^4 t 农业产量与 0.62 亿元生态系统服务价值损失，占总产量与总服务价值的 2.1% 与 0.8%。韧性配置与常规配置的差距并不显著，损失在可接受水平范围内。

3.2.2　来水变化情景下常规与韧性配置

从变化环境情景的 45 年可供水量序列中，抽取丰、平、枯情景各 5 年的来水过程作为可供水量序列，代入石羊河流域水土资源韧性配置与常规水土资源配置方案集，获得方案集对 15 组来水序列情景的产量，如图 5 所示。

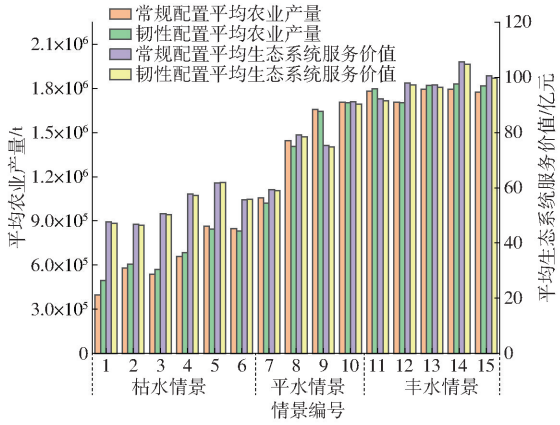


图 5　来水变化情景下常规配置与韧性配置结果

Fig. 5　Conventional and resilient allocation results under variable inflow scenarios

由图 5 可知，在所有情景下，韧性配置方案平均生态系统服务价值较常规配置方案均有不同程度的降低，平水年情景下，韧性配置平均生态服务价值较常规配置方案降低 0.48 亿元，损失 0.89%；在丰水与枯水情景下，损失分别达到 1.17% 与 1.95%。在 5 组平水年情景中，韧性配置仍未表现出显著性能优势，平均农业产量较常规配置降低 2.1×10^4 t，总农业产量降低 1.55%。但在丰水与枯水情景下，韧性配置的农业产量较常规配置获得显著性能提升。丰水年、枯水年韧性配置平均农业产量较常规配置提高 2.3×10^4、4.0×10^4 t，提升幅度达到 1.32% 与 4.90%。

3.3　不确定性下石羊河流域水土资源高效韧性配置方案推荐

为获取石羊河流域水土资源在不确定性情景的韧性配置方案，研究不同决策变量农业与生态配水比例分配在丰、平、枯情景下对应的农业产量与生态系统服务价值关系。其中，农业用水比例与产量的关系结果如图 6 所示。

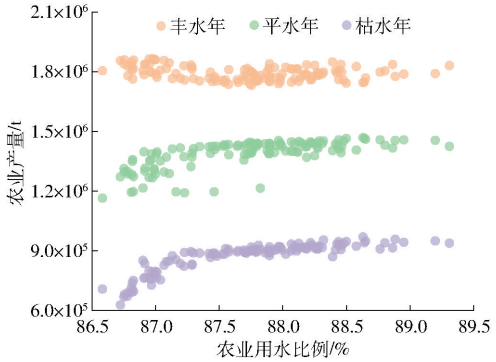


图 6　不同情景下农业用水比例与产量关系

Fig. 6　Relationship between agricultural water-use proportion and yield under different scenarios

由图 6 可知，在丰水年情景下，农业用水比例对作物产量的影响极其有限，作物产量稳定在 1.732×10^6 ~ 1.866×10^6 t 之间。但在平水及枯水情景下，随着农业用水比例的提高，作物产量有较好的提升，作物产量分别在 1.170×10^6 ~ 1.455×10^6 t 以及 6.287×10^5 ~ 9.703×10^5 t 之间。随着农业用水比例的提升，作物产量表现出边际递减效应。对平水年与枯水年的拟合曲线表明，农业用水比例在 87.50% ~ 88.50% 范围内，可以在保证农业产量达到边际效益拐点附近的同时兼顾生态系统用水需求。

以不同情景下来水情景及其对应农业产量、生态系统服务价值关系为基础，绘制来水量与适宜农业用水比例的关系曲线，获得在不同情景下最优农业-生态用水分配推荐方案，结果如图 7 所示。

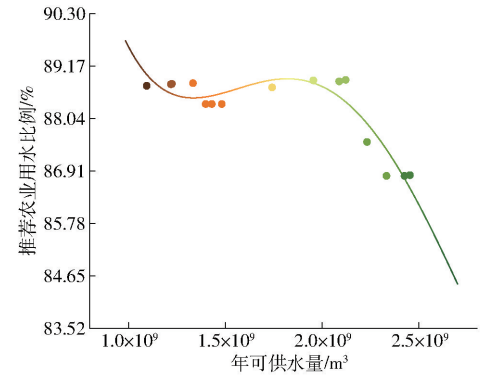


图 7　不同来水情景下农业用水比例推荐方案

Fig. 7　Recommended schemes water-use proportion curve under different inflow scenarios

由图 7 可知，使用 4 次多项式拟合不同来水情景下农业用水推荐比例曲线，拟合曲线决定系数 R^2 为 0.86，表明拟合效果良好。除极端枯水情景外，水土资源韧性配置方案推荐将农业用水比例降至农业-生态总用水量的 89.00% 以下，低于 2021 年石羊河流域农业用水比例的 89.48%。在年可供水量

小于常规平水年 75% 的极端枯水情景,需优先保障农业用水,推荐农业用水比例在 88.50% 以上。在可供水量位于常规平水年 75% ~90% 区间时,此时农业用水已经得到一定程度满足,为兼顾生态鲁棒性需求,推荐农业用水比例 88.00% ~88.50% 为宜。平水年情景下,生态鲁棒性基本可以得到满足,农业用水比例推荐保持 88.50% 左右。丰水年情景下,农业产量出现较为显著的边际效应,推荐农业用水比例为 87.5% 以下,将更多的额外水量分配至生态用水用户。

从所有情景下韧性配置解集对应的配置过程出发,对各农业用户的供水比例与水浇地面积进行统计分析。将解集中决策变量最接近均值的方案作为推荐配置方案,决策变量上四分位数与下四分位数区间作为推荐配置区间,以反映在所有场景中多目标权衡的中心配置水平与可调整的弹性范围。获取凉州区、古浪县、民勤县、金昌市的农业供水分配比例与水浇地耕地面积分配的推荐范围,如表 1 所示。

表 1 石羊河流域农业用户供水比例与耕地面积推荐

Tab. 1 Recommended water-supply proportions and cultivated land areas for agricultural users in Shiyang River Basin

方案	凉州区		古浪县	
	供水比例/%	耕地面积/hm^2	供水比例/%	耕地面积/hm^2
现状配置方案	39.01	7.94×10^4	17.01	4.08×10^4
推荐配置方案	34.71	6.96×10^4	17.92	3.60×10^4
推荐配置区间	[30.91,36.87]	[6.75×10^4,8.16×10^4]	[15.79,20.26]	[3.47×10^4, 4.14×10^4]
方案	民勤县		金昌市	
	供水比例/%	耕地面积/hm^2	供水比例/%	耕地面积/hm^2
现状配置方案	14.63	3.93×10^4	29.34	5.49×10^4
推荐配置方案	16.88	3.45×10^4	30.49	4.98×10^4
推荐配置区间	[15.06,19.71]	[3.34×10^4, 4.35×10^4]	[30.07,30.92]	[4.67×10^4, 6.29×10^4]

由表 1 可知,石羊河流域水资源高效韧性配置方案较常规分配方案调整幅度有限。与常规配置方案相比,水资源韧性配置推荐仅凉州区配水量较现状降低 2.2% ~8.2%,民勤县配水量提高 0.4% ~5.1%,古浪县、金昌市水资源配置方案调整幅度较现状方案保持在较小变动范围内。凉州、古浪、民勤、金昌平均适宜水浇地面积分别为 6.96×10^4、3.60×10^4、3.45×10^4、4.98×10^4 hm^2,推荐在现状基础上以轮作休耕形式调整 12.27%、11.79%、12.03%、9.28% 比例的耕地规模。

4 结论

(1)以石羊河流域为例,提出了一种基于韧性视角的农业-生态水土资源韧性配置模型。与常规优化配置相比,韧性配置农业产量在平水年产生 1.55% 的产量损失,但在极端枯水年与丰水年产量分别提升 4.90% 和 1.32%。

(2)在现有水土资源格局下,当前石羊河流域水资源配置结构相对合理,但现有耕地规模影响了极端枯水情景下水资源转化效率,推荐通过轮作休耕形式调整约 11.8% 的耕地规模,将耕地面积控制在 1.893×10^5 hm^2左右,可在不确定性情景下较好保障农业产出的同时缓解水土资源压力。

(3)根据石羊河流域水土资源韧性配置结果,绘制了不同来水情景下用水比例调控策略曲线。推荐在极端枯水年优先提升农业用水比例高于 88.50% 水平,并在丰水年逐步增加生态用水比例。

参 考 文 献

[1] 刘洪兰,张强,张庭嘉,等. 2023 年河西走廊中部异常高温干旱特征及其成因[J]. 气象学报,2025,83(5):1229 - 1240.
Liu Honglan, Zhang Qiang, Zhang Tingjia, et al. Characteristics and causes of abnormally high temperature and drought in the central Hexi Corridor in 2023[J]. Acta Meteorologica Sinica,2025,83(5):1229 - 1240. (in Chinese)

[2] 王浩,游进军,王婷,等. 新时期水资源调配的关键问题与实施路径[J]. 中国水利,2025(13):8 - 13.
Wang Hao, You Jinjun, Wang Ting, et al. Key issues of analysis and implementation paths for water resources allocation and regulation in the new era[J]. China Water Resources,2025(13):8 - 13. (in Chinese)

[3] Li M, Cao X, Liu D, et al. Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: a multi-dimensional optimization approach[J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107235.

[4] Zhang Z, Guan Q, Zhao B, et al. Multi-objective optimal allocation of agricultural water and land resources in the Heihe River Basin: coupling of climate and land use change[J]. Journal of Hydrology,2025, 653: 132783.

[5] Qin T, Feng J, Li C, et al. Risk assessment and configuration of water and land resources system network in the Huang-Huai-

Hai watershed[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110712.

[6] 靳世鑫,苏承国,黄佳荣,等. 响应生态-经济-社会需求的区域水土资源联合优化配置研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 61 - 73.
Jin Shixin, Su Chengguo, Huang Jiarong, et al. Joint optimal allocation of regional water and land resources in response to ecological - economic - social demands[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 61 - 73. (in Chinese)

[7] Martin-Breen P, Anderies J M. Resilience: a literature review[R]. Brighton: Bellagio Initiative, IDS, 2011.

[8] Hosseini S, Barker K, Ramirez-Marquez J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47 - 61.

[9] Vale L J. The politics of resilient cities: whose resilience and whose city? [J]. Building Research & Information, 2014, 42(2): 191 - 201.

[10] 于强,杨斓,岳德鹏,等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J]. 农业机械学报,2018,49(3):214 - 224.
Yu Qiang, Yang Lan, Yue Depeng, et al. Investigation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 214 - 224. (in Chinese)

[11] 王煜,万芳,王威浩,等. 流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理[J]. 水科学进展,2025,36(2):190 - 203.
Wang Yu, Wan Fang, Wang Weihao, et al. Complex network characteristics and resilience-driving mechanisms of water resource systems in river basin[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 190 - 203. (in Chinese)

[12] 万芳,王煜,王威浩,等. 水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响[J]. 水资源保护,2025,41(1):19 - 26.
Wan Fang, Wang Yu, Wang Weihao, et al. Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 19 - 26. (in Chinese)

[13] 郑小康,王煜,张迪,等. 黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略[J]. 水利学报,2025,56(10):1253 - 1266.
Zheng Xiaokang, Wang Yu, Zhang Di, et al. Driving factors and regulation strategies for resilience of water resources system in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(10): 1253 - 1266. (in Chinese)

[14] 黄生志,闫俊,郭怿,等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. 水资源保护,2025,41(5):258 - 267.
Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 258 - 267. (in Chinese)

[15] 朱兴宇,粟晓玲,胡雪雪,等. 协同调控水-农业-生态的干旱区多水源优化配置[J]. 农业工程学报,2024,40(2):239 - 248.
Zhu Xingyu, Su Xiaoling, Hu Xuexue, et al. Optimal allocation of multiple water sources in arid areas based on water - agriculture - ecology coordinated regulation[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(2): 239 - 248. (in Chinese)

[16] 胡雪雪,粟晓玲,朱兴宇,等. 考虑水转化过程的干旱区内陆河流域适宜灌溉规模[J]. 农业工程学报,2024,40(6):228 - 236.
Hu Xuexue, Su Xiaoling, Zhu Xingyu, et al. Suitable irrigation scale of inland river basin in arid areas considering water transformation process[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(6): 228 - 236. (in Chinese)

[17] 魏征,李道西,柳佳奇,等. 石羊河流域水-作物-生态系统耦合协调度时空演变与调控潜力研究[J]. 农业机械学报,2025,56(8):142 - 151.
Wei Zheng, Li Daoxi, Liu Jiaqi, et al. Spatiotemporal evolution and regulation potential of water - crop - ecosystem coupling coordination degree in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 142 - 151. (in Chinese)

[18] 甄云竹,胡军红,杨茗舒,等. 城市复合公共交通网络韧性评估及恢复策略研究综述[J]. 城市交通,2025,23(4):25 - 39.
Zhen Yunzhu, Hu Junhong, Yang Mingshu, et al. A review of resilience assessment and recovery strategies for urban multimodal public transportation networks[J]. Urban Transport of China, 2025, 23(4): 25 - 39. (in Chinese)

[19] 粟晓玲,康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报,2009,25(11):128 - 132.
Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 128 - 132. (in Chinese)

[20] 张帆,任冲锋,蔡宴朋,等. 基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业机械学报,2021,52(11):297 - 304.
Zhang Fan, Ren Chongfeng, Cai Yanpeng, et al. Optimally allocating of water resources among irrigation districts based on composite multiobjective method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 297 - 304. (in Chinese)

[21] 杨贵羽,李烁阳,常翠,等. 水土资源均衡约束下宁夏引黄灌区水资源高效利用研究[J]. 农业机械学报,2026,57(6):329 - 336,346.
Yang Guiyu, Li Shuoyang, Chang Cui, et al. Efficient utilization of water resources in Ningxia Yellow River Irrigation Area considering water-land resource balance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(6): 329 - 336, 346. (in Chinese)

(下转第 182 页)

environment and economic development[J]. Arid Land Geography,2021,44(6):1810 - 1820. (in Chinese)
[29] Yin C,Zhao W,Fu B, et al. The dual impact of trade on the water - energy - food nexus globally[J]. Nature Sustainability, 2026,9(6):921 - 932.
[30] Duan W,Chen Y,Zou S, et al. Managing the water - climate - food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. Journal of Cleaner Production,2019,220:212 - 224.
[31] Wang X X,Chen Y N,Li Z, et al. Water resources management and dynamic changes in water politics in the transboundary river basins of Central Asia[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(6):3281 - 3299.
[32] Huang J C, Na Y, Guo Y. Spatiotemporal characteristics and driving mechanism of the coupling coordination degree of urbanization and ecological environment in Kazakhstan[J]. Journal of Geographical Sciences,2020,30(11):1802 - 1824.
[33] Ma Y,Li Y,Huang G, et al. Collaborative management of water - energy - food - ecosystems nexus in Central Asia under uncertainty[J]. Water Resources Research,2024,60(3):e2023WR035166.
[34] Lioubimtseva E,Henebry G. Climate and environmental change in arid Central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations [J]. Journal of Arid Environments,2009,73(11):963 - 977.
[35] Qin Y, Abatzoglou J T, Siebert S, et al. Agricultural risks from changing snowmelt[J]. Nature Climate Change,2020,10: 459 - 465.
[36] Liu X, Liu W, Tang Q, et al. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change[J]. Earth's Future, 2022,10: e2021EF002567.
[37] Yalew S G, van Vliet M T H, Gernaat D E H J, et al. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios[J]. Nature Energy,2020,5:794 - 802.
[38] Tripathy K P,Mukherjee S,Mishra A K, et al. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2023,120(28): e2219825120.
[39] Wang X, Duan W, Zou S, et al. Mapping the evolution of the water - energy - food - ecosystem (WEFE) nexus: a comprehensive review of the methods, scales, and sustainability challenges[J]. Geography and Sustainability,2026,7(3): 100447.
[40] 周子朝,孙玮,顾峰雪. 中国水-粮食-生态系统耦合关系及时空分异[J]. 中国农业资源与区划,2026,47(1):92 - 104.
Zhou Zizhao,Sun Wei,Gu Fengxue. Coupling relationships and spatiotemporal variations of water - food - ecology system in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2026,47(1):92 - 104. (in Chinese)

(上接第 161 页)

[22] Xu B, Huang X, Mo R, et al. Integrated real-time flood risk identification, analysis, and diagnosis model framework for a multireservoir system considering temporally and spatially dependent forecast uncertainties[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126679.
[23] Zhang Y, Zhou W, Wang J, et al. Study on the impact of multi-source uncertainty on the operation of inter-basin water transfer projects and adaptive response strategies[J]. Journal of Hydrology, 2025, 660: 133375.
[24] 李霆. 石羊河流域主要农作物水分生产函数及优化灌溉制度的初步研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2005.
Li Ting. Pilot study on water production functions and optimal irrigation schedule of main crops in Shinyang River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
[25] 康绍忠,粟晓玲,杜太生,等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式:以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
[26] Wang Y, Kang S, Li F, et al. Modified water-nitrogen productivity function based on response of water sensitive index to nitrogen for hybrid maize under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106566.
[27] Chen S, Wang S, Shukla M K, et al. Delineation of management zones and optimization of irrigation scheduling to improve irrigation water productivity and revenue in a farmland of Northwest China[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 655 - 677.
[28] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015, 30(8):1243 - 1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8): 1243 - 1254. (in Chinese)
[29] 尚海洋,刘丽娇. 近 20 年石羊河流域生态系统服务价值演化及生态与经济协调发展研究[J]. 生态科学,2024,43(6): 10 - 20.
Shang Haiyang, Liu Lijiao. Research on the evolution of ecosystem service value and coordinated development of ecology and economy in Shiyang River Basin in the past 20 years[J]. Ecological Science, 2024, 43(6): 10 - 20. (in Chinese)
[30] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, PART I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 18(4): 577 - 601.
[31] Jia D, Zhang T, Wu L, et al. Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model[J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130673.