

极端枯水下供需水失衡驱动要素识别与不确定性分析

王友芝^{1,2} 刘姝芳^{1,2} 韩金旭^{1,2} 罗 赟^{1,2} 李强坤^{1,2}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 黄河实验室, 郑州 450003)

摘要: 在极端枯水下, 识别黄河流域供需水失衡破坏因素, 可为流域水资源科学管理提供理论基础, 因此本文采用供需水失衡范围和失衡深度表征供需水失衡程度, 利用主成分分析法识别水文气象、社会经济、水库调度和生态环境对供需水失衡的驱动作用。采用随机分布函数、K-S 和 A-D 方法, 识别、拟合并检验地表引水量和水库下泄水量等驱动因子的随机特性和分布函数。采用三层因子分析方法探究单参数和交互参数对供需水失衡的影响。结果表明: 极端枯水年(1998—2002 年)黄河流域供需水失衡横跨中等程度、相对高程度和高程度; 地表引水量、水库下泄水量对供需水失衡产生主要影响, 方差解释率达 55.005%; 小浪底水库下泄水量对供需水失衡程度影响最大, 地表引水量和万家寨水库下泄水量对供需水失衡程度影响次之。该结果可识别水文气象、社会经济、水库调度和生态环境交互作用下流域供需水失衡的关键要素, 明晰要素不确定性对供需水失衡的影响, 为黄河流域水资源管理提供理论支撑。

关键词: 极端枯水; 黄河流域; 供需水失衡; 主成分分析; 不确定性分析; 敏感性分析

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)04-0391-08 OSID: 

Analysis of Uncertainties and Identification of Impact Factors of Unbalances of Water Supplies and Water Demands under Extreme Dry Years

WANG Youzhi^{1,2} LIU Shufang^{1,2} HAN Jinxu^{1,2} LUO Yun^{1,2} LI Qiangkun^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China
2. Yellow River Laboratory, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aiming to identify impact factors of unbalances of water supplies and water demand (referred to WSD) of Yellow River Basin under extreme dry years to support water resources management, the WSD was measured by ranges and depth of WSD. Besides, responses of WSD on metro-hydrological elements, economic and society, reservoir regulation, ecology and environments were explored by the principal component analysis method (PCA). Moreover, uncertainties of surface water supplies and discharges of reservoirs were measured by stochastic functions that were verified by Kolmogorov-Smirnov test (K-S) and augmented dickey fuller (A-D) approaches. The influences of single and interactive parameters on WSD were studied by three-level factors method. The results showed that WSD of Yellow River Basin ranged from medium, relatively high and high degree. Surface water supplies and discharges of reservoirs had the most impacts on WSD and explanation rate reached about 55.055%. Xiaolangdi reservoir had the biggest impact on WSD, followed by surface water supplies and Wanjiashai reservoir. These results could identify key impact factors of WSD under interactions among hydrometeorology, socioeconomics, reservoir operation and ecological environment. Besides, it could explore impacts of uncertainties on WSD, supporting water resources management of Huanghe River.

Key words: extreme dry years; Yellow River Basin; imbalances between water supplies and water demands; principal component analysis; uncertainty analysis; sensitive analysis

0 引言

黄河流域在我国社会经济发展保障和生态环

境保护方面具有重要意义。水资源是黄河流域社会经济发展和生态环境保护的基本要素, 由于流域水资源短缺, 水资源成为遏制流域社会经

展的主要瓶颈之一^[1-2]。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》对黄河流域水资源利用及社会经济生态发展提出了更高要求。而极端枯水下黄河流域供需水失衡及水资源短缺加剧,极可能引发经济破坏风险。供需水失衡破坏受到水文气象、社会经济、水库调度和生态环境等多重要素影响,各子系统各要素内部及之间反馈作用增加了供需水失衡破坏规律识别的复杂性^[3-4]。因此,研究水文气象-社会经济-水库调度-生态交互作用下供需水失衡破坏规律对黄河流域经济社会可持续发展尤为重要。

流域供需水失衡分析多采用比例法或相减法表征供需水失衡程度,大多集中在流域供需水失衡状态评估,较少涉及供需水失衡驱动要素分析^[5-7]。目前研究主要存在2个问题:①供需水失衡本底标准无明确准则,由于黄河流域本底水资源条件差,即使在平水年流域仍可能面临水资源短缺^[8-9],供需水失衡量化本底基准选择尤为重要。②较难反映流域复杂系统水文气象等复杂性导致的参数不确定性对供需水失衡的影响,目前驱动因素分析常见的方法包括主成分分析法、因子分析法、随机森林等^[10-12],上述方法能表征子系统或因素的影响程度,却较少涉及供需水驱动因素的不确定性分析。敏感性分析方法是一种动态不确定分析方法,参数的不确定性特征直接影响敏感性分析结果,敏感性分析和不确定性分析相结合的方式更为合理^[13-16]。不确定性分析方法包括区间数、模糊数和随机数,区间数能够量化参数变化范围,模糊数能够量化参数简单分布,而随机数能够量化参数复杂分布,在数据量足够的前提下,优先选择随机数量化参数不确定性^[17-25]。

综上,本文构建黄河流域供需水失衡的水文气象-社会经济-水库调度-生态环境指标体系,揭示极端枯水下黄河流域供需水失衡破坏的驱动因素,识别驱动要素不确定性,分析其对供需水失衡程度的敏感性,为极端枯水下黄河流域水资源科学管理提供理论基础。

1 研究方法

1.1 技术路线

技术路线如图1所示。

1.2 方法

1.2.1 极端枯水下黄河流域供需水失衡指数

供需水失衡采用失衡指数表征,为失衡范围和失衡深度的乘积。供需水失衡发生在供水量小于需求量的情况,失衡范围表示供需水失衡涉及的范围,

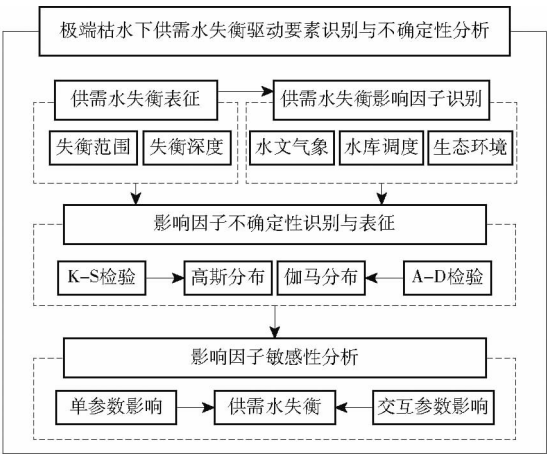


图1 技术路线
Fig.1 Technical roadmap

失衡深度表示供需水失衡的影响程度。黄河流域即使在平水年也存在供需水失衡,极端枯水下供需水失衡程度进一步加重。以多年平均供需水失衡程度为基准,计算极端枯水下黄河流域供需水失衡相对于多年平均供需水失衡指数。计算式为

$$U = U_{\text{range, dry}} U_{\text{depth, dry}} \tag{1}$$

其中

$$U_{\text{range, dry}} = \frac{(W_{\text{demand, dry}} - W_{\text{supply, dry}})}{\sum_{h=1}^H p_h (W_{\text{demand, h}} - W_{\text{supply, h}})} \tag{2}$$

$$U_{\text{depth, dry}} = \frac{(W_{\text{demand, dry}}/W_{\text{supply, dry}})}{\sum_{h=1}^H p_h (W_{\text{demand, h}}/W_{\text{supply, h}})} \tag{3}$$

式中 $U_{\text{range, dry}}$ ——连续和极端枯水年供需水失衡范围

$U_{\text{depth, dry}}$ ——连续和极端枯水年供需水失衡深度

U ——连续和极端枯水年供需水失衡指数

p_h ——不同水文年 h 发生概率,丰水年、平水年和枯水年取 25%、50% 和 25%

$W_{\text{demand, dry}}$ ——枯水年流域需水量

$W_{\text{supply, dry}}$ ——枯水年流域供水量

$W_{\text{demand, h}}$ —— h 水文年流域需水量

$W_{\text{supply, h}}$ —— h 水文年流域供水量

供需水失衡指数为 1.0~2.0, U 越大,表示供需水失衡程度越严重,为方便表述,以 0.2 为标准,将供需水失衡程度划分为 5 个区间^[26],划分结果如表 1 所示。

1.2.2 主成分分析

主成分分析法是考察多个变量间相关性的一种多元统计方法,可通过少数几个因子解释多变量的方差-协方差结构。上述各系统各因素之间可能

表 1 供需水失衡程度划分标准

Tab. 1 Classification criteria of degree between water supply and water demand						
数值	≤1.0	1.0~1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	1.8~2.0
程度	平衡	较低程度失衡	相对低程度失衡	中等程度失衡	相对高程度失衡	高程度失衡

存在相关性,为消除变量间相关性,筛选出线性不相关代表性变量,采用主成分分析对各系统各要素进行分析^[2,12]。

1.2.3 不确定性分析

水资源系统受到水文气象、社会经济及下垫面条件等影响,具有不确定性,不确定性会导致供需水失衡具有变异性。通过识别并定量表征不确定性因素特征和分布函数,进而刻画不确定性因素对供需水失衡结果的影响。常见的不确定表征方法包括随机变量、模糊变量和区间变量,以随机变量为例,常见的分布包括高斯分布和伽马分布等^[27-28]。

在变量分布函数拟合的基础上,进一步校验变量分布的合理性,采用 K-S 和 A-D 相结合的方法对函数拟合优度进行检验。K-S 检验采用累积概率函数,一般头尾分布比较平整,却不能考虑分布头尾的拟合优度。A-D 检验通过增加尾部数据权重,能够弥补 K-S 的不足,显著性水平设为 0.05。

1.2.4 三层因子分析方法

三层因子分析方法通过探究单因素和交互因素遍历系统响应,揭示单个或交互因素对供需水失衡的影响。包括因素和水平挑选,以 4 种因素和 3 种水平为例,传统方法需设计 81 组试验,而三层因子分析将 81 组试验减少到 9 组试验,能极大程度降低工作量,提高计算效率。结合主成分分析法得到的主要影响因子和不确定性分析中影响因子的高、中、低 3 种水平,完成试验组合设计。三层因子分析方法中单变量参数的影响计算公式见文献[14]。

2 研究区域与数据

黄河流域在我国发展大局和现代化建设全局中具有举足轻重的地位,黄河水资源支撑了流域九省区的社会经济发展,然而水资源一直是遏制流域发

展的制约因素^[1]。极端枯水下黄河流域水资源短缺问题更为突出,可能造成社会经济生态损失风险,识别供需水影响要素,量化因素对供需水失衡的影响程度,对极端枯下水资源调控具有重要研究意义。研究区域如图 2 所示。

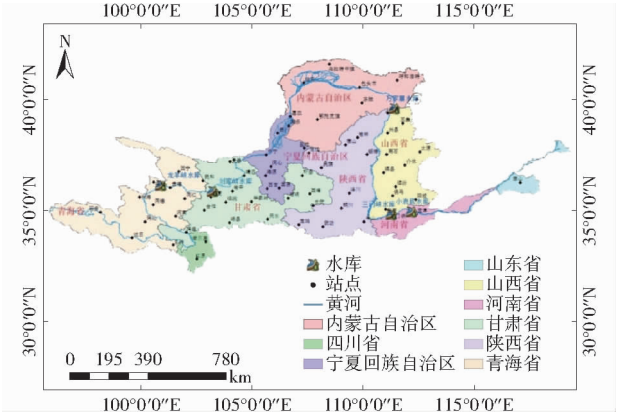


图 2 研究区域
Fig. 2 Study area

水文气象数据来自中国气象数据网站(<https://m.data.cma.cn/>),潜在蒸散发采用 Hargreaves 公式计算,主要基于气温计算。社会经济数据和生态环境数据来自黄河水资源公报,五大水库年末蓄水量变化量和下泄水量来自黄河水资源公报和实地调研。数据时间尺度为 1998—2002 年。

3 结果分析

3.1 极端枯水下黄河流域供需水失衡分析

采用供需水失衡范围、深度和程度表征 1998—2002 年供需水失衡情况,结果如图 3 所示。

图 3 结果表明,供需水失衡范围为 1.35 ~ 1.77,失衡深度为 1.03 ~ 1.08,失衡程度为 1.40 ~ 1.91。1998—2002 年供需水失衡范围、深度和程度呈增加趋势,原因在于随着干旱加剧和累积,水资源

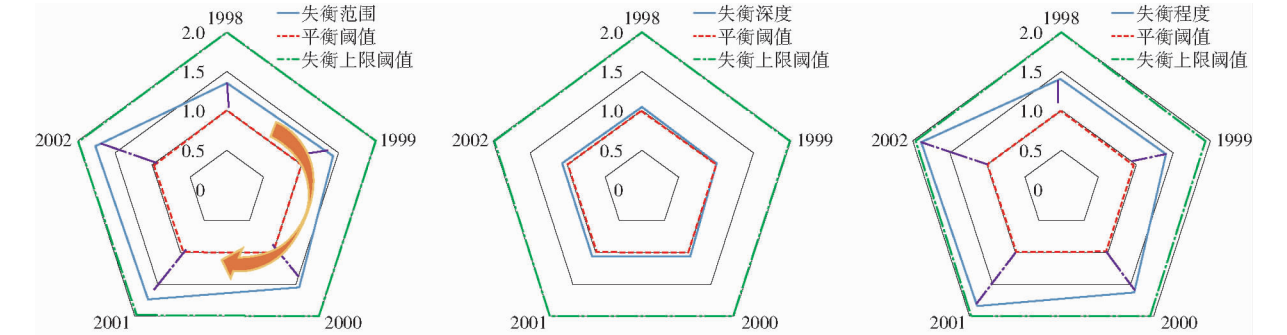


图 3 1998—2002 年供需水失衡范围、深度和程度

Fig. 3 Unbalance range, depth and degree between water supply and water demand from 1998 to 2002

短缺量逐年增加。

相较于多年平均供需水失衡范围,极端枯水下供需水失衡范围为相对低程度失衡和相对高程度失衡;相较于多年平均失衡深度,极端枯水下失衡深度为相对低程度失衡;失衡范围和失衡深度叠加后失衡程度为中等程度和相对高程度失衡。供需水失衡程度呈现时间累加现象,原因在于随着人口增长、社会经济发展、产业规模扩增等原因,生活用水和工业用水需水侧水量增加,进而导致供需水失衡程度增加。虽然农业面积增加,但由于水资源短缺,农业供水保证率低,农业用水并未呈现增加趋势。

3.2 极端枯水下黄河流域供需水失衡影响因子辨识

黄河流域供需水失衡指标体系构建从供需水双

侧角度开展。供水侧主要为直接或间接影响流域及区域可利用水量的要素,包括天然径流、引水量和水库调度水量、气温、降水量、蒸散发、泥沙、污染物等。天然径流表征了自然条件水资源可利用程度,水库调度水量则为人类活动影响下可利用水量,引水量是直接用于区域的三产水量。气温、降水、蒸散发等气象因素影响天然径流量,黄河流域泥沙和污染物问题并存,泥沙和污染物增加了水质型缺水风险。需水侧为涵盖河道外用水部门的水量,包括农业用水、工业用水、生活用水和生态用水。

将上述要素归类到构建水文气象-社会经济-水库调度-生态环境体系,指标时间序列(1998—2002年)如图4所示。

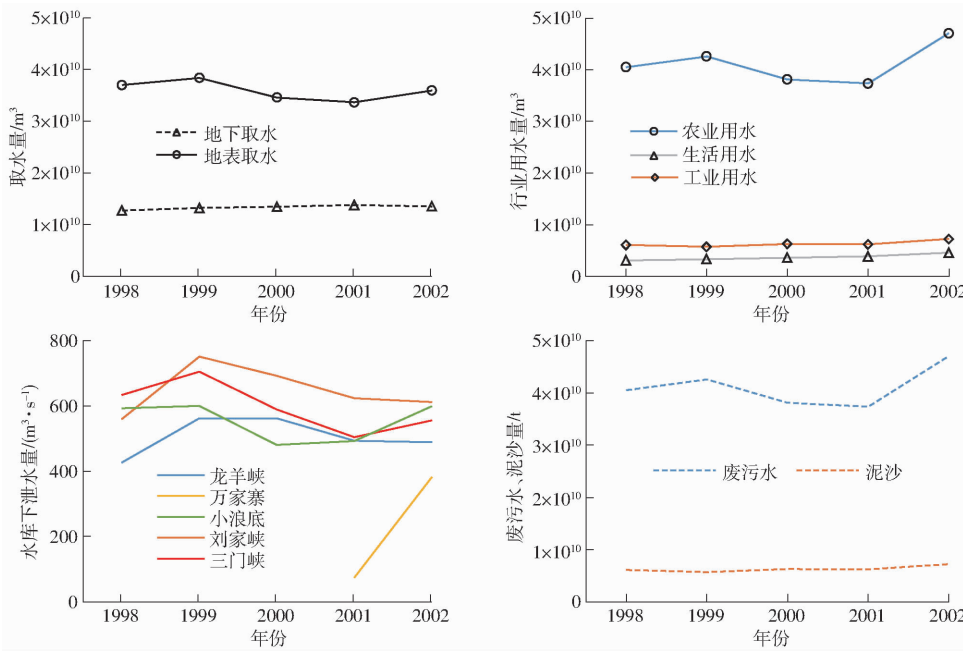


图4 1998—2002年黄河流域取水量、行业用水量、水库下泄水量、废污水量、泥沙量

Fig. 4 Water withdrawal, water usages of industries, discharges of reservoirs, wastewater and sediment

图4结果表明,从供水侧角度展开,1998—2002年黄河流域地表引水量呈先减后增趋势,与径流变化趋势较为一致;龙羊峡水库、刘家峡水库和小浪底水库下泄水量呈现先增后减后增趋势;废污水量呈现类似的变化趋势。从需水侧角度展开,工业用水和生活用水稳步增长,而农业用水与地表引水、水库下泄水量呈现较为一致的变化趋势。这说明水库下泄水量和地表引水量决定了流域可利用水量,水库联合调度保障了流域三产用水。

使用SPSS软件,进行供需水失衡影响程度的主成分分析。Bartlett球度检验统计量为214.7,适合做因子分析。检验 P 值接近0,表明18个变量之间有较强的相关关系,KMO统计量为0.59,大于0.5,可以做因子分析。采用主成分分析法,识别出2个主成分,特征值分别为55.005%和20.775%,累积

贡献率为75.780%,说明前2个主成分基本包含18个指标信息。第一主成分主要指标为地表引水量、径流量、龙羊峡水库下泄水量、刘家峡水库下泄水量、万家寨水库下泄水量、小浪底水库下泄水量和废污水量,该指标主要反映供水量特征;第二主成分主要指标为农业用水量和生活用水量,主要反映用水量特征。主成解释释方差如表2所示。

3.3 影响因子不确定性识别

通过黄河流域供需水失衡程度与第一主成分因素相关性分析可知,流域供需水失衡与地表引水量和刘家峡水库、万家寨水库、小浪底水库下泄水量具有高度相关性。通过以上因素历史数据分析可知,地表引水量和刘家峡水库、万家寨水库、小浪底水库下泄水量具有随机特征。为研究不确定变量对供需水失衡程度的影响,对随机变量进行分布拟合,并采

表 2 主成分解释方差

Tab.2 Explanation variations of principal component

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	合计	方差	累积方	合计	方差	累积方
		解释率/%	差解释率/%		解释率/%	差解释率/%
1	6.601	55.005	55.005	6.601	55.005	55.005
2	2.493	20.775	75.780	2.493	20.775	75.780
3	0.868	7.232	83.012			
4	0.727	6.062	89.074			
5	0.599	4.995	94.070			
6	0.341	2.838	96.908			
7	0.151	1.261	98.169			
8	0.095	0.791	98.959			
9	0.063	0.522	99.482			
10	0.047	0.393	99.874			
11	0.010	0.086	99.960			
12	0.005	0.040	100			

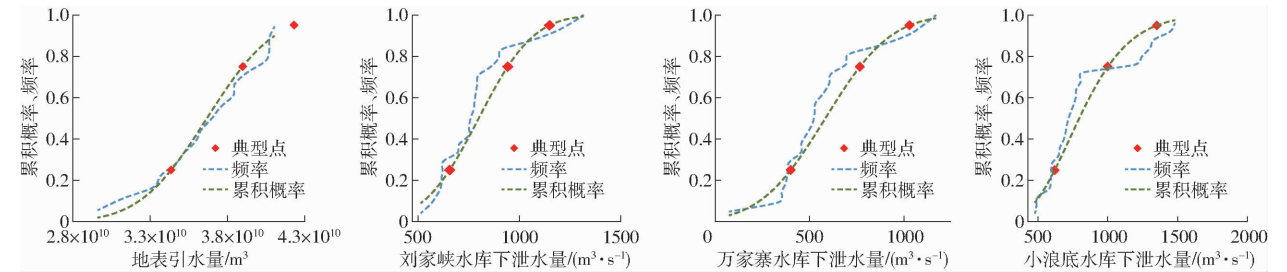


图 5 地表引水量和刘家峡、万家寨、小浪底水库下泄水量累积概率、频率和典型点

Fig.5 Cumulative probability, frequency, and typical points of discharge of surface water, Liujiaxia reservoir, Wanjiashai reservoir and Xiaolangdi reservoir

表 3 随机变量的 K-S 和 A-D 检验结果

Tab.3 K-S and A-D tests of stochastic variables

随机变量	分布函数	假设检验		累积概率		
		K-S 检验	A-D 检验	0.25	0.75	0.95
地表引水量/ m^3	高斯分布	显著	显著	3.44×10^{10}	3.90×10^{10}	4.23×10^{10}
刘家峡水库下泄水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	高斯分布	显著	显著	655	942	1 149
万家寨水库下泄水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	高斯分布	显著	显著	400	766	1 029
小浪底水库下泄水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	伽马分布	显著	显著	622	1 003	1 355

值,分别为地表引水量(S_w)、刘家峡水库下泄水量(L_{jx})、万家寨水库下泄水量(W_{js})、小浪底水库下泄水量(X_{ld})。通过分析可获得单参数或交互参数对供需水失衡的影响,结果如图 6 所示。

图 6 结果表明,单参数影响分析中,小浪底水库下泄水量对供需水失衡程度影响最大(0.48),其次是刘家峡水库下泄水量(0.12)、地表引水量(0.09)和万家寨水库下泄水量(0.08);交互参数影响中,地表引水量和万家寨水库下泄水量影响最大(0.30),其次是地表引水量和刘家峡水库下泄水量(0.24),刘家峡水库和万家寨水库下泄水量(0.24)。单参数影响中,小浪底水库下泄水量影响最大,原因在于黄河下游是流域农业、人口和产业最

用 K-S 和 A-D 相结合的方法对随机变量分布进行拟合优度检验。结果如图 5 和表 3 所示。

图 5 结果表明,地表引水量和刘家峡水库、万家寨水库、小浪底水库下泄水量累积概率和频率表现为较好的一致性,K-S 和 A-D 检验均通过 0.05 显著性检验,说明变量分布函数的拟合效果较好。为验证地表引水量、水库下泄水量对供需水失衡程度的影响,采用低水平、中水平和高水平,分析单变量和交互变量对供需水失衡程度影响。分别取 0.25、0.75 和 0.95 表征参数的低、中、高水平。

3.4 敏感性分析

采用三层次因子分析方法分析供需水失衡对高相关性因素的敏感程度。因素选择地表引水量,刘家峡水库下泄水量、万家寨水库下泄水量、小浪底水库下泄水量;因素水平设置为高、中、低,分别基于随机变量分布反函数求得不同累积频率下自变量

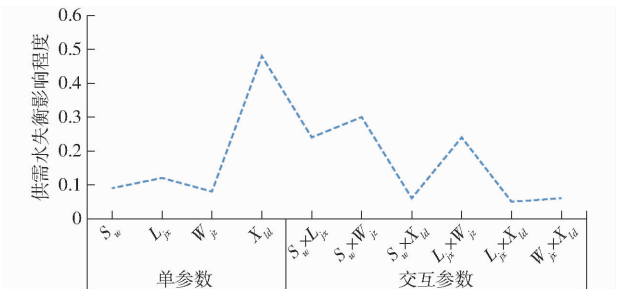


图 6 单变量和交互变量对供需水失衡影响程度

Fig.6 Influence degrees of single and interactive variables on unbalance degrees between water supplies and water demands

为密集的区域,需水量较大,而小浪底水库控制着流域下游的可利用水量;刘家峡水库控制着黄河上游水量,黄河上游宁蒙灌区主要以灌区农业需水为主,需

水量较大,水资源短缺较为严重,刘家峡水库下泄可以在一定程度上减缓农业缺水。交互参数影响中,相较于水库下泄水量交互作用,地表引水量和水库下泄水量交互作用影响相对较大,原因在于地表引水是直接用于生活、工业和农业用水,而水库下泄水量除三产用水外,还承担着发电、调水调沙、防洪防凌等作用,且水库联合调度应考虑综合效益最优,使得水库下泄水量交互作用对供需水失衡影响相对较小。

4 讨论

4.1 供需水失衡指数构建优势

黄河流域供需水即使在平水年也不平衡,存在水资源短缺与供需水失衡。连续枯水年和极端枯水年则加剧了供需水失衡程度,然而供需水失衡程度衡量因为选取的基准年不同而存在差异。因此,以极端枯水下供需水失衡程度为基准,与以多年平均供需水失衡程度为基准的供需水失衡程度进行比较,以凸显本文供需水失衡指数构建优势,结果如表 4 所示。

表 4 多年平均值和枯水年值为基准的供需水失衡程度
Tab.4 Imbalance degrees between water supplies and water demands with different criterions of standard value cross dry, normal and wet years as well as dry years

年份	多年平均值为基准			枯水年值为基准		
	失衡深度	失衡范围	失衡程度	失衡深度	失衡范围	失衡程度
1998	1.04	1.35	1.40	0.87	0.98	0.85
1999	1.03	1.41	1.45	0.90	0.97	0.88
2000	1.06	1.54	1.63	0.99	1.00	0.99
2001	1.08	1.72	1.85	1.10	1.02	1.12
2002	1.08	1.77	1.91	1.14	1.02	1.16

表 4 结果表明,相较于极端枯水年值为基准供需水失衡程度,本文构建的多年平均值为基准的供需水失衡程度能够涵盖丰水年、平水年和枯水年平均情况,更能反映流域真实供需水情况,量化指标更为合理。以 1998 年为例,以枯水年值为基准,供需水失衡指数小于 1.0,表明供需水失衡未发生,以多年平均值为基准,供需水失衡发生,符合实际情况。此外,相较于单一的供需水失衡深度和失衡范围,供需水失衡程度能够体现二维交互作用下供需水失衡,具有更为明显的优势。

4.2 不确定性与敏感性分析结合优势

黄河流域水资源系统受到水文气象、径流等影响,具有不确定性,不确定性分析对于系统输出结果具有较大影响。本文采用高斯分布函数和伽马分布函数量化地表水量和水库下泄水量的随机不确定性,相较于确定数、其他区间数和模糊数等不确定性表征方法,能够反映更多信息,模拟精度更高;而不确定性参数对于系统输出的影响分析需要基于构建大量情景,分析工作量繁琐,而结合敏感性分析中三层因子分析,通过选择典型点,分析代表性点对系统的敏感性能够提高工作效率,为更为有效的手段。另一方面,三层因子分析中典型点选对敏感性分析的结果较为重要,通过量化并检验随机变量的不确定性分布,基于随机分布选取典型点,能够提高敏感性分析精度。因此,不确定性方法与敏感性方法结合,能够实现不确定性变量的精准模拟,提高敏感性分析精度和计算效率,有效识别不确定性变量对系统输出的影响。

5 结束语

构建了供需水失衡深度和失衡范围量化极端枯水下黄河流域供需水失衡程度;采用主成分分析法探究流域水文气象-社会经济-水库调度-生态环境指标对供需水失衡的影响;采用随机分布拟合了主要参数的分布函数,采用三层因子分析法揭示主要影响因子的敏感性。结果表明:极端枯水年(1998—2002 年)黄河流域供需水失衡横跨中等程度、相对高程度和高程度,呈现一定的时间累加趋势。水文气象-社会经济-水库调度-生态环境指标中,水库下泄水量和地表引水量等方差解释率达到 55.005%,能有效代表系统指标。黄河干流水库下泄水量、地表引水量具有随机特性,而随机性会影响供需水失衡程度,小浪底水库下泄水量对供需水失衡程度影响较大,地表引水量和万家寨水库下泄水量对供需水影响程度较大。以“指标构建-影响因素分析-不确定性分析-敏感性分析”为主线研究了极端枯水下黄河流域供需水失衡破坏驱动要素,可为流域水资源科学管理提供理论支撑。另外,供需水失衡演变分析能够为未来条件下水资源管理提供预警。

参 考 文 献

[1] NIU Chen, WANG Xuebin, CHAN Jianxia, et al. Integrated model for optimal scheduling and allocation of water resources considering fairness and efficiency: a case study of the Yellow River Basin[J/OL]. Journal of Hydrology, 2023, 626. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130236.

[2] HAN Xinxueqi, HUA En, GUAN Jiajie, et al. Development of a method to assess synergy and competition for water use among water-energy-food nexus in the Yellow River Basin: water quantity-quality dimensions[J]. Journal of Hydrology, 2024, 639:

131607.

[3] 赵勇,何帆,何国华,等. 全新视角下黄河断流再审视与现状缺水识别[J]. 人民黄河,2020,42(4):42–46.
ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Review the phenomenon of Yellow River cutoff from a whole perspective and identification of current water shortage[J]. Yellow River, 2020,42(4):42–46. (in Chinese)

[4] 卡宇航,屈博,江恩慧,等. 黄河流域水资源-生态-社会系统耦合协调分析[J]. 人民黄河,2024,46(10):49–61.
BIAN Yuhang, QU Bo, JIANG Enhui, et al. Coupling coordination analysis of water resources–ecology–society system in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024,46(10):49–61. (in Chinese)

[5] LIU Bailu, ZHOU Yan, CUI Yaoping, et al. Exacerbating water shortage induced by continuous expansion of surface artificial water bodies in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydrology,2024,633:130979.

[6] 王晓宇,袁汝华,王维. 新形势下黄河流域水资源配置 SD 模型构建与仿真[J]. 生态经济,2024,40(2):181–189,90.
WANG Xiaoyu, YUAN Ruhua, WANG Wei. Construction and simulation of water resources allocation SD model in the Yellow River Basin under the new situation[J]. Ecological Economy, 2024,40(2):181–189,90. (in Chinese)

[7] 孙思奥,汤秋鸿. 黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J]. 资源科学,2020,42(12):2261–2273.
SUN Siao, TANG QiuHong. Spatiotemporal patterns a driving factors of water resources use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020,42(12):2261–2273. (in Chinese)

[8] 陆中桂,康哲,李巍,等. 水量-水质-生态需水综合视角下黄河流域水稀缺评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):73–81.
LU Zhonggui, KANG Zhe, LI Wei, et al. Water scarcity assessment in the Yellow River Basin from comprehensive perspective of water quantity–water quality–ecology water demand[J]. Water Resources Protection, 2024,40(4):73–81. (in Chinese)

[9] 吕铖,吕素冰,焦天一,等. 河南省黄河流域水资源-经济社会-生态环境协调发展评价及驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电,2024(12):1–12.
Lǚ Cheng, Lǚ Subing, JIAO Tianyi, et al. Evaluation and driving factors of coordinated development of water resources, economy society and ecological environment in the Yellow River Bain of Henan Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12):1–12. (in Chinese)

[10] 李宁,汪丽娜. 基于随机森林回归算法的用水总量影响因素解析——以广东省为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2021,53(1):78–84.
LI Ning, WANG Li’na. An analysis of the factors in total water consumption based on random forest regression algorithm: a case study of Guangdong Province[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2021,53(1):78–84. (in Chinese)

[11] 曹烨,邹振东,陈文磊,等. 基于因子分析的深圳市水资源与能源安全形势分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2018,54(6):1346–1350.
CAO Ye, ZOU Zhendong, CHEN Wenlei, et al. Analysis of water resources and energy security in Shenzhen based on factor analysis method[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018,54(6):1346–1350. (in Chinese)

[12] 王世威,范文波,马军勇,等. 基于主成分及信息熵的额敏灌区农业用水特征[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文),2024,63(3):103–112.
WANG Shiwei, FAN Wenbo, MA Junyong, et al. Characteristics of agricultural water use in Emin irrigation area based on principal component and information entropy[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2024,63(3):103–112. (in Chinese)

[13] WANG Youzhi, LI Zhong, GUO Shanshan, et al. Risk-based fuzzy boundary interval two-stage stochastic water resources management programming approach under uncertainty[J]. Journal of Hydrology,2022,582:124553.

[14] ZHANG Junlong, LI Yongping, HUANG Guohe, et al. Assessment of parameter uncertainty in hydrological model using a Markov-Chain-Monte-Carlo-based multilevel-factorial analysis method[J]. Journal of Hydrology,2016,538:471–486.

[15] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233–240.
DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(3):233–240. (in Chinese)

[16] LI Ruihuan, GUO Ping. Regional water use structure optimization under multiple uncertainties based on water resources vulnerability analysis[J]. Water Resources Management,2018,32:1827–1847.

[17] WANG Youzhi, LIU Liu, GUO Ping, et al. An inexact irrigation water allocation optimization model under climate change [J]. Stochastic. Environment. Resources and Risk Assessment, 2019,33(1):271–285.

[18] GAO Yihan, ZHOU Minpei, YU Zhongbo, et al. Climate change impacts on seasonal runoff in the source region of the Yellow River: insights from CORDEX experiments with uncertainty analysis[J]. Journal of Hydrology,2024,645:132132.

[19] YANG Ruifeng, HE Liuyue, ZHU Dajiong, et al. Optimizing the management of multiple water resources in irrigation area under uncertainty: a novel scenario-based multi-objective fuzzy-credibility constrained programming model [J]. Journal of Hydrology,2024,640:131633.

[20] 金菊良,周亮广,崔毅,等. 水资源集对系统中的对立关系分析[J]. 水利学报,2024,55(6):666–674.
JIN Juliang, ZHOU Lianguang, CUI Yi, et al. Analysis of the opposition relationship in water resource set pair system[J].

Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(6):666–674. (in Chinese)

[21] LIU Yangqi, LIN Yifan, HUO Zailin, et al. Spatio-temporal variation of irrigation water requirements for wheat and maize in the Yellow River Basin, China, 1974—2017[J]. Agricultural Water Management,2022, 262:107451.

[22] NAFEES M, AHMAD F, BUTT M, et al. Effects of water shortage in Kabul River network on the plain areas of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan[J]. Environmental Monitoring & Assessment an International Journal, 2018,359. doi:10. 1007/S10661-018-6730-3.

[23] 黄彬彬,鄢小令,李光锦,等. 基于投入产出模型的萍乡市水资源短缺风险的经济评估[J]. 人民珠江,2018,39(11): 79–82,88.
HUANG Binbin, YAN Xiaoling, LI Guangjin, et al. Economic loss assessment of water resources shortage in Pingxiang City [J]. Pearl River, 2018,39(11):79–82,88. (in Chinese)

[24] TIAN Guiliang, HAN Xiaosheng, ZHANG Chen, et al. Virtual water flows embodied in international and interprovincial trade of Yellow River Basin: a multiregional input-output analysis[J]. Sustainability, 2020,12(3):su12031251.

[25] ZHONG Shen, LI Jian, WEN Hongmei, et al. Spatial spillover effect of green water use efficiency and its influence factor: new evidence from Yellow River economic belt, China[J]. Environmental Science, Economics ,2021,3: 188354.

[26] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报,2008,39(4):440–447.
ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(4):440–447. (in Chinese)

[27] 王煜,郑小康,彭少明,等. 黄河流域水资源配置研究与展望[J]. 人民黄河,2024,46(9):18–27.
WANG Yu, ZHENG Xiaokang, PENG Shaoming, et al. Research and prospect of water resources allocation in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024,46(9):18–27. (in Chinese)

[28] 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)

(上接第 368 页)

[26] 杨洋,温兴,马强龙,等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报,2022,38(6):34–43.
YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 38(6): 34–43. (in Chinese)

[27] 彭晓燕,谢浩,黄晶. 无人驾驶汽车局部路径规划算法研究[J]. 汽车工程,2020,42(1):1–10.
PENG Xiaoyan, XIE Hao, HUANG Jing. Research on local path planning algorithm for unmanned vehicles[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 1–10. (in Chinese)

[28] QIU Q, FAN Z Q, MENG Z J, et al. Extended Ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 40–50.

[29] 徐圣林,朱立成,韩振浩,等. 作物表型信息获取机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):388–399.
XU Shenglin, ZHU Licheng, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of robot chassis for obtaining crop phenotypic information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2): 388–399. (in Chinese)

[30] 马悦琦,迟瑞娟,赵彦涛,等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报,2023, 54(增刊1):1–8,102.
MA Yueqi, CHI Ruijuan, ZHAO Yantao, et al. Optimization method of LQR curve path tracking controller for unmanned rice transplanter based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 1–8,102. (in Chinese)

[31] 宋春生,于传超,张锦光,等. 基于遗传算法的复杂双层磁悬浮精密隔振系统 LQR 控制研究[J]. 振动与冲击,2016, 35(16):99–105.
SONG Chunsheng, YU Chuanchao, ZHANG Jinguang, et al. LQR control of a complex two-stage magnetic suspension active precise isolation system based on the genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16):99–105. (in Chinese)

[32] 陈满,施印炎,汪小岳,等. 冬小麦精准追肥机专家决策系统[J]. 农业机械学报,2015,46(7):17–22.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Expert decision system of precision fertilizer for winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 17–22. (in Chinese)