

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221426

湖北省水足迹特征及变化驱动力

袁艳斌¹, 连怡雯¹, 袁晓辉², 周 晗¹, 董 恒¹, 张晓盼¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 水足迹评价对区域水资源合理开发具有指导意义, 基于投入产出法核算湖北省 2007~2017 年水足迹, 并联合结构分解模型分析水足迹变化的驱动因素。结果表明, 2007~2017 年湖北省虚拟水含量下降显著, 用水效率提升, 而水足迹总量呈先上升后下降的趋势, 净增长 19.9%, 主要增长部门是建筑业和服务业; 技术水平和经济规模分别是抑制和促进水足迹增长的主要因素, 但其对水足迹变化的影响逐渐减弱, 均表现削减作用。2007~2017 年部门联系由正向驱动变为负向驱动, 对水足迹的抑制作用得以显现, 可见优化产业生产流程有助于区域开展节水; 驱动因素对不同部门的影响表现出异质性, 产业结构的调整抑制了农业等高耗水部门水足迹增长, 而促进了建筑业、服务业水足迹增长。未来服务业等生产高附加值产品的部门产业规模和居民需求呈增长趋势, 应及时将节水技术发展转向此类部门。

关键词: 投入产出; 水足迹; 虚拟水; 结构分解; 驱动因素

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0040-05

1 概况

湖北省位于我国中部, 受气候变化影响, 水资源时空分布不均, 丰水年和枯水年水资源量差异较大^[1], 同时还存在水质型缺水问题, 部分湖泊河流的水生态问题严峻。虚拟水表示商品或服务生产过程所需的水量^[2], 提供社会经济系统中水资源分配和循环的路径; 水足迹以虚拟水理论为基础, 是指区域消费产品和服务的总水量^[3]。水足迹能够全面量化人类活动对水资源的影响, 已成为水资源管理的重要研究领域^[4]。基于投入产出的水足迹核算方法, 使用经济部门的货币交易数据, 可有效解决工业和服务业产品水足迹核算困难的问题。目前湖北省水足迹研究较少, 从消费的角度全面衡量区域水资源消耗状况有利于更合理地使用水资源。鉴此, 本文采用投入产出法揭示湖北省水足迹变化特征, 并联合结构分解模型分析水足迹变化的驱动因素, 旨在为水资源管理提供参考, 以保障区域水资源可持续发展。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 区域水足迹核算

采用扩展的水资源投入产出模型计算湖北省水足迹^[5], 矩阵形式的投入产出模型表达式为:

$$(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}}_i) \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{Y} = \mathbf{X} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A} = [a_{ij}]$; $a_{ij} = x_{ij}/x_j$ (2)

式中, $\mathbf{X} = [x_i]$ 为总产出的列向量; $\mathbf{Y} = [y_i]$ 为最终需求的列向量; \mathbf{A} 为直接消耗系数矩阵; $\hat{\mathbf{M}}_i$ 为进口系数 M_i 的对角矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; x_{ij} 为部门 i 向部门 j 的投入; x_j 为部门 j 的总产出。

最终需求和相应的直接和间接生产之间的关系通过 Leontief 逆矩阵 \mathbf{L} 建立, 即:

$$\mathbf{L} = [\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{M}}_i) \mathbf{A}]^{-1}; \mathbf{L} = [l_{ij}] \quad (3)$$

式中, l_{ij} 为部门 j 产生单位货币最终需求对部门 i 的直接和间接消耗总和。

直接用水强度 \mathbf{W} 是单位货币总产出的直接用水量, 虚拟水含量 \mathbf{D} 是产生单位货币最终需求所需的总水量, 直接用水强度矩阵与 Leontief 逆

收稿日期: 2022-07-05, 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079101, 42001018); 国家重点研发计划(2021YFC3200305, 2021YFC3200405)

作者简介: 袁艳斌(1970-), 男, 博士、教授, 研究方向为水资源优化配置、资源环境信息系统, E-mail: yuanyanbin@whut.edu.cn

通讯作者: 袁晓辉(1971-), 男, 博士、教授, 研究方向为水资源优化配置, E-mail: yxh71@163.com

矩阵相乘可以得到虚拟水含量,即:

$$D = WL; D = [d_j] \quad (4)$$

$$w_j = \omega_j / x_j; W = [w_j] \quad (5)$$

式中, w_j 为部门 j 的直接用水强度; ω_j 为部门 j 的用水量; d_j 为部门 j 的虚拟水含量。

一个区域的水足迹 W_{WF} 包括内部水足迹 T 和外部水足迹 S , 分别指使用区域内和区域外水资源生产研究区域内居民消费的产品和服务。

$$T = [t_j]; t_j = d_j(1 - M_j)f_j \quad (6)$$

$$S = [s_j]$$

$$s_j = s_j^f + s_j^m = d_j M_j f_j + \left(\sum_i d_i m_{ij} \right) v_j \quad (7)$$

$$v_j = f_j / (f_j + e_j) \quad (8)$$

式中, M_j 为部门进口系数; f_j 为部门 j 产品和服务消费; s_j 为外部水足迹, 包括直接用于区域内最终消费 s_j^f 和中间投入消耗且最终用于区域内消费 s_j^m ; m_{ij} 为进口产品的中间使用, 用 \hat{M}_i 乘以中间消耗矩阵 $X_d = [x_{ij}]$ 得到; v_j 为进口产品区域内消费系数; e_j 为部门 j 的出口。

2.2 结构分解分析

使用结构分解法分析水足迹变化的驱动因素, 总水足迹 W_{WF} 的矩阵形式可写为:

$$W_{WF} = D\hat{F} + DM\hat{V} \quad (9)$$

式中, \hat{F} 为 f_j 的对角矩阵; $M = [m_{ij}]$ 为进口产品中间使用的矩阵; \hat{V} 为 v_j 的对角矩阵。

根据投入产出模型将虚拟水含量分解为直接用水强度和 Leontief 逆矩阵, 分别表征技术进步和部门联系变化对水足迹的影响; 考虑产业结构变动和人口影响, 引入区域产品和服务的总消费 f 和人口因素 p ; 外部水足迹受进口和出口影响, 常被忽略, 导致水足迹分解存在误差, 因此将水足迹分解为:

$$W_{WF} = WL[(\hat{F}/f)(f/p)p + M\hat{V}] \quad (10)$$

式中, W 为技术水平 (W) 矩阵; L 为部门联系矩阵 (L); \hat{F}/f 为部门需求量占需求总量的比例, 代表产业结构 (S); f/p 为人均需求量, 代表经济规模 (G); p 为人口数量, 代表人口效应 (P); M 为进口效应 (I); \hat{V} 为出口效应 (E)。

总水足迹变化量 ΔW_{WF} 可分解为:

$$\Delta W_{WF} = \Delta W + \Delta L + \Delta S + \Delta G + \Delta P + \Delta I + \Delta E \quad (11)$$

用下标“0”代表基准年, 下标“1”代表当年, 以技术水平为例, W_1 表示当年技术水平, W_0 表示基准年技术水平, ΔW 表示技术水平变化对水足迹的影响。采用两级分解法测算各驱动因素的影

响^[6], 研究期内每个因素对 W_{WF} 变化的影响为:

$$\Delta W = [(W_1 - W_0)L_0(S_0G_0P_0 + I_0E_0) + (W_1 - W_0)L_1(S_1G_1P_1 + I_1E_1)]/2 \quad (12)$$

$$\Delta L = [W_1(L_1 - L_0)(S_0G_0P_0 + I_0E_0) + W_0(L_1 - L_0)(S_1G_1P_1 + I_1E_1)]/2 \quad (13)$$

$$\Delta S = [W_1L_1(S_2 - S_0)G_0P_0 + W_0L_0(S_2 - S_0)G_1P_1]/2 \quad (14)$$

$$\Delta G = [W_1L_1S_1(G_1 - G_0)P_0 + W_0L_0S_0(G_1 - G_0)P_1]/2 \quad (15)$$

$$\Delta P = [W_1L_1S_1G_1(P_1 - P_0) + W_0L_0S_0G_0(P_1 - P_0)]/2 \quad (16)$$

$$\Delta I = [W_1L_1(I_1 - I_0)E_0 + W_0L_0(I_1 - I_0)E_1]/2 \quad (17)$$

$$\Delta E = [W_1L_1I_1(E_1 - E_0) + W_0L_0I_0(E_1 - E_0)]/2 \quad (18)$$

2.3 数据来源与处理

投入产出表来源于湖北省统计局, 参照国民经济行业分类合并为 25 个部门, 将 2007、2012 年投入产出表调整为 2017 年的不变价格。农业取水量来源于《湖北省水资源公报》。各工业部门取水量来源于《中国经济普查年鉴(2008)》, 根据 2008 年及研究期各工业部门总产值比率估算相应取水量, 参考工业用水总量做出调整。建筑业及第三产业用水量按照投入产出表中水的生产和供应部门的中间投入比例进行分配。

3 结果与分析

3.1 湖北省虚拟水含量分析

以投入产出表和部门用水量为基础, 计算部门虚拟水含量, 虚拟水含量由直接和间接用水强度构成, 见图 1。2007~2017 年湖北省部门虚拟

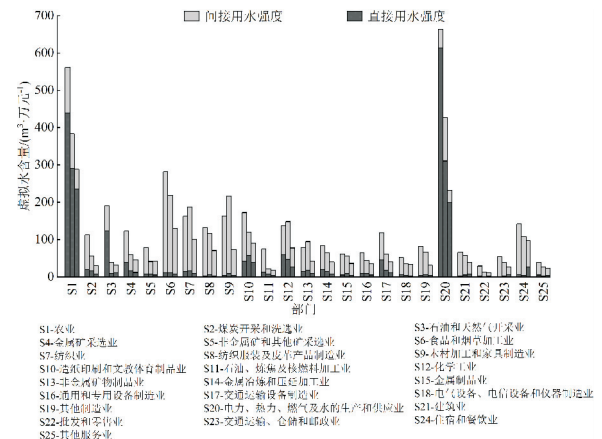


图 1 湖北省 2007、2012、2017 年部门虚拟水含量
Fig. 1 Virtual water content of the sector in Hubei Province in 2007, 2012 and 2017

水含量呈下降趋势,降幅在 31%~83%之间,这可能与最严格水资源管理制度的实施有关。

不同部门用水强度差异较大。农业(S1)和电力、热力、燃气及水的生产和供应部门(S20)虚拟水含量远高于其他部门,研究期内直接用水强度不断减小,但占比始终在 70%以上。这两个部门对水资源的需求量大,且水消耗方式主要是产业本身的直接用水,提高产业的直接用水效率可有效减少水资源的消耗。其余部门虚拟水含量主要由间接用水构成,尤其是轻工业(S6~S9),间接用水强度占比在 90%以上,间接用水强度平均下降了 49.4%。此类间接用水强度高的部门尽管直接消耗的水量不多,但中间生产环节消耗了大量水资源,要从生产全周期进行用水优化。不同于其他虚拟水含量持续下降的部门,纺织业(S7)、木材加工和家具制造业(S9)、化学工业(S12)等工业部门 2007~2012 年虚拟水含量呈上升趋势,2012~2017 年则表现为下降趋势。最严格水资源管理制度实施后,湖北省重点企业开展节水型企业创建,完善内部节水设施,进行再生水回用等节水技术改造增强了节水力度。

3.2 湖北省水足迹特征及变化分析

根据各部门虚拟水含量和产品与服务的最终消费量计算湖北省水足迹,结果见表 1。2007~

表 1 湖北省 2007、2012、2017 年部门水足迹

Tab. 1 Sectoral water footprint in Hubei Province

in 2007, 2012 and 2017 $10^8 m^3$

代码	部门名称	2007 年	2012 年	2017 年
S1	农业	59.59	54.38	61.28
S2	煤炭开采和洗选业	0.14	0.20	0.07
S3	石油和天然气开采业	0.006	0.002	0.03
S4	金属矿采选业	0.008	0.11	0.21
S5	非金属矿和其他矿采选业	0.01	0.04	-0.67
S6	食品和烟草加工业	46.97	43.54	37.13
S7	纺织业	3.94	2.82	2.83
S8	纺织服装及皮革产品制造业	5.73	8.82	4.19
S9	木材加工和家具制造业	2.95	2.57	2.66
S10	造纸印刷和文教体育用品业	1.85	1.81	2.10
S11	石油、炼焦及核燃料加工业	2.39	0.15	1.06
S12	化学工业	5.08	9.28	4.50
S13	非金属矿物制品业	0.62	7.32	0.48
S14	金属冶炼和压延加工业	0.07	3.48	0.44
S15	金属制品业	0.34	3.45	1.71
S16	通用和专用设备制造业	4.34	2.85	8.83
S17	交通运输设备制造业	11.40	21.11	15.63
S18	电气设备、电信设备和仪器制造业	3.26	4.30	5.75
S19	其他制造业	0.32	0.03	0.22
S20	电力、热力、燃气及水的生产和供应业	10.59	21.39	8.29
S21	建筑业	16.13	36.01	47.46
S22	批发和零售业	1.88	1.64	1.81
S23	交通运输、仓储和邮政业	1.95	7.28	2.37
S24	住宿和餐饮业	7.01	6.19	6.72
S25	其他服务业	12.31	14.94	23.42
总		198.90	253.71	238.53

2017 年,水足迹从 $198.90 \times 10^8 m^3$ 增加到 $238.53 \times 10^8 m^3$,增长 19.9%。分阶段来看,水足迹总量呈先上升后下降的趋势,2007~2012 年,水足迹增长 27.6%;2012~2017 年,水足迹下降 6.0%。整个研究期内,内部水足迹占比不断增加,从 76.5% 上升到 84.5%,而外部水足迹从 23.5% 下降到 15.5%,表明湖北省经济活动对省内水资源的消耗增多。内部水足迹和出口虚拟水量的总和与可用水资源量的比值反映了区域水资源压力 W_{WSI} ,2007、2012、2017 年水资源压力指数分别为 0.23、0.33、0.20。根据水资源压力划分等级^[7],湖北省水资源属于轻度压力($0.2 < W_{WSI} \leq 0.4$),受可用水资源量影响较大。

部门水足迹占比和变化特征存在差异性。农业、食品和烟草加工业、建筑业水足迹较多,总量占湖北省水足迹的 50% 以上。其中农业始终是水足迹最高的部门,变化幅度较小;食品和烟草加工业的水足迹持续下降,共减少 $9.84 \times 10^8 m^3$,降幅为 20.9%;建筑业水足迹增长迅速,2017 年达 $47.46 \times 10^8 m^3$,与 2007 年相比增长了 194.2%。另一个水足迹增长趋势显著的是其他服务业,增幅达 90.2%。其余部门水足迹较少,除电力、热力、燃气及水的生产和供应业和交通运输设备制造业外,均不超过 $10 \times 10^8 m^3$ 。采矿业(S2~S5)是水足迹最少的行业,3 年平均水足迹仅 $0.06 \times 10^8 m^3$ 。

3.3 水足迹变化驱动力分析

表 2 为驱动因素对水足迹变化的贡献度。由表 2 可知,技术水平、产业结构及出口效应对水足迹增长起抑制作用,其余因素则起促进作用。其中技术水平是主要的抑制因素,贡献了 -33.4%;经济规模是主要的促进因素,贡献了 48.7%。图 2 为驱动因素在 2007~2012、2012~2017 年两个时期对湖北省水足迹变化贡献度。由图 2 可知,2012~2017 年技术水平的抑制效应减弱,下降 40.0%,经济规模这一主要的正向驱动对水足迹增长的影响量同样下降 20.9%。部门联系、进口和出口效应在两个时期内对水足迹的影响截然相反,2007~2012 年这 3 个因素均正向驱动水足迹增加,2012~2017 年转变为负向驱动因子,影响

表 2 2007~2017 年驱动因素对水足迹变化贡献度

Tab. 2 Contribution of drivers to the change in water footprint, 2007-2017

驱动因素	贡献度/ $10^8 m^3$	驱动因素	贡献度/ $10^8 m^3$
技术水平	-177.24	人口效应	6.89
部门联系	5.96	进口效应	13.00
产业结构	-68.32	出口效应	-0.75
经济规模	258.60		

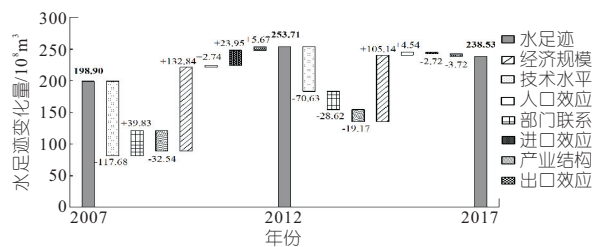


图 2 2007~2012、2012~2017 年驱动因素对水足迹变化贡献度

Fig. 2 Contribution of drivers to water footprint change in 2007-2012, 2012-2017

总量从 $69.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 变为 $-35.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。人口效应对水足迹的影响较小,研究期间保持正向影响,贡献度从 0.8% 上升到 1.9%。

驱动因素对部门水足迹变化贡献度见图 3。作为主要用水部门,农业(S1)对于驱动因素的反应较为敏感,是技术水平、产业结构、经济规模及人口效应影响量最大的部门。2007~2017 年技术水平的提高使农业水足迹减少 $41.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要得益于灌区用水模式的改进。2008 年以来,湖北省建设农业水价综合改革试验区,进行末级渠系节水工程改造,形成了较完备的排灌体系,农田灌溉系数提升,节水效益显著。而随着湖北省产业升级转型,农业产业比重下降,产业结构驱动水足迹减少 $35.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。经济规模和人口效应促进了农业水足迹增长,推动 2007~2017 年农业水足迹增长 $82.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因为正负效应相当,2007~2017 年水足迹变化较小,增长 2.8%。

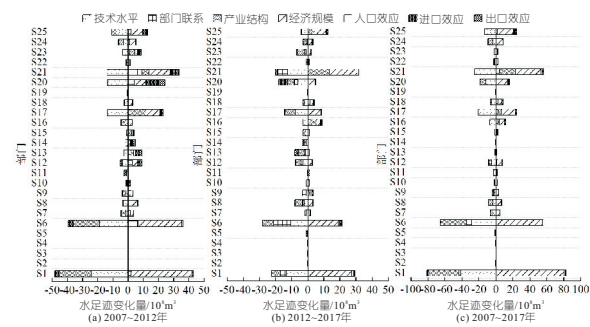


图 3 2007~2017 年驱动因素对部门水足迹变化贡献度

Fig. 3 Contribution of drivers to sectoral water footprint changes, 2007-2017

水足迹下降最多的部门是食品和烟草加工业(S6),是排在第二位的电力、热力、燃气及水的生产和供应业(S20)减少量的 4.3 倍,技术水平和产业结构分别贡献了 -21.3% 、 -22.9% 。不同时期负向驱动的主导因素不同,2007~2012 年主要的负向驱动是技术水平和产业结构,2012~2017 年其负向影响减弱,分别下降 45.0%、62.2%,部门联系成为该时期最大的负向驱动,驱动水足迹

减少 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$,这可能与生产结构优化,生产过程中间接耗水降低有关。电力、热力、燃气及水的生产和供应业(S20)水足迹在 2007~2012 年呈增长状态,在 2012~2017 年呈下降状态。进口效应是 2007~2012 年水足迹增长的主要因素,对水足迹变动贡献 22.1%。这一时期社会经济高速发展,电力、热力能源需求增长,而湖北省煤炭、石油、天然气等资源对外依存度较高,需要进一步通过进口来满足需求。2012~2017 年部门联系、进口及出口效应均转变为负向驱动,正负驱动因素综合驱动水足迹减少 $13.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

水足迹增长最多的部门为建筑业(S21),产业结构和经济规模是主要的正向驱动。2008 年以来,湖北省建筑业快速发展,每年总产值递增规模达千亿元,水足迹也随之大幅增长,进一步分解发现,2007~2012 年增长量大于 2012~2017 年。2007~2012 年部门联系和进口效应的正向作用对这一时期水足迹变化分别贡献 19.7%、11.4%,但在 2012~2017 年均转变为负向影响,贡献度分别为 -11.3% 、 -3.0% 。2012~2017 年建筑业是高耗水产业转向的首要部门,产业占比上升,产业结构对水足迹变化的贡献度由 2007~2012 年的 9.6% 增长到 25.8%。另一水足迹增长显著的部门是其他服务业(S25),包括信息、金融、房地产等部门,经济规模是水足迹增长的主要驱动因素,贡献 37.4%,反映出居民对高附加值的服务类产品需求增多。其他服务业水足迹在 2012~2017 年的增长量大于 2007~2012 年,产业结构驱动作用的转变对这一结果产生了重要影响,而 2012~2017 年又转变成促进作用,贡献度从 -13.0 变为 26.2%。

4 结论

a. 2007~2017 年湖北省虚拟水含量呈下降趋势,用水效率提升显著;水足迹总量增长 19.9%,建筑业和服务业水足迹增长迅速。

b. 技术水平是节水的核心因素,节水技术研究在全行业应继续加强;优化轻工业等间接用水为主的部门的生产结构,降低产业链中高耗水产品的投入;关注居民消费转向的服务业等高附加值部门,在经济规模扩大的同时发挥产业结构优势减小水耗。

参考文献:

[1] FU Y, HUANG G, LIU L, et al. Multi-hierarchy

virtual-water management-a case study of Hubei Province, China [J]. Journal of cleaner production, 2021,293:126244.

[2] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[C]//Priorities for water resources allocation and management, ODA,1993:13-26.

[3] 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.

[4] 朱永楠, 姜珊, 赵勇, 等. 我国煤电生产水足迹评

价[J]. 水电能源科学,2019,37(9):28-31.

[5] 许爽爽, 马树才, 付云鹏. 基于投入产出法的辽宁省水足迹和虚拟水核算[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 58-62.

[6] ZHAO D, LIU J, YANG H, et al. Socioeconomic drivers of provincial-level changes in the blue and green water footprints in China [J]. Resources, conservation and recycling, 2021, 175: 105834.

[7] 陈倩云, 安婷莉, 王玉宝, 等. 我国北方重点煤电基地发展伴生的水资源压力分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 30-34.

Characteristics and Change Driving Force of Water Footprint in Hubei Province

YUAN Yan-bin¹, LIAN Yi-wen¹, YUAN Xiao-hui², ZHOU Han¹, DONG Heng¹, ZHANG Xiao-pan¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Water footprint evaluation is of guiding significance for the rational development of regional water resources. The input-output method was used to account for the water footprint of Hubei Province from 2007 to 2017, and the driving factors of water footprint changes were analyzed using the structural decomposition model. The results show that the virtual water content in Hubei Province decreased significantly, and water use efficiency improved from 2007 to 2017. The total water footprint showed a trend of rising and then falling, with a net increase of 19.9%, and the main growth sectors were construction and services. Technology level and economic scale were the main factors inhibiting and promoting the increase of water footprint, respectively. However, their effects on water footprint changes gradually weakened, and both showed a reduction effect. From 2007 to 2017, the sectoral linkages changed from positive to negative driving force, and the inhibitory effect on water footprint was revealed, which shows that optimizing the industrial production process helps carry out water conservation. The impact of driving factor on different sectors showed heterogeneity. The adjustment of industrial structure inhibited the increase of water footprint in high water-consuming sectors such as agriculture while promoting the increase in construction and services. In the future, the industry scale and residential demand in sectors producing high-value-added products will grow, such as services, and water-saving technology development should be shifted to these sectors promptly.

Key words: input-output; water footprint; virtual water; structural decomposition; driving factor

(上接第 48 页)

[9] SATTARI M T, APAYDIN H, OZTURK F, et al. Application of a data mining approach to derive operating rules for the Eleviyan irrigation reservoir[J]. Lake and reservoir management, 2012, 28(2):142-152.

[10] 李力, 周建中, 戴领, 等. 金沙江下游梯级水库蓄水期

多目标生态调度研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11):62-66.

[11] 刘志刚, 胡斌奇, 伍永刚, 等. 基于云模型的水库调度函数拟合方法研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 53-56, 23.

Reservoir Operation Rule Extraction Method Based on Decision Tree and Its Integrated Model

DAI Ling¹, LUO Guang-lei², ZHOU Jian-zhong³

(1. CISPDR Corporation, Wuhan 430010, China; 2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430061, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Reservoir operation rules, as an important tool to guide reservoir operation, are not only the decision-making reference in the reservoir planning and design period, but also one of the key technologies affecting the comprehensive benefits of the reservoir in the operation and management period. Therefore, based on the historical operation data of reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River, the number of periods, early water level, inflow, outflow and current inflow were selected as the influence factors to form the input factor set combined with the reservoir operation principle and operation characteristics. Comprehensively considering the characteristics of operation data and the principle of decision tree, the end of period water level was determined as the model output and then the corresponding simulated water level evaluation index was proposed based on the reservoir regulation capacity. The correlation coefficient and mutual information were used as the correlation evaluation index of model input factors, and the tree Parzen evaluator was introduced to optimize the number of input factors and algorithm super parameters. Finally, the reservoir operation rule extraction model based on decision tree and its integrated model was established and the reservoir operation rule integrating historical operation process and expert experience was formed. The experimental results show that the decision tree and its integrated model have strong ability and applicability in the extraction and application of reservoir operation rules.

Key words: reservoir operation; rule extraction; decision tree and its integrated model; Bayesian optimization