

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.003

# 黄河中上游城市工业园区污水再生利用模式分析与选择

李学瑞<sup>1</sup>, 贾建伟<sup>1</sup>, 高增龙<sup>2</sup>, 马小蕾<sup>1</sup>, 唐章程<sup>1</sup>

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 榆林市清水工业园供水有限责任公司, 陕西 榆林 719300)

**摘要:** 以国家部委污水再生利用政策为导向,对黄河中上游城市几座典型工业园区再生水回用案例进行对比分析,采用定性、定量综合判定,得出对污水资源化不同影响程度的关键要素排序,依次为园区水资源短缺程度、尾水排放条件、价格、再生水输配管网建设水平。在此基础上,总结了尾水直用、深度净化、点对点三类污水再生利用模式,并提出以利用效益为评价标准选择适宜的模式,构建污水再生利用与资源、环境、社会及经济相协调的绿色高质量发展格局,可为类似工业园区开展污水再生利用提供参考。

**关键词:** 污水再生利用; 黄河中上游; 工业园区

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0019-05

## Mode Analysis and Selection of Wastewater Reclamation in Industrial Parks in the Middle and Upper Reaches of the Yellow River

LI Xue-rui<sup>1</sup>, JIA Jian-wei<sup>1</sup>, GAO Zeng-long<sup>2</sup>, MA Xiao-lei<sup>1</sup>, TANG Zhang-cheng<sup>1</sup>

(1. CSSEC AECOM Consultant Co. Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Yulin Qingshui Industrial Park Water Supply Co. Ltd., Yulin 719300, China)

**Abstract:** This review compares the wastewater reclamation cases of several typical industrial parks in the middle and upper reaches of the Yellow River, guided by the policies of national ministries and commissions. It uses qualitative and quantitative comprehensive judgment to determine the relative importance of the following factors that affect wastewater reclamation to varying degrees: the degree of water shortage in industrial parks, tail water discharge conditions, price, and the degree of construction of the network of reclamation water transmission and distribution pipes. Based on this, three categories of wastewater reclamation modes are summarized including tailwater direct reuse, deep purification reuse, and point-to-point reuse. And it is suggested that the industrial park should select the appropriate mode based on the utilization efficiency as the evaluation standard, and build a green and high-quality development pattern of wastewater reclamation coordinated with resources, environment and social and the economy, which can provide a reference for the scientific development of wastewater reclamation in similar industrial parks.

**Key words:** wastewater reclamation; middle and upper reaches of the Yellow River; industrial park

基金项目: 住房和城乡建设部研发计划项目(2021-K-111); 中国市政工程西北设计研究院有限公司研究课题(XBSZKY2037)  
通信作者: 贾建伟 E-mail: 1441930851@qq.com

《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》提出:把水资源作为最大的刚性约束,全方位贯彻“以水四定”,实施深度节水控水,促进黄河流域生态保护和高质量发展。2019年以来,国家相关部委陆续发布了多个关于污水资源化利用方面的政策,充分体现了国家层面的重视程度。根据水资源禀赋、发展需求和经济水平等因素,以黄河上中游几座工业园区的再生水案例为切入点,按照“因地制宜、分类施策”原则,总结出几类污水再生利用模式,为全面系统推进工业园区污水资源化工作提供参考。

### 1 黄河中、上游城市水资源概况

黄河流域流经9个省(自治区),基于行政区划,通常将四川、青海、宁夏、内蒙归为上游区域,陕西、山西为中游区域。中上游省份四川、青海人均水资源相对充沛,其余各省人均水资源低于国际公认的 $3\ 000\text{ m}^3$ (轻度缺水的界限值),其中宁夏、山西两省人均水资源低于 $500\text{ m}^3$ ,为极度缺水。黄河水资源年内分配不均匀,黄河流域是典型的季风气候区,降水季节性强,大部分地区降水主要在6月—9月,占全年降水量的70%~80%,加剧了沿黄城市水资源利用难度。“八七”分水方案是1987年以来黄河流域水资源节约保护与利用的重要依据,主要分配了流域的地表水,因此,文中提及的中上游城市主要供水水源为地表水。但该方案没有考虑地下水,在一些水资源贫乏的地区出现了大量开采地下水资源

的情况,其中黄河中游的山西省尤为突出。

### 2 政策内涵分析

近年来,国家部委层面相继发布了污水再生利用政策,商务部提出的国家级经济开发区绿色发展指标考核,对再生水回用提出了更高要求。从政策导向性、符合性、有序推进角度,概括出以下政策内涵:①在黄河流域地级及以上城市建设污水资源化利用示范城市;②到2025年,黄河上游地级及以上缺水城市再生水回用率达到25%以上,中下游城市力争达到30%;③拓宽再生水利用渠道,完善再生水利用设施,工业、城市杂用及生态景观等优先使用再生水;④完善再生水的调蓄、储存,可依托低洼地带因地制宜地建设再生水调蓄库塘,形成合理的再生水调蓄能力,统筹建设再生水调配体系;⑤工业园区应规划建设集中式污水处理和再生水利用系统,以使再生水利用率达到要求;⑥工业园区严控新鲜水取用量,缺水地区将市政再生水作为工业用水的重要来源;⑦推广点对点供水,推动工业园区与市政再生水生产运营单位合作;⑧打造高品质再生水(商务部),国家级经开区考核绿色发展指标对再生水界定为经过超滤、反渗透等处理后的水。

### 3 案例介绍及要素分析

选取黄河中上游城市5座工业园区污水再生利用案例,对影响污水再生利用(方式和程度)的各类要素进行初步分析,案例具体情况见表1。

表1 污水再生利用案例概况

Tab.1 Overview of wastewater reclamation cases

园区概况	甘肃金昌A园区	甘肃嘉峪关B园区	宁夏石嘴山C园区	陕西榆林D园区	山西太原E园区
流域位置	黄河上游	黄河上游	黄河上游	黄河中游	黄河中游
产业类型	综合化工	冶金	精细化工	煤化工	煤化工
城市人均水资源量/ $\text{m}^3$	1 050(中度缺水)	1 440(中度缺水)	212(极度缺水)	757(重度缺水)	173(极度缺水)
尾水水质	一级A标准	一级A标准	地表水Ⅳ类标准	一级A标准	地表水Ⅴ类标准
污水规模/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	1.0	3.5	1.5	1.0	32.0
回用规模/ $(10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	1.0	2.5	1.0	0.8	9.0
回用用途	林地浇灌	工业、城市杂用	工业	工业、城市杂用	工业
污水再生处理设施	无新增	无新增	新增双膜及分盐系统	新增双膜系统	新增双膜系统

#### 3.1 要素筛选

筛选方法:参考案例实践和行业研究成果。A、C、D园区在污水资源化推进过程中,均不同程度受到尾水排放口的限制;D园区再生水项目的起因是要完成省、市两级对园区再生水回用率的考核;C园区水资源短缺程度较突出,环评要求企业将再生水作为重要补充水源,而实际上一些企业从黄河攫取

供给生产。陈梓豪等<sup>[1]</sup>对全国119座城市再生水利用的相关数据进行分析,提出再生水管网建设水平(长度)、城市经济水平(总GDP)为主要因素。杨树莲等<sup>[2]</sup>以青岛市为例,开展的再生水与城市自来水比价关系研究表明,再生水与城市供水价格比为(0.387~0.393):1时,再生水才具有一定的吸引力。

综上,初步确定的影响要素为7项,排序见表2。

表2 污水再生利用案例要素分析

Tab.2 Element analysis of wastewater reclamation cases

项目	甘肃金昌A园区	甘肃嘉峪关B园区	宁夏石嘴山C园区	陕西榆林D园区	山西太原E园区
①尾水排放条件	无排口	有排口	无排口	排口指标受限	有排口
②再生水回用率	2025年不低于25%			2025年不低于30%	
③水资源短缺程度	地表水源基本满足	地表水源基本满足	比较短缺,缺口 $2 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /d	现状基本满足,远期缺口50%	严重短缺,缺口约40%
④园区等级及经济水平	省级,中小企业为主,经济一般	省级前列,以酒钢为代表的大、中企业,经济较好	省级,产业较成熟,中小企业为主,经济略好	国家级,区内5个千亿元企业,经济良好	省级,产业较成熟,中型企业为主,经济较好
⑤水价	工业水3.0元/m <sup>3</sup> ,再生水1.2元/m <sup>3</sup> ,优势明显	工业水3.2元/m <sup>3</sup> ,再生水1.2元/m <sup>3</sup> ,优势明显	工业水3.0元/m <sup>3</sup> ,再生水总成本16.2元/m <sup>3</sup> ,劣势明显	工业水9.0元/m <sup>3</sup> ,再生水5.5元/m <sup>3</sup> ,优势明显	工业水4.6元/m <sup>3</sup> ,再生水5.0元/m <sup>3</sup> ,基本可以接受
⑥再生水管网建设水平	园区无再生水管网,需新增输水干管2 km	园区无再生水管网,需新增配水干管6 km	园区无再生水管网,需新增配水干管10 km	园区无再生水管网,需新增配水管网19 km	园区无再生水管网,需新增输水干管14 km
⑦季节性气候影响	影响较大,冬季储存,夏季使用	影响明显,冬季用水量为夏季的1/2	无影响,工业不受气候制约	影响较小,工业与杂用可切换	无影响,工业不受气候制约
要素影响排序	①>⑥>⑦>②>⑤>④>③	⑤>⑥>④>⑦>②>③>①	③>①>⑤>⑥>④>②>⑦	②>④>①>⑥>③>⑤>⑦	③>⑤>⑥>④>②>⑦>①

### 3.2 案例要素分析

A园区尾水没有排放口,只能再生利用。园区经济水平一般,难以匹配较大范围的再生水管网(需全部消纳尾水)。地表水资源基本满足供水要求,企业对再生水的需求不强烈。因此,从经济角度出发,提出将尾水用于周边防护林浇灌,仅需敷设2 km管网。受冬季节性气候影响,设置了中水库,冬季储存,夏季使用。

B园区开展污水再生回用的动力是较低的再生水价格给企业节约成本的经济收益,用途为工业与城市杂用。该园区经济水平较好,但也对再生水管网投资争议较大,经多次论证,近期仅需敷设6 km管网,即能实现约50%的回用,且以大用户为重点敷设再生水管网,沿途兼顾城市杂用。受季节性气候影响,冬季再生水用量仅为夏季的1/2。

C园区受水资源短缺和没有尾水排放口要素制约,2021年中央环保督察就该问题要求限期整改:不得新增从黄河攫取新鲜水,设置污水再生处理设施,补充工业用水。该园区工业用水水质要求较高,且排放的污水水质较差(高盐分、难降解COD),再生处理采用UF-RO双膜工艺,浓盐水经MVR蒸发结晶,再生水成本远高于工业水价。此外,该园区还需新敷设10 km的再生水干管,这进一步加剧了园区和企业负担。园区经济水平尚可,但是面对差距如此大的水价,企业主动使用的意愿不足,政策强制可能导致园区近期发展不稳定。

D园区污水再生利用的起因来自省、市两级对再生水回用率的要求。作为国家级经济开发区,积极响应商务部绿色发展指标的要求,打造高品质再生水。在此基础上,受排口指标限制(现状排口不允许新增排放量),园区着力打造污水“近零排放”。该项目配套19 km的再生水管网,采用“就近利用、按需利用”的近远期思路以尽可能降低管网投资的影响。水资源短缺程度在现阶段不明显,但给水专项规划指出,园区远期约50%的供水需由煤矿疏干水、再生水补充供给。因此,园区提前谋划将非常规水资源纳入统一的水资源配置中。园区现状尾水盐分约1 000 mg/L,近期再生水处理工艺以超滤为主,为了防止水质波动对水体用途的影响,后端同步设置反渗透处理(处理水量占比30%)进行保障。测算再生水价格为5.5元/m<sup>3</sup>,而园区工业用水价格为9元/m<sup>3</sup>,园林绿化用水价格为6元/m<sup>3</sup>,价格优势较明显。

E园区推进再生水回用的根本原因是水资源短缺。园区总需水量为 $28 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,新鲜水资源供水量约 $17 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,规划其余40%由再生水补充。园区内部再生水量有限,规划由市政再生水厂供水。该园区再生水供水规模较大,再生水价格初定5.0元/m<sup>3</sup>,与园区工业水价(4.6元/m<sup>3</sup>)基本相当。再生水输水干管14 km,投资约1.0亿元,园区从自身经济水平和长远发展考虑,决定启动该项目。目前,太原市在污水资源化方面取得了较好的成效,可作

为典型的示范城市,园区对标市级要求,再生水回用率需达30%,有助于后续申请补贴、示范申报等。

### 3.3 综合要素分析

#### 3.3.1 分析方法与结果

采用经验频次法和排序权重法两种方法对5个案例的要素进行评价,结果见表3。

表3 污水再生利用综合要素分析

Tab.3 Comprehensive factors analysis of wastewater reclamation

项目	方法一:经验频次法		方法二:排序权重法							综合得分
	前 I	前 II	I	II	III	IV	V	VI	VII	
			0.32	0.18	0.15	0.12	0.1	0.08	0.05	
①尾水排放条件	1	2	1	1	1				2	0.75
②再生水回用率	1	1	1			1	2	1		0.72
③水资源短缺程度	2	2	2					1	1	0.87
④园区等级及经济水平		1		1	1	1	1	1		0.63
⑤水价	1	2	1	1	1		1	1		0.83
⑥再生水管网建设水平		2		2	1	2				0.75
⑦季节性气候影响					1	1		1	2	0.45
分析结果	主要影响要素:①、③、⑤、⑥		要素排序:③>①>⑤>⑥>②>④>⑦							

根据工作实际经验,排序在前两位的要素往往决定了再生水工程的建设与否。因此,经验频次法通过统计A~E案例中排序分别在首位(前I)和前两位(前II)的要素出现的频次定性筛选主要影响要素。排序权重法通过对各要素的排序(I~VII)赋予权重,根据其在A~E案例中出现的频次,计算综合得分,用以判断影响要素的优先顺序。总体上,排序I~IV的要素基本决定了再生水工程的特点,属主要影响要素;V~VII的要素与项目推进的相关性较弱,主要是从属影响要素。需要指出的是,尾水排放条件要素中若园区无排口或排口受限,属于政策性约束条件,在权重得分基础上需对其综合影响排序进行调整,即影响要素排序为③>①>⑤>⑥>②>④>⑦。

#### 3.3.2 分析论证

##### ① 主要影响要素

工业园区污水再生水利用的第一影响要素是水资源短缺程度,这与“以水四定”一致。尾水排放条件为环保刚性约束,只能严格执行,在利用方式和用途上尽可能兼顾经济性。价格是污水再生利用可持续的关键因素。B园区是基于再生水价格优势推进污水再生利用的典型案列,C园区受高昂再生水价的反作用明显。因此,提出如下建议:园区重新审视水资源的稀缺性,合理提高自来水价格;健全水价政策和激励措施,促进再生水生产在技术、管理、规模效益上优化以降低成本,推行“以奖代惩”,调动用户更多使用再生水,形成规模效益。此外,充分调研水价在企业成本中的构成比例,作为判定企业耐受程度的重要依据。因价格因素造成的企业短期困难,园区可给予扶持,对于长期不能承受的企业,则应由市场经济决定。贯彻污水再生利用政策导向,在黄河流域生态保护大背景下,坚决落实国家中长期“双碳”政策。

管网建设水平是制约再生水推广利用的重要要素,体现在管网投资和建成区实施难度上。园区再生水供给形式多呈现集中式,导致管网路由干扰大,输送距离较长,管径偏大,维护成本偏高。再生水管网缺失严重,致使供给的有效性受限,因此应有序推进再生水管网建设,实现“点、片、域”的协同,充分挖掘大用户,实现“点”突破;分片建设,建成一片,回用一片;近、远期结合,逐步完善再生水管网系统布局。

##### ② 从属影响要素

再生水回用率排序靠后,表明现阶段其仅为必要条件,侧面说明园区对污水再生利用的主动性不够。郝姝然等<sup>[3]</sup>统计了2020年黄河流域各城市的再生水回用率,上游有11个城市在25%以下,中下游20个城市在30%以下,有10个低于15%,有几个甚至为1%~2%。随着地区性政策体系的完善,再生水回用率将展现出强有力的约束。园区等级及经济水平通常不是项目推进的决定要素,主要用来衡量再生利用的方式和用途对园区造成的承受能力,D园区例外。季节性气候也是必要条件,影响再生水储存、调蓄,需要关注再生水储存过程中潜在的藻类生长、微生物污染造成的水质安全,应重视再生水系统的调蓄,并提出合理的退水方案。

#### 4 污水再生利用模式分析及选择

目前,行业内对污水再生利用模式无统一的划分依据。通过综合要素排序和分析,总结出三类污水再生利用模式:一类是A、B园区的模式,在现有尾水水质的基础上,积极拓展再生水回用渠道,即尾水直用模式;第二类是C、D园区的模式,尾水不外排,通过进一步削减污染物,打造高品质再生水用于工业等,即深度净化模式;第三类是E园区的模式,优先考虑将品质更好的市政再生水作为园区工业用水的重要来源,即强调大用户的点对点模式。模式的选择最终体现在利用效益上,即以水资源节约量为表征的资源效益、以污染物削减和节能降耗为表征的环境效益、以人居环境改善为表征的社会效益、以再生水收益及再生水GDP贡献的经济效益。

尾水直用模式与尾水水质执行标准直接相关。黄河流域中上游地区的青海、甘肃、内蒙仍为一级A标准,山西推行地表水准V类标准,四川、陕西、河南、山东制定了地表水准IV类标准。标准的提高,有助于进一步拓宽污水再生利用渠道。该模式经济效益较显著,但在长期用于绿化时有潜在风险。园区发展初期以生活污水为主,TDS浓度较低,后期尾水TDS浓度可能上升并超过一定限值(2 000 mg/L),导致土壤、地下水盐渍化倾向,已敷设的再生水绿化管网闲置、浪费。

深度净化模式要求尾水全部回用,主要针对尾水的除盐处理,通常采用双膜工艺及MVR蒸发结晶技术,但也包括为打造高品质再生水对其他水质指标的处理工艺。再生水水质在达到国家、行业标准的前提下,需满足园区大多数用户的需求。“以质定价”是深度净化模式长效机制的关键,取决于用户对再生水价格的接受程度。以目标水质为参照,核算再生水净化规模,采用全处理或部分处理后掺混的方式,尽可能优化规模以降低成本,形成合理比价体系。使用高品质再生水,企业避免了内部生产用水的再处理,节约的费用可通过水价补偿再生水生产成本,规模效益相对较好。

点对点模式取决于市政再生水厂的距离和水量水质的保障,需有总体的供水规划,以实现水源的统一配置。优先考虑在大用户、水质要求高、工业用新鲜水严格受限的企业或区域推行。北京亦庄开发区采用该模式,由小红门再生水厂向其供

水,采用MF-RO工艺,实现了 $1\ 368\times 10^4\ \text{m}^3/\text{a}$ 的再生水应用,折合 $4\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ,占工业用水总量的40%。该模式是当前国家部委政策积极推荐的模式,即推动工业园区与市政再生水生产运营单位合作。

#### 5 结语

当前,黄河流域污水再生利用处于快速起步和发展阶段,根据得出的水资源、尾水排放、价格、再生水管网建设等主要影响要素的排序和权重,推进园区科学决策、选择因地制宜的再生利用模式,提升综合利用效益。建议在制定再生水相关政策的过程中,进一步引导影响要素发挥更加重要的决策作用。此外,应重视再生水供水系统中管网布局的合理性和调蓄设施的必要性,系统的稳定性是发挥再生水利用效益的关键。

#### 参考文献:

- [1] 陈梓豪,许萍. 制约我国城市再生水推广利用的关键因素[J]. 水电能源科学,2021,39(11): 76-80.  
CHEN Zihao, XU Ping. The key factors restricting promotion and utilization of urban reclaimed water in China[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 76-80(in Chinese).
- [2] 杨树莲,段治平. 再生水与城市自来水比价关系研究——以青岛市为例[J]. 技术经济与管理研究,2018(7):23-27.  
YANG Shulian, DUAN Zhiping. Research on the price relations between reclaimed water and tap water supply in Qingdao [J]. Technoeconomics & Management Research, 2018(7):23-27(in Chinese).
- [3] 郝姝然,陈卓,徐傲,等. 黄河流域主要城市再生水利用状况及潜力分析[J]. 环境工程,2022,40(10): 1-8,79.  
HAO Shuran, CHEN Zhuo, XU Ao, et al. Analysis of water reuse situations and potentials in main cities in the Yellow River basin [J]. Environmental Engineering, 2022,40(10):1-8,79(in Chinese).

作者简介:李学瑞(1988- ),女,甘肃靖远人,硕士,高级工程师,从事市政给排水、工业园区水处理与再生利用工程设计及研究工作。

E-mail:694312955@qq.com

收稿日期:2022-08-23

修回日期:2022-09-06

(编辑:丁彩娟)