

区域水资源利用系统之水-能关系研究

刘 寒¹, 耿雷华^{1,2}, 黄昌硕^{1,2}, 王怡宁¹, 李 恩¹, 刘倩文³

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省水文水资源勘测局盐城分局, 江苏 盐城 224000)

摘要:为促进水资源管理与能源利用的协调发展,推动节水节能减碳,通过分析水资源利用系统不同水源的“蓄-引-提-抽-调”取水过程以及供水系统“取-供-配-排-净-回”流转过程之间的水能关系,结合江苏实际,依据2020年各地对不同水源的取用水情况,建立了江水北调工程各站的调水能耗及江苏省水资源利用系统的水-能关系,为推动水资源及生态环境的可持续发展提供参考。

关键词:水-能关系; 水资源; 可持续发展

中图分类号:TV213.4 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2024)07-0028-0005

Research on water energy relationship in regional water resources utilization system

LIU Han¹, GENG Leihua^{1,2}, HUANG Changshuo^{1,2}, WANG Yining¹,
LI En¹, LIU Qianwen³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China;
3. Yancheng Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yancheng 224000, China)

Abstract: In order to promote the coordinated development of water resource management and energy utilization, and promote water conservation, energy conservation, and carbon reduction, the water energy relationship between the “storage, diversion, extraction, pump, transfer” process of different water sources in the water resource utilization system and the “intake, supply, distribution, discharge, purification, return” process of the water supply system was analyzed. Based on the actual situation in Jiangsu Province and the water consumption of different water sources in different regions in 2020, the water transfer energy consumption of each station of the Yangtze River North Water Diversion Project and the water energy relationship of the water resource utilization system in Jiangsu Province were established, providing reference for promoting the sustainable development of water resources and ecological environment.

Key words: water energy relationship; water resources; sustainable development

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022038); 国家重点研发计划长江-黄河重点专项项目(2022YFC3202401)

作者简介: 刘寒(1995—),女,博士研究生,研究方向为水资源管理、节水减碳。E-mail: 274099387@qq.com

1 概 述

对于社会水循环系统而言,水资源的提取、处理、供应和废水处理都需要耗费大量能源,而能源的开采加工及运输也离不开水资源。水和能源之间存在着错综复杂的关系,这一关系既涉及生活的方方面面,又直接影响着社会的可持续发展^[1]。水是生命之源,能源则是社会运转的动力,水与能源的协同安全发展也在服务国家重大战略方面发挥重要作用,水-能源关系对于可持续发展十分重要^[2]。能源是碳排放的来源,水-能关系是搭建水-能-碳之间关系的桥梁,也是水利行业助力碳中和不可越过的重要过程。探究水能之间的关系,明晰水资源利用系统各个环节的能源的转换和消耗,从而进行低碳合理的水资源配置及管理,对实现水能协同关系下的可持续发展具有重要意义。结合江苏实际进行的水-能关系研究,搭建其水资源利用系统的水-能关系框架,在碳达峰、碳中和背景下对其水资源管理、碳排放管理、水-能协同提升及相关的政策制定具有重要意义。

2 水资源利用系统水-能关系原理剖析

社会水循环是一个宏观开放的系统,始于自然水循环系统的取水或雨水直接利用,终端止于自然水循环系统的排放或蒸、散发。取水系统是指利用一定的工程措施提取地表水或地下水。供水系统是将提取的水资源在一定程度上进行处理。输配水是连接供水系统和用耗水系统的重要环节,是指从水源将经过处理的原水输配至用户的系统。用水系统是指人们日常的生活用水、生产用水以及生

态环境用水过程。排水系统是将使用后的水资源进行收集并处理,将处理后的水源排到自然水体的过程。水的再生回用过程,是伴随着社会经济系统水循环通量和人类环境卫生需求而产生的循环环节,利用水的可再生属性,将水在再生回用处理后再返回用耗水系统。水资源系统的整体运行耗能随着水资源利用过程的不同环节而不同,具体水资源利用的水流过程结构见图1。

2.1 取水过程水-能关系

取水过程也就是通过供水工程取水的行为,包括地表水的蓄水工程、引水工程、提水工程,外调水的调水工程,地下水的抽水工程,非常规水的再生水利用工程和海水淡化工程等。

2.1.1 蓄水工程

蓄水工程主要消耗的能量中,闸门开闭与设备监控耗能较少,可忽略不计。输水过程沿途的水头损失属于水体本身的机械能损失,对本身运行的影响不大,无需补充电能,但由于地势问题,部分水体需借助增压泵进行输送,是蓄水工程的主要能耗来源。根据相关研究^[3],蓄水过程的能耗主要计算式为

$$W = \frac{mgh_f}{3.6 \times 10^6} \quad (1)$$

$$h_f = i \times L \quad (2)$$

$$i = 10.294 \times n^2 \times Q^2 \div d^{5.333} \quad (3)$$

式中: W 为输水能耗值, $\text{kW} \cdot \text{h}$; m 为输水质量, kg ; g 为重力加速度, N/kg ; h_f 为沿程水头损失, m ; i 为单位管长水头损失, m/m ; L 为计算管段的长度, m ; n 为粗糙率; Q 为管段流量, m^3/s ; d 为管道内径, m 。

2.1.2 引水工程

一般借重力作用把水资源从源地输送到用户

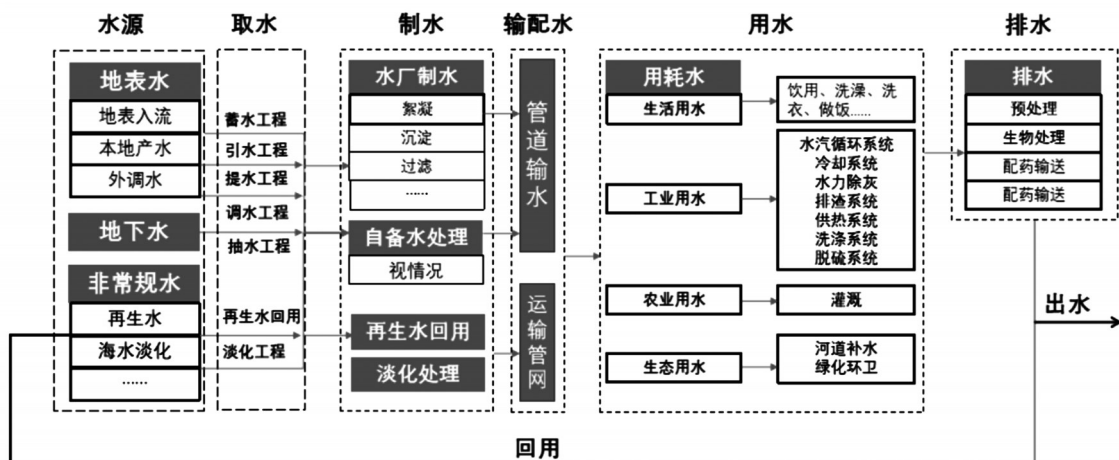


图1 水资源利用系统的水流过程

的措施,所以忽略能量消耗。

2.1.3 提水工程

提水工程分为地表水提升工程和地下水开采工程,其中地表水提升工程主要包括进水建筑物、泵房、出水建筑物等。地下水开采的能量消耗主要是利用泵站提水,其大小取决于地下水埋深、提水量、使用的泵类型和效率。

提水工程以机电作为动力,通过泵站提水消耗能量的计算式^[4]为

$$W = \frac{mgh_f}{3.6 \times 10^6 \times \varepsilon} \quad (4)$$

式中: ε 为提水泵站效率,根据高程的不同,各地提水的单位能耗不一,江苏省地表水提水过程的单位能耗平均值为 $0.04 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,地下水采水的单位能耗平均值为 $0.19 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;其余符号含义同上。

2.1.4 调水工程

跨流域调水是通过修建跨越2个或2个以上流域的引水调水工程,将丰水地区的水资源与紧缺地区的水资源相互调节以达到地区间调剂水量盈亏。南水北调中线、引大入秦是大型自流引水工程,其他均需要泵站进行输送,水头损失^[4]计算式为

$$h_f = L \times Q^2 \times n^2 \frac{(b + 2h\sqrt{1+m^2})^{\frac{4}{3}}}{[(b+mh) \times h]^{\frac{10}{3}}} \quad (5)$$

式中: b 为底宽, m ; h 为水渠水面高度, m ; m 为边坡系数。

全国跨流域调水工程单位距离单位输水能耗平均值为 $0.0045 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3 \cdot \text{km}$,但具体数值视水源和受水区而定。

2.1.5 海水淡化

海水淡化,目前最常用的是反渗透膜的反渗透法。现阶段海水淡化还处于起步阶段,根据相关研究^[5-6],采用反渗透法进行海水淡化的单位能耗为 $6.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

2.1.6 再生水回用

再生水根据用途的不同进行的处理工艺也并不相同,因此也无法进行细致的分析,只能通过统计数据进行分析。根据城镇排水统计年鉴,全国再生水处理单位能耗平均值为 $0.82 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

2.2 制水过程水-能关系

制水过程指的是提取水源进入自来水厂或工业水厂门口后的制水过程。供水方式分为集中供水和自备水,其中自备水基本是沿江沿河的企业就近取水,输水距离很短,使用之前的预处理过程能

耗一般算在企业的运转能耗中,故本次只对公共供水的制水能耗进行分析。根据年城市供水统计年鉴,不同地区输配水单位能耗不同,全国制水过程能耗平均值为 $0.32 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,其中江苏省单位制水过程中的能量为 $0.243 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

2.3 配水过程水-能关系

配水过程指的是水厂出水到用户端的过程,这一过程通过输水管道将水资源输送到终端用水户。对水源地地势低于水厂(或给水区)的情况,根据地势高差、管线长度和管道承压能力等具体情况,可能在中途设置水塔及加压泵站,或者增加具有蓄水或者增压能力的设备,然后通过这些设备将水输送至各个片区。若用户端高程较高,还需要用增压设备将水输送至高层。根据城市供水统计年鉴,不同地区输配水单位能耗不同,全国输配水过程单位能耗均值 $0.41 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,江苏省输配水过程单位能耗为 $0.368 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

2.4 用水过程能耗

用水的水-能关系相对复杂,节水对应的可能是节能,也可能是增加能耗,或者与节能没有关联。例如对于工业行业而言,火电机组的冷却方式为水冷,当改进为空冷之后,用水量将大大减少,但空冷却需要更多的能耗;高压水枪冲洗车,冲击力更强更节水但是增加了高压步骤,更加耗能。可以看出,不同工业行业、不同用水工艺等的节水与节能的关系非常复杂,很难精细化地将用水过程的水-能关系一一对应,因此本次对用水过程的能耗暂不进行详细探讨。

2.5 排水过程能耗

排水系统按照其服务对象的不同,主要分为农田排水系统和城市排水系统,但是在农村地区,一般没有给排水设施,污水没有经过污水处理。城市排水系统包括了废污水的收集、输送、处理、回用和排放等环节。由于污水处理工艺复杂,且每个环节均需要能源消耗,因此通过详细公式计算出各环节的耗能量较为困难。实际过程中,污水处理厂会对污水处理量和耗电量等情况进行统计。根据城镇排水统计年鉴对全国3362座污水处理厂的数据进行分析,结果单位污水收集排放与处理的能耗为 $0.278 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

3 区域水资源利用系统水-能关系定量探究

江苏地处江淮沂沭泗下游,地势平坦,大部分为平原水网地区,一方面通过洪泽湖、骆马湖、南四

湖、太湖及石梁河水库等大型湖泊水库拦蓄上游水,另一方面通过中小型水库、湖泊及河网拦蓄本地径流及回归水。长江横跨江苏全境入海,水量丰富,年际变化较稳定,是江苏省重要的补水水源。围绕全省经济社会发展需要,江苏逐步建成了扎根长江、覆盖全省大部分地区的江水北调、江水东引、引江济太三大跨流域调水工程体系。

3.1 江水北调水-能定量关系

由于引水不耗能,蓄水、抽水、提水在上述部分均进行了能耗计算,此处只对江水北调的耗能进行计算。根据江苏省江水北调工程泵站抽水费用分析^[7],工程运行的电费约占各运行总费用的63%,将其换算至相应的电费并统一电量之后,得到八大梯级泵站的每立方米调水的运行费用、电费及耗电量,再根据各梯级泵站的单位调水的耗电差,预估下一级泵站调水能耗。

2020年江苏省各地共使用调水水源41.54亿 m^3 ,受水区分别为扬州市、盐城市、淮安市、连云港市、泰州市、宿迁市及徐州市,受水相对分散。根据上文计算的江水北调各梯级泵站的调水能耗,使用调水受水区就近的梯级泵站的水-能关系和受水量的加权平均以计算江水北调水的单位调水能耗。

3.2 水资源利用系统水-能定量关系

综合上述水资源利用系统各阶段的水-能关系计算,得到江苏省水资源利用系统的水-能关系如表1所示。计算过程中,取水能耗因取水水源的不同而有较大差异,其中海水淡化单方水耗能最高,而引水基本是自流,因此并不耗能。相较而言,制水、配水及排水过程的能耗较稳定,主要是因为这些能耗均从自来水厂及污水处理厂发生,耗能多少取决于设备的先进情况,而相应设备基本为长期使用,因而水能关系相对稳定。

表1 江苏省工业水系统水能关系

水系统过程		单方水能耗/(kW·h)
取水过程	蓄水	0.180
	引水	0.000
	提水	0.040
	调水	0.088
	抽水	0.190
	海水淡化	6.800
	再生水回用	0.820
制水能耗		0.243
配水能耗		0.368
排水能耗		0.278

4 结 语

本研究从水资源利用系统的整个运行过程出发,将利用系统与水有关的过程划为“取-制-配-排”四大环节,并进行了各环节水-能联系的原理剖析,以此为基础对江苏省相关环节的单位水能耗进行计算。根据不同的水源和不同取水方式,将取水分为“蓄、引、提、调、抽、回、”,详细阐述了取水过程中的水-能关系。不同水源及取水方式的取水过程中,海水淡化的能耗最高,而引水和地表水提水工程能耗最低,表明地表水是最节能的取水方式。同时,海水淡化的能耗是常规水源取水能耗的数倍,其次再生水回用的能耗紧随其后。近年来一直在大力鼓励使用非常规水^[8],通过其水-能关系的分析可知非常规水的能耗非常之大,同时其水质的级别也使得其推广存在一定难度,大力推进非常规水的使用必然伴随着政策上的扶持与鼓励,尤其对于工业行业而言^[9],因此本研究可为非常规水源政策的制定提供一定的理论支撑。

本研究也还存在一些局限性,如其在宏观上对于水资源利用系统的水-能关系进行量化,而用水的水-能过程在不同部门、同一部门不同产品甚至于同一产品的不同工艺之中都存在着巨大的差异,不可一概而论。因此,在下一步的研究中,可将用水过程进行细分,如将工业行业细分到产品线运行系统的水-能分析,生活用水可以采取问卷调查并结合电器运行数据进行用水-用能关系的研判。此外,本研究虽简析了水资源利用系统的水-能关系,但只是对局部区域进行了案例分析,由于自然禀赋、气候条件及经济发展情况、水利工程发达程度以及水资源配置情况的不同,也需要进行更加具体的分析。另外,水-能-碳之间的关系还需要进一步深入研究,因为能-碳间也可通过不同地区能源排放因子进行碳排放的计算,从而为不同的水资源系统提供数据支撑,以制定合理的节水减碳政策,达到节水与减碳的协同发展。

参考文献:

- [1] DAI J, WU S, HAN G, et al. Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment [J]. Applied Energy, 2017(8): 243.
- [2] B G L A, H J H A, et al. LEAP-WEAP analysis of urban energy-water dynamic nexus in Beijing (China) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 3(10): 136.

- [3] 苏小桐. 基于节水减碳的上海市水资源与能源消耗分析及关系研究[D]. 上海:华东师范大学,2022.
- [4] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [5] 冯巍,来昶君. 海水淡化项目管理浅析[J]. 中国西部科技,2013,12(2):91-92.
- [6] CHENGL J D, HSU H K, CHEN T C. Watershed management for disaster mitigation and sustainable development in Taiwan[R]. P Rmrs,2000(13):138-148.
- [7] 黄海田,陈卫东,宋淳. 江苏省江水北调工程泵站抽水费用初步分析[J]. 中国农村水利水电,2003(1):52-54.
- [8] 施红怡,耿雷华. 江苏省“十四五”水利科技创新发展体系探索[J]. 江苏水利,2021(8):1-3.
- [9] 黄昌硕,莫丽娟,耿雷华,等. 江苏省综合节水理论研究与实践[J]. 江苏水利,2023(4):1-4.

(上接第27页)

3.4 生态环境管理能力评价

经统计分析,南通市在生态环境管理能力方面得分82.71分,处于Ⅰ等水平,相对较好。目前,南通市骨干河道水环境质量相对较好,但农村水环境改善压力较大,主要原因是农村环保基础设施有待加强,南通市未来生态环境管理能力提升的重点应是增加农村环保基础设施的投入。

4 结 语

水资源管理能力涵盖了制度建设、人员管理、财务管理等多个方面,涉及的内容既复杂多变又难以精确核定。本文从开发利用管理、用水效率管理、水资源行政管理、生态环境管理等4个维度,初步构建了水资源管理能力评价的指标体系,利用层次分析法对南通市水资源管理能力开展评价。通过这次评估,也找出了全市水资源管理的短板弱项,在今后水资源管理过程中,应着重加强产业结构调整、水资源优化配置、提升水资源监测计量和环保基础设施建设,以进一步提高用水效率和公共供水水平,增强水资源管理能力。

参考文献:

- [1] 宋云峰,杨丹,林洪孝. 基于“三条红线”的区域水资源管理能力评价研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2014,45(1):53-58.
- [2] 杨丹. 区域水资源“三条红线”管理绩效评价模型研究及实证分析[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
- [3] 徐鸿. 一种区域水资源管理绩效评价模型及实证研究[J]. 人民黄河,2016,38(9):42-45.
- [4] 罗浩,周维博,白洁芳,等. 基于GC-TOPSIS模型的水资源管理绩效评价及障碍度分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):26-30.
- [5] 吴丹,王亚华. 中国七大流域水资源综合管理绩效动态评价[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(1):32-38.
- [6] 薛淑慧,张玉虎,于森,等. 基于SVM与FCE模型的城市水资源管理评价研究——以北京市为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(1):71-75.
- [7] 纪静怡,方红远,徐志欢. 基于组合赋权云模型的水资源管理综合评价[J]. 中国农村水利水电,2020(12):40-45.
- [8] 朋磊,刘淼. 基于层次分析法的中国水资源管理能力评价研究[J]. 水利水电快报,2023,44(4):39-44.
- [9] 辛朋磊,仇娟娟,宋建军,等. 南通市沿海开发水资源保障能力评价研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(10):1179-1184.