

基于水资源生态足迹的水资源循环利用技术体系研究

王雪莉, 温 禾, 陈 永

(亚太建设科技信息研究院有限公司, 北京 100120)

摘 要: 平衡水资源供需、实现水资源合理循环利用是当前社会面临的重要问题。基于 2011—2020 年江苏省和甘肃省统计数据, 重点分析人均水资源承载力、人均水资源生态足迹和人均生态盈亏变化趋势。结合各产业人均用水生态足迹进行水资源循环利用技术体系研究。结果表明: 江苏省水资源利用常年呈生态赤字状态, 甘肃省生态赤字状态近几年已有所缓解。构建水资源循环利用体系可从“水源—取水—净水—排水—水处理—回用”流程展开, 再生水回用阶段应综合考虑区域实际情况, 根据各产业用水生态足迹统筹分配再生水中生产、生活、生态用水的比例, 提高水资源循环利用效率。

关键词: 水资源; 生态足迹; 生态承载力; 循环利用

中图分类号: X52

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022080016

Study on technical system of water resources recycling based on water ecological footprint

WANG Xueli, WEN He, CHEN Yong

(Yatai Construction Science & Technology Consulting Institute Co., Ltd, Beijing 100120, China)

Abstract: Balancing water resource supply and demand and achieving rational recycling of water resources are important issues faced by the society today. Based on the statistical data of Jiangsu Province and Gansu Province from 2011 to 2020, the changing trend of water resources carrying capacity per capita, water resources ecological footprint per capita and ecological profit and loss per capita were analyzed. Combined with the ecological footprint of per capita water use in various industries, the technical system of water resource recycling was studied. The results showed that the utilization of water resources in Jiangsu Province had shown an ecological deficit, while the ecological deficit in Gansu Province was gradually in an ecological surplus. The construction of water resources recycling system can be carried out from the process of "water source—water intaking—water purification—drainage—water treatment—reuse". In the stage of reclaimed water reuse, the actual situation of the region should be comprehensively considered, and the proportion of production, domestic and ecological water in reclaimed water should be distributed according to the ecological footprint of water use of various industries, to improve the recycling utilization rate of water resources.

Keywords: water resource; ecology footprint; ecological carrying capacity; recycling utilization

CLC number: X52

20 世纪 90 年代初, WILLIAN E.R 提出生态足迹的概念, 可将人均消耗资源折算为地域面积, 为资源合理利用和可持续发展提供指导^[1]。生态足迹主题研究中, 关于水资源生态足迹的研究自 2014 年之后有明显增加, 逐渐发展为研究热点。近年来越来越多的学者们从水资源生态足迹角度出发, 分析水资源利用及其与经济增长之间的关系^[2-3]。ALESSANDRO et al^[4]以维琴察市为例, 提出了评估城市层面直接用水生态足迹核算方法。RATTANAWAN et al^[5]研究了泰国水稻种植水足

迹清单, 以制定用水政策。MUHAMMADJONet al^[6]通过计算塔吉克斯坦南部主要作物水足迹, 评估气候变化对当前生长期作物需水量的影响, 并确定最佳播种日期以减少未来作物需水量。CHANG et al^[7]通过灰色关联模型、水资源生态足迹模型和主成分分析法对宁夏回族自治区的 5 个城市水资源环境承载力进行安全评价。CRUZ et al^[8]研究了西班牙加那利群岛码头的碳足迹和水足迹。周悦等^[9]运用水资源生态足迹盈亏模型, 从时间和空间两个维度对辽宁省水资源生态盈亏和用水效率进行了

收稿日期: 2022-08-11 录用日期: 2022-09-27

基金项目: 国家重点研发计划绿色宜居村镇技术创新专项(2018YFD1100200)

作者简介: 王雪莉(1992—), 女, 硕士、工程师。研究方向: 村镇供排水和环境咨询。E-mail: 1028561314@qq.com

引用格式: 王雪莉, 温 禾, 陈 永. 基于水资源生态足迹的水资源循环利用技术体系研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(4): 68-73.

研究。李宁等^[10]利用水生态足迹计算模型,结合协调发展脱钩评价模型对长江中游城市群的水资源利用与经济增长协调关系进行评价。张杏梅等^[11]从水量生态足迹和水质生态足迹视角分析了陕西省水资源利用与经济增长之间的关系并对其脱钩状态进行预测。李晓格等^[12]以太阳光值转换率为参数,模拟区域水资源开发利用的动态变化趋势,分析了榆林市水资源可持续利用情况。

为缓解水资源供需矛盾,治理水环境污染和修复生态环境,应当加强水资源循环利用,严格取用水管理,推广污水资源化利用。文献[13]报道,“十三五”时期,全国万元国内生产总值用水量、万元工业增加值用水量分别下降28.0%、39.6%,农田灌溉水有效利用系数显著提升。2021年“中国水周”的主题是“深入贯彻新发展理念,推进水资源集约安全利用”,对提高水资源利用效率提出重点任务。

江苏省作为我国东南沿海地区经济大省,降雨量相对充足,但节水技术和用水方式与经济发展速度不匹配,万元国内生产总值用水量与周边的上海市、浙江省存在一定差距^[14-15]。甘肃省位于西部缺水地区,东西部协作发展、黄河流域生态保护和高质量发展等政策的发布实施,对甘肃省用水结构和水资源利用效率提出更高要求。鉴于以上情况,本研究选取江苏省和甘肃省为主要研究对象,分析其人均用水生态足迹,结合“水源—取水—净水—排水—水处理—回用”环节,构建水资源循环利用体系,探讨再生水回用去向,以期为提高水资源循环利用效率提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

水资源生态承载力指在可持续发展的前提下,某一具体时期和特定区域的水资源可供量对社会系统和生态系统的支撑能力^[16]。水资源生态足迹是在特定人口数量 and 经济发展水平下,将人们为了维持正常生产生活和良好生态环境消耗的水资源量折算为用地面积。根据水资源生态承载力与水资源生态足迹计算模型^[16]得出江苏省和甘肃省2010—2019年水资源生态承载力和各用水方式水资源生态足迹。

水资源生态承载力计算模型,见式(1):

$$EC_w = N \times ec_w = N \times \gamma_w \times \phi_w \times W \div P_w \quad (1)$$

式中: EC_w 为水资源生态承载力, hm^2 ; N 为人口数; ec_w 为人均水资源生态承载力, hm^2/cap ; γ_w 为水资源全球均衡因子, 此处取值 5.19; ϕ_w 为水资源用地的产量因子, 江苏省取值 1.02, 甘肃省取值 0.22; W 为人均水资源消耗量, m^3 ; P_w 为水资源世界平均生产能力, 此处取 $3\ 140\ m^3/hm^2$ 。

水资源生态足迹计算模型, 见式(2):

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times W \div P_w \quad (2)$$

式中: EF_w 为水资源生态足迹, hm^2 ; N 为人口数; ef_w 为人均水资源生态足迹, hm^2/cap ; γ_w 为水资源全球均衡因子, 此处取值 5.19; W 为人均水资源消耗量, m^3 ; P_w 为水资源世界平均生产能力, 此处取 $3\ 140\ m^3/hm^2$ 。

本研究将江苏省水资源生态足迹分为生产、生活、城镇环境和农田灌溉 4 个类别, 甘肃省水资源生态足迹分为农业、城镇公共、工业、生活和生态 5 个类别。采用的年降水量、年水资源总量、全省总用水量、人口数、各行业用水量等数据分别摘自 2011—2020 年《江苏省水资源公报》《江苏省统计年鉴》和《甘肃省统计年鉴》。

2 研究区域水资源生态承载力与生态足迹

2.1 研究区域概况

江苏省地势较低, 地形以平原为主, 属于温带向亚热带的过渡性气候, 雨量适中, 四季分明, 河湖众多, 水系复杂, 为东部河网密集地区^[17]。2019 年江苏省水资源总量 $231.7\ 亿\ m^3$, 常住人口密度为 $753\ 人/km^2$, 城镇常住居民人均可支配收入 $51\ 056$ 元, 农村常住居民人均可支配收入 $22\ 675$ 元。根据《2019 年度江苏省生态环境状况公报》, 2019 年, 全省水环境质量总体有所改善, 纳入国家《水污染防治行动计划》和江苏省“十三五”地表水环境质量目标考核的断面中均无劣 V 类。全省开展监测的 75 个农村饮用水水源地中, 水质达到或优于 III 类的有 69 个, 达标率为 92.0%; 223 个县域地表水点位中, 水质达到或优于 III 类的有 162 个, 占 72.7%。

甘肃省位于中国西部地区, 地处黄河中上游, 山脉纵横交错, 海拔相差悬殊, 气候类型多样, 大部分地区气候干燥, 干旱、半干旱区占总面积的 75%。2019 年, 甘肃省水资源总量 $325.9\ 亿\ m^3$, 城镇居民人均可支配收入 $32\ 323.4$ 元, 农村居民人均

可支配收入 9628.9 元。甘肃省 68 个地表水省控断面中, 2019 年无 V 类、劣 V 类水质。2019 年甘肃省各城市、县城供水普及率分别达到 98.81% 和 91.44%, 城市和县城污水处理率分别为 94% 和 89%, 均达到全国平均水平。

2.2 水资源生态承载力与生态足迹

江苏省 2010—2019 年的人均水资源生态承载力在 0.1936 ~ 0.6254 hm^2/cap 之间波动, 总体呈下降趋势, 见图 1。人均承载能力最高的年份为 2016 年, 最低值则出现在 2019 年, 这是由于人均水资源承载能力与年水资源总量呈正相关, 江苏省人口数量和用水需求逐年增加, 而 2019 年降雨量较少, 水资源压力指数大。

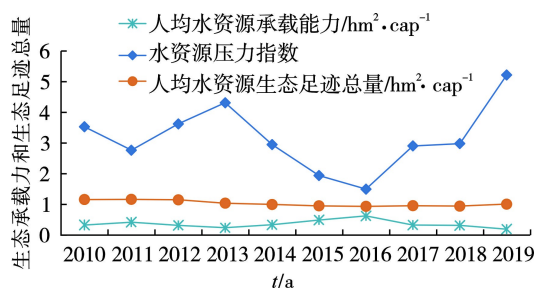


图 1 2010—2019 年江苏省人均水资源生态承载力和生态足迹总量

Fig. 1 Ecological carrying capacity per capita and ecological footprint of water resources in Jiangsu Province from 2010 to 2019

近十年来, 江苏省优化生产结构和工艺, 推动经济发展绿色转型^[18]。江苏省人均水资源生态足迹先降后升, 2011 年达到最高值, 为 1.1639 hm^2/cap , 2016 年为最低值 0.9365 hm^2/cap , 之后的 3 年随着总用水量增加, 人均水资源生态足迹略有增长。从其构成来看, 人均生产用水量生态足迹占比最大, 为 90.94% ~ 93.26%, 其中以人均农田灌溉用水量生态足迹为主, 见图 2。《江苏省节约用水条例》《江苏省农业灌溉用水定额》等节水文件颁布实施, 农田灌排基础设施不断完善, 农田灌溉管理水平得到提高, 农田灌溉用水量生态足迹逐渐下降。随着经济快速发展和生活水平的提升, 用水需求不断增加, 人均生活用水量生态足迹稳定增长, 2019 年达到 0.0832 hm^2/cap , 较 2010 年增加了 16.44%。人均城镇环境用水量生态足迹自 2016 年起有所回升, 充分体现了居民对良好生活环境的追求, 以及生态文明建设和绿色宜居在城镇规划中的重要性。

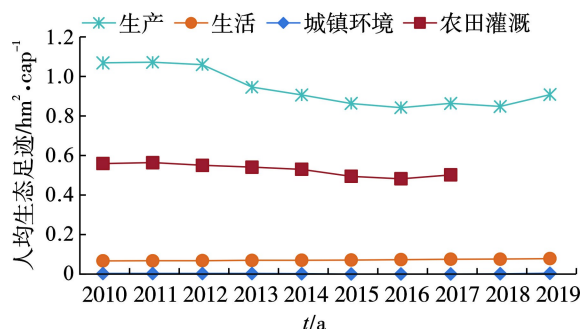


图 2 2010—2019 年江苏省各类别人均水资源生态足迹
Fig. 2 Ecological footprint of water resources in Jiangsu Province from 2010 to 2019

2010—2019 年, 江苏省人均水资源生态承载力均低于同年度人均水资源生态足迹, 即呈生态赤字状态。2012 年生态赤字达到最大值, 为 0.8346 hm^2/cap , 说明江苏省水资源供需不平衡。江苏省属于河网密集地区, 降雨量相对充沛, 但其时空分布不均匀, 水资源利用效率有待提高, 应充分利用降雨, 优化水资源利用方式。

2010—2019 年甘肃省人均水资源生态承载力波动上升, 最低值为 2015 年的 0.1112 hm^2/cap , 2018 年人均水资源生态承载力明显增加, 达到最高值 0.1957 hm^2/cap , 这与年降雨量和年水资源总量增加有关, 见图 3。人均水资源生态承载力与区域年降水量、水资源用地的产量因子和人口数量直接相关, 甘肃省处于西北干旱少雨地区, 年水资源总量并不高, 因此人均水资源生态承载力也低于江苏省, 但二者间的差距逐年缩小。整体来看, 近年来甘肃省水资源供需矛盾有所缓解, 水资源生态系统与社会经济系统的协调性相对比较稳定。

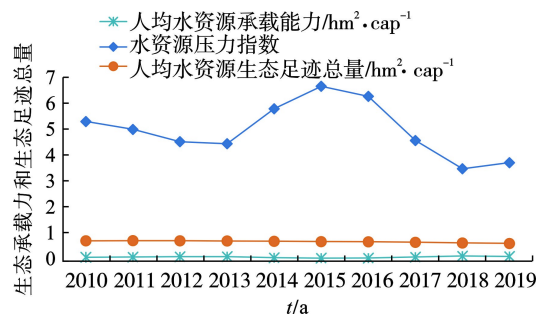


图 3 2010—2019 年甘肃省人均水资源生态承载力和生态足迹总量

Fig. 3 Ecological carrying capacity per capita and ecological footprint of water resources in Gansu Province from 2010 to 2019

甘肃省 2010 ~ 2019 年人均水资源生态足迹持续下降, 2019 年的 0.6868 hm^2/cap 为最低值, 见

图4。人均农业用水生态足迹自2014年来逐年降低,但2019年仍在人均水资源生态足迹总量中占据绝对优势,为77.82%,农业用水包括农田灌溉、林果地灌溉、草地灌溉、鱼塘补水和畜禽用水。人均城镇公共用水生态足迹呈增长趋势,2019年较2010年增幅为49.88%。人均生活用水生态足迹在2013年为最低值,随后又缓慢增加,2019年的增长率最大,为8.35%。人均生态用水生态足迹变化趋势与人均生活用水生态足迹相似,但其增长相对迅速,2015年较上一年增加了71.64%,说明随着经济社会发展,居民对环境质量的需求更高、更迫切。

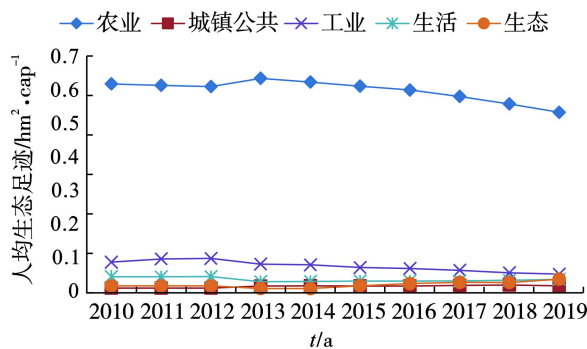


图4 2010—2019年甘肃省各类别人均水资源生态足迹
Fig. 4 Ecological footprint of water resources in Gansu Province from 2010 to 2019

随着年降雨量增多,甘肃省人均水资源生态赤字状态有所缓解,年均增长率为1.34%。这说明甘肃省生态保护与建设规划、城乡环境卫生整洁行动实施方案以及污染物减排计划、山水林田湖草项目等的实施已取得初步成效,对提高区域水资源利用效率、改善水生态环境和缓解水资源供需矛盾起到

了积极作用。

3 水资源循环利用

2019年,全国供水总量6021.2亿 m^3 ,较2018年增加5.7亿 m^3 。在总供水量中,再生水利用量占1.42%,集雨工程利用量占0.16%。我国水资源利用与城镇化发展目前逐渐趋于基本协调发展的状态,但水资源整体利用效率还有待提高^[19]。尤其村镇供排水设施建设情况与城市的差距已逐年缩小,已初步具备水资源循环利用条件和空间,应因地制宜采取适用模式提高水资源利用效率^[20]。

水资源循环利用是实现生态文明建设的重要手段之一^[21],基本理念是在循环经济的基础上提高水资源利用效率。一是减量化,通过法律政策约束,在各行业采取节水措施、雨污水回用等以减少新鲜水取用量,减轻污水处理负荷。二是再利用,通过改进生产工艺促进工厂内小循环,改进水处理技术使经处理达标的污水或雨水回用于农田灌溉、道路清扫、绿化用水等。污水再生利用既可以缓解水资源短缺现象,又可以及时收集、解决污水排放去向问题,减少水环境污染。传统污水再生利用更多侧重于生产系统内局部循环,并未统筹兼顾生产、生活用水和生态用水^[22]。本研究以江苏省和甘肃省为例,结合区域人均水资源生态承载力和人均水资源生态足迹,从“水源—取水—净水—排水—水收集—处理—利用—回用”流程着手,分析现存问题与对应措施,提出水资源循环利用技术体系,见图5。

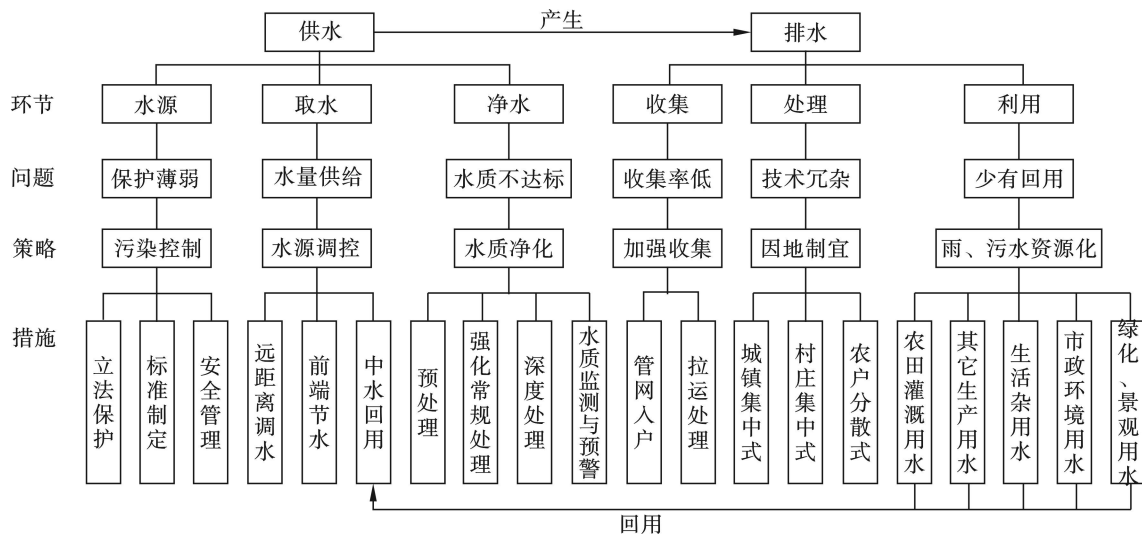


图5 水资源循环利用体系框架

Fig. 5 Technical system framework of water resource recycling

提高水资源利用效率应从保障饮水安全出发,通过制定法律、标准和监测预警等安全管理手段,以“预防为主,防治结合”的方式预防水源地水质污染,特别是村镇分散饮用水水源地。农村饮用水水源地的水质监测工作虽处于不断完善中,水质达标率也逐年提高。但与城市饮用水水源地相比,农村饮用水水源地水质达标率总体偏低,尤其是农村地下水饮用水水源地近几年呈现水质变差趋势^[23]。对水资源需求量大的地区,完善饮用水水源地监测制度,加强饮用水水源地监管力度,是提升水资源循环利用的前提。

在前端采取节水措施和净水措施是水资源循环利用的基础。例如农业灌溉采取喷灌、滴灌等方式,生活用水端使用节水型器具,优化生产工艺实现车间内水的局部循环利用,净化水质减少无效水排放等。保障污水收集处理率是推动水资源循环利用的重要条件。2019年城市、县城、建制镇和乡污水处理率分别为96.81%、93.55%、54.43%和18.21%,同年城市和县城再生水利用量分别占污水处理总量的21.62%和10.55%。市区在基本实现污水处理的情况下,已开展再生水回用;村镇地区因其污水集中收集处理率整体偏低,可鼓励农户分散或村域集中处理后就地资源化利用。

江苏省2010—2017年人均农田灌溉用水生态足迹占人均水资源生态足迹总量的48.50%~53.98%。研究表明,农业用水占江苏省南水北调受水区供水量的65%以上^[24],贯彻水循环理念,提高灌溉用水效率,可有效减少用水量。对于降雨充沛、经济较为发达、人口分布相对集中的江苏省,建议改进农田灌溉技术,采用喷灌、滴灌等方式;在排水系统设计时可充分考虑雨污分流,把雨水通过收集、处理,应用于家庭冲厕;或处理后流入河流、池塘,作景观用水。污水处理技术的选用则主要考虑污染物处理效果、运行稳定性、环境影响等因素,处理达标后,优先回用于用水量较多的农林牧渔业用水和工业用水。

甘肃省2010—2019年人均农业用水生态足迹占人均水资源生态足迹总量的77.34%~81.32%。同时甘肃省农田灌溉用水量占农业用水量的绝大部分,2019年其比例为90.11%,农田灌溉用水量是林牧渔畜用水量的9倍。由此可见,可优先考虑将处理达标的再生水回用于农田灌溉,特别是降雨匮

乏地区。对于甘肃省,因其经济条件一般、气候干燥,在污水处理达标的前提下,需综合考虑处理效果和经济学性,即运行稳定性、基建成本、运行成本等。再生水回用阶段应兼顾城镇公共和生态用水,通过洒水降尘、河湖景观用水,优化生态环境,实现水资源化利用,同时有助于实现生态固碳和绿色宜居。

东部地区河流水系分布多,工业相对发达,水资源生态承载力较高,但不同年份的年降雨量和人口数量变化大,因此人均水资源生态承载力和人均水资源生态足迹波动明显,而中西部干旱缺水地区相对稳定。东部地区应进一步发展科技,减少工业用水和生活用水压力;中西部地区可通过引水工程等手段干预水资源生态承载力,保障水资源生态系统与社会经济系统的协调发展。处理后的污水、雨水循环利用可有效减少新鲜水取用量,再生水回用去向具体可根据不同地区主要用水行业确定优先级。通过对江苏省、甘肃省的水资源生态足迹分析,可以发现农业用水效率有待提高,传统农业发达地区的生态赤字不容忽视,此类地区可充分考虑将再生水回用于农田灌溉。

4 结论

2010—2019年以来,江苏省人均水环境承载能力呈波动下降趋势;人均水资源生态足迹总体来说略有增长,其中以人均农田灌溉用水量生态足迹为主;江苏省人均水资源生态承载力均低于同年度人均水资源生态足迹,呈生态赤字状态。甘肃省人均水资源生态承载力有所上升,人均水资源生态足迹逐年下降,占比最大的仍是人均农业用水生态足迹,人均生态用水生态足迹明显增长,人均水资源生态赤字逐年缓解。

循环利用是实现水资源可持续发展的必要手段,提高水资源循环利用率可从水源保护、节水净水、污水收集处理后回用、雨水资源化利用等多维度出发,根据区域水资源分布和用水特征因地制宜地选择雨污水处理技术、标准和再生水回用去向。再生水应优先回用于生产、生活用水,兼顾生态用水,具体比例可根据各产业人均用水生态足迹确定。通过科学用水、技术节水加强水资源各个环节的循环利用,促进水资源可持续利用。

参考文献

- [1] 袁杰. 基于生态足迹的北方村镇住宅低碳设计与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [2] 李宁, 张建清, 王磊. 基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 202-208.
- [3] 翟琴琴, 张杏梅. 基于水资源生态足迹的西安市水资源利用与经济成长的脱钩分析[J]. 天津农业科学, 2021, 27(2): 49-52.
- [4] MANZARDO A, ANDREA L, FIALKIEWICZ W, et al. Methodological proposal to assess the water footprint accounting of direct water use at an urban level: A case study of the Municipality of Vicenza[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69.
- [5] MUNGKUNG R, Shabbir H, GHEEWALA, Thapat SILALERTRUKSA, et al. Water footprint inventory database of Thai rice farming for water policy decisions and water scarcity footprint label[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(12): 2128-2139.
- [6] KOBULIEV M, LIU T, KOBULIEV Z, et al Bao. Effect of future climate change on the water footprint of major crops in southern Tajikistan[J]. *Regional Sustainability*, 2021, 2(1): 60-72.
- [7] LU C, XI R, ZHENG H, et al. Safety Evaluation of Water Environment Carrying Capacity of Five Cities in Ningxia Based on Ecological Footprint of Water Resources[J]. *Asian Agricultural Research*, 2022, 14(5): 11-16.
- [8] CRUZ P NORLIA, DENISE D M, RODRIGUEZ M J, et al. Carbon and Water Footprints of Marinas in the Canary Islands (Spain)[J]. *Coastal Management*, 2022, 50(5): 408-418.
- [9] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3157-3163.
- [10] 李宁, 张建清, 王磊. 基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 202-208.
- [11] 张杏梅, 翟琴琴. 基于水资源生态足迹的陕西省水资源利用与经济成长的脱钩分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 21-26.
- [12] 李晓格, 张颖, 单永娟. 基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1066-1075.
- [13] 李晓晴. 到2025年全国年用水量总量控制在六千四百亿立方米内[EB/OL]. (2022-03-18)[2022-08-02]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/18/content_5679625.htm.
- [14] 岳金桂, 游海霞. 江苏省水资源可持续利用问题研究[J]. *水利经济*, 2016, 34(3): 41-45.
- [15] 谈飞, 史玉莹. 江苏省水资源环境与经济发展耦合协调度测评[J]. *水利经济*, 2019, 37(3): 8-12.
- [16] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [17] 曲久辉. 东部河网地区农村供排水一体化技术及应用[J]. *中国环境管理*, 2017, 9(3): 112.
- [18] 华学成, 王惠, 仇桂且. 江苏绿色发展转型: 基于绿色效率与环境全要素生产率研究[J]. *现代经济探讨*, 2018(7): 18-25.
- [19] 阚大学, 吕连菊. 中国城镇化和水资源利用的协调性分析——基于熵变方程法和状态协调度函数[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(12): 1-9.
- [20] 王雪莉, 温禾, 张一航, 等. 我国村镇供排水设施建设现状、问题及应对思考[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(3): 47-53.
- [21] 王敏晰, 马宇, 刘威, 等. 生态文明建设与资源循环利用耦合关系[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 577-587.
- [22] 胡洪营, 石磊, 许春华, 等. 区域水资源介循环利用模式: 概念·结构·特征[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 839-847.
- [23] 周同, 罗海江, 孙聪, 等. 中国农村饮用水水源水质状况研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(6): 89-94.
- [24] 方炫, 曹建军. 江苏南水北调供水区水质驱动因素分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 100-107.