

DOI: 10.20103/j.stxb.202302080209

杨永峰,李罡,赵玮,徐卫刚.基于二元水循环效率提升的城市湿地修复策略.生态学报,2024,44(4):1468-1475.

Yang Y F, Li G, Zhao W, Xu W G. Urban wetland restoration strategy based on the dualistic water cycle efficiency improvement. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1468-1475.

基于二元水循环效率提升的城市湿地修复策略

杨永峰¹, 李 罡^{2,3}, 赵 玮⁴, 徐卫刚^{5,*}

1 国家林业和草原局林草调查规划院/海南三亚城市生态系统定位观测研究站, 北京 100714

2 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230022

3 美国佛罗里达海湾海岸大学大沼泽湿地研究中心, 那不勒斯 34114

4 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室中国生态系统研究网络综合中心, 北京 100101

5 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

摘要:城市湿地对人地系统的水循环调节起着关键作用。随着城市的发展,水资源短缺问题日益突出,探讨湿地在缓解城市水资源危机中的作用具有重要意义。基于“自然-社会”二元水循环理论,综合分析了我中国城市用水量在全国总用水量占比急剧增加的现状,以及城市水循环效率低下的重点问题;基于城市水循环途径的取水、输水、用水、排水和回水五个阶段,系统提出湿地的保护恢复有助于改善城市水资源利用状况,增强城市湿地空间优化配置和水资源可持续利用的协同效应;充分考虑城市生态空间整体优化及湿地布局,全面阐释在城市国土空间规划指导下,通过增加城市水循环中社会水回归容量和缩短社会水回归距离,提升城市水循环效率,充分发挥湿地生态工程对城市水循环优化的调控作用;最后,兼顾城市中长期规划发展的协调性、适应性,探讨了湿地保护修复以提升水循环效率的策略,包括多功能水源地建设、缩短汇水距离、多级净水、营建小微湿地以及构建自循环理念的再生系统等具体措施,为城市湿地资源空间规划的整体布局提供重要依据,对促进城市水资源可持续利用和建设人与自然和谐共生的韧性城市具有重要意义。

关键词:城市湿地;水资源;二元水循环;保护修复;策略研究

Urban wetland restoration strategy based on the dualistic water cycle efficiency improvement

YANG Yongfeng¹, LI Gang^{2,3}, ZHAO Wei⁴, XU Weigang^{5,*}

1 Hainan Sanya Urban Ecosystem Observation and Research Station, Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

2 School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China

3 Everglades Wetland Research Park, the Water School, Florida Gulf Coast University, Naples 34114, USA

4 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

5 Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

Abstract: Urban wetlands play a crucial role in regulating the water cycle of the human-earth system. With the development of cities, the problem of water scarcity has become increasingly prominent. Therefore, exploring the role of wetlands in alleviating urban water resource crisis is of great significance. Based on the nature-society binary water cycle theory, this study comprehensively analyzes the current situation of the rapid increase in the proportion of urban water consumption in the total national water consumption in China, as well as the key problems in the inefficiency of the urban water circulation

基金项目:中国林业科学研究院基金项目(CAFIWRTC2020002)

收稿日期:2023-02-08; **网络出版日期:**2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuweigang@caf.ac.cn

pathways. Taking into consideration the five stages of urban water circulation—abstraction, transmission, utilization, drainage, and return, the study systematically proposes that the protection and restoration of wetlands contribute to improving the urban water resource utilization, optimizing the spatial distribution of urban wetlands, and enhancing the synergistic effects of sustainable water resource utilization. By fully considering the overall optimization of urban ecological space and wetland layout, the study elaborates on how, under the guidance of urban land-use planning, enhancing social water return capacity and reducing the distance of social water return in urban water circulation can enhance efficiency. The regulatory role of wetland ecological engineering in optimizing urban water circulation is fully utilized. Finally, with consideration for the coordination and adaptability of medium and long-term urban planning and development, strategies for wetland protection and restoration to enhance water cycle efficiency are discussed. These strategies include the construction of multi-functional water sources land, shortening the drainage distance, multi-stage water purification, establishing small-scale wetlands, and constructing regenerative systems based on the concept of self-circulation. These specific measures provide an important basis for the overall layout of urban wetland resource space planning, and are of great significance for promoting sustainable urban water resource utilization and building resilient cities that achieve harmonious coexistence between humans and nature.

Key Words: urban wetlands; water resources; dualistic water circulation; ecological restoration; strategy

2022 年 11 月 6 日,在武汉召开的《湿地公约》第十四届缔约方大会(COP14)上指出,中国已成为“国际湿地城市”最多的国家。湿地是水资源的主要涵养源之一^[1],城市湿地兼具生态价值、社会价值和经济价值。在“以中心城市引领城市群发展、城市群带动区域发展”的新形势下,我国水资源消耗随人口聚集度提升而加剧向城镇集中,资源性缺水成为当前我国城市发展中面临的最大难题^[2]。然而,城市扩张造成湿地生态空间不断被挤占,水文连通性下降,河道断流和湖面萎缩频繁发生,导致湿地蓄水和调节径流能力下降,形成“面积减少-功能衰退-面积减少”的恶性循环。因此,亟需加强城市湿地保护修复和管理,提升湿地对城市水循环的调节作用,优化城市湿地国土空间格局配置,这对维持城市的可持续发展和增强应对气候变化的能力具有重要意义。

当前应对水资源危机主要是从减少社会水的取用量出发,强调水资源利用效率的提高,即节约用水,而对如何提高社会水回归自然水的水循环效率方面的研究较少。城市人口和经济发展规模的持续扩大,导致水资源消费结构发生改变,2018 年我国城镇人均生活用水量(含公共用水)(225 L/d)是农村居民人均生活用水量(89 L/d)的 2.5 倍。伴随着城市建成区面积从 1981 年的 $0.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 扩大到 2021 年的 $6.24 \times 10^4 \text{ km}^2$,城市供水也从 $96.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 提高至 $673.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着文明发展和卫生要求,城市通常建设了包括供水管网、污水管网、雨水管网、再生水管网、直饮水管网在内的大规模管网系统。这些复杂管网系统的建设与改造减少了地下渗漏量,也使得社会水与自然水系统不断分离,人类社会水循环给自然水循环造成强烈干扰,由于受人工侧支水循环通量与路径的影响,城市水循环演变规律逐渐凸显出“自然-人工”二元特性^[3-4]。

城市湿地是人与自然和谐发展的重要建设内容,对缓解城市水资源危机起着重要调节作用。2019 年《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》出台,部署实现“多规合一”,扭转了“我国城市总体规划的模式多以空间布局和用地规划为主导,湿地与水资源可持续规划停留在理论层面”的局面。实现了以生产空间主导的国土开发方式逐渐向“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的“三生空间”协调的开发方式转变。如何通过有效的城市湿地景观构建缓解城市水资源危机成为研究重点和热点。本研究针对城市水循环特征及其主要影响因素,提出城市湿地保护修复策略,将城市湿地修复保护工程建设和水资源可持续利用结合起来,从而实现自然-社会水循环协同高效利用^[5],充分发挥湿地保护修复和布局管理在城市二元水循环中的关键作用,为提高生态系统稳定性、建设韧性城市提供科学基础。

1 城市二元水循环基本理论

1.1 二元水循环

(1) 自然水循环路径。依据“二元水循环”理论和我国湿地分类标准,自然水循环是在太阳辐射和重力等驱动下,形成“降水、坡面、河道、地下”四个路径^[5]。自然水可分为自然水源和半自然水源两部分。其中,自然水源主要指河流、湖泊等地表水,以及地下水等天然水源;半自然水源主要指水库、沟渠等人为修建,或在自然水源基础之上修建的可提供水源的人工水利基础设施。

(2) 社会水循环路径。依据“二元水循环”理论^[5-6],社会水循环可分为“取、输、用、排、回”五个路径(图1),各阶段之间多采用管网连接,是典型的“耗散结构”。随着产水和需水量的增加,社会水循环各路径的容量不断增大,水循环效率降低,加剧了水资源危机。

(3) “自然-社会”二元水循环结构。自然水循环与社会水循环的路径交叉耦合、相互作用,形成了“自然-社会”二元水循环的复杂系统结构^[5]。城市二元水循环中,水资源从离开自然水到回归自然水,包括两个过程:①社会水回归:人类社会从取水到回水阶段对水资源的利用和回收,包括“取、输、用、排、回”五个阶段,体现了水资源的社会水回归效率;②自然水输送:是自然界能量流动和物质迁移产生的水的形态变化和运动,包括自然水经过降水-蒸发-产流-汇流-入海等过程,体现了水资源的自然水输送效率。自然水输送过程也参与到社会水回归过程中,本研究主要探讨通过湿地保护修复和空间配置调节社会水循环的五个阶段,进而提升社会水回归效率,加快二元水循环,缓解用水紧张。

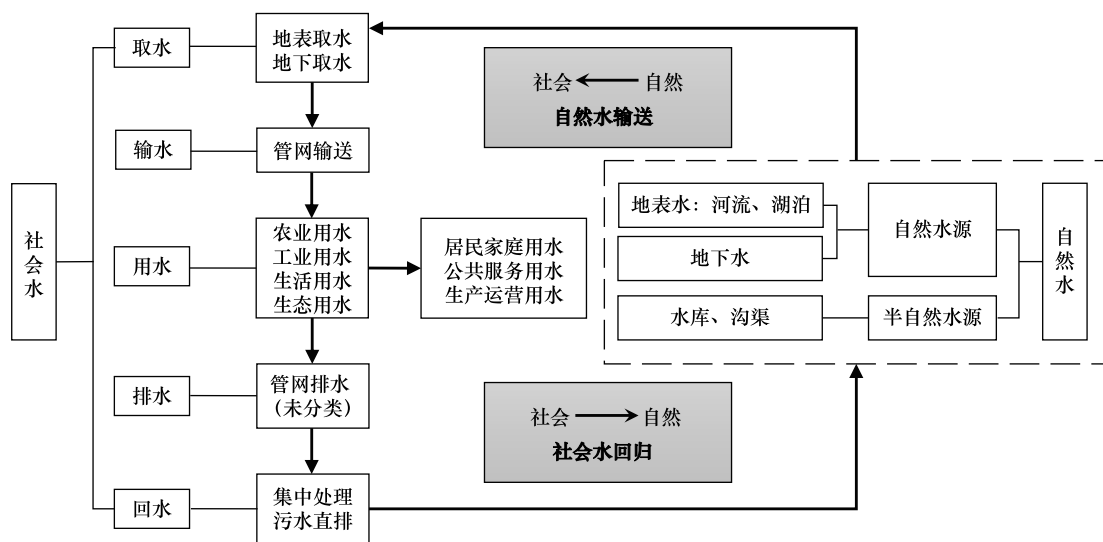


图1 “自然-社会”二元水循环概念图

Fig.1 Conceptual diagram of natural-social dualistic water cycle

1.2 社会水回归效率

在“自然-社会”二元水循环中,提高水循环效率的途径,一方面是减少需求,也就是节约用水;另一方面可以从供给侧角度增加自然湿地水资源的补给速率。在城市二元水循环中,局部湿地水资源危机并不是水资源净供给不足,而是社会水的取水量远高于对自然水的补给量。因此,通过提升社会水到自然水的回归效率,缩短二元水循环周期,从而达到缓解水资源紧张的目的。

在总排水量一定的情况下,路径越短,湿地水资源越多,循环效率越高。通过合理配置湿地水资源,提升二元水循环效率的策略,提高水资源利用率。根据城市水循环容量和湿地格局,利用湿地保护修复用于提升城市水循环效率的主要途径有(1)增加湿地水资源量,提高湿地的社会水回归容量,(2)连通湿地水系,减短

社会水转换距离。利用城市湿地对水循环的天然承载和调控能力提高社会水回归效率。

2 我国城市水循环现状与主要问题

2.1 城市用水比例增加

根据全国水资源环境公报数据分析结果,我国当前的年度用水量稳定在 $6000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,但入海水量从 1999 年的 $21321 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 2021 年的 $16825.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ [7],表明用水循环效率下降,尤其是社会水回归时间延长。我国城市占国土面积不到 1%,却消耗了超过全国年总用水量的 10%,城市供水总量从 1999 年的 $467.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加到 2021 年的 $673.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,以 $8.3 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ 的速率稳定增长。与此同时,城市用水占全国用水总量的比例也呈现出增加趋势(图 2),从 1999 年的 8.36% 增加到 2021 年的 11.37%,其中在 2006 年至 2016 年期间,由于全国用水总量的增加幅度超过城市用水总量,导致该比例出现阶段性低谷区。目前我国 600 多个大中城市中,有 400 多个存在不同程度的缺水问题。城市不断扩大造成的立体储水使得水资源从社会水到自然水的循环周期延长,河川径流量减小,导致缺水程度随时序不断加深。

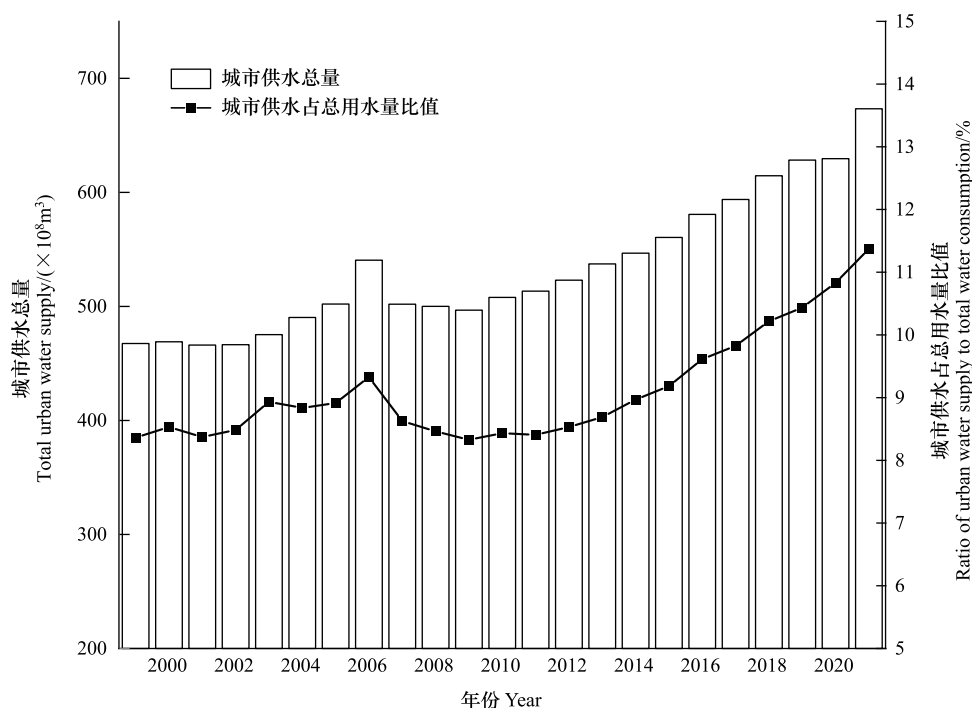


图 2 1999—2021 年我国城市供水总量及其占全国用水量比值

Fig.2 Urban water supply and its ratio to the total water consumption in China during 1999—2021

数据来源自:中国城乡建设统计年鉴

过去 50 年来,我国地表水资源开发利用从 10% 增加到 18% [8],地表水资源消耗量增加了约 1.6 倍,其中用水增加的 65% 发生在黄河流域以北。人为活动加剧了水资源时空分布的不均,城市及城市群是全国人口密度和人口总量增长的高值区,当人口聚集程度超过原本城市水资源承载能力时,城市必须为新积聚的人口建立远距离的供水系统 [9],进而加剧了对人工水库、人工运河、人工降雨、修坝筑堤、跨流域引水工程等工程的依赖。过度的水利工程设施等因素,导致原有湿地水环境结构、湿地蓄水能力、调节径流能力的严重退化,增加了河流、湖泊等各种类型湿地发生水资源危机的风险 [10-13],自然-社会二元水循环的涉水(地理)空间逐步扩大,循环路径不断延伸,内部循环结构也日趋复杂。

2.2 城市水循环效率较低

我国城市水循环(图 3)在取水、输水、用水、排水和回水五个阶段主要存在以下问题。

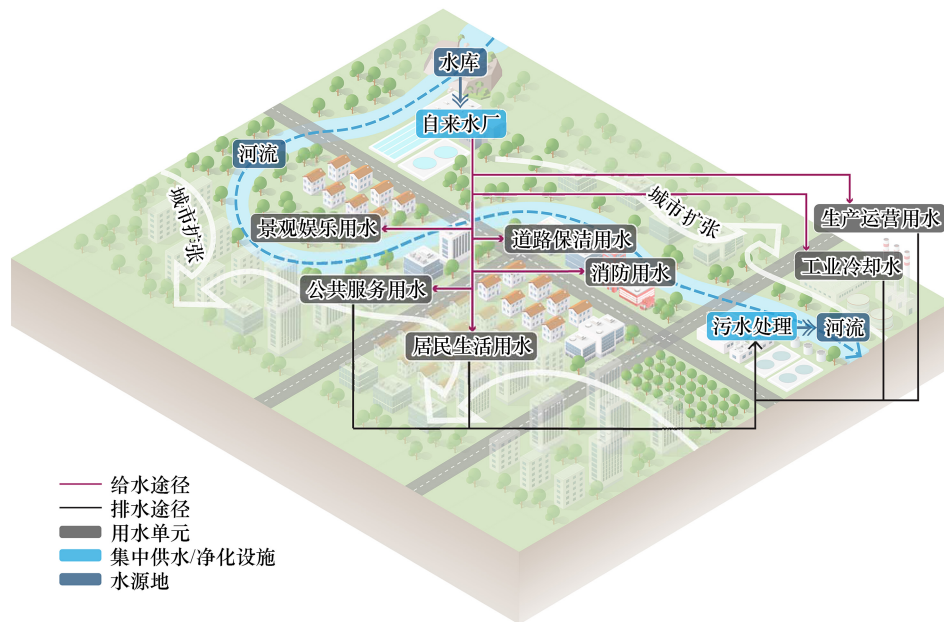


图3 城市水循环路径示意图

Fig.3 Schematic diagram of urban water cycle path

(1)取水阶段。当前我国大多数城市水源单一,主要采取建立水库式的水源地集中取水。随着城市建成区的不断扩大,异地新建水源地成为必然,取水距离也随之不断变长,这种单一的取水路径造成取水效率随城市扩大而不断降低。在城市用水量之中,人们直接饮用和与身体密切相关的水量仅占用水总量的不到30%,其余的70%以上则成为城市污水的产生量。由于前期污水处理厂建设时对再生水回用管道的规划建设不足,导致全国再生水利用水平偏低。京津冀地区的再生水利用率位居全国前列,2020年也仅达到约30%^[14]。这些污水是宝贵的淡水资源,也是城市稳定运行的重要水源^[15]。在现行的城镇生活污水排放一级A标准中,虽然个别指标低于地表水V类水质要求,但多数指标能够满足于灌溉、城市杂用水、地下水回灌的标准。

(2)输水阶段。随着城市的不断扩张、建筑楼层的不断上行,水厂和用水单元之间的输水管道长度逐年增加,全国供水管道总长度在2020年已达到100.69万km^[16]。此外,区域供水范围和分区往往通过经验人为划定,基于原有自来水厂和水源地进行扩建,部分省份在省域内实行了城乡联网供水,极大地增加了水源地的承载压力,延长了社会水循环的回流周期。

(3)用水阶段。工农业发展、人口增加、城市化进程以及人民生活水平的提高对水资源的刚性需求不但没有削减,还衍生出了对水资源的多元化需求。受基础设施供应影响,城市绿化用水等各种杂用水也是通过自来水厂引水,低水(水质要求)高配的方式也减缓了水循环过程。此外,大量水资源被长期固定在容器(如各类包装水等)和运输设备(管道系统)中,也降低了社会水的循环效率。2019年,我国瓶装水市场规模达2000亿元,包装饮用水产量达 $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[17],酒水饮料用水也达到约 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,每年仅此一项就有 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水资源在社会水中长时间滞留。

(4)排水阶段。我国城市管理主要实施污水集中处理的模式,各用水单元的污废水通过城市雨水管道、居民生活污水管道等向污水处理厂集中。近20年来,我国建成区面积由2.8万km²扩张6.03万km²^[18],增加了2.15倍;城市污水处理厂由1000多座增长到5000多座(不含乡镇污水处理厂和工业污水厂)^[16],增加了约5倍,使得污水向污水处理厂集中的周期不断延长。

(5)回水阶段。截至2019年6月底,我国污水处理能力达到 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[19],但处理能力的迅速增长依然不能满足城市大规模发展的需求。过度集中式的城市污水处理系统,不仅导致投资费用和运行能耗居高不

下,也明显影响了中水的就地利用。单一的污水处理模式造成远距离的管道输送,使之不能及时反补回流到自然水中,加剧自然资源可利用量短缺的表象。

湿地生态保护修复工程通过连通水系,充分发挥湿地在净化、蓄洪、涵养水源等方面的承载和调控优势,积极探索通过工程建设增加城市水资源循环容量和缩短社会水回归距离,有效提升水循环效率,探讨解决城市二元水循环中的“取、输、用、排、回”途径中存在的天然水承载总量不足和湿地配置用途不合理等问题的有效途径,湿地的保护恢复有助于改善城市水资源利用状况,增强城市湿地空间优化配置和水资源可持续利用的协同效应,有助于发挥湿地在城市系统中的社会、文化价值,促进城市系统人湿关系的稳定有序发展,实现生产、生活、生态空间相宜。

3 湿地保护修复提升水循环效率的策略分析与展望

城市湿地兼具生态和文化效益,具有宝贵的自然资源禀赋。城市水资源利用总量及其在全国总用水量中的占比均表现出增加趋势,一旦城市水资源紧张将严重制约社会 and 经济发展。本研究创新性地提出了通过城市湿地保护修复提升“自然-社会”二元水循环效率,探讨城市二元水循环效率提升目标下的湿地保护修复策略。基于城市二元水循环特征和制约水资源利用效率的主要因素和关键环节,从社会水到自然水的“取、输、用、排、回”五个途径,探究以提升城市水资源循环效率为目标的湿地保护修复与布局配置策略(图4);同时,在城市国土空间规划指导下,充分考虑城市生态空间整体优化及湿地布局、增删的效益经济比,兼顾城市中长期规划发展的协调性、适应性,建设湿地保护与修复工程^[20],加强城市水资源的可持续循环利用。

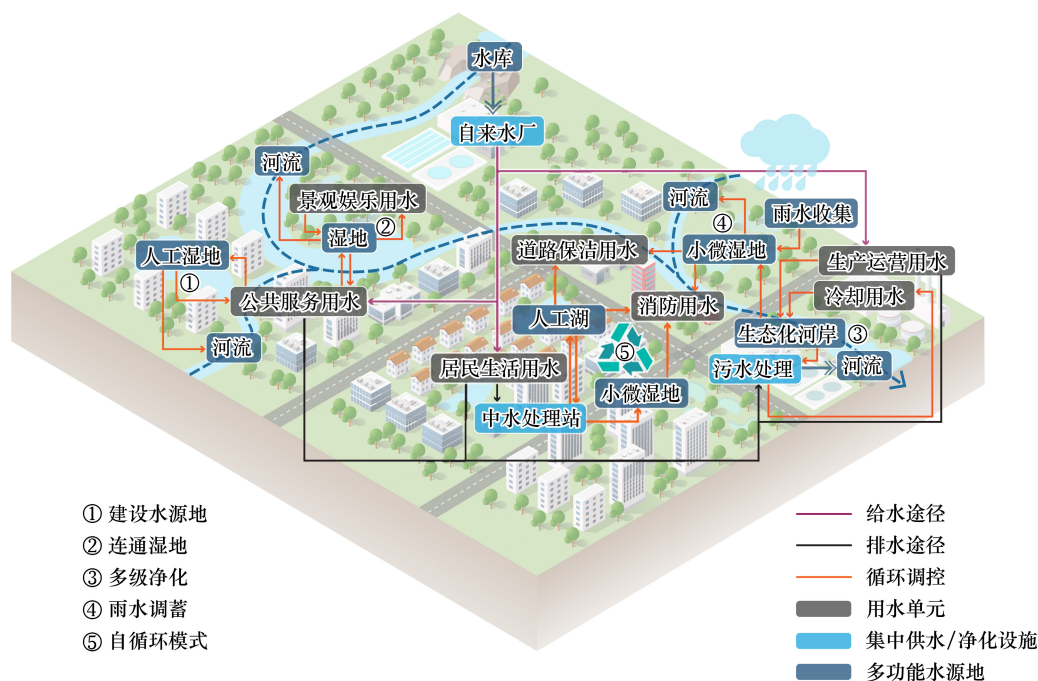


图4 提升城市水循环效率的湿地保护修复策略示意图

Fig.4 Schematic diagram of wetland conservation and restoration strategies for improving urban water cycle efficiency

(1) 建设多功能湿地水源地,缩减水循环周期

在城市水循环的取水阶段,采用分散与集中相结合的方式就近提供水源,改变集中取水、单一取水的局面。通过新建或扩建城市人工湖库,系统规划新建开发园区、居住小区和景观公园的景观水体,将水源地扩展为饮用、城市绿化、生产、生活、生态等不同功能的用水水源地,建设多功能湿地水源地;在工业用水、景观用水和城市公共用水方面提高再生水利用率,实现“优质优用,低质低用”的目标,将可以减少净水阶段的滞留时

间,缩短输水距离,从而缩减水循环周期,有效提升水资源的供给和循环效率。此外,在有条件的城市通过提高直饮水普及率,也可以缩短自然水停留在各种包装容器的时间。

(2) 恢复湿地分布格局,优化水文连通结构

随着城市扩张的发展,以往配套建设的管道与河道排水之间的衔接逐渐出现错位和承载能力不足的问题,同时城市建设单元和交通干道的开发,改变了原有自然河网结构,导致城市输水格局紊乱^[21-22]。2020 年中央财经委员会第六次会议上明确提出“还水于河”的要求,因此在城市水循环的输水阶段,主要通过划分汇水区域,消除“断头河”,疏浚、沟通和拓宽河道以及因地制宜恢复因历史原因封盖、填埋的天然沟渠和水塘,加强城市河、湖、沟、塘等湿地保护和修复力度,增加支流数目并恢复河道自然走势,恢复重建“树网型”湿地结构,提高湿地水文连通性,缩短各建筑区域的汇水距离,同时在湿地布局规划时需要充分考虑城市生态空间整体优化,通过规划建设疏通城市输水路径,优化水文连通结构,加快城市水循环的供水补水效率,为决策者在绿色宜居新城区的开发建设和管理中提供行之有效的空间指引^[23]。

(3) 扩展多级净水体系,增加生态蓄水空间

在城市水循环的用水阶段,建立多级人工湿地分散分类处理体系。结合现有城市河流多因降低阻力系数利于快排而被渠化、硬化,并进而几乎丧失自净能力,通过堤防工程断面优化,因地制宜实施防洪堤和护岸等生态化改造工程,利用“再蛇化”梯级护岸建设,扩大蓄水空间,建设梯级多功能湿地保护和修复工程。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出到 2025 年,全国地表水达到或好于 III 类水体比例达到 85% 的目标。污水处理厂即使全面执行一级 A 排放标准,其出水也会因个别指标低于 V 类标准而成为新的污染水源。已有研究表明,常规的再生水水质不足以消除河流黑臭^[24],许多城市开始计划将污水处理厂的出水水质由一级 A 标准提升至地表类 IV 水甚至 III 类标准^[25],对河岸进行生态化工程改造和人工湿地建设后,天然河道能够对水质进行二次净化,城市湿地兼具生态和社会效益,水质净化效果显著^[26-27],同时减轻“提标改造”造成的碳排放负担,在保证地表水质和污水处理达标前提下,缓解水质恶化和能耗增加问题。

(4) 营建雨水调蓄湿地,提高自然纳污能力

城市扩张中先地上后地下的发展模式,导致生态基础设施建设严重滞后,湿地资源被破坏,引发环境问题^[11],城市水资源的调蓄能力下降,在水循环的排水阶段,通过对现有池塘、沟渠以及大面积造林地里的蓄水坑改造,建设大小不一的雨水花园、雨水储留湿地、树池洼地、生物沟等形式的“城市水窖”工程,在不改变当前城市 and 自然水分布格局的情况下,增强城市系统的自然纳污能力。这一工程措施,不但可以有效截留雨水,缓解因雨污分流改造能力有限造成的污水处理压力,也将减少雨水因随管道进入污水处理厂而延长进入自然的时间,同时,解决城市夏季汛期“低水量高水位”的问题,增强下穿式立交桥、地下停车场、地下通道等敏感区域应对洪涝灾害能力。

(5) 构建“绿色社区+小微湿地”自循环模式,发挥分散治理的协同作用

城镇化人口和生产规模不断扩大,用水单元污水传输距离也在增加,配套管网未能同步规划建设,水资源集中流向污水处理厂,延长了水资源的滞留时间,致使循环效率降低。在水循环的回水阶段,结合绿色社区和小微湿地建设,将中水处理站处理居民住宅生活排水(包括洗浴、冲厕等生活污水)后的尾水,作为补给水源用于社区人工湖的维持,形成“绿色社区+小微湿地”自循环模式。这种模式可以成为周边生态、环卫、消防的补充水源,不仅减少对上一层级用水量的需求,同时减少对下一层级污水净化量的处理要求,在自给自足基础上,提高了中水利用效率,减轻了城市系统的污水综合处理压力^[26],这种模式既满足了自循环系统分散治理,又实现了城市系统的协同治理。

通过湿地保护与修复工程提升二元水循环效率,促进城市水资源的健康循环,充分发挥城市湿地的生态调蓄功能^[28],自循环微系统的构建能够有效提升水资源利用效率,降低通过远距离输水产生的能耗成本和环境风险,减少人类活动对自然水文规律干扰的负面影响,维持生态平衡^[29],推动人与自然和谐共生。

中国在湿地城市建设中采取了更加积极的保护行动,为促进全球湿地生态环境与人类社会和谐发展做出了重要贡献。“自然-社会”二元水循环效率的提升,将大大缩短水资源的循环周期,缓解水资源危机,但在不同区域需要依据自然湿地状况和城市发展阶段,深入研究湿地率的适宜区间以及湿地恢复策略,提出因地制宜的理论依据和技术支持^[30];开展湿地景观格局和城市水资源分配的统筹规划,合理布设城市湿地的空间配置和结构功能;优化城市湿地在自然生态、社会经济和资源整合等方面的综合调控能力,加强湿地生态系统与社会经济过程相互关系的研究^[31-32];将水循环效率提升的生态修复策略加入城市湿地保护发展规划中,与此同时,实施水循环效率提升的生态修复时也要与城市中长期发展规划相结合;基于水循环效率提升的生态修复将有助于提高生态系统质量和稳定性,对建设生态宜居和资源友好的韧性城市具有重要现实意义。

参考文献 (References):

- [1] Józwiakowski K. Possibilities of protection of water resources with the use of constructed wetland systems; a review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2009, 9(2/3/4): 297-306.
- [2] Bartholomew M K, Anderson C J, Berkowitz J F. Wetland vegetation response to groundwater pumping and hydrologic recovery. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2609-2619.
- [3] 裴源生, 许继军, 肖伟华, 杨明智, 侯保灯. 基于二元水循环的水量-水质-水效联合调控模型开发与应用. *水利学报*, 2020, 51(12): 1473-1485.
- [4] 丁超, 胡永江, 王振华, 赵娜, 董文秀, 王黎明. 虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 356-371.
- [5] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法. *水利学报*, 2016, 47(10): 1219-1226.
- [6] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 王浩, 王建华, 李海红, 褚俊英, 陈根发. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架. *科学通报*, 2014, 59(S1): 419-427.
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报—2020. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [8] Zhou X Y, Yang Y H, Sheng Z P, Zhang Y Q. Reconstructed natural runoff helps to quantify the relationship between upstream water use and downstream water scarcity in China's River Basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(5): 2491-2505.
- [9] 孙阳, 王佳驊, 伍世代. 近 35 年中国资源环境承载力评价: 脉络、热点及展望. *自然资源学报*, 2022, 37(1): 34-58.
- [10] Lv Y, Huang G H, Sun W. A solution to the water resources crisis in wetlands: development of a scenario-based modeling approach with uncertain features. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 515-526.
- [11] Wang C H, Hou Y L, Xue Y J. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: analysis of policy optimization for urban wetland water resources management. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1180-1191.
- [12] Xu G H, Xu X L, Tang W B, Liu W, Shi J, Liu M X, Wang K L. Fighting against water crisis in China—a glimpse of water regime shift at County level. *Environmental Science & Policy*, 2016, 61: 33-41.
- [13] 王雅晴, 冼超凡, 欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价. *生态学报*, 2021, 41(8): 2983-2995.
- [14] 杨静, 荆平, 高蝶, 曹慧博. 京津冀城市群水资源循环经济发展的障碍因子分析. *中国农村水利水电*, 2020(10): 131-136.
- [15] 曲炜. 我国污水处理回用发展历程及特点. *中国水利*, 2013(23): 50-52.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴-2021. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [17] 潘弘璇, 郑端, 关芷珊, 林依雯, 徐仪斯. 中国瓶装水市场发展现状及消费需求分析. *中国商论*, 2022(1): 22-24.
- [18] 钟国辉. 城市建成区扩张与经济增长的关系研究. *中国市场*, 2020(23): 30-31.
- [19] 冯云凤. 我国城市污水处理回用现状与发展趋势. *环境与发展*, 2020, 32(4): 63, 65.
- [20] 路飞, 许先鹏, 鲜明睿, 武旭. 拉萨市城市规划区湿地保护现状与对策. *林业调查规划*, 2019, 44(1): 143-147, 152.
- [21] 周倩倩, 李阿婷, 张茜. 城市暴雨内涝对交通的影响及路线优化对策. *广东工业大学学报*, 2018, 35(4): 81-85.
- [22] 李宗礼, 郝秀平, 王中根, 刘晓洁, 李浩. 河湖水系连通分类体系探讨. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1975-1982.
- [23] 徐烨, 杨帆, 颜昌宙. 基于景观格局分析的雄安新区湿地生态健康评价. *生态学报*, 2020, 40(20): 7132-7142.
- [24] 段余杰, 徐宏菊, 姚丽娟, 陶益, 张锡辉. 再生水对城市河流水体黑臭影响的研究. *建设科技*, 2016(1): 25-29.
- [25] 蔡木林, 卢延娜, 刘琰, 赵丽娜, 杨占红, 魏玉霞, 王海燕. 城镇污水处理厂出水排放限值分级及提标成本研究. *环境科学研究*, 2021, 34(7): 1562-1568.
- [26] 陈双, 王国祥, 许晓光, RUHYADI Roby, 马杰, 于岑滢. 水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响. *环境工程学报*, 2018, 12(5): 1424-1433.
- [27] 王立帅, 徐诗文, 林浩文, 吴珊珊. 城市湿地公园建成后综合绩效评估——以广州大观湿地为例. *生态学报*, 2019, 39(16): 6001-6016.
- [28] 王建华, 吕宪国. 城市湿地概念和功能及中国城市湿地保护. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 555-560.
- [29] 张杰, 李冬. 城市水系统健康循环理论与方略. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(6): 849-854, 868.
- [30] Cao S S, Hu D Y, Zhao W J, Chen S S, Chen Q W. Spatial structure comparison of urban agglomerations between China and USA in a perspective of impervious surface coverage: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei and Boswash. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 1017-1031.
- [31] 穆泳林, 梁晨, 李晓文, 白军红, 崔保山, 智烈慧, 梁芳源, 李鹏, 程维金, 肖之炎. 基于系统保护规划的海河流域湿地保护优先格局与保护空缺识别. *生态学报*, 2021, 41(10): 3836-3845.
- [32] Álvarez-Romero J G, Adams V M, Pressey R L, Douglas M, Dale A P, Augé A A, Ball D, Childs J, Digby M, Dobbs R, Gobius N, Hinchley D, Lancaster I, Maughan M, Perdrisat I. Integrated cross-realm planning: a decision-makers' perspective. *Biological Conservation*, 2015, 191: 799-808.