

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0115

曾子悦, 许继军, 吴光东, 等. 南水北调中线一期工程生态效益评估: 以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1168-1178. ZENG Z Y, XU J J, WU G D, et al. Evaluation of ecological services of the first phase of middle route of the South-to-North Water Transfer Project: A case study of Beijing City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1168-1178. (in Chinese)

南水北调中线一期工程生态效益评估

——以北京市为例

曾子悦^{1,2}, 许继军^{1,2}, 吴光东^{1,2}, 王永强^{1,2}, 霍军军^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010)

摘要:以北京市为例,对南水北调中线一期工程产生的实际生态效益进行定量评估。确立南水北调已建工程生态效益评估方法,分析北京市南水北调供水对生态效益的贡献比例,围绕林地、城市绿地、湿地、压采地下水和水域生态效益 5 个方面,计算南水北调中线一期工程为北京市带来的生态效益价值。结果表明:中线一期工程通水后的 4 年间(2015—2018 年),北京市新增的林地、绿地、湿地、水域生态效益和补充地下水生态效益累计为 181.88 亿元,其中由中线一期工程供水累计新增的生态效益价值达到 67.31 亿元。进一步分析可知,在中线一期工程供水产生的生态效益中:新增水域的生态效益最大,占比为 55.00%;压采地下水生态效益次之,占比为 34.85%;新增林地和绿地生态效益占比分别为 6.91% 和 3.24%。研究结果可为北京市及其他南水北调受水区的生态用水、生态环境修复与保护和资源高效利用等方面政策及措施的制定提供支撑。

关键词:南水北调;中线一期工程;生态效益评估;生态用水;北京市

中图分类号: TV214; X171.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



南水北调工程已完成东、中线一期建设,并于 2013—2014 年建成通水,初步构筑了我国“南北调配、东西互济”的水网格局。全面通水以来,工程运行安全平稳,水质持续达标,供用水量连年上升。据统计,截至 2022 年 5 月 14 日,东、中线一期工程累计调水突破 530 亿 m³,直接受益人口达 1.4 亿人,为沿线 50 余条河流实施生态补水 85 亿 m³,为受水区压减地下水超采量超 50 亿 m³,为我国经济社会发展和生态环境保护发挥着越来越重要的支撑作用。东、中线工程通水近 7 年以来,沿线 50 余条河流和一大批湖泊重现生机,华北地区的地下水水位下降和地面沉降趋势得到有效遏制,一定程度上缓解了受水区城市生活、工业用水与农业以及生态补水的紧张局面。通过直接或者置换等方式向河湖

生态补水及压采地下水,沿线河湖水域面积增加,部分区域地下水水位回升^[1]。此外,水源区及沿线水质提升和生态建设,改善了城市生态和景观环境,南水北调工程生态作用及其效益逐渐显现,源源不断滋养北方土地,造福受水区百姓^[2]。

随着生态文明建设战略地位的逐步提升和生态环境保护意识的显著提高,研究分析南水北调工程的生态效益可为南水北调和其他跨流域引调水工程的规划建设与运行管理提供参考依据。因此,对南水北调已建工程生态效益开展合理量化评估十分必要。目前,针对南水北调工程受水区生态效益评估的研究还较为缺乏,前人研究大多是基于预测值来评估工程的潜在效益。例如:杨爱民等^[3]依据东线一期工程可行性研究报告和相关受水区城市

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-09-14 网络出版时间: 2022-11-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221121.1349.002.html>

基金项目: 2021 年水利部重点领域战略研究项目(SKR-2022008);湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB132)

作者简介: 曾子悦(1993—),女(回族),湖北天门人,高级工程师,博士,主要从事水资源管理、遥感水文等方面研究。E-mail: zengzy@mail.crsri.cn

国民经济和社会发展以及城市规划报告,评估了南水北调东线一期工程受水区生态效益;张璐等^[4-5]将中线一期工程受水区绿地生态效益和水土保持林草措施生态服务功能价值分别进行了量化。也有部分研究依照通水后相关部门的统计数据开展评估,李阳等^[6]根据北京市园林绿化局首都园林绿化政务网公开数据,初步评估了中线工程通水两年,北京市因南水北调水的直接或间接利用而增加的生态环境经济效益约为37.8亿元。截至2022年7月22日,南水北调工程全面通水7周年,中线一期工程累计供水突破500亿m³,中线受水区的相关统计监测资料也逐渐完善,可为开展南水北调已建工程的实际生态效益评估提供有效的数据支撑。由于北京市具备较好的数据资料条件和前期研究基础,故选取北京市作为典型受水区,基于生态经济学原理,建立南水北调已建工程生态效益评价指标,分析南水北调已建工程生态效益评估方法、基础数据的获取途径及处理方法,探讨南水北调中线一期工程对北京市产生的生态效益,为南水北调已建工程生态效益评估提供技术参考。

1 北京市南水北调中线一期工程概况

北京市人均年水资源量低于世界平均水平,也远低于中国《宜居城市科学评价标准》规定的500 m³/(人·a)^[7]。为满足城市的大量用水需求,地下水被长期开采。相比2010年,2014年北京市浅部含水层地下水降落漏斗面积达到500 km²,漏斗中心区水位累积下降超过40 m^[8]。南水北调中线于2014年12月27日正式通水进京,至2018年10月31日的4年间,已向北京输水40.50亿m³,其中约70%用于城市居民生活,受益人口达1200万人,全市人均年水资源量由原来的100 m³提升至2018年的165 m³^[9]。中线一期工程的供水范围基本覆盖城6区及大兴、门头沟、通州等地区,其余30%左右的南水北调水用于储存在各大水库、回补地下水等,相继实施了潮白河、永定河等河道生态补水工作,有效促进重点水源地和永定河平原段等地下水严重超采区的地下水资源涵养修复。相较于2010年前后水资源状况,中线一期通水后的4年间,北京市水资源压力有所缓解。

2 数据来源

本研究根据北京市园林绿化局首都的园林绿化

政务网统计数据,获取了北京市林木资源及城市绿地基本情况。采用Landsat 8遥感影像数据和地表覆被数据集获取北京市土地利用/地表覆盖分类,通过前后年份结果对比,分析北京市南水北调工程通水前后的土地利用/地表覆盖变化情况,对统计资料数据进行补充。由于统计数据的滞后性和卫星遥感影像的时效性影响,本研究选取2014年为基准年,讨论截至2018年南水北调中线一期工程为北京市带来的生态效益。

3 生态效益评估方法

3.1 南水北调已建工程生态效益概念内涵

参考杨爱民等^[3]、Jiang等^[10]、吴瑕^[11]、宋炜等^[12]的研究,本研究认为南水北调已建工程的生态效益是指通水后在工程区生态系统及其影响范围内,由于工程供水引起的生态系统状态改变而产生的有益作用的全部效用,可通过生态系统服务价值的变化进行衡量。针对北京市,具体研究南水北调中线一期工程通水后地表生态系统(主要为林地、绿地、湿地、河流湖泊等水域)以及地下水生态系统产生的效益价值。

3.2 南水北调已建工程生态效益评估方法

通过评价南水北调已建工程产生的生态系统服务功能价值可评估其生态效益,市场价值理论是开展生态系统服务价值评估研究的基础,基于市场理论的直接评估法具备数据获取方便、方法不确定性相对较小以及市场定价易于获取和调整等优势,研究应用相对广泛^[13-16]。因此,本研究基于生态经济学原理,围绕相关生态效益评价指标,采用影子工程法、恢复和防护费用法以及工程费用法等方法,计算研究区域的生态效益总价值,并将相关物价折算至2018年。

林地生态效益评估方法。林地生态效益(B_1)主要包括土壤保持(B_{11})、固碳释氧(B_{12})、净化空气(B_{13})、减弱噪声(B_{14})和水源涵养(B_{15}),参照相关技术规范及文献资料^[3,17-23], $B_{11} \sim B_{15}$ 可分别按式(1)~(5)计算。

土壤保持效益主要包括固持土壤、保肥、防止泥沙滞留和淤积3个方面,公式为

$$B_{11} = \frac{A_1 \times C_{11}}{\rho} \times S_{11} \times 10^{-4} + A_1 \times C'_{11} \times S'_{11} \times 10^{-3} + A_1 \times C''_{11} / \rho \times 24\% \times S''_{11} \quad (1)$$

式中: B_{11} 为土壤保持效益值, 元/a; A_1 为新增林地面积, hm^2 ; C_{11} 为单位面积林地每年防止土壤侵蚀的能力, 取值为 $11.11 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; ρ 为土壤容重, 取 $1.39 \text{ t}/\text{m}^3$; 根据我国耕作土壤的平均厚度, h 取值为 0.5 m ; S_{11} 为林业生产的平均收益, 取值为 $387.68 \text{ 元}/\text{hm}^2$; C'_{11} 为单位面积林地每年防止养分离失的能力, 取值为 $447.23 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S'_{11} 为土壤养分的影子价格, 根据化肥价格取值为 $3749.11 \text{ 元}/\text{t}$; C''_{11} 为单位面积林地每年的土壤保持量, 取值为 $3530 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S''_{11} 为修建水库工程费用, 以单位库容造价 $8.40 \text{ 元}/\text{m}^3$ 计算。

固碳释氧效益可根据林地固定 CO_2 和供给 O_2 的经济价值计算。此外, 根据植物光合作用方程式, 植物形成 1 t 干物质需要吸收和放出的 CO_2 与 O_2 质量之比为 $1.63:1.2$, 公式为

$$B_{12} = A_1 \times l_{12} \times S_{12} \times 12/44 + A_1 \times l_{12} \times S'_{12} \times 1.2/1.63 \quad (2)$$

式中: B_{12} 为固碳释氧效益值, 元/a; l_{12} 为每年单位面积林地的 CO_2 吸收率, 取值为 $13.6 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{12} 为固碳造林成本, 取值为 $1200 \text{ 元}/\text{t}$; S'_{12} 为 O_2 的生产成本, 取值为 $1000 \text{ 元}/\text{t}$ 。

净化空气效益主要包括吸收 SO_2 、氟化物、氮氧化物和粉尘 4 个方面, 公式为

$$B_{13} = A_1 \times C_{131} \times S_{131} + A_1 \times C_{132} \times S_{132} + A_1 \times C_{133} \times S_{133} + A_1 \times C_{134} \times S_{134} \times 10^3 \quad (3)$$

式中: B_{13} 为净化空气效益值, 元/a; C_{131} 为每年单位面积林地吸收 SO_2 的能力, 取值为 $88.65 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{131} 为消减 SO_2 的成本, 元/kg; C_{132} 为每年单位面积林地吸收氟化物的能力, 取值为 $0.50 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{132} 为消减氟化物的成本, 元/kg; C_{133} 为每年单位面积林地吸收氮氧化物的能力, 当氮氧化物的发生量为 106.7 wt 时, 森林的吸收量为 $6.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 可能的吸收率为 3.5% ; S_{133} 为吸收氮氧化物的成本, 元/kg; C_{134} 为每年单位面积林地吸收粉尘的能力, 取值为 $10.11 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{134} 为消减粉尘的成本, 元/kg。按照《环境保护税目税额表》规定的大气污染物税额 $1.20 \sim 12.00 \text{ 元}$ 的标准以及北京市按照最高限额征收的基本事实, $S_{131} \sim S_{134}$ 取值分别定为 12.00 、 6.90 、 6.30 和 $1.50 \text{ 元}/\text{kg}$ 。

减弱噪声效益可通过造林成本的 15% 进行衡量

$$B_{14} = A_1 \times C_{14} \times S_{14} \times 15\% \quad (4)$$

式中: B_{14} 为减弱噪声效益值, 元/a; C_{14} 为每年成熟

林单位面积蓄积量, 取值为 $80 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{14} 为平均造林成本, 取值为 $353.04 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

水源涵养效益主要表现为林地由枯枝落叶层和土壤层持水、冠层对降雨的截流在削减洪峰、保证水源补给等方面, 可通过影子工程法进行计算:

$$B_{15} = A_1 \times C_{15} \times S_{15} \quad (5)$$

式中: B_{15} 为水源涵养效益值, 元/a; C_{15} 为单位面积林地每年的水源涵养能力, 取值为 $1105 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S_{15} 为影子工程成本, 以单位库容造价 $8.40 \text{ 元}/\text{m}^3$ 计算。

城市绿地生态效益评估方法。城市绿地生态效益(B_2)主要包括土壤保持(B_{21})、固碳释氧(B_{22})、净化空气(B_{23})、减弱噪声(B_{24})、水源涵养(B_{25})、调节小气候(B_{26})和杀菌(B_{27})等方面。前 4 种效益的计算方法与林地生态效益一致, 但计算价值量的市场定价有所区别。其中: 计算固持土壤效益 B_{21} 时, S_{21} 为绿地生产的平均收益, 取值为 $185.3 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[24]; 计算绿地固碳释氧 B_{22} 时, 其中, 公园绿地固碳量为 $33.6 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 释氧量为 $24.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 其他类型的绿地固碳量为 $25.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 释氧量为 $18.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[6]; 计算净化空气效益 B_{23} 时, 据北京市林业局统计数据可知, 近 5 年来北京城市绿地实增林木数量约为林地实增林木数量的 $1/6$, 需乘以此系数; 计算水源涵养 B_{25} 时, C_{25} 为单位面积绿地每年的水源涵养能力, 取值为 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ^[6]。

调节小气候效益主要表现为降温和增湿两方面, 可通过影子价格法计算:

$$B_{26} = A_2 \times S_{26} \quad (6)$$

式中: B_{26} 为调节小气候效益值, 元/a; A_2 为新增绿地面积, hm^2 ; S_{26} 为城市绿地生态系统每年调节气温的影子价格, 取值为 $114752 \text{ 元}/\text{hm}^2$ ^[22,25]。

研究表明杀菌效益为其他环境效益总和的 1% ^[26], 可通过下式计算:

$$B_{27} = (B_{21} + B_{22} + B_{23} + B_{24} + B_{25} + B_{26}) \times 1\% \quad (7)$$

式中: B_{27} 为调节小气候效益值, 元/a。

湿地生态效益评估方法。湿地生态效益(B_3)主要包括水资源调节、水质净化、保护生物多样性、大气调节和文化科研等方面。由于对保护生物多样性、观光旅游和文化科研等相关的生态效益衡量缺乏统一的定价标准和成熟案例, 因此本研究主要考虑水资源调节和水质净化两方面, 参照杨爱民等^[3]、李阳等^[6]、谢高地等^[27]的研究成果, 采用经验公式(8)估算:

$$B_3 = A_3 \times S_3 \quad (8)$$

式中: B_3 为湿地生态效益, 元/a; A_3 为新增湿地面积, hm^2 ; S_3 为单位面积湿地每年产生的生态服务价值, 取值为 527000 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。

压采地下水生态效益评估方法。压采地下水生态效益(B_4)包括防治地下水漏斗下降、地面沉降、海(咸)水入侵、湿地萎缩和林草地退化, 以及涵养水源、水质净化、沉淀污染物、碳储存等方面^[28-29]。其中, 防治地质灾害是南水北调地下水压采的最直接效益^[30], 主要表现为防治地下水漏斗下降和地面沉降^[31-32]。参照杨爱民等^[32]的研究成果, 采用恢复和防护费用法评估压采地下水产生的防治地下水漏斗下降和地面沉降生态效益, 可通过式(9)计算:

$$B_4 = W_4 \times (S_{41} + S_{42}) \quad (9)$$

式中: B_4 为压采地下水生态效益, 元; W_4 为压采地下水水量, m^3 ; S_{41} 为超采单方地下水的地下水漏斗下降经济损失, 取值为 0.60 元/ m^3 ; S_{42} 为超采单方地下水的地面沉降经济损失, 取值为 5.32 元/ m^3 。

水域生态效益评估方法。水域生态效益(B_5)主要包括水资源调节、水质净化、保护生物多样性、

大气调节和文化科研等方面, 计算方法与湿地生态效益计算方法一致。

4 北京市南水北调生态效益评估

4.1 通水前后土地利用/覆盖变化

Landsat 通过多颗卫星联合观测, 能达到 30 m/8 d 一景的时空分辨率, 由于长时间大范围连续观测、对公众免费等优势, 在农作物识别、土地利用/覆盖地表数据库建立等方面有了充分应用^[33-35]。本研究采用中国科学院资源环境科学数据中心基于 Landsat 卫星影像提取的“中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集”^[36], 获取 2018 年北京市土地利用/覆盖分布, 见图 1(a)。由于该数据集无 2014 年数据, 本研究在该数据集 2015 年的土地利用/覆盖分类数据的基础上, 采用 Landsat 8 影像 2014 年 13 景影像(云量 < 20%), 按照徐新良^[37]提出的土地利用/覆被变化时空信息分析方法中的分类标准, 通过支持向量机算法进行分类后, 辅以目视解译对面状地物边缘和细小地物形态进行修正, 生成 2014 年北京市土地利用/覆盖分布, 见图 1(b)。

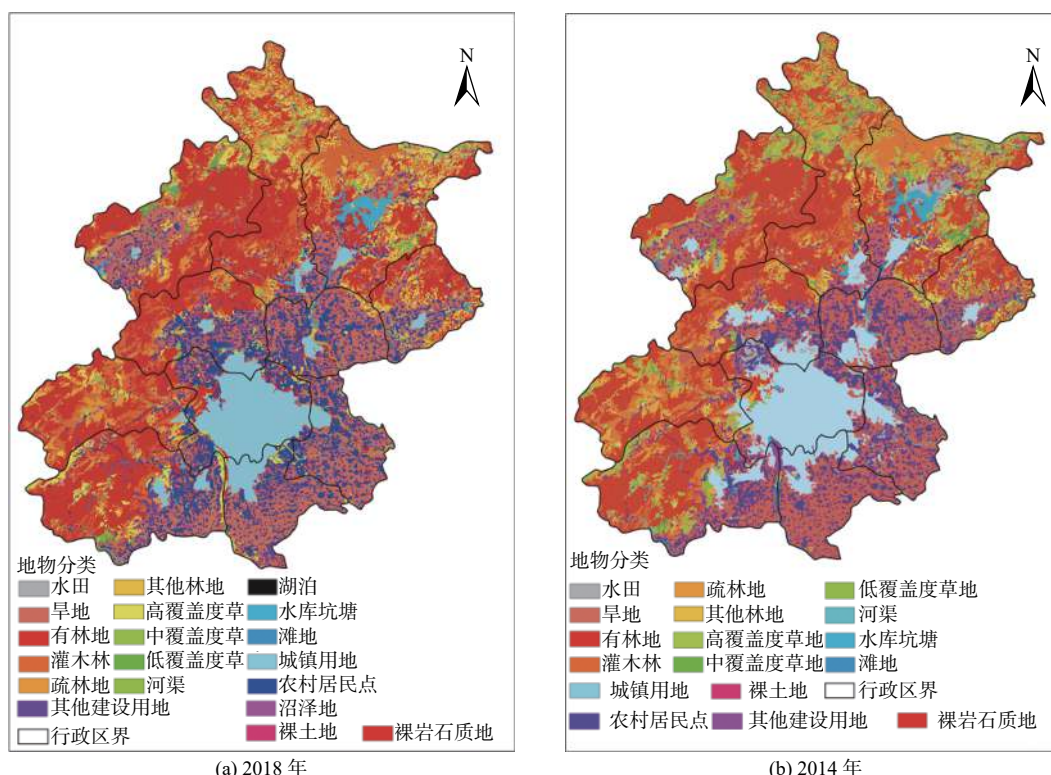


图 1 基于 Landsat 8 OLI 影像的北京市土地利用/覆盖分类分布(空间分辨率: 30 m×30 m)

Fig. 1 Land use/land cover of Beijing City derived from Landsat 8 OLI images (spatial resolution: 30 m×30 m)

各土地利用/覆盖类型在全市总面积中的占比及其变化见图 2, 分析可知: 南水北调中线一期工程通水后, 截至 2018 年, 北京市水田基本消失, 旱地也

有小幅面积减少, 由于耕地不在生态效益评估的生态服务系统考虑范围内, 在此不作讨论; 全市林地(包含有林地、灌木林、疏木林和其他林地)整体

由原来的 44.60% 的占比提高到 45.97%, 其中, 有林地增加了 4.55%, 疏林地减少了 0.8%, 说明原本部分疏林地的林木郁闭度提高, 转变为郁闭度更高的灌木林和有林地; 草地(包括高、中、低覆盖度草地)的整体比例也从 2014 年的 6.99% 提高到了 7.87%, 其中高覆盖度的草地提升比例更是超过了 18%, 与林地类似, 中、低覆盖度草地有部分转化为高覆盖

度草地; 水域面积方面, 北京市水域在全市面积中的占比超过 2%, 由于采取跨流域生态补水、再生水利用等系列措施, 河渠、水库湖泊和湿地的面积均有大幅提高, 特别是水库坑塘(含湖泊), 面积变化幅度达到 42.44%。对于城乡、工矿、居民用地和未利用土地, 本研究不作讨论。

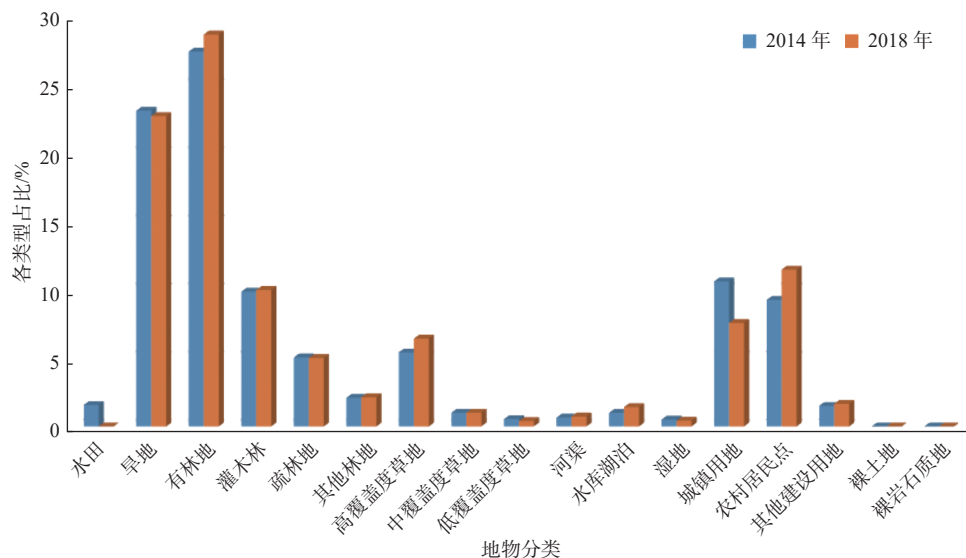


图 2 北京市 2014 年和 2018 年各土地利用/覆盖类型占比
Fig. 2 Land use/land cover percentage of 2014 and 2018 of Beijing city

此外, 根据北京市园林绿化局的首都园林绿化政务网(<http://yllhj.beijing.gov.cn/sdlh/>)的统计数据, 整理可得北京市城市绿地、林木资源及湿地的基本情况, 见表 1。综合统计数据和遥感影像分类结果, 得到计算北京市 2015—2018 年林木资源、城市绿地、湿地和水域等面积的累计变化量, 即新增林地生态效益、城市绿地生态效益、湿地生态效益和水域面积生态效益的物质质量基础数据, 见表 2。

表 1 北京市林木资源及城市绿地基本情况

Tab. 1 Basic situation of forest resources and urban green space in Beijing

类型	面积/hm ²		
	2014年	2018年	
合计	80222.95	85286.37	
城市绿地	公园绿地	28797.69	32618.50
	生产绿地	1691.38	1675.87
	防护绿地	16361.10	16937.18
	附属绿地	33372.78	33881.62
	其他绿地	0	173.20
	林木(不含山区森林)	967495.30	1009259.12
湿地	51434.10	—	

注: 2018年为评估年, 2014年为基准年。

表 2 2015—2018 年北京市林木资源、城市绿地、水域等面积变化

Tab. 2 Change of the areas of forest, green land and water body of Beijing from 2015 to 2018

类型	2015—2018年面积变化/hm ²	
合计	5063.42	
城市绿地	公园绿地	3820.81
	生产绿地	-15.51
	防护绿地	576.08
	附属绿地	508.84
	其他绿地	173.20
	林木(不含山区森林)	41763.82
湿地	7265.90	
水域	10201.78	

注: 2018年为评估年, 2014年为基准年。

4.2 供水的生态效益贡献比例

4.2.1 在林地、城市绿地生态效益中的贡献比例

中国南水北调集团公司(<http://www.csnwd.com.cn/>)公开信息显示, 截至 2019 年底, 南水北调工程进京水量达到 51.4 亿 m³, 其中回补地下水累计达到

6.4 亿 m^3 , 城市生态用水达 4.3 亿 m^3 。折算至 2015—2018 年, 由南水北调工程提供的城市生态用水量为 3.44 亿 m^3 。按照《北京市区污水处理再生水回用总体规划纲要》和北京市水务局 (<http://swj.beijing.gov.cn/>) 统计数据可知, 全市再生水利用量年均均为 10 亿 m^3 。北京市园林绿化局野生动植物和湿地保护处资料 (<http://yllhj.beijing.gov.cn/>) 显示, 2018 年北京市再生水年利用量为 10.7 亿 m^3 , 其中 9.7 亿 m^3 用于河湖湿地补水及地下水回补, 剩余部分绝大多数用于城市绿地和林地的生态用水, 且 2015—2018 年两者占比可认为与 2018 年基本一致。因此, 推测 2015—2018 年北京市城市绿地和林地的生态用水中, 再生水使用量为 3.74 亿 m^3 。北京市林木与城市绿地的主要水源为降水、再生水以及南水北调水。根据国家气象科学数据中心中国地面气象站逐小时观测资料 (<http://data.cma.cn/>) 与 2015—2018 年的北京市水资源公报, 北京市 2015—2018 年的年降水量分别为 583.0、660.0、592.0 和 575.5 mm。由于降水入渗量可用于代表有效降水, 降水入渗系数与一次降水量、强度和历时等因素有关^[38]。经计算, 北京市 2015—2018 年有效降水量分别为 432.0、508.0、485.4 和 441.2 mm。通过表 1 可知, 2015—2018 年, 林木增加面积为 41763.82 hm^2 , 城市绿地增加面积为 5063.42 hm^2 , 则新增林木与城市绿地在 2015—2018 年由降水供给的水量为 8.61 亿 m^3 。因此, 从水源角度考虑, 按照北京市南水北调生态用水补水至河湖后用于相关林地和城市绿地生态用水的客观事实, 推算可知 2015—2018 年新增林地和城市绿地生态效益中南水北调供水的贡献比例为 21.78%。

4.2.2 在湿地生态效益中的贡献比例

在南水北调中线一期工程实施的北京市生态补水中, 主要补给河湖湿地。由于水域和湿地的生态效益计算方法一致, 各河湖湿地的补水量尚待获取, 且依据北京市水务局、北京市园林绿化局野生动植物和湿地保护处资料, 2014 年后北京市湿地生态补水的绝大部分水源为再生水, 例如, 2018 年湿地生态补水再生水占比高达 85.9%。因此, 暂且认为北京市南水北调中线一期工程实施的生态补水主要用于水库、河湖等水域, 故假设 2015—2018 年新增湿地生态效益中南水北调供水的贡献比例为 0。

4.2.3 在水域生态效益中的贡献比例

由图 1 可知, 由于北京市水域面积仅占全市面积的 2% 左右, 且主要为几大水库。北京市水务局

资料显示, 2015 年 7 月至 2019 年 3 月底南水北调水通过密云水库调蓄工程对密云、怀柔和十三陵等水库累计实施补水约 6.19 亿 m^3 , 折算至 2018 年底约为 5.78 亿 m^3 。考虑气候变化影响, 北京市 2015—2018 年的降水量相比 2014 年的 439 mm 有所增多, 据测算对北京市水域的累计补充水量约为 2.60 亿 m^3 。由于水域面积扩大主要由降水增多和南水北调供水两方面因素导致, 因此本研究认为北京市 2015—2018 年新增水域生态效益中南水北调供水的贡献比例为 68.92%。

4.2.4 在压采地下水生态效益中的贡献比例

根据北京市水务局资料, 与中线一期工程通水前相比, 截至 2018 年底, 北京市平原区地下水资源储量共增加 9.90 亿 m^3 。由于平原区是北京市地下水存储及开采的主要区域, 故采用平原区地下水储量变化作为评估补充地下水生态效益的主要依据。Long 等^[39]研究表明, 考虑调水、农业灌溉用水减少和气候波动 3 个因素, 调水对北京市地下水储量恢复的贡献为 40%。由于南水北调通过压采地下水实现其补充地下水的生态效益, 因此认为, 截至 2018 年北京市压采地下水生态效益中南水北调供水的贡献比例为 40%。

4.3 北京市南水北调生态效益评估计算

根据表 2 及 3.2 节所述, 北京市生态效益主要表现在新增林地、绿地、湿地、水域生态效益和补充地下水等方面。经计算, 2015—2018 年北京市新增的林地、绿地、湿地、水域生态效益和补充地下水生态效益累计估算可达 181.88 亿元, 其中由于南水北调工程产生的生态效益累计估算为 67.31 亿元, 见表 3。由表 3 可知, 南水北调产生的生态效益中, 新增水域生态效益最大, 累计达 37.02 亿元, 占比为 55.00%, 主要由以下 3 个方面原因导致: 南水北调中线一期工程发挥生态效益的主要方式之一是补给北京各大水库; 由于水域和湿地生态效益评估方法相同, 在各河湖湿地生态补水数据尚不可获取的情况下, 基于公开数据资料, 暂且认为南水北调中线一期工程生态补水的主要对象为北京市的水库和湖泊等水域, 因此在结果上表现为将南水北调产生的新增湿地生态效益(虽暂不可量化, 但可知相对占比很少)并入了南水北调工程带来的新增水域生态效益中; 由于水域是湿地、林地和绿地等生态系统的主要载体, 为反映水资源所具备的生态系统价值, 目前对水域生态系统价值的市场定价高于其他类型。此外, 在林地和绿地方面, 考虑到多水源(即

降水、南水北调水与再生水)对林地和草地生态系统物质质量增长的贡献,虽然 2015—2018 年北京市新增林地和绿地的生态效益分别高达 21.31 亿元和 9.93 亿元,但由于南水北调水贡献率仅为 21.78%,故综合所得新增林地和绿地生态效益分别仅为 4.65 亿元和 2.18 亿元;而在地下水压采方面,2015—2018 年北京市地下水储量累计增加 9.90 亿 m³,南

水北调贡献比例为 40%,则由南水北调带来的补充地下水效益价值约为 23.46 亿元。最后,为便于讨论,假设各类生态系统物质质量匀速增长且每年地下水压采量相同,通过 4 年(2015—2018 年)平均可知,南水北调中线一期工程每年可为北京市创造约 16.83 亿元的生态价值。

表 3 2015—2018 年北京市由南水北调供水产生的累计生态效益价值

Tab. 3 Cumulative value of ecological services generated from the South-to-North Water Transfer Project from 2015 to 2018 in Beijing City

生态效益类型	生态效益评价指标	面积增量/ hm ²	地下水储量 变化/亿m ³	生态效益 价值/亿元	南水北调 贡献率/%	南水北调生态效益 价值/亿元
林地	固持土壤效益			0		0
	土壤保持效益	保肥效益		0.70		0.15
		防止泥沙滞留和淤积的效益		2.14		0.47
		固碳释氧效益	41 763.82	6.04	21.78	1.32
		净化空气效益		6.78		1.48
		水源涵养效益		3.88		0.84
		减弱噪声效益		1.77		0.39
		小计		21.31		4.65
城市绿地	固持土壤效益			0		0
	土壤保持效益	保肥效益		0.08		0.02
		防止泥沙滞留和淤积的效益		0.26		0.06
		固碳释氧效益	5 063.42	3.07	21.78	0.67
		净化空气效益		0.14		0.03
		减弱噪声效益		0.21		0.05
		水源涵养效益		0.26		0.06
		调节小气候效益		5.81		1.27
	杀菌效益		0.10		0.02	
	小计		9.93		2.18	
湿地	湿地总体生态效益	7 265.90		38.26	0	0
补充地下水	压采地下水总体生态效益		9.90	58.66	40.00	23.46
水域	水域总体生态效益	10 201.78		53.72	68.92	37.02
合计				181.88		67.31

5 结论

2015—2018 年北京市新增的林地、绿地、湿地、水域生态效益和补充地下水生态效益累计可达 181.88 亿元。由南水北调工程产生的生态效益为 67.31 亿元,其中,新增水域产生的生态效益占比为 55.00%,压采地下水生态效益次之,占比为 34.85%。限于数据原因,将在 2015—2018 年南水北调水对北京市湿地生态系统服务价值增长的直接或间接贡献并入对新增水域生态效益评估中,加之目前对水域生态系统价值的市场定价高于其他类型等因

素,使得新增水域产生的生态效益占比最大。此外,新增林地和绿地产生的生态效益占比分别为 6.91% 和 3.24%。因此,这 4 年期间,假设生态系统物质质量匀速增长且年地下水压采量保持不变,南水北调中线一期工程每年为北京市带来的生态价值约 16.83 亿元。本研究可为北京市及其他南水北调受水区制定生态用水计划,探索生态效益发挥途径提供参考,也能为生态环境修复与保护、水资源高效利用等方面政策措施的制定提供支撑。今后,进一步根据南水北调中线工程生态补水及回补地下

水工作,核定生态服务价值的市场定价等计算标准,提高生态效益量化评估的客观性和准确性,应是南水北调工程生态效益评估等相关研究的重点和难点。此外,如何准确量化南水北调生态用水对于受水区生态系统服务价值增量的贡献也是未来研究的重点方向之一。

参考文献(References):

- [1] 李鹏程. 奋力开创“十四五”南水北调工程高质量发展新局面[J]. *水利发展研究*, 2021, 41(7): 47-51. (LI P C. Strive to create a new situation of high-quality development of the South-to-North Water Diversion Project in the 14th five year plan[J]. *Water Conservancy Development Research*, 2021, 41(7): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wdr.2021.07.013.
- [2] 赵存厚. 南水北调工程概述[J]. *水利建设与管理*, 2021, 41(6): 5-9. (ZHAO C H. Overview of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2021, 41(6): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2021.06.03.
- [3] 杨爱民, 张璐, 甘泓, 等. 南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估[J]. *水利学报*, 2011, 42(5): 563-571. (YANG A M, ZHANG L, GAN H, et al. Ecological benefit evaluation of water receiving area of phase I project of east line of South-to-North Water Diversion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 563-571. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.05.008.
- [4] 张璐, 杨爱民, 吴赛男, 等. 南水北调中线一期工程对受水区城市绿地产生的生态环境效益研究[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(4): 4-7,23. (ZHANG L, YANG A M, WU S N, et al. Study on the ecological benefits of the first phase of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project on urban green space in the water receiving area[J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2010, 41(4): 4-7,23. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2010.04.009.
- [5] 张璐, 解翼阳. 南水北调中线工程水土保持林草措施生态服务功能价值研究[J]. *中国水土保持*, 2014(4): 46-49,69. (ZHANG L, XIE Y Y. Study on ecological service function value of forest and grass measures for soil and water conservation in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *China Soil and Water Conservation*, 2014(4): 46-49,69. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2014.04.025.
- [6] 李阳, 胡桂全, 杨丽锦, 等. 南水北调中线通水后北京新增生态环境效益初评[J]. *城市地质*, 2017, 12(4): 35-39. (LI Y, HU G Q, YANG L J, et al. Preliminary evaluation of new ecological benefits in Beijing after the middle route of South-to-North Water Diversion[J]. *Urban Geology*, 2017, 12(4): 35-39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2017.04.006.
- [7] 顾文选, 罗亚蒙. 宜居城市科学评价标准[J]. *北京规划建设*, 2007(1): 7-10. (GU W X, LUO Y M. Scientific evaluation criteria for livable cities[J]. *Beijing Planning and Construction*, 2007(1): 7-10. (in Chinese))
- [8] 王树芳, 李捷, 刘元章, 等. 南水北调对北京地下水涵养的影响[J]. *中国水利*, 2019(7): 26-30. (WANG S F, LI J, LIU Y Z, et al. Impact of South-to-North Water Diversion on groundwater conservation in Beijing[J]. *China Water Resources*, 2019(7): 26-30. (in Chinese))
- [9] 北京市水务局. 2018年北京市水资源公报[EB/OL]. (Beijing Municipal Water Affairs Bureau. 2018 Beijing Water Resources Bulletin [EB/OL] (in Chinese) <http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/szygb/>)
- [10] JIANG W, WU T, FU B J. The value of ecosystem services in China: A systematic review for twenty years[J]. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101365. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101365.
- [11] 吴瑕. 南水北调中线工程对汉江中下游水环境影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. (WU X. Study on the impact of the middle route of South-to-North Water Diversion Project on the water environment in the middle and lower reaches of Hanjiang River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [12] 宋炜, 郑良勇, 侯新民. 南水北调济平干渠工程生态修复模式和效益研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 18-20. (SONG W, ZHENG L Y, HOU X M. Study on ecological restoration model and benefit of Jiping main canal project of South-to-North Water Diversion[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 18-20. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.01018.
- [13] COSTANZA R, ARGE R D, GROOT R D. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997(387): 253-260. DOI: 10.1016/S0921-8009(98)00020-2.
- [14] 刘尧, 张玉钧, 贾倩. 生态系统服务价值评估方法研

- 究[J]. *环境保护*, 2017, 45(6): 64-68. (LIU R, ZHANG Y J, JIA Q. Study on the methods of ecosystem services valuation[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(6): 64-68. (in Chinese)) DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2017.06.015](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2017.06.015).
- [15] 李丽, 王心源, 骆磊, 等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1233-1245. (LI L, WANG X Y, LUO L, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1233-1245. (in Chinese)) DOI: [10.13292/j.1000-4890.201804.031](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201804.031).
- [16] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域[J]. *地理研究*, 2010, 29(3): 383-396. (FU B J. Trends and priority areas in ecosystem research of China[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 383-396. (in Chinese))
- [17] 国家林业和草原局, 森林生态系统服务功能评估规范, GB/T 38582—2020[S].北京: 中国标准出版社, 2020. (National Forestry and Grassland Administration, Forest ecosystem service function evaluation specification, GB/T 38582-2020 [S].Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese))
- [18] 国家林业局, 退耕还林工程生态效益监测与评估规范, LY/T 2573—2016[S].北京: 中国标准出版社, 2016. (The State Forestry Administration, Code for monitoring and evaluation of ecological benefits of returning farmland to forest project, LY/T 2573-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese))
- [19] 李善同, 许新宜. 南水北调与中国发展[M]. 北京: 经济科学出版社, 2004. (LI S T, XU X Y. South-to-North Water Diversion and China's development [M] Beijing: Economic Science Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 《中国水利年鉴》编纂. 中国水利统计年鉴[Z]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Compilation of China water conservancy yearbook. China water conservancy statistical yearbook [Z]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2020. (in Chinese))
- [21] 姜东涛. 森林生态效益估测与评价方法的研究[J]. *华东森林经理*, 2000(4): 14-19. (JIANG D T. Study on estimation and evaluation methods of forest ecological benefits[J]. *East China Forest Manager*, 2000 (4): 14-19. (in Chinese))
- [22] 彭建, 王仰麟, 陈燕飞, 等. 城市生态系统服务功能价值评估初探: 以深圳市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005(4): 594-604. (PENG J, WANG Y L, CHEN Y F. Preliminary study on the value evaluation of urban ecosystem service function: Taking Shenzhen as an example[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2005(4): 594-604. (in Chinese))
- [23] 余新晓, 秦永胜, 陈丽华, 等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. *生态学报*, 2002(5): 783-786. (YU X X, QIN Y S, CHEN L H, et al. Preliminary study on the service function and value of mountain forest ecosystem in Beijing[J]. *Journal of Ecology*, 2002(5): 783-786. (in Chinese))
- [24] 中华人民共和国水利部. 水利建筑工程概算定额: 上册[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Budgetary estimate quota of water conservancy construction engineering Volume I [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [25] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (YANG S H, et al. Urban ecological environment [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [26] 周冰冰. 北京市森林资源价值[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. (ZHOU B B. Value of forest resources in Beijing [M]. Beijing: China Forestry Press, 2000. (in Chinese))
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746. (XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S. Value of ecosystem services in China[J]. *Resource Science*, 2015, 37(9): 1740-1746. (in Chinese)) DOI: [1007-7588\(2015\)09-1740-07](https://doi.org/10.1007-7588(2015)09-1740-07).
- [28] 杨硕. 地下水开采生态效益评价研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (YANG S. The evaluation of ecological benefits of groundwater exploitation [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese))
- [29] 王辉, 许学工. 滨海平原地下水库效益评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(5): 13-19. (WANG H, XU X G. Benefit evaluation of coastal plain underground reservoir[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(5): 13-19. (in Chinese)) DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2015.05.03](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2015.05.03).
- [30] 刘昌明. 发挥南水北调的生态效益 修复华北平原地下水[J]. *南水北调与水利科技*, 2003(1): 17-19. (LIU C M. Exploring an ecological benefit for South-to-North Water Diversion for rehabilitation ground-

- water systems in the north China plain[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2003(1): 17-19. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2003.01.004](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2003.01.004).
- [31] 宋全香, 李佳, 苗红昌, 等. 河南省黄河以北地区地下水压采潜力分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(8): 67-72. (SONG Q X, LI J, MIAO H C, et al. Analysis of groundwater exploitation potential in the north region of Yellow River in Henan Province[J]. *Yellow River*, 2020, 42(8): 67-72. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2020.08.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2020.08.014).
- [32] 杨爱民, 甘泓, 汪林, 等. 南水北调人工补给地下水含水层成本效益研究[J]. *中国水利*, 2013(23): 46-49. (YANG A M, GAN H, WANG L, et al. Research on cost-benefits of ground aquifers artificial recharge using water from South-to-North Water Diversion Project[J]. *China Water Resources*, 2013(23): 46-49. (in Chinese))
- [33] WULDER M A, WHITE J C, GOWARD S N, et al. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 955-969. DOI: [10.1016/j.rse.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.004).
- [34] HE Y, BRANDO A, BUCHNER J, et al. Monitoring cropland abandonment with Landsat time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246(1): 111873. DOI: [10.1016/j.rse.2020.111873](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111873).
- [35] XIAN G, HOMER C, FRY J. Updating the 2001 National Land Cover Database land cover classification to 2006 by using Landsat imagery change detection methods[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1133-1147. DOI: [10.1016/j.rse.2009.02.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.004).
- [36] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统. (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. (XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China multi period land use and land cover remote sensing monitoring data set (CNLUCC). Data registration and publishing system of resource and environmental science data center of Chinese Academy of Sciences.(in Chinese)) DOI: [10.12078/2018070201](https://doi.org/10.12078/2018070201).
- [37] 徐新良, 庞治国, 于信芳. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2014, 90-108. (XU X L, PANG Z G, YU X F. Analysis method and application of spatio-temporal information of land use/cover change [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2014, 90-108. (in Chinese))
- [38] 郭元裕. 农田水利学 [M]. 3版, 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (GUO Y Y. Irrigation and Drainage Engineering [M]. 3th ed, Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [39] LONG D, YANG W, SCANLON, B. R. et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3665. DOI: [10.1038/s41467-020-17428-6](https://doi.org/10.1038/s41467-020-17428-6).

Evaluation of ecological services of the first phase of middle route of the South-to-North Water Transfer Project: A case study of Beijing City

ZENG Ziyue^{1,2}, XU Jijun^{1,2}, WU Guangdong^{1,2}, WANG Yongqiang^{1,2}, HUO Junjun^{1,2}

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment, Wuhan 430010, China)

Abstract: As the most important basic strategic water resources allocation project in China, the South-to-North Water Transfer Project has completed the construction of the first phase of the east and middle route, and started supplying water from 2013 to 2014. Up to 14/05/2022, the cumulative water transfer of the first phase of the east and middle route has exceeded 53 billion m³. The South-to-North Water Transfer Project is playing an increasingly important supporting role for China's economic and social development and ecological and environmental protection. With the improvement of the strategic position of ecological civilization construction and the significant improvement of the requirements of ecological and environmental protection awareness, it is necessary to study, analyze and reasonably quantify the ecological benefits of the South-to-North Water Transfer Project, so as to provide a reference basis for the planning, construction, operation and management of the South-to-North Water Transfer Project and other inter-basin water transfer projects. Therefore, based on the principle of ecological

economics, the ecological benefit evaluation indicators of the built projects of the South-to-North Water Transfer Project were defined, the basic data acquisition and processing methods of the ecological benefit evaluation methods of the built projects of the South-to-North Water Transfer Project were analyzed, Beijing was taken as a typical water receiving area, and the ecological benefits of the phase I project of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project to Beijing were discussed, so as to provide technical reference for the ecological benefit evaluation of the built projects of the South-to-North Water Transfer Project. It is assumed that the ecological benefit of the South-to-North Water Transfer Project refers to the full utility of the beneficial effect caused by the change of ecosystem state due to the water supply from the project in the ecosystem and its influence range of the project area after water supply, which can be measured by the change of ecosystem service value. Therefore, the value of ecological services of the first phase of middle route of the South-to-North Water Transfer Project for Beijing City were evaluated by determining the evaluation method in 5 aspects including woodland, city green-land, wetland, groundwater and open water. Based on the statistical data of the capital landscaping government network of Beijing Landscaping Bureau, the basic situation of forest resources and urban green space in Beijing was obtained. The Landsat 8 remote sensing image data and its relevant dataset were used to classify the land use/land cover in Beijing. Through the comparison of the results before and after the year, the changes of land use/land cover before and after the water supply of the South-to-North Water Transfer Project in Beijing were analyzed to supplement the statistical data.

The results show that in the first 4 years (2015-2018) in operation of the first phase of middle route of the South-to-North Water Transfer Project, the growth of the value of ecological services of Beijing City is 18.19 billion RMB, of which 6.73 billion RMB is due to the first phase of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. Among them, the ecological service value generated by the new water area are the largest, accounting for 55.02%. The ecological service value generated by pressure mining of groundwater ranks the second, accounting for 34.87%, and the ecological service value generated by the new forest land and the new green land account for 6.90% and 3.21%, respectively. Since the South-to-North Water Transfer did not directly supply wetlands, it is believed that the South-to-North Water Transfer Project had no direct or indirect contribution to the growth of wetland ecosystem service value in Beijing from 2015 to 2018.

This research can provide support for the formulation of policies and measures for ecological water use, ecological environment restoration and protection, and efficient utilization of water resources in Beijing and other water reception areas of the South-to-North Water Transfer Project.

Key words: South-to-North Water Transfer Project; first phase of middle route; evaluation of ecological services; ecosystem water use; Beijing City