

# 密云水库 2008—2019 年水生态服务功能评价

齐娜<sup>1</sup>, 孙威威<sup>1</sup>, 阚海明<sup>2</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 邹俊亮<sup>2</sup>, 庞卓<sup>2</sup>, 张国芳<sup>2</sup>

(1.北京市密云水库管理处 林业管理所, 北京 101512; 2.北京市农林科学院 北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097)

**摘要:** [目的] 对重要饮用水源地密云水库水生态服务功能的动态变化及其受南水北调工程的影响进行分析, 为该水库生态系统平衡和水资源保护提供依据。[方法] 运用市场价值法、替代工程法、替代成本法、碳交易法、支付意愿法、比例折算法和成果参照法, 定量研究密云水库水资源供给, 提供水产品, 调蓄洪水, 增加湿度, 夏季降温, 净化水质, 涵养水源, 固定 CO<sub>2</sub>, 释放 O<sub>2</sub>, 保护生物多样性, 旅游休闲和科研教育等生态服务价值的变化情况。[结果] 2008—2019 年密云水库水生态服务价值介于 709.96~1 003.60 亿元之间, 呈先小幅波动后增大的趋势, 其中, 支持服务价值(尤其是保护生物多样性)占主导地位(64%~80%); 调节服务价值处于次要地位(18%~33%), 主要表现为涵养水源、增加湿度、夏季降温和调蓄洪水; 供给服务价值和文化服务价值合计比例不足 5%。南水北调工程使密云水库的增加湿度价值、夏季降温价值、涵养水源价值、净化水质价值、旅游休闲价值、科研教育价值和生态服务总价值极显著提升( $p < 0.01$ ), 调蓄洪水价值极显著下降( $p < 0.01$ )。[结论] 密云水库水生态服务功能除了取决于气候等自然因素外, 还受南水北调工程、交通便利程度等人为因素的影响。建议加强密云水库水量水质监测和文化生态潜能开发, 以保障北京市饮用水储备安全可靠。

**关键词:** 水生态服务; 功能评价; 南水北调工程; 密云水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0276-08

中图分类号: X171.4

**文献参数:** 齐娜, 孙威威, 阚海明, 等. 密云水库 2008—2019 年水生态服务功能评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 276-283. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.037; Qi Na, Sun Weiwei, Kan Haiming, et al. Evaluation on water-related ecosystem services of Miyun Reservoir during 2008—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 276-283.

## Evaluation on Water-related Ecosystem Services of Miyun Reservoir During 2008—2019

Qi Na<sup>1</sup>, Sun Weiwei<sup>1</sup>, Kan Haiming<sup>2</sup>, Liu Lei<sup>1</sup>, Zou Junliang<sup>2</sup>, Pang Zhuo<sup>2</sup>, Zhang Guofang<sup>2</sup>

(1. Forest Management Branch, Miyun Reservoir Management Department, Beijing 101512, China; 2. Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamics of water-related ecosystem services and its influences by south-to-north water diversion project were analyzed, in order to protect water resources and ecosystem balance of Miyun Reservoir. [Methods] The methods of market value, alternating engineering, alternative cost, carbon trading, willingness to pay, proportion apportionment and benefit transfer were used to evaluate the water-related ecosystem services of water resources supply, aquatic product provision, flood regulation and reservation, air humidity improvement, summer heat amelioration, water purification, water conservation, CO<sub>2</sub> sequestration, O<sub>2</sub> release, biodiversity protection, tourism and leisure and scientific research and education of Miyun Reservoir. [Results] The water-related ecosystem service values of Miyun Reservoir ranged from 70.996 to 100.360 billion during 2008—2019, which fluctuated slightly at first and then increased. As for components of water-related ecosystem services, the value of supporting services, especially biodiversity protection, played a dominant role (64%~80%). The value of regulating services was in the secondary position (18%~33%),

收稿日期: 2021-02-18

修回日期: 2021-04-06

资助项目: 北京市农林科学院青年基金项目“针对北京农村生活污水户级处理的生物滞留池强化设计与净化效果研究”(QNJJ202003); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20180706; KJCX20200301)。

第一作者: 齐娜(1985—), 女(汉族), 宁夏回族自治区隆德县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持和水源涵养林研究。Email: qina004@163.com。

通讯作者: 庞卓(1984—), 男(汉族), 河北省迁安市人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态修复与评价研究。Email: pangzh-84@163.com。

which was mainly manifested in water conservation, humidity improvement, summer heat amelioration and flood regulation and reservation. The value of provisioning services and cultural services together accounted for less than 5%. Moreover, the south-to-north water diversion project significantly increased the values of air humidity improvement, summer heat amelioration, water conservation, water purification, tourism and leisure, scientific research and education and total ecosystem services ( $p < 0.01$ ), while significantly decreased the value of flood regulation and reservation ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] The water ecological service function of Miyun Reservoir is affected not only by natural factors such as climate, but also by human factors such as south to north water diversion project and traffic convenience. The monitoring of water volume and quality and the development of cultural and ecological potential of Miyun Reservoir should be strengthened, so as to guarantee the security and reliability of drinking water reserves for Beijing City.

**Keywords:** water-related ecosystem services; evaluation of functions; south-to-north water diversion project; Miyun Reservoir

水生态系统服务将水体的生态过程与人类福利牢固地联系在一起<sup>[1-2]</sup>。一方面,人类活动是水陆景观转换的驱动因素,进而影响支撑水生态系统服务的各种生态、水文过程;另一方面,水生态系统服务的实际水平反过来又决定了社会经济发展的速度与潜力<sup>[3]</sup>。水生态系统服务既包括供水、水产品生产、发电、航运等直接使用价值,还包括区域气候调节、调蓄洪水、固碳释氧、休闲娱乐等间接价值<sup>[4]</sup>。目前将河流、水库、湖泊、沼泽(或湿地)等不同类型水生态系统作为整体,进行区域水生态服务综合评价的研究较为系统充分<sup>[5-10]</sup>。然而,对于水库生态系统,尤其是作为重要饮用水源地的水库生态系统服务价值研究鲜有报道,尚缺乏针对性的评价方法。

密云水库作为北京重要的地表饮用水源地、水资源战略储备基地,其水生态服务功能对首都经济社会发展具有不可替代的支撑作用。2015年,随着南水北调来水调入密云水库调蓄工程的启用,密云水库成为南水北调中线工程的间接调节库,提高了供水保证率和水资源战略储备量,保证了北京市安全供水格局的构建<sup>[11]</sup>。然而,水资源供需矛盾依然是制约北京市可持续发展的重要瓶颈,完善水生态服务功能评价是加强水源保护、提高水资源利用率的重要基础。针对密云水库的水生态服务功能评价尚未见报道。因此,本文因地制宜地运用生态服务评估方法对密云水库水生态服务功能进行评价,并分析其受南水北调工程的影响,为基于服务效能的密云水库生态保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

密云水库在北京市东北部燕山群山丘陵之中,距离北京城区 80 km,建于 1960 年,拦蓄潮河、白河上游来水而成,控制流域面积  $1.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是北京主要的

饮用水供应源地。密云水库总库容量为  $4.38 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,对应水面面积为  $188 \text{ km}^2$ ,汛限库容为  $2.34 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,防洪作用明显。密云水库所处经纬度为  $40^\circ 20' - 41^\circ 45' \text{ N}$  和  $115^\circ 25' - 117^\circ 30' \text{ E}$ ,属于大陆性季风气候,其广阔的水面具有显著的小气候调节作用,库区夏季平均气温比纬度相近的北京市区低  $3^\circ \text{ C}$ 。此外,密云水库还具有提供水产品、涵养水源、净化水质、保护生物多样性、固碳释氧、休闲娱乐、科研教育等重要生态服务功能。密云水库水生态系统保护状况是为北京市提供更可靠、更优质水源供给和其他生态服务的决定因素。

## 2 数据来源与研究方法

密云水库饮用水供给量、水库蓄水量、全年和夏季水面蒸发量、国家级和北京市一级保护野生动物种类、水产品捕获量和投放量以及浮游植物密度从密云水库管理处获得;旅游休闲收入信息来自《北京密云年鉴》;密云水库水面面积由卫星遥感监测获取;北京市水价信息、电价信息来自北京市发展和改革委员会相关通知;水质数据来自《北京市水务统计年鉴》;水产品单价来自《北京统计年鉴》;固定  $\text{CO}_2$  成交价由北京绿色交易所提供。

本文基于功能分类法对密云水库水生态服务功能进行评价。结合研究目的、水库生态系统的特点和可获取数据的情况,对供给服务中的水资源供给和提供水产品功能,调节服务中的调蓄洪水、增湿降温、净化水质和涵养水源功能,支持服务中的固定  $\text{CO}_2$ 、释放  $\text{O}_2$  和保护生物多样性功能以及文化服务中的旅游休闲和科研教育功能,分别采用市场价值法、替代工程法、替代成本法、碳交易法、比例折算法进行价值核算,有针对性地对密云水库的水生态服务功能进行评价。具体分析方法详见表 1。

表 1 密云水库水生态服务功能评价方法

服务功能	评价指标	计算方法	数据来源
供给服务	水资源供给	市场价值法	密云水库管理处,北京市发展和改革委员会
	提供水产品	市场价值法	密云水库管理处,《北京统计年鉴》
调节服务	调蓄洪水	替代工程法	密云水库管理处,参考文献[12]
	增加湿度	替代成本法	
	夏季降温	替代成本法	卫星遥感影像,北京市发展和改革委员会,《北京市水务统计年鉴》,参考文献[13—15,17]
	涵养水源	替代工程法	
支持服务	净化水质	替代成本法	
	固定 CO <sub>2</sub>	碳交易法	
	释放 O <sub>2</sub>	市场价值法	密云水库管理处,北京绿色交易所,卫星遥感影像,《北京市统计年鉴》,参考文献[12,14—18]
文化服务	保护生物多样性	支付意愿法	
	旅游休闲	比例折算法	《北京密云年鉴》,参考文献[14—15,19]
	科研教育	成果参照法	

## 2.1 供给服务

(1) 水资源供给价值( $V_w$ ):

$$V_w = S_w \cdot P_w \quad (1)$$

式中: $V_w$ 为水资源供给价值(亿元); $S_w$ 为水资源供给量( $10^8 \text{ m}^3$ ); $P_w$ 为饮用水水价,依据《北京市发展和改革委员会关于北京市居民用水实行阶梯水价的通知(京发改[2014]865号)》(5元/ $\text{m}^3$ )。

(2) 提供水产品价值( $V_f$ ):

$$V_f = \frac{(Y-Q) \times P_v}{10^4 \times O} \quad (2)$$

式中: $V_f$ 为提供水产品价值(亿元); $Y$ 为水产品捕获量<sup>[17]</sup>(t); $Q$ 为水产品投放量<sup>[17]</sup>(t); $P_v$ 为水产品产值,《北京统计年鉴 2020 年》(亿元); $O$ 为水产品产量,《北京统计年鉴 2020 年》( $10^4 \text{ t}$ )。

## 2.2 调节服务

(1) 调蓄洪水价值( $V_r$ ):

$$V_r = (R_t - R_s) \times C \quad (3)$$

式中: $V_r$ 为调蓄洪水价值(亿元); $R_t$ 为总库容<sup>[17]</sup>( $4.38 \times 10^9 \text{ m}^3$ ); $R_s$ 为水库蓄水量<sup>[17]</sup>( $10^8 \text{ m}^3$ ); $C$ 为蓄洪成本<sup>[12]</sup>(0.67元/ $\text{m}^3$ )。

(2) 增加湿度价值( $V_h$ ):

$$V_h = A \times E_{\text{year}} \times 10^3 \times \text{SP}_{\text{ve}} \times P_e \times 10^{-8} \quad (4)$$

式中: $V_h$ 为增加湿度价值(亿元); $A$ 为水面面积<sup>[14]</sup>( $\text{km}^2$ ); $E_{\text{year}}$ 为全年累计水面蒸发量,1960—2016年多年平均值<sup>[13]</sup>,1 214.2 mm; $\text{SP}_{\text{ve}}$ 为单位体积水汽化消耗电量<sup>[15]</sup>,125 kWh/ $\text{m}^3$ ; $P_e$ 为电价,依据《北京市发展和改革委员会关于北京市居民生活用电实行阶梯电价的通知(京发改[2012]831号)》[0.48元/(kW·h)]。

(3) 夏季降温价值( $V_{\text{tm}}$ ):

$$V_{\text{tm}} = \frac{A \times E_{\text{summer}} \times 10^3 \times \text{SP}_{\text{vh}} \times P_e}{3.6 \times 10^3 \times \text{EER} \times 10^8} \quad (5)$$

式中: $V_{\text{tm}}$ 为夏季降温价值(亿元); $E_{\text{summer}}$ 为夏季累计水面蒸发量,1960—2016年多年平均值<sup>[13]</sup>(510.1 mm); $\text{SP}_{\text{vh}}$ 为水在标准状况下汽化热<sup>[15]</sup>( $2.26 \times 10^6 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ); $\text{EER}$ 为空调能耗比<sup>[15]</sup>(3.2)。

(4) 涵养水源价值( $V_{\text{wstore}}$ ):

$$V_{\text{wstore}} = R_s \cdot P_{\text{wstore}} \quad (6)$$

式中: $V_{\text{wstore}}$ 为涵养水源价值(亿元); $R_s$ 为水库蓄水量<sup>[17]</sup>( $10^8 \text{ m}^3$ ); $P_{\text{wstore}}$ 为单位贮水价值<sup>[15]</sup>(6.11元/ $\text{m}^3$ )。

(5) 净化水质价值( $V_{\text{wp}}$ ):

$$V_{\text{wp}} = (R_N \times P_N + R_P \times P_P) \times R_s \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中: $V_{\text{wp}}$ 为净化水质价值(亿元); $R_N, R_P$ 分别为密云水库出库水相对于进库水总氮和总磷的浓度减少量《北京市水务统计年鉴》( $\text{g}/\text{m}^3$ ); $R_N$ 和 $R_P$ 为去除总氮和总磷处理成本<sup>[22]</sup>,其值分别为 1.5 和 2.5 元/kg。

## 2.3 支持服务

(1) 固定 CO<sub>2</sub> 价值( $V_{\text{CO}_2}$ ):

$$V_{\text{CO}_2} = C_c \times D_{\text{pp}} \times 10^{-3} \times A \times h \times 44/12 \times P_t \times 10^{-8} \quad (8)$$

式中: $V_{\text{CO}_2}$ 为固定 CO<sub>2</sub> 价值(亿元); $C_c$ 为浮游植物单细胞生物量碳含量<sup>[16]</sup>( $1.71 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{个}$ ); $D_{\text{pp}}$ 为浮游植物密度<sup>[17]</sup>( $10^4 \text{ 个}/\text{L}$ ); $h$ 为有效深度(表层水取样深度 0.5 m 的 2 倍<sup>[20]</sup>,1 m); $P_t$ 为 CO<sub>2</sub> 成交价,依据《北京碳市场年度报告》2014—2018 年平均值(北京绿色交易所, <https://www.cbeex.com.cn/article/xxfw/xz/bjtsendhq/>, 52.518 元/t);44/12 为由 C 到 CO<sub>2</sub> 质量转换系数。

(2) 释放 O<sub>2</sub> 价值( $V_{\text{O}_2}$ ):

$$V_{\text{O}_2} = C_c \times D_{\text{pp}} \times 10^{-3} \times A \times h \times 32/12 \times P_{\text{O}_2} \times 10^{-8} \quad (9)$$

式中: $V_{O_2}$ 为释放 $O_2$ 价值(亿元); $P_{O_2}$ 为制造 $O_2$ 价格<sup>[12]</sup>(400元/t);32/12为根据植物的光合作用化学方程式确定的释放 $O_2$ 与固定C的质量比。

(3) 保护生物多样性价值( $V_{biod}$ ):

$$V_{biod} = \sum_{i=1}^3 r_i \times N_i \times P_i \times R \times 10^{-4} \quad (10)$$

式中: $V_{biod}$ 为保护生物多样性价值(亿元); $i=1,2,3$ 为国家一级保护物种,国家二级保护物种和北京市一级保护物种; $r_i$ 为保护级别系数<sup>[15]</sup>, $r_1=10$ , $r_2=5$ , $r_3=1$ ;  $N_i$ 为保护物种种数,根据密云水库管理处调查 $N_1=3$ , $N_2=8$ , $N_3=8$ ;  $P_i$ 为物种保护支付意愿<sup>[18]</sup>[元/(人·a)],针对野生动物 $P_1=44.56$ , $P_2=35.23$ , $P_3=31.58$ ;  $R$ 为北京市常住人口(万人)。

## 2.4 文化服务

(1) 旅游休闲价值( $V_{tour}$ ):

$$V_{tour} = V \cdot N \quad (11)$$

式中: $V_{tour}$ 为旅游休闲价值(亿元); $V$ 为地区旅游休闲总收入(包括旅游区景点收入和民俗旅游收入两部分),来自《北京密云年鉴》2008—2019年(中国经济社会大数据研究平台,https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2020030054)(亿元); $N$ 为水景观在地区旅游休闲总收入中所比例例,根据问卷调查<sup>[19]</sup>结果,取值为32.7%。

(2) 科研教育价值( $V_{re}$ ):

$$V_{re} = A \cdot P_{re} \quad (12)$$

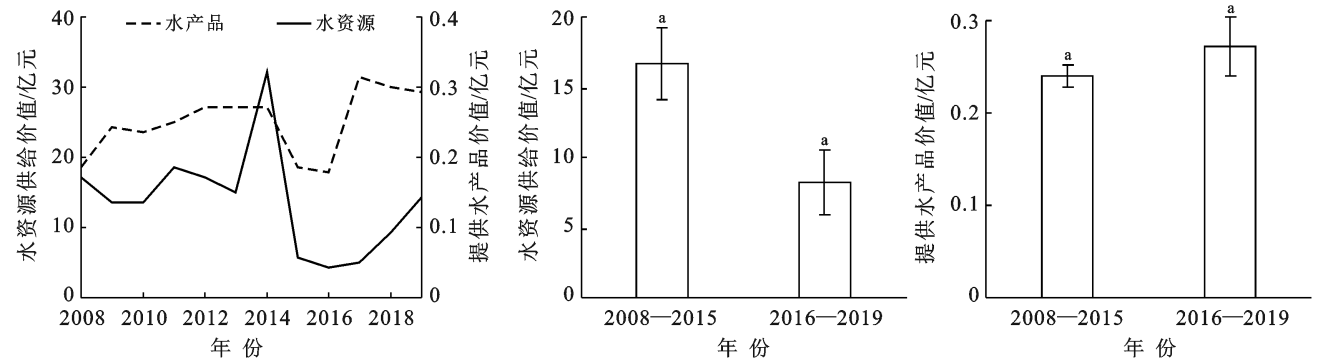
式中: $V_{re}$ 为科研教育价值(亿元); $P_{re}$ 为水生态系统单位面积科研教育价值(以2002年 $3.8402 \times 10^5$ 元/ $km^2$ 为基础,取8%的社会折现率,算得2008—2019年的 $P_{re}$ 值)<sup>[15]</sup>(亿元/ $km^2$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 密云水库供给服务价值

由图1可以看出,2008—2019年密云水库供给服务中的水资源供给价值和提供水产品价值都呈现不规则、

大幅度波动的变化趋势。水资源供给价值平均为 $13.8355 \pm 7.5699$ 亿元,最低值出现在2016年;最高值出现在2014年。提供水产品价值平均为 $0.2506 \pm 0.0468$ 亿元,最低值出现在2016年;最高值出现在2017年。南水北调工程启用后,水资源供给价值降低,提供水产品价值提高,但是两者的变化均不显著。密云水库是北京重要的地表饮用水源地,因此,水资源供给服务是密云水库水生态服务的核心内容。水资源供给服务价值由淡水供应能力和饮用水需求量共同决定,供需平衡、储量有可靠保障是水库生态系统水资源供给服务所要实现的最终目标<sup>[21]</sup>。南水北调中线工程启用之前,密云水库是除地下水外北京市唯一的饮用水供给来源,水资源供给服务价值随着饮用水需求量的增加而增大,到2014年达到峰值。南水北调中线工程2015年开始向北京市供给饮用水后,密云水库的水资源供给压力得到缓解,水资源供给服务价值也大幅减少。2016年南水北调中线工程开始向密云水库补充水,密云水库成为南水北调中线工程的间接调节库,淡水供应能力显著增强,其水资源供给服务价值也随着需求量的增加而恢复逐年上升的趋势。南水北调中线工程实现供水后,密云水库的水资源供给服务价值总体上有所降低(图1),但是密云水库的供水来源更加多样化,其淡水供应能力对局地气候因素的依赖性明显下降,从而提升了北京市饮用水供应的稳定性与可靠性,更有利于实现水资源供需平衡。密云水库提供的水产品主要是滤食性鱼类。通过定期投放和捕捞,这类鱼可以滤食浮游植物、移除水体中富营养物质,达到改善水环境、促进水库生态系统平衡的效果<sup>[17]</sup>。密云水库的提供水产品价值在南水北调工程启用后有所提升,在补水初期的2016和2017年分别出现了最低值和最高值(图1),这可能与供水来源多样化以后,密云水库蓄水量和水质的变化有关,需要通过加强监测指导更科学合理的滤食性鱼类投放和捕捞方案<sup>[17]</sup>。



注:柱状图中,相同小写字母表示差异不显著( $p>0.05$ );不同小写字母表示差异极显著( $p<0.01$ )。下同。

图1 密云水库 2008—2019 年供给服务价值变化

### 3.2 密云水库调节服务价值

由图2可知,2008—2019年密云水库调节服务

中的调蓄洪水价值呈现先小幅波动,后逐渐减小的变化趋势;增加湿度价值、夏季降温价值和涵养水源价

值则都呈现先小幅波动,后逐渐增大的变化趋势;净化水质价值先小幅波动,再增大而后又降低。调蓄洪水价值平均为 20.301 6±3.768 2 亿元,最低值出现在 2019 年;最高值出现在 2015 年。增加湿度价值、夏季降温价值和涵养水源价值平均分别为 60.519 0±18.099 9 亿元、39.902 7±11.934 1 亿元和 82.173 8±

34.363 8 亿元,最低值都出现在 2015 年;最高值都出现在 2019 年。净化水质价值平均为 0.028 7±0.015 7 亿元,最低值出现在 2009 年;最高值出现在 2016 年。南水北调工程启用后,密云水库调蓄洪水价值极显著降低( $p<0.01$ ),增加湿度价值、夏季降温价值涵养水源价值和净化水质价值则都极显著升高( $p<0.01$ )。

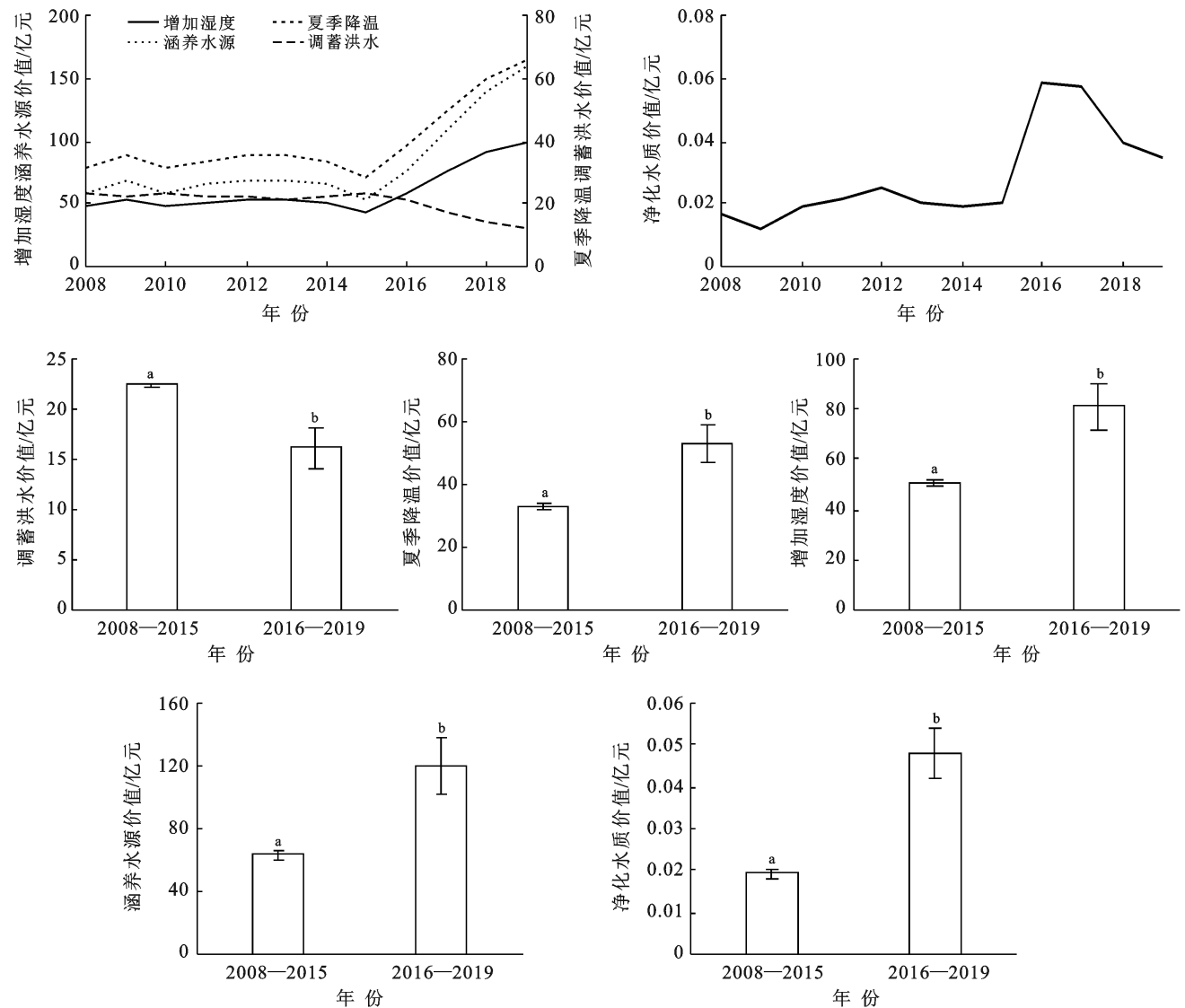


图 2 密云水库 2008—2019 年调节服务价值变化

水库调蓄洪水价值与蓄水量呈负相关〔式(3)],增加湿度价值和夏季降温价值都与水面面积呈正相关〔公式(4)一(5)],涵养水源价值与蓄水量呈正相关〔公式(6)],而对于特定的水库,水面面积随蓄水量的增加而增大,因此,调蓄洪水价值与增加湿度价值、夏季降温价值、涵养水源价值呈负相关。南水北调中线工程的启用对密云水库各项调节服务价值都有极显著的影响。南水北调工程开始补水后,密云水库的供水压力减轻,同时密云水库自身的来水量增加,因此,

水库蓄水量和水面面积逐年增大,导致调蓄洪水价值极显著降低,增加湿度价值、夏季降温价值和涵养水源价值却极显著提高。密云水库是重要饮用水源地,入库河流、引水渠受到严格保护,污染物浓度低,水库生态系统水质净化功能发挥空间有限,因此,水质净化价值较低。然而,南水北调工程开始补水后,初期由于机械混合作用导致氮、磷元素浓度上升,水质净化功能发挥作用,使得水质净化价值在 2016 和 2017 年升高,后期随着水库水位逐渐稳定,机械混合

作用影响减弱,氮、磷浓度下降,水质净化价值也随之下降,与吴晓辉等<sup>[11]</sup>预测分析的水质变化趋势相吻合。

### 3.3 密云水库支持服务价值

由图 3 可知,2008—2019 年密云水库支持服务中的固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值呈现相似的小幅度稳态波动变化趋势,保护生物多样性价值则呈缓慢上升的变化趋势。固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值平

均分别为  $0.000\ 18 \pm 0.000\ 03$  亿元和  $0.001\ 01 \pm 0.000\ 18$  亿元,最低值都出现在 2013 年;最高值都出现在 2018 年;保护生物多样性价值平均为  $618.991\ 8 \pm 40.561\ 1$  亿元,最低值出现在 2008 年,最高值出现在 2019 年。南水北调工程启用后,密云水库固定 CO<sub>2</sub> 价值、释放 O<sub>2</sub> 价值和保护生物多样性价值都有不显著的升高,同时固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值波动幅度增大,保护生物多样性价值波动幅度变小。

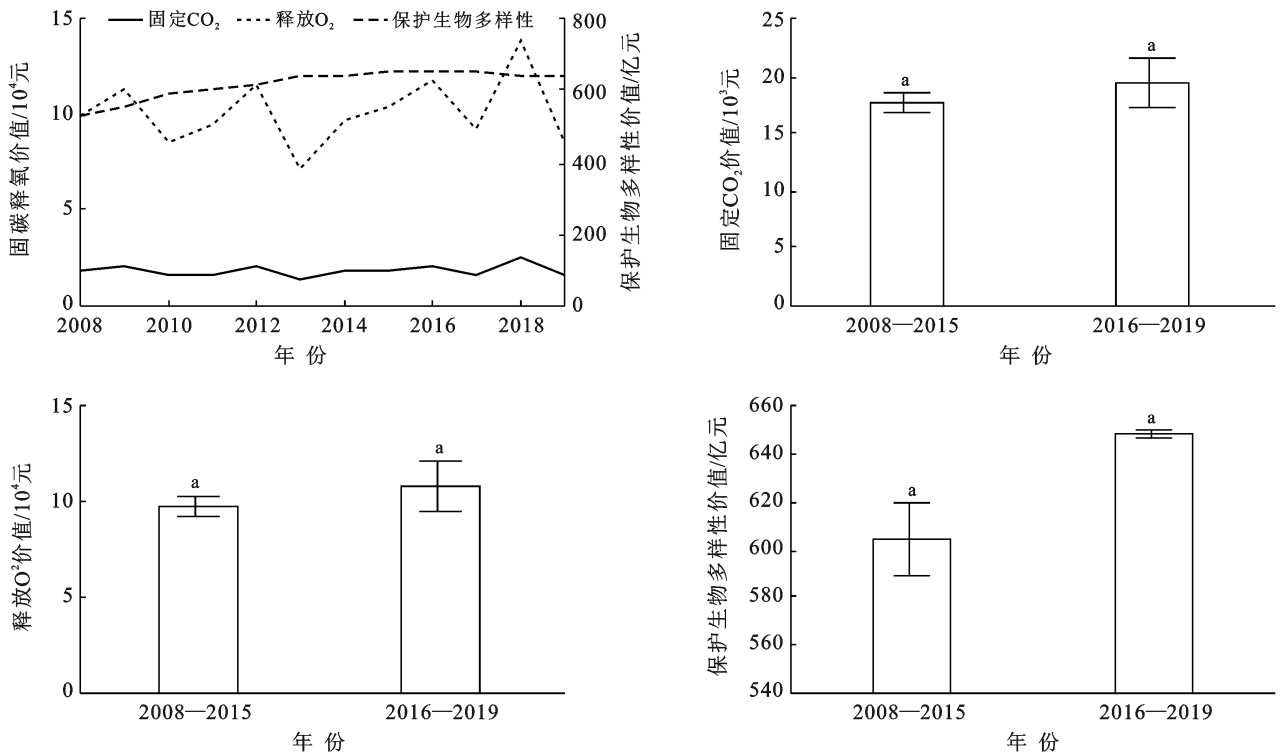


图 3 密云水库 2008—2019 年支持服务价值变化

水库生态系统固定 CO<sub>2</sub> 功能和释放 O<sub>2</sub> 功能主要通过浮游植物的光合作用实现,其价值的大小都由浮游植物的生物量决定<sup>[16]</sup>。浮游植物的生物量一方面取决于支撑浮游植物生长和繁殖的水体中营养元素的含量,另一方面受制于摄取浮游植物的滤食性鱼类的数量<sup>[17]</sup>。由于密云水库水质长期稳定在地表水 II 类水平,而且管理处定期向水库中投放和捕获滤食性鱼类,因此,浮游植物的生物量总体保持稳定,导致密云水库固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值相应地呈现稳定波动的变化趋势。南水北调工程使密云水库的来水更加多元化,对水质和水生生物均造成一定的冲击,使浮游植物生物量、固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值波动增强,具体影响过程与机制还需要更长时间的监测。

本文采用碳交易法而非碳税法进行水库生态系统固定 CO<sub>2</sub> 功能的价值评价,碳交易价格远低于碳

税价格,导致估算的固定 CO<sub>2</sub> 价值偏低<sup>[12,15]</sup>,但是基于碳交易法获得的固定 CO<sub>2</sub> 价值市场认可度更高,更具有实操性。

密云水库已被列入国家重点湿地名录,由于来水的多元化,水库水位趋于稳定,水库周边的湿地也将形成稳定的生境,有利于生物多样性的保护。密云水库涉及的国家一级、二级和北京市一级保护生物全部为鸟类,其中国家一级保护野生动物有 3 种:大鸨(*Otis tarda*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*),国家二级保护野生动物有 8 种:毛脚鳶(*Buteo lagopus*)、大鳶(*Buteo hemilasius*)、白尾鹞(*Circus cyaneus*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、猎隼(*Falco cherrug*)、红脚隼(*Falco amurensis*)、大天鹅(*Cygnus cygnus*)、灰鹤(*Grus grus*),北京市一级保护野生动物有 8 种:灰喜鹊(*Cyanopica cyana*)、红嘴蓝鹊(*Urocissa erythrorhyncha*)、黑卷尾(*Dicrurus*

*macrocerus*)、星头啄木鸟(*Dendrocopos canicapillus*)、鸿雁(*Anser cygnoides*)、大白鹭(*Egretta alba*)、中白鹭(*Egretta intermedia*)、凤头鹛(*Podiceps cristatus*)。随着密云水库周边生态环境的进一步改善和人们对生物多样性保护重要性认识的深入,密云水库的生物多样性保护价值将维持稳步上升的趋势。

### 3.4 密云水库文化服务价值

由图 4 可以看出,2008—2019 年密云水库文化服务中的旅游休闲价值呈现先快速上升后逐渐趋稳的变化趋势,科研教育价值则呈现先小幅波动,后快速上升的趋势。旅游休闲价值平均为  $3.525 2 \pm 1.885 4$  亿元,最低值出现在 2008 年;最高值出现在 2017 年;科研教育价值平均为  $0.850 6 \pm 0.499 2$  亿元,最低值出现在 2008 年;最高值出现在 2019 年。南水北调工程

前后,密云水库旅游休闲价值和科研教育价值都极显著提高( $p < 0.01$ )。

密云水库是密云区旅游休闲的一张名片,独特的山—水—林—库风光对游客有很强的吸引力。交通便捷程度对旅游潜力的释放具有决定性作用,2009 年北京至承德高速公路全线开通后,密云区旅游进入飞速发展阶段,密云水库旅游休闲价值也大幅增加;2015 年以后高速公路的旅游带动作用趋于饱和,旅游休闲价值进入稳定平衡期。为了加强水源地保护工作,密云水库宜适当限制与保护水源无关的旅游开发活动。密云水库是山水林田湖草系统治理的典范,也是密云水库精神的重要载体,对于践行习近平生态文明思想、引导全社会爱水护水有重要推动作用,因此,密云水库的科研教育价值尚有很大的上升空间。

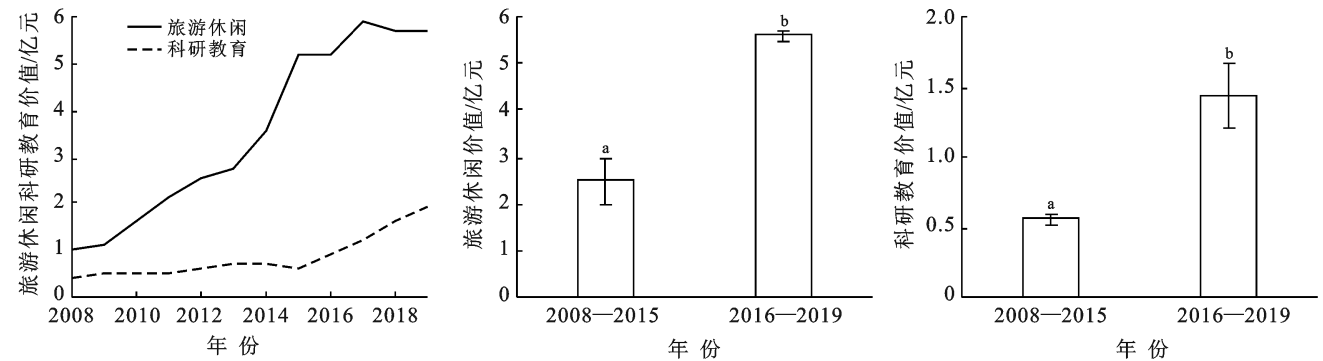


图 4 密云水库 2008—2019 年文化服务价值变化

### 3.5 密云水库水生态服务总价值和不同水生态服务价值所比例例

由图 5 可知,2008—2019 年密云水库水生态服务总价值呈现先小幅波动,后逐渐增大的变化趋势。

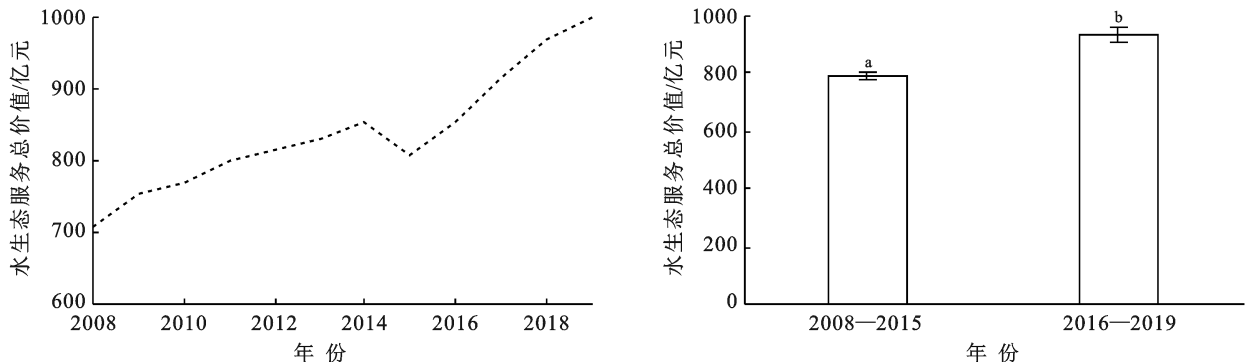


图 5 密云水库 2008—2019 年水生态服务总价值变化

密云水库各项水生态服务功能按照价值由大到小依次为:保护生物多样性>涵养水源>增加湿度>夏季降温>调蓄洪水>水资源供给>旅游休闲>科研教育>提供水产品>水质净化>释放  $O_2$  > 固定

水生态服务总价值平均为  $840.380 8 \pm 86.427 4$  亿元,最低值出现在 2008 年;最高值出现在 2019 年。南水北调工程启用后,密云水库水生态服务总价值极显著提高( $p < 0.01$ ),并且波动幅度也增大。

$CO_2$  (图 1—4)。密云水库水生态服务功能价值由支持服务功能中的保护生物多样性价值所主导,其所比例例合计达 64%~80%,呈现先扩大后缩小趋势,最大比例出现在 2015 年;调节服务功能中的涵养水源

价值、增加湿度价值、夏季降温价值和调蓄洪水价值处于次要地位,其所比例例合计为 18%~33%,呈现逐年增大的趋势;供给服务功能和文化服务功能价值比例合计不足 5%,分别呈现不规则波动和逐年增大的变化趋势(图 6)。

水生态服务价值因为研究对象、选取的生态服务功能和价值计算方法的不同而存在差异。例如:位于珠江流域下游的广东省广州市 2005—2010 年水生态服务价值在 699.62~879.07 亿元之间、深圳市 2013 年水生态服务价值为 864.51 亿元<sup>[7,8]</sup>,位于长江流域上游的重庆市 2001—2015 年水生态服务价值在 555.99~1 340.30 亿元之间<sup>[10]</sup>,位于长江下游的太湖流域 2008 年水生态服务价值为 910 亿元<sup>[6]</sup>,而处于永定河流域上游的河北省张家口市 2017 年水生态服务价值仅为 55.14 亿元<sup>[12]</sup>。密云水库 2008—2019 年水生态服务价值为 709.96~1 003.60 亿元,与珠江流域和长江流域的区域水生态服务价值相当,同时显著高于永定河上游的区域水生态服务价值。这可能是由于密云水库的蓄水量又大于永定河上游的水资源供给量和水库蓄水量。

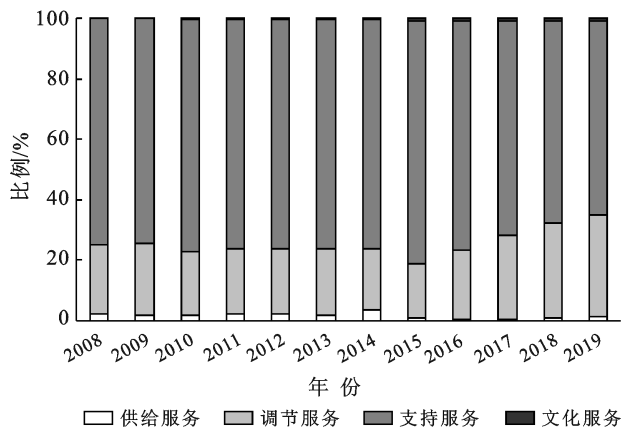


图 6 密云水库 2008—2019 年不同水生态服务价值所比例例变化趋势

## 4 结论

(1) 本研究运用替代成本法、替代工程法、市场价值法、碳交易法、支付意愿法、比例折算法和成果参照法评估密云水库水生态服务价值的变化情况。在研究时段内,密云水库的水资源供给价值、提供水产品价值和水质净化价值呈现大幅度、不规则波动的变化趋势,调蓄洪水价值先小幅波动后逐年下降,增加湿度价值、夏季降温价值、涵养水源价值和科研教育价值则都先小幅波动后逐年上升,固定 CO<sub>2</sub> 价值和释放 O<sub>2</sub> 价值均在平均值附近小幅波动,保护生物多

样性价值逐年平稳上升,旅游休闲价值先快速上升后稳定于高位,水生态服务总价值的变化趋势与增加湿度价值、夏季降温价值、涵养水源价值和科研教育价值相似。

(2) 南水北调工程对密云水库各项水生态服务功能有不同的影响:南水北调工程启用后,水资源供给价值、提供水产品价值、固定 CO<sub>2</sub> 价值、释放 O<sub>2</sub> 价值和保护生物多样性价值与启用前相比,变化不显著;调蓄洪水价值极显著减小;增加湿度价值、夏季降温价值、涵养水源价值、水质净化价值、旅游休闲价值和科研教育价值都极显著增大。水生态服务总价值也极显著增大,从 792.995 8±47.626 1 亿元增加至 935.150 7±64.293 5 亿元。

(3) 密云水库水生态服务价值达 709.96~1 003.60 亿元,其中保护生物多样性价值、涵养水源价值、增加湿度价值、夏季降温价值和调蓄洪水价值居于支配地位。为保障饮用水储量和水质安全可靠、维护水库生态系统持久稳定,建议密切监测南水北调对水库水量水质的长期影响,并据此调整滤食性鱼类的投放量和捕获量,同时加强密云水库文化、生态价值的挖掘和宣传力度,提升科研教育价值,促进区域社会经济的可持续发展。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zheng Hua, Li Yifeng, Robinson B E, et al. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(10): 527-532.
- [2] Peng Jian, Wang An, Luo Lingwei, et al. Spatial identification of conservation priority areas for urban ecological land: An approach based on water ecosystem services [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(6): 683-694.
- [3] Pacetti T, Castelli G, Bresci E, et al. Water values: Participatory water ecosystem services assessment in the Arno River Basin, Italy [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(14): 4527-4544.
- [4] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等.水生态服务功能分析及其间接价值评价[J].*生态学报*, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [5] 刘征.河北省水生态系统服务功能重要性评价[D].河北石家庄:河北师范大学,2006.
- [6] 王斌,张彪,王建锋,等.太湖流域水生态系统服务及其空间差异[J].*水土保持通报*, 2011, 31(2): 215-221.
- [7] 叶延琼,章家恩,陈丽丽,等.广州市水生态系统服务价值[J].*生态学杂志*, 2013, 32(5): 1303-1310.
- [8] 梁鸿,潘晓峰,余欣繁,等.深圳市水生态系统服务功能价值评估[J].*自然资源学报*, 2016, 31(9): 1474-1487.



- [8] 张勃, 刘秀丽. 基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测: 以甘肃省为例[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6251-6260.
- [9] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析[J]. 地理研究, 2003, 22(5): 654-662.
- [10] 刘钰, 马延吉. 农业生态足迹研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(7): 1115-1123.
- [11] 杨桂华, 李鹏. 旅游生态足迹: 测度旅游可持续发展的新方法[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1475-1480.
- [12] 刘海燕, 郝海广, 刘煜杰, 等. 北方农牧交错生态脆弱区农户生态足迹及其与收入的关系[J]. 生态经济, 2019, 35(7): 148-154.
- [13] 张铭也, 赵春子. 基于生态足迹法的延边州水资源生态环境研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(3): 135-142.
- [14] 郭运功, 汪冬冬, 林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2): 103-108.
- [15] Ferng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity [J]. Ecological Economics, 2001, 37(2): 159-172.
- [16] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究: 以温州市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2982-2993.
- [17] 胡悦, 王溧. 京津冀三维生态足迹演变趋势及驱动因素[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(18): 309-313.
- [18] Destek M A, Ulucak R, Dogan E. Analyzing the environmental Kuznets curve for the EU countries: The role of ecological footprint [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(29): 29387-29396.
- [19] 程钰, 尹建中, 王建事. 黄河三角洲地区自然资本动态演变与影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 127-136.
- [20] 程钰, 任建兰, 侯纯光, 等. 沿海生态地区空间均衡内涵界定与状态评估: 以黄河三角洲高效生态经济区为例[J]. 地理科学, 2017, 37(1): 83-91.
- [21] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 生态足迹的模型修正与方法改进述评[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 1-17.
- [22] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 等. 中国的生态服务消费与生态债务研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 43-51.
- [23] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法: 以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [24] 刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 614-624.
- [25] 刘某承, 苏宁, 伦飞, 等. 区域生态文明建设水平综合评价指标[J]. 生态学报, 2014(01): 97-104.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

(上接第 283 页)

- [9] 文一惠, 马良, 谢婧, 等. 生态服务功能空间转移量化研究: 以官厅水库流域为例[J]. 环境保护科学, 2018, 44(1): 95-102.
- [10] 邓灵稚, 杨振华, 苏维词. 城市化背景下重庆市水生态系统服务价值评估及其影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 208-216.
- [11] 吴晓辉, 吴钢, 潘朔旻, 等. 南水北调来水对密云水库水质和水生生物影响的预测分析[J]. 北京水务, 2015(6): 4-6.
- [12] 管欣, 张玉玲, 贾晓宇, 等. 永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1326-1337.
- [13] 李婵娟, 段新光, 焦有权. 长系列数据支持下密云水库蒸发量变化特征分析[J]. 价值工程, 2020, 39(9): 200-202.
- [14] 石河, 齐如九. 密云水库水体面积 10 年以来最大达 148.7 km<sup>2</sup> 100 万亩京津冀水源绿色生态带初步形成[J]. 绿化与生活, 2019, No.268(9): 13-15.
- [15] 孙晓玉. 水生态系统服务价值评价研究及其应用[D]. 湖北 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [16] 张颖. 密云水库浮游植物种类组成及生物量的研究[D]. 辽宁 大连: 大连海洋大学, 2018.
- [17] 梁勇, 王荣臣, 李翌, 等. 密云水库滤藻鱼类增殖放流对水生态环境影响分析[J]. 北京水务, 2020(S1): 60-63.
- [18] 谢世林, 史雪威, 彭文佳, 等. 我国重点保护动植物物种价值评估[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7565-7571.
- [19] 陈卓. 基于游客支付意愿的旅游生态补偿机制研究: 以北京市密云区石城镇为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [20] 中国水产科学研究院长江水产研究所. SC/T9402-2010 淡水浮游生物调查技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2010.
- [21] Li Delong, Wu Shuyao, Liu Laibao, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.
- [22] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济评价[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443-452.