

DOI: 10.5846/stxb201903120464

吴一帆, 张璇, 李冲, 郝芳华, 殷国栋. 生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升——以潮河流域为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5168-5178.

Wu Y F, Zhang X, Li C, Hao F H, Yin G D. Improvement of ecosystem service function in watershed by ecological restoration measures: A case study in Chaohe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5168-5178.

生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升 ——以潮河流域为例

吴一帆¹, 张璇^{1,2,*}, 李冲¹, 郝芳华¹, 殷国栋¹

1 北京师范大学水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学中国绿色发展协同创新中心, 北京 100875

摘要:流域生态环境修复工程对保护和提高流域生态系统服务功能及其价值起到了至关重要的作用。本文基于 InVEST 模型, 选取密云水库上游, 潮河流域为研究对象, 依据各地区“十三五”生态环境保护规划中针对潮河流域的生态修复措施, 设置化肥减量、河岸缓冲带、退耕还林和综合修复四种情景, 并采用直接市场法和替代市场法研究生态系统服务价值的变化。经过研究发现: ①四种情景都有效的提高了生态服务功能和价值; ②单独实施化肥农药减量, 不能显著降低 TP (-13.14%)、TN (-10.94%) 负荷; ③采取综合修复的方式能使潮河流域水源涵养, TP、TN 拦截, 土壤保持能力分别提高了 40.18%、53.89%、42.32% 以及 63.76%, 同时生态服务价值增加 7.73×10^7 元。这一发现旨在通过对不同生态修复措施在生态环境修复中的成本与效益分析, 帮助决策者和规划单位准确评估生态修复的收益, 从而制定提高生态环境系统服务功能的最佳修复方案。

关键词: 潮河; InVEST 模型; 生态服务功能; 土地利用

Improvement of ecosystem service function in watershed by ecological restoration measures: A case study in Chaohe River Basin

WU Yifan¹, ZHANG Xuan^{1,2,*}, LI Chong¹, HAO Fanghua¹, YIN Guodong¹

1 Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Green Development Institute, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The ecological environment restoration projects have played vital roles in protecting the watershed's environment and improving the ecosystem services. The Chaohe River Basin, located at the upstream of the Miyun Reservoir, was selected as the study area. According to the "13th Five-Year" Ecological Environmental Protection Plan for Chaohe River Basin, four scenarios were setup, including the fertilizer reduction, establishment of riparian buffer zone, Grain for Green Program, and integrated treatment method. The InVEST model was used to quantify the changes on ecosystem services and the direct and alternative market approaches were applied to estimate ecosystem services values under these four scenarios. The results have shown that ① All four scenarios have presented positive effects on the ecosystem services enhancement. ② Reduction of fertilizers and pesticides will reduce the phosphorous (13.14%) and nitrogen pollution (10.94%) not obviously. ③ The integrated treatment would increase the water yield, water purification (TP/TN reduction) and soil conservation services for 40.18%, 53.89%, 42.32%, and 63.76%, respectively. Accordingly, the integrated practices would also increase the ecosystem services value for 77.26 million yuan. This study has tried to introduce a practical

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770516); 高等学校学科创新引智计划“111 计划”(B18006)

收稿日期: 2019-03-12; 网络出版日期: 2020-05-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuan@bnu.edu.cn

approach for policy makers and stakeholders to evaluate the income of restoration practices and to find the best restoration practices for improving the ecosystem services function.

Key Words: Chaohe River; InVEST model; ecosystem service; land use

生态系统服务功能是自然生态系统支撑和维持人类生存和发展的环境条件^[1],是人类直接或间接从生态系统中获取的所有收益^[2]。“千年生态系统评估(Millennium Assessment, MA)”将生态系统服务分为供给服务、调节服务、文化服务以及支持服务四大类,其中水源涵养、土壤保持、水质净化、气候调节等由生态系统自身属性直接完成的定义为调节服务^[3-4]。为了对生态系统的调节服务功能进行价值评估,UNER 提出将生态系统直接或间接产生的产品使用替代市场法和假想市场法^[5-6],根据产品的市场价格推算调节功能的市场价值。1997 年 Costanza 等^[7],对世界生态系统服务和自然资本的价值进行了评估,以当时的价格估算,每年地球生态系统产生的价值约为 16—54 万亿美金;我国学者欧阳志云等^[8],于 1999 年首次运用影子价格、替代工程法或损益分析方法对我国陆地生态系统在有机物质的生产、二氧化碳的固定、氧气的释放等方面进行了价值评估,揭示了陆地生态系统的巨大生态、人文等价值。随着近年来遥感等技术的发展,以及各种相关模型的完善,生态系统服务功能的量化方法也愈发成熟,其中 InVEST 模型就是一种目前广泛应用于量化生态服务功能及其价值的研究的工具^[9]。如 Keller 等^[10],应用 InVEST 模型中的多个模块针对不同的土地利用变化情况探究土地利用变化对生态服务功能干扰最小化的途径,并为未来土地管理提供科学的理论指导;吴瑞等^[11],对 1995 至 2010 年北京官厅水库的水源涵养以及水质净化功能的时空变化进行了评估,并探讨了研究区生态服务功能对政策法规的响应关系。目前,国内大多数有关生态系统服务功能和价值的研究多以分析研究区生态服务功能和价值受气候和土地利用影响的时空变化特征为主,极少考虑对生态系统服务价值进行核算,然而在生态环境治理中成本与效益分析是决策者们制定政策的基础。所以,为全面认识流域生态修复措施的成本和效益,从经济性、高效性和长久性三方面共同指导生态修复工作,提升重点流域的生态服务功能,开展流域生态系统价值核算的研究十分必要。

密云水库是北京市重要的地表饮用水源地,其水质为Ⅲ类,当前营养状态为中营养水平^[12]。目前对密云水库及其上游生态环境的研究多从水质、径流、气候变化和污染物演变等方面展开^[13-15],针对生态修复等环境治理手段对生态系统服务功能和价值的影响研究较少。本文选取密云水库上游,潮河流域为研究对象,根据北京市、承德市以及相关区县的“十三五”生态环境保护规划,应用 InVEST 模型量化生态服务功能,结合直接市场法和替代市场法对不同生态修复手段进行价值核算。本研究以期量化生态修复效用、改善流域生态环境质量、提高流域生态环境功能提供科学依据和有效参考。

1 研究区概况

潮河流域地处京津冀北部,华北和东北两个地区的连接过渡地带,地近京津,地理位置如图 1 所示,总面积约 $6.52 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。研究区属于温带大陆性季风型气候,年平均气温 $0-8^\circ\text{C}$,气温由西北向东南递增;地势由西北向东南呈阶梯状下降,起伏较大;水资源储量丰富,多年平均降水量 490 mm,主要集中在 6—9 月^[16]。植被物种多样性丰富,植被覆盖率超过 70%。

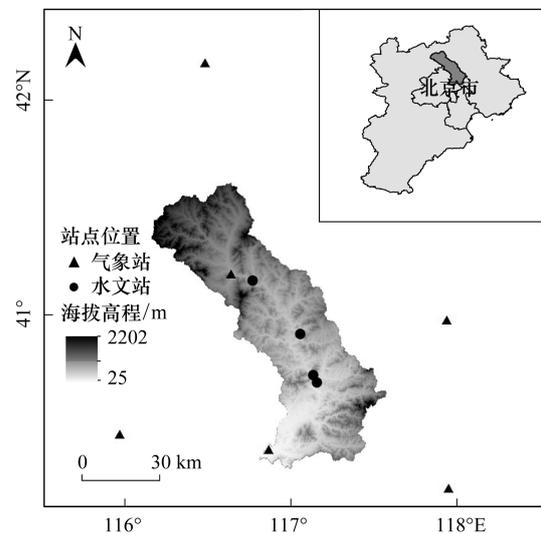


图 1 潮河流域研究区示意图

Fig.1 Location of the Chaohe River Basin

研究区地处京津冀地区重要的水源地和水源涵养生态功能保护区,潮河流域作为密云水库的上游,研究其水源涵养、土壤保持和水质净化能力等生态系统服务功能具有重要战略意义^[17]。

2 数据与方法

2.1 数据的来源与处理

本研究使用来自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)的 DEM 数据,分辨率为 90 m。土地利用数据来自资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),选择 2005 和 2015 两期土地利用栅格图像。土壤数据来自中国土壤数据库(<http://www.soil.csdb.cn/>),土壤图层使用 1:100 万矢量数据。选取研究区及周边 6 个气象站的数据作为气象驱动(图 1),气象数据从中国气象数据服务网(<http://data.cma.cn/>)下载并处理,辐射数据从(<https://power.larc.nasa.gov/>)获取。选取研究区周围古北口水质站作为面源污染校验站点,选取总氮(TN),总磷(TP)为指示污染物。其中驱动 InVEST 模型的生物物理属性参数的选择参考 InVEST 模型输入手册及相关文献获得,具体情况如表 1 所示:

表 1 InVEST 模型驱动参数属性表
Table 1 Biophysical attribute table for InVEST model

	蒸散系数 Evapotranspiration coefficient	植被覆盖因子 Vegetation coverage factor	水土保持措施因子 Factor of soil and water conservation	N 负荷 Nitrogen load/ (kg hm ⁻² a ⁻¹)	P 负荷 Phosphorus load/ (kg hm ⁻² a ⁻¹)	N、P 截留效率 Nitrogen & Phosphorus interception efficiency/%
水田 Paddy field	0.8	0.25	0.35	11.3	2.06	0.4
旱地 Dry land	0.2	0.5	0.4	23.7	3.1	0.25
有林地 Forest	1	0.003	0.2	1.8	0.011	0.75
灌木 Shrub	0.398	0.01	0.2	4.85	0.43	0.65
疏林地 Sparse forest	1	0.003	0.2	1.8	0.011	0.75
其他林地 Other forest	1	0.2	0.2	4	0.005	0.6
高密度草地 High density grassland	0.85	0.01	0.2	6.26	0.68	0.48
中密度草地 Medium density grassland	0.65	0.008	0.2	5.56	0.51	0.38
低密度草地 Low density grassland	0.65	0.02	0.25	3.89	0.32	0.25
河渠 Channel	1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.05
水库 Reservoir	1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.05
滩地 Shallows	0.7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.05
城镇 Urban area	0.3	0.001	0.001	5.51	0.25	0.01
农村 Rural area	0.4	0.001	0.001	17.35	0.97	0.01
建设 Construction area	0.3	0.001	0.001	1.8	0.13	0.01
沙地 Sandy land	0.5	0.25	0.01	0.001	0.001	0.05
裸岩石 Bare area	0.3	0.25	0.01	0.001	0.001	0.05

2.2 模型的原理及校验

2.2.1 InVEST 模型原理

InVEST 模型的水源涵养模块是一种基于水量平衡法的估算方法,某栅格单元的降水量减去实际蒸散的水量即为水源涵养量,其中实际蒸散是根据 ZHANG 等^[18]基于 Budyko 水热耦合平衡假设提出的算法计算得出。模型主要算法:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \cdot P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的年产水量 mm; AET_{xj} 为栅格 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量 mm; P_x

为栅格 x 的年降水量 mm。

水质净化模块用于评估生态系统中植被和土壤的水质净化服务,水质净化服务功能是根据流域 TN 和 TP 的输出量评估的,二者输出量越高,表明水质净化功能越弱。其主要算法:

$$ALV_x = HSS_x \cdot pol_x \quad (2)$$

式中, ALV_x 是栅格 x 的调整后输出量, HSS_x 栅格 x 的水文敏感性得分, pol_x 为栅格 x 的输出系数。

土壤保持模块的作用是描述坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程。有利于流域水土保持生态系统服务功能的研究,为水库清淤管理和河道水质控制提供指导。其主要算法:

$$USLE_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (3)$$

式中, $USLE_x$ 为栅格 x 的土壤实际侵蚀量,是考虑植被拦截后的计算结果; R_x 为降雨侵蚀力; K_x 为土壤可蚀性; LS_x 为坡度长因子; C_x 为植被覆盖因子; P_x 为土壤保持措施因子。

2.2.2 子流域的划分

本研究根据分辨率为 90 m 的 DEM 数据,使用 ArcGIS 10.2 中的 Hydrology 模块,基于水文过程进行填注、集流等操作计算流向,并提取水系图将流域划分为 27 个子流域, InVEST 模拟结果统计将以划分的 27 子流域为基本单元进行。

2.2.3 模型的校验

由于土地利用类型与生态系统服务功能关系密切^[19],根据 2005 至 2015 年土地利用变化分析发现,研究区的各土地利用类型变化较小(图 2),这与研究区的功能定位及当地强有力的环境保护政策有密切的关系。考虑数据的可获得性与完整性,本研究使用 2005 年古北口水质站监测值校准模型参数并应用于 2015 年的模型模拟。

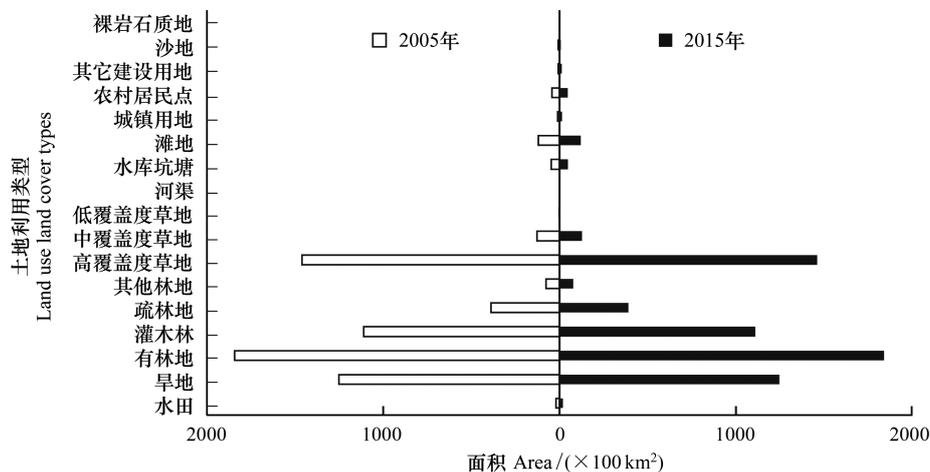


图 2 潮河流域 2005 和 2015 各土地利用类型面积

Fig.2 Land use area of Chaohe River Basin in 2005 and 2015

水源涵养模块的计算结果包含了地表水和地下水,因此不能使用地表径流值来校验模型。本研究参考吴瑞等的研究方法^[11],用平均径流深与模型相应评估值进行校验。

$$R = w_{yield} \cdot \frac{a}{A} \quad (4)$$

式中, R 是平均径流深(mm); w_{yield} 是模型输出的整个流域产水量(m^3); a 是径流系数; A 是流域的总面积(hm^2)。如果模型误差小于 10%,则认为模拟结果基本可以反映实际的情况^[20]。具体校验结果如下表 2 所示。

表 2 2005 年古北口水质站水质数据校准模型

Table 2 Calibration and validation of the InVEST model

时间 Year	N 输出量 Nitrogen Export/t			P 输出量 Phosphorus Export/t			径流深 Runoff depth/mm			
	模拟	观测	误差	模拟	观测	误差	模拟	观测	误差	
	验证 Calibration	2005	413.02	392.19	4.92%	29.62	27.26	8.66%	11.7	12.5

2.3 四种生态修复措施的情景设置

根据北京市 2016 年 12 月印发的《北京市“十三五”时期环境保护和生态建设规划》第四章第二节,承德市 2017 年 7 月印发的《承德市环境保护十三五规划的通知》第三章第二节,北京市顺义区 2017 年 4 月印发的《顺义区“十三五”环境保护与生态建设规划》以及其他区县的“十三五”生态环境规划,提取其中有关提升潮河流域生态系统功能的相关措施,基于 2015 年潮河流域的土地利用现状,设置四种拟开展的生态修复手段情景(表 3):①化肥农药减量;②河岸缓冲带;③退耕还林;④以上三种共同作用的综合修复。

表 3 四种生态修复情景

Table 3 Four ecological restoration scenarios setup

生态修复情景 Ecological restoration scenarios	方法措施 Ecological restoration measures
化肥农药减量 Fertilizer reduction	查阅研究区周围同类型的文献 ^[21-22] ,将 InVEST 模型的农业用地(水田、旱地)输入部分的 N、P 负荷降低 20%,其中 TN 分别由 2015 年实际的 11.3 kg hm ⁻² a ⁻¹ 和 23.7 kg hm ⁻² a ⁻¹ 降低至 9.04 kg hm ⁻² a ⁻¹ 和 18.96 kg hm ⁻² a ⁻¹ ,TP 由 2.06 kg hm ⁻² a ⁻¹ 和 3.1 kg hm ⁻² a ⁻¹ 降低至 1.65 kg hm ⁻² a ⁻¹ 和 2.48 kg hm ⁻² a ⁻¹
河岸缓冲带 Riparian buffer zone	由于草地在作为河岸缓冲带的主要覆盖植被时,河岸缓冲带对污染物的去除率最高 ^[23] ,设置潮河沿岸的缓冲区范围为 1km,将缓冲区范围内的栅格中是城镇、农业(水田、旱地)、建设用地等非生态环境类型的土地利用转化为草地作为河岸缓冲带情景
退耕还林 Grain for Green Programme	根据各区县环境保护“十三五”规划,将潮河流域全部坡度大于 25 度的旱地以及其他沙地等共计 8×10 ⁴ hm ² 转换为林地植被类型演替初级阶段的灌木林 ^[24] ,作为退耕还林情景
综合修复 Integrated treatment	以上三种共同作用

2.4 生态服务功能的核算标准

2.4.1 水质净化

密云水库水质易受上游农业面源氮和磷污染的影响,参考江苏省农业科学院利用水葫芦处理湖泊氮磷的示范工程^[25],将治理湖泊中的 TN、TP 污染的成本分别定为 4.8×10⁴元/t,3.18×10⁵元/t。

2.4.2 水源涵养

在潮河流域内,生态系统的水源涵养功能主要由森林、草地、农田生态系统提供,对本研究区采用替代市场法,以蓄水量等同研究区水源涵养量的水库建设成本估算生态系统涵养水源的总价值^[4-5]。由于模型水源涵养的模拟数值不能完全反应实际流量^[26],所以应用径流系数估算实际的径流量,并将产生的径流按照市场价格核算为密云水库下游供水地区(北京市)的居民用水价格。

$$E_w = \text{wyield} \cdot a \cdot P_i \quad (5)$$

式中, E_w 为水源涵养总价值(元); P_i 为北京市居民用水价格(元/m³); a 是径流系数;wyield 是模型输出的整个流域产水量(m³)。

2.4.3 土壤保持

土壤保持的经济效益主要来源于上游生态系统减少下游密云水库受泥沙淤积作用的影响^[4-5]。有学者认为,全国因土壤侵蚀流失的泥沙有 24%淤积于下游水库,是导致水库蓄水能力下降的主要原因,同时也在

一定程度上增加了干旱、洪涝发生的概率^[27-28]。

$$E_s = 24\% \cdot P_s \cdot \frac{A}{\rho} \tag{6}$$

式中, E_s 为土壤流失的经济损失(元); A 为土壤流失总量(t); P_s 为水库库容工程费用(元/ m^3); ρ 为土壤容重(t/m^3)。

2.4.4 生态服务价值核算相关参数

潮河流域的平均土壤容重^[15]为 1.48 g/cm^3 ;流域的径流系数^[17]为 0.116;根据《中国水利年鉴》平均水库库容造价^[5],我国单位库容的水库工程费用为 1.22 元/m^3 ,按照物价指数换为 2015 年的价格约为 1.64 元/m^3 ;北京市政府发布的《北京市居民用水价格消费表》按第一阶梯估算,潮河流域的水源涵养价值为 2.07 元/m^3 。河岸缓冲带草本覆被成本概算为 2295 元/hm^2 ^[29];退耕还林成本按照给予农户补偿均价概算为 3795 元/hm^2 ^[30]。

3 结果与分析

3.1 四种情景的土地利用变化情况

图 3 显示了四种生态修复措施模拟实施之后,潮河流域土地利用类型的空间分布,表 4 则列出了各土地利用类型面积及占比的变化情况。其中,化肥减量的情境是对施用化肥的总量进行削减,而不改变原有的耕地分布与面积。从图 3 土地利用图像上可以看出潮河流域居民生活、耕作的活动范围大多分布在临近潮河的两岸,频繁的人类活动对潮河流域的水环境质量存在风险。因此,修建河岸缓冲带将使沿河的水田面积减少 75.00%、旱地减少 33.97%、城镇用地减少 64.28%、农村居民点减少 30.43%,在自然生态系统与人类生产活动频繁交互的区域设置生态缓冲带,将有效减少化肥及城市污染等经过雨水冲刷直接进入河道^[23]。通过退耕还林的修复措施,将位于陡坡的耕地转变为灌木,减少了潮河流域 63.45%的易侵蚀旱地的同时降低了农业生产产生的 TP、TN 对密云水库上游来水的水质影响。

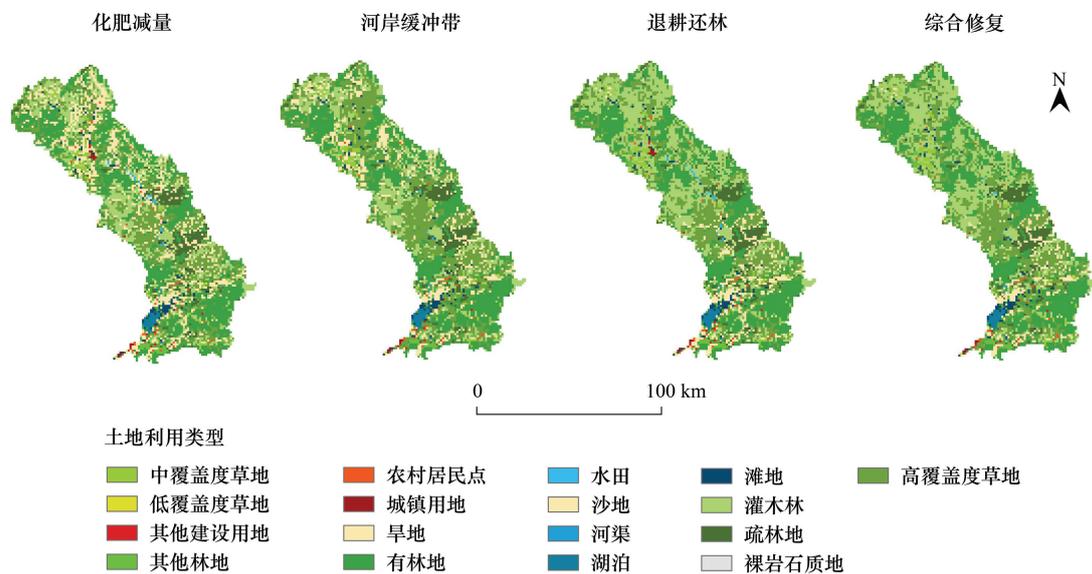


图 3 四种情景设置下的土地利用变化

Fig.3 Land-use maps of the Chaohe River Basin under four scenarios

3.2 生态修复情景下生态系统服务功能的变化

四种情景下潮河流域水源涵养量,水质净化功能,土壤保持功能的总量变化情况如表 5 所示,分布变化如

图 4 所示。其中化肥减量的情景由于不涉及土地利用变化,故水源涵养以及土壤流失均没有改变。农业生产活动产生的 TP、TN 是造成面源污染的主要因素之一^[31],从情景设置上来看,化肥施用量的减少对 TP 和 TN 排放量的削减率为四种情景中最低,分别为 13.14%、10.94%。由此可见单独实施减量的措施,并不能明显的减少 TP、TN 排放,因此面源污染的控制需要综合手段协同控制^[32]。河岸缓冲带的修建与退耕还林在水源涵养量的提升方面效果相当,但在 TP、TN 的减排以及土壤保持方面退耕还林比河岸缓冲带提高了 42.58%、31.73%以及 29.43%。退耕还林将流域 P、N 及土壤截留能力较差的耕地转换为截留能力较高的灌木林,减少了坡度较大的耕地受雨水冲刷造成的污染扩散和土壤流失,使面源污染得到明显好转,同时减轻了密云水库清淤的工作量。总体上,四种情景对潮河流域的生态系统修复都有一定的促进作用,在综合修复的情景下,生态系统服务功能都得到了明显的提升。其中水源涵养量提高了 40.18%,TP、TN 的排放分别减少了 53.89%和 42.32%,同时土壤流失量降低了 63.76%。

表 4 四种情景下主要变化的各土地利用类型

Table 4 Land use Land cover change under four scenarios

	化肥减量		河岸缓冲带		退耕还林		综合修复	
	Fertilizer reduction		Riparian buffer zone		Grain for Green Programme		Integrated treatment	
	面积/ ($\times 10^2$ hm ²)	占比/%	面积/ ($\times 10^2$ hm ²)	占比/%	面积/ ($\times 10^2$ hm ²)	占比/%	面积/ ($\times 10^2$ hm ²)	占比/%
水田 Paddy field	20	0.31	5	0.08	21	0.32	5	0.08
旱地 Dry land	1245	19.09	822	12.60	455	6.82	370	5.52
灌木林 Shrub	1109	17.00	1109	17.00	1857	28.47	1818	27.87
高覆盖度草地 High density grassland	1461	22.40	1924	28.81	1463	22.43	1632	25.02
城镇用地 Urban area	14	0.21	5	0.08	14	0.21	5	0.08
农村居民点 Rural area	46	0.71	32	0.49	46	0.71	30	0.46
其他建设用地 Construction	12	0.18	10	0.15	12	0.18	8	0.12
裸岩、沙地 Bare area	10	0.12	10	0.12	0	0	0	0

表 5 四种情景下各生态服务功能的变化

Table 5 Changes of ecological service functions under four scenarios

	水源涵养量 Water conservation (0.1 billion m ³)	TP Total phosphorus/t	TN Total nitrogen/t	土壤流失 Soil export/t
2015 实际 Actual state in 2015	6.57	30.88	428.67	113362.63
化肥减量 Fertilizer reduction	6.57	26.82	381.88	113362.63
河岸缓冲带 Riparian buffer zone	7.04	26.70	378.18	79289.63
退耕还林 Grain for Green Programme	7.94	15.33	258.17	55953.88
综合修复 Integrated treatment	9.21	14.24	247.27	41088.16

从空间分布来看,在退耕还林和综合修复的情景下,大面积的旱地转化为营养物截留能力较强的灌木林,流域北部以及西部中下游的 TP、TN 输出形成面源污染的风险得到了明显的减轻。水源涵养的主要影响因素有降水、蒸散发、土地利用、地表径流等,其中降水是最直接的驱动因素^[33]。从研究区水源涵养分布图上来看,四种情景中潮河流域水源涵养能力由流域西南向东北递减,这与研究区降水空间分布由南向北减少的特征相一致。从子流域水源涵养的分布来看,在河岸缓冲带、退耕还林、综合修复三种情境下,沿河子流域均呈现水源涵养量上升的趋势,这是由于土地利用变化通过改变研究区下垫面状况影响水源涵养功能^[11]。其中,退耕还林将农田转换成植被覆盖度更高的林地、草地,增加了土壤含水量^[34],提升了流域水源涵养的能力,同时从长期来看,大量聚集度高的林地会在区域内形成微气候,保持区域的土壤湿润,维持一定的水源涵养能力^[35];河岸缓冲带的修建将农业用地、城镇用地以及居民点转换为草地,硬化路面的减少和植被的增多增加

了沿河的蒸散发,但同时在一定程度上减少了地表径流,此时水源涵养量的增加的原因可能是雨水的大量下渗以及流域土壤的高含水量,这与流域径流系数较小相符合^[17]。

导致土壤流失现象发生的原因非常复杂,包括地形、土壤质地、气候变化以及人为因素等^[36]。生态修复工程提高流域土壤保持能力的核心是使流域在减缓自然生态系统的衰退的同时,使土地类型资源向高土壤保持能力的类型转换^[37-38]。潮河流域土壤流失的重点区域是流域的北部以及中西部,该区域水田、旱地以及中低密度草地分布较多,植被土壤保持能力较弱,退耕还林及河岸缓冲带的手段都能大幅提高流域的土壤保持水平。

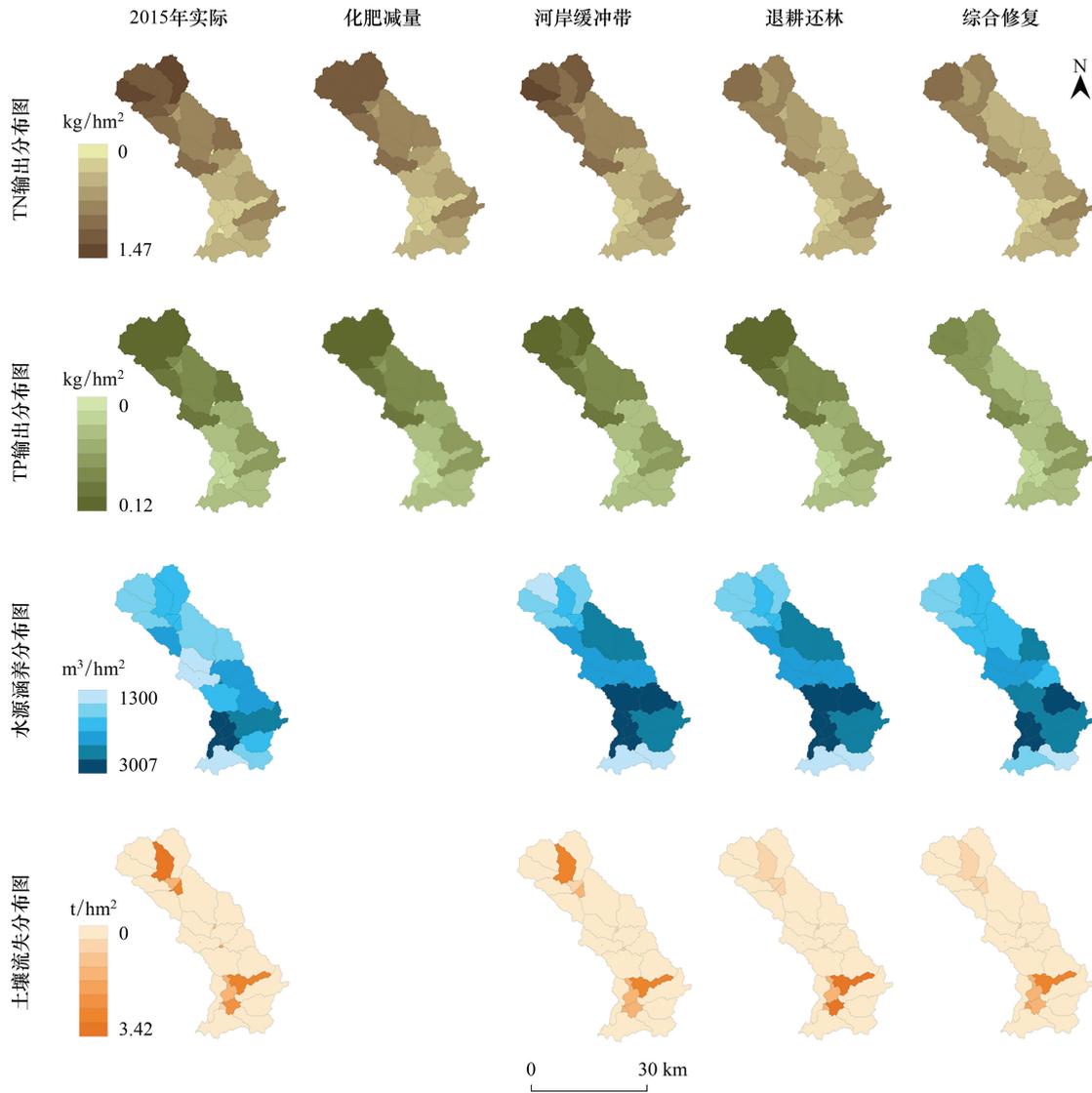


图4 2015年各生态修复情景下生态服务功能分布图(化肥减量对水源涵养与土壤流失没有影响)

Fig.4 Distribution of ecosystem services under ecological restoration scenarios in 2015(The water yield and soil export for scenario of fertilizer reduction has not been listed due to none changed land use and land cover)

3.3 生态服务价值核算

使用直接市场法和替代市场法对潮河流域的生态系统服务功能进行价值核算,以潮河流域 2015 年的实际数据为基础,分别研究四种生态修复情景与 2015 年基准情景的变化结果,得到相应修复手段实施后研究区增加的生态服务价值。核算后的生态系统服务价值结果见表 6。

表 6 四种情景下各生态系统服务价值较 2015 年增加值及价值核算

Table 6 The value of ecosystem services under four scenarios increased compared with 2015

	水源涵养价值 Water conservation ($\times 10^4$ 元)	水质净化 Water purification/ ($\times 10^4$ 元)		土壤流失 Soil export/ ($\times 10^4$ 元)	生态价值 Eco-value/ ($\times 10^4$ 元)	实施成本 Cost/ ($\times 10^4$ 元)	价值核算 Net-value/ ($\times 10^4$ 元)	价值回收耗时 Revenue time/a
		TN	TP					
化肥减量 Fertilizer reduction	0.00	224.56	128.98	0	353.56	0	353.56	1
河岸缓冲带 Riparian buffer zone	3268.03	242.33	133.02	0.91	3644.30	12848	-9203.7	3
退耕还林 Grain for Green Programme	3275.24	818.44	494.39	1.52	4589.57	30360	-25770.43	6
综合修复 Integrated treatment	6324.76	870.71	529.25	1.92	7726.64	43208	-35481.36	5

四种情景都在一定程度上增加了流域的生态服务价值,较 2015 年的实际情况,化肥减量使得潮河流域水质好转,净增加 3.54×10^6 元生态服务价值;河岸缓冲带的建设在增加了流域的水源涵养量的同时,于一定程度上提高了水质净化能力和土壤保持能力,增加了 3.64×10^7 元的生态服务价值;退耕还林行动改变了流域的土地利用类型,增加了 4.59×10^7 元的生态服务价值;在三种修复手段同时开展,在协同作用下,潮河流域的生态系统服务价值将比 2015 年实际增加 7.73×10^7 元。虽然化肥减量产生的生态服务价值最低,但由于没有工程建设成本的前期投入所以获得收益最快;相比于化肥减量,退耕还林和河岸缓冲带的设置均涉及工程前期耗时较长的规划及建设过程,虽然退耕还林在理论上能产生更大的生态系统服务价值,但由于涉及对农户的补贴以及植被的种植,其价值回收的历时较建设河岸缓冲带更久。在工程实施后的生态服务价值并不能立刻覆盖工程成本,因此生态修复工程对提升流域生态系统服务价值需要经历一个较长的周期才能实现价值回收。

由此可见,在制定生态修复政策前需对拟实施的地区进行充分的调查,生态修复措施的实施应根据不同地区定制相应的修复方案。例如,在资金较不充足的地区,政策上鼓励化肥农药减量不仅能在一定程度上改善当地的生态环境也能减轻政府部门的财政压力;而在农业用地较少生态环境较好的地区,河岸缓冲带的设置相较于退耕还林会在短期内产生更大的收益;而对于需要重点保护和治理的特定生态服务功能区,综合治理是解决并彻底改善提高当地生态系统服务功能的关键手段。

3.4 不确定性分析

影响生态系统服务功能和价值估算准确性和真实性的因素有很多,包括 InVEST 模型结构拟合误差以及 InVEST 模型输入数据的误差,如年均降水分布、年均蒸散发分布等气象数据是根据 IDW 插值估算,并不能反应每一个子流域的真实情况;本研究基于 1 km 的土地利用图像,利用 2005 年校准模型的参数对 2015 年的情况以及四种情景进行模拟,可能会有较大的误差,InVEST 模型虽不能很好的反映各生态服务功能的绝对值,但可以很好的揭示各情景间的变化^[39]。

生态服务价值核算的研究内容聚焦在水源涵养、水质净化、土壤流失三个方面,没有考虑防风固沙、固碳、减缓气候变化等的影响,也没有量化生态修复措施实施过程中对其他生态服务功能的影响,例如,在退耕还林情景下,农业生产价值将会减少;河岸缓冲带的修建初期河道中泥沙可能有暂时性的升高以及缓冲带修好后对作为景观对周边地块价值的提升;化肥减量后农作物产量变化等也需要进一步核算。这可以在未来的研究过程中,通过对 InVEST 模型模块的完善来进行更细致的探讨。

4 结论

本研究以 2015 年潮河流域土地利用和社会经济现状为基准情景,设置了化肥减量、河岸缓冲带、退耕还林和综合修复四种情景,利用 InVEST 模型对生态系统服务功能进行模拟,采用直接市场法和替代市场法等

价值评价方法对潮河流域在四种不同生态修复情景下的水源涵养、土壤保持、水质净化能力及其生态价值进行了量化分析。

(1) 四种生态修复情景均有效的提高了流域的生态服务价值,在综合修复的情景下,水源涵养量提高了 40.18%,TN、TP 的排放分别减少了 42.32%和 53.89%,同时土壤流失量降低了 63.76%。

(2) 单独实施化肥农药减量的措施,不能明显减少 TN、TP 排放造成的面源污染,面源污染的防治需要对流域进行综合、全面的修复。

(3) 化肥减量、河岸缓冲带、退耕还林以及综合修复四种情景的生态系统服务价值分别较 2015 实际情况增加了 3.54×10^6 、 3.64×10^7 、 4.59×10^7 和 7.73×10^7 元。

参考文献(References):

- [1] Loomes R, O'Neill K. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 2000, 6(3): 274-274.
- [2] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [4] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [5] 岑晓腾. 土地利用景观格局与生态系统服务价值的关联分析及优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [6] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. *资源科学*, 2001, 23(6): 2-9.
- [7] Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S. and Turner, R.K., 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 2014, 26: 152-158.
- [8] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [9] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2403-2409.
- [10] Keller A A, Fournier E, Fox J. Minimizing impacts of land use change on ecosystem services using multi-criteria heuristic analysis. *Journal of Environmental Management*, 2015, 156: 23-30.
- [11] 吴瑞,刘桂环,文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 406-414.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2017.
- [13] 秦丽欢,曾庆慧,李叙勇,程鹏. 密云水库沉积物磷形态分布特征. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 774-781.
- [14] 张敏,李令军,赵文慧,许金浩,赵文吉. 密云水库上游河流水质空间异质性及其成因分析. *环境科学学报*, 2019, 39(6): 1852-1859.
- [15] 钢迪嘎,齐维晓,刘会娟,曲久辉. 南水北调对密云水库水位变幅带土壤磷释放量的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3813-3822.
- [16] 王曼玉,蔡茂茂,李春征,张志强. 气候变化和人类活动对基流的影响——以密云水库上游潮河流域为例. *中国水土保持科学*, 2018, 16(6): 15-23.
- [17] 刘佳凯,张振明,鄢郭馨,余新晓. 潮白河流域径流对降雨的多尺度响应. *中国水土保持科学*, 2016, 14(4): 50-59.
- [18] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [19] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, Lockaby B G. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [20] 刘晓娜,裴厦,陈龙,刘春兰. 基于 InVEST 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 168-176.
- [21] 耿润哲,王晓燕,庞树江,殷培红. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1258-1267.
- [22] Gao J, Li F, Gao H, Zhou C B, Zhang X L. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 148-155.
- [23] 孙东耀,全川,纪钦阳,谭立山,张玉珍,卓桂华,张健,林啸. 不同类型植被河岸缓冲带对模拟径流及总磷的消减研究. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2393-2399.
- [24] 李维. 北京山区典型流域森林植被多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [25] 亢志华,刘华周. 基于成本-收益分析法的太湖氮磷污染物去除生态补偿. *江苏农业学报*, 2015, 31(4): 942-945.
- [26] Karnieli A, Ben-Asher J. A daily runoff simulation in semi-arid watersheds based on soil water deficit calculations. *Journal of Hydrology*, 1993, 149: 9-25.
- [27] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. *应用生态学*

- 报, 2000, 11(4): 481-484.
- [28] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科, 韩艺师. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估. 生态学报, 2000, 20(4): 552-558.
- [29] 王劲修. 山西沁河源头河岸带生态评价及重建补偿研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [30] 王铮钰, 陈昱成, 赵伊凡, 张芳芳. 黄土高原区退耕还林生态补偿标准研究. 绿色科技, 2018, (16): 283-287.
- [31] 杜伟. 长三角地区典型稻作流域农田氮平衡及氮负荷研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [32] 冯晓娜, 张刚, 王咏. 农业面源污染防治措施进展研究. 环境科学与管理, 2017, 42(8): 89-93.
- [33] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [34] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, Liu Y, Qiao J M, Wang X, Du J S. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [35] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 金志丰, 周寅康. 近 15a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2453-2462.
- [36] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
- [37] 何莎莎. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域水土流失研究[D]. 郑州: 河南大学, 2018.
- [38] 梁占岐, 李锦荣, 郭建英, 邢恩德, 刘艳萍, 珊丹, 侯雪彤. 退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响——以安塞县为例. 水土保持研究, 2016, 23(3): 77-81.
- [39] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1418-1426.