

DOI: 10.5846/stxb202207101963

刘灿均, 门宝辉, 申耀铎, 庞金凤. 滦河流域土壤保持和水质净化服务及其权衡与协同关系. 生态学报, 2023, 43(14): 5740-5752.

Liu C J, Men B H, Shen Y D, Pang J F. Soil conservation and water purification services and their trade-offs and synergies in Luanhe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5740-5752.

滦河流域土壤保持和水质净化服务及其权衡与协同关系

刘灿均, 门宝辉*, 申耀铎, 庞金凤

华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206

摘要: 滦河流域是京津冀地区重要的生态屏障和水源涵养区, 但流域内仍存在水土流失、河流水质不达标等问题。基于实测资料及 loadest 模型等工具率定 InVEST 模型参数, 定量评估了滦河流域各生态区 2005、2010 和 2015 年土壤保持和水质净化服务及其时空变化特征, 采用相关分析和基于网格的 Moran'*I* 指数分析了两项服务的作用机理和权衡与协同关系的时空分异, 并探讨了气候和土地利用变化对二者的影响。结果表明: 2005 年、2010 年、2015 年滦河流域年均土壤保持强度为 136.45 t/hm², 时间上呈现出先强后微减的特点, 空间格局表现为由西北向东南增加; 流域总氮(TN)、总磷(TP)年均输出量分别为 1526.73 t/a 和 82.89 t/a, 输出量逐年增加且集中在流域中下游, 流域整体水质净化能力有所减弱。流域内水体中 TN、TP 浓度与泥沙入河量具有显著相关性, 土壤保持和水质净化服务关系整体上由协同向权衡转变, 空间上的差异性表现为林地、草地集中区域(生态区 A)多以协同关系为主, 而农牧带交错地区(生态区 B)多以权衡关系为主。建议未来滦河流域开展生态建设和管理工作时应统筹考虑土壤保持和水质净化服务, 因地制宜协调二者关系, 通过增强流域水土保持功能带动水质净化服务的提升, 并优化土地利用布局, 促进流域的生态环境高质量发展。

关键词: 土壤保持服务; 水质净化服务; 滦河流域; 权衡与协同关系; 土地利用

Soil conservation and water purification services and their trade-offs and synergies in Luanhe River Basin

LIU Canjun, MEN Baohui*, SHEN Yaoduo, PANG Jinfeng

College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract: The Luan River Basin is an essentially ecological barrier and water conservation area in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Notwithstanding, there are still problems concerning soil erosion and substandard river water quality in the basin. On the basis of the measured data, the parameters of the InVEST model were calibrated to quantitatively evaluate the soil conservation and water purification services and their temporal and spatial variation characteristics in each ecological region of the Luan River Basin in 2005, 2010 and 2015, respectively. Correlation analysis and Moran'*I* index were employed to examine the mechanism of action and relationship of trade-offs and synergies between the two services. Meanwhile, we discussed how the two services would be affected by changes in land use and climate. The results demonstrated that the annually average soil conservation intensity of the Luanhe River Basin in 2005, 2010 and 2015 was 136.45 t/hm², displaying the characteristics of first strengthening and then decreasing slightly. Notably, the spatial distribution pattern showed an increase from northwest to southeast. The averagely annual output of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the basin was 1526.73 t and 82.89 t, respectively. The lower and middle portions of the basin produced the

基金项目: 全球环境基金(GEF)水资源与水环境综合管理主流化项目(1-2, 2-6)

收稿日期: 2022-07-10; 网络出版日期: 2023-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: menbh@ncepu.edu.cn

majority of the output, which grew yearly. Additionally, the overall water purification capacity of the basin was weakened. There was a significant connection between the concentration of TN and TP in the water body in the basin and the amount of sediment that entered the river. The relationship between soil conservation and water purification services has changed from synergy to trade-off as a whole. The spatial difference lies in the fact that woodland and grassland concentrated areas are overwhelmingly based on synergy, whereas the agricultural and pastoral belt areas are predominately based on trade-off relationships.

Key Words: soil conservation services; water purification service; Luanhe River Basin; tradeoffs and synergies; land use

滦河流域是我国北方城市群重要的生态屏障,也是京津冀地区的重要水源涵养区,流域内不仅有著名的塞罕坝林海有效阻挡了北方沙地风沙的南侵,还建设有引滦入津工程,极大缓解了天津等地用水紧张状况,促进了京津唐地区社会、经济、生态的发展。然而,流域内也存在诸多生态环境问题,其坝上地区生态环境脆弱,沙土化严重,中部土石山地丘陵地区人口集中,坡耕地广布,水土流失问题突出,且河流含沙量较高,河流水环境一度受到污染^[1-2]。近年来,随着一系列水土保持和水污染治理项目的实施,流域内水土流失及水环境治理取得了一定成效,在京津冀一体化背景下,流域生态环境发展与保护也面临新的挑战。

生态系统服务是人类通过生态系统直接或间接获取的各种产品和效益,普遍分为供给、调节、支持及文化服务四种类型^[3-4]。其中,土壤保持和水质净化服务是两项重要的调节服务^[5],前者指生态系统对土壤流失的侵蚀调控作用和对泥沙的储积保持能力,后者则表征区域下垫面对于水污染物的净化截留能力^[6-7],研究显示,区域对于氮、磷营养物的净化作用与其土壤保持功能息息相关^[8-9]。鉴于滦河流域的重要生态作用和其突出的生态环境问题,土壤保持和水质净化服务是该区域生态系统服务研究的重点。然而,目前滦河流域两项生态系统服务的变化规律和相互关系还不清晰,相关研究多以张承地区和京津冀地区为研究对象。许丁雪等^[10]对张承地区水源涵养和土壤保持服务进行了评估,并具体分析了土地利用变化对两项服务的影响;王盛等^[11]在此基础上进一步分析了该地区两项服务的权衡与协同关系,并讨论了气候和土地利用变化情景下的水源涵养和土壤保持服务的响应;此外,潘梅等^[12]评估了京津冀地区防风固沙、水源涵养和土壤保持服务,并分析了气候和生态工程等因素对三项服务的影响。水质净化方面,吴瑞等^[13]评估分析了官厅水库流域的水质净化服务及其时空变化;宁立新等^[14]模拟了京津冀地区包括水质净化在内的多项生态系统服务功能,并据此评估了京津冀地区的生态系统健康状况;李晓素^[15]评估了京津冀地区各流域的水质净化服务及其驱动因素。在生态系统服务评估工具方面,诸多评估模型被相继开发与应用^[16-18],其中,InVEST模型因其具有空间可视化和多模块评估的特点而被广泛应用于定量评估研究区域内各项生态系统服务^[19-23]。

综上,已有研究和成果针对滦河流域的土壤保持和水质净化服务还未深入;另外,在已有水质净化服务的研究中,基于InVEST模型的模拟结果往往未能与河流实际水质进行对比;而在生态系统服务的权衡与协同关系分析中,缺乏局部区域空间内部年际变化的描述。因此,结合实测资料开展滦河流域土壤保持和水质净化服务评估,探究流域内两项服务相互关系的时空变化并分析两项服务的影响因素具有重要的科学和现实意义。本研究以滦河流域(潘家口水库以上)为研究区域,采用InVEST模型定量评估流域内不同生态区在2005年、2010年、2015年土壤保持和水质净化服务,并结合实测流量、水质和泥沙资料,计算滦河干流断面输沙量和总氮(TN)、总磷(TP)年通量,用以验证模拟结果。在此基础上,基于网格尺度分析了滦河流域土壤保持和水质净化服务的权衡与协同关系及其时空变化特征,并讨论了气候和土地利用变化对两项生态系统服务的影响,对做好滦河流域水土保持及源区水质保护工作,更好构建京津冀生态屏障具有重要意义,也能为京津冀地区未来开展生态系统监测、评估和管理等工作提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滦河流域(潘家口水库以上)位于河北省东北部,毗邻北京市、内蒙古自治区、辽宁省,流域面积约35000

km²。流域地势起伏,山地、丘陵广泛分布,海拔由西北向东南递减(图 1)。流域地处温带大陆性季风气候区,夏季降水集中,冬季干燥而寒冷。流域内河流众多,其中,滦河干流发源于承德市丰宁县西北部的巴彦图古尔山,至潘家口水库的河段全长 620 km,沿途接纳众多支流,主要包括兴洲河、伊逊河、武烈河、柳河、瀑河等,水资源较为丰富。

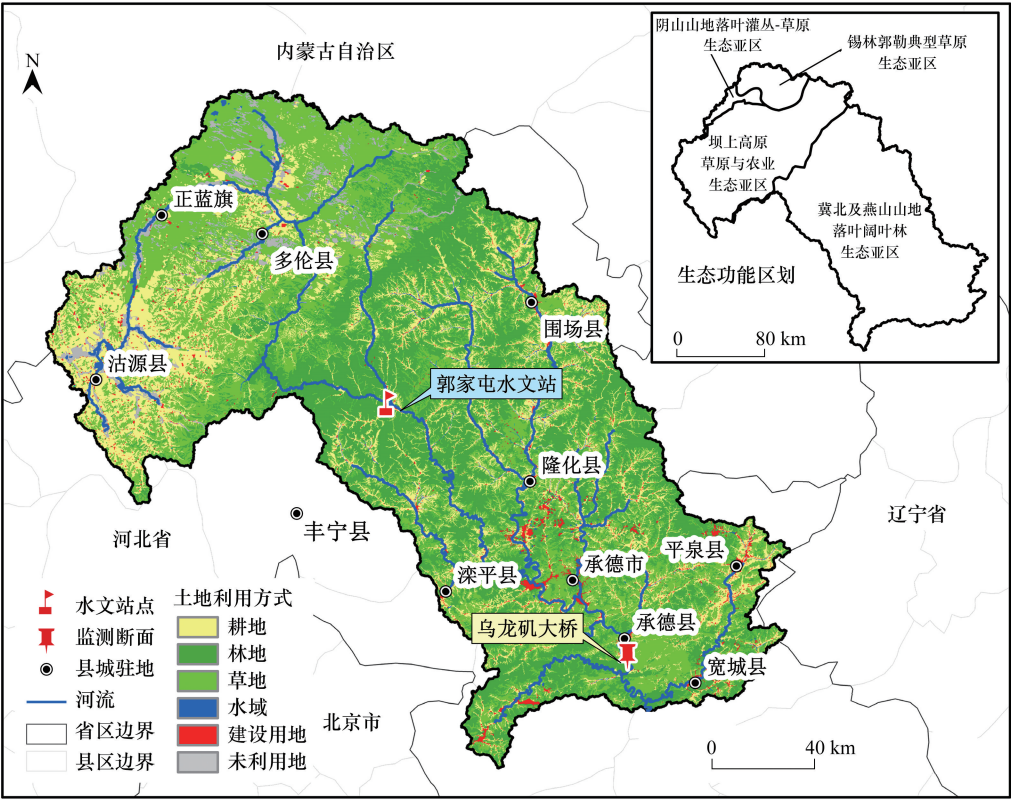


图 1 滦河流域地理位置及生态分区图
Fig.1 Location and ecological zone in Luanhe river basin

按照中国生态功能区划数据库(www.ecosystem.csdb.cn/ecoass)的划分方式,滦河流域被划分为 2 个生态区和 4 个生态亚区(表 1)。其中,生态区 A 属于内蒙古高原地带,海拔较高,水资源相对缺乏,且农牧业交错,水土流失严重;生态区 B 以山地丘陵为主,水系发育,水资源较为充沛,城市和农田分布集中,河流含沙量高,水体氮磷物质浓度较高。

表 1 滦河流域生态区及生态亚区

生态区 Ecological areas	生态亚区 Ecological subregions
内蒙古高原中东部典型草原生态区(A) Typical grassland ecological area in the central and eastern Inner Mongolia Plateau	阴山山地落叶灌丛-草原生态亚区(A ₁) 锡林郭勒典型草原生态亚区(A ₂) 坝上高原草原与农业生态亚区(A ₃)
燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区(B) Yanshan-Taihang Mountains Deciduous Broad-leaved Forest Ecological Zone	冀北及燕山山地落叶阔叶林生态亚区(B ₁)

1.2 数据收集与处理

本研究所使用数据包括:(1)2005 年、2010 年、2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn),精度为 30 m×30 m,并将土地利用类型重分类后简化为耕地、林地、草地、水域、建设

用地、未利用地六类;(2)数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn),精度为 30 m×30 m;(3)1999—2018 年降水数据为滦河流域及周边 14 个气象站点的逐日实测数据,通过统计年降水量并进行空间插值得到流域面降水量(年尺度),精度为 30 m×30 m;(4)土壤数据从世界土壤数据库(HWSD)中国特征土壤数据集(geodata.pku.edu.cn)提取滦河流域部分,并提取流域内各类型土壤沙含量、淤泥含量、粘土含量及有机碳含量用于土壤侵蚀因子计算,精度为 30 m×30 m;(5)滦河流域边界及子流域划分通过对研究区进行水文分析得到。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型泥沙输送模块(SDR)

使用 InVEST 模型泥沙输送模块(SDR)模拟并评估滦河流域土壤保持服务。InVEST 模型 SDR 模块是一个基于栅格计算的空间显式模型,该模型基于修正通用土壤流失方程计算栅格年土壤侵蚀量及输沙率,进而模拟流域土壤侵蚀及泥沙传输过程。模型的主要计算式如下:

$$S_x = S_{\text{RKSL},x} - S_{\text{USLE},x} + S_{R,x} \quad (1)$$

$$S_{\text{RKSL},x} = R_x \times K_x \times LS_x \quad (2)$$

$$S_{\text{USLE},x} = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (3)$$

$$S_{R,x} = (1 - \text{SDR}_x) \sum_{y=1}^{x-1} S_{\text{USLE},y} \prod_{z=y+1}^{x-1} \text{SDR}_z \quad (4)$$

$$\text{SDR}_x = \text{SDR}_{\max} \left[1 + \exp\left(\frac{IC_x - IC_0}{k_1}\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

式中, S_x 、 $S_{\text{RKSL},x}$ 、 $S_{\text{USLE},x}$ 、 $S_{R,x}$ 分别表示栅格 x 的土壤保持量(t)、潜在土壤侵蚀量(t)、实际土壤侵蚀量(t)、泥沙持留量(t); R_x 为栅格 x 的降雨侵蚀性因子($\text{MJ mm h}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),采用章文波等^[24]修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型计算,以气象站点日尺度降水量计算半月时段侵蚀力,并汇总得到年尺度降雨侵蚀性因子; K_x 为栅格 x 的土壤可蚀性因子($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),采用 Williams 等^[25]建立的 EPIC 模型结合土壤资料计算得到年尺度数据; LS_x 为坡长坡度因子,由 DEM 数据计算得到; C_x 、 P_x 分别为植被与作物管理因子及水土保持因子,根据海河流域已有研究成果确定^[26]; SDR_x 和 SDR_z 分别表示栅格 x 和上坡栅格 z 的泥沙输送率,栅格 x 的泥沙输送率由栅格的最大泥沙输送率 $\text{SDR}_{\max}$ 、地形指数 IC_x 、 IC_0 以及校正参数 k_1 计算得到。模型输入包括流域 DEM、降雨侵蚀性因子栅格、土壤可蚀性因子栅格、土地利用栅格、子流域边界,生物物理性表(包括 C_x 、 P_x 值)、 $\text{SDR}_{\max}$ 、 IC_0 和校正参数 k_1 。其中,根据 InVEST 模型使用手册设置 $\text{SDR}_{\max} = 0.8$ 、 $IC_0 = 0.5$;为了提高 SDR 模块计算结果的准确性,选取位于子流域出口的水文站,统计水文站上游子流域的泥沙年输出量模拟结果,与水文站实测年输沙量进行比较,以确定模型校正参数 k_1 。

1.3.2 InVEST 模型营养物输送模块(NDR)

使用 InVEST 模型营养物输送模块(NDR)模拟评估滦河流域水质净化服务。该模型采用质量平衡方法,根据每一栅格的土地利用及其养分(TN、TP)负荷率确定养分负荷量,并计算养分输送率得到栅格营养物入河量,进而模拟区域营养物质的长期稳定流动。其中,养分负荷可以分为与沉积物结合部分和溶解部分,分别通过地表径流和地下径流输送,由于缺乏两种输送类型的划分信息,研究默认养分都通过地表径流到达河流。模型的主要计算公式如下:

$$X_{\text{exptot}} = \sum_i X_{\text{exp},i} \quad (6)$$

$$X_{\text{exp},i} = \text{load}_{\text{surf},i} \times \text{NDR}_{\text{surf},i} \quad (7)$$

$$\text{NDR}_{\text{surf},i} = \text{NDR}_{0,i} \left[1 + \exp\left(\frac{IC_i - IC_0}{k_2}\right) \right]^{-1} \quad (8)$$

式中, X_{exptot} 表示流域氮磷养分输出总量(kg/a); $X_{\text{exp},i}$ 表示栅格 i 的氮磷养分输出量(kg/a); $\text{load}_{\text{surf},i}$ 表示栅格 i 的地表氮磷养分负荷量(kg/a),由土地利用养分负荷平均值并考虑当地径流潜力指数校正得到; $\text{NDR}_{\text{surf},i}$ 表

示栅格 i 的地表氮磷养分输送效率,由栅格 i 与河流之间的养分最大持留率 $NDR_{0,i}$ 、地形指数 IC_i 、 IC_0 以及校正参数 k_2 计算得到。其中,当地径流潜力指数采用降水量表征;不同土地利用的氮磷污染负荷和氮磷截留率根据已有研究成果确定^[27-28]。模型输入包括流域 DEM、土地利用栅格、年降水量栅格、子流域边界、生物物理性表(包括氮磷污染负荷和氮磷截留率)以及校正参数 k_2 。通过比较子流域 TN、TP 年输出量模拟结果与子流域出口断面 TN、TP 实测年通量来确定校正参数 k_2 。为了减小污染物实测通量计算误差,本研究采用负荷估算模型(loadest)建立断面连续日流量监测数据和有限离散水质监测数据之间的回归方程,并由此计算断面污染物的实测年通量^[29]。同时,NDR 模块仅考虑了面源氮磷养分的输移,因此有必要在 NDR 模拟结果中加入点源的年负荷量估算来调整总负荷输出,以便与实测通量数据进行比较。

1.3.3 权衡与协同关系分析

本研究采用 Pearson 相关分析评估 2015 年滦河子流域产生的泥沙入河量与河流水质之间的相关关系,并采用双变量 Moran' I 指数进一步研究 2005 年、2010 年、2015 年流域土壤保持和水质净化两项生态系统服务的权衡与协同关系及其空间变化特征。Moran' I 指数广泛应用于空间自相关分析,由于同一属性单元的聚集性变化会受到其他属性单元的影响,在单变量 Moran' I 指数基础上拓展出双变量 Moran' I 指数用以分析多变量之间存在的空间聚集差异^[30]。本文中的双变量 Moran' I 指数能够反映流域土壤保持和水质净化服务权衡与协同的整体关系,其计算公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j W_{ij} (x_i - \bar{x}) (y_j - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

式中, I 为双变量全局 Moran' I 指数, W_{ij} 为空间权重, x_i 和 y_i 分别代表要素 i 的土壤保持和水质净化服务指标值, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两项生态系统服务的指标平均值。全局 Moran' I 指数取值范围为 $[-1, 1]$,当 $I > 0$ 时,两项服务整体上表现为协同关系,反之则表现为权衡关系。双变量 Moran' I 指数是对生态系统服务权衡与协同关系的整体描述,要探究其在局部区域的差异性,还需进一步计算流域局部 Moran' I 指数,计算公式如下:

$$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j W_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (10)$$

式中, I_i 为双变量局部 Moran' I 指数。本研究采用 GeoDa 软件计算滦河流域土壤保持和水质净化服务的双变量 Moran' I 指数。

2 结果与分析

2.1 土壤保持服务时空变化模拟

将 2015 年数据输入 SDR 模块并调整校正参数 k_1 ,当其调整为 1.6 时,郭家屯水文站上游子流域泥沙入河总量模拟结果为 48.05 万 t,与 2015 年实测值(46.64 万 t)基本接近,相对误差为 3%,故由此确定 k_1 值。保持 $k_1 = 1.6$,分别输入各年数据模拟得到滦河流域 2005 年、2010 年、2015 年流域土壤保持强度,其空间分布如图 2 所示。从时间变化看,2005 年、2010 年、2015 年流域土壤保持强度分别为 121.94、189.97 和 97.46 t hm⁻² a⁻¹,总体上表现出先强增后微减的变化特点,流域内 A₁、A₃、B₁ 区土壤保持强度变化特点与流域一致,A₂ 区则表现为持续增加。从空间变化看,流域内土壤保持强度由西北向东南增加,各生态亚区年平均土壤保持强度表现为:B₁(206.18 t hm⁻² a⁻¹)>A₃(27.96 t hm⁻² a⁻¹)>A₁(8.27 t hm⁻² a⁻¹)>A₂(7.55 t hm⁻² a⁻¹),A₁、A₂ 区土壤保持强度空间差异较小,A₃ 北部区域土壤保持强度小于南部,而 B₁ 区则呈现出南高北低的特点。

2.2 水质净化服务时空变化模拟

2.2.1 基于 loadest 的 TN、TP 通量计算

基于 2015 年和 2016 年滦河干流郭家屯水文站、乌龙矶大桥监测断面的逐日流量及 TN、TP 浓度的逐月离散数据,采用 loadest 模型对断面污染物通量与流量进行拟合优化,得到郭家屯水文站、乌龙矶大桥断面

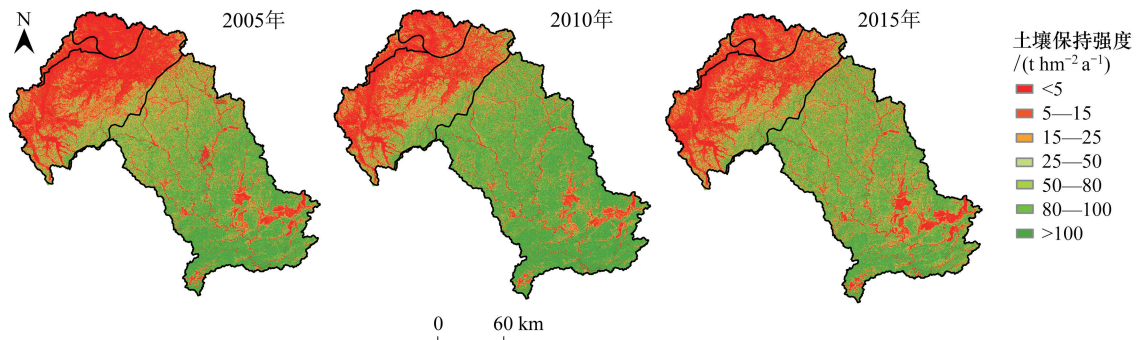


图 2 2005、2010、2015 年滦河流域土壤保持强度分布

Fig.2 Distribution of soil conservation intensity in Luanhe river basin in 2005, 2010 and 2015

TN、TP 通量评估的最佳方程,其相关系数(R^2)、概率曲线相关系数(PPCC)、残差序列相关系数(SCR)均显示拟合效果较优。采用最佳方程计算得到 2015—2016 年郭家屯水文站、乌龙矶大桥断面 TN、TP 日负荷结果与实际观测值如图 3 所示,由图可知,loadest 计算结果与实测值具有较好的一致性。根据实际调查,郭家屯断面上游区域无点源排放;乌龙矶大桥断面上游区域的点源污染主要来自污水处理厂。故采用 loadest 模型的最优拟合方程计算得到 2015 年郭家屯水文站的 TN、TP 年通量分别为 591.88 t/a、34.02 t/a,扣除点源污染后乌龙矶大桥断面在 2015 年的 TN、TP 年通量分别为 1521.76 t/a、69.24 t/a。

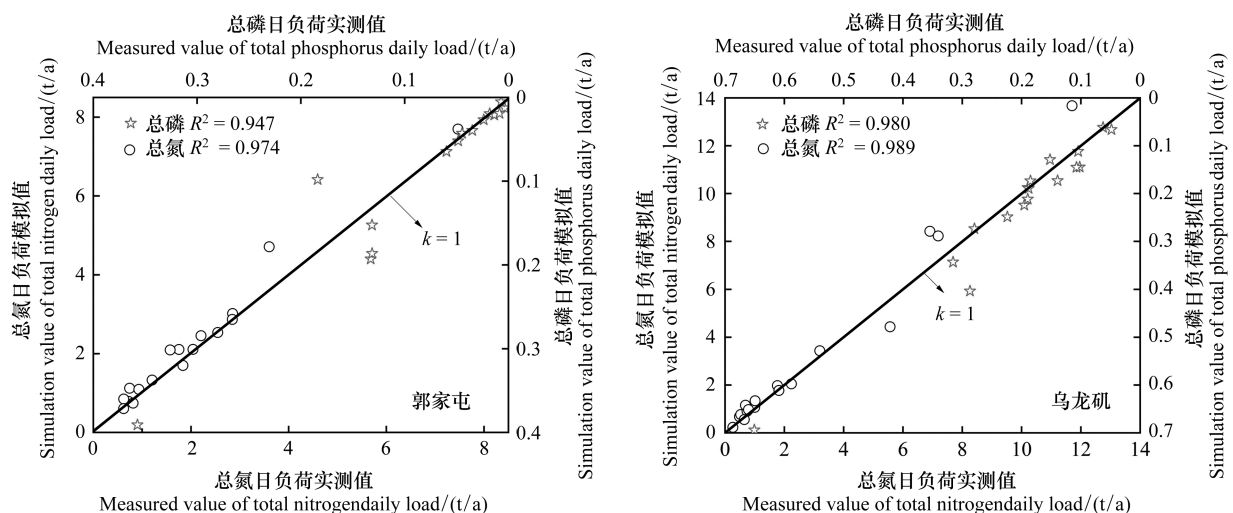


图 3 2015 年郭家屯、乌龙矶大桥断面总氮(TN)、总磷(TP)负荷模拟值与实测值的关系

Fig.3 Relationship between simulated and measured TN and TP load values of sections of Guojiatun and wulongji bridges in 2015

2.2.2 水质净化服务的时空变化分析

基于 2015 年数据运行 NDR 模块并调整校正参数 k_2 。当 $k_2=0.4$ 时模拟结果中郭家屯断面和乌龙矶大桥断面上游子流域 TN 年输出量(分别为 507.25、1461.83 t/a)和 TP 年输出量(分别为 27.06、79.87 t/a)与 loadest 模型评估结果接近,由此确定 k_2 值。保持 $k_2=0.4$,分别输入各年数据模拟得到滦河流域 2005 年、2010 年、2015 年 TN、TP 年输出量如图 4、5 所示。

从时间变化上看,滦河流域 TN、TP 年输出量均值分别为 1526.73 t/a 和 82.89 t/a;子流域最大 TN、TP 输出量均出现在 2015 年,分别为 207.83、12.01 t/a,而最小 TN、TP 年输出量均出现在 2005 年,分别为 0.58、0.028 t/a。从空间变化上看,滦河流域 TN、TP 年输出量分布在 2005、2010、2015 年均呈现出沿河道向外递减

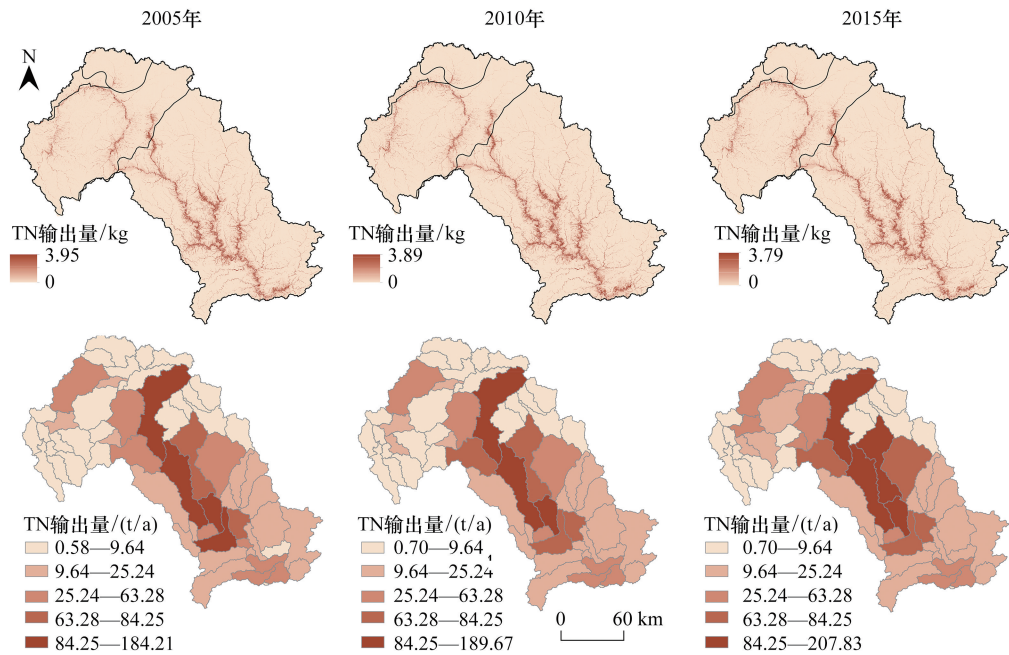


图 4 2005、2010、2015 年滦河流域总氮 (TN) 输出量分布

Fig.4 Distribution of TN output in Luanhe River Basin in 2005, 2010 and 2015

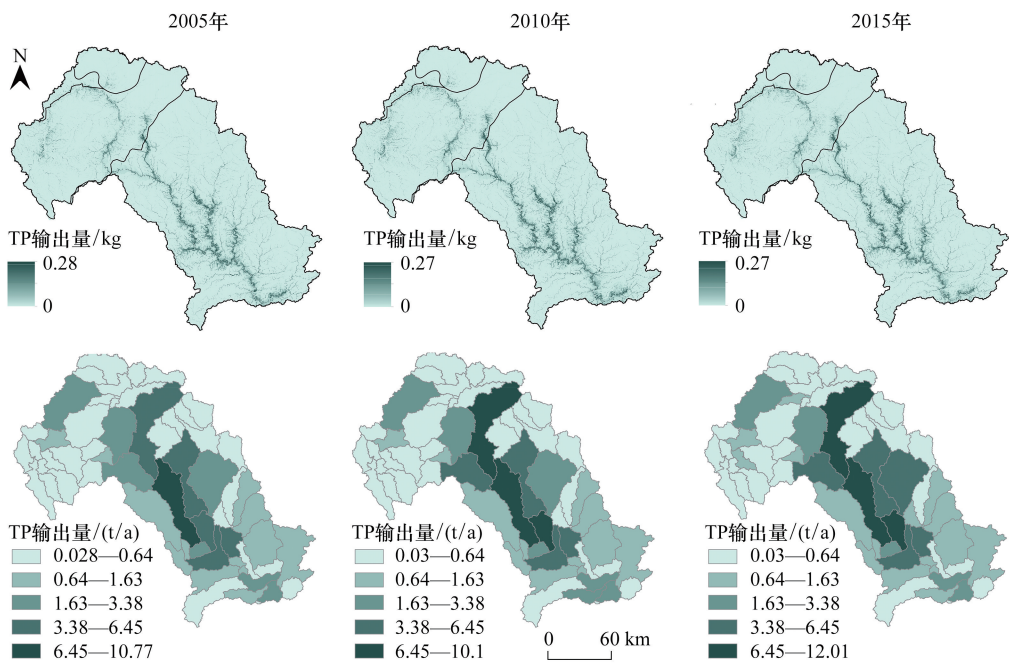


图 5 2005、2010、2015 年滦河流域总磷 (TP) 输出量分布

Fig.5 Distribution of TP output in Luanhe River Basin in 2005, 2010 and 2015

的特点;TN、TP 年输出量较大的子流域均分布在围场县西部、隆化县中部与西部、滦平县东部、承德市等流域中部地区;子流域 TN 年输出量主要分布在 0.58—25.24 t/a 的范围内,TP 年输出量主要分布在 0.028—1.63 t/a 的范围内,其中,TN 年输出量高值(>63.28 t/a)和 TP 年输出量高值(>3.38 t/a)的子流域数量均有所增加。TN、TP 年输出量在各生态亚区的分布均呈现出 $B_1 > A_3 > A_2 > A_1$ 的分布特点,且 B_1 区的 TN、TP 年输出量远大于

其他三个生态亚区,各生态亚区 TN、TP 年输出量见表 2。

表 2 2005、2010、2015 滦河流域生态亚区 TN、TP 输出量

Table 2 Output of TN and TP in the ecological sub-regions of the Luanhe River Basin in 2005, 2010 and 2015

生态亚区 Ecological subregion	2005 年		2010 年		2015 年	
	TN / (t/a)	TP / (t/a)	TN / (t/a)	TP / (t/a)	TN / (t/a)	TP / (t/a)
A ₁	14.00	0.69	17.25	0.82	18.41	0.87
A ₂	12.97	0.55	15.73	0.67	17.07	0.74
A ₃	258.35	13.67	314.03	16.25	337.76	17.55
B ₁	1166.22	65.60	1188.15	64.54	1220.23	66.73

TP:总磷 Total phosphorus;TN:总氮 Total nitrogen

2.3 土壤保持和水质净化服务权衡与协同关系

2.3.1 子流域泥沙入河量与水质指标相关性分析

参与相关分析的水质指标包括总磷 (TP)、总氮 (TN)、溶解氧 (DO)、五日生化需氧量 (BOD₅)、化学需氧量 (COD),这些指标能够基本反映水体的净化能力和水体中有机物、营养物、有毒物的综合状况^[31]。选取位于子流域出口的水质监测断面,取各断面上述水质指标在 2015 年的全年平均值,与断面上游子流域产生的泥沙入河总量组成序列,并进行 Pearson 相关分析,分析结果见表 3。

表 3 2015 年滦河子流域泥沙入河量-水质的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient of Luanhe sub-basins sediment inflow-water quality in 2015

相关系数 Correlation coefficient	TP	TN	DO	BOD ₅	COD
子流域泥沙入河量 The amount of sediment entering the river of sub-basins	0.815 **	0.804 **	-0.802 **	0.426	0.376

*、** 分别表示在 0.05、0.01 级别相关性显著;DO:溶解氧 Dissolved oxygen;BOD₅:五日生化需氧量 Biochemical oxygen demand;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand

由表 3 可知,子流域产生的泥沙入河量与子流域出口的河流水质状况具有一定的相关关系。其中,TN、TP 与泥沙入河量正相关,DO 与泥沙入河量成负相关,且相关性较为显著;而 BOD₅、COD 与泥沙入河量无显著相关性。结合滦河流域实际情况^[32],这一结果反映了流域水土流失与水质状况的内在联系:滦河流域地处温带大陆性季风气候区域,其坝上地区农牧业交错,生态环境脆弱,而中部地区多为土石山地,农田广布,人口密集;在区域自然环境和人为因素的作用下,滦河流域水土流失问题较为严重;水土流失形成的泥沙和地表径流为氮、磷物质的迁移提供了载体和路径,这些污染物质进入水体后,造成了氮磷元素的超标进而导致水体污染^[33—34]。

2.3.2 土壤保持与水质净化服务权衡与协同关系分析

分别将 NDR 模块模拟得到的 2005 年、2010 年、2015 年流域 TN、TP 年负荷量与年输出量做差,计算流域 TN、TP 保持量,并面向滦河流域建立 5 km×5 km 尺度的 1548 个网格单元,提取各网格单元土壤保持量和 TN、TP 保持量,基于网格单元采用 Moran'I 指数研究两项生态系统服务的权衡与协同关系及其时空变化特征,双变量全局 Moran'I 指数的分析结果见表 4。

表 4 滦河流域土壤保持-水质净化服务双变量全局 Moran'I 指数

Table 4 Luanhe river basin soil conservation-water quality purification service bivariate global Moran'I index

全局 Moran'I 指数 Global Moran'I index	2005 年		2010 年		2015 年	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
土壤保持服务 Soil conservation services	0.074	0.093	-0.047	-0.030	-0.113	-0.086

由表 4 可知,流域 TN 和 TP 净化服务与土壤保持服务的关系在研究期间保持一致,2005 年整体上表现为

协同关系,而 2010 年和 2015 年整体表现为权衡关系,且由于 Moran' I 指数均接近于 0,两项服务呈现出的协同与权衡关系整体上较弱,时间变化上看其整体关系由协同向权衡转变。计算双变量局部 Moran' I 指数得到双变量丽萨(Lisa)聚类地图如图 6 所示。其中“低-低聚集”和“高-高聚集”分别表示土壤保持与水质净化服务同增和同减的局部协同关系,而“低-高聚集”和“高-低聚集”分别表示二者此消彼长和此长彼消的局部权衡关系。

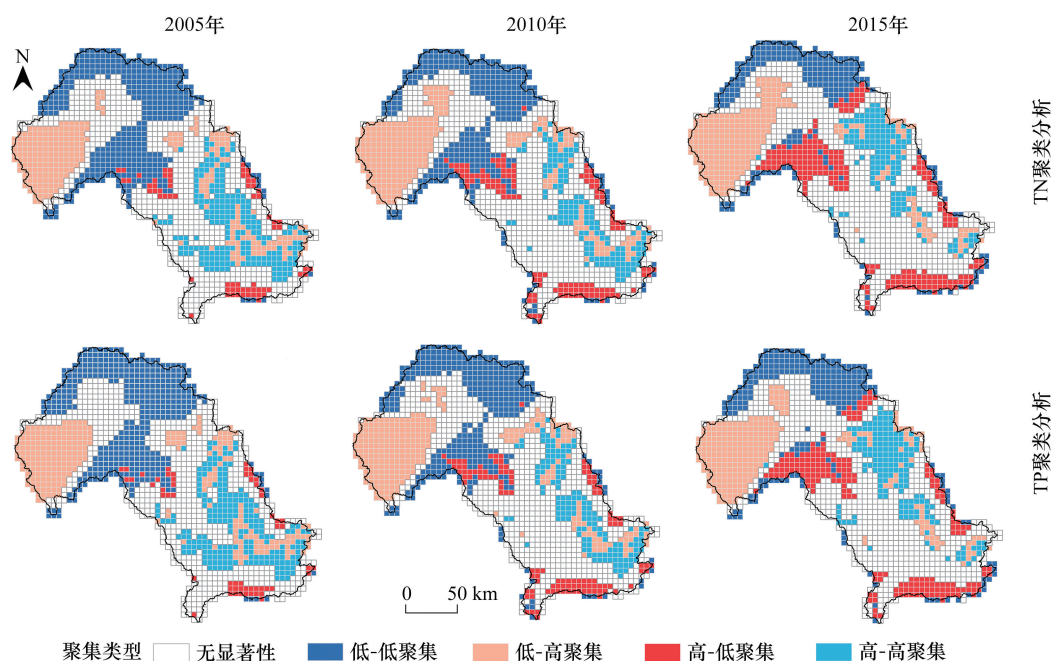


图 6 基于双变量 Moran' I 指数的滦河流域土壤保持-水质净化服务聚类分析

Fig.6 Cluster analysis of soil conservation and water purification services in Luanhe River Basin Based on bivariate Moran' I index

由图 6 可知,流域土壤保持与水质净化服务的权衡与协同关系存在时空分异,且这种时空分异对于土壤保持-水质净化(TN)和土壤保持-水质净化(TP)而言具有相似性。2005 年两项服务表现为“低-低”协同关系的区域主要分布在流域上部边缘和中部海拔较高的山区,而表现为“高-高”协同的区域主要分布在流域中下部海拔较低的平原地带,这些地区的土地利用类型多为林地和草地;表现为“低-高”权衡的区域集中分布在流域上部沽源县以东、多伦县以南、丰宁县以西的地区,该区域土地利用方式以耕地为主,以及零散分布于流域中下部平原地区,而“高-低”权衡的区域则零散分布于流域中部隆化县以西和以东地区,以及流域下部边缘承德县以南地区。随着时间的迁移,到 2010 年流域中下部表现为“高-高”协同的区域面积缩减,而流域中部山区表现的“低-低”协同关系部分转变为“高-低”权衡关系,同时,流域上部表现为“低-高”权衡关系的区域逐渐向东扩张。到 2015 年,表现为“高-高”协同的区域向流域上部转移,而表现为“低-高”权衡和“高-低”权衡的区域进一步扩张。总体而言,流域土壤保持与水质净化服务表现为权衡关系的区域面积占比逐年增加(分别为 21.7%、26.7%、31.75%),而表现为协同关系的区域面积占比逐年减少(分别为 39.2%、31.5%、26.4%)。

2.4 土壤保持与水质净化服务影响因素分析

2.4.1 气候变量敏感性实验

气候变化是影响生态系统服务功能的重要因素^[35]。为了探究滦河流域气候变化对土壤保持服务的影响,本研究利用 2010 年土地利用数据并保持模型参数不变,基于 2005—2015 年的平均气候状况对 SDR 模块年降水量分别调整 15% 和 30%,定量评估流域内土壤保持服务的变化情况。各生态亚区土壤保持强度与降水量变化呈线性正相关关系,具体表现为年降水量每增加(减少) 15%,流域土壤保持强度增加(减少) 10.32 t

$\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。由于 NDR 模块模拟结果对整个流域面降水量的线性调整不敏感^[23],利用 2010 年土地利用数据并保持模型参数不变,以 2005—2015 年平均气候状况为基准分别对生态区 A、B 年降水量进行如表 5 所示调整,定量评估生态区 A、B 年降水量差异对流域水质净化服务的影响,调整后流域 TN、TP 保持量变化如表 5 所示。由表可知,流域整体水质净化服务功能对生态区 A、B 年降水量变化有不同响应,流域 TN、TP 的整体净化能力随生态区 A 降水量增加(减少)而增强(减弱),随生态区 B 降水量增加(减少)而减弱(增强);当生态区 A 降水量增加而生态区 B 降水量减少时,流域水质净化功能显著增强,当生态区 A 降水量减少而生态区 B 降水量增加时,流域水质净化功能明显减弱。

表 5 滦河流域生态区 A、B 降雨量调整方式及 TN、TP 保持量变化情况

Table 5 Adjustment methods of precipitation in ecological area A and B and changes of TN and TP retention

生态区 A、B 年降水量调整方式 Adjustment methods of annual precipitation in ecological area A and B		年降水量 Annual precipitation					
		A 区不变	A 区不变	A 区增加 30%	A 区减少 30%	A 区增加 30%	A 区减少 30%
		B 区增加 30%	B 区减少 30%	B 区不变	B 区不变	B 区减少 30%	B 区增加 30%
流域氮磷保持量变化	TN	-0.87%	2.67%	2.21%	-1.45%	3.15%	-3.04%
Changes of TN and TP retention in watershed	TP	-0.81%	2.51%	2.13%	-1.38%	2.94%	-2.93%

2.4.2 土地利用变化及其影响

土地利用变化是影响流域土壤保持和水质净化服务的另一重要因素^[36—37]。2005—2015 年间,滦河流域土地利用变化显著(图 7):(1)建设用地逐步扩张,以流域下部承德市区及周边区域扩张最为显著;(2)草地面积显著增加,面积转换剧烈,增加面积主要分布在流域下部承德县以南、流域中部的隆化县以及流域上部的多伦县、围场县以北地区;(3)耕地和林地显著减少,主要转出为草地和建设用地。

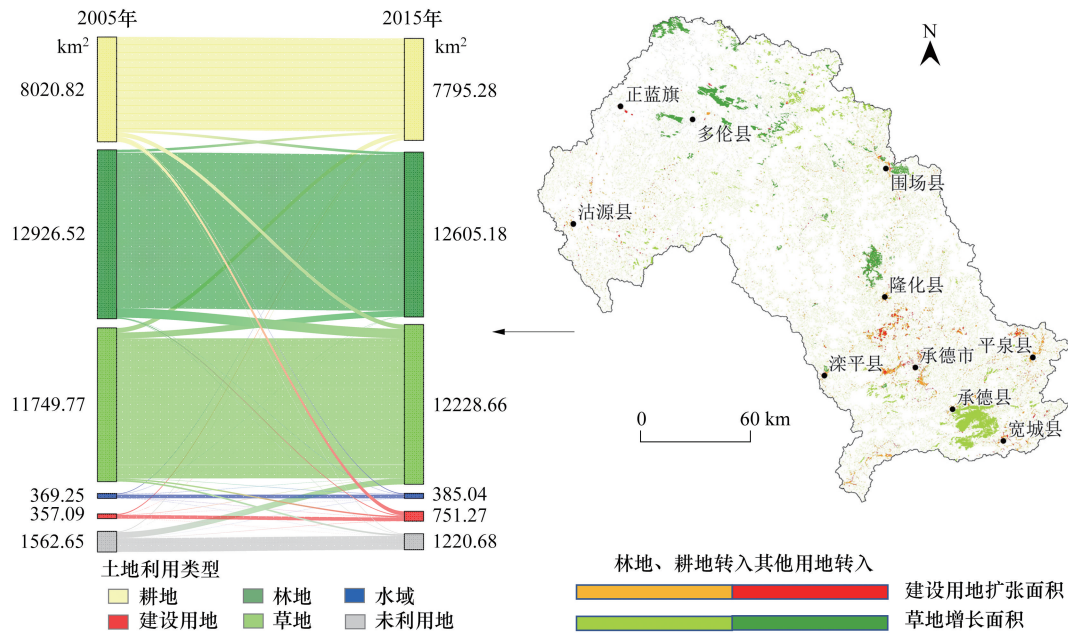


图 7 2005—2015 年滦河流域土地利用转换

Fig.7 Land use transformation in Luanhe River Basin from 2005 to 2015

保持气候条件(2005—2015 年平均降雨量)及模型参数不变,基于 2005 年、2010 年、2015 年土地利用状况探究土地利用变化对流域土壤保持和水质净化服务的影响。不同土地利用类型的土壤保持强度和 TN、TP 保持量见表 6。土地利用方式对土壤保持和水质净化服务作用明显,其中,各土地利用类型的土壤保持能力

顺序为:林地>草地>耕地>建设用地>未利用地,而 TN、TP 净化能力顺序为:耕地>草地>林地>建设用地>未利用地。在土地利用类型转换过程中,耕地和林地转出为草地和建设用地一定程度上引起了耕地 TN、TP 净化能力和林地的土壤保持能力的减弱,而草地和建设用地的土壤保持与 TN、TP 净化能力有所提高。

表 6 不同土地利用类型的土壤保持强度和 TN、TP 保持量
Table 6 Soil conservation intensity and TN, TP retention of different land use types

土地利用 Land uses	土壤保持强度/(t hm ⁻² a ⁻¹) Soil conservation intensity			TN 保持量/(×10 ² t) TN retention			TP 保持量/(×10 ² t) TP retention		
	2005 年	2010 年	2015 年	2005 年	2010 年	2015 年	2005 年	2010 年	2015 年
耕地 Farmland	80.29	80.09	80.51	222.74	217.33	216.06	15.73	15.35	14.95
林地 Woodland	243.45	233.01	233.16	33.14	32.16	32.11	2.00	1.95	2.09
草地 Grassland	117.22	128.89	128.13	65.94	68.93	69.04	3.73	3.90	4.08
建设用地 Construction land	51.58	84.36	89.46	7.58	15.57	16.41	0.35	0.71	0.76
未利用地 Unused land	1.13	0.39	0.45	13.83	10.46	10.43	0.25	0.19	0.20

3 讨论与结论

3.1 讨论

通过与已有研究成果进行对比,验证本次研究结果的可靠性。土壤保持方面,本次研究得到的滦河流域 2005 年、2010 年、2015 年土壤保持强度分布特点与张承地区的有关研究成果^[11]整体一致,但本研所得不同生态区的土壤保持强度相对偏低;水质净化方面,由于缺乏滦河流域水质净化功能评估的有关研究,仅与 2015 年海河流域的相关成果^[38]进行了比较,本研所得滦河子流域 TN、TP 输出分布特征与海河流域成果相似,而 TN 输出量略大于海河流域研究成果。产生上述差异的原因包括:(1)本研究与相关研究的空间边界有所不同;(2)模型参数如污染负荷输出系数、校正参数等的确定存在差异;(3)研究采用的数据来源如土地利用、降水量数据等有所不同;(4)采用的空间分辨率不同,本研究具有较高空间分辨率(30 m×30 m)。

本研究在定量评估滦河流域土壤保持和水质净化服务的基础上分析了两项服务的权衡与协同关系,流域两项服务之间整体上从协同向权衡关系转变。在流域各生态分区内,两项服务的空间关系呈现出显著异质性。生态区 B 土壤保持和水质净化服务的关系以协同为主,但权衡关系面积逐年增加。该生态区在研究期间降水量稳定而土地利用转换剧烈,区域中部和北部地区植被覆盖良好,能够稳固土壤,减少土壤侵蚀,还能拦截储积大量泥沙和其中的氮、磷物质,增强水质净化作用;而南部地区的氮磷负荷随耕地及城镇的扩张逐步增加,水质净化服务并不理想。生态区 A 中,A₁和 A₂区受人类活动影响较小且气候稳定,两项服务以协同关系为主。A₃区地处坝上高原,土地利用变化微小而气候变化显著,近年来该区域降水强度增加产生过量溅蚀和冲刷作用^[11],导致土壤保持功能有所下降,而降水量的增加一定程度上提高了 A₃区域水质净化功能,区域两项服务的权衡关系面积最大且逐年扩张。总体而言,生态区 B 两项服务关系主要受土地利用变化的影响,而气候变化是生态区 A 两项服务关系的主要作用因素。二者的关系也是生态系统内部各种服务之间相互作用的结果,在未来需定量评估其他各项生态系统服务及其驱动机制,才能进一步探究各项服务之间的深层关系,并分区制定生态保护及服务功能提升策略。

本次研究结果也存在一些不确定性。由于缺乏 2005 年和 2010 年滦河水质、泥沙数据,研究仅用 2015 年实测水质及泥沙资料确定了模型校正参数 k_1 和 k_2 ,这势必会影响两项生态系统服务功能的评估。校正参数 k_1 和 k_2 分别反映了河流网络水力连通性与 SDR 和 NDR 之间的关系,这种关系取决于流域下垫面条件^[23]。研究期间滦河流域下垫面发生了显著变化,各年份之间校正参数存在差异性,采用 2015 年率定的参数模拟 2005 年和 2010 年情况可能会导致模拟结果与实际情况产生一定误差。因此,进一步获取更加详实的水质与泥沙统计数据,针对各评估年份实际情况校正模型参数并开展生态系统服务功能评估,是今后研究工作完善和提升的重要方面。

3.2 结论

(1) 2005 年、2010 年、2015 年滦河流域年均土壤保持强度分别为 121.94、189.97、97.46 t hm⁻² a⁻¹; 土壤保持强度年际变化呈现出先强增后微减的特点, 空间上表现为由西北(坝上地区)向东南(冀北及燕山山地)增加的分布格局。流域 TN、TP 年输出量均值分别为 1526.73 t/a 和 82.89 t/a, 输出量逐年增加且集中在流域中下部, 流域整体水质净化能力有所减弱。

(2) 河流水体的 TN、TP 浓度与泥沙入河量具有显著相关性; 土壤保持和水质净化服务总体上由协同关系向权衡关系转变, 且空间分布存在差异性, 生态区 B 受土地利用方式影响主要表现为协同关系, 而生态区 A (农牧带交错地带) 受到气候变化影响主要表现为权衡关系。

(3) 滦河流域水土流失与河流水质状况具有紧密的内在联系, 气候和土地利用变化是影响流域土壤保持和水质净化的重要因素, 在未来开展流域生态规划和管理时, 应分析生态系统服务之间的作用机理, 综合考虑生态系统服务的影响因素, 协调流域内土壤保持和水质净化服务的权衡与协同关系, 促进流域内生态系统服务的效益最优。

参考文献 (References):

- [1] 门宝辉, 牛晓赞, 刘灿均, 陈静, 刘晶晶. 滦河承德段水环境容量计算及初始分配. 水资源保护, 2022, 38(2): 168-175, 189.
- [2] 林田野. 基于滦河流域水环境治理与保护的思考. 水资源开发与管理, 2020, 18(1): 14-17.
- [3] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [4] Valencia Torres A, Tiwari C, Atkinson S F. Progress in ecosystem services research: a Guide for scholars and practitioners. Ecosystem Services, 2021, 49: 101267.
- [5] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 260-272.
- [6] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望. 生态学报, 2019, 39(2): 432-440.
- [7] Terrado M, Acuña V, Ennaanay D, Tallis H, Sabater S. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean Basin. Ecological Indicators, 2014, 37: 199-209.
- [8] 张晓艳, 李琴书. 不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响. 水土保持研究, 2018, 25(5): 12-17.
- [9] Yan R H, Gao J F. Key factors affecting discharge, soil erosion, nitrogen and phosphorus exports from agricultural polder. Ecological Modelling, 2021, 452: 109586.
- [10] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 刘海江, 江源. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [11] 王盛, 李亚文, 李庆, 胡世雄, 王金凤, 李文静. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究. 生态学报, 2022, 42(13): 5391-5403.
- [12] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 曹巍. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(15): 5151-5167.
- [13] 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.
- [14] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化. 生态科学, 2021, 40(6): 1-12.
- [15] 李素晓. 京津冀生态系统服务演变规律与驱动因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [16] Sherrouse B C, Semmens D J, Ancona Z H. Social Values for Ecosystem Services (SolVES): open-source spatial modeling of cultural services. Environmental Modelling & Software, 2022, 148: 105259.
- [17] Martínez-López J, Bagstad K J, Balbi S, Magrath A, Voigt B, Athanasiadis I, Pascual M, Willcock S, Villa F. Towards globally customizable ecosystem service models. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2325-2336.
- [18] 刘景红, 郑晓, 樊俊美, 赵澜林. 基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3905-3912.
- [19] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 毕如田, 夏露, 郭岩松, 王煜, 许彩彩, 孙波. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展. 生态科学, 2022, 41(1): 237-242.
- [20] 刘有延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [21] 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 韩国栋, 孙建. 基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析. 草地学报, 2021, 29(S1): 43-51.
- [22] 廖雯, 胡砚霞, 于兴修, 刘璇璇. 丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素. 水土保持通报, 2021, 41(6): 288-294, 376.

- [23] Redhead J W, May L, Oliver T H, Hamel P, Sharp R, Bullock J M. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 666-677.
- [24] 章文波. 北方农牧交错带降雨侵蚀力的时空分布. *自然科学进展*, 2003, 13(6): 651-654.
- [25] Williams J, Renard K, Dyke P. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38: 381-383.
- [26] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [27] 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 265-272.
- [28] 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.
- [29] 李娜, 盛虎, 何成杰, 郭怀成. 基于统计模型 LOADEST 的宝象河污染物通量估算. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 355-366.
- [30] 韦钧培, 杨云川, 谢鑫昌, 廖丽萍, 田忆, 周津羽. 基于服务簇的南宁市生态系统服务权衡与协同关系研究. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(1): 21-31.
- [31] 张远, 林佳宁, 王慧, 郭昌胜, 丁森, 贾晓波, 霍守亮, 徐建, 刘琰, 王海燕, 吴丰昌. 中国地表水环境质量标准研究. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2523-2528.
- [32] 石先闯, 代凤梅, 沈阳. 承德市京津冀水源涵养功能区建设成效及对策. *中国水土保持*, 2020(10): 45-47.
- [33] 余进祥, 郑博福, 刘娅菲, 刘成林. 鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估. *生态学报*, 2011, 31(14): 3980-3989.
- [34] 范晓娟, 张丽萍, 邓龙洲, 邬燕虹, 孙天宇, 费凯. 侵蚀程度差异诱发的坡面产流-产沙-总磷流失特征. *环境科学学报*, 2019, 39(2): 459-468.
- [35] 张宇硕, 吴殿廷. 京津冀地区生态系统服务权衡的多尺度特征与影响因素解析. *地域研究与开发*, 2019, 38(3): 141-147.
- [36] 陈泽怡, 余珮珩, 陈奕云, 江颂, 白少云, 顾世祥. 共享社会经济路径下汉江流域产水和水质净化服务时空演变. *中国生态农业学报: 中英文*, 2021, 29(10): 1800-1814.
- [37] Chen Y T, Li Z B, Li P, Zhang Y X, Liu H L, Pan J J. Impacts and projections of land use and demographic changes on ecosystem services: a case study in the Guanzhong region, China. *Sustainability*, 2022, 14(5): 3003.
- [38] 王道芸. 基于 InVEST 模型的海河流域农业面源污染负荷估算[D]. 抚州: 东华理工大学, 2019.