

农牧交错区生态工程建设对生态系统服务的影响

冀正欣^{*}, 许月卿^{*}, 胡起源, 高翔, 林昕, 宋佳璇, 刘天昊

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学土地利用与管理研究中心, 北京 100193)

摘要: 查明农牧交错区生态工程建设对区域生态系统服务的影响可为生态环境建设和优化管理提供有益参考。该研究以农牧交错区典型县域张北县为例, 综合利用光谱混合分解模型、InVEST 模型和回归分析方法, 基于原始影像的端元分解、土地利用/覆被制图和生态系统服务评估, 从生态用地数量和质量变化两个角度探析生态工程建设对区域生态系统服务的影响。结果表明: 1) 2000—2020 年间, 生态工程建设影响下张北县林地分布范围迅速扩张, 耕地和草地面积持续收缩, 林地扩张与耕地和草地缩减存在一定的空间重合现象。张北县水土保持、水源涵养和防风固沙 3 种服务整体表现为强化趋势, 但具体分布存在明显的空间异质性; 2) 在生态用地数量变化方面, 生态用地总面积不断增长, 20 a 间增加了 687.67 km²。其中, 林地面积、草地面积及其总面积增加对水土保持和水源涵养服务的提升效果明显, 而仅有林地面积增加对防风固沙服务具有积极作用。在生态用地质量变化方面, 20 a 间林地端元要素丰度值平均含量下降了 0.108, 其质量整体呈衰退趋势。20 a 间草地端元要素丰度值平均含量增加了 0.099, 其质量整体表现为微弱上升的态势。林地和草地质量改善均增强了水土保持、水源涵养和防风固沙服务, 但防风固沙服务对林地和草地质量变化最为敏感。研究结果为生态工程建设对生态系统服务的影响研究提供了新的认知视角, 未来应从生态用地精细分类对生态系统服务的影响差异方面深化研究, 也应重视气候要素对区域生态系统服务的相对贡献。

关键词: 生态; 生态系统服务; 生态工程建设; 生态用地数量; 生态用地质量; 光谱混合分解; 农牧交错区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404010

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0262-10

冀正欣, 许月卿, 胡起源, 等. 农牧交错区生态工程建设对生态系统服务的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 262-271. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404010 <http://www.tcsae.org>

Ji Zhengxin, XU Yueqing, HU Qiyuan, et al. Effects of ecological engineering construction on ecosystem services in the agro-pastoral transitional zone: A case study of Zhangbei County, Hebei Province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 262-271. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

生态系统服务是生态系统与生态过程形成和维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1]。日益增强的人类活动驱动着生态系统结构与过程发生剧烈变化, 引致生态系统服务持续退化^[2-4]。作为一项巨大的人类活动, 生态工程是植被恢复和生态系统服务提升的重要推动力^[5]。自改革开放以来, 中国政府陆续推行了“三北”防护林工程、京津冀风沙源治理工程、生态退耕工程、高寒湿地生态系统修复工程等一系列重大举措^[6], 极大改变了生态用地的数量和质量, 增强了区域生态系统服务。解析生态工程建设对生态系统服务的影响是地理科学和土地科学的前沿领域, 也是有效推进生态保护和修复工作亟需破解的实践问题。

纵观已有研究, 当前学术界针对中国北方农牧交错

区^[7]、东北林草交错区^[8]、西南岩溶喀斯特地貌区^[9]和青藏高原生态屏障区^[10]等生态脆弱区, 聚焦生态工程实施前后生态系统服务的时空格局^[11-12]、路径规律^[13]、权衡关系^[14-16]和预测调控^[17-18]等主题展开了系列探索, 而在细化生态工程实施下生态用地数量和质量对生态系统服务的影响研究方面较为缺乏。生态工程以土地为直接作用对象和显化载体, 通过改善生态用地的面积与质量来恢复生态系统的结构与功能, 并映射于生态系统服务的格局动态。一方面, 生态工程通过植树造林、退耕还林还草等建设活动直接改变了地表覆被类型, 使得有益于生态恢复的生态用地面积增加, 从而带动区域生态系统服务得到提升。另一方面, 生态工程通过封山育林、禁牧休耕等生态保育措施则对林地、草地等生态地类的要素含量即生态用地的质量产生影响, 强调对受损、退化的生态用地进行休养治理, 以实现生态系统服务的恢复、更新乃至提升的预期。可见, 生态工程通过改变生态用地数量和质量进而对生态系统服务产生综合影响, 科学认知生态工程实施下生态用地数量与质量变化是探析生态工程建设对生态系统服务影响的前提和基础。

光谱混合分解模型能够将地面复杂混合像元的光谱信号分解, 得到具有明确物理意义的纯净端元及其丰度值信息, 实现地物空间从像元级到亚像元级的转变^[19-20]。

收稿日期: 2024-04-01 修订日期: 2024-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目“冀北山区‘生产-生活-生态’空间演化机理与优化调控研究”(41971238)

作者简介: 冀正欣, 博士生, 研究方向为土地系统变化与区域可持续发展。

Email: jizhengxin1997@163.com

※通信作者: 许月卿, 副教授, 博士生导师, 研究方向为土地系统科学与国土空间优化。Email: xmoonq@sina.com

纯净端元的丰度值差值可以描述相应地类特征要素的量变过程,从而监测地类内部的质量变化特征^[21]。丰度值多季相图又能连续刻画区域地表物质的异质性梯度^[22],并借助少量样点满足更高精度的土地利用/覆被制图需求,以达成精准提取区域土地利用类型及数量结构信息的目标,为生态用地数量与质量对生态系统服务的影响研究提供了认知视角和技术路径。

河北省张北县位于半湿润向半干旱、华北平原向坝上高原的过渡地带,景观格局表现为耕地与草地互嵌、生产方式呈现出农业与牧业并存,属于典型的农牧交错区^[23]。特殊的地理环境导致当地气候、土壤、植被等自然本底条件较差,极易受到气候波动的强烈影响,是敏感的生态脆弱带之一^[24]。随着《张家口首都水源涵养功能和生态环境支撑区建设规划(2019—2035年)》的颁布,张北县被定位于首都水源涵养区和生态环境支撑区的先行示范区,也是国家重点生态功能区中浑善达克沙漠化防治生态功能区的核心区域,承担着水源涵养、土壤保持、防风固沙等生态调节重任,迫切需要在这个特殊地域内评估生态工程建设对相关生态系统服务的影响。有鉴于此,本研究以河北省张北县为案例区,基于2000、2010、2020年Landsat遥感影像数据,采用光谱混合分解模型和随机森林分类算法,进行原始影像的分解及土地利用分类与制图;定量评估土壤保持、水源涵养、防风固沙3种生态系统服务及其演化特征;查明生态工程建设背景下生态用地的数量和质量变化,并厘清生态用地数量与质量对区域生态系统服务的影响,以期生态脆弱区生态环境建设和优化管理的研究与应用提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

张北县地处河北省西北部,介于114°10′~115°27′E,40°57′~41°34′N之间(图1)包括西部丘陵区、中部平原区和东南坝头区3种地貌类型,海拔1201~2102 m,具有典型的高原丘陵景观特征。



图1 河北省张北县地理位置

Fig.1 Geographic location of Zhangbei County, Hebei Province

属温带大陆性季风气候,干燥少雨,大风频繁,年降水量为300 mm左右。由于复杂的地形与气候特征,疏松的沙质地表裸露和稀疏矮小的自然植被条件,生态环境敏感而脆弱,干旱、风沙、霜冻和雹灾等自然灾害频发。

张北县总面积4185 km²,下辖18个乡镇,366个行政村。截至2020年,该县总人口达30.89万人,地区生产总值达121.78亿元。自20世纪80年代起,京津冀风沙源治理工程、退耕还林还草工程、禁牧工程等相继在此实施,显著改变了区域生态系统过程及其功能。因此,本研究以张北县为研究案例探究农牧交错区生态工程建设对生态系统服务的影响,具有典型性与代表性。

1.2 数据来源及处理

本文所涉数据包括遥感数据、气象数据、地形数据、土壤数据和统计数据。遥感数据:2000年和2010年Landsat TM以及2020年Landsat OLI分别在5月、8月、11月的三季相影像,必要时采取相邻年份或月份进行替代,来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),并借助ENVI 5.3进行辐射定标、大气校正、镶嵌和裁剪处理;气象数据:2000、2010和2020年张北县及其周边气象站点逐月降水量、气温和风速数据,来源于张家口市气象局,并利用普通克里格插值法生成空间数据;地形数据:高程及坡度数据,来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);土壤数据:土壤深度、土壤沙粒、粉粒、黏粒的含量比例等,来源于世界土壤数据库的中国土壤数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/>);统计数据:行政区划、人口和GDP,来源于张家口及张北县统计年鉴。其中,空间数据均统一地理坐标和投影坐标系统后转换为30 m×30 m的栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 研究思路

生态工程通过植树造林、退耕还林还草等建设活动以及封山育林、禁牧休耕等生态保育措施两方面作用于区域生态系统的要素、过程和格局,影响了区域生态系统服务。由于生态用地数量及质量对生态工程实施与生态系统服务的桥梁作用,定量刻画区域生态用地数量及质量的格局动态是解析两者关系的前置条件。有别于生产和生活用地,生态用地是以直接或间接提供土壤保持、水源涵养、防风固沙和生物支持等生态系统服务为主,旨在保护和稳定区域生态系统的土地利用类型^[25]。针对生态用地具有尺度性和区域性的特点,结合张北县土地利用的特殊性,本研究的生态用地仅涵盖林地和草地。林地和草地数量可以通过光谱混合模型融合随机森林算法解译得到,林地和草地质量则能够基于光谱混合分解过程中的不同特征端元三季相丰度图及地类空间信息提取而来。在精准识别生态用地数量与质量基础上,量化评估区域生态系统服务,利用回归分析探寻生态工程实施下生态用地数量及质量与区域生态系统服务的作用关系,进而提出区域生态工程实施现存问题与调控建议,服务于生态保护和修复工程建设及可持续管理的现实

需求。

1.3.2 研究方法

1) 光谱混合分解模型

光谱混合分解假设传感器捕捉到的地面目标像元的辐射亮度仅与各组分的面积占比相关,即目标像元在某一波段的反射率,由构成该像元的各端元组分在相应波段的反射率以及它们在像元中所占的面积比例作为权重系数的线性组合^[22, 26-27]。因此,光谱混合分解的目的是从亚像元尺度寻求各端元组分占所在混合像元的面积百分比,即端元的丰度值,从而实现地表混合光谱空间向纯净端元空间的转变^[28]。光谱混合分解的主要步骤包括:主成分分析、端元提取和光谱分解。通过主成分变换分析张北县三季相遥感影像光谱空间的内在维度,以确定端元数量和类型。结果显示,所有季相前 3 个主成分的方差累积贡献率均超过 96%,表明前 3 个主成分足以表达原始影像的光谱特征信息。根据凸面几何理论,端元数量通常比光谱空间内在维度多 1。因此可以在研究区设置四个端元类型,构建四维标准光谱端元空间。根据已有研究^[26, 29],结合张北县的实际景观格局,选定土壤、植被、暗色物质、水为研究区的四维端元。确定端元数目及类型后,本研究基于前 3 个主成分变换图像所组成的二维散点图,利用图像端元法在其顶点处圈定 200~300 个像素,以提取不同端元要素的纯净像元及其光谱曲线。进而采用线性光谱混合分解模型,分解张北县 2000、2010 和 2020 年三季相的遥感影像,以探析各端元在不同季节上的变异特征。3 个时期不同季相的残差均方根平均值均在 0.01 以下,变异系数均小于 1,表明对于张北县 Landsat TM 和 Landsat OLI 遥感影像,四端元线性光谱混合分解具有良好的适用性。

上述光谱混合分解步骤已将原始影像分解为具有典型物理意义的纯净端元,有效避免了混合像元对地物光谱信息造成的影响。其中,不同特征端元的丰度值可反映相应地物的质量特征。参考已有研究^[21],植被端元可以作为林地、草地的特征要素,进而能够其通过端元丰度值的差异变化体现出相应地类的质量变化。此外,整合研究区假彩色合成遥感影像、三季相端元丰度图、实地调研知识以及 Google Earth 的训练样点,用生成随机森林算法的训练数据作为土地利用类型信息提取的分类器。参照中科院资源环境科学数据库分类法,将研究区地类分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。3 期影像总体解译精度分别为 92.09%, 93.92% 和 92.74%, 3 期的 Kappa 系数分别为 0.89、0.91、0.90,能够满足研究的精度要求。

2) 生态系统服务量化

土壤保持服务是生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力以及对泥沙的储积保持能力^[30]。InVEST 模型的泥沙输送比例模块弥补了 USLE 方程对地块自身泥沙持留能力考虑不足的缺陷,在综合考虑降水、土壤、地形地貌、土地覆被类型等因素的基础上,通过模型计算来描述坡面土壤流失和侵蚀泥沙的空间过程,从而评估区域的土

壤保持程度。因此,本研究利用 InVEST 模型泥沙输送比例模块(sediment delivery and retention)测算研究区的土壤保持功能。计算如下:

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (2)$$

$$SC = RKLS - USLE \quad (3)$$

式中 USLE 为实际土壤侵蚀量 (t), RKLS 为潜在土壤侵蚀量 (t), SC 为土壤保持量 (t)。R 为降雨侵蚀力 [MJ·mm/(hm²·h·a)], K 为土壤侵蚀力因子, LS 为边坡长度和陡度因子, C 为种植管理因子, P 为配套措施因子。

水源涵养服务是生态系统将降水保持在系统内的过程和能力,主要表现在降水拦蓄、径流调节、水质净化等方面^[31]。基于水量平衡原理,运用 InVEST 模型的产水模块,通过降水量、潜在蒸散发、土壤深度、植被可利用含水率、土地利用数据等参数数据,结合植物根系深度、Zhang 系数等参数因子计算产水量。计算公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (4)$$

式中 Y(x) 为栅格单元 x 的产水量 (m³), AET(x) 为栅格 x 的年实际蒸散量 (mm), P(x) 为栅格 x 的年均降水量 (mm)。

在产水量计算结果基础上,结合地形指数、流速系数和土壤饱和导水率等,计算得到栅格尺度的水源涵养量。

$$Ret = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y(x) \quad (5)$$

式中 Ret 为单位面积水源涵养量 (mm), V 为流速系数, TI 为地形指数, K_s 为土壤饱和导水率。

防风固沙服务是生态系统通过其内在的过程及结构减少由风蚀所引起的土壤侵蚀现象,本质是保持水土、抑制风蚀过程^[32]。防风固沙功能主要受气候条件(风速、温度、降雨)、植被覆盖状况、土壤可蚀性、地表粗糙度等因素的影响,可以用生态系统防风固沙能力指数(S_{ws})进行评估。计算公式如下:

$$S_{ws} = NPP_{mean} \times K \times F_q \times D \quad (6)$$

$$F_q = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left\{ \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right\} \times d \quad (7)$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2 \times (1 - r_i) \quad (8)$$

$$D = 1/\cos\theta \quad (9)$$

式中 NPP_{mean} 为植被多年净初级生产力的平均值, K 为土壤可蚀性因子, F_q 表示多年平均气候侵蚀性因子, D 表示地表粗糙度因子, u 为 2 m 高处的月平均风速 (m/s), ETP_i 为月潜在蒸发量 (mm), P_i 为月平均降水量 (mm), d 为当月天数 (d), T_i 为月平均气温 (°C),

r_i 为月平均相对湿度 (%)， θ 为坡度 (°)。

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆被的时空格局

张北县 2000—2020 年土地利用/覆被分类如图 2 所示，耕地、草地、林地是张北县最主要的景观类型，2020 年三者的面积比例分别为 37.43%、34.60% 和 22.84%，占研究区总面积的比例大于 95%。耕地可以划分为坝上高原区的平耕地和山地丘陵处的坡耕地两大类，后两者则集中分布在西部、以及东部和南部的山地丘陵

区。研究期间，耕地面积呈持续收缩趋势，共减少 802.86 km²，这既与区域已有的研究结论^[33]相一致，也与张北县大力实施生态退耕工程的现状相吻合。草地面积同样呈现出不断减少态势，这与生态林与经济林快速扩张不断挤压草地面积的区域特点相符，也源于相关政府对退耕还林与退耕还草的补贴差异。相反，林地分布范围迅速扩张，在坝头山地区形成了颇具规模的“绿色长城”，这反映出张北县“三北”防护林建设、京津风沙源治理工程、生态退耕工程等生态恢复工程的显著成效。

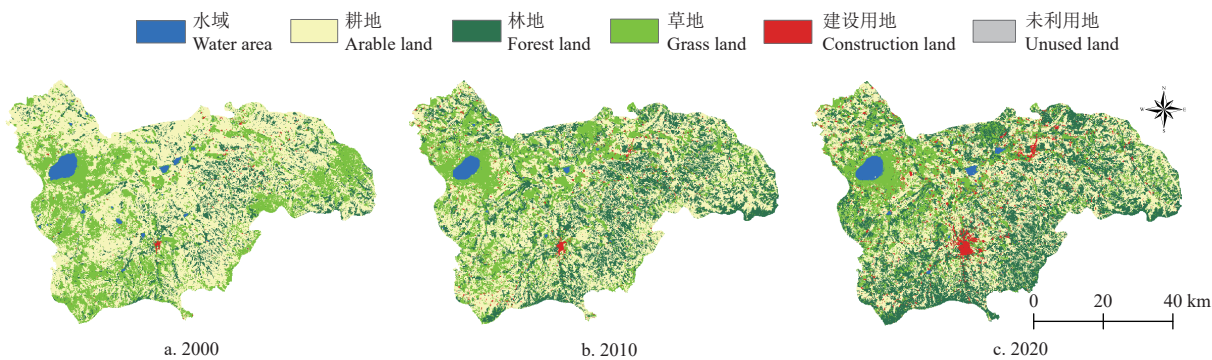


图 2 张北县土地利用/覆被图
Fig.2 Land use/cover map of Zhangbei County

2.2 生态系统服务的时空动态

与 2000 年相比，得益于张北县生态工程的大规模推

动，水土保持、水源涵养和防风固沙 3 种服务均有所增加 (图 3)。

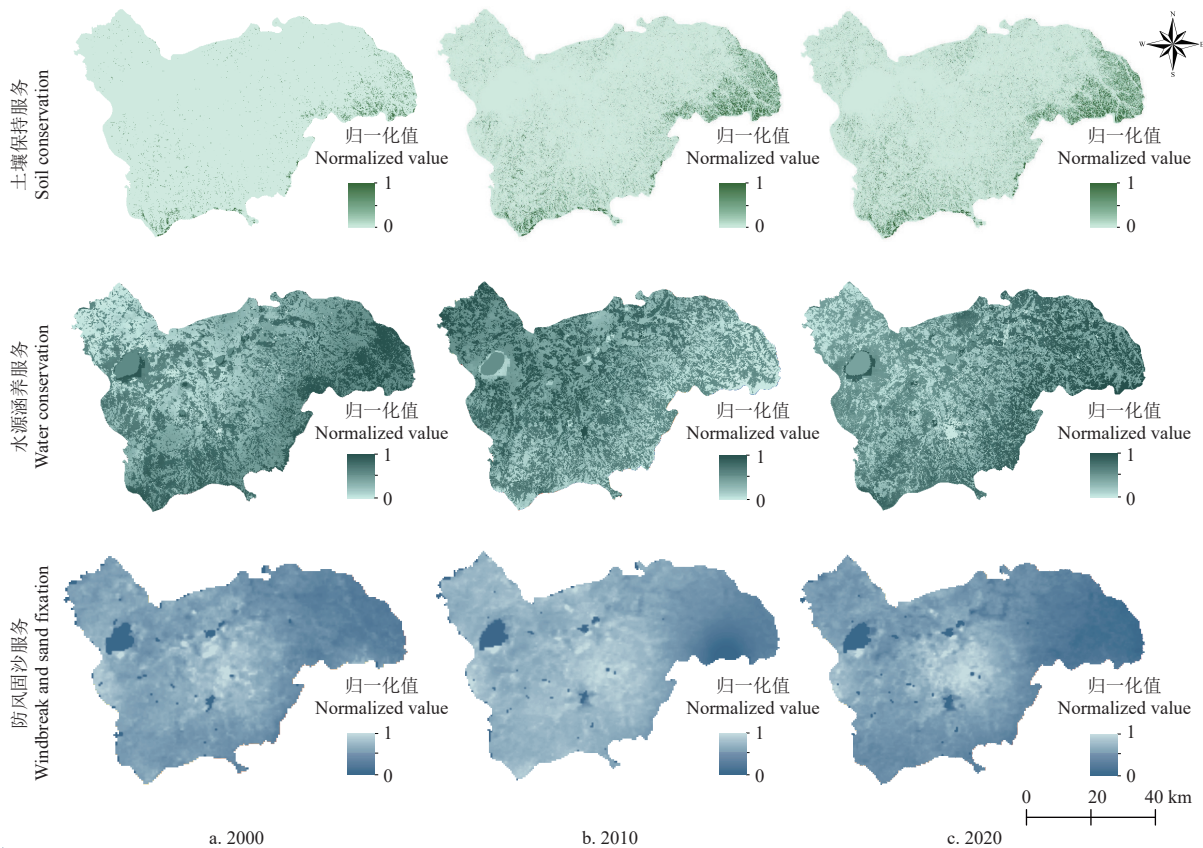


图 3 张北县生态系统服务格局及演化
Fig.3 Pattern and evolution of key ecosystem services in Zhangbei County

在空间格局上,张北县生态系统服务整体表现为强化趋势,但其具体分布存在明显的空间异质性。土壤保持服务展示出东南两端高、中部低的空间态势,与张北县坝缘及山脉分布格局十分契合。这是因为该区域具有明显的海拔落差且地形坡度较大,极易发生土壤堆积和流水侵蚀现象,而中部和北部则处于高原腹地,地势相对平缓,地形外力对其影响较小,土壤堆积和流失现象相对较少;水源涵养服务呈现为团块状和碎斑状变化格局,这与张北县地类分布特征高度相关。林地和草地由于根系对土壤的改善调节作用较强,使得其水源涵养能力最高。而耕地作物虽具有一定的涵养水源能力,但因其承载了频繁的人类干扰,对土壤造成了负面影响,导致其水源养护能力较低。水域本身则并不能对水资源产生过多的涵养保持功能,因为水源涵养能力绝大部分受到降水、蒸散发等自然因素的影响;防风固沙服务整体体现出中部高、四周低的分布格局,且其高值区前期以扩展为主,后期则相对收缩,这是气候条件与地形因素共同作用所致。东部和南部作为张北县的生态屏障,海拔较高而气温低,蒸散发弱且风速较小,加之崎岖地形容易与降水相互作用形成泥沙流失,因而防风固沙能力较弱,而地形相对平坦的中部地区降水量较少、蒸散发强且风速大,水土流失现象少,故防风固沙能力更强。

2.3 生态工程建设对生态系统服务的影响

2.3.1 生态用地数量和质量空间分布变化

出于更直观清晰地揭示生态用地数量时空动态的目的,本研究基于 Python 编程语言,针对张北县 2000、2010 和 2020 年土地利用/覆被数据,提取出其森林和草地类型,并以 300 m×300 m 网格为基本单元计算生态用地面积丰度,进而得到 2000—2020 年生态用地在网格内的面积变化信息(图 4)及地类转换信息(图 5)。

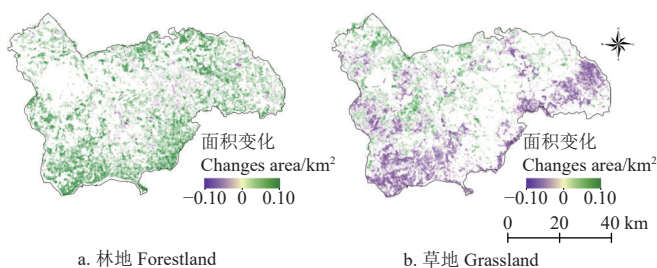


图 4 2000—2020 年张北县生态用地面积变化

Fig.4 Changes area of ecological land in Zhangbei County from 2000 to 2020

生态用地总体数量不断增长,20 a 间增加了 687.67 km²。其中,林地整体空间扩张尤为显著,基本覆盖整个研究区域,其增加高值区主要分布在南部的坝缘区及东北部的桦皮岭附近,20 a 内面积增长了 986.10 km²。受退耕还林政策影响,耕地是林地面积扩张的主要来源,两个时期内分别有 482.51 和 263.35 km² 的耕地转入为林地。草地则与之相反,面积在不断缩减,其减少的高值区集中分布于南部的坝缘区、东北部的桦皮岭、以及西部的安固里淖附近,20 a 间减少了

307.43 km²,但 2010—2020 年张北县禁牧政策的实施减缓了这一趋势。值得注意的是,林地扩张的高值区与草地缩减的高值区存在一定的空间重合现象,两个时期分别有 152.81 和 245.68 km² 的草地转化为林地,这主要源于林地、草地之间的生态补贴差异,地方政府往往在生态决策和建设过程中更倾向于补贴资金更高的林地。

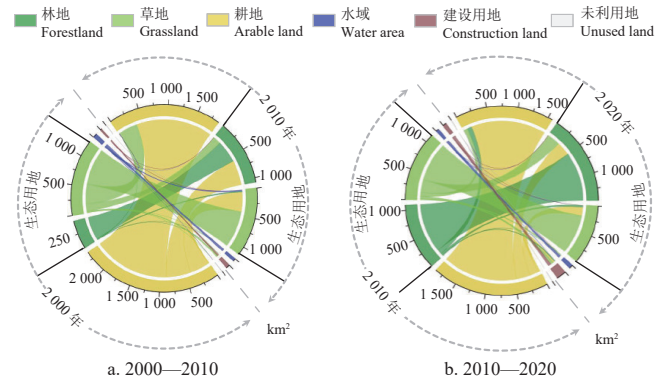


图 5 2000—2020 年张北县生态用地转换方向及数量

Fig.5 Conversion direction and amount of ecological land in Zhangbei County from 2000 to 2020

相应地物类型特征端元要素丰度值的差值能够体现出地物自身质量的变化,是生态用地质量的隐性体现^[21]。20 a 间林地端元要素丰度值平均含量下降了 0.108,其质量整体呈衰退趋势,且下降区呈图斑状零星分布于张北县中部(图 6)。但与 2000—2010 年相比,2010—2020 年林地端元要素丰度值明显增加,其质量明显好转,这主要是因为自 2010 年以来,张北县陆续开展了补植补造、中幼林抚育及森林质量精准提升建设项目(图 7)。草地质量整体表现为微弱上升的态势,20 a 间其端元要素丰度值平均含量增加了 0.099,增加区域主要呈团块状围绕在安固里淖附近(图 6)。特别是 2010 年后,张北县实施了禁牧工程和草原生态保护补助奖励机制,鼓励农户用综合性专业化的养殖小区替代过去放牧式的畜牧生产,这些措施有效促进了退化草地的恢复,使得草地质量得到进一步提升(图 7)。

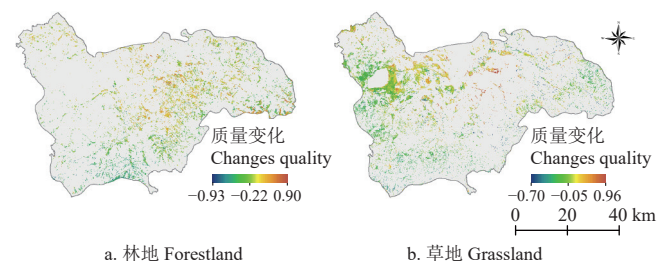


图 6 2000—2020 年张北县生态用地质量空间变化

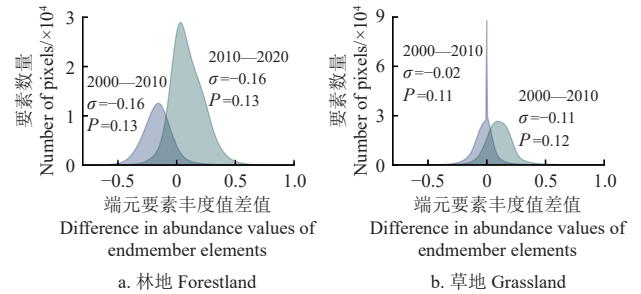
Fig.6 Spatial changes of ecological land quality in Zhangbei County from 2000 to 2020

2.3.2 生态用地数量和质量对生态系统服务的影响

为了进一步查明生态用地数量和生态系统服务之间的定量关系,本文对张北县生态用地数量变化与 3 种生态系统服务变化分别进行回归分析,结果均通过显著性检验($P<0.05$),其中林地、草地面积和林草地总面积

变化与 3 种生态系统服务变化（土壤保持、防风固沙和水源涵养）的 R^2 分别为 0.30、0.15 和 0.39，0.49、0.38 和 0.46，0.40、0.21 和 0.86，见图 8。土壤保持服务和水源涵养服务与林地面积、草地面积和林草地总面积的相关关系表现为正相关关系，而防风固沙服务仅与林地面积表现为正相关关系，与草地面积和林草地总面积的相关关系则表现为负相关关系。林地和草地面积增加提升了地表植被覆盖度，减少降水对地表土壤的冲击，更有利于土壤团聚体的稳定，同时植被冠层、枯落物部分可以有效截留降水，因而带来土壤保持服务和水源涵养服务的提升。其中，由于张北县多为植被稀疏的次生林，林下地表裸露，而草地则密集生长、根系发达，能更有效减少径流对表面土壤的冲刷，改善土壤渗透性并加强径流蓄滞，故草地面积增加对土壤保持、拦截径流的能力比林地更为明显，应在今后生态工程建设过程中注重草地生态工程的建设工作。防风固沙服务对植被覆盖度变化的敏感性较低，更多受风速、降水等气候要素的牵

制。特别是张北县地处东部农业区与西部草原牧区的半干旱生态过渡带，干燥少雨、大风频繁，气候要素会改变近地表风场和风沙流结构，影响多年平均气候侵蚀性因子，进而直接塑造区域防风固沙服务的效果。



注：σ 为标准差；P 为统计值。

Note: σ represents standard deviation; P represents statistical value.

图 7 2000—2020 年张北县生态用地质量时间变化
Fig.7 Temporal changes in ecological land quality in Zhangbei County from 2000 to 2020

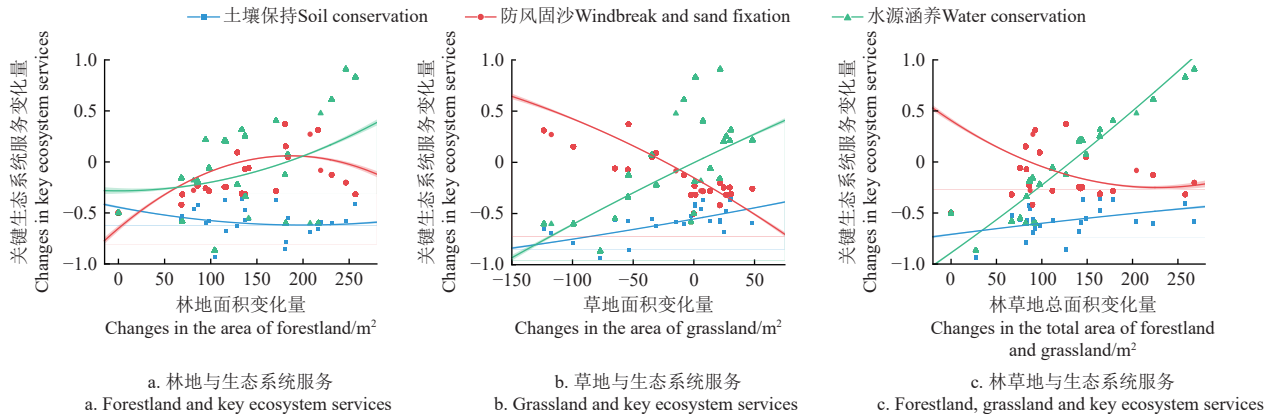


图 8 2000—2020 年张北县生态用地面积变化与关键生态系统服务变化的回归分析
Fig.8 Regression analysis between the area changes of ecological land and the changes of key ecosystem services in Zhangbei County from 2000 to 2020

为进一步查明生态用地质量和生态系统服务之间的定量关系，本文对张北县生态用地质量变化与 3 种生态系统服务变化分别进行回归分析，结果均通过显著性检验 ($P < 0.05$)，其中林地和草地质量变化与 3 种生态系统服务变化的 R^2 分别为 0.48、0.97 和 0.94，0.46、0.97 和 0.91，见图 9。3 种生态系统服务与林地和草地质量的相关关系均表现为正相关关系，表明林草地质量的改善均增强了土壤保持、水源涵养和防风固沙服务。究其原因，林草地质量的提升导致自然属性（地表植被覆盖、地表粗糙度、根系结构、土壤性质等）发生变化，从而导致同一地类所带来的生态系统服务能力的增强。其中，防风固沙服务对林草地质量的变化最为敏感，这是由于植被从稀疏过渡到相对茂密阶段后，能够很大程度上降低风速，吸附滞留粉尘，从减少地表沙化现象。而土壤保持和水源涵养服务对林地质量的响应要比草地质量更为显著，这源于林地质量提升可以显著增加植被冠层密度，改变降雨的再分配过程，减少降水对地表土壤直接冲击，同时更为发达的根系能够加强蓄水量和入渗量，达到固定土壤、涵养水源的作用。因此，地方政府应在

林地生态工程建设过程中，积极推进退化森林的生态恢复与生态重建工作，全面实施森林质量精准提升工程。

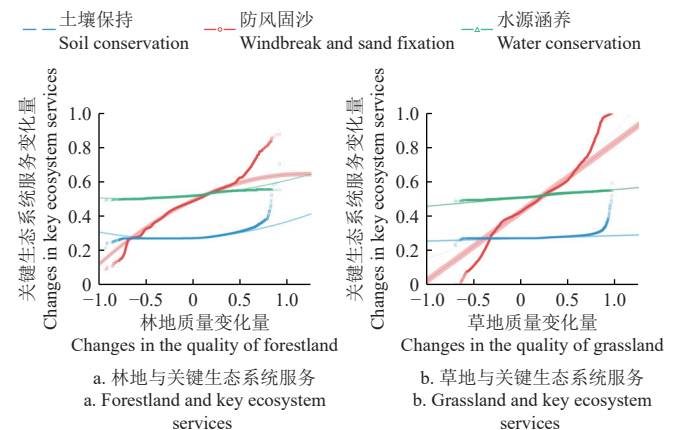


图 9 2000—2020 年张北县生态用地质量变化与生态系统服务变化的回归分析

Fig.9 Regression analysis between the quality changes of ecological land and the changes of key ecosystem services in Zhangbei County from 2000 to 2020

3 讨 论

3.1 生态工程建设存在问题及对策建议

生态用地总体数量不断增长,但内部结构失衡严重。20 世纪 80 年代以来,随着京津风沙源治理工程、“三北”防护林工程、退耕还林还草工程等国家、省、市重点生态工程的大规模实施,张北县生态用地面积大幅度增加,土壤保持服务和水源涵养服务等生态系统服务能力显著提升,但由于当前生态工程忽略了区域本底属性与气候特征的影响,以人工造林为主要目的,致使林地吞噬草地的现象频出,林地与草地的面积结构失衡严重。研究发现,20 年内林地面积增长了 986.10 km^2 ,而草地面积减少了 307.43 km^2 ,至 2020 年林地和草地分别占研究区总面积的 34.60% 与 22.84%。林地扩张的高值区与草地缩减的高值区存在一定的空间重合现象,两个时期分别有 152.81 和 245.68 km^2 的草地被林地侵占。张北县地处农牧交错带,气候干旱少雨,水资源短缺,若片面追求人工种植林的扩张,会加剧深层土壤干旱、地下水位下降和生物多样性减少等问题,影响到生态工程建设成效。对此,政府部门在今后生态工程建设过程中,应遵循生态系统内在规律,摒弃以往“重乔木而轻灌草”的陈旧观念,按照“宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草、乔灌结合、林草融合”的准绳,推广乔灌草结合绿化方式,在促进坝头山地区林地恢复的同时,因地制宜选用虎榛子、柠条、沙棘、酸枣与燕麦、苜蓿、披碱草等耐干旱、耐瘠薄、抗风沙的灌木和草种,以协调生态用地的结构比例,构建健康稳定的自然生态系统。

林地老化退化问题较为突出,草地质量不高现象依然存在。尽管张北县自 2010 年起陆续开展了补植补造、中幼林抚育及森林质量精准提升建设项目,林地质量与 2000—2010 年相比有所好转,但 20 年间林地端元要素丰度值平均含量下降了 0.108,林地老化退化问题十分突出。同时,得益于禁牧工程和草原生态保护补助奖励机制,草地端元要素丰度值平均含量增加了 0.099,草地质量整体表现为微弱上升的态势,但增加区域主要呈团块状围绕在安固里淖附近,尚有大面积退化脆弱草地亟待改造提升。区域 3 种生态系统服务与林地和草地质量的相关关系均表现为正相关关系,其中土壤保持和水源涵养服务对林地质量的响应要比草地质量更为显著。但实地调查证实,研究区仍有相当比重的“小老头树”等残次林、过密过疏林、沙化及病虫害草场。因此,地方政府应在现有林草和草地空间分布的基础上,进一步落实森林质量精准提升建设项目以及草原禁牧休牧制度。一方面针对林地质量较低的区域,结合封山育林等政策,补植补造树种结构单一的中幼林,抚育改造生长状况不良的退化林,采伐更新枯死、濒死林,遏制林地老化退化趋势,优化林分空间结构及生态功能。另一方面全域推行围栏封育、补播改良、鼠虫病害和毒害草治理等措施,加强草原综合治理及草畜平衡工作,全面维持和提升草地生态系统服务。

生态用地数量增加和质量提升的空间布局极不匹配,二者与生态系统服务的作用关系尚未协调。林地数量增

加高值区集中分布于南部的坝缘区及东北部的桦皮岭附近,但这些区域大规模的造林成果多处于幼龄林阶段,抵御干旱等自然灾害能力较差,缺乏人为经营管理,致使这些区域的林地质量退化问题最为显著,进行影响到区域内土壤保持和防风固沙服务的有效发挥,且水源涵养服务在这些区域明显下降。草地数量增加高值区主要分布在北部的波状平原区,但其质量提升高值区围绕在安固里淖周围,草地数量增加和质量提升的空间错配导致这两类区域的生态系统服务提升均不显著。基于上述情况,应加快建立空天地一体化生态工程建设监测体系及常态化更新机制,融合遥感卫星观测、低空无人机监测和地面实地站点测量等数据获取技术,对生态工程建设过程中生态用地数量和质量进行全生命周期的实时监测、动态评估和精准预测工作,针对生态用地数量减少、质量下降以及其带来的生态系统服务削弱等问题及时反馈和科学预警,以便动态调整更新生态工程实施策略,纠正现行实施过程的偏差,实现生态用地数量和质量以及相应的生态系统服务同频共振。

3.2 特色与不足

生态系统服务是区域生态工程建设下生态用地数量和质量交互作用的综合表征,科学分解两者的相对影响是当前研究的焦点问题。本研究利用光谱混合分解在精准地类制图以及其端元映射地类质量上的优势,关注了生态工程的数量和质量对生态系统服务的影响。生态工程既能直接通过植树造林、退耕还林还草等方式改变生态地类的数量面积和空间布局,也会利用封山育林、补植补造、禁牧休耕等生态保育措施改善生态用地的质量。本研究得到的生态用地数量变化趋势与刘晓娟等^[34]对中国未来多情景土地利用变化模拟结果中的林地及草地变化趋势相一致,造成该结果的原因是部分生态工程在一定程度上侧重林地面积的扩张,而忽视草地面积的维持。徐宏超等^[35]发现的京津冀地区 2000—2020 年林地面积上升了 3% 左右,草地面积则呈现逐年减少趋势也证实了本研究结果。同时,相较于以往研究定性分析京津冀植被生态修复进展时提出的京津冀林草资源总量低、质量差、退化严重等问题^[36],本研究进一步量化了区域生态用地质量的数值变化及空间布局。此外,厘清生态用地数量和质量对生态系统服务的影响能够直观、详细地揭示生态工程在区域生态系统恢复中的独立作用,比起现有研究多关注生态用地的数量格局变化对生态系统服务的影响,本研究更加精细化和深入化,为生态工程对生态系统服务影响及其演化过程研究提供了新的认知视角,研究结果可为农牧交错区生态恢复过程提供更具体域特色的政策启示。

然而,本文在生态用地精细分类对生态系统服务的影响方面尚未开展深入研究,如林地可按其优势种群分为针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌木林等,也可根据树龄分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林,不同植被类型和树龄阶段引起的表面粗糙度、土壤理化性质、固碳释氧能力的差异对生态系统服务有显著影响,对这些内容仍需开展进一步的探索和研究。此外,气温、

降水和风速等气候要素也通过地表蒸散发过程驱动水循环,深刻塑造着区域生态系统的结构与功能,从而制约生态系统服务及其整体格局的潜力与空间分布,但本文在生态系统服务对气候要素响应的滞后效应方面考虑不足。未来需补充气候要素的时间序列数据,并纳入植被生态过程模型揭示生态系统服务对气候要素的反馈作用,从而剥离出气候要素和生态工程对区域生态系统服务的相对贡献。

4 结 论

本文以地处农牧交错区的张北县作为研究区,基于光谱混合分解模型和随机森林算法,开展 2000—2020 年研究区原始影像的端元分解及土地利用/覆被的精准制图,评估其土壤保持、水源涵养、防风固沙等 3 种生态系统服务,揭示生态工程建设背景下生态用地数量和质量对区域生态系统服务的影响,以期为生态脆弱区生态环境建设活动提供有益参考。具体结论如下:

1) 生态工程建设背景下张北县土地利用结构变化显著。林地分布范围迅速扩张,耕地和草地面积则呈持续收缩趋势,林地扩张与耕地和草地缩减存在一定的空间重合现象。受此影响,张北县土壤保持、水源涵养和防风固沙 3 种服务均表现出强化趋势,但具体分布存在明显的空间异质性。土壤保持服务展示出东南两端高、中部低的空间态势,水源涵养服务呈现为团块状和碎斑状变化模式,防风固沙服务体现出中部高、四周低的分布格局。

2) 生态工程建设对 3 种生态系统服务的影响可以通过生态用地数量和生态用地质量来具体表征。在生态用地数量方面,生态用地总面积不断增长,20 年间增加了 687.67 km²。其中,林地面积、草地面积和林草地总面积增加对土壤保持和水源涵养服务的提升效果明显,而仅有林地面积增加对防风固沙服务具有积极作用;在生态用地质量方面,20 年间林地端元要素丰度值平均含量下降了 0.108,其质量整体呈衰退趋势。20 年间草地端元要素丰度值平均含量增加了 0.099,其质量整体表现为微弱上升的态势。林地和草地质量改善均增强了土壤保持、水源涵养和防风固沙服务,但相比其他两种生态系统服务,防风固沙服务对林地和草地质量变化最为敏感,而土壤保持和水源涵养服务对林地质量的响应要比草地质量更为显著。

【参 考 文 献】

- [1] DAILY G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[M]. Washing DC: Island Press, 1997.
- [2] ELLIS E C. The anthropocene condition: evolving through social-ecological transformations[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2023, 379(1893): 20220255.
- [3] LEWIS S L, Maslin M A. Defining the anthropocene[J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [4] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13.
- PENG Jian, LV Danna, DONG Jianquan, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 3-13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈珊珊, 温兆飞, 马茂华, 等. 气候变化背景下定量解析生态工程对植被动态的影响研究方法概述[J]. *生态学报*, 2022, 42(15): 6439-6449.
- CHEN Shanshan, WEN Zhaofei, MA Maohua, et al. Quantitative analysis of the impact of ecological projects on vegetation dynamics under the background of climate change: A review of methods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6439-6449. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 国土空间生态修复布局研究进展[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(11): 1925-1941.
- WANG Chenxu, LIU Yanxu, YU Chaoyue, et al. Research progress on the arrangement of territorial ecological restoration[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(11): 1925-1941. (in Chinese with English abstract)
- [7] LIU M, JIA Y, ZHAO J, et al. Revegetation projects significantly improved ecosystem service values in the agro-pastoral ecotone of northern China in recent 20 years[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147756.
- [8] 郑树峰, 王丽萍, 臧淑英. 大兴安岭天保工程区生态系统服务变化研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(7): 1295-1302.
- ZHENG Shufeng, WANG Liping, ZANG Shuying. The change of ecosystem services of Natural Forest Protection Project Regions in the Da Hinggan Mountains[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1295-1302. (in Chinese with English abstract)
- [9] GAO J, ZUO L, LIU W. Environmental determinants impacting the spatial heterogeneity of karst ecosystem services in Southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(4): 1718-1731.
- [10] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 等. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系——以普达措国家公园为例[J]. *地理科学*, 2022, 42(7): 1283-1294.
- MA Yuewei, PAN Jianfeng, CAI Siqing, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the Potatso National Park[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(7): 1283-1294. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 966-982.
- WANG Xiaoqi, ZHAO Xueyan. Impacts of human activities on ecosystem services in national parks: A case study of Qilian Mountain National Park[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(4): 966-982. (in Chinese with English abstract)
- [12] WANG X, WU J, LIU Y, et al. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: 114835.
- [13] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 等. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207.
- XIE Lixia, BAI Yongping, CHE Lei, et al. Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the Upper Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 196-207. (in Chinese with English abstract)

- [14] HE J, SHI X, FU Y, et al. Evaluation and simulation of the impact of land use change on ecosystem services trade-offs in ecological restoration areas, China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 311: 114835.
- [15] 冯琳, 雷国平. 东北地区生态系统服务及权衡/协同关系时空演变特征与功能分区研究[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(7): 100-113.
FENG Lin, LEI Guoping. Study on spatial-temporal evolution characteristics and functional zoning of ecosystem services and trade-offs/synergies relationships in Northeastern China[J]. *China Land Science*, 2023, 37(7): 100-113. (in Chinese with English abstract)
- [16] 卫彦宏, 乔旭宁, 张仲伍, 等. 基于气候带与农业区划的农田生态系统服务权衡及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20): 220-228.
WEI Yanhong, QIAO Xuning, ZHANG Zhongwu, et al. Trade-off and driving mechanisms for farmland ecosystem services based on climatic zones and agricultural regionalization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(20): 220-228. (in Chinese with English abstract)
- [17] 耿鑫, 胡实, 肖玉, 等. 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1799-1814.
GENG Xin, HU Shi, XIAO Yu, et al. Land use pattern optimization and evaluation based on ESV of agro-pastoral ecotone in Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1799-1814. (in Chinese with English abstract)
- [18] FANG Z, DING T, CHEN J, et al. Impacts of land use/land cover changes on ecosystem services in ecologically fragile regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831: 154967.
- [19] 孙敏轩, 刘明, 孙强强, 等. 利用光谱混合分解模型分析 GF-6 新增波段对土地利用/覆被的响应[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(3): 244-253.
SUN Minxuan, LIU Ming, SUN Qiangqiang, et al. Response of new bands in GF-6 to land use/cover based on linear spectral mixture analysis model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(3): 244-253. (in Chinese with English abstract)
- [20] SUN D. Detection of dryland degradation using Landsat spectral unmixing remote sensing with syndrome concept in Minqin County, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 41: 34-45.
- [21] 姜宛贝, 孙丹峰, 孙强强. 基于光谱混合分解的民勤生态治理效果评价[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 210-218.
JIANG Wanbei, SUN Danfeng, SUN Qiangqiang. Ecological restoration assessment in Mingin based on spectral mixture analysis[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(1): 210-218. (in Chinese with English abstract)
- [22] SMALL C. The Landsat ETM+ spectral mixing space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(12): 1-17.
- [23] 周建, 张凤荣, 徐艳, 等. 基于降水量与土壤类型的北方农牧交错区土地利用/覆被格局及变化分析——以科尔沁左翼后旗为例[J]. *地理研究*, 2017, 36(7): 1210-1222.
ZHOU Jian, ZHANG Fengrong, XU Yan, et al. Analysis of land use/cover pattern and its changes in the agro-pastoral ecotone based on the precipitation and soil types: A case study of Horqin Left Rear Banner[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(7): 1210-1222. (in Chinese with English abstract)
- [24] 冀正欣, 许月卿, 黄安, 等. 冀北山区"三生"空间识别与演化特征分析——以张家口市为例[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(1): 123-134.
JI Zhengxin, XU Yueqing, HUANG An, et al. Spatial pattern and evolution characteristics of the production-living-ecological space in the Mountainous Area of Northern Hebei Province: A case study of Zhangjiakou City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, 58(1): 123-134. (in Chinese with English abstract)
- [25] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
LONG Hualou, LIU Yongqiang, LI Tingting, et al. A primary study on ecological land use classification[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李卓, 韩文超, 胡起源, 等. 融合光谱混合分解与面向对象的土地利用/覆被分类[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 225-233.
LI Zhuo, HAN Wenchao, HU Qiyuan, et al. Land use/cover classification based on combining spectral mixture analysis model and object-oriented method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(17): 225-233. (in Chinese with English abstract)
- [27] SUN Q, ZHANG P, SUN D, et al. Desert vegetation-habitat complexes mapping using Gaofen-1 WFV (wide field of view) time series images in Minqin County, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2018, 73: 522-534.
- [28] 孙敏轩, 焦心, 冀正欣, 等. 草地系统认知理论与光谱融合量化策略[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(2): 84-95.
SUN Minxuan, JIAO Xin, JI Zhengxin, et al. Grassland system cognitive theory and its spectral identification method[J]. *China Land Science*, 2022, 36(2): 84-95. (in Chinese with English abstract)
- [29] SUN D, ZHANG P, SUN Q, et al. A dryland cover state mapping using catastrophe model in a spectral endmember space of OLI: A case study in Minqin, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(14): 5673-5694.
- [30] PENG J, HU X, WANG X, et al. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100998.
- [31] LI M, LIANG D, XIA J, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112212.
- [32] ZHAO T, PAN J, BI F. Can human activities enhance the trade-off intensity of ecosystem services in arid inland river basins? Taking the Taolai River Basin as an example[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160662.
- [33] 刘超, 霍永伟, 许月卿, 等. 生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1806-1820.
LIU Chao, HUO Yongwei, XU Yueqing, et al. Changes in Cultivated Land and Influencing Factors before and after the Implementation of Grain for Green Project in Zhangjiakou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1806-1820. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. *热带地理*,

2019, 39(3): 397-409.

LIU Xiaojuan, LI Xia, LIANG Xun, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 397-409. (in Chinese with English abstract)

[35] 徐宏超, 李春林, 王昊, 等. 土地利用变化对京津冀热环境时空演变的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(3): 1340-1348.

XU Hongchao, LI Chunlin, WANG Hao, et al. Impact of land use change on the spatiotemporal evolution of the regional

thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(3): 1340-1348. (in Chinese with English abstract)

[36] 刘硕, 李品, 冯兆忠. 京津冀防风固沙植被生态修复研究进展与对策[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 267-274.

LIU Shuo, LI Pin, FENG Zhaozhong. Eco-restoration research progress and strategy about wind-break and sand-fixation forest in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 267-274. (in Chinese with English abstract)

Effects of ecological engineering construction on ecosystem services in the agro-pastoral transitional zone: A case study of Zhangbei County, Hebei Province of China

JI Zhengxin^{*}, XU Yueqing^{*}, HU Qiyuan, GAO Xiang, LIN Xin, SONG Jiaxuan, LIU Tianhao

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Center of Land Use and Management Research, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Ecological engineering can dominate the structure and function of ecosystems. The quantity and quality of ecological land can be directly related to the pattern and dynamics of regional ecosystem services. It is very necessary to identify the impacts of ecological engineering construction on regional ecosystem services, especially in agro-pastoral transitional zones. This study aims to explore the impact of the quantity and quality of ecological land on ecosystem services under ecological projects. A case study was taken in Zhangbei County, a typical county in an agro-pastoral transitional zone. The map of land use was then classified using a random forest model, according to the Landsat remote sensing images in 2000, 2010, and 2020. The linear spectral mixture model was also used to decompose the original image for the abundance values of typical endmembers. Three key ecosystem services were included soil conservation, water conservation as well as windbreak, and sand fixation. The evolutionary characteristics were quantitatively assessed using the InVEST model and ArcGIS. The correlation analysis was then applied to reveal the impact of the quantity and quality of ecological land on the key ecosystem services. The results showed that: 1) The distribution of forestland in Zhangbei County was expanded rapidly, with a total increase of 986.10 km² from 2000-2020. But the areas of arable land and grassland continued to shrink, thus decreasing by 802.86 and 307.43 km², respectively. There was some spatial overlap between the expansion of forestland and the shrinkage of arable land and grassland. An overall strengthening trend was found for soil conservation, water conservation, windbreak, and sand fixation as a whole. However, there was outstanding spatial heterogeneity in the specific distribution. 2) In the quantity of ecological land, the total area of ecological land has continuously increased by 687.67 km² over the past 20 years. Among them, the increases in the area of forestland, grassland, and their total area posed a significant effect on the soil conservation and water conservation services, while only the increase in the area of forestland shared the positive impact on the windbreak and sand fixation. In the quality of ecological land, the average abundance values of endmember elements in forestland declined by 0.108 during the 20-year period, indicating an overall decreasing trend. The average abundance values of endmember elements in grassland increased by 0.099, with an overall weakly increasing trend. The quality of forestland and grassland was enhanced the soil conservation, water conservation, windbreak, and sand fixation, whereas the windbreak and sand fixation were the most sensitive to changes in the quality of forestland and grassland. The findings can offer a promising perspective to explore the impact of ecological engineering construction on ecosystem services. The region-specific decision-making insights can also be provided for ecological restoration in the agro-pastoral transitional zone. The impact of fine classification of ecological land on ecosystem services should be further examined in future research. Additionally, it is necessary to incorporate the time-series data of climatic factors into vegetation ecological process models, in order to reveal the feedback effects of ecosystem services on climatic factors. This approach can be expected to distinguish the relative contributions of climatic factors and ecological engineering in regional ecosystem services.

Keywords: ecology; ecosystem services; ecological engineering construction; quantity of ecological land; quality of ecological land; linear spectral mixture model; agro-pastoral transitional zone