

DOI: 10.20103/j.stxb.202410102458

陈乐, 卫伟. 黄土丘陵沟壑区不同生态恢复模式下生态系统服务及驱动因素. 生态学报, 2025, 45(15): - .

Chen L, Wei W. Ecosystem services and driving factors under different ecological restoration models in the Loess Hilly and Gully Region. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

# 黄土丘陵沟壑区不同生态恢复模式下生态系统服务及驱动因素

陈 乐<sup>1,2</sup>, 卫 伟<sup>1,2,3,\*</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

**摘要:** 黄土丘陵沟壑区是全国重要的水土流失区和生态恢复核心区, 探讨其不同生态恢复模式下的小流域土地利用变化、生态系统服务及其驱动因素, 有助于制定更具针对性的精细化管理策略, 实现生态系统可持续管理。聚焦梯田与退耕还林还草工程的生态效益, 以黄河二级支流—关川河流域为例, 选取草地主导型、梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型四种典型流域, 利用高分辨率遥感影像、气象、地形、土壤和人口数据, 结合 CASA、InVEST 及地理探测器模型, 分析了 2010—2020 年间各流域的土地利用变化、生态系统服务 (包括土壤保持 (SC)、产水 (WY) 和固碳服务 (NPP)) 及其驱动因素。结果表明: (1) 各流域土地利用变化呈现“破碎化加剧—多样性提升”的耦合特征。水域、水浇地及建设用地普遍扩张, 草地缩减驱动了梯田垦殖, 疏林地转化显著促进了乔木扩增。(2) 四种流域生态系统服务整体呈增长趋势, 其中林地主导型流域 SC 增速最快 ( $14.01 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), 林梯草复合型流域 WY 和 NPP 增速最高 ( $2.73 \text{ mm/a}$  和  $22.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )。(3) 单因子分析显示, NPP 在草地主导型和林梯草复合型流域主要受植被覆盖度驱动, 在梯田主导型和林地主导型流域则受土地利用影响; SC 在草地主导型流域主要受海拔影响, 在梯田主导型和林地主导型流域受坡度影响, 林梯草复合型流域则由太阳辐射和降水量驱动; WY 在梯田主导型流域受土地利用影响, 其他流域则主要由降水量主导。(4) 双因子交互驱动表明, 土地利用、植被覆盖度、气象及地形要素间的协同作用增强了对生态系统服务空间分异的解释力。综上, 研究揭示了黄土丘陵沟壑区不同生态恢复模式下土地利用变化及生态系统服务的复杂性和异质性, 强调了多因子在塑造下垫面特征及生态系统服务中的关键作用, 为脆弱生态区生态恢复与多目标土地可持续管理提供了科学依据。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 梯田; 退耕还林; 生态系统服务; 地理探测器

## Ecosystem services and driving factors under different ecological restoration models in the Loess Hilly and Gully Region

CHEN Le<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1,2,3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 National Field Scientific Observation and Research Station of Earth Key Belt in Shaanxi Loess Plateau, Xi'an 710061, China

**Abstract:** The Loess Plateau hilly and gully region represents a critical zone for soil erosion control and ecological restoration in China. Investigating land use changes, ecosystem services, and their driving factors in small watersheds under varying ecological restoration models is essential for formulating precise management strategies to achieve sustainable

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (U21A2011, 41971129); 国家重点研发计划课题 (2022YFF1300403)

**收稿日期:** 2024-10-10; **网络出版日期:** 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

ecosystem management. Focusing on the ecological benefits of terracing and the the Grain for Green Program, this study selected the Guanchuan River Basin, a secondary tributary of the Yellow River, as a case study. Four representative watershed types—grassland-dominated, terraced-dominated, forested-dominated, and mixed (forest-terrace-grassland)—were analyzed using high-resolution remote sensing data combined with meteorological, topographic, soil, and population datasets. Using the CASA, InVEST, and Geodetector models, the study evaluated land use changes, ecosystem services (soil conservation (SC), water yield (WY), and carbon sequestration (NPP)), and their driving factors from 2010 to 2020. The findings reveal: (1) Land use changes across different watersheds exhibited a dual trend of “increased fragmentation” and “enhanced diversity”, characterized by expansion of water bodies, irrigated land, and construction areas. The reduction of grasslands has driven terrace cultivation, while the conversion of sparse forests significantly promoted forest expansion. (2) All ecosystem services exhibited an overall upward trend: SC in forested-dominated watersheds showed the most significant growth ( $14.01\text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), while WY and NPP in mixed watersheds experienced the highest increases ( $2.73\text{ mm/a}$  and  $22.63\text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , respectively). (3) Univariate drivers analysis indicated that NPP in grassland-dominated and mixed watersheds was mainly driven by vegetation coverage, whereas land use type emerged as the key driver in terraced-dominated and forested-dominated watersheds. SC was predominantly influenced by elevation in grassland-dominated watersheds, by slope in terraced-dominated and forested-dominated watersheds, and by solar radiation and precipitation in mixed watersheds. WY in terraced-dominated watersheds was strongly determined by land use, while in other watersheds it was controlled by precipitation. (4) Bivariate interaction analysis showed that the synergistic effects between land use type, vegetation coverage, meteorological, and topographic factors significantly enhanced the quantitative explanatory power for spatial variations in ecosystem services compared to individual drivers. In summary, this research underscored the spatiotemporal complexity and heterogeneity of land use change and ecosystem services under different ecological restoration models in the Loess Plateau hilly and gully region, highlighting the critical role of multiple factors in shaping underlying surface characteristics and ecosystem services. These findings provide a robust scientific foundation for ecological restoration and multi-objective sustainable land management efforts in ecologically fragile regions.

**Key Words:** Loess hilly and gully region; terraced fields; the Grain for Green Program; ecosystem services; geographical detector

生态系统服务是指生态系统通过生物与非生物要素相互作用,为人类提供的各种产品和服务,如能量循环、物质交换和生物多样性维持<sup>[1]</sup>,构成人类生存与发展的基础<sup>[2-3]</sup>。在全球气候变化和人类活动扩展的背景下,生态系统结构和功能正在发生深刻变革,尤其在脆弱生态区,生态系统服务面临严峻挑战<sup>[4-6]</sup>,区域生态系统结构和功能的稳定性受到显著影响<sup>[7]</sup>。强化脆弱区生态系统服务综合研究,不仅有助于揭示全球变化背景下人地耦合系统的生态阈值与反馈机制,还能通过量化恢复措施的多尺度协同效应,为差异化生态修复策略的循证设计与适应性管理提供决策框架<sup>[5, 8]</sup>。

黄土丘陵沟壑区是中国水土流失最严重的地区之一<sup>[9-10]</sup>,因其黄土层、陡峭地形、沟壑发育、降水不均和植被覆盖率低,导致水土流失和土地退化严重,生态系统服务功能持续退化<sup>[11]</sup>。长期不合理土地利用加剧了表土流失、土壤肥力下降,改变了水文特征并增加了洪涝风险,削弱了农业生产力和生态系统稳定性<sup>[12]</sup>。为应对生态挑战,国家自 20 世纪 50 年代以来实施了坡改梯田、飞播造林、退耕还林和小流域综合治理等工程措施,显著提高了植被覆盖率并恢复了部分生态系统服务功能<sup>[13-15]</sup>。梯田和退耕还林工程作为关键生态项目,有效减少了土壤侵蚀,提升了水土保持功能,并提高了农业生产力<sup>[16-17]</sup>,成为中国最成功的生态建设项目之一<sup>[14, 18]</sup>。研究表明,梯田通过增加地表粗糙度,增强了水量平衡调节和土壤持水能力,显著提升了土地稳定性<sup>[19]</sup>。梯田建设和退耕还林不仅增强了水土保持和水资源调节功能<sup>[20]</sup>,还显著提升了碳汇<sup>[21]</sup>、气候调节和生物多样性<sup>[22]</sup>。植被恢复促进了多年生植物和本土物种回归,提升了物种多样性和生态系统抗干扰能力<sup>[23-24]</sup>,有效缓解了气候变化下降雨和径流波动对土壤侵蚀的影响<sup>[9]</sup>。此外,生态工程增强了生态系统服务的协同效应,坡地退耕还林在短期内可能对粮食产量产生影响,但梯田产量较坡耕地提高了 27% 以上,弥

补了这一影响<sup>[25]</sup>。生态恢复措施对居民生计和经济也产生了深远影响,尽管短期内减少了可利用土地,但通过平衡生态保护与经济发展,生态修复与可持续发展可得以协调推进<sup>[22]</sup>。这一系列研究为黄土高原生态治理与可持续发展提供了重要理论依据和实践指导。

尽管生态修复工程已取得显著成效,但不同生态恢复模式通过改变下垫面组分结构产生的景观异质性,导致生态系统服务提升效果呈现显著空间分异<sup>[16,26]</sup>。值得注意的是,在气候—地形—土壤因子相对趋同背景下,不同生态恢复模式主导的生态系统服务演变及其驱动因素的分异特征仍不明确,制约着恢复措施的精准配置。因此,本研究聚焦黄土丘陵沟壑区的梯田和退耕还林还草工程,以黄河二级支流—关川河流域为核心对象,基于高分辨率遥感影像、气象、DEM、坡度、土壤和人口数据,结合 InVEST、CASA 模型及地理探测器,分析了 2010 至 2020 年梯田主导型、林地主导型、草地主导型和林梯草复合型四种典型子流域的土地利用变化特征、生态系统服务(产水(WY)、土壤保持(SC)及固碳(NPP))及其驱动因素,旨在深入理解不同生态恢复模式下的生态系统服务功能,为脆弱生态区多目标决策与适应性管理提供科学依据。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

关川河流域地处黄土高原西南部(图 1),以梁状、梁峁状高原和丘陵地形为主<sup>[27]</sup>。该流域地形破碎、降

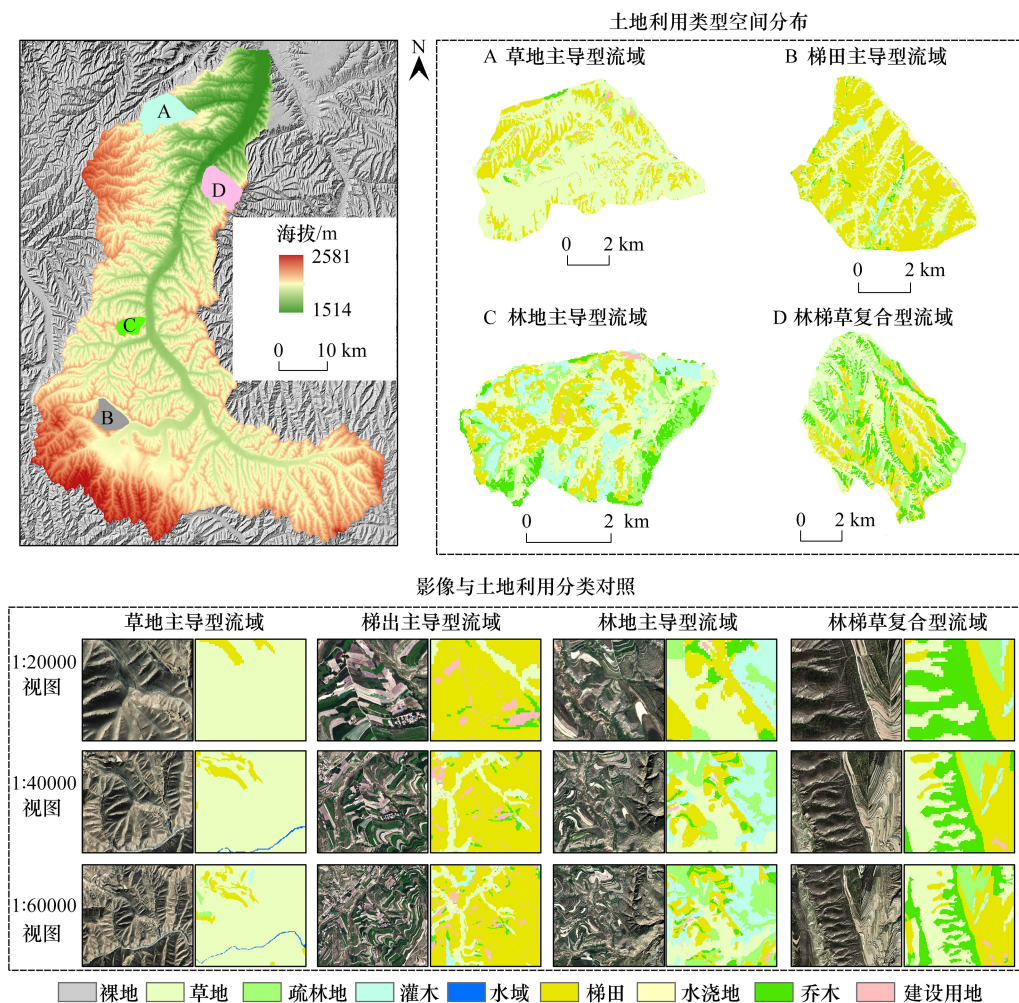


图 1 流域分布及土地利用图

Fig.1 Watersheds distribution and land use map

水集中、土壤黏性低、保水性差,导致严重的水土流失,成为黄土高原最脆弱的流域之一<sup>[28-29]</sup>。

本研究聚焦于黄土丘陵沟壑区的坡改梯田与退耕还林/还草措施,在关川河流域选取了草地主导型、梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型四个典型小流域,代表该区域内不同的土地利用模式和景观配置,反映生态工程实施的差异性。草地主导型流域(面积 55.57 km<sup>2</sup>,草地占比大于 63%)分布于坡度较大(平均坡度 18.42°,海拔 1948.23 m)、干旱(年均温为 7.48℃、年均降水量 283.61 mm、年均潜在蒸散量 996.07 mm)且水土流失严重的区域。该流域人口稀少(平均人口密度为 26.10 人/km<sup>2</sup>),生态恢复主要通过坡耕地退耕还草快速恢复植被、减少水土流失,是短期见效较快的治理方式。梯田主导型流域(面积 29.32 km<sup>2</sup>,农耕梯田占 60%以上)位于坡度相对较缓(平均坡度为 15.04°)、降水较丰富的区域(年均温为 6.98℃、年均降水量 360.52 mm)。该流域人口相对密集(平均人口密度为 154.70 人/km<sup>2</sup>),生态及经济恢复主要依靠坡改梯建设有效控制水土流失,实现粮食安全与经济效益的双重目标。林地主导型流域面积 16.16 km<sup>2</sup>,其中乔木、灌木、疏林地三者面积之和占流域 46%以上。该流域位于中坡过渡带(坡度 16.01°,海拔 2000.08 m),年均温为 7.27℃,年均降水量 331.27 mm,年均潜在蒸散量 960.74 mm,平均人口密度为 74.64 人/km<sup>2</sup>。生态恢复主要依赖坡耕地退耕还林增强了生物多样性和水源涵养功能。林梯草复合型流域面积 47.86 km<sup>2</sup>,其中林地、梯田和草地各占 20%—37%。平均坡度为 18.07°,平均海拔 1940.62 m,平均人口密度为 76.73 人/km<sup>2</sup>。该流域通过多要素空间优化配置,在气候干旱背景下(年均降水 282.40 mm,年均潜在蒸散 982.62 mm),实现了生态修复与农业生产的有机结合,最大程度控制了水土流失,改善了生态环境。

## 1.2 数据与处理方法

### 1.2.1 气象数据

2010、2015 和 2020 年研究区及周边 25 个气象站的日均温度、降水量和蒸散量数据来自国家气象数据服务网和地方气象站。利用 Anusplin 4.3 对逐月气象数据进行空间插值<sup>[30]</sup>,生成空间分辨率为 10 m 的栅格数据集。太阳辐射数据来自 ERA5 气象数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu>),基于 WorldClim V2.1 数据对 ERA5-Land 原始太阳辐射进行了订正<sup>[31]</sup>,并重采样至 10 m。本研究中,小流域面积小,地形遮蔽效应弱,ERA5 足以反映流域辐射趋势,且动态数据优于静态插值。

### 1.2.2 土地利用与地形数据

本研究基于 QuickBird、GF-2 和 GF-7 影像,结合野外实测数据及 Google 采样数据(470 个野外样本点、240 个 Google Earth 采样点),采用面向对象的遥感解译方法,制备了 2010 年、2015 年和 2020 年的高精度土地利用数据集,空间分辨率为 1 m,解译精度均超过 95%。土地利用类型包括梯田、乔木、灌木、疏林地、草地、水域、水浇地、建设用地和裸地。分类视图效果见图 1,在高空间视图(1:20000)支持下,地类单元的形态细节及空间分布特征被精准重构,地块边界在复杂地形和多地类交错区域的提取精度显著;当影像尺度放大至 1:60000 时,提取的地类边界仍保持完整连贯,精度未见衰减,进一步证明土地利用分类的准确性。另外,研究基于 GF-7 影像生成空间分辨率为 5 m 的 DEM 和坡度。为满足研究需求,土地利用和地形数据均被重采样至 10 m 分辨率。

### 1.2.3 土壤数据

土壤数据集包含土壤厚度、质地、有机碳含量及土壤深度等关键参数,来自全球权威的世界土壤数据库(HWSD,<https://iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/>),该数据库整合了多种全球土壤数据来源,提供高精度空间分布数据,广泛应用于生态环境、气候变化和土地利用等领域,确保数据的科学性与准确性。本研究中小流域内成土母质通常较均一,HWSD 土壤数据分辨率可表征主导土壤类型,结合地形指数校正局部变异,满足模型需求。

### 1.2.4 NDVI 和植被覆盖度数据(FV)

NDVI 数据来自美国国家航空航天局的 MOD13Q1 数据,时空分辨率分别为 16 天和 250 m×250 m。为确保数据兼容性和可用性,MOD13Q1 数据通过 MODIS 重投影工具进行重投影和拼接<sup>[32]</sup>。采用最大值合成法生

成月度归一化植被指数,并重采样至  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。同时,利用像元二分模型计算生成植被覆盖度(FV)。

### 1.2.5 人口密度数据(PD)

2010、2015 和 2020 年的人口密度数据来源于 WorldPop 中心(<https://hub.worldpop.org/>)。空间分辨率  $100\text{m}$ ,可识别小流域村落级热点,耦合土地利用变化分析人类活动对生态服务的压力。根据研究需要,将人口数据重采样至  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 生态系统服务评估

鉴于黄土丘陵沟壑区的主要生态问题,研究选择了三类典型生态系统服务:土壤保持(SC)、产水(WY)和固碳(NPP)。

#### (1) 土壤保持服务(SC)

土壤保持服务以土壤保持量为指标,定义为无植被覆盖或无管理条件下的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,通过修正的通用土壤流失方程(RUSLE 模型)计算<sup>[10]</sup>,以评估生态系统减少土壤侵蚀的贡献。

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

式中,SC、RKLS 和 USLE 分别表示土壤保持量、潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量( $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ );L 为坡长因子,S 为坡度因子,C 为植被覆盖因子,P 为管理因子。R 为降水侵蚀因子( $\text{MJ mm}/(\text{hm}^2 \text{ h a})$ )。各因子计算公式如下:

R 因子基于 Wischmeier 和 Smit<sup>[33]</sup>建立的基于指数函数的月降雨侵蚀力模型获得:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10 \left[ 1.5 \times \lg \left( \frac{P_i^2}{P_y} \right) - 0.8188 \right] \quad (2)$$

式中, $P_i$ 为月平均降水量(mm), $P_y$ 为年均降水量(mm);

K 因子与土壤质地、降雨径流、有机碳、土壤渗透等有关,通过 EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator)模型计算<sup>[34]</sup>:

$$K = \{ 0.2 + 0.3 \exp [-0.0256 \text{ sand} \times (1 - \text{silt}/100)] \} \times \left[ \frac{\text{silt}}{\text{clay} + \text{silt}} \right]^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25 \text{ soc}}{c + \exp(3.72 - 2.95 \text{ soc})} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.7(1 - \text{sand}/100)}{(1 - \text{sand}/100) + \exp(-5.51 + 22.9(1 - \text{sand}/100))} \right] \quad (3)$$

式中,silt、sand、clay 分别指的是粉粒、沙粒和黏粒含量(%);soc 指的是有机碳含量(%).

坡度因子(S)指地形坡度对土壤流失的影响。根据坡度的不同,采用不同的公式进行计算:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta + 0.05 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & 10^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\theta$ 为坡度角度。该公式反映了坡度对水流和土壤流失的影响,坡度越大,土壤流失的可能性越高。

坡长因子(L)用于反映坡面的长度对土壤侵蚀的影响。坡长越大,水流对土壤的侵蚀力越强。计算公式为:

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (5)$$

式中,m 是坡长因子指数, $\lambda$  为坡面长度。

植被覆盖因子(C)反映了植物覆盖对土壤侵蚀的保护作用。植被越密,土壤流失越少。具体计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1 & FV = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & 0 < FV \leq 78.3\% \\ 0 & FV > 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

式中,FV 为植被覆盖度,c 为覆盖度对应的指数。该因子根据不同植被覆盖度调整土壤流失的程度。

$P$  因子反映了人为水土保持措施对土壤侵蚀的减缓作用,其值域区间(0—1)反映不同恢复措施的水土调控效能。本研究基于黄土高原丘陵沟壑区第 5 副区典型小流域观测数据<sup>[35]</sup>,确立地类赋值方案:梯田(0.01)、乔木(0.05)、灌木(0.1)、疏林地(0.17)、草地(0.3)、水浇地(0.4);裸地与建设用地取极值 1,指示无防护状态;水域赋 0 值表征零侵蚀风险区。

### (2) 产水服务(WY)

InVEST 模型用于计算产水量,核心基于水文循环过程。模型综合考虑蒸散发、降水、土壤深度、径流、植被水分利用效率和根系深度等参数,评估区域水资源产出能力<sup>[36]</sup>。其计算公式如下:

$$WY = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \times P_i \quad (7)$$

式中, $WY$  为月产水量(mm); $P_i$  为月降水量(mm); $AET$  为实际蒸散量(mm),使用 Budyko 水热平衡方程进行计算:

$$AET = \frac{P_i \left(1 + w \frac{PET_i}{P_i}\right)}{1 + w \frac{PET_i}{P_i} + \left(\frac{PET_i}{P_i}\right)^{-1}} \quad (8)$$

式中, $w$  为植物水利用系数,用于调整潜在蒸发蒸腾和降水之间的关系。本研究基于关川河流域植被蒸腾调控能力梯度,确立地类赋值方案:乔木(2.0)、梯田(1.2)、灌木(1.0)、水浇地(0.8)、疏林地(0.6)、草地(0.5)、裸地(0.1)。 $PET_i$  为第  $i$  月的潜在蒸散(mm),计算公式如下:

$$PET_i = K_c \times ET_i \quad (9)$$

式中, $K_c$  为作物蒸发蒸腾系数,反映了作物类型和生长阶段对蒸发蒸腾的影响。 $ET_i$  为第  $i$  月的参考作物蒸发蒸腾。另外,模型中使用的土壤深度数据来源于 HWSD 数据库。

### (3) 固碳服务(NPP)

CASA 模型是基于光能利用率的概念模型,是估算净初级生产力(NPP)的重要方法之一<sup>[20]</sup>。研究基于 MODIS 数据,采用 CASA 模型进行 NPP 估算,公式如下:

$$NPP_i = (FPAR_i \times PAR_i) \times (\varepsilon_{\max} \times T_{\varepsilon i} \times W_i) \quad (10)$$

式中, $NPP_i$  为第  $i$  月的净初级生产力; $FPAR_i$  为  $i$  月的光合有效辐射比,通过 NDVI 估算; $PAR_i$  为第  $i$  月的光合有效辐射; $\varepsilon_{\max}$  为最大光能转换率,取全球公认的值  $0.389 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ;  $W_i$  第  $i$  月的水分应力因子,表示土壤水分对植物生长的影响,按照 Xiao 等<sup>[37]</sup>提出的方法估算。 $T_{\varepsilon i}$  第  $i$  月的温度应力因子,包含低温( $T_{\varepsilon i1}$ )和高温( $T_{\varepsilon i2}$ )。具体的计算公式如下:

$$T_{\varepsilon i} = T_{\varepsilon i1} \times T_{\varepsilon i2} \quad (11)$$

$$T_{\varepsilon i1} = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}} - 0.0005 \times (T_{\text{opt}})^2 \quad (12)$$

$$T_{\varepsilon i2} = \{1.184 / [1 + e^{(0.2 \times (T_{\text{opt}} - 10 - T))}]\} \times \{1 / [1 + e^{(0.3 \times (-T_{\text{opt}} - 10 + T))}]\} \quad (13)$$

式中, $T_{\text{opt}}$  表示植物生长的最适温度,定义为 NDVI 值在一年内达到最高时的月平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。 $T$  代表月平均温度。

### 1.3.2 生态系统服务均值及趋势计算

研究通过计算栅格点的多年均值来评估生态系统服务。采用回归方程斜率来表征监测时段内每个栅格点的生态系统服务变化趋势;以 SC 为例,具体计算方法如下<sup>[38]</sup>:

$$SC_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n SC_i}{n} \quad (14)$$

$$SC\_trend = \frac{n \times \sum_{i=1}^n SC_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n SC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (15)$$

式中,  $n$  是研究时间序列的长度;  $SC_i$  表示第  $i$  年的 SC。通过回归方程斜率代表研究区域监测时段内每个栅格点生态系统服务的变化趋势。 $trend > 0$ , 代表该栅格内生态系统服务状况有改善, 且数值越大说明改善效果越明显。反之, 则表明该栅格内生态系统服务状况变差。

### 1.3.3 地理探测器

地理探测器是一种空间统计分析方法, 基于假设: 若自变量显著影响因变量, 则二者的空间分布应具有相似性<sup>[10]</sup>。该方法可用于揭示地理要素的空间分异特征及其驱动机制。研究选取人口密度 (PD)、温度 (TMP)、降水 (PRE)、太阳辐射 (SR)、潜在蒸散 (PET)、坡度 (SLOPE)、海拔 (DEM)、植被覆盖度 (FV)、土地利用类型 (LUCC) 为驱动因素, 采用因子探测和交互作用探测, 分析各流域生态系统服务的驱动力。因子探测评估单一因素  $X$  对因变量  $Y$  空间分异的贡献, 并通过  $q$  值量化, 计算方法如下:

$$q = 1 - \left( \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \right) \quad (16)$$

式中,  $h=1, 2, \dots, L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma^2$  和  $\sigma_h^2$  为层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差。 $q$  取值范围为  $[0, 1]$ , 值越大表明自变量对因变量的影响力越大, 反之则影响力越小。

交互作用探测评估两个因子共同作用对因变量的影响, 判断其是否增强、减弱或独立。通过比较交互  $q$  值  $[q(X_1 \cap X_2)]$  与单因子  $q$  值  $[q(X_1)、q(X_2)]$  及其和  $[q(X_1) + q(X_2)]$ , 交互作用分为五类: 非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化特征

2010—2020 年间, 各流域土地利用变化总体呈现“破碎化加剧”和“多样性提升”的双重趋势 (图 1、图 2)。水域和水浇地面积普遍增长、形态趋于复杂化。建设用地在所有流域均呈现增长态势, 其中梯田主导型流域呈显著增加, 与城镇化进程密切相关。草地面积占比在草地主导型、梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型流域分别减少 5.33%、10.95%、10.01% 和 8.11%, 草地向梯田转化是草地主导型和梯田主导型流域的主导趋势, 导致梯田面积占比分别增加 3.31% 和 4.84%, 梯田形态趋于复杂、干扰程度显著增加。林地面积占比在草地主导型、梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型流域分别增加 0.59%、3.42%、22.31% 和 3.84%, 主要受植树造林和撂荒地再植树推动。特别是林地主导型流域, 乔木、灌木和疏林地面积分别增加 6.01%、7.45% 和 8.85%, 且灌木和疏林地逐渐被乔木取代, 促使乔木连通性增强, 覆盖率增加。林梯草复合型流域则表现出乔木扩展与草地梯田化的双重趋势, 乔木和梯田面积占比分别增加了 8.19% 和 2.36%, 形态复杂性增强, 聚集性上升。灌木微增 0.19%, 疏林地面积占比从 14.31% 降至 9.77%, 结构趋于分散。

### 2.2 生态系统服务

图 3 显示了 4 种流域类型 SC、WY 和 NPP 的空间分布及趋势变化。各流域年均单位面积 SC 梯田主导型 ( $507.86 \text{ t/hm}^2$ ) > 林地主导型 ( $374.66 \text{ t/hm}^2$ ) > 林梯草复合型 ( $267.35 \text{ t/hm}^2$ ) > 草地主导型 ( $220.52 \text{ t/hm}^2$ )。2010—2020 年, 四种流域的 SC 均呈增长趋势, 其中林地主导型和林梯草复合型流域的年增长率较高, 分别为  $14.01 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$  和  $11.62 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。各流域中, 单位面积年均产水量梯田主导型最高, 达到  $87.63 \text{ mm/a}$ 。年际变化中, WY 在林梯草复合型和草地主导型流域呈持续增长趋势, 单位面积年均增幅分别为  $2.73 \text{ mm/a}$  和  $1.19 \text{ mm/a}$ 。单位面积年均 NPP 林地主导型 ( $475.1 \text{ g C m}^{-2}$ ) > 梯田主导型 ( $468.82 \text{ g C m}^{-2}$ ) > 林梯草复合型 ( $374.27 \text{ g C m}^{-2}$ ) > 草地主导型 ( $291.90 \text{ g C m}^{-2}$ )。2010—2020 年, 各流域 NPP 均逐年增长, 其中林梯草复合型

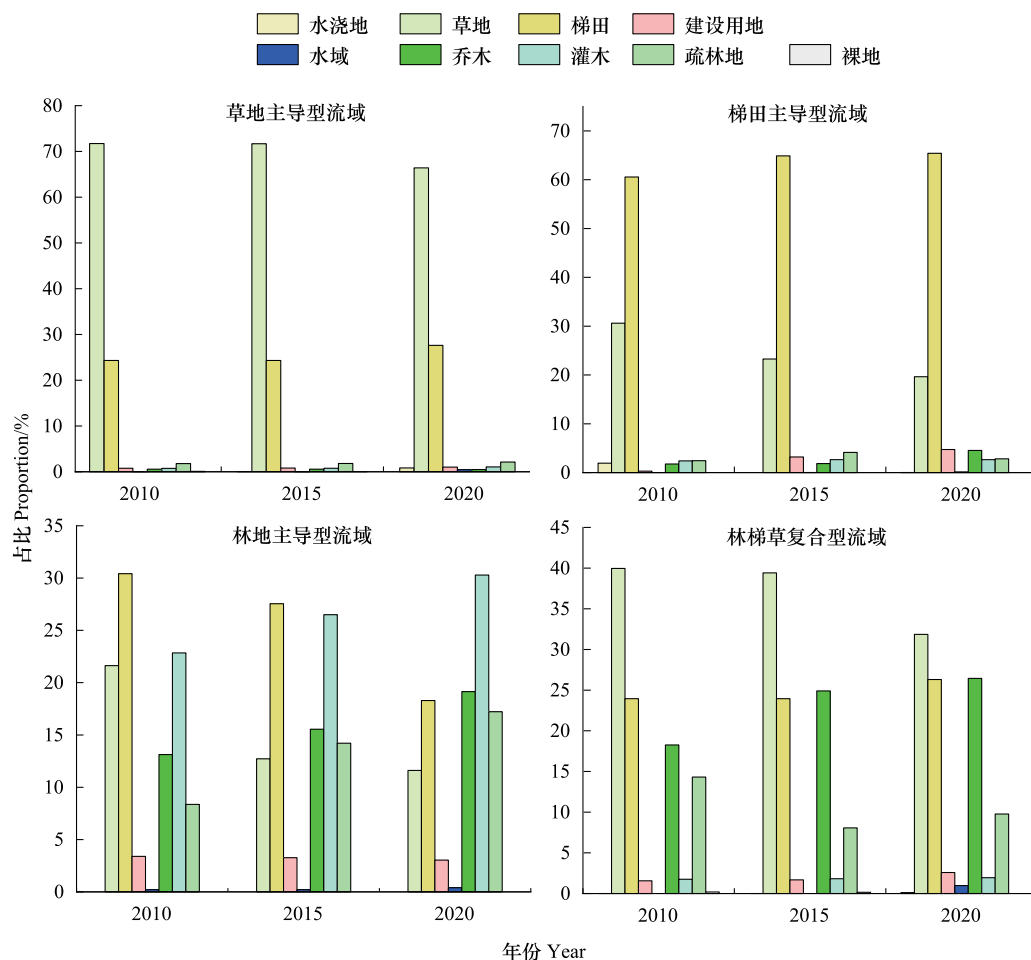


图2 2010—2020年期间四种流域土地利用类型面积占比

Fig.2 Area proportion of four watershed land use types from 2010 to 2020

( $22.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 增长最快,草地主导型次之,林地主导型和梯田主导型相对较慢。

### 2.3 生态系统服务驱动力

本研究通过地理探测器分析了9个自变量对3个因变量的影响(图4)。单因子探测结果显示,NPP在草地主导型和林梯草复合型流域的空间分异主要受植被覆盖度影响( $q$ 值分别为0.807和0.545),在梯田主导型和林地主导型流域则主要受土地利用/覆被影响,其次是植被覆盖度。SC在草地主导型流域主要受海拔和降水量影响( $q$ 值分别为0.461和0.457),在梯田主导型和林地主导型流域则由坡度主导( $q$ 值分别为0.494和0.419)。林梯草复合型流域中,SC的空间分异受多因子影响,太阳辐射( $q=0.545$ )贡献最大,其次是降水量和潜在蒸散量。WY在草地主导型、林地主导型和林梯草复合型流域主要由降水量控制, $q$ 值分别为0.86、0.559和0.756,而在梯田主导型流域则以土地利用/覆被的影响最显著。

双因子交互探测表明,因子协同作用增强了对生态系统服务空间分异的解释力。例如,草地主导型流域中,植被覆盖度与降水量的交互作用对NPP影响最显著( $q=0.888$ )。在梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型流域,植被覆盖度与土地利用的交互作用对NPP影响最为显著, $q$ 值分别为0.774、0.601和0.852。草地主导型流域中,SC受坡度与降水量交互作用的影响较大;在梯田主导型和林地主导型流域,坡度与海拔的交互作用显著( $q$ 值分别为0.597和0.670);林梯草复合型流域中,SC则主要受坡度与气象因子(尤其是太阳辐射)的交互作用影响。对于WY,降水量与土地利用的交互作用在各流域均最强, $q$ 值在草地主导型、梯田主导型、林地主导型和林梯草复合型流域分别为0.961、0.833、0.716和0.952。

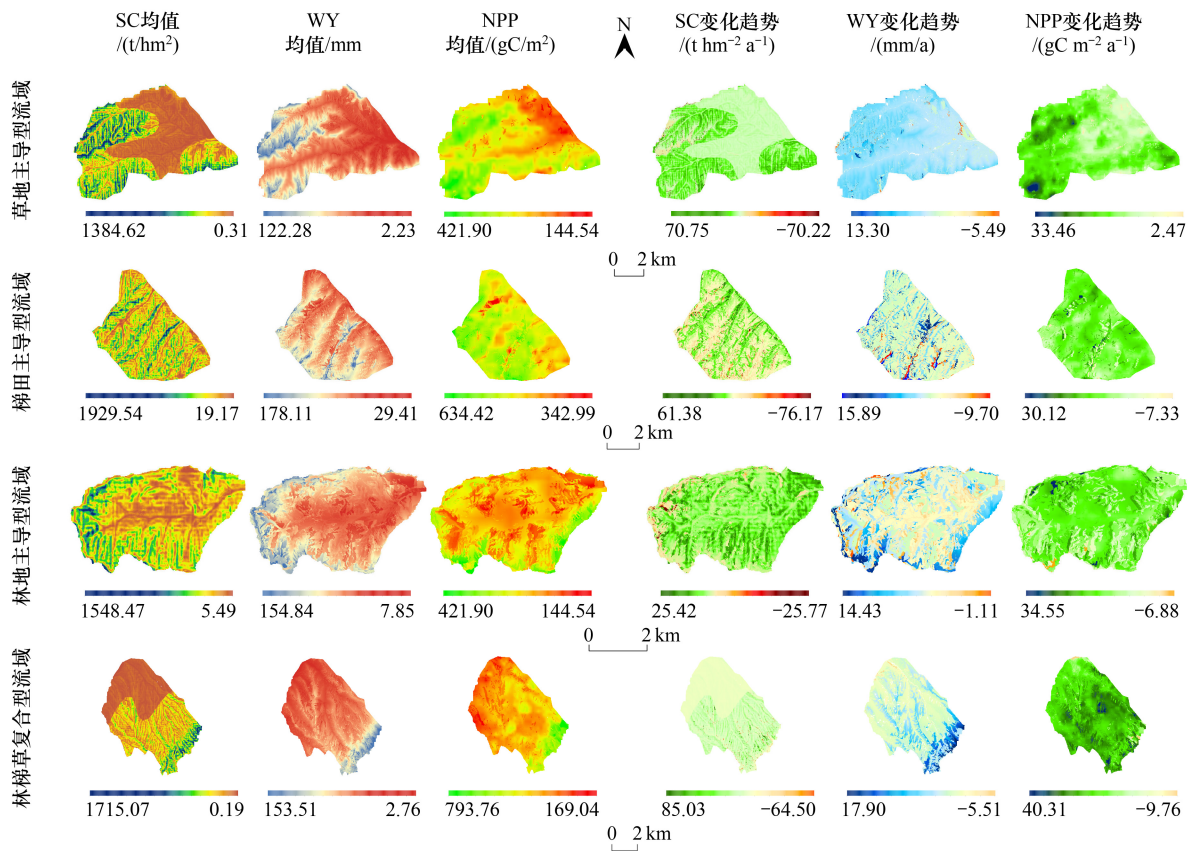


图3 2010—2020年4种流域SC、WY和NPP均值及趋势变化

Fig.3 Mean values and trends of SC, WY, and NPP for four watersheds from 2010 to 2020

SC:土壤保持服务;WY:产水服务;NPP:固碳服务

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用演变

本研究基于高分辨率土地利用产品,定量刻画了2010—2020年间四个典型小流域的土地利用类型空间分布及面积变化特征,深化了对黄土丘陵沟壑区不同生态恢复模式下土地利用动态的理解。各流域水浇地、建设用地和林地的增加反映了区域农业集约化、城镇化加速与生态恢复并行的复合过程,印证了封山育林、退耕还林及小流域综合治理等生态工程对优化水资源配置和提升生态功能的显著成效<sup>[39—41]</sup>。建设用地的扩张体现了城镇化进程的加速,与前人<sup>[10]</sup>的研究形成空间互证。同时,城镇化衍生的资金及技术扩散效应为生态系统修复提供了重要保障<sup>[42—43]</sup>,凸显脆弱生态区城镇化发展与生态保护并行的动态特征。值得注意的是,黄土丘陵沟壑区梯田面积虽保持增长态势,但扩张速率呈现显著下降趋势,其空间受限性主要源于劳动力结构性短缺、人口外流加速及宜垦后备资源匮乏的多重约束<sup>[20,44]</sup>。各流域草地向林地的大规模转型反映了区域在调整产业结构及发展生态林和经济林方面的政策导向<sup>[45]</sup>。此外,研究区通过发展梯田农业与特色林果经济,构建了“生产—生态”协同发展模式,在优化产业结构、提升劳动效率的同时,实现了经济效益与生态保护的协调发展,促进了黄土丘陵沟壑区的可持续发展。

#### 3.2 生态系统服务变化

梯田主导型流域年均SC最高,凸显了其在控制径流和减少土壤侵蚀方面的优势,支持了Wei等<sup>[17]</sup>和Chen等<sup>[20]</sup>的研究。梯田通过地形改造降低地表径流强度和拦截泥沙,有效防止了土壤流失,特别是在高降

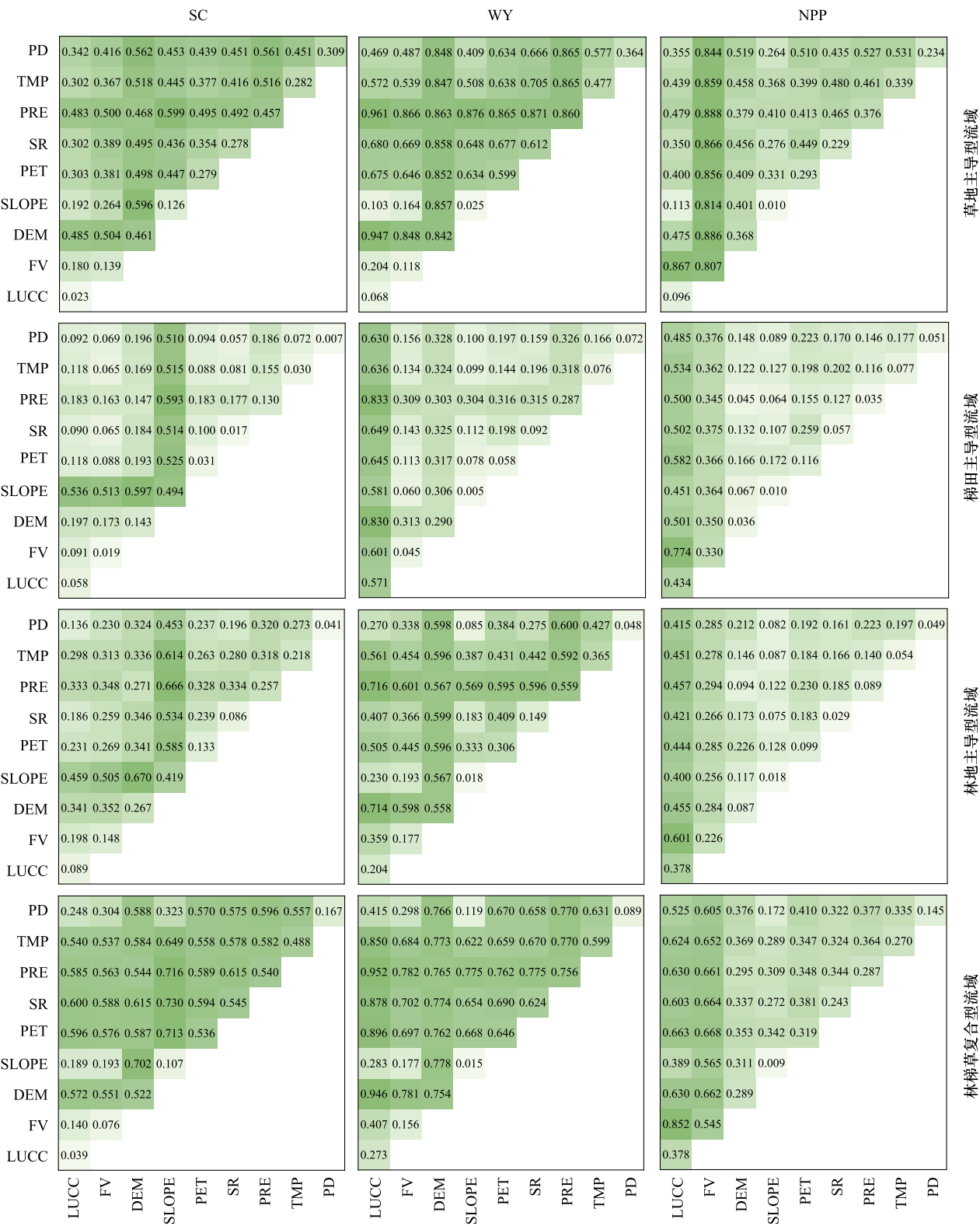


图 4 驱动因子对 4 种流域生态系统服务的影响

Fig.4 The impact of driving factors on ecosystem services in four types of watersheds

PD:人口密度;TMP:温度;PRE:降水;SR:太阳辐射;PET:潜在蒸散;SLOPE:坡度;DEM:海拔;FV:植被覆盖度;LUCC:土地利用类型

雨强度区域中。同时,梯田农业优化了降水入渗和储存,促使年均 WY 显著高于其他流域类型,进一步验证了其在水资源管理中的突出作用<sup>[46]</sup>。然而,梯田生态系统服务功能对高强度人工管理的依赖性较强,农耕梯田

撂荒或管理不当可能导致功能不稳定,甚至引发土壤贫瘠化和化学污染等问题。林地主导型流域 SC 主要受益于林地植被生物量和根系密度的增加,其深根系通过提高土壤稳定性和减少侵蚀展现出较为长期稳定的生态效应。此外,林地主导型流域年均 NPP 最高,得益于植被高生物量和强碳汇能力的综合作用,与刘国彬等<sup>[11]</sup>的研究结果一致,表明林地 in 提升生态系统生产力和碳固存方面具有重要作用,但林地的高蒸腾需求可能对区域水资源供需平衡构成一定压力。草地主导型流域因草地根系浅,土壤保持能力较弱<sup>[24]</sup>,但在风蚀和干旱环境中,其地表覆盖功能能够提供基本生态服务。同时草地较低的蒸腾需求优化了水资源利用效率,使其在干旱和高寒地区展现出重要的生态适应性。林梯草复合型流域在水资源供应和碳固存方面的增长,表明多样化生态恢复措施的有效性,与 Feng 等<sup>[47]</sup>提出的空间异质性理论相符。通过整合梯田、林地和草地的功能优势,林梯草复合型流域显著增强了产水与碳固存的协同性,并通过空间异质性提高了生态系统的韧性与稳定性,说明多功能流域管理策略能够有效优化生态系统服务配置,为区域可持续发展提供了科学依据。

### 3.3 生态系统服务驱动因素

研究揭示了不同生态恢复模式下生态系统服务时空分异的驱动机制,指出其空间异质性源于植被特征、土地利用方式、气候要素、地形属性与土壤条件的非线性耦合作用,进一步丰富了前人的研究<sup>[10, 16, 42]</sup>。研究发现,NPP 在草地主导型和林梯草复合型流域主要受植被覆盖度影响,这与谢宝妮 等<sup>[48]</sup>的研究相符,体现了植被结构对碳固存能力的直接调控作用。而梯田主导型和林地主导型流域则主要受土地利用强度影响,其中梯田通过地形重塑显著提升农田生产力,林地则凭借高生物量密度和深根系实现碳汇功能强化,印证了土地管理措施对生态系统生产力的定向调控理论<sup>[11, 13]</sup>。土壤保持服务的驱动机制表现出地形-气候-植被的协同特征;草地主导型流域主要由海拔和降水量联合驱动,揭示地形位势与水文过程对浅根植被水土保持效能的复合影响<sup>[10, 49]</sup>;梯田主导型和林地主导型流域,坡度是主要驱动因素,揭示了梯田建设对土壤保持的关键作用以及林地深根系统在陡坡环境下的生态稳定性<sup>[10-11]</sup>。林梯草复合型流域则呈现太阳辐射与降水的协同驱动模式,凸显多土地利用系统中气候要素对水土保持功能的突出作用<sup>[5]</sup>。产水服务形成气候—土地利用的二元驱动格局:草地主导型、林地主导型和林梯草复合型流域主要受降水量驱动,梯田主导型流域则更多受土地利用影响,其优化的土地管理和水资源利用措施显著提升了产水效率,支持了 Mesfin 等<sup>[19]</sup>和 Chen 等<sup>[20]</sup>的结论。

双因子交互探测进一步揭示了多尺度过程的协同放大效应:草地主导型流域中,植被覆盖度与降水量的交互作用对 NPP 影响最显著,表明气候—植被耦合是干旱区碳汇功能提升的关键路径<sup>[24]</sup>。在梯田主导型和林地主导型流域,植被覆盖度与土地利用类型的交互作用更具影响力,与 Chen 等<sup>[50]</sup>的研究结果相符,进一步验证了脆弱生态区“空间优化-植被恢复”协同增效理论<sup>[11]</sup>。SC 驱动机制方面,在梯田主导型和林地主导型流域内,坡度与海拔的交互作用对 SC 影响最显著,与 Sun 等<sup>[9]</sup>的研究一致。而在林梯草复合型流域中,坡度与气象因子的交互作用对 SC 影响最强烈,这进一步验证了复杂地形、气候与植被属性交互对水土保持功能的关键调控作用<sup>[10]</sup>。产水服务的多因子驱动机制呈现典型的“气候-土地利用”二元耦合特征。具体表现为:(1)降水量与土地利用的交互效应主导产水空间分异:梯田主导型流域通过雨水收集工程与微地形调控技术协同提升降水-径流转化效率<sup>[50]</sup>;林地主导型流域则依托冠层截留调控与深层根系水分输导维持“降水-蒸散”动态平衡<sup>[13-14]</sup>。(2)林-梯-草复合型流域中,气候波动与人为干预的级联效应进一步解析了异质景观水文过程的多尺度响应机制,为半干旱区水土资源优化调控提供了理论依据。

## 4 结论

本文基于 CASA、InVEST 和地理探测器模型,分析了黄土丘陵沟壑区不同流域的土地利用变化、生态系统服务及其驱动力,揭示了不同生态恢复模式下的生态系统服务差异及其驱动机制。主要结论如下:

(1) 2010—2020 年,各流域土地利用变化呈现“破碎化加剧”和“多样性提升”的双重趋势,草地向梯田和林地转化、疏林地和灌木向乔木转化趋势明显。

(2) 四种流域的生态系统服务均呈增长趋势, 梯田主导型流域的 SC 和 WY 最优, 林地主导型流域 NPP 表现突出。

(3) 草地主导型和林梯草复合型流域的 NPP 主要受植被覆盖度影响, SC 由海拔、降水和太阳辐射驱动, WY 由降水量主导; 梯田主导型和林地主导型流域的 NPP 和 WY 主要受土地利用影响, SC 由坡度决定。双因子交互作用进一步增强了对生态系统服务空间分异的解释力。

研究结果凸显了生态工程与自然条件共同塑造了脆弱生态区的下垫面特征及生态系统服务的多样性与适应性。未来生态恢复应采用精细化管理策略, 以确保区域生态与经济效益的长期可持续性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Daily G C. Nature's services; societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC; Island Press, 1997.
- [ 2 ] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [ 3 ] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [ 4 ] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [ 5 ] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 赵文武, 王帅. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展. *中国基础科学*, 2020, 22(3): 25-30.
- [ 6 ] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 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. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13.
- [ 7 ] Milanović M, Knapp S, Pyšek P, Kühn I. Linking traits of invasive plants with ecosystem services and disservices. *Ecosystem Services*, 2020, 42: 101072.
- [ 8 ] Dong X B, Wang X W, Wei H J, Fu B J, Wang J J, Uriarte-Ruiz M. Trade-offs between local farmers' demand for ecosystem services and ecological restoration of the Loess Plateau, China. *Ecosystem Services*, 2021, 49: 101295.
- [ 9 ] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena*, 2014, 121: 151-163.
- [ 10 ] 廖洪圣, 卫伟, 石宇. 黄土丘陵区典型流域土壤侵蚀时空演变特征及其驱动机制: 以祖厉河为例. *生态环境学报*, 2024, 33(6): 908-918.
- [ 11 ] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
- [ 12 ] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [ 13 ] Cao S X, Chen L, Yu X X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions; a case study in northern Shaanxi Province. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(3): 536-543.
- [ 14 ] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739-741.
- [ 15 ] Jiang W, Wu T, Fu B J. The value of ecosystem services in China: a systematic review for twenty years. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101365.
- [ 16 ] 杨开宝, 刘国彬, 吴发启, 孙宝胜. 黄土高原典型小流域综合治理的水文生态效应 (英文). *生态学报*, 2008, 28(5): 2042-2051.
- [ 17 ] Wei W, Chen D, Wang L X, Daryanto S, Chen L D, Yu Y, Lu Y L, Sun G, Feng T J. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 388-403.
- [ 18 ] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [ 19 ] Mesfin S, Almeida Oliveira L A, Yazew E, Bresci E, Castelli G. Spatial variability of soil moisture in newly implemented agricultural bench terraces in the Ethiopian Plateau. *Water*, 2019, 11(10): 2134.
- [ 20 ] Chen L, Wei W, Tong B, Liu Y X, Liu Z Y, Chen S N, Chen D. Long-term terrace change and ecosystem service response in an inland mountain province of China. *Catena*, 2024, 234: 107586.
- [ 21 ] Zhang J G, Lan Z L, Li H W, Jaffar M T, Li X, Cui L L, Han J L. Coupling effects of soil organic carbon and moisture under different land use types, seasons and slope positions in the Loess Plateau. *Catena*, 2023, 233: 107520.
- [ 22 ] Liu Y F, Dunkerley D, López-Vicente M, Shi Z H, Wu G L. Trade-off between surface runoff and soil erosion during the implementation of ecological restoration programs in semiarid regions: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136477.
- [ 23 ] 武春华, 陈云明, 王国梁. 黄土丘陵区典型群落特征及其与环境因子的关系. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 64-69.
- [ 24 ] 程积民, 井赵斌, 金晶炜, 高阳. 黄土高原半干旱区退化草地恢复与利用过程研究. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 267-279.

- [25] Liu X H, He B L, Li Z X, Zhang J L, Wang L, Wang Z. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the Loess Plateau regions of China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 797-807.
- [26] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. *生态学报*, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [27] 李海防, 卫伟, 邓居礼, 王丽君. 关川河流域 1995—2010 年降雨特征及其水土流失效应. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 84-93.
- [28] 赵传普, 徐学选, 陈天林, 张少妮. 关川河流域土地利用变化对径流的影响. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 83-87.
- [29] 陈乐, 卫伟. 多源土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度评估. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 177-186, 194.
- [30] 王军邦, 王居午, 叶辉, 刘亚, 何洪林. 2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 2017, 2(1): 73-80, 205-212.
- [31] 任婧宇, 彭守璋, 曹扬, 霍晓英, 陈云明. 1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 621-633.
- [32] Dwyer J, Weiss J, Schmidt G, Logar T, Burrell R, Stubbendieck G, Rishia J, Misterek B, Jia S, Heuser K. The MODIS Reprojection Tool. *AGU Spring Meeting Abstracts*, 2001, U21A-24.
- [33] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation planning. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1965: 282.
- [34] 刘宝元, 毕小刚, 符素华. 北京土壤流失方程. 北京: 科学出版社, 2010.
- [35] 张富, 姚进忠, 雷升文, 王守俊. 甘肃省水土保持综合治理效益研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2014.
- [36] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 巩杰, 燕玲玲. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1728-1743.
- [37] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [38] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 郭辉, 张鹏飞, 孟凡浩, 刘铁. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 50-63.
- [39] 张洵, 岑云峰, 高照良, 李永红, 孙贯芳, 刘文博. 2001—2020 年黄土高原生态环境质量对气候及土地利用变化的响应. *水土保持通报*, 2023, 43(03): 234-244.
- [40] 李振涵, 李静文, 于洪伟, 郑晓燕, 吴海滨, 戚菁, 胡承志, 曲久辉. 汾河流域水生态环境保护与可持续发展策略研究. *环境科学学报*, 2024, 44(8): 1-11.
- [41] Wang L, Wei W, Sun G, Fu B J, Chen L D, Feng X M, Ciais P, Mitra B, Wang L X. Effects of inter-basin transfers on watershed hydrology and vegetation greening in a large inland river basin. *Journal of Hydrology*, 2024, 635: 131234.
- [42] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 杨凯悦, 米文宝. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局. *经济地理*, 2020, 40(6): 174-184.
- [43] 毛盛林, 上官周平. 近 20 年黄土高原土地利用/植被覆盖变化特征及其成因. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 213-219.
- [44] Xu D D, Deng X, Guo S L, Liu S Q. Labor migration and farmland abandonment in rural China: Empirical results and policy implications. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 738-750.
- [45] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, Nieminen J. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 2008, 75(3): 319-325.
- [46] Xu M H, Li X L, Liu M, Shi Y, Zhou H K, Zhang B G, Yan J L. Spatial variation patterns of plant herbaceous community response to warming along latitudinal and altitudinal gradients in mountainous forests of the Loess Plateau, China. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 172: 103983.
- [47] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [48] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 244-253.
- [49] 曾麒洁, 李双权, 马玉凤, 张志华, 钱发军, 杜军, 毕会涛. 伊洛河流域土壤保持生态服务功能动态变化. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 350-360.
- [50] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 109-121.