

洮河流域生态系统服务价值的 地形梯度特征及其驱动因素

谢保鹏, 王永强, 陈英, 裴婷婷, 李晓丹

(甘肃农业大学 管理学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 分析洮河流域地形梯度特征下的生态系统服务价值空间分异及其驱动因素, 为促进流域生态保护和社会经济可持续发展提供科学支撑。[方法] 基于 1993—2023 年 6 期土地利用遥感数据, 综合运用生态系统服务价值(ESV)核算模型、地形分布指数和地理探测器方法, 系统探究流域近 30 a 生态系统服务价值的时空演变规律及其地形梯度特征与驱动机制。[结果] ① 流域地形梯度呈现典型阶梯式分布特征, 84.99% 的区域集中分布于第 2—7 梯度, 其中梯度 1—9 的优势地类依次表现为建设用地—水域—耕地—草地—林地—林地—林地—未利用地—未利用地的递变格局; ② 研究期间流域 ESV 总量增加 6.39×10^7 元(增幅 2.36%), 其空间分布沿着地形梯度(由低到高)呈现先增后减的梯度分异特征, 高值区主要分布于靠近青藏高原的梯度 5 和梯度 7 区域, 低值区则集中于黄土高原西南部的梯度 1 和梯度 9 区域; ③ ESV 梯度分异是自然地理要素与社会经济要素协同作用的结果, 其中高程(DEM)作为主导解释因子($q=0.491$)与坡度、土地利用强度等因子的交互作用均呈现双因子增强效应。[结论] 随着地形坡度的增大, 洮河流域 ESV 先增大后减小。1993—2023 年, 低梯度区 ESV 呈负增长, 中、高梯度区 ESV 呈持续增长和稳定增长。ESV 的空间分异主要受自然因素驱动。建议在低坡度地区应严格控制建设用地扩张, 加强水生态修复; 在中等坡度地区应加强生态农业和耕地保护; 在高坡度地区应减少人为干扰, 加强未利用土地管理。

关键词: 生态系统服务价值; 地形梯度特征; 空间分异; 驱动因素; 洮河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0396-13

中图分类号: X171.1

文献参数: 谢保鹏, 王永强, 陈英, 等. 洮河流域生态系统服务价值的地形梯度特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 396-408. Xie Baopeng, Wang Yongqiang, Chen Ying, et al. Topographic gradient characteristics and driving factors of ecosystem service value in Taohe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 396-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.031; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.031.

Topographic gradient characteristics and driving factors of ecosystem service value in Taohe River basin

Xie Baopeng, Wang Yongqiang, Chen Ying, Pei Tingting, Li Xiaodan

(College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The spatial differentiation and driving factors of ecosystem service value under the topographic gradient characteristics of Taohe River basin were explored in order to provide scientific support for promoting ecological protection and sustainable social and economic development in the basin. [Methods] Based on six phases of land-use remote sensing data (1993—2023) and integrated an ecosystem service value (ESV) assessment model, terrain distribution index, and geographical detector method to systematically explore the spatial and temporal evolution laws, topographic gradient characteristics, and driving mechanisms of ESV over the past 30 years. [Results] ① The Taohe River basin features a typical stepped topographic gradient distribution, with 84.99% of its area concentrated in gradients of 2 to 7. The dominant land-use types across gradients 1—9 follow a sequential transition: construction land—water bodies—cropland—grassland—forestland—forestland—forestland—

收稿日期: 2025-04-24

修回日期: 2025-06-23

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目“土地利用变化背景下洮河流域生态系统服务价值时空格局演化”(24JRRA641)

第一作者: 谢保鹏(1988—), 男(汉族), 甘肃省甘谷县人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: xiebp@gsau.edu.cn。

通信作者: 陈英(1969—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理与农村发展等方面的研究。Email: chen@gsau.edu.cn。

unused land-unused land. ② The total ESV of Taohe River basin during the research period increased by 6.39×10^7 yuan (a 2.36% rise). Its spatial distribution is characterized by a gradient differentiation involving initial increases and then decreases along the terrain gradient from low to high. High ESV values were predominantly distributed in gradients 5 and 7 (adjacent to the Qinghai-Xizang Plateau), whereas low values were clustered in gradient 1 and gradient 9 regions within the southwestern Loess Plateau. ③ ESV gradient differentiation emerged from the synergistic interaction of natural geographic and socioeconomic factors, with elevation (DEM) serving as the dominant explanatory factor ($q=0.491$). Its interactions with slope and land-use intensity demonstrate two-factor enhancement effects. [Conclusion] The ESV in the Taohe River basin initially increased and then decreased with rising terrain gradients. From 1993 to 2023, the low-gradient zone exhibited negative ESV growth, whereas the medium-and high-gradient zones featured sustained growth and stabilization. The spatial differentiation of ESV was primarily driven by natural factors. On the basis of these findings, we recommend strictly controlling construction land expansion and enhancing aquatic ecology restoration in low-gradient zones, promoting ecological agriculture and cultivated land protection in medium-gradient zones, and reducing human disturbance while strengthening unused land management in high-gradient zones.

Keywords: ecosystem service value; terrain gradient characteristics; spatial differentiation; driving factors; Taohe River basin

地形作为自然地理格局的基础性构成要素,对土地利用格局及生态系统服务价值的空间分布均会产生重要影响。地形梯度也称为地形的倾斜度或坡度,它反映了地形在不同区域的变化程度,是影响生态系统服务价值分布的重要因素之一^[1];生态系统服务价值地形梯度特征凸显了地形因素对生态系统服务价值空间分布的塑造作用^[2]。在科学技术不断进步的背景下,人类开发活动的垂直范围不断扩大,这一变化无疑会对不同梯度的生态系统服务价值产生不同程度的影响。同时,考虑到当前全球生态环境所面临的严峻挑战,严格执行生态保护政策以及积极开展生态修复工作已刻不容缓。在青藏高原向黄土高原过渡的洮河流域开展研究,理论层面上,明确该区域生态系统服务价值的地形梯度特征,有助于认识不同地形条件下生态系统服务价值分布规律,进一步推动生态系统服务价值评估理论的完善与拓展。实践层面上,通过精准识别不同地形梯度区域的生态系统服务价值及其驱动因素,能够有针对性地制定生态保护与修复策略,科学合理地划定生态保护重点区域,确保生态资源得到优化配置与有效保护。同时为流域内土地利用规划和产业布局提供重要参考,有助于避免在生态系统服务价值高的区域进行不合理的开发建设活动,促进土地资源的可持续利用,实现经济发展与生态保护的协调共进,助力洮河流域的可持续发展。

自1990年以来, Costanza R等^[3]对生态系统服务价值评价的研究取得突破进展后,生态系统服务价值研究视野得到了进一步拓展。从国外研究来看,前人研究多集中在宏观层面,学者从全球以及大区

域尺度出发,例如 Sutton P C^[4]和 MA^[5]工作组沿用生态系统服务价值评估模型,分别对全球生态系统服务经济价值以及生态系统与人类福祉的关系^[6]进行了研究。从国内研究来看,当前大量研究主要集中在长江流域^[7]、黄河流域^[8]、青藏高原区域^[9]以及经济发达等^[10]特定区域的生态系统服务价值总量或平均价值评估,同时针对中国区域的生态系统服务价值研究中,其评估方法主要采用的是谢高地等^[11]改进的价值当量法,该方法根据不同生态系统类型的单位面积价值估算整个区域的生态系统服务价值,在大尺度和小区域上均展现出了广泛的应用性。随着遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术的出现,数据获取与数据处理的效率都得到了极大的提升,关于生态系统服务价值的研究也相应地迈向精细化,与此相关的研究更多地集中在生态系统服务价值的地形梯度特征^[12]以及对人类活动的响应^[13]方面,就生态系统服务价值的地形梯度特征相关研究而言,此前研究大多是利用高程、坡度、坡向、地形起伏度等地形要素对地形梯度进行划分^[14-15]。

综上所述,现有的研究资料存在一定局限性,大多研究缺乏对于地形过渡区域的研究。其次前人研究多采用单一地形要素对地形梯度进行划分,相较而言,地形位指数和地形分布指数可以结合地形因素,深入理解生态系统服务价值与地形之间的内在联系和生态过程。再次之,地形梯度特征下的流域生态系统服务价值分异的影响因素较为复杂,需要进一步深入研究。洮河流域地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,作为黄河上游重要的水源涵养区和甘肃省水电资源开发的重要基地,该流域承担着水

源涵养等重要生态功能^[16]。同时该流域的地形梯度特点表现为复杂的地形起伏、明显的构造地貌特征、水系流域的不对称性以及不同地貌单元之间的差异。因此,深入探究洮河流域的生态系统服务价值的地形梯度特征以及空间分异驱动因素十分必要。为此,本研究首先采用地形位指数来分析洮河流域地形梯度分布特征,其次利用地形分布指数来识别不同地形梯度上的土地利用类型分布特征,接着采用生态系统服务价值(ESV)核算模型量化洮河流域不同梯度上的生态系统服务价值,进一步采用地理探测器识别影响ESV分异的关键驱动因素及其交互效应,最终为促进流域生态保护和经济社会可持续发展提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洮河流域位于黄土高原与青藏高原的过渡地带(图1),流域范围包括甘肃省的兰州市、定西市、临夏州、甘南州、陇南市,青海省的海东市、黄南州以及四川省的阿坝县。2023年该区域土地利用类型以林地和草地为主,占总面积的78.34%,拥有良好的生态基底。流域总面积为 $3.36 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中甘肃省境内流域面积为 $2.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内地势东高西低,以山地地形为主,最大高差约3 000 m。气候上属于温带大陆性气候,年降雨量在300~600 mm。2023年,流域内总人口达到1 446.25万人,且人口主要集中在流域东部的河流沿岸地区。近年来,随着西部大开发战略的实施,作为黄土高原流域重点水土保持区的洮河流域,面临着较大的生态压力。与此同时,国土空间生态修复工作的推进,使得该区域的土地利用布局得以不断优化,生态环境质量也逐步得到改善。

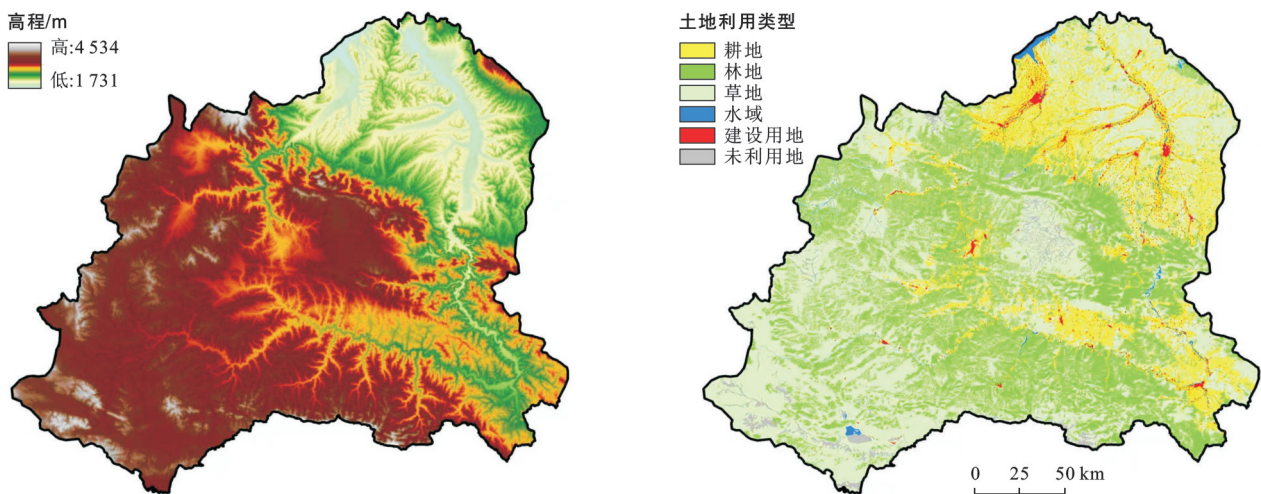
1.2 数据来源

如表1所示,本研究中1993,1999,2005,2011,2017和2023年土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据共享中心,数据分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,总体精度达到85.72%,kappa系数为0.82,整体数据验证精度良好,DEM数据来源于地理空间数据云,坡度、坡向数据利用DEM数据在Arc GIS 10.6平台进行了提取,NDVI数据借助GEE平台进行处理;社会经济数据(GDP、第一产业总产值)来源于甘肃省、青海省、四川省2023年统计年鉴以及国民经济和社会发展公报,四川省阿坝县2023年GDP缺失数据采用线性插值法进行补充,插值得到阿坝县2023年GDP为497.41亿元,经过验证,阿坝县2023年实际GDP为503.19亿元,相对误差为1.15%。本研究所有数据投影均统一为WGS_1984,投影栅格为30 m精度,空间参考为WGS_1984_UTM_zone_48N。

1.3 研究方法

1.3.1 ESV核算模型

参考谢高地^[11]关于ESV的核算方法,进一步结合其修订的中国ESV当量表,依据1993—2023年洮河流域平均粮食产量和过去20 a内流域平均粮食收购价格,遵循“1个标准单位的生态系统服务价值当量因子的价值相当于 1 hm^2 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值,其经济价值量等于全国平均粮食单产市场价值的1/7。”理论对其进行计算,在本研究中,粮食产量以及市场价格均采用洮河流域1993—2023年的平均值,即 $4 541.57 \text{ kg/hm}^2$ 和 2.54 元/kg ,计算得到洮河流域ESV当量因子为 $1 647.94 \text{ 元/hm}^2$,进一步根据价值当量和各土地利用类型面积计算得到洮河流域ESV,计算公式为



注:基于标准地图服务系统下载的标准地图号GS(2019)333号的标准地图制作,底图未做修改。下同。

图1 洮河流域DEM和土地利用现状

Fig.1 DEM and land use status in Taohe River basin

$$ESV = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (A_k V_{ki}) \quad (1)$$

式中:ESV 代表生态系统服务价值(元); m 为土地利

用类型的数量; n 为生态系统服务功能类型数; A_k 表示第 k 种土地利用类型的面积(hm^2); V_{ki} 表示第 k 种土地利用类型第 i 类生态系统功能的价值系数。

表 1 主要数据来源

Table 1 Main data sources

数据	空间分辨率	数据来源
土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境数据共享中心(https://www.resdc.cn)
DEM	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
坡度、坡向	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
年均蒸发量、降水量	1 km	中国科学院资源环境数据共享中心(https://www.resdc.cn)
NDVI	1 km	美国国家航天局(https://www.nasa.gov)
人口密度	30 m	中国科学院资源环境数据共享中心(https://www.resdc.cn)
总人口	1 km	中国科学院资源环境数据共享中心(https://www.resdc.cn)
第一产业总产值		甘肃、青海、四川省 2023 年统计年鉴、国民经济社会发展公报
GDP		甘肃、青海、四川省 2023 年统计年鉴、国民经济社会发展公报

1.3.2 地形位指数

地形位指数能反映某点的地形条件。其通过比较某点高程与周围区域平均高程,以及坡度与周围区域平均坡度,来确定该点在地形上的相对位置。地形位指数越大,表示该点的高程和坡度越高;反之则越低。本研究参考藏玉珠等^[17]的研究,采用地形位指数综合体现洮河流域的地形条件,以此为基础进一步划分区域地形梯度。计算公式为:

$$T = \ln \left[(C/\bar{C} + 1) \times (P/\bar{P} + 1) \right] \quad (2)$$

式中: T 为地形位指数; G, P 表示某点的高程(m)、坡度($^\circ$); \bar{G}, \bar{P} 表示研究区的平均高程(m)、平均坡度($^\circ$)。

1.3.3 地形分布指数

地形分布指数能够消除地形位梯度分段和面积差异的影响,反映各功能类型在不同地形位上的分布情况。通过地形分布指数,可以了解某种土地利用类型在特定地形位上的优势或劣势。本研究参考周寒冰等^[18]的研究,采用地形分布指数来反映洮河流域不同土地利用类型在不同级别地形梯度上的分布特点。计算公式为:

$$P_{ie} = (S_{ie}/S_i) / (S_e/S_s) \quad (3)$$

式中: P_{ie} 为分布指数; S 为土地利用类型总面积(km^2); i 为某种土地利用类型; e 为地形梯度级别; $P_{ie} > 1$, 表明该地类在某等级地形中呈现优势分布, P_{ie} 越大, 表明该土地利用类型分布的数量越多^[16,18]。本研究用地形分布指数来表征不同梯度上的主导土地利用类型。

1.3.4 地理探测器

地理探测器可以通过分析各驱动因子层内方差和总方差的关系来分析要素的空间分异^[19]。本研究借助其空间分层异质性来探究洮河流域 ESV 的空间分异特征, 计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L [(N_h) / (\sigma_h^2)]}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: q 表示某一驱动因子对要素空间分异的影响力; L 为要素 Y 或者 X 的分层, 即分类或分区; N_h, N 分别为评价单元 h 和全区单元数; σ_h^2, σ^2 分别为评价网格和研究区要素的方差; SSW, SST 分别为评价单元内的总方差和全区总方差。

2 结果与分析

2.1 地形梯度特征

总体上洮河流域的地形梯度跨度相对较大, 由公式(2)计算出洮河流域地形位指数 T 在 0.19~1.18。

具体来看, 采用自然间断点法对研究区的地形梯度进行分级, 其中 1—3 级为低地势区, 4—6 级为中地势区, 7—9 级为高地势区。洮河流域大部分地区位于 2—7 级梯度(表 2), 面积比例达到 84.99%, 第 1 梯度面积比例仅为 4.03%, 8, 9 梯度总面积比例为 10.97%。表明洮河流域大部分地区为中地势区域, 低地势区和高地势区面积较小。

由公式(3)对洮河流域土地利用的地形分布指

数进行计算(图 2),研究发现耕地分布的优势区域为 1—4 梯度,随着梯度增大其分布指数持续下降。洮河流域耕地类型以坡耕地为主,其集中分布于坡度为 $6^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 靠近黄土高原一侧区域, 25° 以上地区耕地分布面积大幅下降;林地分布优势区域为 4—9 梯度,其分布指数与梯度变化方向一致,原因是该区域在长时间的演化历程中形成了相对稳定和独立的树种。草地分布的优势区域为 2—6 梯度,主体区域位于靠近青藏高原东南侧的甘南高原部分,随着海拔进一步提高,水热组合条件下降,其分布面积随之减少;水域的优势分布区域为 1—2 梯度,该地区地势平坦,成为天然的河流的发育区和良好的水系汇集区域,在海拔 2 500 m 的 3—9 梯度,水域的地形分布指数与梯度呈现出相反的变化趋势,原因在于随着梯度增高,河流无法形成汇集;建设用地的优势分布区域

为 1—2 梯度,其分布指数随着地形梯度增大而减小,这种分布规律体现在流域尺度上的原因在于人类开发建设活动多集中在河谷低地、靠近水源和交通的地区;未利用地的优势分布区域为 1—3 梯度和 8—9 梯度,其分布指数均与地形梯度变化方向一致,其中在 1—3 级度未利用地主要分布在水土流失严重、过度放牧导致土地生产力严重破坏,同时被列入保护区域的耕地草地过渡带,8~9 级梯度则因为靠近青藏高原东部,因此海拔高、坡度大的自然条件限制了当地居民对未利用地的开发。

研究结果表明,1—9 梯度对应的优势分布地类分别为:建设用地—水域—耕地—草地—林地—林地—林地—未利用地—未利用地,这种分布特征更多体现出其作为两大高原过渡地带,土地资源分布和人类活动受到两大高原地形特征的影响。

表 2 洮河流域地形梯度分级标准及面积比例

Table 2 Topographical gradient classification standard and area proportion of Taohe River basin

分级	高程/m	坡度/ $(^{\circ})$	地形位指数	面积/ km^2	比例/ $\%$
1	[1 717~2 100)	[0~5.02)	0.19~0.32	1 313.92	4.03
2	[2 100~2 666)	[5.02~10.04)	0.32~0.42	3 626.63	11.11
3	[2 666~2 951)	[10.04~14.47)	0.50~0.57	4 871.98	14.93
4	[2 951~3 194)	[14.47~18.60)	0.50~0.57	5 339.60	16.36
5	[3 194~3 416)	[18.60~22.49)	0.57~0.64	5 071.56	15.54
6	[3 416~3 626)	[22.49~26.58)	0.64~0.70	4 797.49	14.70
7	[3 626~3 872)	[26.58~31.01)	0.70~0.76	4 031.13	12.35
8	[3 872~4 100)	[31.01~38.69)	0.76~0.83	2 788.81	8.55
9	[4 100~4 610)	[38.69~75.32)	0.83~1.18	790.10	2.42

2.2 生态系统服务价值分布

由公式(1)结合洮河流域 2023 年土地利用类型进行系数修正,得到流域单位面积生态系统服务价值系数(表 3)。由表 3 可知,该流域水文调节、气候调节、水资源供给、生物多样性保护的系数较高,分别为 17.93, 1.92, 1.45 和 1.03 万元/ hm^2 ,体现出水体对于流域及周边地区具有显著的生态价值;单位生态系统服务价值系数较低的为维持养分循环、食物生产和原料生产,单位系数分别为 808.87, 3 526.2 和 2 609.25 元/ hm^2 ,由于其靠近青藏高原,以林地、草地为主的自然生态基底使洮河流域提供调节服务和支撑服务产生的单位生态系统服务价值远高于供给服务和文化服务。不同土地利用类型的单位面积生态系统服务价值系数也存在明显差异。水域、林地、草地提供的单位面积生态系统服务价值分别为 20.70, 3.25, 1.99 和 0.35 万元/ hm^2 。耕地和未利用地的单位面积生态系统服务价值分别不及水域的

1/30, 1/100。原因在于该流域水系主要发源于青藏高原,且靠近发源地,水量充足,在自西向东汇集到靠近黄土高原的河谷地带的过程中,其辐射的范围较远。其次不同土地利用类型的比例也决定着地区单位生态系统服务价值系数,林地和草地面积比例高且集中连片分布更有利于生态系统服务价值的存储和发挥。

2.2.1 生态系统服务价值梯度分布

选取 1993, 1999, 2005, 2011, 2017 和 2023 年流域生态系统服务总价值,利用 ArcGIS 10.8 平台统计每个梯度的生态系统服务总价值,结果表明(图 3)洮河流域 ESV 总体表现为高梯度区域高于低梯度地区,靠近青藏高原一侧区域高于靠近黄土高原区域,随着地形梯度的增大呈现出“抛物线型”的分布特征。1—4 梯度的 ESV 总值依次为 2 800.33, 2 870.05, 3 020.91 和 2 840.37 万元,该区域处于黄土高原西侧的定西市、白银市等区域,地形坡度起伏较大的同时

土地利用类型以耕地为主,植被覆盖率较低且覆被类型单一;第6梯度为梯度生态系统服务价值总值的转换带,其ESV为3 100.24万元,该区域主要位于青藏高原的东北边缘部分,地形特征表现为平坦开阔的草滩和山坡草场,是洮河流域的主要牧业基地;ESV分布高值区为第5和第7梯度,该区域主体位于甘南藏族自治州的玛曲县、碌曲县等地区,梯度主要覆被类型为高原草甸和山坡草场,流域南部阴坡覆盖着茂密的原始森林,阳坡为高山草甸,是洮河林区的最主要组成部分,2010年以后国家对于甘南藏族自治州的生态环境保护力度进一步加强,并取得显著成效,2011和2017年期,年度梯度生态系统服务价值平均值分别为3 330.93和3 340.20万元,占生态系统服务总价值的16.70%,该区域处于青藏高原海拔3 500 m、坡度25°附近,典型的寒温带针叶林和高山灌丛草甸混交地带,植物量丰富和因此梯度ESV显著高于其他梯度;ESV低值区为8—9梯度,梯度生态系统该服务价值分别为3 030.24和2 780.02万元,该区域位于青藏高原东北部,随着地形梯度的抬高,由

于气候和地形的限制,土地利用类型以草地和未利用地为主,其生物量和生产力相对较低,因此提供的生态系统服务价值也较低。

表 3 洮河流域单位面积生态系统服务价值系数
Table 3 Service value coefficient of ecosystem per unit area in Taohe River basin 单位:万元/hm²

一级分类	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
食物生产	0.14	0.04	0.04	0.13	0.00	0.00	0.35
原料生产	0.07	0.10	0.06	0.04	0.00	0.00	0.26
水资源供给	0.00	0.05	0.03	1.37	0.00	0.00	1.45
气体调节	0.11	0.31	0.20	0.13	0.00	0.02	0.77
气候调节	0.06	0.94	0.53	0.38	0.00	0.02	1.92
净化环境	0.02	0.28	0.17	0.91	0.00	0.05	1.43
水文调节	0.04	0.62	0.39	16.85	0.00	0.03	17.93
土壤保持	0.17	0.38	0.24	0.15	0.00	0.02	0.97
维持养分循环	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.08
生物多样性保护	0.02	0.35	0.22	0.42	0.00	0.02	1.03
美学景观	0.01	0.15	0.10	0.31	0.00	0.01	0.58
总计	0.66	3.25	1.99	20.70	0.00	0.18	26.78

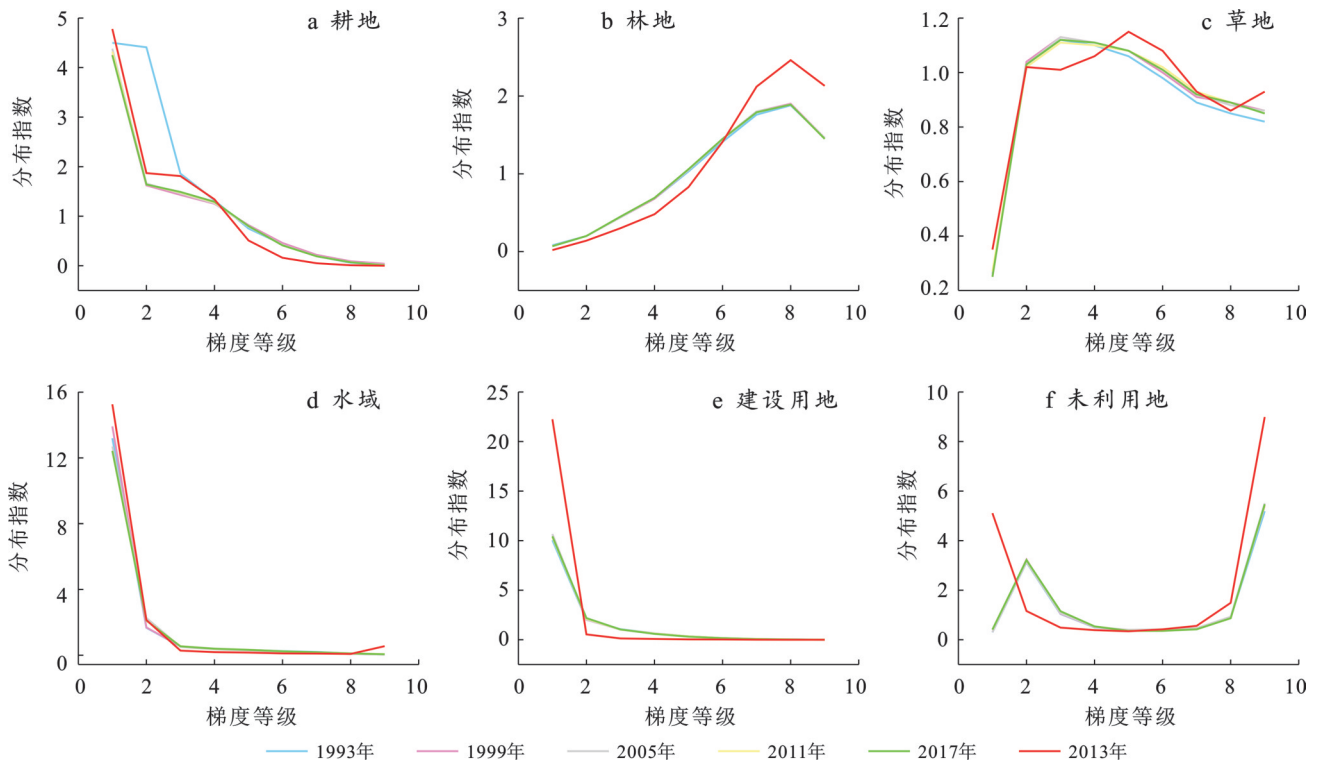


图 2 洮河流域 1993—2023 年不同土地利用类型分布指数

Fig.2 Distribution index of different land types in Taohe River basin from 1993 to 2023

从单项生态系统服务比例情况来看(图4),过去30 a,洮河流域气候调节和水文调节比例最大,达到25.40%,20.99%。维持养分循环比例最小,为0.99%。单项生态系统服务价值量从小到大依次为:气候调节>水文调节>土壤保持>气体调节>净化

环境>生物多样性>美学景观>原料生产>食物生产>水资源供给>维持养分循环,洮河流域各单项生态系统服务价值量相对较高,在气候调节、水源涵养、水土保持以及生物多样性等方面具有重要生态作用。

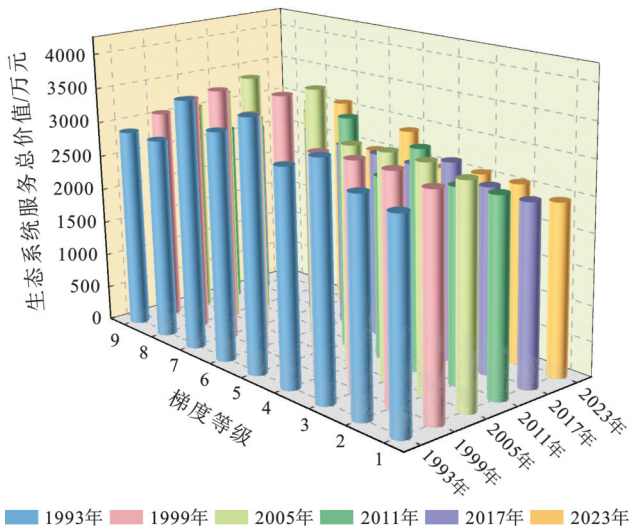


图3 洮河流域 1993—2023 年不同梯度生态系统服务总价值
Fig.3 Total value of different gradient ecosystem services in Taohe River basin from 1993 to 2023

洮河流域 1993—2023 年单项生态系统服务同样呈现出明显的梯度分布特征(图 4),食物生产和原料生产主要分布在流域靠近黄土高原一侧的 3—6 梯度,该区域海拔处于 2 666~2 626 m,坡度区间为 $[10.04^{\circ}, 26.58^{\circ}]$,优势分布地类为耕地和草地,占总地形区面积的 60.53%,大面积的耕地和草地分布的自然基底、良好的气候因素和适宜耕种的坡度使得该区域供给能力较为突出。气体调节、气候调节主要分布在靠近青藏高原一侧的第 1 梯度以及 7—8 梯度,第 1 梯度高程为 $(1 717 \text{ m}, 2 100 \text{ m})$,坡度约在 5° 以下,该区域优势分布地类为水域,具有良好的水文调节能力。第 7,8 梯度高程位于 $(3 626 \text{ m}, 4 100 \text{ m})$,坡度为 $[26.58^{\circ} \sim 38.69^{\circ}]$,优势分布地类为林地,为流域内部及周围区域承担着重要的气候调节功能。水土保持、生物多样性保护大多分布于第 6—8 梯度,区域优势地类为草地,高程和坡度分别为 $(3 416 \text{ m}, 4 100 \text{ m})$, $(22.49^{\circ}, 38.69^{\circ})$,地势起伏较大,高差和坡度差分别达到 684 m 和 16.20° ,草地在该区域承担着重要的水土保持、维护生物多样性的功能。此外,从 2017 年开始,流域第 9 梯度承担着重要的美学景观价值。该区域海拔高,坡度大,优势分布地类为林地,良好的天然植被使得其生物资源丰富的同时美学景观功能较为显著。

2.2.2 生态系统服务价值空间分布

在 ArcGIS 10.8 中,对洮河流域 1993, 1999, 2005, 2011, 2017 和 2023 年共 6 期的生态系统服务价值进行区域分区统计,用以描述洮河流域 1993—2023 年的 30 a 间生态系统服务价值在时空上的变化情况。经过自然间断点法对单位面积 ESV 进行重分

类(表 4),最终得到该流域 30 a 间生态系统服务价值在空间上的分布情况(图 5)。

从 ESV 空间分布来看,洮河流域生态系统服务空间分异较为明显,在 1993—2023 年洮河流域 ESV 分布高值区呈线状、片状分别位于洮河沿岸的低海拔以及流域西北部植被覆盖良好地区,此区域位于第 2 和第 6 梯度,土地利用类型主要以草地、林地为主。该区域需进一步加强植树造林和草地改良措施,以增强生态系统的稳定性和服务功能,同时形成更完善的河流生态系统缓冲带,减少水土流失和面源污染进入河道,此外要采取科学的森林经营措施和草地管理措施,如合理控制放牧强度、开展森林抚育等,以维持其良好的水源涵养和土壤保持功能。低值区以片状形态分布于流域东北部、西南部人口集中、人类活动剧烈区域,该区域位于第 1—2 梯度及 7—8 梯度,土地利用类型以耕地、建设用地和未利用地为主。由于该区域造成生态系统服务功能受损较为严重的原因在于人类生产、生活等活动强度的持续加大,因此生态建设的重点应放在生态修复上,对于被过度开垦的耕地,可以逐步实施生态退耕,恢复其原有的植被覆盖。同时可种植一些适应当地环境的先锋植物,如在东北部和西南部的这些区域,根据土壤条件和气候特点,选择一些耐旱、耐贫瘠的草本或木本植物,如苜蓿、沙棘等,逐步改善土壤质量,恢复生态系统的生产力。

表 4 单位面积生态系统服务价值(ESV)分类
Table 4 Classification of ecosystem service value (ESV) per unit area 单位:万元/hm²

生态系统服务价值(ESV)	分类
<1.00	无价值
[1.00, 5.90)	极低
[5.90, 9.30)	较低
[9.30, 17.69)	中等
[17.69, 57.84.00)	较高
≥ 57.84	极高

1993—2023 年洮河流域 ESV 空间分布特征发生了较为明显的空间变化,生态系统服务价值总体上呈现出增加的趋势,尤其在流域的中部和南部地区的玛曲县和碌曲县等地区生态系统服务价值的增长尤为明显。具体来看,流域北部临洮县以及安定区等地区的 ESV 低值区逐渐减少,而卓尼县、临潭县、迭部县等地区的高值区域则从南部边缘逐渐向中部地区的岷县、漳县等地区扩张。从不同生态系统服务的面积比例情况来看,高值区面积比例由 1993 年

的 2.79% 变为 2023 年的 7.51%, 略微增长, 低值区面积由 1993 年的 17.44% 下降为 2023 年的 9.27%, 尤其

是从 2011 年开始, 低值区减少和高值区显著增加的速度在进一步加快, 流域整体 ESV 著提升。

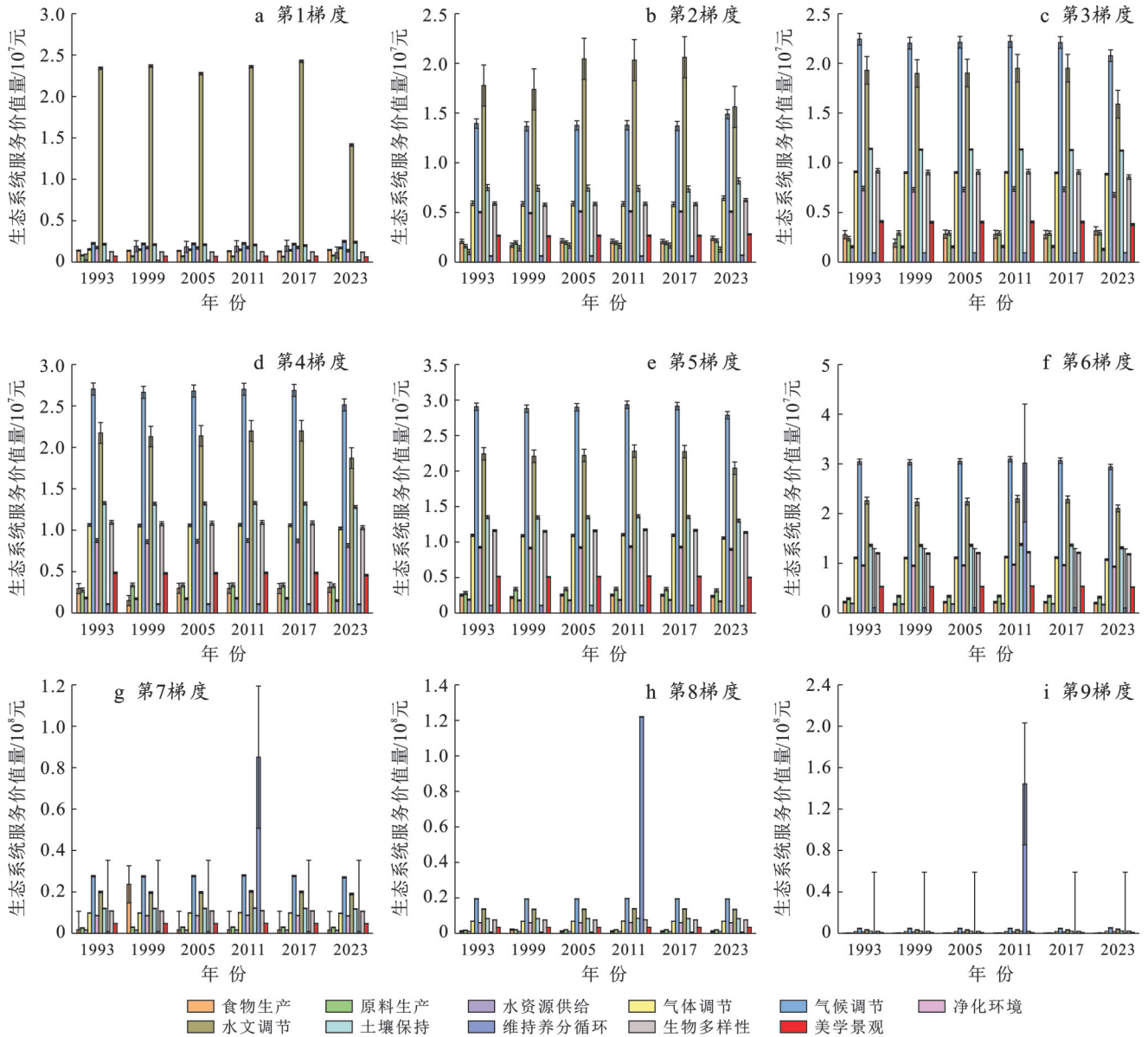


图 4 洮河流域 1993—2023 年不同梯度生态系统服务单项价值

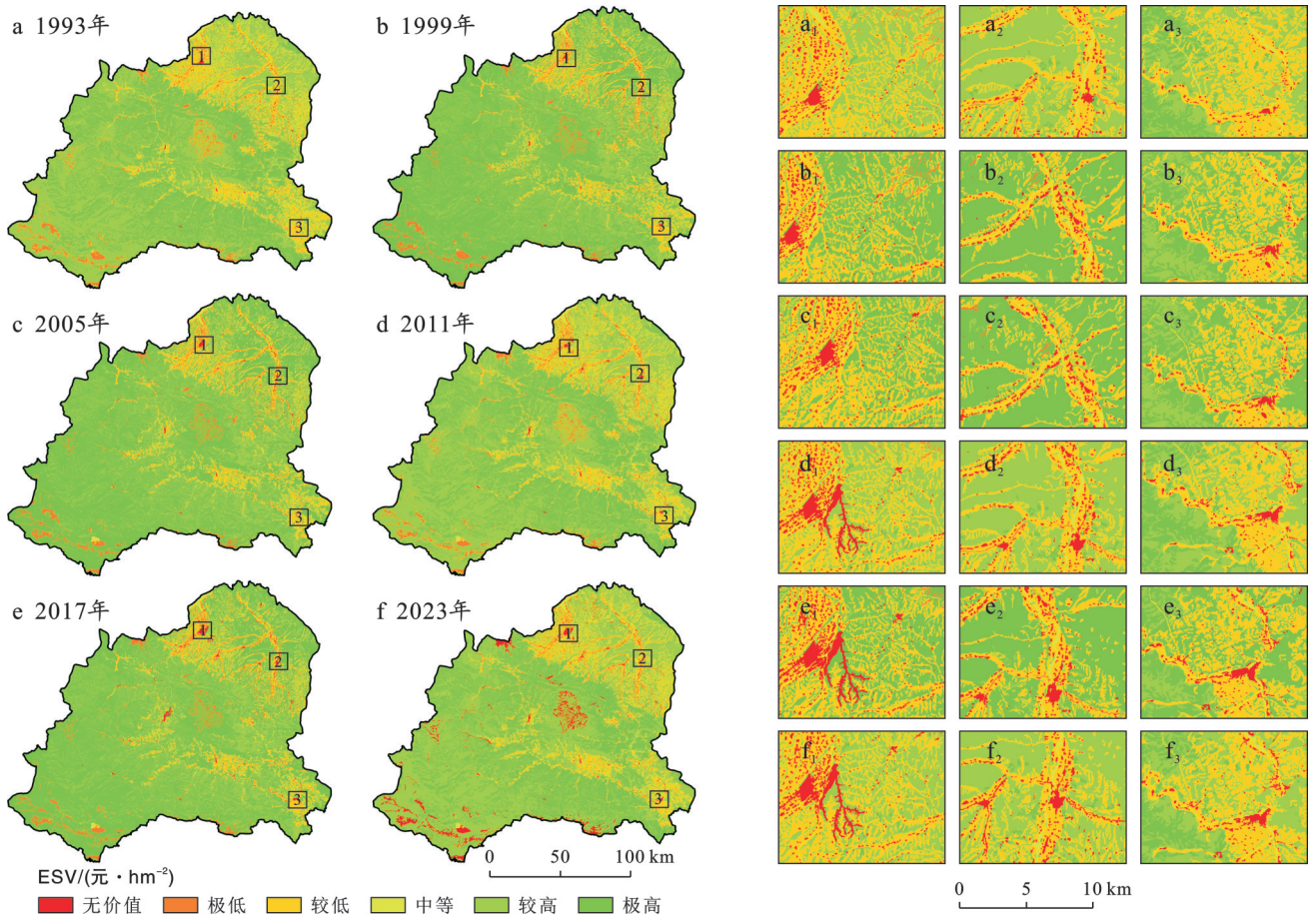
Fig.4 Individual value of different gradient ecosystem services in Taohe River basin from 1993 to 2023

这种空间变化趋势与 2010 年以来临洮县洮河国家湿地公园建设以及洮河流域植被恢复工程具有紧密联系。这些工程显著改善了流域湿地生态系统的稳定性和连通性, 同时提高了流域整体的植被覆盖率, 因此建议在其他类似流域或区域推广此成功经验, 优先在生态脆弱或人类活动频繁的地区启动生态修复项目, 通过聚焦关键区域并持续投入, 以确保长期生态效益。流域北部河东地区土地利用类型以耕地为主, 通过退耕还林、高标准农田建设等工作, 有效改善农业生产条件的同时又提高了区域的水土保持能力, 但同时要注意到生态价值的提升与社区

参与和生态补偿政策密切相关。因此退耕还林政策与生态补偿手段应适度结合, 以获取当地居民的支持与配合。流域中部的岷县、漳县等地区通过实施退耕还林还草工程以及巩固退耕还林成果, 显著提升了生态系统的整体性和连通性, 有效强化 ESV 高值区北移的生态通道建设。因此在生态修复项目中要重视生态廊道建设, 连接分散的高价值生态区域, 从而整体上提升生态系统的连通性和完整性。流域南部甘南藏族自治州通过设立自然保护区、强化草原的监督和管理等手段, 进一步加强对生态环境的保护力度, 从而确保甘南藏族自治州对洮河流域水

源涵养、气候调节的基础性地位。该区域在未来需要继续坚持长期生态监测网络,实时跟踪生态系统

变化,为生态建设和保护政策制定以及生态修复提供科学依据。



注:左侧6个分图中1,2,3分别为ESV变化显著的3个典型区域编号;右侧6个分图(a₁₋₃,b₁₋₃,c₁₋₃,d₁₋₃,e₁₋₃,f₁₋₃)分别为3个典型区域在1993,1999,2005,2011,2017年和2023年6个时间节点ESV分布的局部放大图。

图5 洮河流域不同时期生态系统服务价值(ESV)空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecosystem service value (ESV) in different periods in Taohe River basin

2.2.3 洮河流域1993—2023年不同梯度下ESV的变化差异

生态系统服务价值在不同梯度等级上呈现出明显的分异,其中中等梯度区域的增值最为显著(图6a)。1993—2023年各梯度生态系统服务价值变化量绝对值从大到小依次为:第1梯度>第4梯度>第3梯度>第5梯度>第6梯度>第7梯度>第9梯度>第8梯度>第2梯度。第1梯度生态系统服务总量年均减少率为1.54%,过去30a共减少815.36万元,第4梯度生态系统服务价值年均增速达到2.24%,累计增加值为702.12万元。不同类型的生态系统服务对梯度变化的响应不同(图6b),其中供给服务(如食物生产)普遍增长,而调节服务和文化服务在中等梯度区域有显著提升。单项生态系统服务价值量变化从大到小依次排序为:水文调节>气候调节>净化环境>生物多样性>水土保持>美学景观>气体调节>水资源供给>维持养分循环>食物生产>原料

生产。水文调节价值量年均增幅为3.89%,过去30a累计增加2900.44万元,原料生产价值量减少最明显,变化量为-294万元。从各单项生态系统服务价值量在梯度上的变化来看,在所有梯度等级上食物生产的价值都有显著增加,尤其是在梯度等级1和2,在耕地面积数量较稳定且呈现减少趋势的状态下,这一变化趋势表明流域内农业技术的进步和农田生态系统的改善。气候调节、水文调节、净化环境、维持生物多样性等价值在中低梯度(尤其是在梯度等级3,4)等级上同样均呈现出增加态势,表明在2500~3000m区域内湿地、植被覆盖状况呈现出稳中向好的变化趋势。总体来看,第1梯度水文调节、净化环境价值量总体增加;第2梯度除食物生产外,其余单项生态系统服务价值量均呈现下降趋势;第3—7梯度除食物生产和原料生产价值量下降外,其余各单项生态系统服务价值量均出现不同增加;第9梯度各单项生态系统服务价值量持续下降。综上分

析, 洮河流域 1993—2023 生态系统服务价值呈现以下梯度分异特征: ①边缘效应。梯度等级 1, 9 流域的边缘区域受到城市化和土地退化的影响, 造成了以供给服务为主的生态系统服务价值负增长, 生态系统服务价值总量分别减少 800.07 和 201.32 万元; ②中梯度持续增长。梯度等级 2—4 区域得益于生态

保护和植被恢复措施, 有效地提升调节服务和支撑服务为主的生态系统服务价值, 生态系统服务价值总量累计增长 1 200.93 万元; ③稳定性: 梯度等级 5—8 的生态系统服务价值总量变化不明显, 趋于平稳状态, 在调节服务方面的生态系统服务价值已经达到一定的平衡, 现有保护措施足以维持其服务水平。

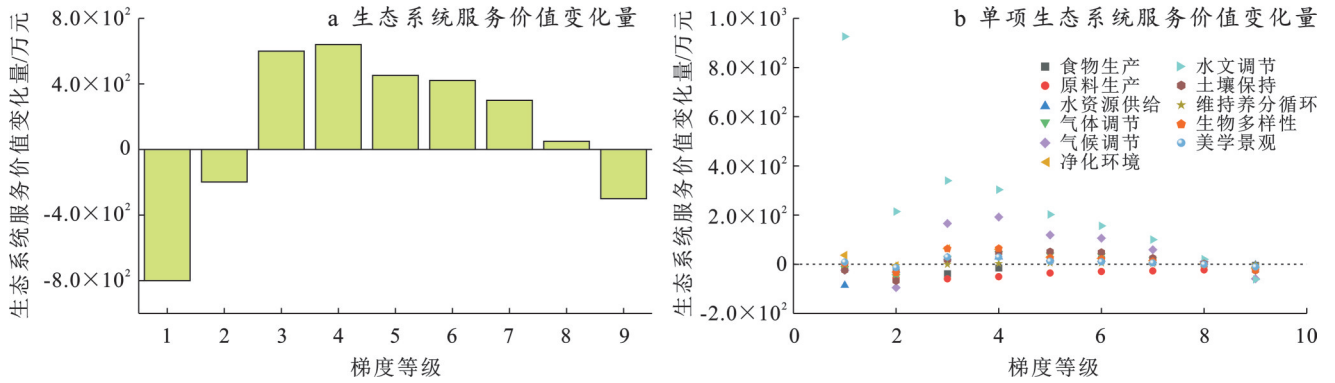


图 6 洮河流域 1993—2023 年生态系统服务价值梯度变化
Fig.6 Gradient change of single ecosystem service value in Taohe River basin from 1993 to 2023

2.3 生态系统服务价值空间分异驱动因素

由于洮河流域地处中国青藏高原和黄土高原的过渡地带, 其地形地势、气象环境、地表覆盖状况、人口和经济分布等均在东西方向上存在明显的差异性, 因此综合考虑洮河流域过渡性的自然地理特征和集聚性的社会经济特征, 并参考前人^[20]相关研究成果, 最终选取 2023 年的高程(X_1)、坡度(X_2)、坡向(X_3)、年均降雨量(X_4)、年均蒸发量(X_5)、NDVI(X_6)、GDP(X_7)、总人口(X_8)、第一产业总产值(X_9)和人口密度(X_{10})共 10 个自然和经济因子来探究洮河流域 ESV 空间分异的驱动因素。

单因子探测结果显示(表 5), 洮河流域 ESV 空间分异受自然因素和经济因素的共同影响, 各驱动因素解释力 q 值按照从高到低的排序依次为: $X_1 > X_{10} >$

$X_4 > X_8 > X_7 > X_5 > X_9 > X_6 > X_2 > X_3$, 其中 X_1 是区域 ESV 空间分异的主导因子, 解释力高达 0.490 8。 X_{10} , X_4 , X_8 , X_7 和 X_5 为较重要因子, 解释力因子分别为 0.418 2, 0.416 8, 0.409 4, 0.409 5 和 0.400 1, 表明洮河流域地形因素对生态系统服务价值空间分异具有决定性的作用。其余因子的解释力均低于 0.400 0, 但也会在不同的程度上对区域 ESV 空间分异产生影响。区域 ESV 空间分异受高程、年均降雨量、人口密度、GDP 和年均降雨量的影响程度较高, 表明社会经济因素也对流域生态系统服务价值有影响, 但影响强度不如地形因素显著。在未来需因地制宜合理开发土地资源、科学规划土地资源利用方向, 加强国土空间规划和生态保护修复的实施, 最终促进流域可持续发展。

表 5 洮河流域生态服务价值 (ESV) 空间分异驱动因子单因子探测结果

Table 5 Single factor detection results of ecosystem service value (ESV) spatial differentiation drivers in Taohe River basin

变量	驱动因素									
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
q 值	0.490 8	0.005 7	0.002 5	0.416 8	0.400 1	0.216 5	0.409 5	0.409 4	0.396 8	0.418 2

各因子交互探测结果显示(图 7), 任意两因子相互组合的交互作用均大于等于单因子探测结果, 其中 X_1 与各因子的交互对区域 ESV 空间分异的影响最为显著, 解释力 q 均高于 0.49, 此外 $X_4 \cap X_6$, $X_4 \cap X_5$, $X_5 \cap X_7$, $X_5 \cap X_8$, $X_5 \cap X_9$, $X_5 \cap X_{10}$, $X_6 \cap X_7$, $X_6 \cap X_8$, $X_6 \cap X_9$, $X_6 \cap X_{10}$ 的交互作用对洮河流域 ESV 空间分异的解释力较高, q 值均大于 0.484 3, 其中 $X_4 \cap X_5$ 的结果与洮河流域水资源的可用性和分布密切相关, 降雨量和蒸发量的变化会影响当地植被生长、土壤湿度和水

循环, 从而对生态系统服务价值产生影响。其余因子交互作用的解释力 q 值均在 0.216 6 以上, 表明各因子交互均对流域 ESV 空间分异产生影响。由此可见在区域自身的地形分异以及植被覆盖差异等自然条件的限制下, 目前洮河流域 ESV 的空间分异对于人类活动的响应程度一般, 因此该流域发展模式应与自身的自然和经济状况相适应, 通过逐步推进国土空间生态修复工作保护流域生态环境的同时仍要促进社会经济的稳步发展。

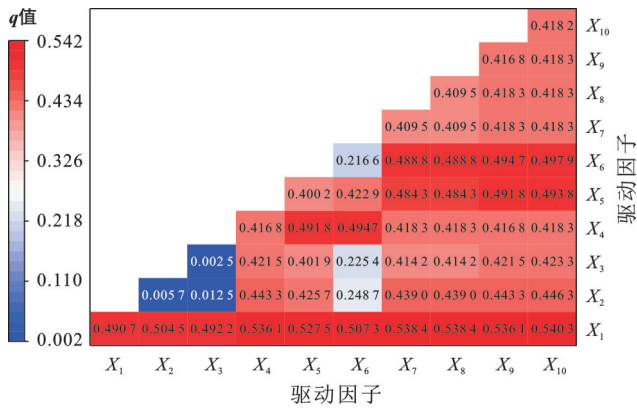


图7 洮河流域2023年生态服务价值(ESV)空间分异驱动因子交互探测结果

Fig.7 Interactive detection results of ecosystem service value (ESV) spatial differentiation driving factors in Taohe River basin in 2023

3 讨论

在生态系统服务价值计算中,当量因子服务价值作为测算基础,对于研究结果准确与否有重要影响。本研究计算洮河流域1个标准等效因子经济价值为1 647.94元/hm²,结果与张鹏岩等^[21]计算的黄河下游1个标准等效因子经济价值(1 895.51元/hm²)较为接近。黄河上游当量因子服务价值低于黄河下游的原因在于上游的水热组合环境逊于下游,进一步导致上游的粮食单产低于下游。本研究为最大程度弱化作物结构和市场粮食价格对经济价值的影响,采用洮河流域1993—2023年平均粮食收购价格作为基准。此外本文在计算标准当量因子时机械地将建设用地采用传统方式设为0,建设用地生态系统服务的经济价值未被充分考虑,参考张晓瑶等^[22]对深圳市不同情景下的生态系统服务价值模拟结果,在城市扩张背景下,建设用地面积显著增加,将其标准当量因子设置为0会导致生态系统服务价值中的土壤保持价值无法充分体现。总体而言,本研究对洮河流域生态系统服务价值的地形梯度特征、空间分布、梯度分异、空间分异以及梯度效应的驱动因素进行了充分探究,但在选取影响因素时仅仅立足于地区实际自然、社会经济特征并参考前人研究结果,缺乏对于各个因素的层次性解析,有望在未来进一步推进。

整体来看,洮河流域ESV在地形梯度上呈现第5和第7梯度最高,在此梯度上,地形分异明显,开始呈现海拔高、坡度大的地形分布,其生态系统服务也随之呈现多样化的特点。其次从ESV变化量来看,1993—2023年洮河流域ESV总体增长 6.39×10^7 元,增幅为2.36%。洮河流域生态系统服务价值西南高东北低,同时靠近青藏高原的西南部主要以水文调

节和气候调节为主,这两项单项生态系统服务价值增幅分别达到0.28%和1.92%。靠近黄土高原的东北侧以粮食供给服务为主,然而由于地形和气候条件的限制,该区域粮食生产的稳定性较差,产量波动较大,同时相关研究^[23]表明,在2000—2015年,黄土高原退耕还林还草面积约 3.50×10^4 km²,占2000年耕地面积的16.8%,因此在过去30 a该区域粮食供给价值量不断下降的一个重要原因在于退耕还林政策的实施。该政策使得一些原本用于粮食生产的土地转变为林地或草地,导致粮食产量下降。除此之外,本研究认为近年来,化肥、农药、种子等农业生产资料价格不断上涨,导致粮食生产成本增加,使得农民种粮收益减少,部分农民因经济效益考虑而减少粮食种植面积或投入不足影响粮食产量。最后耕地非粮化现象的蔓延也是导致区域粮食播种面积减少,粮食产量下降的重要原因。再次之从单项生态系统服务价值的梯度分异特征来看,流域中梯度地区生态系统服务价值持续增加,尤其是在净化环境和水文调节方面,这种变化与2018年以来引洮生态工程补水项目的持续推进有关。从另一方面来看,随着地形梯度的增高,洮河流域生态系统服务价值的增加量呈现递减趋势。这种现象的原因主要在于,随着地形梯度的增加,地形复杂性增强,交通不便性加剧,导致人类活动强度显著下降,开发程度较低。由于人类活动的减少,该区域的生态系统服务功能主要以自然状态为主,缺乏多样化的开发利用活动,使得生态系统服务价值的类型和贡献相对单一。最后通过探究影响ESV空间分异的驱动因素发现,自然因素对于ESV的空间分布影响显著,同时单一社会经济因素与高程交互作用时,均会加深对于该流域ESV空间分异变化的影响,该结论与程静等^[24]的研究结果高度相似,在洮河流域,生态系统服务的分布与地形梯度上的土地利用方式密切相关,土地利用类型分布对生态系统服务价值(ESV)的分布起着决定性作用。然而,洮河流域生态系统服务在地形梯度上展现出了独特的区域特殊性,尤其在流域西南靠近青藏高原的部分,随着地形梯度的增高,林地和草地的分布优势逐渐显现,成为区域调节服务持续增加的主要驱动因素。这种现象表明,研究区自然地形特征在塑造生态系统服务价值分布方面具有主导作用,而社会经济因素对ESV的影响相对较低。为了进一步推动洮河流域实现生态-社会-经济可持续发展,本研究提出以下建议:①加强高梯度生态核心区保护力度,尤其是重点保护流域西南部靠近青藏高原一侧的高山草甸与灌丛带,禁止风电、矿产开

发,限制放牧强度(载畜量 ≤ 0.5 羊单位/ hm^2),在海拔超过3 000 m的地区,强化冰川-冻土核心保护区,划定无人区范围,布设生态监测站网,禁止任何人为干扰。②加快推动流域东北部农业生态化转型,对海拔1 800 m以下,靠近黄土高原的第1,2梯度而言,在坡度 $< 15^\circ$ 的缓坡的地区推广“马铃薯-燕麦-箭筈豌豆三年轮作体系”, $15^\circ \sim 25^\circ$ 坡耕地强制实施“三年休耕,两年种植”制度,休耕期播种紫花苜蓿固氮,达到粮食生产和生态保护的的双重目的。③建立“三维空间管控平台”,集成DEM数据划定开发禁限区:坡度 $> 25^\circ$ 区域自动触发建设禁令,海拔 $> 3 000$ m地块纳入生态资产台账,同时研发“海拔-坡度-植被”匹配模型,自动生成不同梯度最优种植方案,实现从“平面分区”到“立体管控”的升级。

4 结论

(1) 洮河流域土地利用类型分布呈现出明显的地形分异特征,在1993—2023年流域内1—9梯度对应的优势分布地类分别为:建设用地—水域—耕地—草地—林地—林地—林地—未利用地—未利用地,在低梯度区需合理规划城市布局,增加城市绿地和生态空间,同时加强水资源保护和生态系统修复,合理开发利用水资源;中梯度区域应加大生态农业推广力度,减少化肥农药使用,保护耕地生态系统;高梯度区域则需加强森林、草地资源管理和生态修复,提高森林质量,防止草地退化。同时强化未利用地管理防止其被不合理开发。

(2) 在1993—2023年,洮河流域的生态系统服务价值(ESV)随地形梯度增高呈现出先上升后下降的特征,第6梯度为转折点。在靠近黄土高原边缘的低梯度区域,生态系统服务价值出现负增长,因此需减少不合理的建设用地扩张,保护并增加林地、草地等生态用地,在耕地区推广生态农业模式,减少化肥农药使用,采用有机肥料和生物防治措施,以提升耕地的生态质量和服务价值。与此同时,靠近青藏高原的中梯度区域,其调节服务和支持服务为主的生态系统服务价值持续增长,应继续坚持生态优先策略,强化对草原、森林、湿地等资源的保护。而在流域西南部的高梯度区域,调节服务为主的生态系统服务价值趋于平稳,应尽可能避免人类活动对生态系统的干扰,以保持其稳定性。

(3) 流域ESV空间分布与地形梯度上的土地利用类型联系紧密,而空间分异则受到自然因素和社会经济因素的共同作用,自然因素作用更为显著。高程、坡度、坡向、NDVI是ESV空间分异的主导因子且任意两因子交互均会显著增强其空间分异,任

一自然因子与社会经济因子交互均会略微增强其空间分异。因此建议在进行区域开发建设时,必须充分考虑自然地理环境的主导作用,并根据当地实际情况,因地制宜地开展开发和建设活动。

参考文献(References)

- [1] 吴见,王帅帅,谭靖.基于安徽省土地利用变化的地形梯度效应分析[J].长江流域资源与环境,2016,25(2):239-248. Wu Jian, Wang Shuashuai, Tan Jing. Analysis on terrain gradient effect based on land use change in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 239-248.
- [2] 徐彩仙,巩杰,李焱,等.基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J].生态学报,2020,40(13):4291-4301. Xu Caixian, Gong Jie, Li Yan, et al. Spatial distribution characteristics of typical ecosystem services based on terrain gradients of Bailongjiang watershed in Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4291-4301.
- [3] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [4] Sutton, P C, Costanza R. Global change and the ecosystem service value of salt marshes [J]. Ecological Economics, 2002, 41(2), 249-266.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment Board. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [6] Millennium Ecosystem Assessment Board. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment [J]. Choice Reviews Online, 2004, 41(8): 41-4645.
- [7] 高伟,李欣悦,张远,等.长江流域生态系统服务价值时空演变与预测[J].生态学报,2023,43(15):6203-6211. Gao Wei, Li Xinyue, Zhang Yuan, et al. Evolution and prediction of ecosystem service values of the Yangtze River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6203-6211.
- [8] 张初蕊,陈立欣,王丽群,等.黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析[J].北京林业大学学报,2024,46(6):70-81. Zhang Churui, Chen Lixin, Wang Liqun, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River basin [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 70-81.
- [9] 张晓瑶,陆林,虞虎,等.青藏高原土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟[J].生态学杂志,2021,40(3):887-898. Zhang Xiaoyao, Lu Lin, Yu Hu, et al. Multi-scenario simulation of the impacts of land-use change on ecosystem service value on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 887-898.
- [10] 赵泳春,苏方林.经济差异化增长下生态系统服务价值

- 的时空演变特征:以珠江-西江经济带为例[J].自然资源学报,2022,37(7):1782-1798.
- Zhao Yongchun, Su Fanglin. Spatio-temporal dynamic characteristics of the ecosystem service values under differential economic growth: A case study of the Pearl River-West River economic belt [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(7):1782-1798.
- [11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(8):1243-1254.
- [12] 石宇,韩蕊,郭砾.基于地形梯度的南方丘陵山地生态系统服务价值对城市化的空间响应:以粤北地区为例[J].生态学报,2021,41(18):7238-7248.
- Shi Yu, Han Rui, Guo Luo. Ecosystem service value and its spatial response to urbanization based on terrain gradient in southern hilly and mountainous region: A case study in northern Guangdong, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(18):7238-7248.
- [13] 李久林,雷秋慧,胡大卫,等.长江经济带人类活动强度与生态系统服务价值时空关联特征分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(9):1992-2003.
- Li Jiulin, Lei Qiuhui, Hu Dawei, et al. Characterization of spatial and temporal correlation between human activity intensity and ecosystem service value in the Yangtze River economic zone [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024,33(9):1992-2003.
- [14] 周建伟,吴华,许童,等.西藏雅砻河流域生态系统服务价值地形梯度分异及驱动因素[J].水土保持研究,2025,32(2):396-406.
- Zhou Jianwei, Wu Hua, Xu Tong, et al. Terrain gradient differentiation and driving factors of ecosystem service value of the Yalong River basin in Tibet [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(2):396-406.
- [15] 朱青青,刘超,沈艳,等.宁夏罗山草地生态系统服务价值的地形效应[J].应用生态学报,2024,35(12):3267-3274.
- Zhu Qingqing, Liu Chao, Shen Yan, et al. Terrain effects on the value of grassland ecosystem services in Luoshan, Ningxia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(12):3267-3274.
- [16] 曹莹,曾彪,张富广,等.黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略[J].生态学报,2024,44(18):8219-8233.
- Cao Ying, Zeng Biao, Zhang Fuguang, et al. Reasonable target and restoration strategies of vegetation restoration in a water conservation area of the upper Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(18):8219-8233.
- [17] 臧玉珠,刘彦随,杨园园.山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应:以井冈山市为例[J].自然资源学报,2019,34(7):1391-1404.
- Zang Yuzhu, Liu Yansui, Yang Yuanyuan. Land use pattern change and its topographic gradient effect in the mountainous areas: A case study of Jinggangshan City [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(7):1391-1404.
- [18] 周寒冰,王志泰,王志杰,等.喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应:以贵阳市中心城区为例[J].水土保持研究,2021,28(6):337-347.
- Zhou Hanbing, Wang Zhitai, Wang Zhijie, et al. Response of ecosystem service value of karst mountainous city to terrain gradient: A case study of downtown of Guiyang City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(6):337-347.
- [19] Pan Ting, Jin Gui, Zeng Shibo, et al. Spatial-temporal divergence characteristics and driving factors of green economic efficiency in the Yangtze River economic belt of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2024,34(6):1158-1174.
- [20] 王波,杨太保.1980—2018年银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J].干旱区地理,2021,44(2):552-564.
- Wang Bo, Yang Taibao. Value evaluation and driving force analysis of ecosystem services in Yinchuan City from 1980 to 2018 [J]. *Arid Land Geography*, 2021,44(2):552-564.
- [21] 张鹏岩,耿文亮,杨丹,等.黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J].农业工程学报,2020,36(11):277-288.
- Zhang Pengyan, Geng Wenliang, Yang Dan, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(11):277-288.
- [22] 张晓瑶,张潇,李冬花,等.城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2022,42(6):2086-2097.
- Zhang Xiaoyao, Zhang Xiao, Li Donghua, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2086-2097.
- [23] 高晴.黄土高原退耕还林对粮食生产的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- Gao Qing. Effects of "grain for green" project on grain production in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021.
- [24] 程静,黄越.宁夏回族自治区生态系统服务价值时空演变及其驱动力[J].水土保持研究,2021,28(2):382-389.
- Cheng Jing, Huang Yue. Spatiotemporal evolution of ecosystem services value and its driving forces in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(2):382-389.