

韩艳, 乔荣荣, 常学礼. 内蒙古鄂尔多斯西柳沟流域生态系统服务功能空间格局与变化解析[J]. 中国沙漠, 2026, 46(3): 353-361.

内蒙古鄂尔多斯西柳沟流域生态系统服务功能空间格局与变化解析

韩艳^{1,2}, 乔荣荣^{2,3}, 常学礼²

(1. 潍坊中学, 山东 潍坊 261031; 2. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 3. 南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 在全球气候变化和人类活动日益加剧的背景下, 生态系统服务功能评价成为当前地球科学研究的主要方向, 特别是随着 InVEST 模型与 ArcGIS 结合的不断完善, 针对水源涵养、土壤保持、防风固沙和固碳的生态系统服务功能评价成为区域可持续发展规划的依据。本文采用 InVEST 模型与 ArcGIS 的空间分析模块相结合, 分析了内蒙古鄂尔多斯西柳沟流域地貌分异对独立和综合生态系统服务功能的影响, 解释了近 30 年来生态系统服务功能变化特点。结果表明: 西柳沟地貌类型空间分异对生态系统服务功能有明显影响。1990—2020 年, 水源涵养量增加了 4.62 mm, 其中沙漠区增加幅度最大, 为 2.55 倍; 土壤保持量减少了 22.62 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中黄土区减少最多, 为 30.44 t·hm⁻²·a⁻¹; 防风固沙量增加了 1.30 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中沙漠区增加最大, 为 1.7 t·hm⁻²·a⁻¹; 固碳量增加了 0.08 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中黄土区增加最大, 为 0.22 t·hm⁻²·a⁻¹。分级格局综合评价揭示了在不同时间尺度上, 较高级别是分布面积最大的类型。空间格局特征以 1990 年的较低级别在沙漠区集中连片分布和 2020 年的较高级别在黄土区和平原区呈连片分布为特点, 研究区地貌分异导致的变化以黄土区和沙漠区最为显著。总体上高和较高级别面积分别增加了 138.1、213.6 t·hm⁻²·a⁻¹, 低、较低和中等级别面积分别减少了 7.5、235.0、109.1 t·hm⁻²·a⁻¹。西柳沟生态系统服务功能变化与近 30 年来的黄土区水土保持工程实施、草原科学禁牧和库布齐沙漠化治理与开发利用并举等生态工程建设密切相关。

关键词: 生态系统服务; 评价; InVEST 模型; 西柳沟

文章编号: 1000-694X(2026)03-353-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00244

中图分类号: Q94

文献标志码: A

0 引言

生态系统向人类社会与环境提供的各种直接和间接的资源供给、环境调节、文化休憩和永续支持的功能, 可被理解为生态系统服务功能^[1-2]。因此, 在全球气候变化、生物多样性保护和可持续发展受环境制约日益严峻的背景下, 开展生态系统服务功能评价, 成为判断区域环境现状的主要途径。在干旱半干旱地区, 随着气候变化和人类活动加剧, 土壤侵蚀成为区域生态系统服务功能变化的主要表征, 其发生发展变化过程直接影响到水土资源开发利用和社会经济发展^[3]。土壤侵蚀包括了水

力、风力、冻融和重力侵蚀, 其中水力侵蚀和风力侵蚀涉及范围最广, 成为影响生态系统服务功能的主要过程。

在生态系统服务功能研究中, 通过赋值量化生态系统服务功能, 不仅可以揭示生态系统生态和经济价值, 同时可为制定区域可持续发展政策提供基础数据支持^[3-5]。在生态系统服务功能研究方法方面, 模型应用为主要研究手段。其中 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型是目前被广泛使用的评价工具^[4-6]。该模型内置许多模块并支持用户自行输入新建模块, 能定量评估水源涵养、水土保持、防风固沙、碳固定和

收稿日期: 2025-03-30; 改回日期: 2025-10-21

资助项目: 内蒙古自治区“十三五”水利重大专项(NSK2017-M2); 国家自然科学基金项目(41271193)

作者简介: 韩艳(1986—), 女, 山东潍坊人, 硕士, 主要从事土地利用变化监测研究。E-mail: 872766920@qq.com

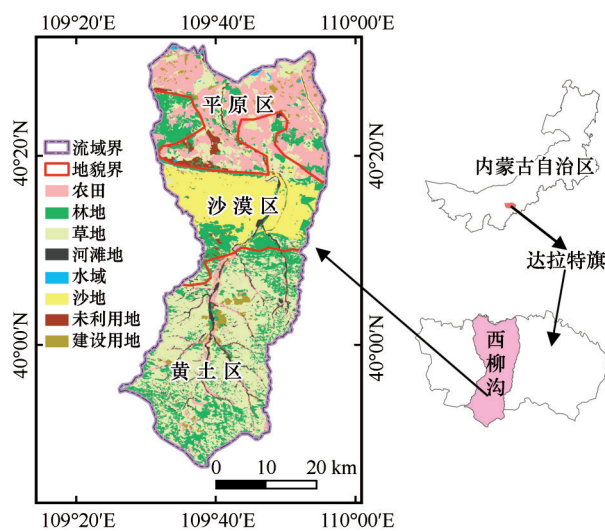
通信作者: 常学礼(E-mail: xlchang@126.com)

生物多样性维持等多种生态系统服务功能,输出结果具有二维可视性,可结合遥感和地理信息分析技术揭示生态系统服务功能的时空格局时空变化特征^[6]。在黄河和长江流域,InVEST模型典型研究案例解释了以流域(或行政区)为单元的生态系统服务功能时空变化以及驱动机制,研究人员借助模型不仅评估了流域的水源涵养功能,还揭示了土地利用和气候变化等因素对流域生态系统服务功能的影响^[7],指出研究区生态系统服务功能变化受气候变化和人类活动共同驱动。生态系统服务功能表现出显著的时空差异,尤其是在水源涵养、土壤保持和碳固定等方面^[6,8-9]。位于黄河“几字弯”的内蒙古十大孔兑地区,地貌类型差异明显,自南向北呈带状分布着砒砂岩黄土区、库布齐沙漠和洪积冲积平原区^[10]。其中西柳沟流域是十大孔兑中土壤侵蚀最严重地区。1998年7月12日发生的洪水携带泥沙淤积堵塞黄河干流,形成一座长10 km、宽1.5 km、厚6.27 m的巨型沙坝,是历史上十大孔兑区域最大的水土流失灾害事件。同时,西柳沟流域黄土、沙漠和平原三类地貌面积比例在十大孔兑地区具有较好的代表性,而且也是近30多年来国家和地方生态建设的重点区域^[11]。

因此,本文选取1990年和2020年为研究时段,采用InVEST模型与遥感技术相结合的方法,对西柳沟流域生态系统服务功能从水源涵养、土壤保持、防风固沙和固碳4个方面分别进行单项和综合评估。主要目的是解释地貌分异对不同生态系统服务功能空间格局的影响,揭示近30年来生态系统服务功能变化特点,为十大孔兑区域今后的生态建设规划与布局提供基础。

1 研究区

西柳沟流域呈北低南高,海拔900~1 600 m,总面积为2 078.6 km²。地貌南部为砒砂岩黄土区、中部为库布齐沙漠区、北部为洪积冲积平原区,在十大孔兑中西柳沟流域在地貌类型分布方面具有最好的代表性(图1),三类地貌区面积分别为916.41 km²、596.88 km²和565.06 km²。黄土区以草地为主,面积为561.6 km²,占该类型区面积61.3%;沙漠区以流动沙地为主,面积为287.3 km²,占该类型区面积48.1%;平原区以农田为主,面积为332.0 km²,占该类型区面积58.8%。研究区植被类型以南部砒砂岩



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号标准地图制作,底图未作修改。

图1 研究区位置

Fig.1 Overview of the study area

黄土区的典型草原植被、中部库布齐沙漠的沙生草本+灌丛植被和北部洪积冲积平原的人工乔木林+农业植被为显著特征。

2 研究方法

2.1 数据源

十大孔兑流域边界矢量数据:源于内蒙古自治区“十三五”水利重大专项(NSK2017-M2)基础数据集。

DEM数据:源于地理空间数据云(<https://www.giscloud.cn/>),采用空间分辨率为30 m的SRTM1 V3.0的中国区域数据。

土壤数据:来源于国家科技资源共享服务平台——国家地球系统科学数据中心-土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)。

降水和蒸散发数据:源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/main/>)。

NDVI数据:源于中国科学院地理科学与资源研究所土地利用与全球变化遥感团队发布的中国30 m年最大NDVI数据集。

土地利用数据:源于中国科学院资源环境科学数据中心基于Landsat 5和Landsat 8数据解译的全国土地利用数据集(分辨率30 m)。

所有数据在输入InVEST模型前,在ArcGIS中采用重采样功能将分辨率都调整为30 m。

2.2 InVEST模型

InVEST模型是用于对陆地、海洋和淡水生态系统服务功能进行评估的主要工具(更新至第7版),该模型内含的各类模块运行成熟,适用于不同生态系统、不同时空尺度的生态系统服务功能评估。其中,与陆地生态系统有关的计算模块主要有土壤侵蚀、碳储量和产水量等。InVEST模型通过输入较少的数据就可以获得较为可信的结果,打破了传统方法的局限性,使复杂问题简易化,运行结果可以在ArcGIS进行二次编辑,较纯文字的表达方式更加直观^[3,5-6]。

2.3 评估方法

本文主要从水源涵养、水土保持、固碳和防风固沙4个指标进行单项评估。然后,依据各评估因子权重赋值对归一化后的单项指标进行综合评估。

2.3.1 水源涵养

$$R = (P - AET) \times K \times C \quad (1)$$

式中: R 是水源涵养量(mm); P 是年降水量(mm); AET 是实际蒸散量(mm),通过潜在蒸散量和土壤湿度条件估算; K 是土地利用类型的植被涵养系数(无量纲),反映不同植被类型的水源涵养能力; C 是土壤可渗透性系数(无量纲),代表土壤对水的渗透能力。其中,植被涵养系数 K 依据研究区土地利用类型分别赋值为草地0.6、林地0.8、耕地0.4、沙地0.1。土壤可渗透性系数 C 依据研究区土壤类型分别赋值为沙土0.6、壤土0.4、黏土0.2。

2.3.2 水土保持

$$SDR_i = RKLS_i - USLE_i \quad (2)$$

式中: $RKLS_i$ 为第 i 个栅格单元的年潜在土壤侵蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); $USLE_i$ 为第 i 个栅格单元的年实际土壤侵蚀量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); SDR_i 为第 i 个栅格单元的土壤保持量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)。年潜在土壤侵蚀量与年实际土壤侵蚀量之差为年土壤保持量(模型细节见文献^[12])。

2.3.3 防风固沙

$$S = V \times W \times C_v \quad (2)$$

式中: S 是防风固沙量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); V 是植被覆盖度,表示植被对风沙侵蚀的阻止能力(百分比,无量纲); W 是风力指数,由风速数据计算; C_v 是植被防风

系数,反映不同植被类型在防护风沙中的效果,分别赋值为草地0.7、林地0.9、荒漠0.2^[13];风力指数 W 通过风速的平方函数表示,是基于区域内和周边气象站风速数据采用公式 $W=v^2$ 计算获得(v 是站点风速,1990、2020年的平均风速分别为5.6、5.8 $m \cdot s^{-1}$)。植被覆盖度 V 通过NDVI数据计算并结合土地利用数据修正获得。

2.3.4 固碳

采用InVEST模型中的碳储存与封存模块计算固碳量:

$$C = (V \times C_v) + (S \times C_s) \quad (4)$$

式中: C 为固碳量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); V 为植被覆盖面积(hm^2); C_v 是植被固碳系数($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); S 为土壤面积(hm^2); C_s 为土壤固碳系数($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)。各参数赋值为: C_v :草地0.5 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,林地1.0 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,耕地0.3 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,沙漠0.1 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; C_s :沙土0.4 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,壤土0.6 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,黏土0.8 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ^[14-15]。

2.3.5 综合评价与格局分析

在单项服务功能评价的基础上,采用因子累加法进行综合服务功能的评价。不同生态系统服务功能权重用等值赋值法,即:水源涵养、水土保持、防风固沙和固碳能力的权重都为0.2。由于采用的4个评价因子单位不同,所以在累加评价之前对各因子进行归一化处理,获得无量纲结果,然后采用自然断点法做5级分类进行变化分析。

$$X_j = (X_i - X_{minj}) / (X_{maxj} - X_{minj}) \quad (5)$$

式中: X_j 为第 j 个单项服务功能归一化后的栅格值; X_i 为第 j 个单项服务功能归一化前的栅格值; X_{minj} 为第 j 个单项服务功能归一化前所有栅格中的最小值, X_{maxj} 为第 j 个单项服务功能归一化前所有栅格中最大值。综合生态服务功能大小由1级到5级逐渐增高,分别定义为1(低)级0.119~0.335、2(较低)级0.335~0.419、3(中等)级0.419~0.492、4(较高)级0.492~0.562和5(高)级0.562~0.762。综合评价的格局分析主要选取衡量不同级别斑块类型大小、密度、形状和空间关系的4个指标进行,计算在Fragstats中完成。

3 结果

3.1 单项生态系统服务功能评价

在InVEST模型中,水源涵养等4个模块的输出结果见图2,不同生态系统服务功能对应的空间属

性统计结果见表1。在流域尺度上,1990年和2020年水源涵养量分别为3.78 mm和8.40 mm。从水源涵养量分布格局来看,不同年份都以研究区南部黄土区和北部平原区较高,而中部沙漠区较低为特征(图2),水源涵养量由大到小依次为黄土区、平原区和沙漠区。数量化评估细节表明,1990年黄土区和平原区水源涵养量分别高于全流域0.86 mm和0.52 mm,而沙漠区则低于全流域1.8 mm;2020年只有黄土区水源涵养量高于全流域2.36 mm,而平原区和沙漠区都低于全流域,分别低了0.31 mm和3.35 mm。从土壤保持量分布格局来看,研究区内不同年份均是北部平原区较高,而中部沙漠区和南部砒砂岩黄土区较低,土壤保持量依次为平原区、沙漠区和黄土区。数量化评估细节表明,1990年平原区和沙漠区土壤保持量分别高于全流域43.10 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和21.44 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而黄土区则低于全流域40.54 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$;在2020年平原区和沙漠区土壤保持量分别高于全流域58.96 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和18.44 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而黄土区则低于全流域48.36 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。从防风固沙量分布格局来看,不同年份差异明显,1990年高值

区主要分布在不同地貌类型交错区东侧,呈分离状态;2020年已经连片分布,而且沙漠区防风固沙量明显提高;1990年不同地貌类型区防风固沙量相差不大,为2.02~2.27 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而2020年防风固沙量明显提高,为2.86~3.72 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。数量化评估细节表明,1990年黄土区防风固沙量高于全流域0.11 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而平原区和沙漠区则分别低于全流域0.04 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和0.14 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$;2020年沙漠区和黄土区防风固沙量高于全流域0.26 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和0.19 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而平原区则低于全流域0.60 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。从固碳量分布格局来看,不同年份特征一致,都是中部沙漠区和北部平原区较高,南部黄土区偏低,不同地貌类型区固碳量在不同年份相差不大,1990年为6.06~6.73 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,2020年为6.28~6.66 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。数量化评估细节表明,1990年黄土区固碳量低于全流域0.34 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而平原区和沙漠区则分别高于全流域0.21 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和0.33 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$;2020年黄土区固碳量仍低于全流域0.20 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而平原区和沙漠区则分别高于全流域0.14 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和0.18 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

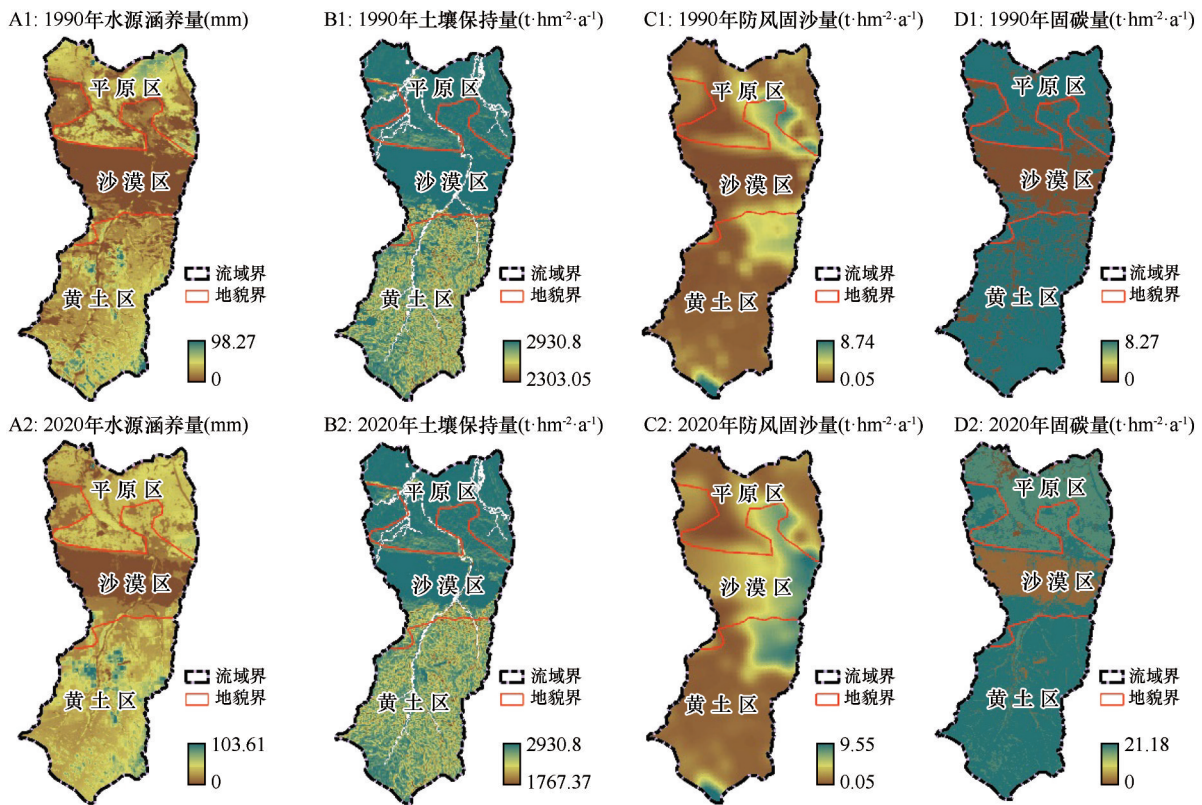


图2 西柳沟流域1990年和2020年不同生态系统服务功能空间分布

Fig.2 Spatial distribution of four ecosystem service functions in the Xiliugou Basin in 1990 and 2020

表1 单项生态系统服务功能评价

Table 1 Evaluation of individual ecosystem service functions

时间	服务功能	黄土区	沙漠区	平原区	全流域
1990年	水源涵养量/mm	4.64	1.98	4.30	3.78
	土壤保持量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2830.81	2892.79	2914.45	2871.35
	防风固沙量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2.27	2.02	2.12	2.16
	固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	6.06	6.73	6.61	6.40
2020年	水源涵养量/mm	10.76	5.05	8.09	8.40
	土壤保持量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2800.37	2867.17	2907.69	2848.73
	防风固沙量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	3.65	3.72	2.86	3.46
	固碳量/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	6.28	6.66	6.62	6.48

3.2 综合评价与分级格局

1990年西柳沟生态系统服务功能较高级别(4级)分布面积最大,为891.3 km²,占研究区面积44.8%(表2);较低(2级)和中等(3级)级别分布面积相差不大分别为454.5 km²和393.4 km²,占比分别为22.8%和19.8%;高(5级)级别分布面积为233.6 km²,占比为11.7%;低(1级)级别分布面积为16.4 km²,占比不足1%。2020年西柳沟生态系统服务功能仍以较高级别分布面积最大,与1990年相比增加了213.6 km²,达到了1104.9 km²,占研究区面积比例提高到了55.5%;分布面积居第二位是高级别,分布面积较1990年增加了138.1 km²,达到了371.7 km²,占比也提高到了18.7%;其余3个级别分布面积较1990年都呈减少状态,中等、较低和低三个级别分别减少了109.1、235.0、7.5 km²。

表2 综合评价分级构成特征

Table 2 Structural characteristics of comprehensive evaluation grades

级别	1990年		2020年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
低	16.4	0.9	8.9	0.4
较低	454.5	22.8	219.5	11.0
中等	393.4	19.8	284.3	14.3
较高	891.3	44.8	1104.9	55.5
高	233.6	11.7	371.7	18.7
合计	1989.3	100.0	1989.3	100.0

从分级格局来看(图3),1990年较低以下级别集中分布在中部沙漠区,较高级别主要在平原区,而高级别主要集中在平原与沙漠交错区和黄土区

最南部。到2020年,较低以下级别面积明显减少(表2,图3),主要分布在沙漠区西部,其他部分主要转换为中等和较高级别。高级别区域在1990年基础上呈扩大状态,其中黄土区东北部变化最明显。

从1990年综合评价分级格局数量化特点来看(表3),斑块破碎化方面以较低级别最高,斑块密度达到了3.01个·km⁻²;较高、中等和低级别破碎化程度差别不大,斑块密度变化在1.27~1.89个·km⁻²;高级别斑块破碎化最低,斑块密度为0.78个·km⁻²。从图3可以明显看出黄土区是各种级别斑块破碎化最为严重区,沙漠区次之,平原区最轻。从最大斑块指数来看,1990年较低和较高级别拥有连片分布的大斑块,最大斑块指数占流域面积的16.0%和14.1%;中等和高级别最大斑块指数分别为7.0%和5.9%,连片分布的最大斑块面积不到上述二类的一半;低级别斑块最大斑块指数相对甚微。从图3中可以明显看出,高和较高级别最大斑块分布在沙漠和黄土交错区,低级别最大斑块分布在沙漠区,中等级别分布在黄土区。从不同斑块级别平均分维数来看,由于本研究采用的分辨率为30 m,不同级别拥有大量独立栅格(斑块)分维数为1,使斑块分维数在不同级别相差无几,为1.039~1.046。从同级别斑块之间的距离来看,1990年低级别类型斑块平均距离最大,为163.5 m,说明该级别斑块之间的离散性最大,而高级别类型斑块间平均距离最小,为98.3 m,说明该级别斑块间聚集度较强,呈集中分布。

从2020年综合评价分级格局数量化特点来看(表3),斑块破碎化仍以较低级别最高,斑块密度为2.80个·km⁻²;中等和较高级别破碎化程度相近,斑

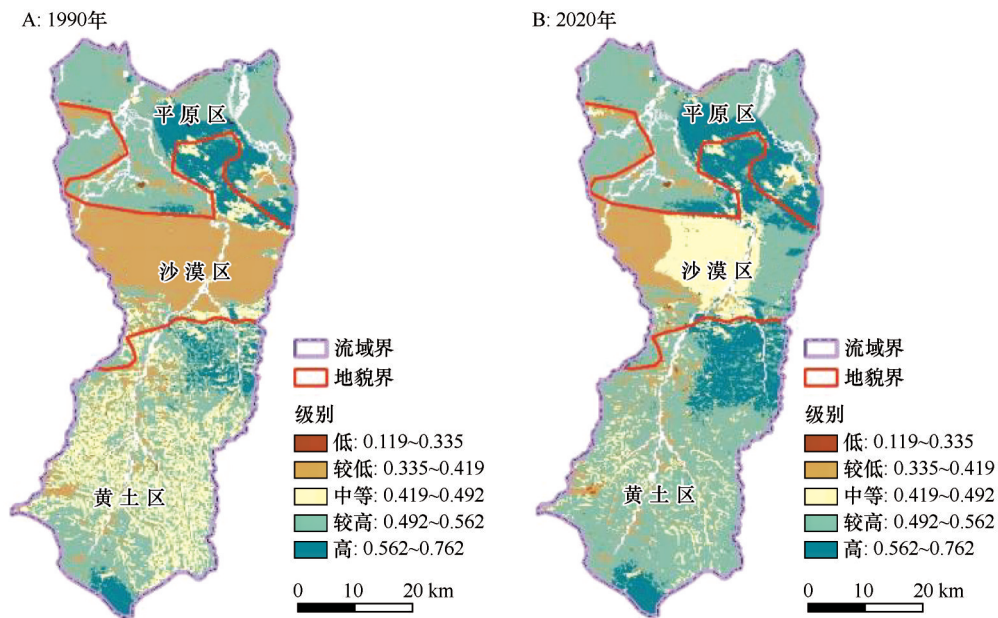


图3 西柳沟流域生态系统服务功能综合评价空间分布

Fig.3 Spatial distribution of comprehensive ecosystem service evaluation in the Xiliugou Basin

表3 综合评价分级类型景观格局特征

Table 3 Landscape pattern characteristics of comprehensive evaluation grades

年份	级别	斑块密度 (个·km ⁻²)	最大斑块 指数	平均分 维数	平均间 距/m
1990	低	1.27	0.05%	1.039	163.5
	较低	3.01	16.0%	1.044	122.4
	中等	1.43	7.0%	1.045	125.1
	较高	1.89	14.1%	1.046	115.1
	高	0.78	5.9%	1.045	98.3
2020	低	0.35	0.05%	1.039	222.0
	较低	2.80	4.8%	1.043	122.0
	中等	1.57	7.7%	1.046	134.0
	较高	1.50	29.1%	1.041	110.2
	高	0.92	8.5%	1.040	137.1

块密度分别为 1.57 个·km⁻²和 1.50 个·km⁻²;高级别斑块密度为 0.92 个·km⁻²,低级别为 0.35 个·km⁻²。从最大斑块指数来看,较高级别拥有连片分布的大斑块,最大斑块指数占流域面积的 29.1%;高和中等级别最大斑块指数相差不大,分别为 8.5%和 7.7%,最大斑块面积不到较高级别的 1/3;与 1990 年相比,较低级别最大斑块指数显著减少,为 4.8%,低级别最大斑块指数保持稳定,仍为 0.05%。不同斑块级别平均分维数变化幅度与 1990 年相似,也为 1.039~

1.046,略有不同的是除低级别类型分维数保持不变外,其他级别各有微量增减。从不同级别斑块间距离来看,2020 年仍以低级别类型斑块平均距离最大,为 222.0 m,保持最大的斑块间离散性,而高和中等级别类型斑块间平均距离相差不大,分别为 137.1 m和 134.0 m;与 1990 年相比较,较低和较高级别斑块间距都为减少状态,斑块间距分别为 122.0 m和 110.2 m,分别减少了 0.4 m和 4.9 m。

4 讨论

十大孔兑生态系统服务功能在不同地貌区空间差异比较明显,这些差异不仅表现在不同服务功能单项评价中,而且在时间尺度上也具有较显著的特点^[6-7,10]。其中,水源涵养量以黄土区最高、平原区次之和沙漠区最低为特点,而且这一特点在此次两个研究时段中具有 consistency。从变化特点来看,1990—2020 年全流域和不同地貌分区水源涵养量都呈增加趋势,全流域水源涵养量增加了 4.62 mm,是 1990 年的 2.2 倍;各地貌分区以沙漠区增加最明显,增加了 3.07 mm,是 1990 年的 2.55 倍。这与西柳沟流域在过去 30 多年中因植被恢复与生态建设工程极大改善了地表植被覆盖状态密切相关,而植被因子在 InVEST 模型水源涵养功能模块计算中具有较高的赋值。

土壤保持量以平原区最高、沙漠区次之和黄土

区最低为特点,这一特点同样在此次两个研究时段中具有一致性。从变化特点来看,1990—2020年全流域和不同地貌分区土壤保持量都呈减少趋势,全流域土壤保持量减少了 $22.62 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是1990年的99.2%;各地貌分区减少不明显,其中黄土区减少最多,为 $30.44 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是1990年的98.9%。产生这一结果与当年降水量和降水分布格局有关,虽然从1990—2020年,研究区的植被状况和水土保持与荒漠化治理得到逐步改善与加强,但是土壤保持量计算中最大影响变量是降雨侵蚀力^[8]。而离西柳沟最近的达拉特旗气象站观测数据表明2020年的降雨量(359.1 mm)高于1990年(347.0 mm),差别不大,造成2020年土壤保持量略有下降可能与年内大于12 mm降水量的差异有关。防风固沙量在不同时段存在差异,1990年以黄土区最高,2020年以沙漠区最高。从变化特点来看,1990年到2020年全流域和不同地貌分区防风固沙量都呈增加趋势,全流域防风固沙量增加了 $1.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是1990年的1.6倍;各地貌分区以沙漠区增加最明显,增加了 $1.70 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是1990年的1.8倍。西柳沟流域防风固沙功能改善在沙漠区最大,这与该区域近30多年坚持荒漠化治理与利用密切相关,多年累积的“三北”防护林工程、环京津风沙源治理工程的成果,是该区域防风固沙功能改善的根本原因^[10-11]。固碳量以沙漠区最高、平原区次之和黄土区最低为特点,这一特点在本次研究的两个时段中也具有一致性(表1)。从变化特点来看,1990—2020年除沙漠区为弱减少趋势(减少了 $0.07 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)外,全流域和其他地貌分区固碳量都呈弱增加趋势,全流域仅增加了 $0.08 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;各地貌分区以黄土区增加相对明显,增加了 $0.22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是全域增量的2.75倍。固碳量变化不大,与2020年遥感数据选择受限、无法获取最佳(云量为0)生长旺期数据有关。

考虑到现状生态系统服务功能具有多维度的特点,采用综合分级格局评价对生态系统服务功能具有更好的概括性和客观性。在1990年,综合评价分布面积最大的较高级别,斑块密度、最大斑块指数和斑块间平均距离都小于分布面积居次位的较低级别。这与西柳沟流域地貌分异明显有关,较低级别在沙漠区集中连片分布拉高了最大斑块指数,而在黄土区零散分布导致了斑块密度增加,在平原

区的离散分布又导致了斑块间距加大。较高级别最大斑块分布在平原区,而黄土区同样也是该级别零散分布密集区。所以,从地貌分区差异对生态系统服务功能影响来看,黄土区最复杂导致分级格局空间异质性最高;沙漠区和平原区空间异质性相对较低。在2020年,综合评价分布面积最大仍是较高级别(表2),斑块密度和最大斑块指数都大于分布面积居次位的高级别,而斑块间距相反。这种结果表现在地貌分异上呈现出以下两个特点,一是在黄土区和平原区较高级别呈连片分布,二是高级别主要分布在平原-沙漠交错区和沙漠-黄土交错区。综合评价分级格局的变化(1990—2020年)主要发生在黄土区和沙漠区。其中,高和较高级别分布面积增加,分别增加了 138.1 km^2 和 213.6 km^2 ,低、较低和中等级别面积减少,分别减少了7.5、235.0、109.1 km^2 。导致变化的原因是近30年的砒砂岩黄土区水土保持工程实施、草原科学禁牧和库布齐沙漠化治理与开发利用并举等生态工程建设^[12-15]。

5 结论

西柳沟地貌类型空间分异格局对生态系统服务功能有明显影响。1990—2020年,水源涵养量增加了4.62 mm,其中沙漠区增加幅度最大,达到2.55倍;土壤保持量减少了 $22.62 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中黄土区减少最多,为 $30.44 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;防风固沙量增加了 $1.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中沙漠区增加最大,为 $1.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;固碳量增加了 $0.08 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中黄土区增加最大,为 $0.22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

在时间尺度上,生态服务功能综合评价较高级别的部分都是分布面积最大类型。1990年较低级别在沙漠区集中连片分布,2020年较高级别在黄土区和平原区呈连片分布,都是最大斑块指数居高的根本原因。综合评价分级格局变化主要发生在黄土区和沙漠区,在研究时段内高和较高级别面积分别增加了 $138.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $213.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,低、较低和中等级别面积分别减少了7.5、235.0、109.1 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] Costanza R, d'Arge R, DeGroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630):253-260.

- [2] 张恺, 易桂花, 张廷斌, 等. 川西高原生态系统服务功能权衡协同关系及其归因分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 366-376.
- [3] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676.
- [4] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1418-1426.
- [5] 王东东, 贾仰文, 牛存稳, 等. 基于 WEP-L 模型的水源涵养不同功能评估方法: 以渭河涵养区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4342-4352.
- [6] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [7] 张皓月, 占车生, 夏军, 等. 黄河流域内蒙古段植被时空变化特征及条带状分布成因[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8818-8829.
- [8] 陶勤, 王世航, 王奇, 等. 基于 InVEST 模型的川滇生态屏障区土壤保持功能评价[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1548-1556.
- [9] 王硕, 盛艳, 范淑花, 等. 基于 InVEST 模型的窟野河流域碳储量变化对土地利用格局的响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 149-158.
- [10] 白雪莲, 王理想, 季树新, 等. 鄂尔多斯草原沙漠交错区生态系统健康评价: 以十大孔兑为例[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 187-194.
- [11] 柴志福, 陈正新, 武海霞, 等. 基于高分遥感技术的库布齐沙漠风沙入十大孔兑量研究[J]. 内蒙古水利, 2022, 9: 2-5.
- [12] 王鹏, 马逸伦, 程静, 等. 宁夏水源涵养功能时空演变格局及其归因分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 191-199.
- [13] Yang H, Shi C. Sediment grain-size characteristics and its sources of ten wind-water coupled erosion tributaries (the Ten Kongduis) in the Upper Yellow River [J]. *Water*, 2019, 11(1): 115-115.
- [14] 曹鹏辉, 齐晓明, 杨雯, 等. 内蒙古土地利用多情景模拟与碳储量预测分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 83-90.
- [15] 祁迷, 王飞, 滑永春, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 194-200.

Spatial pattern and changes of ecosystem service functions in the Xiliugou Basin of Ordos, Inner Mongolia

Han Yan^{1,2}, Qiao Rongrong^{2,3}, Chang Xueli²

(1. Weifang Middle School, Weifang 261031, Shandong, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; 3. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In the context of climate change and increasingly intensive human activities, the evaluation of ecosystem service functions has become one of the primary research directions in Earth sciences. In particular, the continuous improvement of the integration between the InVEST model and ArcGIS has made it possible to assess ecosystem service functions, such as water conservation, soil retention, windbreak and sand fixation, and carbon sequestration. These assessments have become critical references for regional sustainable development planning. This study combines the InVEST model with the spatial analysis module of ArcGIS to analyze the impact of geomorphic differentiation on both independent and integrated ecosystem service functions in the Xiliugou watershed. It also explains changes in the ecosystem service functions over the past three decades. The results showed that: geomorphic type spatial differentiation has a significant impact on ecosystem service functions. Between 1990 and 2020, water conservation increased by 4.62 mm, with the largest increase (2.55 times) occurring in desert areas; soil retention decreased by 22.62 t·hm⁻²·a⁻¹, with the most significant reduction (30.44 t·hm⁻²·a⁻¹) observed in loess regions; deposit by windbreak and sand fixation increased by 1.30 t·hm⁻²·a⁻¹, with the largest increase (1.7 t·hm⁻²·a⁻¹) in desert areas; and carbon sequestration increased by 0.08 t·hm⁻²·a⁻¹, with the most notable increase (0.22 t·hm⁻²·a⁻¹) in loess regions. The comprehensive evaluation pattern analysis revealed that higher-level types occupy the largest distribution areas at different time points. The spatial pattern characteristics of different levels are marked by the concentration of lower-level types in desert areas in 1990 and the concentration of higher-level types in loess and plain areas in 2020. Changes caused by geomorphic differentiation in the study area were most pronounced in loess and desert regions. Overall, high and higher-level areas increased by 138.1 t·hm⁻²·a⁻¹ and 213.6 t·hm⁻²·a⁻¹, respectively, while low, lower, and medium-level areas decreased by 7.5 t·hm⁻²·a⁻¹, 235.0 t·hm⁻²·a⁻¹, and 109.1 t·hm⁻²·a⁻¹, respectively. The changes in ecosystem service functions in the Xiliugou watershed are closely related to ecological engineering projects implemented over the past three decades, including soil and water conservation efforts with scientific rotational grazing in the loess area, and integrated management and utilization of Kubuqi desertification.

Key words: ecosystem services; assessment; InVEST model; Xiliugou