杜军,武娟娟,旭日干,等.十大孔兑流域生态系统服务功能及其耦合机制[J].中国沙漠,2026,46(5):1-10.

十大孔兑流域生态系统服务功能及其耦合机制

杜 军[1],武娟娟[1,2],旭日干[3],何志斌[1],贾晓鹏[1],陈龙飞[1],刘崇旺[4]

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站,甘肃 兰州 730000;2.中国科学院大学,北京 100049;3.鄂尔多斯市水利事业发展中心,内蒙古 鄂尔多斯 017010;4.东北农业大学,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:大尺度生态系统服务功能评价是宏观生态学研究的主要方向,恰当的方法应用和评价因子选择是生态系统服务功能评价的基础。本文采用InVEST模型和RWEQ模型分别计算了十大孔兑地区水源涵养、土壤保持、防风固沙、固碳能力和生境质量生态系统服务功能,同时在ArcGIS环境中用PCA模块分析了独立服务功能对综合服务功能影响的耦合机制。结果表明:不同服务功能空间格局主要受南北向的地貌类型差异和东西向流域间人工植被建设力度差异的影响。1990—2020年,全域水源涵养功能增加了6.267 mm;土壤保持功能增加了0.320 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;防风固沙功能增加了1.598 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;固碳能力期增加了0.684 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;生境质量功能增加了0.062。单项生态系统服务功能对综合服务功能评价的耦合机制在不同年份有所差别。1990年,最大的耦合作用(PC1,64.31%)由固碳能力和生境质量所主导,其次耦合作用(PC2,29.78%)由防风固沙功能所支配,表明植被状况、生境多样性和防沙治沙力度决定了该年生态系统服务功能综合水平。2020年,最大的耦合作用(PC1,65.52%)由防风固沙功能所主导,其次耦合作用(PC2,28.72%)由生境质量功能所支配,表明防沙治沙力度和生境多样性决定了该年生态系统服务功能综合水平。过去30年,流域生态系统服务从以植被状况和生境多样性为主,逐步过渡到以防沙治沙为核心,这一转变体现出人类活动对生态系统服务功能产生的深远影响。

关键词:生态系统;服务功能评价;InVEST;PCA;十大孔兑

文章编号:1000-694X(2026)05-001-10 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00241

中图分类号:Q148 **文献标志码**:A

0 引言

生态系统服务功能是指生态系统通过其结构和过程向人类社会提供的各种直接和间接的资源供给、调节、支持以及文化服务[1-3]。近年来,随着全球环境问题的日益严峻,基于生态系统服务功能评价区域环境现状在全球范围内得到了广泛关注。生态系统服务功能的概念最早在20世纪60年代提出,旨在描述生态系统对人类社会的贡献[4]。随后,随着研究深入和全球环境问题加剧,生态系统服务概念不断得到扩展和深化。特别是"千年生态系统评估"构建的供给、调节、文化和支持分类评估体系,被广泛应用于不同时空尺度生态系统服务功能的研究中,其融合生态学、经济学和环境科学等领域的特点,成为对不同区域生态系统服务功能进行评估的主要途径[5]。在北美、欧洲和东亚等地区的研究已经表明,量化生态系统服务功能不仅可以揭示生态系统服务对人类社会的价值,还可以为制定可持续性发展政策提供科学依据[6-8]。Costanza等[9]、王金凤等[10]、吴爱林等[11]量化了全球生态系统服务的经济价值,并在全球范围内引起了广泛关注。此外,国内的生态系统服务功能评价研究也逐渐崛起,尤其是在长江流域、黄河流域等生态系统重要区域,许多学者利用模型和遥感数据对生态系统服务功能进行了深入评估和预测。

在生态系统服务功能评价方法上,模型工具的应用已成为重要研究手段,其中InVEST模型是目前国际上广泛使用的评价工具[12]。该模型能够定

收稿日期:2025-06-22;**改回日期**:2025-09-29

资助项目:"科技兴蒙"行动重点专项(2022EEDSKJXM004-2);国家自然科学基金项目(U2443223,42271018)

作者简介:杜军(1986—),男,山东聊城人,副研究员,研究方向为植物生态与生态遥感。E-mail:dujun2012@lzb.ac.cn

量评估包括水源涵养、碳储量、生物多样性维持等在内的多种生态系统服务功能，并通过空间分析揭示生态系统服务的空间分布特征[13]。InVEST模型的应用不仅提升了生态系统服务功能评价的准确性，还能评估不同情境下的生态系统服务功能变化，从而为流域管理和规划提供决策支持。此外，还发展了其他多种生态系统服务评价方法，例如基于遥感和地理信息系统技术的空间分析方法，能够对大尺度生态系统服务功能进行空间评估和预测[14]。特别是通过模型与遥感融合的评估方法，可以更全面地了解流域生态系统服务功能的时空变化以及驱动机制。在黄河流域、长江流域等地区的研究中，研究人员不仅评估了流域的水源涵养功能，还揭示了土地利用变化、气候变化等因素对流域生态系统服务功能的影响[15-16]，指出了流域生态系统服务功能受到土地利用变化、气候变化和人类活动的共同驱动；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、水土保持和碳储量等方面[17-18]。位于黄河“几字弯”的内蒙古十大孔兑地区位于中国北方半干旱区，境内降水量呈现由东向西递减趋势，分布有自南向北流经砒砂岩黄土区、库布齐沙漠和洪积冲积平原区汇入黄河的十条季节性河流[19]。该区域特有的黄土地貌、风沙地貌和平原组合使水源涵养、防风固沙、水土保持等方面生态服务功能研究在半干旱地区具有较好的代表性[20]。

因此，本文选取1990年和2020年作为研究时段，将InVEST模型作为主要分析工具，同时结合RWEQ模型与遥感技术等方法，对十大孔兑地区生态系统服务功能从水源涵养、土壤保持、防风固沙、固碳能力和生境质量等5个方面进行单项和综合评估。拟解决的科学问题为：①不同的生态系统服务功能空间格局与变化规律；②单项生态系统服务功能与综合服务功能耦合机制。最终实现为区域生态工程规划设计和土地资源利用管理提供科学依据。

1 研究区

本研究区为内蒙古十大孔兑流域，海拔900~1 600 m，总面积约为1.02万 km^2，涵盖了呼斯太河、罕台川、毛不拉孔兑等10条黄河一级支流流域（图1）。植被类型主要为南部黄土砒砂岩区的典型草原植被、中部库布齐沙漠的沙生草本与灌丛植被，以及北部冲积洪积平原的人工乔木林和农业植被[21]。年降水量200~400 mm，自东向西递减，降水集中在夏季，但蒸发量大[22]。研究区内分布有典型的水力侵蚀区和风力侵蚀区，总体上生态环境较为脆弱。

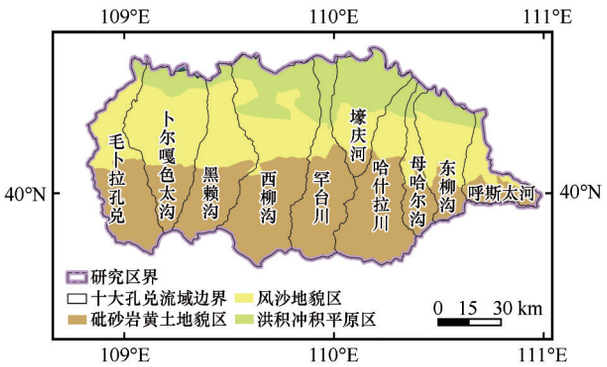


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

2 研究方法

2.1 数据源

本研究通过多种途径收集并处理了1990年和2020年的土地利用、气象、地形和土壤等基础数据。土地利用数据来自Landsat遥感影像，1990年使用Landsat 5 TM影像，2020年则采用Landsat 8 OLI影像。通过影像预处理（包括辐射校正、大气校正和几何校正等）以及监督分类，并辅以目视解译进行精度检验，获取研究区在1990年和2020年不同土地利用类型的空间分布情况（分辨率为30 m）。气象数据包括年降水量、年平均气温和潜在蒸散量等指标，基于国家气象数据中心的逐日气象观测数据统计获得，选取位于研究区内和周边的东胜、包头等气象站的数据。为消除气象数据的空间差异，采用反距离加权法（IDW）对气象数据进行了空间插值处理，生成分辨率为30 m的空间数据，以确保数据在整个研究区域内的适用性。地形数据使用美国地质调查局（USGS）提供的SRTM DEM数据（30 m分辨率），在ArcGIS环境中提取坡度、坡向等地形因子，为水源涵养、土壤保持等生态系统服务功能的评价提供基础数据支持。土壤数据包括类型、质地、深度和有机碳含量等信息，数据来源于中国土壤科学数据库。通过空间重采样（30 m分辨率）和统一分类标准，确保研究区域内土壤数据的精度和一致性，为后续的生态系统服务功能评估提供数据基础。

2.2　评估方法

本研究主要采用InVEST模型及RWEQ模型来对十大孔兑流域的水源涵养、土壤保持、防风固沙、生境质量和固碳能力的生态服务功能进行定量计算评估[23-24]，然后再用归一化后的单项在ArcGIS环境中进行综合评估分析。

2.2.1　水源涵养功能

利用InVEST模型中的WY（Water Yield）模块计算水源涵养功能，原理是基于水量平衡方法，考虑各土地利用类型土壤渗透性的空间异质性，结合地形要素、粗糙度因子等进行分析：

$$WY_{xj}=\left(1-\frac{AET_{xj}}{P_x}\right)\cdot P_x \tag{1}$$

式中：x为栅格单元；j为土地利用类型；WY_{xj}为栅格x上土地利用j的年产水量；AET_{xj}为栅格x上土地利用j的实际年蒸散量；P_x为栅格x的年降水量。关于产水量的计算中所用到的植物可利用含水量和季节常数的确定借鉴文献[25]。

2.2.2　土壤保持功能

土壤保持功能的计算借助InVEST模型中SDR模块来实现，基本原理为裸地的潜在土壤侵蚀量（SE_P）减去植被覆盖的实际土壤侵蚀量（SE_A）[26]。

$$SC=SE_P-SE_A \tag{2}$$

$$SE_P=R\cdot K\cdot LS \tag{3}$$

$$SE_A=R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P \tag{4}$$

式中：SC为土壤保持量；R为降雨侵蚀力因子；K为土壤可蚀性因子；LS为坡长和坡度因子；C为植被覆盖因子；P为土壤保持措施因子。

2.2.3　防风固沙功能

本研究采用修正土壤风蚀模型（RWEQ）来计算十大孔兑流域防风固沙服务质量，该模型在考虑气候、植被、地形和土壤等因素基础上，以裸土背景下的潜在风蚀量与植被覆盖情况下的实际风蚀量之差来确定防风固沙功能变化[24,27]。

$$SP=S_{LP}-S_L \tag{5}$$

$$S_{LP}=\frac{2Z}{S_P^2}\cdot Q_{maxP}\cdot e^{-\left(Z/S_P\right)^2} \tag{6}$$

$$Q_{maxP}=109.8(WF\cdot EF\cdot SCF\cdot K') \tag{7}$$

$$S_P=150.71(WF\cdot EF\cdot SCF\cdot K')^{-0.3711} \tag{8}$$

$$S_L=\frac{2Z}{S^2}\cdot Q_{max}\cdot e^{-\left(Z/S\right)^2} \tag{9}$$

$$Q_{max}=109.8(WF\cdot EF\cdot SCF\cdot K'\cdot C) \tag{10}$$

$$S=150.71(WF\cdot EF\cdot SCF\cdot K'\cdot C)^{-0.3711} \tag{11}$$

式中：SP为单位面积固沙量；S_{LP}为潜在风蚀量；S_L为实际风蚀量；Z为下风向距离；SP为潜在关键地块长度；S为关键地块长度；Q_{maxP}为潜在风沙最大转运量；Q_{max}为实际风沙最大转运量；WF为气候因子；EF为土壤可蚀性因子；SCF为土壤结皮因子；K'为地表粗糙度因子；C为植被覆盖因子。

2.2.4　生境质量功能

本研究采用InVEST模型的HQ模块来计算十大孔兑流域的生境质量服务，该模块是基于考虑不同土地利用类型的敏感性和威胁源强度来计算，输出结果处于[0,1]，值越大，生境质量越好。

$$Q_{xj}=H_j\cdot\left(1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right) \tag{12}$$

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^{R}\omega_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{13}$$

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}}\right) \tag{14}$$

式中：Q_{xj}为土地利用类型j中栅格x的生境质量；H_j为j的生境适宜度；D_{xj}为j中x所受威胁水平；k为半饱和常数；z为归一化常数，通常取值2.5；R/r为胁迫因子；Y_r为胁迫因子所占栅格数；ω_r为胁迫因子的权重；r_y是栅格y的胁迫因子值，通常取0或1；i_{rxy}为y的r_y对x的胁迫水平；β_x为x的可达性水平，取值[0,1]；S_{jr}为j对r的敏感性，取值[0,1]；d_{xy}为x与y的直线距离；d_{rmax}为r最大影响距离。本文中关于胁迫因子及各土地利用类型对胁迫因子的敏感度的确定参考已有文献结果[27]。

2.2.5　固碳能力功能

本研究采用InVEST模型的CSS（Carbon storage and sequestration）模块来计算十大孔兑流域的固碳能力，该模块中关于碳储量的计算，是根据四大基本碳库（即地上生物量、地下生物量、土壤有机质和死亡有机质）来估算目前储存在景观中的碳量。

$$C_{tot}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \tag{15}$$

式中：C_{tot}为总碳储量；C_{above}为地上生物碳储量；C_{below}为地下生物碳储量；C_{soil}为土壤有机碳储量；C_{dead}为死亡有机碳储量；对于以上4个分量碳密度的确定参考已有研究结果[12]。

2.2.6　综合评价

在单项服务功能评价的基础上，采用权重叠加

法进行综合服务功能的评价。不同生态系统服务功能的重要性依据文献的专家打分法确定的权重进行赋值，水源涵养、土壤保持、防风固沙、生境质量、固碳能力的权重分别为0.25、0.25、0.2、0.15、0.15[28]。由于所采用的5个评价因子单位不同，所以综合评价采用各因子的归一化后数据进行评价，结果通过自然断点法做5级分类进行变化分析。综合生态服务功能由I级到V级逐渐增高，分别定义为I级（低，0.207~0.376）、II级（较低，0.376~0.444）、III级（中等，0.444~0.485）、IV级（较高，0.485~0.540）和V级（高，0.540~0.707）。综合生态服务功能变化在分级基础上判定，用2020年减去1990年，若：大于0，为改善区；等于0，为稳定区；小于0，为退化区。研究区生态系统综合服务功能耦合机制分析在ArcGIS中用PCA模块分析完成，输入数据采用5个单项评价归一化栅格数据。

3 结果与分析

3.1 单项生态系统服务功能评价

从研究区的水源涵养功能来看，1990、2020年水源涵养能力分别为4.304、10.570 mm（总量分别为4.4035×10^7、1.0816×10^8 m^3，表1），2020年较1990年增加了6.27 mm（总量增加了6.41255×10^7 m^3）；在分布格局上，研究区东部呼斯太河至罕台川流域的南部砒砂岩黄土区具有较高的水源涵养功能，而中西部罕台川至毛卜拉孔兑的风沙地貌区（库布齐沙漠）较低（图2）。在土壤保持功能方面，1990、2020年分别为28.403、28.723 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$（总量分别为$2.9064\times10^8$、$2.9391\times10^8$ $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$），期间土壤保持功能变化较小，仅增加了0.320 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；研究区中部风沙地貌区和北部洪积冲积平原区具有较高的土壤保持能力，而南部的砒砂岩黄土区则较低。从防风固沙功能角度，1990、2020年分别为2.980、4.578 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$（总量分别为$3.0493\times10^7$、$4.6840\times10^7$ $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$），2020年较1990年增加了1.598 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；研究区防风固沙功能在呼斯太河到壕庆河的中部库布齐沙漠区域最高，最西边的毛卜拉孔兑流域相对较高，而其余区域均较低。就固碳功能而言，1990、2020年的值分别为6.966、7.649 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$（总量分别为$7.1277\times10^7$、$7.8272\times10^7$ $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$），2020年比1990年增加了0.684 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；两个时段的高值区主要集中在黑赖沟到毛卜拉孔兑的砒砂岩黄土区和库布齐沙漠，呼斯太河至哈什拉川的砒砂岩黄土区和库布齐沙漠交错区也有少量高值区分布。在生境质量功能方面，1990年和2020年的值分别为0.199和0.2614，低值区主要分布在中部的库布齐沙漠；从时间变化来看，1990—2020年，低值区的分布面积显著减少，主要在黑赖沟到毛卜拉孔兑流域内的区域。

表1 单项生态系统服务功能评价

Table 1 Functional evaluation of individual ecosystem services

年份	水源涵养/mm	土壤保持/($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)	防风固沙/($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)	固碳能力/($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)	生境质量
1990	4.3035	28.4032	2.9800	6.9658	0.1994
2020	10.5703	28.7234	4.5776	7.6494	0.2614

3.2 生态系统服务功能综合评价

1990年服务功能空间格局结果显示，I级（差）和V级（好）主要分布在研究区中部的风沙地貌区（图3）。在子流域分布上，I级功能区域主要位于罕台川至毛卜拉孔兑一带，而V级功能区域集中分布在呼斯太河至壕庆河之间。在研究区南部的砒砂岩黄土区，生态服务功能以III级（中等）为主，集中分布在东柳沟至毛卜拉孔兑之间。从各级分布面积来看（表2），III级面积最大，为3 661.3 km^2，占研究区总面积的35.8%；IV级（较好）和I级次之，分别为2 263.4 km^2和2 068.8 km^2，面积占比分别为22.1%和20.2%；V级和II级（较差）分布面积较小，分别为1 383.0 km^2和847.2 km^2，面积占比分别为13.5%和8.3%。

相对于1990年，2020年服务功能空间格局发生了明显变化，I级分布范围显著缩小，而V级分布范围在研究区东部和西部均有扩张（图3）。具体而言，I级区域缩小至卜尔嘎斯台沟流域中部，而V级区域在东部原分布范围内趋于同质化，并在西部出现显著扩张。此外，在原来III级分布的区域，II级取代了大部分面积。从各级分布面积来看（表2），2020年II级面积最大，为3 383.6 km^2，占研究区总面积的33.1%；III级次之，为2 855.5 km^2，占比为

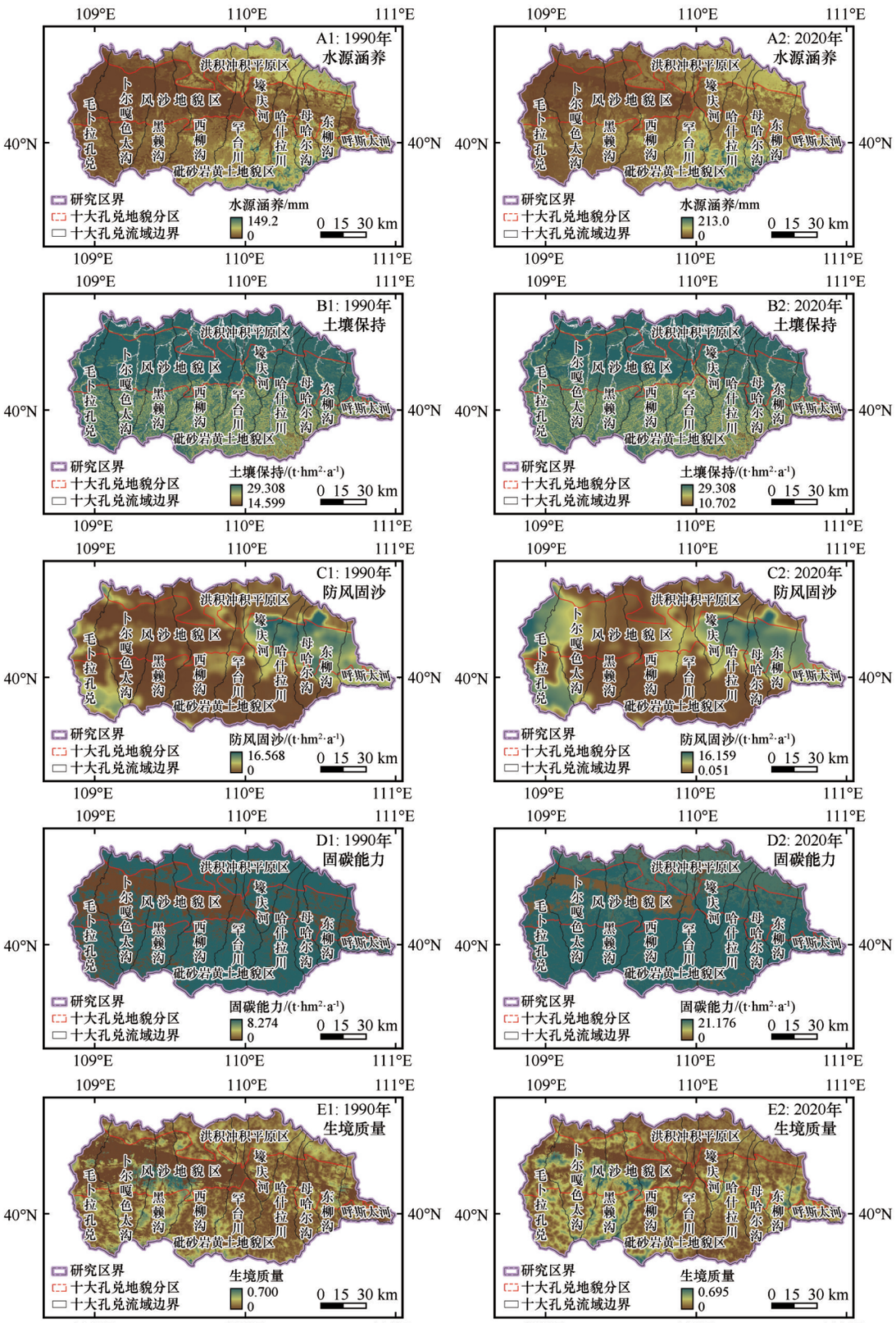


图2　1990年和2020年生态系统服务功能空间分布

Fig.2　Spatial distribution of ecosystem service functions in 1990 and 2020

27.9%；IV级和V级面积相近，分别为1 520.3 km²和1 819.7 km²，占比分别为14.9%和17.8%；I级面积最小，为644.1 km²，占比6.3%。

1990—2020年，研究区综合生态服务功能分级

表 2 综合评价分级统计特征

Table 2 Statistical characteristics of the integrated evaluation hierarchy

级别	1990年面积 /km²	2020年面积 /km²	变化 /km²	变化比例 /%
I	2 068.8	644.6	−1 424.2	−68.8
II	847.2	3 383.6	2 536.4	299.4
III	3 661.3	2 855.5	−805.8	−22.0
IV	2 263.4	1 520.3	−743.1	−32.8
V	1 383.0	1 819.7	436.7	31.6
合计	10 223.7	10 223.7	—	—

的面积变化具有以下特点(表 2):II级和V级分布面积显著增加,分别增加了 2 536.4 km²和436.7 km²;而I级、III级和IV面积则有所减少,分别减少了 1 424.2 km²、805.8 km²和 743.1 km²。其中,II级面积的增加最为显著,2020 年的面积是 1990 年的 3 倍。总体而言,十大孔兑流域综合生态服务能力在过去 30 年有 39.69% 的区域呈现出衰减趋势,而 23.33% 的范围则表现出功能较大改善,其余 36.98% 的面积处于相对稳定的状态(表 3)。从综合生态服务功能分级变化的空间格局来看(图 4),生态服务功能改善区域主要分布在中部风沙地貌区(如库布齐沙漠),尤其集中在西部的毛卜拉孔兑和卜尔嘎斯台沟流域;生态服务功能退化区域则主要分布在南部的砒砂岩黄土区和北部的洪积冲积平原区。生态功能稳定区域在研究区全境均有分布,其中中部风沙地貌区分布最为集中,而其他区域的分布较为破碎化。

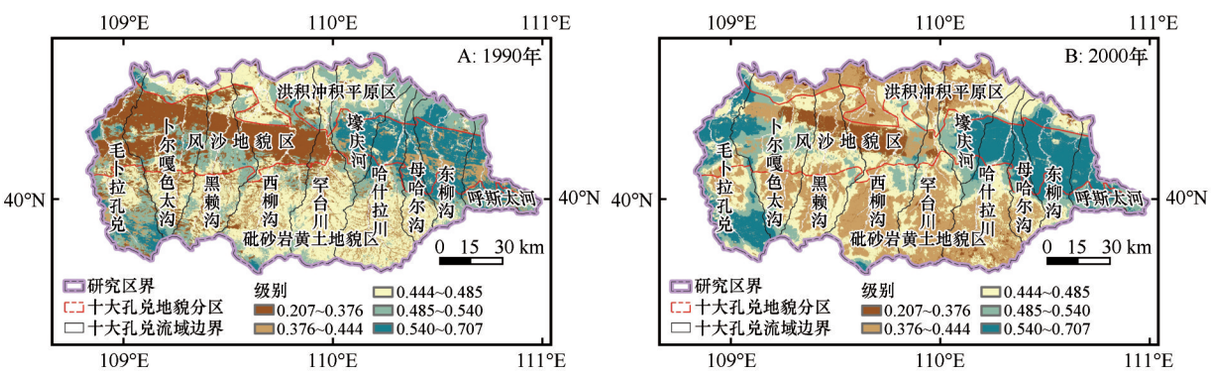


图 3 十大孔兑区域生态系统服务功能综合评价

Fig.3 Comprehensive assessment of ecosystem service functioning in the Ten Kongwe regions

表 3 综合评价变化特征

Table 3 Integrated evaluation of change characteristics

服务功能变化	面积/km²	比例/%
改善区	2 384.7	23.33
稳定区	3 781.1	36.98
衰减区	4 057.9	39.69
合计	10 223.7	100.00

3.3 1990 年与 2020 年综合服务功能耦合机制

由于本文采用 5 个评价因子的加权累加方法量化综合生态系统服务功能,因此分析评价因子的耦合机制是理解生态系统服务功能的关键补充。首先,从表 4 的相关性分析结果可见,在 1990 年和 2020 年的 5 个评价因子中,除生态质量与固碳能力的相关系数较高(分别为 0.8774 和 0.7292)外,其余因子之间的相关系数(绝对值)均未超过 0.4930,各评价因子间相互独立基本可信。

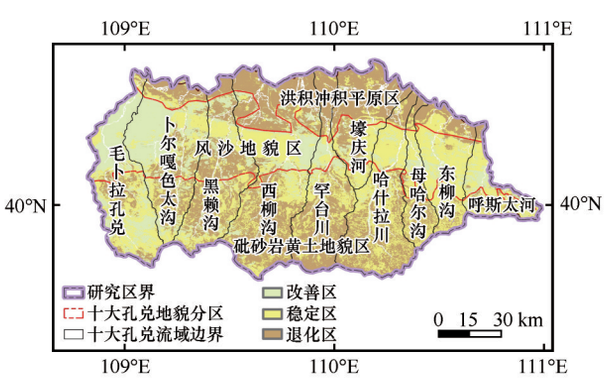


图 4 1990 年与 2020 年综合生态系统服务功能变化

Fig.4 Changes in integrated ecosystem service functions between 1990 and 2020

主成分分析(PCA)的结果显示,无论在 1990 年还是 2020 年,主成分 PC1 和 PC2 的累积贡献率均超过 90%(表 5),说明研究区生态系统服务功能的因子耦合作用主要集中于这两个主成分维度。具体而言,1990 年,除土壤保持功能对 PC1 向量(贡献率

表 4　不同评价因子关联系数

Table 4　Correlation coefficients of different evaluation factors

年份	功能类型	水源涵养	土壤保持	防风固沙	固碳能力	生态质量
1990	水源涵养	1				
	土壤保持	−0.3843	1			
	防风固沙	−0.0095	0.1072	1		
	固碳能力	0.4930	−0.3434	0.0626	1	
	生态质量	0.3741	−0.2177	0.0304	0.8774	1
2020	水源涵养	1				
	土壤保持	−0.4055	1			
	防风固沙	−0.2403	0.1462	1		
	固碳能力	0.3012	−0.2461	−0.0107	1	
	生态质量	0.0781	−0.1124	−0.0106	0.7292	1

为64.31%)产生负向作用(载荷量为−0.0538)外,其余因子均为正向作用;固碳能力(载荷量为0.8035)和生态质量(载荷量为0.5879)的贡献最大,其他因子的载荷量均未超过0.0651(绝对值)。PC2向量(贡献率为29.78%)主要以土壤保持功能和防风固沙功能为正向作用,其余因子为负向作用;从载荷量来看,防风固沙功能贡献最大(载荷量为0.9970),而其他因子的载荷量均未超过0.0568(绝对值)。2020年的结果表明(表5),水源涵养功能和固碳能力对PC1向量(贡献率为65.52%)起负向作用,其余因子均为正向作用;防风固沙功能对PC1向量的贡献最高(载荷量为0.9988),其余因子载荷量均未超过0.0357(绝对值)。PC2向量(贡献率为28.72%)除土壤保持功能为负向作用外,剩余因子均为正向作用;生态质量功能的贡献最大(载荷量为0.9483),而其他因子的载荷量均未超过0.3131(绝对值)。

表 5　不同评价因子 PCA 分析特征向量与特征值

Table 5　Eigenvectors and eigenvalues of PCA analysis for different evaluation factors

评价指标	1990年		2020年	
	PC1	PC2	PC1	PC2
水源涵养	0.0406	−0.0070	−0.0357	0.0244
土壤保持	−0.0538	0.0364	0.0315	−0.0441
防风固沙	0.0651	0.9970	0.9988	0.0167
固碳能力	0.8035	−0.0364	−0.0056	0.3131
生态质量	0.5879	−0.0568	−0.0134	0.9483
特征值	0.0616	0.0285	0.0492	0.0216
贡献率/%	64.31	29.78	65.52	28.72

4　讨论

区域尺度的生态系统服务功能评价涉及评价方法和评价因子的选择,其结果受计算模型特性以及输入因子类型和数量的影响[29]。Costanza等[9]、谢高地等[30]基于生态系统服务价值体系构建的框架对生态系统服务功能评价产生了深远影响,并奠定了该领域研究的顶层框架。依据这一思路,本文选取了水源涵养、土壤保持、防风固沙、固碳能力和生境质量5个因子,对十大孔兑流域进行了生态系统服务功能评价研究。

在十大孔兑的单项生态系统服务功能评价中,水源涵养功能分布格局明显受到地貌类型和人工植被建设过程的影响(图2)。在研究区南部砒砂岩黄土区,由于近40年来的林业和水土保持工程实施,在呼斯太河至罕台川一带形成了超过100 mm的水源涵养高值区。产生这一现象的原因在于该区域内广泛分布着油松、樟子松和柠条等乔灌木林地,而且植被盖度较高[31]。相对而言,研究区中部的风沙地貌区水源涵养功能较低,这主要与该区广泛分布的流动和半流动沙丘密切相关[19]。从时间变化来看,1990—2020年,研究区的水源涵养功能增加了1倍多(表1),同期降水量分别为320 mm和310 mm,变化不大,这表明植被盖度的增加(人工植被建设)是水源涵养功能显著提升的主要原因。土壤保持功能的分布格局表现为中北部的风沙地貌和洪积冲积平原区为高值区,而南部砒砂岩黄土区为低值区,这与南部较大的地形起伏紧密相关。与此同时,研究区中部库布齐沙漠存在大面积防风固

沙功能的高值区，其中，毛卜拉孔兑在两个时期间格局变化显著，高值区明显扩张，这一变化主要得益于毛卜拉孔兑区域属于杭锦旗（其他孔兑属于达拉特旗），是水土保持和防沙治沙工程的重点区域，因此效果最为明显[19,31]。在固碳功能方面，尽管中部风沙地貌区处于低值区，但随着时间推移，低值区面积呈缩小趋势，使得整体固碳能力2020年比1990年提高了0.684 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，表明近30年来库布齐沙漠治理效果显著。就研究区生境质量而言，高值区主要分布在研究区西部（黑赖沟至毛卜拉孔兑）的风沙地貌区和砒砂岩黄土区。1990—2020年，生境质量分布格局的主要变化发生在毛卜拉孔兑和卜尔嘎斯台沟流域以及研究区中东部的砒砂岩黄土区和风沙地貌交错区。这些变化与人工植被建设和地貌类型交错诱发的空间异质性增加息息相关。整体上，尽管在过去的30年内，十大孔兑流域综合生态服务功能衰减面积较改善面积大，但从研究区平均值和总量来看，所有单向功能类型的服务能力均呈现出增加的趋势，尤其是水源涵养、防风固沙及生境质量的显著改善，由此表明研究区生态服务功能的空间异质性随时间推移而进一步加大，这一点从格局变化分析中也可以得到验证（表2，图3），具有较好生境本底的区域生态服务能力明显增加，而环境脆弱的地区可能面临更加严峻的生态问题。

通过对研究区生态系统服务功能单因子评价与综合评价的耦合机制分析，发现1990年首要耦合作用主要受固碳能力和生境质量的驱动，而防风固沙功能在次要耦合作用中占据主导地位。这意味着此时研究区生态系统服务功能很大程度上取决于这三者的综合能力，揭示了植被状况、生境多样性以及防沙治沙举措，共同塑造了研究区生态系统服务功能的水平。而到2020年时，首要耦合作用转变为由防风固沙功能主导，生境质量功能则在次要耦合作用中起关键作用。这表明，该时期研究区生态系统服务功能主要由防风固沙和生境质量功能所调控，相应地，这一阶段防沙治沙力度和生境多样性成为决定研究区生态系统服务功能水平的核心要素。总体而言，随时间推移，研究区生态系统服务功能的主导因素发生了显著转变，从以植被状况和生境多样性为主，逐步过渡到以防沙治沙为核心。这一转变与长时间以来大规模开展的水土保持和防沙治沙工程息息相关，深刻体现出人类活动对生态系统服务功能产生的深远影响。

此外，本文采用的InVEST模型和RWEQ模型因其模块化设计以及对多种生态系统服务功能的综合评价能力，成为当前生态系统服务功能研究中广泛应用的工具之一。然而，这些模型对输入数据的精度和一致性要求较高，尤其是对土地利用、气象和土壤等空间数据。在本研究中，由于部分历史数据缺失或精度略粗，可能导致模型输出结果存在一定的不确定性。同时，InVEST模型的水源涵养模块依赖于简化的水文过程，未能充分考虑地下水补给和降水变异性等复杂水文过程，这可能导致水源涵养结果的低估或高估。因此，未来研究需要结合其他水文模型（如SWAT模型）和生态过程模型，进一步全面评估流域的生态系统服务功能，以减少不确定性，提高评估精度和可靠性。

5 结论

通过对过去30年间不同时期十大孔兑生态系统服务功能的对比分析，本研究揭示了各项服务类型（水源涵养、土壤保持、防风固沙、生境质量和固碳能力）不同程度的改善提升，并且其空间格局受到南北向的地貌类型和东西向流域间人工植被建设力度差异的综合影响。早期，生态系统服务功能水平主要取决于植被状况、生境多样性以及防沙治沙力度；而后期，防沙治沙力度和生境多样性成为主导因素。这种变化体现了生态系统服务功能的动态演变过程，以及人类活动和自然因素对生态系统的综合影响。

参考文献：

[1] 王奕淇，孙学莹.黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素[J].环境科学，2024，45(5)：2767-2779.

[2] 刘家根，黄璐，严力蛟.生态系统服务对人类福祉的影响：以浙江省桐庐县为例[J].生态学报，2018，38(5)：1687-1697.

[3] 龚享林，白永平，张春悦，等.典型“山地-绿洲-荒漠”系统的生态系统服务簇空间分布及其成因分析：以石羊河流域为例[J].地理研究，2025，44(1)：292-304.

[4] 庞彩艳，文琦，丁金梅，等.黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J].生态学报，2024，44(12)：5003-5013.

[5] Sarukhan J，Whyte A，Hassan R，et al.Millenium Ecosystem Assessment：Ecosystems and human well-being[R].Washington，DC，USA：Island Press，2005.

[6] Wang B J，Zhang Q，Cui F Q.Scientific research on ecosystem

services and human well-being:a bibliometric analysis[J].Ecological Indicators,2022,125: 107449.

[7] Evans D L, Falagán N, Davies J A C, et al.Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure:a systematic review[J].Ecosystem Services,2022,54:101405.

[8] Wood K A, Jupe L L, Aguiar F C, et al.A global systematic review of the cultural ecosystem services provided by wetlands [J].Ecosystem Services,2024,70:101673.

[9] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature, 1997, 387: 253-260.

[10] 王金凤,徐洁,徐基良,等.黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估[J].北京林业大学学报,2024,46(7):90-100.

[11] 吴爱林,陈燕,燕彩霞,等.长江三角洲生态系统服务价值分析及趋势预测[J].水土保持通报,2017,37(4):254-259.

[12] 曾令建.十大孔兑区生态系统服务功能及其权衡协同关系[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

[13] He Z F, Liu W X, Liu C Y.Evaluation and trade-offs/synergies of ecosystem services in an ecologically fragile region:a case study of western Jilin Province [J]. Sustainability, 2024, 16 (20):8778.

[14] 成超男,胡杨,赵鸣.城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望 [J].地理科学进展,2020,39(10):1770-1782.

[15] 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.

[16] 程建,程久苗,吴九兴,等.2000-2010年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化[J].长江流域资源与环境,2017,26(6):894-901.

[17] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].地理研究,2021,40(3):821-838.

[18] 王慧.黄河内蒙古段十大孔兑生态脆弱性演变及驱动力分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.

[19] 白雪莲.十大孔兑复合地貌区水土侵蚀时空异质性[D].山东烟台:鲁东大学,2020.

[20] 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.

[21] 娄佳乐.1986-2020年黄河流域十大孔兑土地利用与植被覆盖时空演变及影响因素研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.

[22] 娄佳乐,党晓宏,蒙仲举,等.1986-2020年黄河流域十大孔兑土地利用变化及驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(01):319-327.

[23] 王卓尧,任宇飞,姜群鸥,等.基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估[J].北京林业大学学报,2024,46(11):103-112.

[24] 王晓峰,马嘉豪,冯晓明,等.黄河流域生态安全屏障防风固沙时空变化及驱动因素[J].生态学报,2023,43(2):660-671.

[25] 肖鹏.黄河流域内蒙古段生态安全综合评价及格局构建优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.

[26] 曾令建,杨振奇,秦富仓,等.植被覆盖变化与土壤保持演变空间异质性研究[J].水土保持学报,2023,37(5):178-188.

[27] 姚林杰.基于生态系统服务的内蒙古黄河流域生态安全格局构建[D].呼和浩特:内蒙古大学,2023.

[28] 朱趁趁,龚吉蕊,杨波,等.内蒙古荒漠草原防风固沙服务变化及其驱动力[J].生态学报,2021,41(11):4606-4617.

[29] Sharps K, Masante D, Thomas A, et al. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment[J].Science of The Total Environment,2017,584-585:118-130.

[30] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1746-1750.

[31] 陈正新.黄河十大孔兑水土保持减沙效益评价[M].北京:科学出版社,2021.

Ecosystem service functions and their coupling mechanisms in the Ten Tributaries Basin

Du Jun[1], Wu Juanjuan[1,2], Xu Rigan[3], He Zhibin[1], Jia Xiaopeng[1], Chen Longfei[1], Liu Chongwang[4]

(1.*Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Ordos Water Resources Development Center, Ordos* 017010, *Inner Mongolia, China*; 4.*Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The evaluation of large-scale ecosystem service functions is one of the primary research directions in macro-ecology. The proper application of methods and the selection of evaluation factors serve as the foundation for the evaluation of ecosystem service functions. In this paper, the InVEST model and the RWEQ model were employed to calculate the ecosystem service functions of water conservation, soil conservation, windbreak and sand fixation, carbon sequestration capacity, and habitat quality in the Ten Tributaries area respectively. Meanwhile, the PCA module in the ArcGIS was utilized to analyze the coupling mechanism of the impact of independent service types on the comprehensive service functions. The research findings indicate that the spatial patterns of different service functions are mainly influenced by the differences in geomorphic types in the north-south direction and the disparities in the intensity of artificial vegetation construction among the east-west basins. From 1990 to 2020, the water conservation function across the entire area increased by 6.267 mm; the soil conservation function increased by 0.320 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; the windbreak and sand fixation function increased by 1.598 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; the carbon sequestration capacity increased by 0.684 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; and the habitat quality function increased by 0.062. The coupling mechanism of single-item ecosystem service functions on the evaluation of comprehensive service functions varies across different periods. In 1990, the largest coupling effect (PC1, 64.31%) was dominated by carbon sequestration capacity and habitat quality, and the secondary coupling effect (PC2, 29.78%) was dominated by the windbreak and sand fixation function, suggesting that the vegetation condition, habitat diversity, and the intensity of sand control and desertification prevention determined the comprehensive level of ecosystem service functions during that period. In 2020, the largest coupling effect (PC1, 65.52%) was dominated by the windbreak and sand fixation function, and the secondary coupling effect (PC2, 28.72%) was dominated by the habitat quality function, indicating that the intensity of sand control and desertification prevention and habitat diversity determined the comprehensive level of ecosystem service functions during that period. In the past three decades, ecosystem services in the basin have gradually changed from vegetation status and habitat diversity to desertification prevention and control, which reflects the far-reaching impact of human activities on ecosystem services.

Key words: ecosystem; services function evaluation; InVEST; PCA; Ten Tributaries