

石羊河流域生态系统服务时空变化 及其多尺度影响因素研究

石 晶^{1,2,3}, 石培基^{1,2,3*}, 李雪红^{1,2,3}, 王梓洋^{1,2,3}, 许澳康¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展实验室, 兰州 730070;
3. 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070)

摘 要:对生态系统服务时空变化的影响因素开展多尺度定量分析,是揭示生态系统服务演化机理和推进区域可持续发展的重要突破口。既有研究侧重于从行政或流域的等级确定研究尺度大小,缺乏科学合理的尺度划分方法。论文以石羊河流域为研究区,评估了食物供给、碳固存、产水量和防风固沙4种生态系统服务的时空变化特征,并应用小波分析和参数最优地理探测器模型确定了生态系统服务时空变化影响因素研究的最佳尺度及不同尺度下的主要影响因子。结果表明:① 2000—2020年石羊河流域食物供给、碳固存、产水量和防风固沙4种生态系统服务均呈上升趋势。食物供给服务增幅最大,增幅为138.3%,碳固存、产水量和防风固沙服务增幅分别为0.97%、7.6%和9.5%。② 根据4种生态系统服务的小波方差主周期,2000—2020年和2010—2020年分别构建了6个、2000—2010年构建了7个影响因素研究的特征尺度。③ 随着尺度增大,影响因子对生态系统服务时空变化的作用程度逐渐增强,且不同尺度的主要影响因子存在明显差异。食物供给和碳固存服务在小尺度上主要受人文因子影响,大尺度上受自然因子影响;产水量服务在不同尺度上始终受自然因子影响;防风固沙服务随尺度增大人文因子影响程度显著增强。④ 尺度增大过程中不同交互因子 q 值的增加趋势不同,其中碳固存和防风固沙服务中人文因子间的交互作用显著增强。论文通过小波分析改进了传统的多尺度序列构建方法,可为优化区域生态系统结构及制定多级生态系统管理决策提供参考。

关键词:生态系统服务;小波分析;多尺度;参数最优地理探测器;石羊河流域

生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务,对人类社会生存和发展起着举足轻重的作用^[1]。保障生态系统结构和功能动态平衡是维护人类福祉、促进人地关系协调的重要基础^[2-3]。在快速城镇化背景下,生态系统服务供给能力的有限性和利益主体的多元化需求致使区域生态资源存量趋紧^[4]。同时,高强度的人类活动以及对资源的过度索取迫使区域生态系统面临的压力和风险日益加剧,部分区

域生态系统服务功能明显降低并将可能长期发展演化^[5]。为积极防范和化解区域生态环境退化风险,国家始终坚持生态环境保护与建设并举,恪守统筹兼顾、合理开发等原则开展区域生态综合治理,并相继制定了系列综合性、多层次的生态保护战略和风险防范体系。生态系统服务功能的变化是由同一空间区位上自然生态过程和人类活动相互协作和博弈的结果^[6],拥有强势地位的影响因素将在很大程度上左右生态系统服务的演变形式^[7]。

收稿日期:2023-07-11;修订日期:2023-11-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(41771130,42101276);西北师范大学绿洲科学科研成果突破行动计划项目(NWNU-LZKX-202306)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771130 and 42101276; Northwest Normal University Oasis Scientific Research Achievements Breakthrough Action Plan Project, No. NWNU-LZKX-202306.]

第一作者简介:石晶(1997—),男,甘肃天水人,硕士生,主要研究方向为区域发展与规划管理。E-mail: shijingnwnu@126.com

*通信作者简介:石培基(1961—),甘肃临洮人,教授,主要研究方向为城市与区域发展规划和国土整治。

E-mail: xbsdspj@163.com

引用格式:石晶,石培基,李雪红,等.石羊河流域生态系统服务时空变化及其多尺度影响因素研究[J].地理科学进展,2024,43(2):276-289.
[Shi Jing, Shi Peiji, Li Xuehong, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem services in the Shiyang River Basin and its multi-scale influencing factors. Progress in Geography, 2024, 43(2): 276-289.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.02.006

此外,有研究还表明生态系统服务时空变化与影响因子间的空间关联度存在明显的尺度效应^[4]。因此,开展区域生态系统服务时空变化与影响因素的多尺度空间关联分析,有助于厘清区域生态系统服务的时空变化规律及不同尺度下的主要驱动力^[8],对疏解区域生态系统压力及合理配置生态资源具有重要的理论和现实意义。

当前,有关生态系统服务的研究主要涉及时空变化^[7]、价值评估^[9]、供需关系及供需不匹配^[10-11]、权衡协同关系^[12-13]等多个方面,主要采用价值量评估、物质量评估、能值评估等方法^[14]。部分研究已明确指出区域生态系统服务的时空变化主要由自然环境的更替或社会经济的发展变革所引起^[15],同时揭示了不同区域生态系统服务时空演变的基本规律及其与影响因子的关联特征^[16],但鲜有学者从多尺度视角对生态系统服务时空变化与影响因素的关系展开系统分析。有关生态系统服务多尺度的研究多集中在权衡协同及其影响因素方面。如郑德凤等^[17]对燕山—太行山区生态系统服务权衡关系进行多尺度分析发现,随着尺度增大,权衡关系逐渐减弱。陈俊辰等^[18]对湖北省生态系统服务权衡关系探究发现,随着尺度增大,协同关系逐渐增强。张弛等^[8]对珠江三角洲地区生态系统服务权衡的尺度效应和影响因素进行研究发现小尺度下地形因素对权衡具有显著影响作用,而在较大尺度下气候则成为影响权衡的主要因素。上述研究发现,生态系统服务权衡协同及其受自然人文因子的影响程度会随着尺度的变化而变化^[19]。以地理要素的自身属性、空间位置和空间关系等基本特征为出发点进行思考,生态系统服务时空变化与自然人文因子的空间关联程度也应当同样具有尺度差异。即单一尺度所揭示的关联结果可能并不具有代表性,不能简单地推演到邻近尺度,其有可能会简化或忽视尺度依赖关系,模糊同一影响因子在不同空间尺度上对生态系统服务变化的作用方式^[20]。值得强调的是,既有生态系统服务的多尺度研究一般根据行政或流域的等级确定尺度大小^[21-22]。此方法虽在一定程度上弥补了传统单一尺度的局限性,但由于尺度大小仍是人为主观选择,并不能客观、全面地反映地理要素在尺度伸缩过程中结构信息的变化特征,这一问题在王越等^[4]的研究中同样证实。小波分析被称为“数学显微镜”,是经典的多尺度分析工具,既能以连续的方式刻画不同尺度下地理要

素结构信息的分布特征,还能厘定要素间的空间关联度,已在土地利用要素冲突、景观格局变化驱动力分析等研究中广泛应用^[23-25]。因此,尝试突破传统研究特征尺度识别瓶颈,利用小波分析探究自然人文影响因子在不同空间尺度下与生态系统服务时空变化的关联程度,是有效推进生态系统分级调控的重要途径。

石羊河作为河西走廊的第三大内陆河,是青藏高原生态屏障和北方防沙带的重要组成部分,更是中国人口最为密集、用水矛盾最为突出的干旱区内陆河流域之一^[26]。20世纪石羊河流域因受人类活动和气候变化影响,流域内生态环境日趋恶化。上游祁连山区约1500 km²的林草地被垦殖,中游地区因耕地面积扩张,农业用水占比激增,导致下游民勤绿洲面积急剧减小,更成为“罗布泊”的影子^[27]。进入21世纪,甘肃省将石羊河流域生态治理列为“一号工程”,并相继实施了《石羊河流域重点治理规划》和《石羊河流域水资源管理条例》等多项生态保护政策,通过上游涵养水源、中游管理调度、下游节水恢复的联动治理,区域生态环境逐渐改善,但部分区域仍存在生态环境退化现象。鉴于此,本文以石羊河为研究区,借助InVEST模型和ArcGIS分析了生态系统服务的时空变化特征,并运用小波分析对特征尺度下生态系统服务时空变化与自然人文因子的空间关联程度进行对比分析,以明确不同尺度下同一影响因子对生态系统时空变化的影响差异,以期提升对不同尺度生态系统服务时空变化规律的理解和加强区域生态系统的分级管控提供依据。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部(36°29′~39°27′N、101°22′~104°16′E),是河西走廊三大内陆河流域之一(图1)。流域海拔1247~4853 m,全长约162 km,属温带大陆性干旱气候。流域面积约4.16万 km²,涉及三市七县,行政区划包括金昌市、武威市凉州区、古浪县、民勤县及天祝和肃南两县的部分区域^[26]。流域内总人口约227万人,人口密度为55人/km²,是河西走廊平均水平的3.4倍。流域包括红水河、杂木河、西营河等主要支流,水资源总量约17亿 m³,人均水资源不足700 m³,是全国平均水

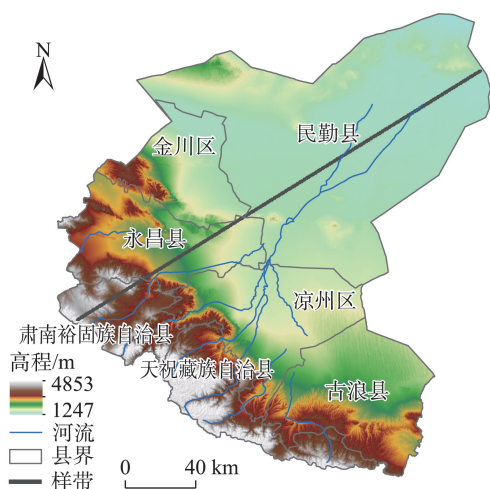


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

平的1/3。流域地势南高北低,自西南向东北倾斜,气候垂直地带性明显,由南部祁连山区、中部走廊平原区和北部低山丘陵与荒漠区三大地貌单元组成。南部祁连山为高寒半干旱湿润区,是流域的主要水源供给地,植被以草地和林地为主。中部走廊平原是流域内的主要农业灌溉区,灌溉面积约2900 km²,人类活动频繁且为主要耗水区,干旱程度明显高于上游区域。北部为温暖干旱区,景观类型以草地和荒漠为主,降水少且蒸发量大,属于重度缺水,是生态环境问题最为突出的区域。

样带布设沿石羊河呈西南—东北走向,全长270.6 km,西起37.87°N、101.42°E,东至39.18°N、104.15°E。使样带尽可能经过南部祁连山、中部走廊平原和北部低山丘陵与荒漠绿洲等多种地貌及景观类型,以保证采样数据具有代表性和针对性,样带构建500 m×500 m(与本文栅格数据分辨率一致)的网格单元共1081个。

1.2 数据来源

本文涉及2000、2010、2020年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。该土地利用数据是采用人机交互目视判读方式解译,空间分辨率为30 m,总体精度均在88.95%以上,包括6个一级分类和25个二级分类^[5]。DEM、人口密度、人均GDP和年均气温数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。NDVI数据来源于美国地质调查局(USGS)。蒸散量数据来源于国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)。风速和降雨数据来源于中国气象数据共享平

台(data.cam.cn),并通过站点插值获取2000、2010和2020年各月降雨天数、各月月均风速和各月2 m处日均风速大于5 m/s的天数。土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集(V1.2)。雪盖因子数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn/portal/)。社会经济数据来源于《中国统计年鉴》《甘肃省水资源公报》《甘肃农村年鉴》《甘肃发展年鉴》和各地级市统计年鉴。居民点数据从土地利用数据中提取得到,并通过距离分析获取距居民点距离数据。为方便计算,本文将所有栅格数据重采样为500 m×500 m,投影坐标系统一转换为WGS_1984_Albers。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

石羊河流域地处祁连山东段,并发源于祁连山北麓,祁连山区具有良好的水源涵养功能,流域中下游耕地广布,农业较为发达。但因东西北三面受巴丹吉林和腾格里两大沙漠威胁,干旱缺水及沙漠蔓延成为石羊河流域面临的主要生态问题。因此,本文结合石羊河流域自然、人文特征,选择食物供给、碳固存、产水量和防风固沙4种具有代表性的指标对生态系统服务进行综合分析,计算公式见表1。

1.3.2 土地利用程度

土地利用程度不仅可以表征土地的自然属性,也可反映人类对土地的综合利用程度。土地利用程度与生态系统结构和功能的转变密切相关,计算如下:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times B_i) \quad (1)$$

式中: L 为土地利用程度指数; A_i 为第 i 类土地利用程度分级指数; B_i 为第 i 类土地利用类型面积占总面积的百分比; n 为土地利用类型数^[35]。本文将土地利用分为4级:未利用地分级指数为1,林地、草地和水域为2,耕地为3,建设用地为4^[36]。

1.3.3 小波分析

小波分析是一种将长时间序列或空间尺度上的变量与其具体时空特征联系起来的分析方法^[37]。通过小波变换可将变量解析成不同时空尺度特征子信号,对于一维数据,可定义为:

$$W(a, x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi(x - \frac{b}{a}) dx \quad (2)$$

式中: $W(a, x)$ 为小波变换系数; $f(x)$ 为时空域上原始

表1 生态系统服务评估方法

Tab.1 Ecosystem service assessment methods

服务类型	计算方法	计算公式	变量解释
食物供给	通过归一化植被指数对农牧业产值进行空间化处理。将农业产值按照栅格 NDVI 值与耕地总 NDVI 值的比值进行分配,牧业产值按照栅格 NDVI 值与草地总 NDVI 值的比值分配,水产品产值按照栅格 NDVI 值与水域总 NDVI 值的比值分配,进而表征各栅格的食物供给能力 ^[28-29]	$CP_x = CP_{sum} \times \frac{NDVI_x}{NDVI_{sum}}$	CP _x 为栅格 x 分配的粮食、肉类、奶类和水产品的产量;CP _{sum} 为石羊河流域粮食、肉类、奶类和水产品总产量;NDVI _x 为栅格 x 的归一化植被指数;NDVI _{sum} 为石羊河流域耕地、草地和水域的 NDVI 值之和
碳固存	碳固存服务运用 In-VEST 模型中的碳固存模块进行量化。不同土地利用类型碳密度系数根据 Alam 等 ^[30] 、Giardina 等 ^[31] 和陈光水等 ^[32] 研究中的修正方法进行修正	$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead}$ $C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i$	i 为某种土地利用类型;C _i 为第 i 类土地利用类型碳密度;C _{i-above} 、C _{i-below} 、C _{i-soil} 和 C _{i-dead} 分别为第 i 类土地利用类型地上植被碳密度(t/hm ²)、地下植被碳密度(t/hm ²)、土壤碳密度(t/hm ²)和死亡有机碳密度(t/hm ²);C _{tot} 为生态系统碳储总量(t);S _i 为第 i 类土地利用类型面积(hm ²);n 为土地利用类型数量
产水量	产水量运用 InVEST 模型中的产水模块进行计算。产水量为栅格的年降水量减去年实际蒸散量 ^[33]	$Y_{x,j} = (1 - \frac{AET_{x,j}}{P_x}) \times P_x$	Y _{x,j} 为第 j 类土地利用/覆被类型、栅格 x 的产水量;AET _{x,j} 为第 j 类土地利用/覆被类型、栅格 x 的年实际蒸散量;P _x 为 x 中的年降水量
防风固沙	防风固沙量根据植被固沙量进行计算。即裸土条件下的潜在风蚀量与植被覆盖条件下的实际风蚀量的差值 ^[34]	$SL_{sv} = SL_s - SL_v$ $SL = \frac{Q_y}{y}$ $Q_{max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)$ $GC = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times COG)^{-0.3711}$	SL _{sv} 为潜在防风固沙量(kg/m ²);SL _s 为潜在土壤风蚀量(kg/m ²);SL _v 为实际土壤风蚀量(kg/m ²)。SL 为土壤风蚀模数(kg/m ²);y 为地块长度;Q _y 为地块长度 y 处的沙通量(kg/m);Q _{max} 为风力的最大输沙能力(kg/m);GC 为关键地块长度(m);WF 为气象因子(kg/m);EF 为土壤可侵蚀性成分;SCF 为土壤结皮因子;K'为土壤糙度因子;COG 为植被因子,包括平铺、直立作物残留物和植被冠层,无量纲

信号数据函数,称为分析小波;a是空间尺度参数;b代表小波在空间上的中心位置;φ(x)为小波核函数,也称为基小波。

小波方差为小波系数模离差的平方和,其大小可反映对应尺度下结构信息的丰缺程度^[38]。地理学空间分布尺度分析可揭示空间要素的尺度特征及效应。小波方差的计算公式为:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (WC_i - \bar{u})^2 \tag{3}$$

式中:S²为小波方差;WC_i为小波系数; \bar{u} 为小波系数的平均值;n为小波系数数目。

1.3.4 参数最优地理探测器

地理探测器能对生态系统服务与筛选出的因子进行探测分析,揭示其空间分异驱动力。传统地理探测器对连续型变量进行离散化时具有较强的主观性,一定程度上影响空间分层异质性最佳尺度的确定。改进后的参数最优地理探测器(optimal parameters-based geographical detector, OPGD)模型

可以更好地实现空间数据最优离散化和空间层数及空间尺度参数的最佳组合分析。本文借助 R 语言中的 GD 包,运用相等间隔、自然断点、分位数、几何间隔和标准差 5 种分类方法^[39],将分类等级数设置为 3~8 类,从中选择 q 值最高的参数组合方式进行空间离散化。通过计算单一因子 q 值[q(X₁),q(X₂)]及双因子交互 q 值[q(X₁∩X₂)]判断双因子是否存在交互作用及交互作用的程度。q 值计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{4}$$

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

式中:q 为因子解释力,值域为[0,1],值越大解释力强;h 为解释变量或被解释变量的分层(Strata);N_h和 N 为层 h 和全区的单元数;σ_h和 σ²分别代表层 h 和全区的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差^[40]。

2 结果与分析

2.1 石羊河流域生态系统服务的时空变化特征

为清晰反映石羊河流域生态系统服务时空变化趋势,本文将4类生态系统服务从大到小按自然断点法分为5个等级(高、较高、中等、较低和低),并将2000—2020年的生态系统服务评价结果进行叠

加分析和可视化处理,以统计研究期内的时空变化差异(图2)。

2000—2020年石羊河流域食物供给服务呈显著增加趋势,空间上自西南到东北逐渐递减。南部祁连山区、北部民勤绿洲和东部南湖绿洲区域食物供给显著增加且分布较集中,较高和高等级面积明显扩张,但民勤县局部区域有轻微减少趋势。研究

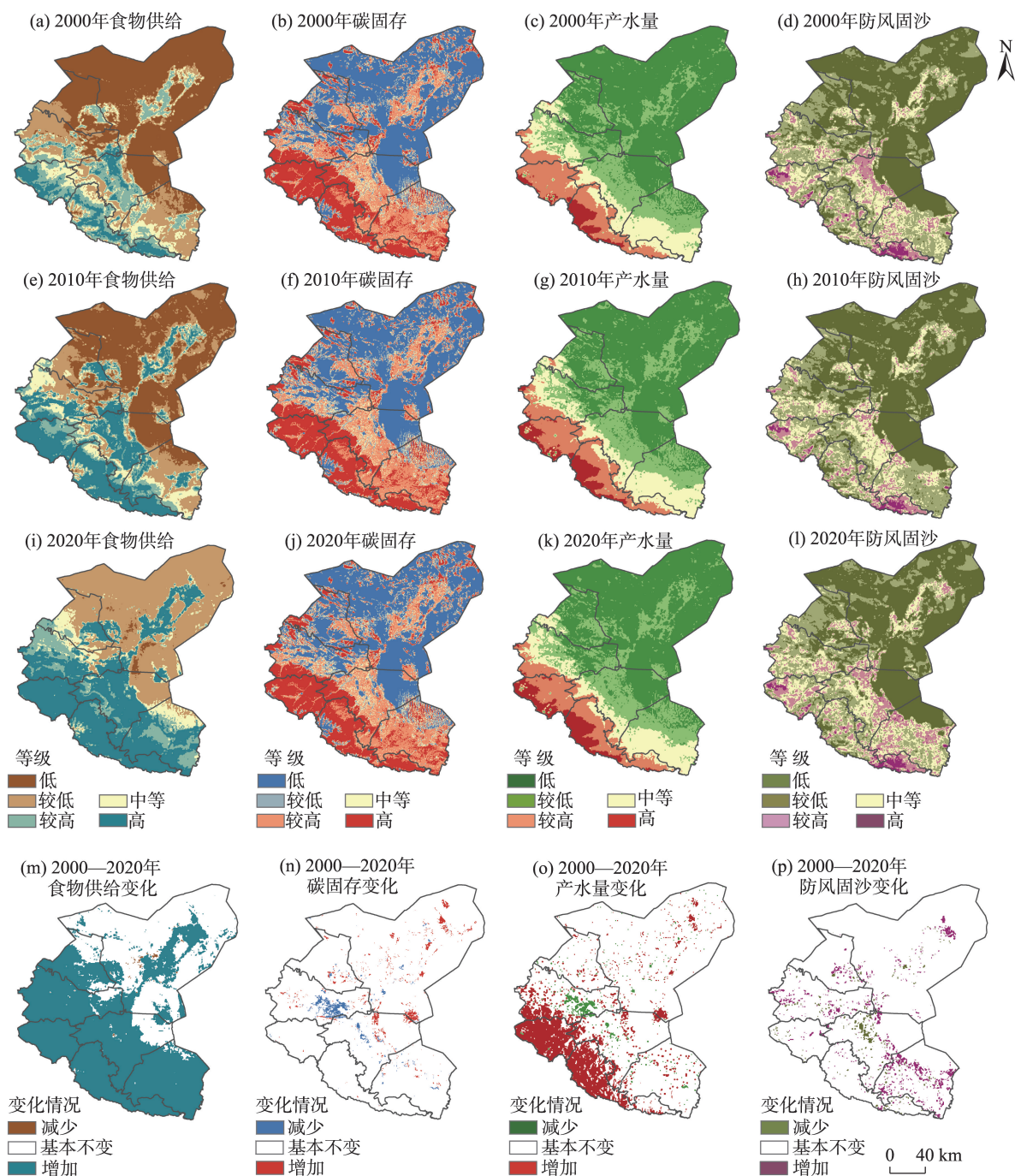


图2 生态系统服务空间分布及变化

Fig.2 Spatial distribution and changes of ecosystem services

区高等级和低等级面积变化最为显著,高等级面积占比从2000年的6.97%增至2020年的39.46%,低等级面积占比从45.17%降至0.92%。从不同阶段看,2000—2010年石羊河流域南部祁连山、民勤绿洲、凉州区及南湖绿洲的食物供给增加较为明显,主要为高等级面积的扩张,面积占比增加16.25%,其余区域增幅较小;10年间食物供给从54.66 t/km²增至80.19 t/km²,增幅46.7%。2010—2020年食物供给持续增强,增幅为62.43%。该阶段北部的巴丹吉林沙漠区和走廊平原东部的腾格里沙漠区食物供给增加较显著,低等级面积急剧萎缩。南部祁连山和流域中游高等级面积持续扩张并形成大面积的集中连片区。

2000—2020年石羊河流域碳固存服务呈缓慢增加趋势,空间分布特征与食物供给服务相似,呈西南到东北逐渐减小。碳固存在流域中游、南湖绿洲及北部民勤县增加显著,但在永昌县存在大面积减少现象,这与该区域用地面积的扩张密切相关。研究区碳固存低等级和高等级面积占比略有减小,其余等级均呈轻微增加趋势,面积占比增幅不超过1%。碳固存与地表植被覆盖度高度相关,其高等级面积减小意味着流域植被覆盖度高的区域存在局部生态退化现象。2000—2010年流域碳储量增幅较为显著,从2000年的13129.75 t/km²增至2010年的13231.58 t/km²,增幅为0.78%;2010—2020年增幅较小,为0.2%。总体来看,石羊河流域碳固存在数量和空间上变化均较稳定,整体呈上升趋势,表明流域内生态环境逐渐好转。

2000—2020年石羊河流域产水量呈持续增加趋势,较高级和高等级主要分布在祁连山区,产水量随海拔降低逐渐减小,流域东部腾格里沙漠和北部巴丹吉林沙漠地区产水量最小。研究区南部祁连山区及南湖绿洲产水量增加最明显且空间分布较集中,永昌县产水量与碳固存服务变化趋势较为相似,存在大面积减小现象。研究期内高等级和低等级面积占比变化较显著,其中高等级面积占比增加2.2%,低等级减小1.13%,其余等级面积占比变化不超过1%。从不同阶段看,2000—2010年除肃南县高等级、南湖绿洲及民勤绿洲较低等级面积略有扩张外,其余区域变化均不显著。产水量从2000年的927561.13 m³/km²增至2010年的987015.61 m³/km²,增幅为6.41%。2010—2020年研究区产水量增幅相对较小,为1.19%,仅肃南县和天祝县高等

级面积有轻微扩张现象。

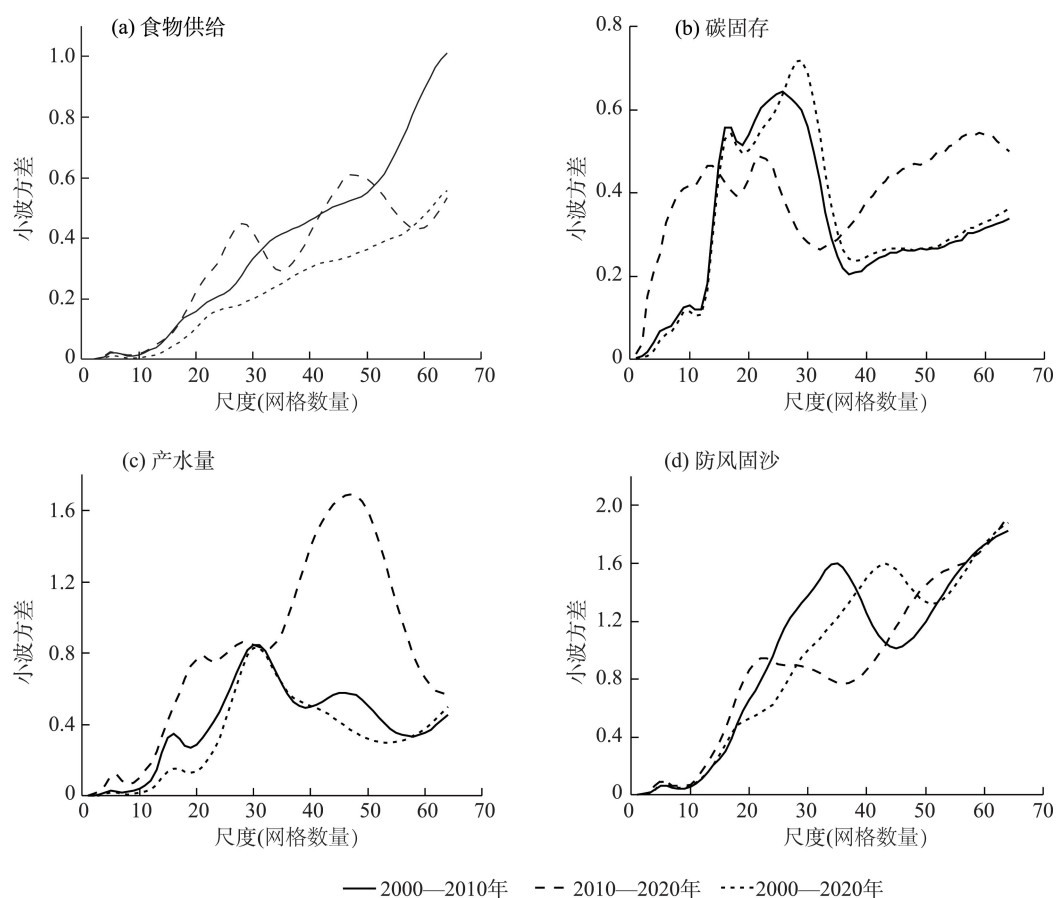
2000—2020年石羊河流域防风固沙服务虽先减后增,但总体呈增加趋势。较高等级和高等级主要分布在肃南县、天祝县和凉州区。中等主要分布在祁连山及民勤绿洲,低等和较低等级主要分布在流域东部的腾格里沙漠和北部的巴丹吉林沙漠。20年间防风固沙空间变化较小,仅古浪县和民勤绿洲增加较显著且空间分布较集中,其他区域虽均有增加现象,但分布较零散,而凉州区防风固沙略有减小且分布较为集中。2010年防风固沙量为1918.41 t/km²,相比2000年的2100.13 t/km²减少了181.72 t/km²,降幅为8.65%。2010—2020年防风固沙量增加了381.62 t/km²,增幅为19.9%。

2.2 多尺度影响因素分析

2.2.1 特征尺度识别

本文分别计算样带上4种生态系统服务不同时间段空间变化量的小波方差,并根据方差主周期构建影响因素研究的特征尺度。以2010—2020年食物供给的小波方差为例(图3a),其存在三个局部峰值(主周期),第一主周期为46(网格数量,下同),第二、第三主周期分别为28和5,这表明食物供给在主周期为5、28和46所对应的尺度下时其空间异质性较高且周期的震荡较强烈,这些尺度是需要研究的重点。同理,碳固存小波方差的主周期分别为58、21和14(图3b),产水量为46、28、21(图3c),防风固沙为21和5(图3d)。可见,各类生态系统服务小波方差变化趋势虽存在差异,但其主周期所对应的尺度较为一致。如食物供给与产水量服务具有两个相同主周期(46和28),碳固存、产水量和防风固沙服务存在一个相同主周期(21)。不同生态系统服务之间存在相同主周期的现象在2000—2010年和2000—2020年间也同样存在,这表明4种生态系统服务的尺度特征具有相对一致性。

为全面反映各影响因素对生态系统服务时空变化的多尺度影响差异,本文以4种生态系统服务的主周期为参考确定研究区不同时间段驱动因子分析的采样网格规模。例如,在样带采样分辨率为500 m的前提下,2000—2020年识别出4种生态系统服务空间变化的小波方差主周期共6个,分别为6、9、16、24、30和44。因此,本文分别构建与方差主周期大小相对应的网格规模(3、4.5、8、12、15和22 km)作为特征尺度,并对这些特征尺度下生态系统服务空间变化量的采样数据进行驱动因子探测分



注:网格大小为500 m×500 m。

图3 生态系统服务小波方差曲线

Fig.3 Ecosystem services wavelet variance curves

析。同理,2000—2010年识别出7个特征尺度,分别为2.5、5、8、13、15.5、17.5和22.5 km;2010—2020年识别6个特征尺度,分别为2.5、7、10.5、14、23和29 km(图3)。

2.2.2 生态系统服务时空变化的单因子检测

基于不同时段小波方差分析,本文在特征尺度下选取DEM、NDVI、年均气温、年均降水量、人口密度、人均GDP、土地利用程度和距居民点距离8个典型自然人文因子,选择 q 值最高的参数组合方式对各因子进行空间离散化处理,并对生态系统服务时空变化的影响因素进行分析(图4)。通过对比不同尺度影响因素变化差异,尝试在整体变化中把握共性规律,以总结较稳定的尺度关联规则^[8]。

通过单因子检测结果发现,生态系统服务空间变化的影响因素对网格尺度大小的变化响应明显,主要表现为尺度增大,因子的影响程度随之增强,且除产水量外其余生态系统服务的主要影响因素在不同尺度上具有较大差异。具体来看,2000—

2020年间食物供给服务在小尺度上距居民点距离、人口密度和人均GDP的解释力较强,而在大尺度上NDVI和年均降水量则成为主要影响因素,且随着尺度增大,自然因子 q 值增幅较人文因子明显(图4)。碳固存服务不同尺度上影响因素的变化趋势与食物供给服务基本相似,3 km和4.5 km尺度上主要受土地利用程度、距居民点距离和人均GDP影响,15 km尺度上主要受年均降水量、DEM和年均气温影响。产水量服务在不同尺度上主要受年均降水量、DEM和年均气温影响。防风固沙服务在尺度为8 km和15 km时DEM、年均降水量和NDVI的影响较为显著,在其他尺度上土地利用程度、人口密度和人均GDP的影响程度较其他因子明显,且在尺度为12 km和22 km时 q 值远高于其他因子。相比较2000—2020年,2000—2010年和2010—2020年间的影响因子 q 值虽在个别尺度变化幅度较大,但总体变化趋势、不同尺度主要影响因素与2000—2020年相对一致。总体上,石羊河流域食物

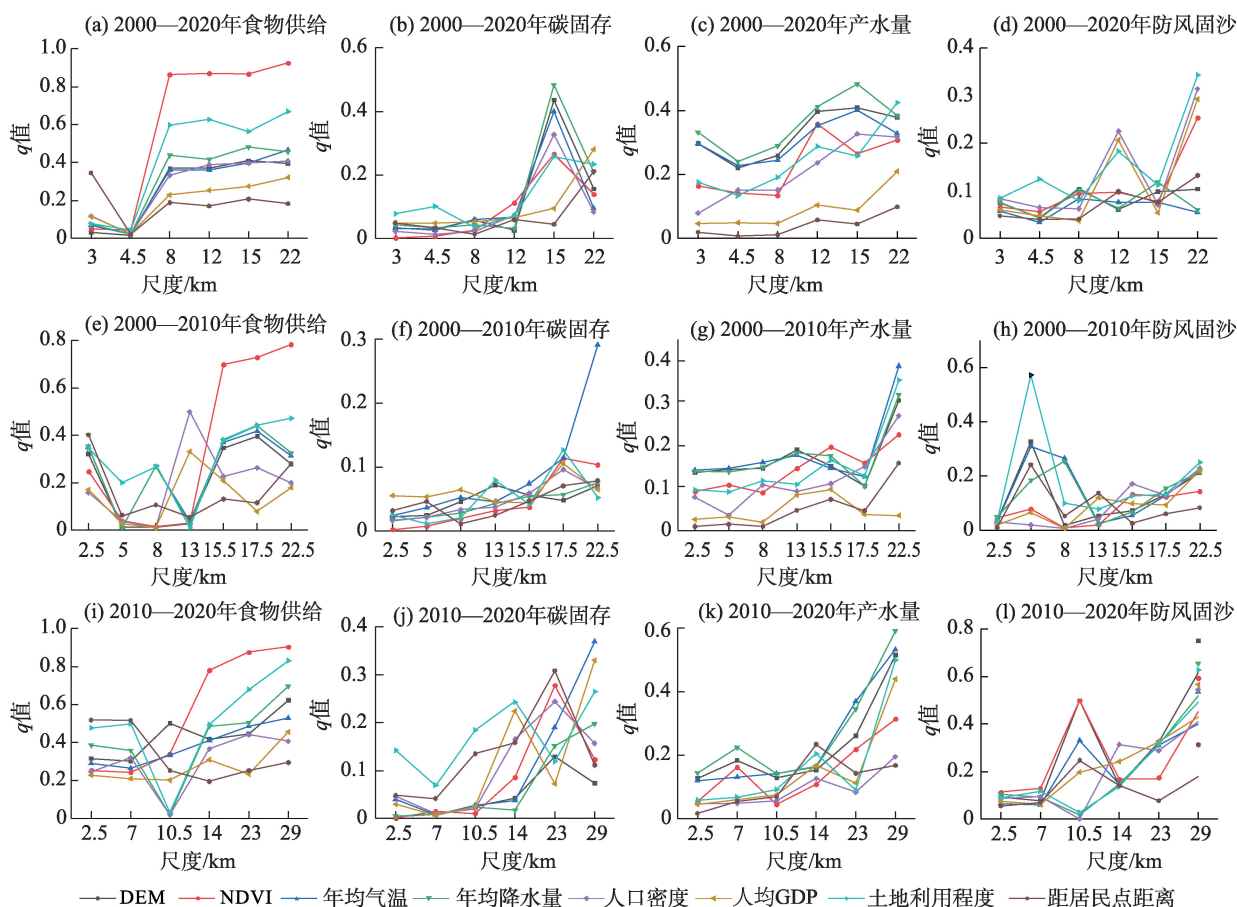


图4 不同尺度生态系统服务单因子探测结果

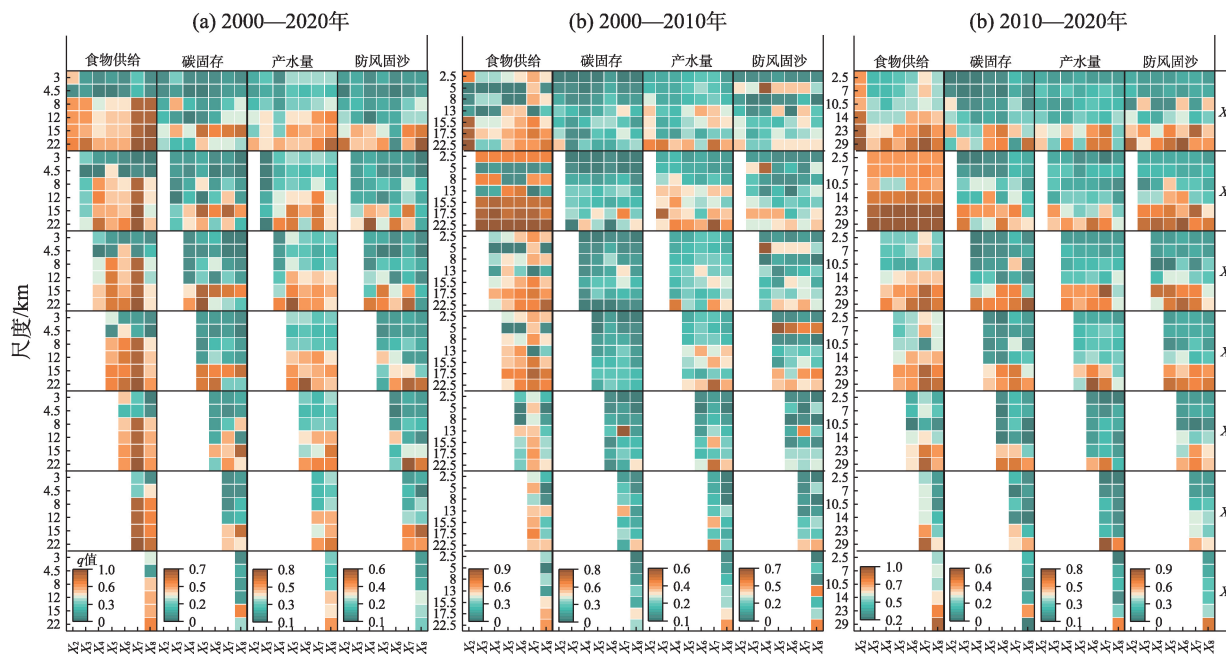
Fig.4 Results of single factor detection of ecosystem services at different scales

供给和碳固存服务在小尺度上主要受人为因子影响,大尺度上受自然因子影响。产水量服务在不同尺度上受自然因子的影响程度均较明显。防风固沙服务随尺度增大,人为因子逐渐成为主要影响因子。可见,研究尺度的变化会在一定程度上改变其影响因子的作用大小,这种差异也说明了尺度大小是影响地理要素间耦合程度的关键因素。具体来说,尺度的伸缩可能会改变单元格内部某种景观的完整性以及景观的组分与结构,从而影响单元格内不同地理要素间各子系统的相互作用程度。

2.2.3 生态系统服务时空变化的交互因子检测

从交互因子探测结果来看(图5),2000—2020年石羊河流域食物供给服务在较小尺度上距居民点距离与其他因子以及NDVI与年均气温、土地利用程度交互作用较强,随尺度增大,NDVI、土地利用程度与其他影响因子交互作用显著增强,尺度达22 km时 q 值均大于0.74。碳固存服务在不同尺度上GDP、土地利用程度、距居民点距离与DEM、气

温、降水等自然因子交互作用较为显著,但随着尺度增加,土地利用程度、距居民点距离与人口密度交互作用增强, q 值增量均大于0.25。产水量在小尺度上DEM与NDVI、土地利用程度,降水量与NDVI及人文因子交互作用较为明显, q 值均大于0.35,且随尺度增大影响程度逐渐增强。防风固沙服务在大小尺度上土地利用程度与DEM、NDVI、降水、人口密度交互作用均较明显,随着尺度增大,距居民点距离与土地利用程度的交互作用显著增强。总体来看,4种生态系统服务在较大和较小尺度上主要交互因子基本保持一致,但在尺度增加过程中,各因子的交互作用会呈现不同程度的增加趋势。相较于2000—2020年,2000—2010年和2010—2020年间4种生态系统服务影响因子间的交互作用虽存在一定差异,但在尺度增加过程中交互因子 q 值与2000—2020年的变化趋势较为一致。可见,生态系统服务的变化不仅与单个影响因子有关,还受自然、人文多维因子的协同影响,且尺



注:影响因素 $X_1 \sim X_8$ 分别为DEM、NDVI、年均气温、年均降水量、人口密度、人均GDP、土地利用程度、距居民点距离。

图5 不同尺度生态系统服务交互因子探测结果

Fig.5 Results of ecosystem service interaction factor detection at different scales

度的变化会一定程度上改变因子间的交互作用程度。此外, q 值较高的因子在交互中的作用更为突出,表明影响力高的因子对其他因子具有较强的辐射作用,对这些影响因子的有效调控是保护生态系统的关健。

3 讨论

特征尺度识别是多尺度下地理要素空间异质性研究和遴选适宜度量单位的关键,本文对石羊河流域4种生态系统服务时空变化的样本数据进行小波分析,根据小波方差主周期构建了不同时段特征尺度,在这些尺度下生态系统服务时空变化的空间异质性及结构信息丰富程度较高。研究发现,不同尺度上同一因子或主要因子对生态系统服务的影响程度具有明显差异。这与相关研究结论有所不同,基于单一尺度的研究普遍认为造成生态系统服务时空变化的主要影响因素是特定不变的^[41-42],这可能忽略了研究尺度变化过程中生态系统服务与影响因子间的关联差异。因此,在类似研究中应综合考虑影响因子及其在不同尺度下对地理要素的作用方式,基于多尺度视角探讨影响因素问题有利于客观全面地认识地理要素的时空演变机理,能

有效避免单一尺度研究结果造成的偶然性。

研究还发现,石羊河流域影响因子对生态系统服务时空变化的影响差异主要表现在两个方面:一是随着尺度增大,影响因子的作用程度逐渐增强;二是不同尺度的主要影响因素存在明显差异。其中食物供给和碳固存服务在小尺度上主要受人文因子影响,大尺度上受自然因子影响,这与Liu等^[43]在太湖流域的研究结果较为一致。这说明地理环境作为背景条件总体上控制生态系统供给的基本特征,而社会经济因素参与较小尺度的生态过程^[8,43-44]。但有所不同的是,产水量服务在不同尺度上始终受自然因子控制,防风固沙服务随尺度增大,人文因子的影响程度高于自然因子,这与石羊河流域总体的自然、人文特征有关。就产水量而言,石羊河流域地势西南高、东北低,人类活动虽能在一定程度上影响局部区域的产水量变化,但在地形、降水、气温等自然因素共同作用下基本奠定了产水量的空间分布格局,长时间序列上降水量波动引起的产水量空间变化差异远高于人类活动导致的局部区域产水量变化^[45-46]。因此,对于石羊河流域来说,降水量、地形、气温等因素在不同尺度上均是引起产水量变化的主要因素。对于防风固沙服务而言,造成这种现象的原因可能与其自身特性有关。石羊河

流域防风固沙服务的空间分布格局虽由自然因素决定,但其时空变化与人类活动密切相关。近年来该区实施了流域综合治理、退耕还林还草和三北防护林等系列生态保护工程,一定程度上遏制了流域沙化趋势,使得区域防风固沙服务明显提升^[47]。值得注意的是,这些工程的实施往往涉及较大的空间范围,且由于沙化威胁到区域可持续发展,人类会优先选择对居住地较近的区域进行保护和治理,与此同时,为满足发展需求,人类会对居住地边缘的生态用地进行持续开垦和建设,进而导致防风固沙服务下降。因此,相比较小尺度,大尺度更能完整地涵盖防风固沙服务变化区域的景观单元以及其与耕地、人口密度的位置关系。

由此可见,对于某一特定的生态系统服务而言,不同影响因素发挥关键作用的尺度有所差异,使得生态过程表现出明显的尺度依赖性^[8]。此外,大尺度上景观单元的完整性以及影响因素间的位置叠加、功能互补等现象可能更为显著地影响了生态系统服务的时空变化,这一现象在交互因子分析中表现得更为明显。上述结论说明多尺度分析对识别不同尺度下生态系统服务时空变化的关键影响因素是必要的,其为区域生态系统的宏观调控及分级管理提供了新思路和新方法。即生态系统调控不仅要把握各类生态系统服务时空演变的基本规律,还要深入剖析不同尺度下生态系统服务与关键因素相互作用的内在逻辑,以实现区域生态治理效益最大化的目的。

然而,本文也存在不确定性。其一,样带走向的改变可能会影响特征尺度识别结果,本文虽对4种生态系统服务方差主周期对应的特征尺度进行了综合分析,但由于石羊河流域地形起伏及景观类型空间差异较大,不同走向的样带最终识别的特征尺度可能有所不同。其二,本文仅选取了4种生态系统服务和8种影响因素,可能会使研究结果呈现的基本规律存在不全面性。因此,在未来的研究中还需布设多条不同走向的样带,提高特征尺度识别的可靠性,并进一步探究多种生态系统服务和影响因素在不同空间尺度下的关联关系,从而不断完善多尺度影响因素分析的研究体系。

4 结论

本文以石羊河流域为例,在食物供给、碳固存、

产水量和防风固沙4种生态系统服务评估的基础上,采用小波分析和参数最优地理探测器模型从多尺度视角探讨了生态系统服务时空变化影响因素研究的最佳尺度以及不同尺度下的主要影响因子,主要结论如下:

(1) 2000—2020年,石羊河流域食物供给、碳固存、产水量和防风固沙4类生态系统服务均呈上升趋势。其中食物供给服务增幅最大且空间变化最为明显,增幅为138.3%,碳固存、产水量和防风固沙服务增幅较小,分别为0.97%、7.6%和9.5%。4类生态系统服务空间上基本呈自西南到东北逐渐递减趋势。

(2) 综合考虑不同时间段石羊河流域食物供给、碳固存、产水量和防风固沙4种生态系统服务样带的小波方差结果,以方差主周期为参考分别构建了不同时段驱动因子采样网格特征尺度,其中2000—2020年6个、2000—2010年7个、2010—2020年6个。

(3) 石羊河流域不同时间段4种生态系统服务时空变化的单因子 q 值基本随尺度增大而增大,且在不同尺度上生态系统服务受自然人文因子的影响程度不同。食物供给和碳固存服务时空变化在小尺度上主要受人文因子影响,大尺度上主要受自然因子影响。产水量服务在不同尺度上始终主要受自然因子影响。防风固沙服务随尺度增大,人文因子逐渐成为主要影响因素。

(4) 石羊河流域不同时间段4种生态系统服务的影响因子交互作用基本随尺度增大而增强,且在不同尺度上主要交互因子基本保持一致。但在尺度增加过程中,各因子的交互作用增加趋势略有不同,其中碳固存和防风固沙服务随尺度增加时人文因子间的交互作用增强较为显著。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 邱坚坚, 刘毅华, 袁利, 等. 人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1060-1072. [Qiu Jianjian, Liu Yihua, Yuan Li, et al. Research progress and prospect of the interrelationship between ecosystem services and human well-being in the context of coupled human and natural system. *Progress in Geography*, 2021, 40(6): 1060-1072.]

- [3] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价 [J]. 地理学报, 2019, 74(3): 432-445. [Chen Feng, Li Hongbo, Zhang Anlu. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 432-445.]
- [4] 王越, 李炆颖, 曾先, 等. 沈阳经济区土地利用要素性冲突空间多尺度作用机理 [J]. 经济地理, 2022, 42(3): 231-239. [Wang Yue, Li Wenyang, Zeng Xian, et al. The spatial multi-scale mechanism of land use elemental conflicts in Shenyang economic zone. *Economic Geography*, 2022, 42(3): 231-239.]
- [5] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 人为干扰对生态脆弱性动态演变过程的影响: 以兰西城市群为例 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1317-1327. [Shi Jing, Shi Peiji, Wang Ziyang, et al. Effects of human disturbances on dynamic evolution of ecological vulnerability: A case study over Lanzhou-Xining urban agglomeration. *China Environmental Science*, 2023, 43(3): 1317-1327.]
- [6] 彭建, 李冰, 董建权, 等. 论国土空间生态修复基本逻辑 [J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 18-26. [Peng Jian, Li Bing, Dong Jianquan, et al. Basic logic of territorial ecological restoration. *China Land Science*, 2020, 34(5): 18-26.]
- [7] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制 [J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2797-2813. [Liu Zhitao, Wang Shaojian, Fang Chuanglin. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2797-2813.]
- [8] 张弛, 李枝坚, 曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究: 以珠江三角洲为例 [J]. 地理研究, 2022, 41(5): 1279-1297. [Zhang Chi, Li Zhijian, Zeng Hui. Scale effects on ecosystem service trade-off and its influencing factors based on wavelet transform: A case study in the Pearl River Delta, China. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1279-1297.]
- [9] 刘玉, 翟晓燕, 张永勇, 等. 基于水循环模拟的水生态产品价值量核算: 以黄河上游湟水河流域为例 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1704-1716. [Liu Yu, Zhai Xiaoyan, Zhang Yongyong, et al. Valuation of aquatic ecological products based on water cycle simulation: Taking the Huangshui River Basin as an example. *Progress in Geography*, 2023, 42(9): 1704-1716.]
- [10] Cao W, Wu D, Huang L, et al. Spatial and temporal variations and significance identification of ecosystem services in the Sanjiangyuan National Park, China [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6151. doi: 10.1038/s41598-020-63137-x.
- [11] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化 [J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796. [Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796.]
- [12] Xu Z H, Peng J, Dong J Q, et al. Spatial correlation between the changes of ecosystem service supply and demand: An ecological zoning approach [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 217: 104258. doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104258.
- [13] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581. [Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Trade-offs and synergies between ecosystem services in Ordos City. *Progress in Geography*, 2017, 36(12): 1571-1581.]
- [14] 杨薇, 靳宇弯, 孙立鑫, 等. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2516-2528. [Yang Wei, Jin Yuwan, Sun Lixin, et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers: Model development and a case study. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2516-2528.]
- [15] 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. [Cheng Chaonan, Hu Yang, Zhao Ming. Progress and prospect of the spatiotemporal change and ecosystem services evaluation of urban green space pattern. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1770-1782.]
- [16] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制 [J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920. [Huang Muyi, Yue Wenze, Fang Bin, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920.]
- [17] 郑德凤, 万巨影, 白丽娜, 等. 燕山—太行山区生态系统服务价值权衡/协同关系的多尺度分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(4): 409-417. [Zheng Defeng, Wan Juying, Bai Lina, et al. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs/synergies in Yanshan-Taihang Mountains area. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4): 409-417.]
- [18] 陈俊辰, 贺淑钰, 薛晶, 等. 多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应: 以湖北省为例 [J]. 生态

- 学报, 2023, 43(12): 4835-4846. [Chen Junchen, He Shuyu, Xue Jing, et al. Exploring ecosystem service trade-offs and their response to landscape configuration at multi-scales: A case study of Hubei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4835-4846.]
- [19] Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28. doi: 10.5751/ES-01667-110128.
- [20] 赵俊三, 袁磊, 张萌. 土地利用变化空间多尺度驱动力耦合模型构建 [J]. *中国土地科学*, 2015, 29(6): 57-66. [Zhao Junsan, Yuan Lei, Zhang Meng. Driving forces coupling model for multi-scale land use change based on system dynamics. *China Land Science*, 2015, 29(6): 57-66.]
- [21] Yang M H, Gao X D, Zhao X N, et al. Scale effect and spatially explicit drivers of interactions between ecosystem services: A case study from the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147389. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147389.
- [22] Dade M C, Mitchell M G E, McAlpine C A, et al. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach [J]. *Ambio*, 2019, 48 (10): 1116-1128.
- [23] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [24] Biswas A, Si B C. Application of continuous wavelet transform in examining soil spatial variation: A review [J]. *Mathematical Geosciences*, 2011, 43(3): 379-396.
- [25] 李双成, 高伟明, 周巧富, 等. 基于小波变换的NDVI与地形因子多尺度空间相关分析 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4198-4203. [Li Shuangcheng, Gao Weiming, Zhou Qiaofu, et al. Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198-4203.]
- [26] 刘春芳, 王佳雪, 许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算: 以石羊河流域为例 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(8): 157-165. [Liu Chunfang, Wang Jiaxue, Xu Xiaoyu. Regional division and standard accounting of ecological compensation from the perspective of ecosystem service flow: A case study of Shiyang River Basin. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(8): 157-165.]
- [27] 卿苗, 赵军, 冯超, 等. 1980—2030年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 9525-9536. [Qing Miao, Zhao Jun, Feng Chao, et al. Response of ecosystem carbon storage service to land-use change in Shiyang River Basin from 1980 to 2030. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9525-9536.]
- [28] 苏维词. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治 [J]. *中国环境科学*, 2000, 20(6): 547-551. [Su Weici. Eco-environmental fragility in Guizhou Karst mountain region and its ecological rehabilitation. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 547-551.]
- [29] Peng J, Hu X X, Qiu S J, et al. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [30] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89: 67-76.
- [31] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404: 858-861.
- [32] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1): 34-42. [Chen Guangshui, Yang Yusheng, Liu Lezhong, et al. Research review on total below ground carbon allocation in forest ecosystems. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 34-42.]
- [33] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710. [Zheng Hua, Li Yifeng, Ouyang Zhiyun, et al. Progress and perspectives of ecosystem services management. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 702-710.]
- [34] 黄孟冬, 肖玉, 秦克玉, 等. 1980—2018年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7612-7629. [Huang Mengdong, Xiao Yu, Qin Keyu, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion prevention service in Otindag from 1980 to 2018. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7612-7629.]
- [35] 包志炎, 郑高安, 王萱, 等. 基于模糊数据挖掘的灌区水资源配置研究 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 270-277. [Bao Zhiyan, Zheng Gao'an, Wang Xuan, et al. Water resources allocation of irrigation district based on fuzzy data mining. *Transactions of the CSAM*, 2020, 51 (8): 270-277.]
- [36] 牛志君, 周亚鹏, 王树涛, 等. 县域土地利用变化对碳储量的影响与评价: 以黑龙江流域巨鹿县为例 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 292-297, 304. [Niu Zhijun, Zhou Yapeng, Wang Shutao, et al. Influence and evaluation of land use change on carbon storage on county scale: A case study of Julu County in Heilonggang Basin. *Re-*

- search of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 292-297, 304.]
- [37] 余祥伟, 薛东剑, 陈凤娇. 融合多尺度边缘检测的小波贝叶斯SAR图像滤波[J]. 遥感信息, 2019, 34(5): 120-125. [Yu Xiangwei, Xue Dongjian, Chen Fengjiao. An wavelet Bayesian SAR image filtering with multiscale edge detection. Remote Sensing Information, 2019, 34(5): 120-125.]
- [38] 邱炳文, 苏簪铀, 陈崇成. 基于小波变换的武夷山自然保护区NDVI与地形因子多尺度空间相关分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1915-1920. [Qiu Bingwen, Su Zanyou, Chen Chongcheng. Multi-scale spatial correlations between topographic attributes and vegetation indices in Wuyi Mountain Reserve based on wavelet transform. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1915-1920.]
- [39] 李琛, 吴映梅, 高彬媛, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测: 以环洱海地区为例[J]. 经济地理, 2022, 42(4): 220-229. [Li Chen, Wu Yingmei, Gao Binpin, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in plateau lake: A case study of the area around the Erhai. Economic Geography, 2022, 42(4): 220-229.]
- [40] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1198-1213. [Xiang Shujiang, Zhang Qian, Wang Dan, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1198-1213.]
- [41] 姚志强, 陈实, 胡文海, 等. 皖江城市带生态系统服务价值演变及驱动分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(4): 218-226. [Yao Zhiqiang, Chen Shi, Hu Wenhai, et al. Evolution and driving analysis of ecosystem service values in the Wanjiang Urban Belt. Environmental Science & Technology, 2022, 45(4): 218-226.]
- [42] 赖勇, 林少涛, 黄光庆, 等. 快速城镇化背景下生态系统服务价值时空变化及空间特征研究: 以潮州市潮安区为例[J]. 生态科学, 2023, 42(4): 18-28. [Lai Yong, Lin Shaotao, Huang Guangqing, et al. Spatial-temporal dynamics of ecosystem services value in a rapidly urbanization process: A case study of Chao'an District, Chaozhou City. Ecological Science, 2023, 42(4): 18-28.]
- [43] Liu Y, Bi J, Lv J S, et al. Spatial multi-scale relationships of ecosystem services: A case study using a geostatistical methodology [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 9486. doi: 10.1038/s41598-017-09863-1.
- [44] Wang S X, Wu B, Yang P N. Assessing the changes in land use and ecosystem services in an oasis agricultural region of Yanqi Basin, Northwest China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(12): 8343-8357.
- [45] An Y M, Zhao W W, Li C J, et al. Temporal changes on soil conservation services in large basins across the world [J]. Catena, 2022, 209(1): 105793. doi: 10.1016/j.catena.2021.105793.
- [46] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(6): 1018-1029. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.]
- [47] 黄晶, 薛东前, 董朝阳, 等. 干旱绿洲农业区土地利用转型生态环境效应及分异机制: 基于三生空间主导功能判别视角[J]. 地理科学进展, 2022, 41(11): 2044-2060. [Huang Jing, Xue Dongqian, Dong Chaoyang, et al. Eco-environmental effects and spatial differentiation mechanism of land use transition in agricultural areas of arid oasis: A perspective based on the dominant function of production-living-ecological spaces. Progress in Geography, 2022, 41(11): 2044-2060.]

Spatial and temporal variability of ecosystem services in the Shiyang River Basin and its multi-scale influencing factors

SHI Jing^{1,2,3}, SHI Peiji^{1,2,3*}, LI Xuehong^{1,2,3}, WANG Ziyang^{1,2,3}, XU Aokang¹

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province,

Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and

Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A multi-scale quantitative analysis of the factors that influence the spatial and temporal changes in ecosystem services is an important breakthrough in revealing the mechanisms of ecosystem service evolution and promoting sustainable regional development. Existing studies focus on determining the scale of research from the administrative division or watershed level, and lack scientific and sound scale division methods. Taking the Shiyang River Basin as the study area, this study evaluated the spatiotemporal variation characteristics of four ecosystem services—food supply, carbon sequestration, water production, and wind and sand control. Wavelet analysis and the optimal parameters-based geographical detector model were used to determine the optimal scale and the main influencing factors at different scales for studying the spatiotemporal changes of ecosystem services. The results show that: 1) The four ecosystem services (food supply, carbon sequestration, water production, and wind and sand control) in the basin all showed an increasing trend from 2000 to 2020. Food supply services increased the most, by 138.3%, while carbon sequestration, water production, and wind and sand control services increased by 0.97%, 7.6%, and 9.5% respectively. 2) According to the wavelet square difference main cycle of the four ecosystem services, six characteristic scales of influencing factors were constructed from 2000 to 2020 and from 2010 to 2020, and seven from 2000 to 2010, respectively. 3) With the increase of scale, the effect of the influencing factors on the temporal and spatial changes of ecosystem services gradually increased, and the main influencing factors at different scales were significantly different. Food supply and carbon sequestration services were mainly affected by human factors on a small scale and natural factors on a large scale. Water production service was always affected by natural factors at different scales. With the increase of scale, the influence of human factors on the wind and sand control service was significantly enhanced. 4) The increasing trend of q -values of various interaction factors in the process of increasing scale is different and among these, the interaction between the human factors of carbon sequestration and wind and sand control services is significantly enhanced. This study addressed the inadequacies of the traditional multi-scale sequence construction method through wavelet analysis, which can provide a reference for optimizing regional ecosystem structure and making multi-level ecosystem management decisions.

Keywords: ecosystem services; wavelet analysis; multi-scales; optimal parameters-based geographical detector; Shiyang River Basin