干旱绿洲生态系统服务与人类福祉的耦合协调关系
——以甘肃省酒泉市肃州区为例

郭泇彤[1]，陈强强[1,2]，李晓榕[3]
（1.甘肃农业大学 财经学院，甘肃 兰州 730070；2.甘肃省生态建设与
环境保护研究中心，甘肃 兰州 730030；3.新疆大学 经济与管理学院，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘　要：［目的］分析干旱区绿洲生态系统服务与人类福祉的时空演变特征、耦合协调关系及其驱动因素，为协同推进干旱区生态治理与民生改善提供科学依据。［方法］以典型干旱区绿洲甘肃省酒泉市肃州区为研究对象，融合联合国可持续发展目标框架、千年生态系统评估体系与中国人类福祉功能结构，运用生态系统服务价值核算、耦合协调度模型、随机森林算法及时空地理加权回归模型开展研究。［结果］①考察期内，肃州区生态系统服务价值呈现“先降后升”的态势，由2003年的8.96×10^9元下降至2013年的8.24×10^9元后升至2023年的8.32×10^9元，调节服务价值构成生态系统服务价值的主体。人类福祉指数显著提升，由0.28提升至0.51，以人均GDP与公共服务为代表的发展功能增长最为突出。②生态系统服务与人类福祉的耦合协调关系由以拮抗和失调为主逐步向磨合阶段演进，空间上呈现出南部祁连山沿线“高-高”集聚、中部城区及绿洲农业区“低-低”集聚的显著分异格局。③城市化进程与农业开发强度是制约生态系统服务与人类福祉协调发展的主要因素，而植被覆盖度提升，第三产业比重增加以及城乡收入差距缩小则表现出显著促进作用，且各驱动因素的影响具有明显的时空异质性。［结论］肃州区生态系统服务与人类福祉的耦合协调关系在时空上呈现明显的演进特征与空间分异，且受城市化、农业开发、植被覆盖等多重因素异质性的影响。

关键词：生态系统服务；人类福祉；耦合协调；干旱区绿洲城市；甘肃省酒泉市肃州区
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2026)04-0359-13　　**中图分类号：**X171.1

文献参数：郭泇彤，陈强强，李晓榕.干旱绿洲生态系统服务与人类福祉的耦合协调关系[J].水土保持通报，2026，46(4)：359-371. Guo Jiatong，Chen Qiangqiang，Li Xiaorong. Coupling and coordination relationship between ecosystem services and human well-being in arid oasis cities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46(4)：359-371.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.008　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.008**

Coupling and coordination relationship between ecosystem services and human well-being in arid oasis cities
—A case study of Suzhou District，Jiuquan City，Gansu Province

Guo Jiatong[1]，Chen Qiangqiang[1,2]，Li Xiaorong[3]
（1.*College of Economics and Finance*，*Gansu Agricultural University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730070，*China*；2.*Gansu Ecological Construction and Environmental Protection Research Center*，*Lanzhou*，*Gansu* 730030，*China*；3.*School of Economics and Management*，*Xinjiang University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830046，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal evolution characteristics，coupling coordination relationship，and driving factors of ecosystem services and human well-being in arid oasis regions were analyzed in order to provide a scientific basis for synergistically promoting ecological governance and livelihood improvement in arid regions.［Methods］Taking Suzhou District，a typical arid oasis in Jiuquan City，Gansu Province，as the study area，the United Nations Sustainable Development Goals framework，the Millennium Ecosystem Assessment system，and the functional structure of human well-being in China were integrated. Ecosystem service value accounting，a coupling coordination degree model，a random forest algorithm，and a geographically and temporally weighted

收稿日期：2025-11-10　　**修回日期：**2026-01-15　　**采用日期：**2026-01-16
资助项目：国家社会科学基金一般项目“生态理性视域下甘南黄河水源补给区草原生态保护农户认知行为与调适机制研究”(21BJY117)
第一作者：郭泇彤(1992—)，女(汉族)，甘肃省酒泉市人，硕士研究生，研究方向为农业管理。Email：307436675@qq.com。
通信作者：陈强强(1979—)，男(汉族)，甘肃省陇西县人，硕士，教授，主要从事区域农业资源开发与管理方面的研究。Email：jjglxy666@126.com。

regression model were used. [Results] ① During the study period, ecosystem service value in Suzhou District showed a trend of first decreasing and then increasing, declining from 8.96×10^9 yuan in 2003 to 8.24×10^9 yuan in 2013 and then rising to 8.32×10^9 yuan in 2023, with regulating services constituting the main component of ecosystem service value. The human well-being index increased significantly from 0.28 to 0.51, and the development function represented by per capita GDP and public services showed the most prominent growth. ② The coupling coordination relationship between ecosystem services and human well-being gradually evolved from a stage dominated by antagonism and imbalance to a stage of adaptation and coordination. Spatially, a significant differentiation pattern was observed, with high-high clustering along the southern Qilian Mountains and low-low clustering in the central urban area and oasis agricultural area. ③ Urbanization process and agricultural development intensity were the main factors restricting the coordinated development of ecosystem services and human well-being. Increased vegetation coverage, a higher proportion of the tertiary industry, and a narrowing urban-rural income gap showed significant promoting effects. The influence of these driving factors exhibited obvious spatiotemporal heterogeneity. [Conclusion] The coupling coordination relationship between ecosystem services and human well-being in Suzhou District shows clear spatiotemporal evolution characteristics and spatial differentiation, and is affected by the heterogeneous effects of multiple factors, including urbanization, agricultural development, and vegetation coverage.

Keywords: ecosystem services; human well-being; coupling coordination; arid oasis city; Suzhou District, Jiuquan City, Gansu Province

生态系统服务是维系人类福祉的自然资本基础,既包括食物与水源等直接供给,也涵盖气候调节,水土保持与文化传承等调节与支持功能[1]。人类福祉作为生态系统服务的价值承载体,是一个涵盖物质充裕、健康保障、社会和谐与个人发展自由等多维度的综合概念[2]。二者之间并非单向依赖,而是通过资源利用与空间开发形成复杂的双向耦合关系,其动态演化决定了区域可持续发展的路径与风险边界。联合国千年生态系统评估确立了生态系统服务与人类福祉关系的范式框架之后,探讨二者之间的协同互惠机制逐渐成为可持续发展研究的重要议题。《生物多样性公约》第十五次缔约方大会(COP15)通过的"昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架",进一步明确到2030年生态系统服务价值提升15%的目标,凸显生态保护与民生改善的全球共识。推动生态保护与民生改善的深度融合,已在中国国家战略体系中居于至高优先级。

党的十八大以来,"两山"理念深度融入生态文明建设实践,引领形成系统性的生态治理战略部署。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》将西北干旱区绿洲生态系统保护修复列为重点,要求在保障生态安全的同时改善民生福祉。干旱区绿洲具有水资源依赖性强,生态脆弱与服务功能独特等特征,是实现区域发展与生态安全协调的关键单元。以甘肃省酒泉市肃州区为代表的干旱区绿洲在承担国家战略与区域发展任务的同时,面临水源短缺、绿洲边缘化与生物多样性退化等多重挑战。这一情境提出了两类亟需回答的科学问题:①生态系统服务的时空演变如何影响不同维度的人类福祉;②两者之间耦合关系与驱动因素为何,哪些要素可用于实现协同优化并规避系统性风险。

在生态系统服务与人类福祉的交叉研究领域,其研究范式经历了从价值评估到关联分析,再到机制探析的深刻演进。早期研究以Costanza等[3]对生态系统服务的经济价值评估为代表,奠定了该领域的量化分析基础。随后,学术焦点转向对生态系统服务间及其与人类福祉复杂关系的解析,如Bennett等[4]对服务间权衡协同关系及其福祉传导路径的探讨,标志着研究从单一评估走向系统关联。近年来,研究前沿开始聚焦文化服务与精神福祉等非物质层面,强调其在景观感知、心理健康与社区凝聚力等社会心理机制中的关键作用[5]。在研究方法上,遥感技术与参与式评估的结合使得生态系统服务与人类福祉的关联研究更加精细化。在区域研究方面,非洲萨赫勒地区[6]、中亚咸海流域等[7]干旱区的案例研究表明,水资源供给服务的变化直接影响当地居民的基本生活保障与发展机会,而调节服务的退化则可能加剧健康风险与社会不平等。国内研究起步相对较晚但发展迅速。在理论层面,欧阳志云等[8]系统构建了符合中国特点的生态系统服务评估框架,为后续研究奠定了理论基础;刘焱序等[9]进一步提出了生态系统服务与人类福祉耦合研究的概念框架。在实践层面,现有研究主要集中于长三角[10]、粤港澳大湾区等[11]发达城市群,以及黄河流域[12]、长江经济带

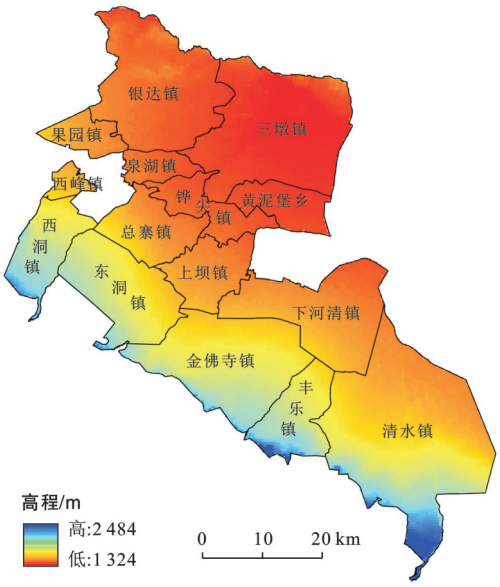
等[13]关键生态功能区。这些研究揭示了快速城市化过程中生态系统服务与居民生活质量的复杂关系,如陈万旭等[14]对长江中游城市群的研究发现生态系统服务与人类福祉存在明显的空间失配现象;刘焱序等[15]对北京都市圈的研究表明,城市扩张过程中不同群体从生态系统服务中获益的能力存在显著差异。此外,李文青等[16]在秦巴山区的研究强调了地形梯度对二者关系的调节作用,房方等[17]在鄱阳湖流域的研究则关注了文化生态系统服务与居民幸福感的内在联系。随着研究方法论的持续进展,生态系统服务与人类福祉的关联研究已逐步超越宏观统计描述,转向对空间异质性、系统流动性与时间动态性的深入探析。通过参与式制图、社会-生态网络分析及长时序数据分析等方法,不仅揭示了文化2服务感知的空间分异、服务流动与居民福祉的匹配关系,还厘清了其关系在城市化进程中的动态演变规律。

鉴于此,本研究以肃州区为典型案例,立足于干旱区绿洲系统的生态-经济-社会复合特性,构建融合供给、调节、支持与文化服务的多层次生态系统服务评价体系,以及涵盖物质基础、健康保障、发展能力等多维度的人类福祉指标体系,运用生态系统服务价值核算、耦合协调度模型与时空地理加权回归等方法,解析2003—2023年肃州区生态系统服务于人类福祉的时空演变路径、耦合协调关系及其驱动机制,以期为肃州区及同类干旱区绿洲城市的高质量发展与生态安全屏障建设提供科学依据。

1　研究区域、数据来源与研究方法

1.1　研究区域

甘肃省酒泉市肃州区位于河西走廊中段,地理位置为39°10′—39°59′N,98°12′—99°18′E之间,总面积3 386 km^2,是典型的干旱区绿洲城市,也是丝绸之路经济带的重要节点(图1)。该区域属于温带大陆性干旱气候,水资源供给高度依赖祁连山冰川融水,是阻挡巴丹吉林沙漠南侵、维系区域生态平衡的重要屏障。从经济社会维度看,该地区的绿洲农业发达,是河西走廊重要的商品粮和特色农产品生产基地,同时承担着区域人口集聚、产业发展的功能。截至2023年,常住人口为4.48×10^{5}人,地区生产总值达7.72×10^{9}元,三次产业结构为16.90∶27.65∶55.45,形成了农业根基扎实、工业与服务业协同发展的产业格局。在可持续发展的背景下,干旱区绿洲城市面临着水资源短缺,生态脆弱性高与经济社会发展需求迫切的多重矛盾,其生态系统服务的供给状况直接关乎人类福祉的提升。因此,破解生态与发展的双重困境、实现生态系统服务与人类福祉的协调共进对推动整个干旱区乃至全球同类区域的可持续发展具有重要的示范意义。



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS〔2024〕650号标准地图制作。底图无修改,下同。

图1　甘肃省酒泉市肃州区概况

Fig.1　Overview of Suzhou District, Jiuquan City, Gansu Province

1.2　数据来源

本研究数据涵盖了2003—2023年的自然地理数据、社会经济数据及遥感监测数据,具体数据来源与应用场景如表1所示。

1.3　研究方法

1.3.1　生态系统服务价值(ESV)的核算

参照谢高地等[18]提出的"单位面积价值当量因子法",并结合肃州区作为干旱区绿洲的生态特征,本文对生态系统服务价值(ESV)的当量因子进行了区域适用性修正,且ESV核算的供给、调节、支持、文化4个维度的指标选取参照廖祥等研究[19]。首先,确定基准当量因子:以肃州区2003年灌溉耕地(农田)的自然粮食产量经济价值作为基准,依据《全国农产品成本收益资料汇编》及肃州区相关统计资料,测算得出该年单位面积农田生态系统服务价值为1 562.3元/(hm^2·a),并将其定义为1个标准当量因子的价值量。其次,构建修正系数:鉴于干旱区水资源稀缺及荒漠生态系统的特殊性,分别对水资源供给服务与荒漠支持服务赋予1.8,0.3的修正系数,从而得到适用于肃州区不同土地利用类型的生态系统服务价值(见表2)。最后,进行敏感性分析。通过调整土地利用类型的ESV价值±50%,计算敏感度系数(CS),检验ESV核算结果的稳定性,若CS<1,表明核算结果可靠。

$$ESV=\sum_{i=1}^{n}A_i\times VC_i \quad (1)$$

式中：ESV为生态系统服务总价值（元）；A_i为第i种土地利用类型的面积（hm^2）；VC_i为第i种土地利用类型的单位面积生态系统服务价值〔元/（hm^2·a）〕；n为土地利用类型数量。

表1 数据来源和描述

Table 1 Data sources and descriptions

数据类型	应用场景	数据形式（分辨率）	数据来源
土地利用数据	生态系统服务价值核算（ESV）	栅格（30 m）	依据中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/），提取肃州区30 m分辨率矢量边界数据
数字高程模型（DEM）	影响因素分析（地形因子）	栅格（90 m）	欧空局哥白尼数字高程模型（https://panda.copernicus.eu/）
气象数据（降水、气温）	ESV核算（气候调节服务）、影响因素	站点数据	中国气象局国家气象科学数据中心（http://data.cma.cn/） 甘肃省气象局（gs.cma.gov.cn）
植被覆盖度（NDVI）	ESV核算（支持服务）、影响因素	栅格（250 m）	美国国家航空航天局（NASA）MODIS数据集取肃州区行政边界内数据（地理坐标：北纬39°10′—39°59′，东经98°12′—99°18′），时间分辨率16 d，空间分辨率250 m
社会经济数据	人类福祉（HW）评估、影响因素	统计数据	《肃州区国民经济和社会发展统计公报》（2003—2023年）、酒泉市统计局官网
水资源数据	ESV核算（水资源供给服务）	统计数据	酒泉市水务局《水资源公报》（2003—2023年）

表2 肃州区单位面积生态系统服务价值

Table 2 Ecosystem service value per unit area in Suzhou District

单位：元/（hm^2·a）

生态服务大类	生态服务子类	耕地	林地	草地	湿地	水域	荒漠	建设用地
供给服务	食物生产	1 562.3	468.7	312.5	624.9	234.3	0.0	15.6
	原料生产	781.2	1 249.8	624.9	468.7	312.5	0.0	0.0
	水资源供给	2 812.1	937.4	468.7	2 343.5	12 498.4	156.2	0.0
调节服务	气体调节	1 249.8	3 593.3	2 031.0	2 343.5	937.4	156.2	−468.7
	气候调节	1 093.6	4 061.9	2 343.5	3 693.3	3 124.6	312.5	−312.5
	净化环境	312.5	3 593.3	2 031.0	3 693.3	8 124.0	156.2	−312.5
	水文调节	1 874.8	3 124.6	2 031.0	23 435.0	15 623.0	156.2	−4 687.0
支持服务	土壤保持	1 874.8	3 593.3	2 343.5	2 812.1	937.4	312.5	31.2
	维持养分循环	312.5	369.3	312.5	312.5	156.2	15.6	0.0
	生物多样性	468.7	4 061.9	2 812.1	4 687.0	4 061.9	312.5	15.6
文化服务	美学景观	312.5	3 124.6	1 874.8	4 687.0	3 124.6	312.5	156.2
总价值/（元·hm^{-2}）		10 502.3	26 031.9	15 931.3	49 374.6	51 384.2	1 874.8	−5 138.4

1.3.2 人类福祉（HW）指标体系构建

结合可持续发展目标框架（SDGs）、千年生态系统评估体系（MEA）、中国人类福祉功能结构框架以及肃州区的干旱区绿洲特征，构建“功能层—维度层—指标层”共3级人类福祉评价体系（表3），并采用熵权法确定指标权重，通过极差标准化处理指标数据，最终计算综合福祉指数。

①第一层：基础功能（权重为0.42）。干旱区绿洲居民的基本福祉依赖健康保障与居住安全，参考MEA“健康”维度与SDG3，SDG11，选取卫生资源、住房条件等指标；②第二层：发展功能（权重为0.35）。经济发展与教育资源是提升福祉的核心动力，结合SDG8（体面工作和经济增长）、SDG4（优质教育），将发展功能划分为“基本物质”和“自由选择”两个维度，“基本物质”维度聚焦解决居民经济收入保障问题，是发展功能的物质基础，“自由选择”维度聚焦解决居民发展机会公平问题，体现发展功能的“能力拓展”属性，分别选取人均GDP、高中入学率等指标进行衡量；③第三层：和谐功能（权重为0.13）。和谐功能的核心是体现社会公平与包容，而社会公平的关键载体是“社会关系”，参考SDG10，以城乡收入比衡量，反映居民在社会资源分配中的公平性体验；④第四层：可持续功能（权重为0.10）。干旱区生态安全与水资源保障是福祉功能可持续的前提，结合SDG13（气候行动）、SDG6（清洁饮水），选取碳排放、自来水普及率等指标。

表 3　可持续发展目标框架下肃州区人类福祉评估体系

Table 3　Assessment system for human well-being in Suzhou District under framework of sustainable development goals

类功能结构(权重)	MEA维度(权重)	SDGs目标	具体指标	指标方向	权重
基础功能(0.42)	健康(0.58)	SDG_3	万人卫生机构床位数/(张·万人)	正向	0.26
		SDG_3	万人卫生技术人员数/(人·万人)	正向	0.32
	安全(0.42)	SDG_{11}	人均住房建筑面积/(m^2·人)	正向	0.21
		SDG_9	公路密度/($km \cdot km^{-2}$)	正向	0.21
发展功能(0.35)	基本物质(0.62)	SDG_8	人均GDP/(万元)	正向	0.28
		SDG_{10}	城乡居民人均可支配收入/(万元)	正向	0.34
	自由选择(0.38)	SDG_4	高中阶段毛入学率/%	正向	0.20
		SDG_7	人均用电量/(kW·h·人)	正向	0.18
和谐功能(0.13)	社会关系(1.00)	SDG_{10}	城乡收入比/(农村·城镇)	正向	0.13
可持续功能(0.10)	生态安全(1.00)	SDG_{13}	单位GDP碳排放/(t/万元)	负向	0.05
		SDG_6	农村自来水普及率/%	正向	0.05

1.3.3　耦合协调度模型

生态系统服务与人类福祉均属于开放型复杂系统,二者之间存在紧密关联。借鉴已有研究[20],本文采用耦合协调度模型对两者关系进行类型划分。同时,为进一步揭示系统间协调关系的内在结构,引入耦合协调度指标以判断二者的相对发展状态。将生态系统服务与人类福祉的相对发展关系划分为3类:生态系统服务发展滞后型、二者均衡发展型以及人类福祉发展滞后型,具体的判断标准见表4。

$$\mu_1=\sum_{i=1}^{n} w_i x_{ij} \tag{2}$$

$$\mu_2=\sum_{j=1}^{m} v_j y_{ij} \tag{3}$$

$$C=\sqrt{\frac{\mu_1\mu_2}{\left(\mu_1+\mu_2\right)^2/4}} \tag{4}$$

式中:w_i, v_j为指标权重,x_{ij}, y_{ij}为标准化数据;C为耦合度,取值范围$C\in[0,1]$,C越接近1,耦合度越高。

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{5}$$

式中:D为耦合协调度;T为综合发展指数,$T=a\mu_1+\omega\mu_2$;μ为相对发展度,表示生态系统服务与人类福祉间的相对发展水平差异,$\mu=\mu_1/\mu_2$。

表 4　生态系统服务与人类福祉耦合协调的阶段及发展水平界定

Table 4　Definition of stages and development levels of coupling coordination between ecosystem services and human well-being

耦合协调度区间	耦合协调阶段	符号	相对发展度区间	耦合特征
$0\leqslant D\leqslant 0.2$	严重失调	Ⅰ	$0<\mu\leqslant 0.6$	系统严重失调,生态系统服务发展滞后
			$0.6<\mu\leqslant 1.2$	系统严重失调,二者低水平均衡发展
			$1.2<\mu$	系统严重失调,人类福祉发展滞后
$0.2<D\leqslant 0.4$	中度失调	Ⅱ	$0<\mu\leqslant 0.6$	系统中度失调,生态系统服务发展滞后
			$0.6<\mu\leqslant 1.2$	系统中度失调,二者较低水平均衡发展
			$1.2<\mu$	系统中度失调,人类福祉发展滞后
$0.4<D\leqslant 0.5$	拮抗	Ⅲ	$0<\mu\leqslant 0.6$	系统拮抗,生态系统服务发展滞后
			$0.6<\mu\leqslant 1.2$	系统拮抗,二者基本均衡发展
			$1.2<\mu$	系统拮抗,人类福祉发展滞后
$0.5<D\leqslant 0.7$	磨合	Ⅳ	$0<\mu\leqslant 0.6$	系统缓慢磨合,生态系统服务发展滞后
			$0.6<\mu\leqslant 1.2$	系统较强磨合,二者较高水平均衡发展
			$1.2<\mu$	系统缓慢磨合,人类福祉发展滞后
$0.7<D<1$	高度协调	Ⅴ	$0<\mu\leqslant 0.6$	系统高度协调,生态系统服务发展滞后
			$0.6<\mu\leqslant 1.2$	系统极度协调,二者高水平均衡发展
			$1.2<\mu$	系统高度协调,人类福祉发展滞后

1.3.4 空间自相关分析

空间自相关分析用于识别空间变量的分布模式及其与邻近单元之间的集聚特征，主要包括全局空间自相关与局部空间自相关两个层面，分别通过Moran's I指数与局部Moran's I(LISA)进行测度。该统计量的取值范围为[-1,1]，其中，正值表明目标区域与周边地区在变量变化趋势上具有相似性，呈现空间集聚特征；负值则反映目标区域与周边区域变化趋势相异，存在空间异质性格局；若取值接近于零，则表明变量在空间上呈随机分布状态，缺乏显著的空间依赖关系。

1.3.5 随机森林与GTWR模型

随机森林是一种基于Bagging集成的机器学习方法，适用于评估多个自变量对因变量的影响程度。该模型通过计算每个自变量在模型中的增量均方误差来度量其重要性，该值越高，表明变量对因变量的解释作用越强。在数据的预处理中，输入变量参照相关研究[21]，结合研究区实际，选取城市化率(X_1)、农业开发强度(X_2)、第三产业占比(X_3)、植被覆盖度(X_4)、城乡收入比(X_5)、水资源利用率(X_6)、单位GDP碳排放(X_7)、公路密度(X_8)8个影响因素，数据标准化采用Z-score法(消除量纲影响)，输出变量为EHC值(耦合协调度)，数据来源于计算结果。同时，本文基于Python平台的Sklearn库构建模型，将样本数据按80%与20%的比例划分为训练集与测试集，并采用交叉验证方法确定最优决策树数量为86，随机种子数量设为42，以保证模型的可重复性与稳健性。

时空地理加权回归(GTWR)是在传统地理加权回归基础上引入时间维度的一种扩展模型，能够将时空信息嵌入局部回归参数中，从而更准确地捕捉变量关系的时空非平稳性。由于生态系统服务与人类福祉之间往往存在时间滞后效应，其相互影响并非即时响应，而GTWR模型则能够有效处理此类具有时空异质性的面板数据，为揭示变量在不同时期与区位的局部作用机制提供方法支持。具体地，首先，采用双平方核函数通过AIC准则确定空间带宽，然后输出研究单元在2003，2013，2023年的局部回归系数，通过t值、R^2值判断系数显著性与区域的适配性。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务与人类福祉动态演化特征

由表5可知，2003—2023年肃州区生态系统服务价值总体呈现先降后稳的演变特征，由8.96×10^9元下降至8.32×10^9元，累计降幅为7.2%。其中，2003—2013年生态系统服务价值显著下降，降幅达8.1%，主要源于区域发展初期快速城市化与农业扩张背景下生态与生产空间竞争的持续加剧。建设用地和耕地面积分别增长95.6%和6.3%，其扩张主要以占用林地，草地等高生态服务价值用地为实现路径，从结构上削弱了水源涵养、气候调节等关键调节与支持服务功能，反映出干旱区绿洲地区在起步发展阶段以供给服务扩张为导向、自然资本持续消耗的生态系统服务权衡特征。2013—2023年区域生态系统服务价值趋于稳定并小幅回升，增幅约1.0%。这一转折并非自然生态系统内生演替的结果，而是生态治理模式由粗放型向制度化、系统化转型的集中体现。以《祁连山生态保护与综合治理规划》为代表的一系列高强度、约束性政策在有效遏制生态空间持续蚕食的同时，通过退牧还草、水源涵养林建设和湿地修复等措施推动林草植被和湿地等关键生态用地恢复，具体表现为南部山区林草面积增加约12.3 km^2、湿地面积净增3.3 km^2。土地利用结构的系统性优化进一步改善了水源涵养、土壤保持和生物多样性维护等生态系统服务功能，推动区域生态系统服务价值由持续下降转向总体企稳。

表5 2003—2023年肃州区生态系统服务价值构成
Table 5 Composition of ecosystem service value in Suzhou District (2003—2023)

年份	总ESV/10^8元	供给服务/%	调节服务/%	支持服务/%	文化服务/%
2003	89.62	20.5	62.3	8.0	9.2
2004	88.85	20.3	62.6	7.9	9.2
2005	88.01	20.1	62.9	7.8	9.2
2006	87.15	19.8	63.2	7.7	9.3
2007	86.28	19.6	63.5	7.6	9.3
2008	85.40	19.3	63.8	7.6	9.3
2009	84.52	19.0	64.1	7.5	9.4
2010	83.63	18.7	64.4	7.5	9.4
2011	82.91	18.4	64.7	7.5	9.4
2012	82.63	18.3	64.9	7.5	9.3
2013	82.35	18.2	65.1	7.5	9.2
2014	82.42	18.3	65.0	7.4	9.3
2015	82.50	18.4	64.9	7.3	9.4
2016	82.58	18.6	64.7	7.3	9.4
2017	82.65	18.8	64.5	7.2	9.5
2018	82.73	18.9	64.4	7.2	9.5
2019	82.81	19.0	64.3	7.2	9.5
2020	82.89	19.1	64.3	7.1	9.5
2021	82.98	19.2	64.3	7.1	9.4
2022	83.07	19.3	64.2	7.1	9.4
2023	83.17	19.3	64.2	7.1	9.4

基于肃州区2003—2023年生态系统服务的结构数据，本文从供给服务、调节服务、支持服务与文化

服务4个维度系统考察其二级指标的变化趋势(图2)。在供给服务方面,食物生产与原料生产价值占比分别从0.21,0.15轻微下降至0.19,0.13,水资源供给略有下降,反映该区域水资源供给功能面临一定压力;调节服务中各子类均呈缓慢下降趋势,气体调节从0.47降至0.45,气候调节由0.41降至0.39,净化环境由0.28降至0.26,水文调节虽仍维持高位但由1.00降至0.98,土壤保持也从0.50降至0.48,表明调节功能整体有所弱化;支持服务中,维持养分循环与生物多样性同步由0.37降至0.35,显示生态系统在维持结构与功能稳定性方面的作用略有减弱;文化服务中的美学景观价值由0.17降至0.15,反映自然景观的休闲与文化功能有所下降。生态系统服务价值的整体下行并非短期扰动,而是区域经济社会转型过程中多因素交互作用的结果。一方面,长期以来以灌溉农业和资源型产业为主的发展模式加大了对水资源、土地和能源的消耗,区域生态环境承载力出现边际减弱,导致供给服务和调节服务在结构上呈现出持续下降趋势。另一方面,近年来气候变化背景下干旱化程度加剧、水热时空匹配度下降,进一步削弱了水文调节、气候调节与土壤保持等关键生态过程的稳态性。此外,城镇空间扩张和基础设施建设推高了对自然景观的占用与扰动,使得文化服务价值呈现边际下滑。

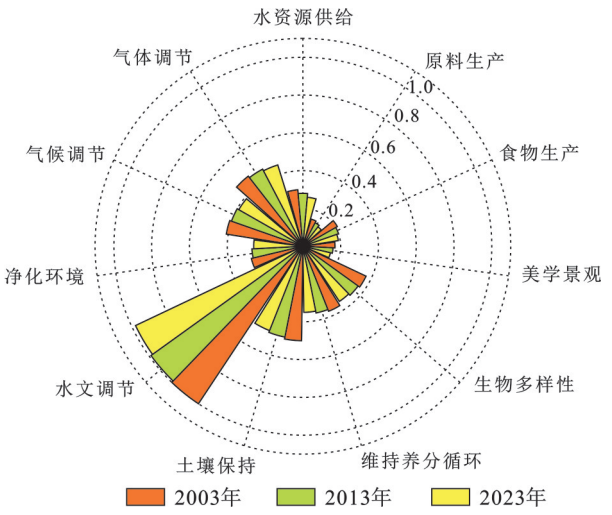


图2　2003—2023年肃州区生态系统服务演变

Fig.2　Evolution of ecosystem services in Suzhou District (2003—2023)

由图3可知,人类福祉的基础功能、发展功能、和谐功能与可持续功能4个维度均呈现持续提升态势,反映出区域人类福祉水平的整体改善。具体而言,基础功能涵盖健康与安全两方面,其数值分别由2003年的0.32,0.25上升至2023年的0.78,0.85,增幅显著,显示出基础保障能力不断增强。在发展功能方面,基本物质与自由选择两个维度亦呈现稳步上升趋势,分别从0.20,0.22提升至0.80,0.82,表明区域在物质条件与选择机会方面的供给能力持续增强。和谐功能以社会关系为表征,其数值由2003年的0.30增至2023年的0.70,虽增速略缓,但仍体现社会维度生态服务的积极演进。可持续功能以生态安全为度量,其数值从0.25上升至0.80,显示出区域生态环境的长期稳定性逐步提升。从变化原因看,上述四项功能的整体改善与肃州区在生态保护与社会发展上的结构性调整密切相关。一方面,随着国家西部生态屏障建设和河西走廊生态治理力度持续加大,水资源调配优化、绿洲边界治理以及生态修复工程共同提升了生态系统的调节与支撑能力,从而为健康、安全与生态安全等核心维度提供了更坚实的生态基础。另一方面,区域经济结构由资源依赖型向文旅产业、现代农业和生态型产业转型,使得居民的收入水平、就业机会和公共服务供给稳步提升,促进了基本物质、自由选择及社会关系等福祉要素的扩展。

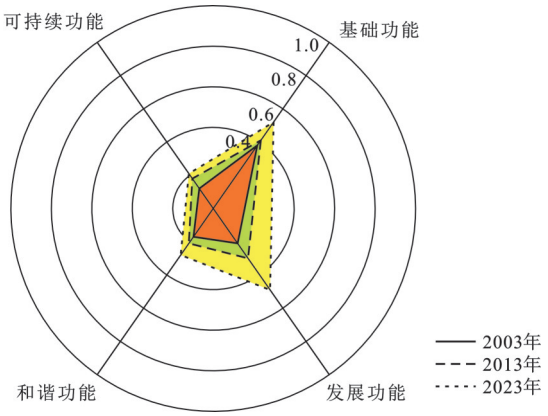


图3　2003—2023年肃州区人类福祉演变

Fig.3　Evolution of human well-being in Suzhou District (2003—2023)

2.2　生态系统服务与人类福祉的耦合协调

2.2.1　生态系统服务与人类福祉的耦合协调等级演变

2003—2023年肃州区耦合协调度D整体呈现稳步提升态势(图4),由0.38增至0.56,考察期内累计提升0.18,年均增幅约0.9%。从数值演变的阶段特征看,可分为两个区间:2003—2013年D值从0.38升至0.48,处于0.3到0.5的失调过渡区间,提升节奏相对平缓,反映此阶段生态系统服务与人类福祉的互动仍以单向适应为主;2013—2023年D值从0.48升至0.56,突破0.5的临界阈值后进入磨合区间,提升幅度略有增加,表明二者的协同性开始增强,互动关系从适应转向互促。

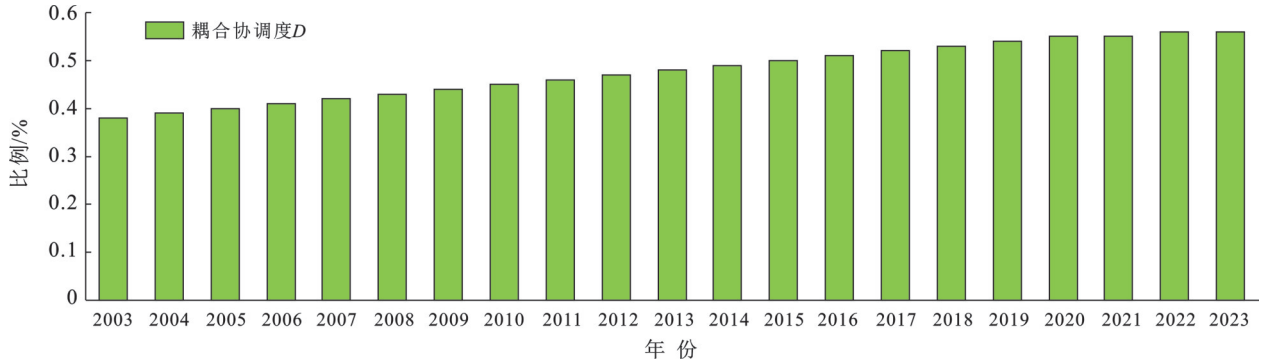


图4 2003—2023年生态系统服务与人类福祉的耦合协调度

Fig. 4 Coupling coordination degree between ecosystem services and human well-being (2003—2023)

协调等级实现由“中度失调”向“磨合”阶段的跨越。从等级结构演变来看(表6),严重失调与中度失调类型占比显著下降,其中中度失调由62.5%降至16.7%,而磨合类型成为主导,占比从12.5%上升至58.3%,并于2023年首次出现高度协调单元。从系统发展关系来看,生态系统服务(ES)滞后型占比从33.3%升至66.7%,均衡发展型则从58.3%降至25.0%,说明人类福祉(HW)提升速度显著快于生态系统服务改善进度,ES逐渐成为区域协调发展的关键制约因素。近年来,肃州区依托城镇化推进、产业转型与居民福利政策强化,使教育、医疗、收入及生活条件显著改善,推动人类福祉水平快速提升。另一方面,生态系统服务的恢复和提升具有明显的时间滞后性,受制于水资源约束强化,绿洲边界压力增大及气候干旱化趋势等外源因素,生态系统的调节与支持功能难以在短期内实现同步提升。

2.2.2 生态系统服务与人类福祉的耦合协调空间分异特征

从乡镇尺度看(图5),2003—2023年间肃州区生态系统服务与人类福祉的耦合协调水平整体呈持续提升态势,演化路径表现为由早期的失调与拮抗状态,逐步过渡至磨合阶段并最终进入协调阶段,区域整体协调性显著增强,但阶段性空间差异仍较为明显。

从空间演化过程看,耦合协调水平并未呈现稳定的单向梯度分布,而是表现出明显的阶段性分异特征。2013年前后,北部湿地与荒漠交错生态区(如银达镇、三墩镇、果园镇等)率先由拮抗阶段进入磨合状态,成为区域耦合协调水平提升的“先行区”;而中部绿洲灌溉农业区(如泉湖镇、上坝镇、西峰镇等)由于农业集约化程度较高与城镇扩张压力叠加,生态系统承载压力较大,在2013—2018年间仍存在局部拮抗现象,表现出一定的阶段性滞后;南部沿山戈壁荒漠生态区(如丰乐镇、清水镇、东洞镇等)受自然条件约束,生态系统服务供给能力相对较弱,但随着区域生态治理与资源配置优化,其耦合协调水平亦逐步提升。2018年以后,各乡镇耦合协调水平显著趋同,区域整体由“局部差异显著”向“全域协调收敛”转变,至2023年基本形成以协调状态为主的空间格局。总体而言,肃州区乡镇尺度耦合协调水平的演化,本质上是自然生态禀赋、土地利用结构与人类活动强度共同作用的结果,其中湿地资源禀赋、绿洲农业开发强度以及荒漠生态约束构成了空间差异的主要驱动机制。

表6 2003—2023年肃州区耦合协调度等级与相对发展度分布

Table 6 Distribution of coupling coordination degree levels and relative development degrees in Suzhou District (2003—2023)

年份	耦合协调度等级与相对发展度分布/%							
	严重失调	中度失调	拮抗	高度协调	高协调	生态系统服务滞后	均衡	人类福祉滞后
2003	0	62.5	25.0	12.5	0	33.3	58.3	8.4
2004	0	60.0	26.5	13.5	0	35.0	56.6	8.4
2005	0	58.0	28.0	14.0	0	38.0	55.0	7.0
2006	1.0	55.0	30.0	14.0	0	40.0	53.0	7.0
2007	2.0	53.0	32.0	13.0	0	43.0	51.0	6.0
2008	3.0	51.0	34.0	12.0	0	45.0	49.0	6.0
2009	4.0	49.0	37.0	10.0	0	48.0	46.0	6.0
2010	4.5	48.0	38.5	9.0	0	50.0	44.0	6.0
2011	5.0	47.0	39.0	9.0	0	51.0	42.0	7.0
2012	6.0	46.8	40.2	7.0	0	52.5	39.5	8.0
2013	6.7	46.7	41.7	5.0	0	53.3	38.3	8.4
2014	6.0	43.0	43.0	8.0	0	55.0	37.0	8.0
2015	5.0	38.0	45.0	12.0	0	57.0	35.0	8.0
2016	4.0	33.0	44.0	19.0	0	59.0	32.0	9.0
2017	3.0	28.0	42.0	27.0	0	60.0	31.0	9.0
2018	2.0	25.0	39.0	34.0	0	62.0	29.0	9.0
2019	1.0	22.0	35.0	42.0	0	63.0	28.0	9.0
2020	0.5	20.0	31.5	48.0	0	64.5	27.0	8.5
2021	0	18.0	28.0	54.0	0	65.0	26.0	9.0
2022	0	17.0	26.0	57.0	0	66.0	25.5	8.5
2023	0	16.7	25.0	58.3	0	66.7	25.0	8.3

根据全局Moran's I分析结果(表7)可知,2003—2023年肃州区生态系统服务与人类福祉的耦合协

调度的空间自相关性持续增强,全局Moran's *I*值由0.386显著上升至0.517,且各年均通过1%水平的显著性检验。

这表明研究期间肃州区生态系统服务与人类福祉的协调度(EHC)呈现出日益显著的空间集聚特征,空间依赖效应逐步强化。

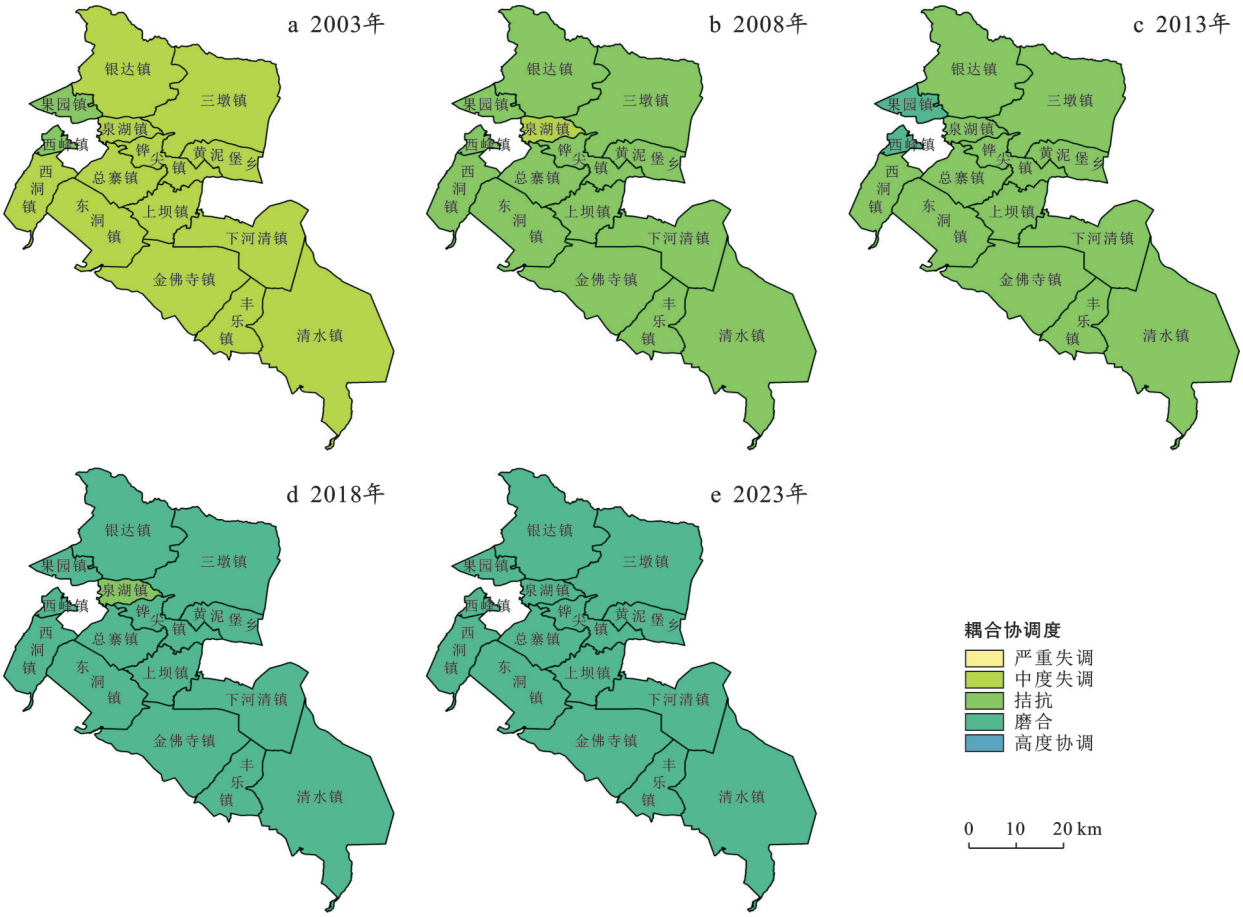


图5　各乡镇生态系统服务与人类福祉的耦合协调度

Fig.5　Coupling coordination degree between ecosystem services and human well-being across townships

表7　2003—2023年肃州区EHC全局Moran's *I*值及空间聚集特征

Table 7　Global Moran's *I* values and spatial clustering characteristics of EHC in Suzhou District (2003—2023)

年份	全局Moran's *I*值	*p*值
2003	0.386	0.008
2013	0.452	0.004
2023	0.517	0.001

注:EHC为生态系统服务与人类福祉的协调度。下同。

根据李佳桐等[22]的研究,由于南北区域间存在显著的空间异质性,本文将肃州区划分为3个典型区域:南部沿山戈壁荒漠生态区、中部绿洲灌溉农业生态区、北部湿地与荒漠交错生态区。基于局部Moran's *I*分析结果(表8),肃州区EHC整体呈现出"中部相对低值,南北分化"的空间分异格局。高-高聚集区主要分布于北部湿地与荒漠交错生态区(如银达镇、三墩镇、果园镇等),该区域湿地、绿洲与荒漠交错分布,生态系统服务供给能力较强,同时依托一定的农业与城镇发展基础,人类福祉水平相对较高,二者形成较为稳定的正向协同关系;低-低聚集区集中于中部绿洲灌溉农业生态区(如泉湖镇、上坝镇、西峰镇等),受高强度农业开发与城镇扩张影响,生态系统承载压力较大,生态服务供给不足与较高人类福祉需求之间存在结构性矛盾;而南部沿山戈壁荒漠生态区(如丰乐镇、清水镇、东洞镇等)则多表现为低值或过渡型集聚特征,受自然条件约束,生态系统服务供给能力有限,人类福祉水平整体不高,空间关联性相对较弱。

2.3　生态系统服务与人类福祉的耦合协调的影响因素分析

2.3.1　主导因素重要性

根据随机森林模型的实证结果(图6)可知,2003—2023年肃州区生态系统服务与人类福祉耦合协调

度各影响因子的重要性排序依次为城市化率以58.7%的IncMSE值居于首位，农业开发强度为42.3%，第三产业占比为38.5%，植被覆盖度为35.2%，城乡收入比为32.1%，水资源利用率为28.6%，单位GDP碳排放为25.8%，公路密度为22.4%。该排序反映出城市化与农业活动在区域生态约束中占据主导地位，凸显了人为干扰对生态承载力演变的关键影响。

表8 肃州区EHC局部Moran's *I*空间聚集特征

Table 8 Local Moran's *I* spatial clustering characteristics of EHC in Suzhou District

空间聚集类型	分布区域	生态服务价值水平	人类福祉水平	局部Moran's *I*值	*p*值	空间关联特征
高-高聚集区	北部湿地与荒漠交错生态区	高	中等	0.682	0.003	显著正相关，高值与高值空间关联紧密
低-低聚集区	中部绿洲灌溉农业生态区	低	高	0.575	0.005	显著正相关，低值与低值空间关联显著
过渡地带异质型聚集区	南部沿山戈壁荒漠生态区	中-低	低-中	0.124	0.215	空间相关性不显著，分布离散

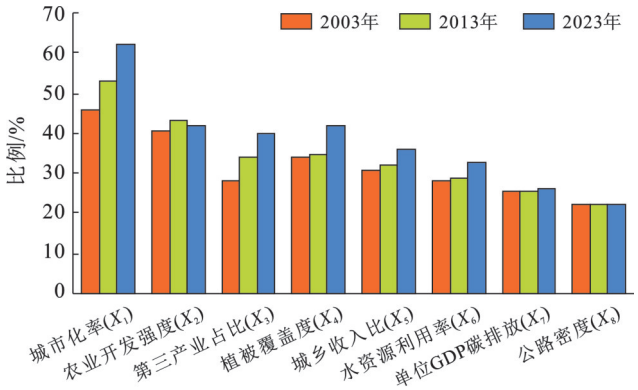


图6 2003—2023年肃州区关键要素分阶段变化趋势

Fig.6 Staged variation trends of key factors in Suzhou District (2003—2023)

从动态演进的角度观察，各因素的重要性呈现出明显的时间异质性。城市化率作为核心驱动因素，其影响持续增强，IncMSE由2003年的42.1%上升至2023年的58.7%，体现了城市扩张对生态系统的挤压效应不断加剧。这一趋势与肃州区近20 a来人口集聚、建设用地快速增长及城镇功能外溢直接相关，城市空间向绿洲边缘和农田区域持续渗透，使得生态系统服务在空间上被压缩，从而强化了城市化的负向贡献。农业开发强度的影响则呈现先升后降的变化轨迹，从2003年的38.5%升至2013年的45.2%，随后回落至2023年的42.3%。这种拐点式调整与2013年后大规模节水农业技术推广和高效节水灌溉系统建设密切相关，表明农业生产方式从粗放型向集约节水型转变，使农业生态压力得到一定缓解，推动生态系统服务功能逐步恢复。与此同时，第三产业占比的影响稳步提升，从2003年的25.3%增长到2023年的38.5%。这一变化不仅反映出服务业部门对土地、水资源等生态要素的依赖程度相对较低，也体现了肃州区产业结构由资源消耗型向生态友好型加速转型的过程。服务业尤其是文旅、商贸与现代服务业的发展，通过减少高耗能、高排放产业比重，提高了经济增长与生态系统服务改善之间的协同度。在干旱绿洲系统中，第三产业扩展通常伴随生态环境质量改善与居民福祉提升同步发生，因此其重要性的增强可视为生态系统服务与人类福祉耦合协调水平上升的结构性支撑因素。

2.3.2 主导因素时空异质性

为揭示肃州区空间非平稳性，更精准地提出分区调控策略，采用GTWR模型进行评估。根据表9所示的GTWR模型估计结果，2003—2023年肃州区南部沿山戈壁荒漠生态区与北部湿地与荒漠交错生态区各因素对生态承载力的影响呈现出明显的时空分异特征。从时间演变来看，影响因素的回归系数在两类区域中保持一致的变动方向，但影响程度存在显著差异。城市化率、农业开发强度、城乡收入比、单位GDP碳排放和公路密度等因素的系数均为负值，且除城乡收入比和单位GDP碳排放的负面影响有所减弱外，其余因素的负向效应随时间的推移呈增强趋势；与之相反，第三产业占比、植被覆盖度与水资源利用率则表现出持续增强的促进效应，其中南部地区第三产业占比的系数从0.30增至0.50，植被覆盖度从0.45升至0.57，增幅均显著高于北部。从空间对比来看，南部祁连山沿线在第三产业、植被覆盖与水资源利用方面的正向响应更强，而北部荒漠区在城市化、农业开发与碳排放等方面的生态压力更为突出，反映出不同自然本底与发展路径下生态系统的异质性响应机制。从驱动因素看，南部沿山戈壁荒漠生态区虽生态基础相对脆弱，但在生态修复工程持续推进与资源约束强化背景下，产业发展逐步向生态依托型路径转型，第三产业占比由0.30提升至0.50，植被覆盖度由0.45提高至0.57，其增幅显著高于其他区域，表明生态改善与产业升级之间形成了较强的协同效应；北部湿地与荒漠交错生态区依托湿地与绿洲复合生态本底，生态系统服务基础较好，但受

农业开发与城镇扩张影响,资源利用压力仍然存在,各类负向因素(如城市化率、农业开发强度)的抑制作用相对稳定;而中部绿洲灌溉农业生态区作为高强度人类活动集聚区,农业开发与城镇扩张叠加,对生态系统形成持续挤压,其负向影响程度在空间上更为集中,成为制约区域生态承载力提升的关键区域。

表 9　肃州区 2003—2023 年南部祁连山沿线与北部荒漠区 GTWR 模型因素影响

Table 9　Influencing factors of GTWR model along southern Qilian Mountains and in northern desert area of Suzhou District (2003—2023)

影响因素	区域类型	2003年回归系数	2013年回归系数	2023年回归系数
城市化率(X_1)	南部沿山戈壁荒漠生态区	−0.18	−0.20	−0.22
	北部湿地与荒漠交错生态区	−0.25	−0.30	−0.35
农业开发强度(X_2)	南部沿山戈壁荒漠生态区	−0.10	−0.11	−0.12
	北部湿地与荒漠交错生态区	−0.28	−0.31	−0.34
第三产业占比(X_3)	南部沿山戈壁荒漠生态区	0.30	0.40	0.50
	北部湿地与荒漠交错生态区	0.15	0.19	0.23
植被覆盖度(X_4)	南部沿山戈壁荒漠生态区	0.45	0.51	0.57
	北部湿地与荒漠交错生态区	0.20	0.22	0.24
城乡收入比(X_5)	南部沿山戈壁荒漠生态区	−0.12	−0.10	−0.08
	北部湿地与荒漠交错生态区	−0.20	−0.18	−0.16
水资源利用率(X_6)	南部沿山戈壁荒漠生态区	0.35	0.40	0.45
	北部湿地与荒漠交错生态区	0.25	0.28	0.31
单位GDP碳排放(X_7)	南部沿山戈壁荒漠生态区	−0.25	−0.20	−0.15
	北部湿地与荒漠交错生态区	−0.35	−0.30	−0.25
公路密度(X_8)	南部沿山戈壁荒漠生态区	−0.15	−0.13	−0.11
	北部湿地与荒漠交错生态区	−0.22	−0.20	−0.18

注:GTWR为时空地理加权回归模型。下同。

3　结 论

本研究基于2003—2023年数据,对肃州区生态系统服务(ES)、人类福祉(HW)及其耦合协调关系开展了系统分析,并从空间格局、动态演化与驱动因素3个维度揭示了典型干旱绿洲系统的运行逻辑。

(1)生态系统服务与人类福祉呈现非同步演进,形成“生态滞后,福祉超前”的阶段性特征。ES总量呈“先降后稳”态势,调节服务始终为核心功能;而HW水平稳步提升,发展功能改善最为显著。空间上,ES高值区集中于南部祁连山生态源地,而HW高值区则聚集于中部城区,反映出生态价值供给地与福祉受益地之间存在明显的空间错配。

(2)耦合协调度虽实现质的提升,但“生态滞后”成为系统升级的核心瓶颈。研究期内,耦合协调状态由“中度失调”迈入“磨合阶段”,但远未达到高水平协调。空间集聚特征呈现“中部相对低值,南北分化”的格局,北部湿地与荒漠交错生态区以“高-高”集聚为主,中部绿洲灌溉农业生态区以“低-低”集聚为主,南部沿山戈壁荒漠生态区多表现为低值或过渡型分布。

(3)生态承载力受多因素共同驱动,但其影响机制具有显著时空异质性。城市化率和农业开发强度是抑制生态承载力的主要因素;第三产业占比与植被覆盖度则发挥关键促进作用,显示产业结构优化与生态恢复工程对生态改善的显著贡献。城市化因素的抑制作用在中部城区最强,而植被恢复在南部沿山戈壁荒漠生态区边际效益最大,这一规律突破了单一治理模式的局限,为精准化、区域化调控提供了科学支撑。

4　讨 论

作为典型干旱区绿洲,肃州区生态系统服务与人类福祉耦合协调关系的实证研究,深刻揭示了内陆生态脆弱区在城镇化推进与绿色发展转型进程中面临的复杂挑战,为该区域探索可持续发展演进路径提供了关键实践参考。本文的实证结果表明,该地区“生态-福祉”关系呈现出时间滞后、空间分化与因素异质等系统性特征,这不仅反映了区域发展路径的结构性矛盾,也是干旱绿洲系统长期演化逻辑的具体表现。

(1)空间格局表明,生态服务—人类福祉的非均衡演进具有明显的“生态高地—经济洼地”结构特征。南部沿山戈壁荒漠生态区作为关键生态功能区,承担着水源涵养、气候调节等核心调节服务,符合已有研究关于山地-绿洲系统在干旱区承担生态支撑功能的论述。然而,由于主体功能定位的硬约束,祁连山区始终面临生态保护收益无法有效转化为经济增长动能的困境,而中部城区的福祉提升却在相当程度上依赖来自山区的跨区域生态输入,这一“生态供给—福祉获益”空间错配现象与李双成等[23]关于生态系统服务空间外部性的研究结论高度一致。由此可见,肃州区内部“生态贡献—经济回报”机制尚未形成闭环,生态保护主体与福祉获益主体之间的利益分配不对称,是导致区域发展空间失衡的重要制度性根源。

(2)耦合协调度虽呈现出稳步提升态势,但系统仍停留在“磨合”阶段,且ES滞后型单元占比上升。这说明,在资源禀赋高度刚性的干旱绿洲中,经济社会快速发展对生态承载力形成持续挤压,与Bryanetal[24]关于干旱区“生态滞后性”特征的论述一致。尽管研究期内生态修复与治理工程有所推进,但

尚未从根本上扭转ES下降的趋势，生态供给已成为制约区域协调发展的关键因素。这一情形表明，如果未来仍延续“福祉驱动—生态滞后”的发展模式，区域可能陷入低水平均衡状态[25]。因此，区域政策需要从传统的“末端治理”向“主动恢复”和“战略性生态投资”转型，进一步提升生态系统的供给能力与韧性[26]。

（3）驱动因素的时空异质性揭示了区域治理中“单一政策难以奏效”的制度现实。城市化率与农业开发强度作为主要抑制因素，分别对应建设扩张与农业生产对自然资本的结构性占用，这与Seto等[27]关于快速城镇化与生态压力之间的实证规律高度契合。相反，植被覆盖度的促进效应凸显了自然基础设施在提升生态承载力中的核心作用，也印证了“基于自然的解决方案”（NbS）在干旱区治理中的有效性[28]。这些差异性结果表明，以行政区划为单元的“一刀切”治理模式难以匹配干旱绿洲的空间复杂性，构建基于主体功能区、精细化与差异化的空间治理体系更为必要[29]。

（4）从系统性视角来看，肃州区生态福祉协调演进过程揭示出典型的干旱绿洲社会-生态系统调控逻辑，即生态承载力决定福祉上限，福祉提升反过来又通过资源消耗、土地利用变化与污染排放影响生态系统，二者之间的反馈关系最终体现在耦合协调度的阶段性变化中。这一机制与Liu Jianguo等[30]提出的“社会-生态系统耦合框架”高度一致，说明只有在制度层面形成生态保护激励、生态产品价值实现与跨区域生态补偿等制度安排，才能真正实现从“生态优势”向“发展优势”的转化，推动干旱绿洲走向高质量、可持续的发展轨道。

针对典型干旱绿洲生态承载力约束、人地关系紧张及空间功能错配等核心矛盾，基于研究结论，需从分区治理、生态供给提升与制度协同3方面构建系统性政策框架。在分区差异化管控上，南部沿山戈壁荒漠生态区作为关键生态源区，应优先生态保护，通过天然林保护、退牧还草及水源涵养工程巩固生态屏障；中部绿洲灌溉农业生态区及传统农业带需聚焦空间品质与资源效率提升，推进建成区生态化改造、产业低耗水转型并推广节水农业技术，实现人口与产业集聚和生态承载协调；北部湿地与荒漠交错生态区则可依托土地与风光资源优势，实施防风固沙工程，适度发展生态旅游与新能源产业。在生态供给能力提升方面，需以水资源调控为核心构建可持续生态供给机制，强化再生水利用、农业节水及地下水治理以提升水资源效能，并在绿洲边缘建设防风固沙林带，在城区推广立体绿化与生态设施，提高植被覆盖度与生态稳定性。在制度协同机制完善上，为破解激励不对称问题，应将生态系统服务价值纳入政府绩效考核以推动政绩评价向“生态＋高质量发展”转型，建立多层级生态补偿机制并重点强化祁连山功能区横向补偿以平衡保护成本与收益，构建政企社协同治理格局，提升生态治理效能。

参考文献（References）

[1] 刘宥延.草地生态资产与生态系统服务概念与特征[J].草业科学，2022，39(4)：795-805.
Liu Youyan. Differentiation and analyses of the concepts and characteristics of ecological assets and ecosystem services of grasslands [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 795-805.

[2] 余浩天，许茗雯，刘颖慧.青藏高原重点城镇化地区人类福祉的时空动态：以拉萨市为例[J].北京师范大学学报（自然科学版），2025，61(4)：530-538.
Yu Haotian, Xu Mingwen, Liu Yinghui. Spatiotemporal dynamics of human well-being in key urbanized areas of the Qinghai-Xizang Plateau: Case of Lhasa [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025, 61(4): 530-538.

[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] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services [J]. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.

[5] Daniel T C, Muhar A, Arnberger A, et al. Cultural ecosystem services: A review and prospects for future research [J]. Ecological Economics, 2012, 86: 254-266.

[6] López C, Hiernaux P, Sanou M, et al. Linking ecosystem services and human well-being in the Sahel: A case study of the Gourma region, Mali [J]. Ecosystem Services, 2017, 24: 155-166.

[7] Jalilov U, Watanabe O, Takeuchi K. Impact of environmental change on ecosystem services and human well-being in the Aral Sea basin [J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 227-236.

[8] 欧阳志云，王效科，苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报，1999，19(5)：607-613.
Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 607-613.

[9] 刘焱序，傅伯杰，王帅，等.空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展[J].地理学报，2020，75(5)：891-903.
Liu Yanxu, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Research progress of human-earth system dynamics based on spatial

resilience theory [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):891-903.

[10] 张迺婕.基于城乡差异视角的生态系统服务与人类福祉关系空间格局及影响因素分析[D].上海:上海师范大学,2025.
Zhang Naijie. Spatial pattern and influencing factors of the relationship between ecosystem services and human well-being based on the perspective of urban-rural differences [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2025.

[11] 庄宝怡,孙传谆,植接弟,等.基于居民生态福祉提升目标的区域生态网络构建:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2025,45(24):12453-12469.
Zhuang Baoyi, Sun Chuanzhun, Zhi Jiedi, et al. Regional ecological network construction for ecological well-being: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(24):12453-12469.

[12] 陈引妮,杨屹,闫嘉欢.黄河流域陕西段生态系统服务与人类福祉的耦合协调及驱动机制[J/OL].(2026-02-02).环境科学,1-18. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202510003.
Chen Yinni, Yang Yi, Yan Jiahuan. Coupling coordination between ecosystem services and human well-being in Shaanxi's Yellow River basin and its driving factors [J/OL]. (2026-02-02). Environmental Science, 1-18. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202510003.

[13] 张晓燕,马维艳,何伟军,等.长江三峡生态经济走廊生态系统服务的时空演化特征及影响因素研究[J].生态经济,2023,39(8):145-155.
Zhang Xiaoyan, Ma Weiyan, He Weijun, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and influencing factors of ecosystem services in the Three Gorges ecological economic corridor of the Yangtze River [J]. Ecological Economy, 2023,39(8):145-155.

[14] 陈万旭,赵雪莲,钟明星,等.长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J].生态学报,2022,42(1):138-149.
Chen Wanxu, Zhao Xuelian, Zhong Mingxing, et al. Spatiotemporal evolution patterns of ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River urban agglomerations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 138-149.

[15] 赵育恒,曾晨.武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J].生态学报,2019,39(4):1426-1440.
Zhao Yuheng, Zeng Chen. Analysis of spatial-temporal evolution and factors that influences ecological service values in Wuhan urban agglomeration, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(4):1426-1440.

[16] 李文青,赵雪雁,杜昱璇,等.秦巴山区生态系统服务与居民福祉耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(10):2522-2540.
Li Wenqing, Zhao Xueyan, Du Yuxuan, et al. Spatiotemporal changes of the coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being in Qinba Mountains area [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(10):2522-2540.

[17] 房方,王圣云,陈莹芬.鄱阳湖流域生态系统服务与居民福祉的时空耦合特征及其影响因素分析[J/OL].[2026-02-06].长江流域资源与环境,1-19. https://link.cnki.net/urlid/42.1320.x.20260206.1035.002.
Fang Fang, Wang Shenyun, Chen Yingfen. Spatiotemporal evolution and influencing factors of the coupling between ecosystem services and residents' well-being in Poyang Lake basin [J/OL]. [2026-02-06]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1-19. https://link.cnki.net/urlid/42.1320.x.20260206.1035.002.

[18] 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.

[19] 廖祥,杨鑫,焦孟杰,等.可持续发展视角下生态系统服务与人类福祉耦合协调研究:以成渝城市群为例[J].地域研究与开发,2025,44(3):125-134.
Liao Xiang, Yang Xin, Jiao Mengjie, et al. Study on coupling coordination of ecosystem services and human well-being under the perspective of sustainable development: A case of Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Areal Research and Development, 2025, 44(3):125-134.

[20] 邱坚坚,刘毅华,陈澄静,等.生态系统服务与人类福祉耦合的空间格局及其驱动方式:以广州市为例[J].自然资源学报,2023,38(3):760-778.
Qiu Jianjian, Liu Yihua, Chen Chengjing, et al. Spatial structure and driving pathways of the coupling between ecosystem services and human well-beings: A case study of Guangzhou [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(3):760-778.

[21] 李雪敏,李同宁,李道政,等.内蒙古县域生态系统服务与居民福祉耦合协调关系时空特征及影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):27-37.
Li Xuemin, Li Tongning, Li Daozheng, et al. Spatial-temporal characteristics of county-range coupling coordination relationship between ecosystem services and human's well-being in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7): 27-37.

(下转第 384 页)