

多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究

刘琨¹, 俞博云¹, 杨文府²

1. 太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024;

2. 山西省煤炭地质物探测院自然资源部矿业城市自然资源调查监测与保护重点实验室, 晋中 030600

摘要: 生态系统服务权衡协同关系是掌握区域生态演化机理的重要指标。大量研究以行政区作为整体, 对区域内的生态系统服务权衡协同关系进行描述, 但是有关区域内生态系统服务空间异质性及多种生态系统服务间影响差异性的研究尚缺乏。本文以汾河流域作为研究区, 基于1986年、1995年、2005年、2015年4期影像解译得到的土地利用分类结果, 以及统计和生态数据, 利用多尺度地理加权回归模型(MGWR)对生态系统服务权衡协同关系进行分析, 并通过与土地利用数据相结合, 定量分析土地转移对生态系统服务权衡协同关系的影响, 探究生态系统服务的演化机理。研究表明: 多尺度地理加权回归模型能解决生态系统服务权衡协同关系存在的空间异质性, 从而准确揭示多种生态系统服务之间的内在关系; 利用多尺度地理加权回归模型获得最佳生态系统服务组合的方式能有效降低数据冗余, 提高工作效率; 土地利用类型的变化是生态系统服务权衡协同关系演化的主要驱动因素; 流域内植被退化会使粮食生产和产水量之间的权衡关系下降, 使生物多样性和产水量等其他生态服务之间的协同关系下降; 1986年—2015年间流域内单项生态系统服务间以协同关系为主导, 且水源涵养与产水量间的协同关系最显著, 平均协同率为75.6%。研究结果可为汾河流域土地利用优化和生态系统服务改善提供参考。

关键词: 遥感, 生态系统服务, 权衡和协同关系, 多尺度地理加权回归, 土地利用, 汾河流域

中图分类号: P2

引用格式: 刘琨, 俞博云, 杨文府. 2023. 多尺度地理加权回归模型支持下的汾河流域生态系统服务关系演化机理研究. 遥感学报, 27(7): 1667-1679

Liu J, Yu B Y and Yang W F. 2023. Evolution mechanism of ecosystem service relationship in the Fenhe River Basin based on multiscale geographically weighted regression. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1667-1679 [DOI: 10.11834/jrs.20221816]

1 引言

生态系统服务是生态过程、生态功能等为人类提供生存和发展的环境条件(欧阳志云等, 1999)。生态服务主要包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务(谢高地等, 2015), 这些服务类型多样, 空间异质性强, 各服务之间存在互相作用、相互制约的复杂关系(戴尔阜等, 2015)。生态系统服务的权衡协同关系是指一种生态系统服务的增加会抑制或促进另一种或多种生态系统服务(于德永和郝蕊芳, 2020), 因此研究生态系统服务之间的权衡协同关系能有效把握区

域的生态演化过程, 对制定区域可持续发展的生态决策具有参考价值。谢高地等(2015)结合Costanza的生态价值评估方法, 制定了适合中国的生态系统服务价值当量因子表, 初步评估了中国生态系统服务的时空变化特征。杨强强等(2021)利用修订后的中国陆地生态系统服务价值当量因子表对青弋江流域生态系统服务价值的变化以及生态系统服务间的权衡协同关系进行研究, 发现基于修订当量因子表的分析方法能更准确地估算流域生态系统服务价值。Dobbs等(2014)基于Landsat影像的分类结果, 采用主成分分析和贝叶斯回归相结合的方法, 对不同规模城市中社会和

收稿日期: 2022-01-04; 预印本: 2022-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号:U1810203); 山西省应用基础研究计划项目(编号:201901D111466, 202203021221043)

第一作者简介: 刘琨, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: 8886355@163.com

生态因子间的权衡协同关系分析,发现生态系统服务在不同地区和社会环境下存在显著差异。高江波和王欢(2019)利用地理加权回归模型在分析生态系统服务间权衡协同关系的同时考虑了区域内部的空间异质性,发现各生态系统服务间的权衡协同关系存在显著的空间异质性,而利用地理加权回归模型 MGWR (Multiscale Geographically Weighted Regression) 可以有效探测生态系统内部的异质性。但是目前生态系统服务研究多以行政区为研究尺度,对区域间的权衡协同关系差异进行分析,缺少对区域生态系统内部空间异质性的探究(李冬花等, 2021; 杨洁等, 2021)。此外,许多研究仅考虑了生态系统服务间的两两关系,没有考虑多种生态系统服务间的互相影响和制约关系,研究结果不能很好体现多种生态系统服务之间的作用关系(孙艺杰等, 2017; Yang等, 2016)。

本文以汾河流域为研究区,基于1986年、1995年、2005年和2015年4期Landsat遥感影像数据,得到历年土地利用分类数据,同时构建生态系统服务模型;然后利用多尺度地理加权回归模型(MGWR)对生态服务进行多元回归分析,获得最佳生态系统服务组合,并分析其权衡协同关系;最后,结合土地利用分类结果定量分析了土地利用转移对生态系统服务权衡协同关系的影响,并且揭示了汾河流域生态系统服务随土地利用变化的演化机理,为改善汾河流域生态系统服务,保障区域可持续发展提供参考。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

汾河流域($39^{\circ}08'N-35^{\circ}16'N$, $110^{\circ}13'E-113^{\circ}51'E$)包括汾河从发源到汇入黄河所流经的整个区域,汾河全长716 km,流域面积约39721 km²,占山西省总面积的25%。汾河流域是山西省的工农业发达区,也是生态环境受影响较大的区域(图1)。流域属大陆性半干旱气候,年平均气温在 $6^{\circ}-13^{\circ}$ 之间,主要植被类型以落叶阔叶林和针叶林为主。汾河流域从宁武县发源地至太原市兰村为上游,兰村至灵霍山峡入口为中游,以下为下游,流经包括太原市、吕梁市、临汾市等在内的6个地市。

2.2 数据与预处理

2.2.1 研究数据

研究数据包括遥感影像数据、DEM数据、生态数据、统计数据等多源数据集。其中Landsat TM/ETM的遥感影像获取自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/> [2021-06-26]),数据获取时相为每年的6—9月,所有影像均成像良好,空间分辨率为30 m。DEM数据来自NASA的EARTHDATA网站(<https://search.asf.alaska.edu/#/> [2021-09-15])的ALOS PALSAR数据,空间分辨率为12.5 m。生态数据包括来自全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/Default.aspx> [2021-09-16])的北纬 18° 以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力1 km栅格数据集(1985年—2015年);来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/> [2021-09-18])的中国陆地实际蒸散发数据集(1982年—2017年);来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/> [2021-09-20])的中国5 km逐月NDVI数据集(1982年—2020年);来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx> [2021-09-20])的中国1980年以来逐年降水量空间插值数据集。研究采用的统计数据来自《山西统计年鉴》和《中国农业环境发展报告》。

2.2.2 数据预处理

对获取的Landsat数据进行辐射定标,大气校正,裁剪等预处理,得到内的多光谱研究区遥感影像。对获取的NPP、降水、蒸发散等生态数据进行月最大值合成,得到年值数据,空间分辨率为1 km;对NDVI影像进行加法运算和重采样操作,得到空间分辨率为1 km多年累计NDVI数据集。为了土地利用分类数据保持一致,将获取的DEM数据重采样为30 m。

3 研究方法

3.1 研究技术路线

采用最大似然法得到研究区土地利用分类结果,在对结果验证的基础上,分析了1986年—2015年汾河流域的土地利用演化过程;基于生态数据构建了生态系统服务模型,通过MGWR模型

进行多元回归分析，获取了最佳生态系统服务组合，在此基础上，利用MGWR模型进行一元回归分析，获得了生态服务之间的权衡和协同关系。

在此基础上，研究了汾河流域生态系统服务权衡和协同关系的演化机理。

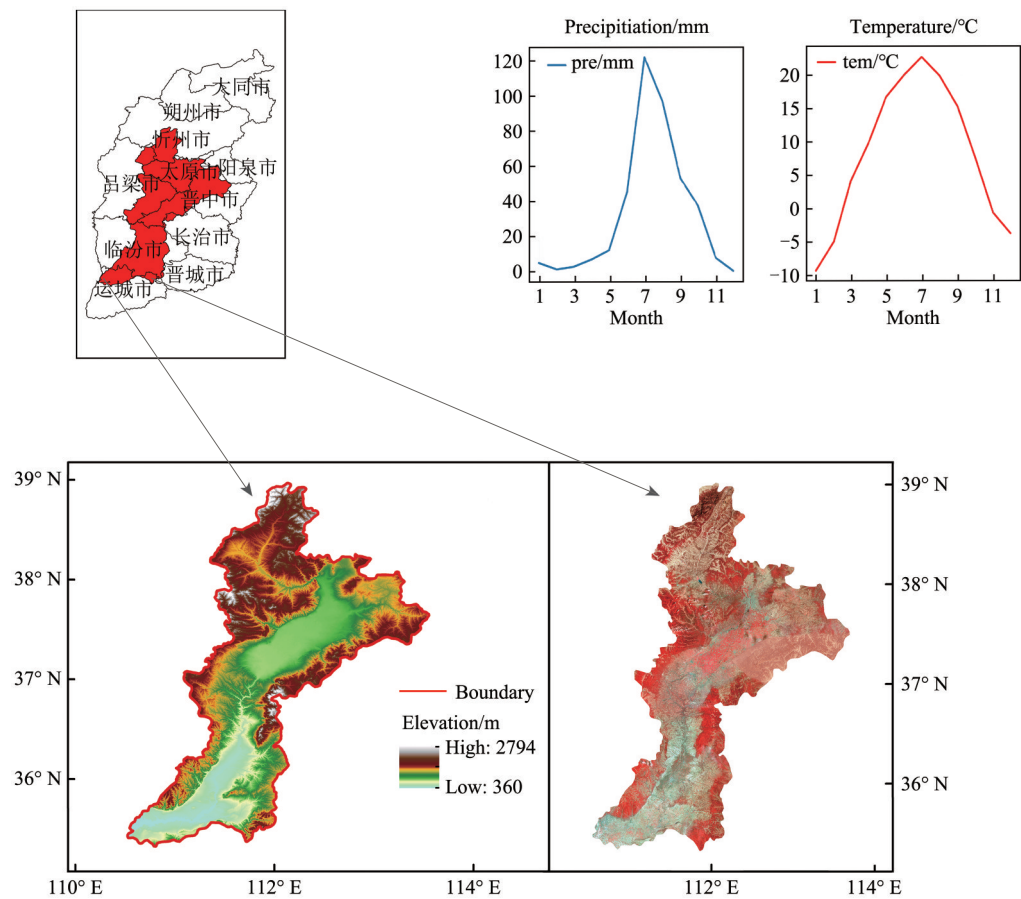


图1 汾河流域地理位置及行政区划图

Fig. 1 The location and zoning map of Fenhe river basin

3.2 土地利用分类

研究基于汾河流域的土地利用情况，结合《土地利用现状分类 GB/T 21010—2017》，将汾河流域的土地利用类型分成水体、草地、耕地、建筑用地、林地、未利用地6类。为减少分类结果中草地和林地，林地与水体，耕地与未利用地，高反射建筑用地和未利用地的误分现象，将DEM数据、NDVI、缨帽变换的湿度波段与原始影像波段合成的数据作为分类图像。对分类结果中小面积的独立图斑进行分类后处理和人工改正，分类结果如图2。4期分类结果混淆矩阵检验的总体精度分别为82%，87%，85%，94%，Kappa系数为0.77，0.84，0.82，0.92，分类精度满足后续研究。

3.3 生态系统服务模型构建

参考Costanza等（1997）对生态服务类型的划分，结合汾河流域研究区的自然地理情况，选择构建水源涵养，土壤保持，生物多样性和碳固定4个调节服务，产水量和粮食生产两个供给服务研究汾河流域生态系统服务权衡协同关系的演化机理。

3.3.1 水源涵养服务 WC(Water Conservation)

基于年降水量、年蒸散量数据，采用水量平衡法（沈钰仟 等，2020）构建水源涵养服务，见图3。水源涵养服务的计算公式为

$$WC = P_i - ET_i - P_i \times \alpha$$

(1)

式中， ET_i 为年蒸发散量（单位：mm）， P_i 为年降

水量 (单位: mm), $P_i \times \alpha$ 为地表径流量, α 是平均地表径流系数, 采用各类型生态系统地表径流

系数的均值 (龚诗涵 等, 2017)。

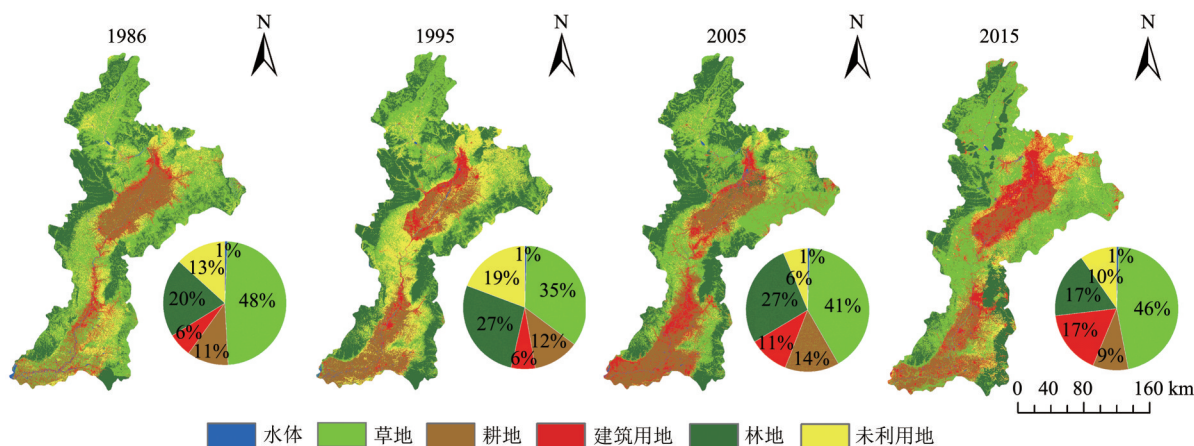


图2 1986年—2015年土地利用分类结果图

Fig. 2 The result of land use classification from 1986 to 2015

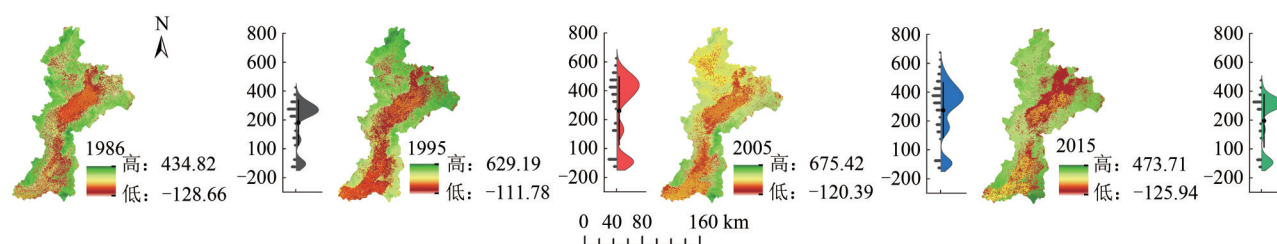


图3 1986年—2015年水源涵养服务

Fig. 3 Water conservation service from 1986 to 2015

3.3.2 土壤保持服务 SC (Soil Conservation)

土壤保持能力采用土壤侵蚀度来表征。土壤侵蚀度由坡度、植被覆盖度和土地利用类型数据计算得到, 其中坡度数据利用流域的DEM数据计算得到, 植被覆盖度利用线性混合像元分解模型计算得到, 土地利用类型获取自土地利用分类结

果。同时参考《土壤侵蚀分类分级标准》(中华人民共和国水利部, 2008) 对土壤侵蚀程度进行分级, 得到土壤侵蚀度结果 (图4)。并将土壤侵蚀度按剧烈、极强度、强度、中度、轻度和微度侵蚀分别赋值6、5、4、3、2、1。

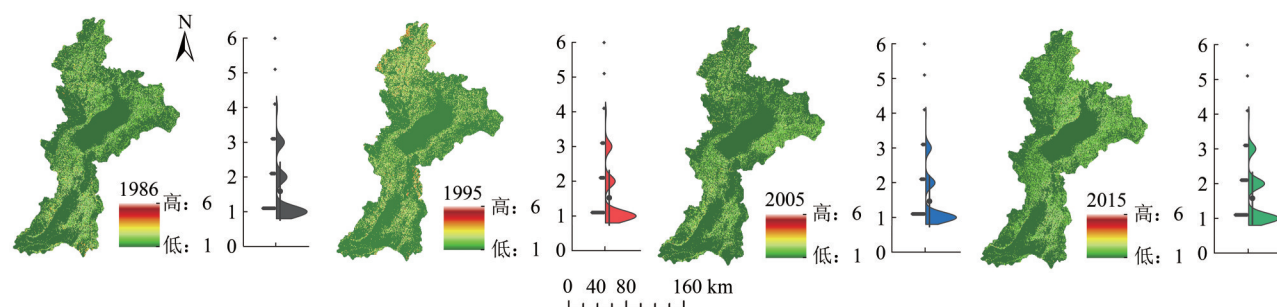


图4 1986年—2015年土壤保持服务

Fig. 4 Soil conservation service from 1986 to 2015

3.3.3 生物多样性服务 BD (Biological Diversity)

归一化植被指数 NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) 对监测生物多样性和开展生物保

护具有可靠的应用潜力 (Radeloff 等, 2019), 本研究采用年 NDVI 累计值衡量研究区的生物多样性服务功能, 如图5。

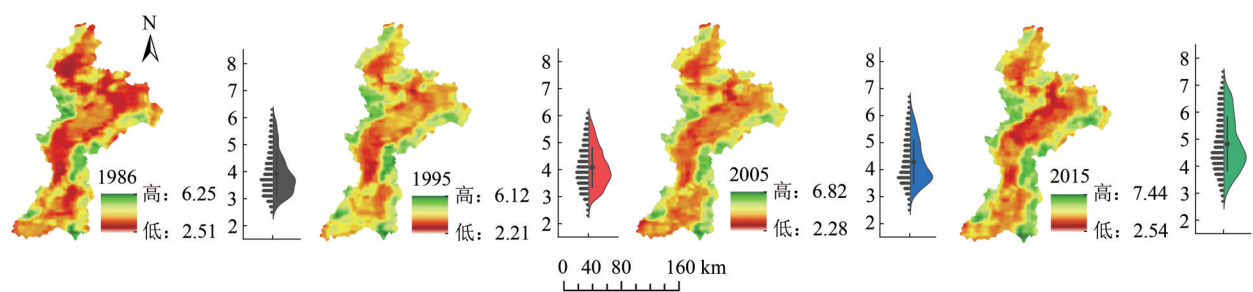


图5 1986年—2015年生物多样性服务

Fig. 5 Biological diversity service from 1986 to 2015

3.3.4 碳固定服务CS(Carbon Sequestration)

采用净初级生产力NPP衡量碳固定服务（付梦

娣等，2021；王国斌，2020）。计算得到1986年—2015年4期的碳固定服务结果，见图6。

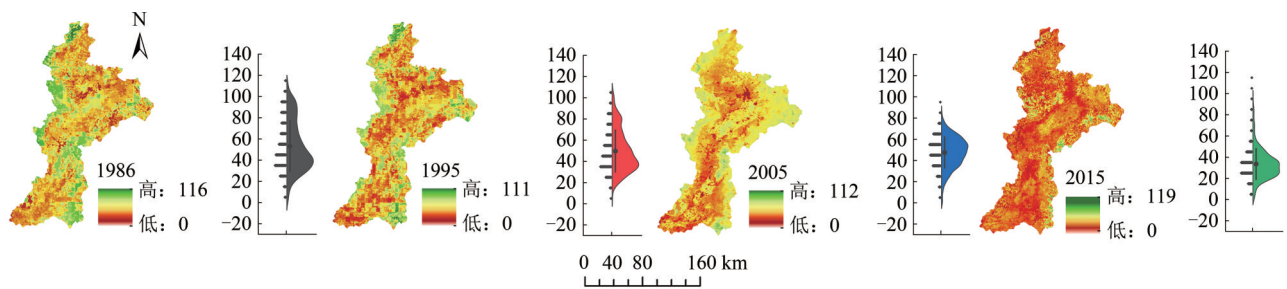


图6 1986年—2015年碳固定服务

Fig. 6 Carbon sequestration service from 1986 to 2015

3.3.5 产水量服务WY(Water Yield)

采用基于水量平衡的方法计算产水量，认为各像元的产水量为该像元降水量与实际蒸散发后的水量之差（潘韬等，2013）。其计算公式为

$$WY = (1 - \frac{ET_i}{P_i}) \times P_i \tag{2}$$

式中， ET_i 为年蒸发散量， P_i 为年降水量，单位均为mm。产水量服务，见图7。

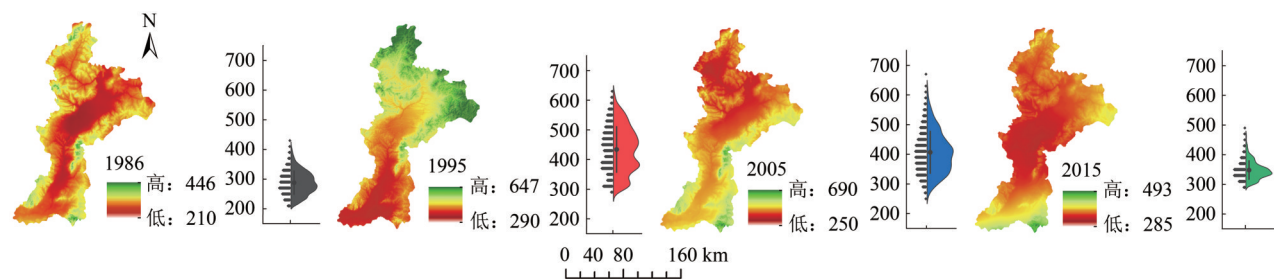


图7 1986年—2015年产水量服务

Fig. 7 Water yield service from 1986 to 2015

3.3.6 粮食生产服务GP(Grain Production)

基于汾河流域的实际情况，结合统计数据，得到汾河流域的主要粮食产量和对应单价，并以谢高地等制定的生态系统服务价值当量表（谢高地等，2008）为计算基础，结合土地利用分类得到的农田面积，得出单位面积农田生态系统服务

价值。考虑到在没有人力投入的情况下，自然生态系统提供的经济价值是现有农田单位面积提供食物生产服务经济价值的七分之一，由此可得出流域内1个当量因子的经济价值量（Zhang等，2020）。从而得到每一种土地利用类型的粮食生产价值，进而获得汾河流域粮食生产服务计算结果，见图8。粮食生产服务计算公式为

$$GP = \frac{C_i \times Q_i \times S_{ij}}{7 \times A} \quad (3)$$

式中, c_i 为单价 (单位: 元), Q_i 为年产量 (单位:

t), S_{ij} 为研究区第 i 种土地利用类型的第 j 项生态系统服务价值系数, A 为研究区农田的面积 (单位: ha)。

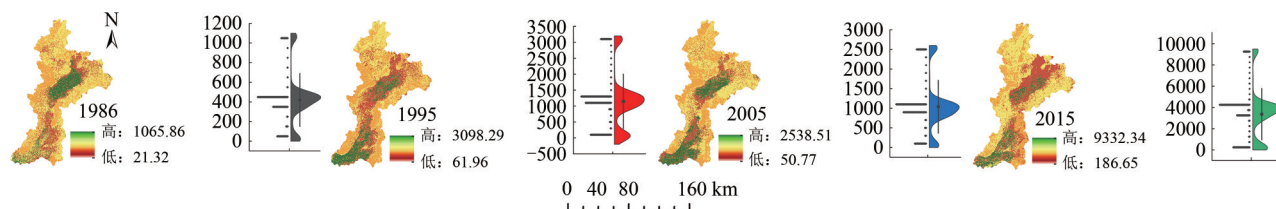


图8 1986年—2015年粮食生产服务

Fig. 8 Grain production service from 1986 to 2015

3.4 多尺度地理加权回归(MGWR)

与地理加权回归模型 GWR (Geographical Weighted Regression) 相比, 多尺度地理加权回归模型 (MGWR) 考虑了不同协变量在空间尺度上的变化差异, 允许不同协变量具有不同的带宽, 对于地理现象空间异质性更为敏感 (Fotheringham 等, 2017)。研究采用 MGWR 获取最佳生态系统服务组合模式, 并进行回归分析。MGWR 模型的公式为

$$y = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{i=1}^n \beta_{b_{ij}}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为回归方程的截距常量, n 为观测

量总数, $\beta_0(u_i, v_i)$ 第 i 个观测量的空间位置, $\beta_{b_{ij}}$ 为第 j 个协变量的回归系数, x_{ij} 为协变量, ε_i 为误差项。

4 结果及分析

4.1 土地利用及其变化分析

为了探究各时期汾河流域土地利用的详细信息, 研究基于土地利用分类结果获取了1986年—2015年汾河流域各地类面积, 并用桑基图表达了各地类变化转移信息 (图9), 同时计算了土地利用动态度。

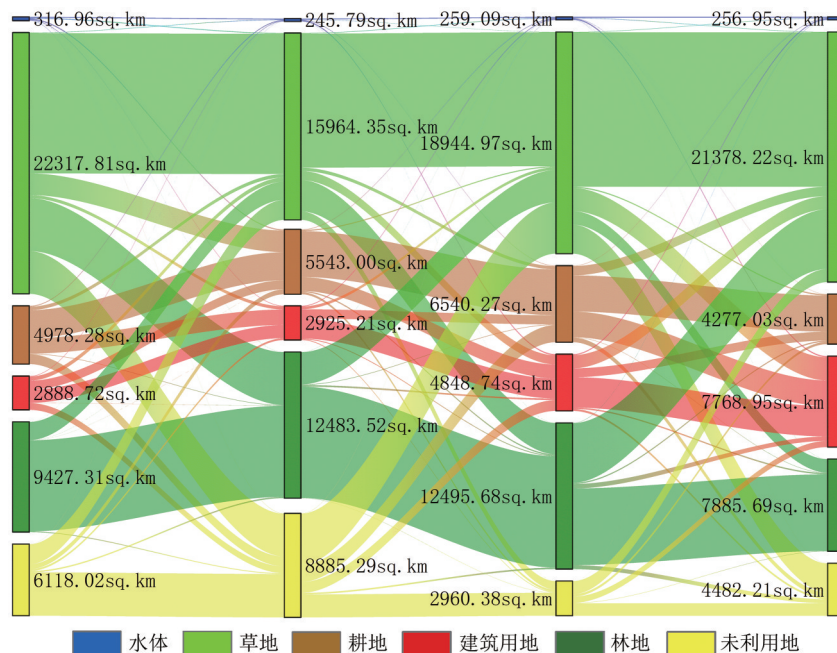


图9 1986年—2015年汾河流域各地类用地面积转移

Fig. 9 The land use area transfer in the Fenhe River basin from 1986 to 2015

从图9可以看出, 1986年—2015年间汾河流域的土地利用经历了较为复杂的变化过程。总体

来看, 建筑用地面积呈现上升趋势, 在2005年—2015年间增长幅度尤为显著达到2920.21 km²; 草

地呈现先减少后增加的趋势，在1986年—1995年间草地面积显著减少28.5%后，于1995年—2015年间草地面积逐渐开始回升，并且草地一直处于汾河流域土地景观的主导地位；耕地和林地呈现先增加后减少的态势，在1986年—2005年间面积分别上升31.4%和32.5%后，于2005年后开始出现减少的态势，分别减少34.6%和36.9%。水体在1986年—1995年间大幅减少22.4%后变化幅度较小，在1995年—2015年间水体面积没有发生太大变化；未利用地在30年间总体呈现减少趋势，于2015年减少至1986年未利用地面积的26.7%。从图10的综合土地利用动态看，1986年—1995年间土地利用变化程度最大为3.9%，1995年—2005年间土地利用变化程度最小仅有3.04%。从图11的单一土地利用动态看，未利用地面积变化十分剧烈，在1995年—2005年间随着城市规模快速扩张其减少度超过了20%；建筑用地的面积增长在1995年—2015年的城市扩张阶段十分明显，增长度接近4%；耕地在1986年—2005年间变化程度较小，而在2005年—2015期间减少度超过5%，且大部分都转移为城市用地；草地在1986年—1995年间减少程度达到4.4%且大多转移为林地，流域环境有所改善；林地在2005年—2015年间减少程度达到5.8%，多数区域退化成草地；各阶段水体的变化均不显著。

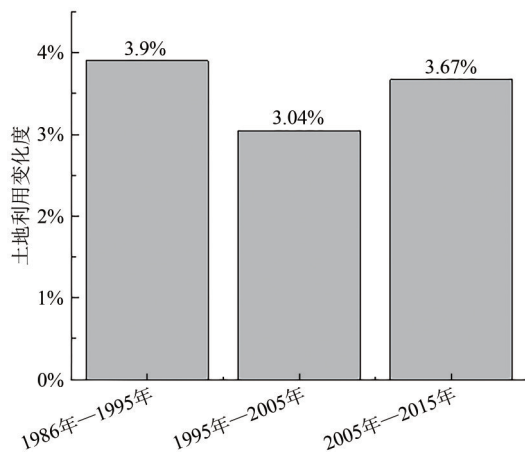


图10 1986年—2015年综合土地利用变化度

Fig. 10 The comprehensive land use change degree in the Fenhe River basin from 1986 to 2015

综上，1986年—2015年间汾河流域土地利用动态变化程度呈现先下降后上升的态势。受到城市化进程的影响，30年间建筑用地面积呈现增长态势，未利用地面积呈现减少态势，两者的动态

变化程度均在1995年—2015年间达到最值。草地始终为汾河流域的主导地类，面积呈现先减少后增加态势，耕地和林地面积呈现先增加后减少态势，水体面积变化趋于稳定。

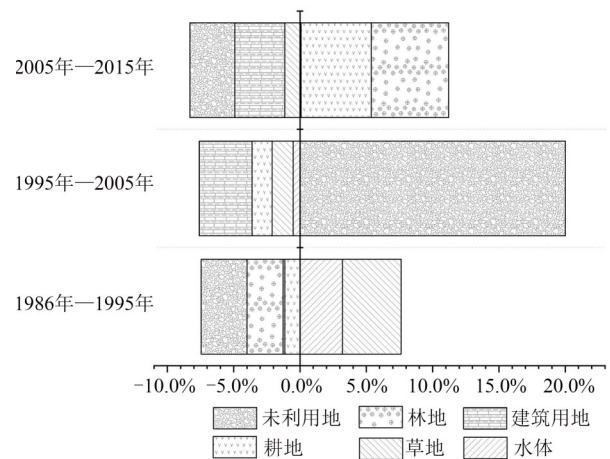


图11 1986年—2015年各地类单一土地利用变化度

Fig. 11 The single land use change degree of different land cover in the Fenhe River basin from 1986 to 2015

4.2 生态系统服务功能及其演变分析

结合表1的统计结果，从图3中可以看出，1986年—2015年间汾河流域的水源涵养服务呈现先上升后下降的态势，并于2005年达到最大的273.78 mm。空间上，流域中部的盆地地区多以建筑用地、耕地为主，水源涵养服务呈现低值。流域两侧的山地区域多以林地、草地为主，水源涵养服务呈现高值。从图4中可以看出1986年—2015年间汾河流域水土保持服务呈现先下降后上升的态势，1986年—2005年均值由1.58降至1.46表明流域的土壤保持能力有所加强。2005年—2015年均值由1.46快速增加至1.58可见城市快速扩张加剧了汾河流域的土壤侵蚀程度。空间上，流域中部的地势平坦盆地地区以及流域两侧的植被覆盖度高的山地区域，水土保持服务呈现低值，土壤侵蚀轻微。植被覆盖度低的山区多以草地和未利用地为主，水土保持服务呈现高值，土壤侵蚀较为严重。从图5中可以看出1986年—2015年间汾河流域生物多样性服务呈现上升态势，于2015年达到最高值4.82。空间上，流域中部的多以建筑用地、耕地为主，生物多样性服务呈现低值。流域两侧的山地区域生物多样性服务呈现高值，且林地的生物多样性服务最高。从图6中可以看出1986年—2015年间汾河流域碳固定服务呈现下降态势，且

2005年—2015年期间呈现显著下降，并于2015年达到最低值33.6。空间上，与生物多样性服务具有相似的空间分布。从图7中可以看出1986年—2015年间汾河流域产水量服务，呈现先上升后下降的态势，并于1995年达到最大值433.42 mm。空间上，流域下游和植被覆盖度较高的地区产水量服务较高，流域中游建筑用地较多的区域产水量服务较低。从图8中可以看出，1986年—2015年

间汾河流域粮食生产服务，呈现上升的态势且2005年—2015年期间呈现显著增加，并于2015年达到最高值3323.78元，现象表明粮食生产服务始终在不断升高。空间上，流域中游和下游的耕地密集区域粮食生产服务呈现高值，而广泛分布于流域两侧的林地和流域中部的建筑用地，其粮食生产服务则呈现低值。

表1 1986年—2015年汾河流域生态系统服务平均值
Table 1 The average value of ecosystem services in the Fenhe River basin from 1986 to 2015

年份	生态系统服务					
	水源涵养(WC)/mm	土壤保持(SC)	碳固定(CS)	生物多样性(BD)	产水量(WY)/mm	粮食生产(GP)/元
1986	180.46	1.58	53.00	3.91	287.96	417.16
1995	262.83	1.51	49.50	4.08	433.42	1139.52
2005	273.78	1.46	47.39	4.28	406.89	1053.70
2015	194.63	1.56	33.59	4.82	348.12	3323.78

4.3 生态系统服务权衡和协同关系分析

受MGWR软件(Oshan等, 2019)运算量的限制，在使用MGWR模型之前首先对图像进行规则格网采样处理，以每5 km的间隔提取了影像中1800多个点带入模型运算。接着，对各生态系统服务进行显著共线性检验，以排除多元回归模型中具有相关性的自变量。显著共线性检验结果表明，各服务的方差膨胀因子值均小于7.5，可见各生态系统服务之间不存在共线性关系。其次，因变量的空间自相关性是MGWR模型计算的重要前提，通过全局莫兰指数对生态系统服务进行空间自相关分析，证明各个生态系统服务存在空间自相关关系(陈彦光, 2009)，因此可以使用MGWR模型对生态服务进行回归分析。最后，研究利用MGWR模型进行多元回归分析计算得到单一生态系统服务与其他生态服务间的回归系数(图12)，并将结果的全局 R^2 与普通最小二乘法计算得到的全局 R^2 进行比较，发现MGWR模型的全局 R^2 大于普通最小二乘法的全局 R^2 ，可见MGWR模型的回归效果优于普通最小二乘法。因此，MGWR模型能更好地反映生态系统服务之间的权衡协同关系。

由于一种生态服务受到多种生态系统服务的影响，且不同生态系统服务对一种生态系统服务的影响不同(于德永和郝蕊芳, 2020)。为了更精确、快速地确定各生态系统服务之间的影响程度，在解决空间异质性问题的基础上，研究基于图12的计算结果，选择了拥有最大回归系数绝对值的生态系统服务作为最佳服务组合，用于后续的权衡

协同关系分析。最终选取的结果为水源涵养(WC)与产水量(WY)；土壤保持(SC)与生物多样性(BD)；碳固定(CS)与生物多样性(BD)；生物多样性(BD)与产水量(WY)；粮食生产(GP)与产水量(WY)，其中WC与WY、CS与BD、BD与WY之间的协同关系显著分别为0.76、0.20和0.90，GP与WY、SC与BD的权衡关系显著为0.35、0.18。

相关系数能够反映生态系统服务间的权衡和协同关系。正值表示两种生态系统服务之间存在协同关系，负值为权衡关系(李冬花等, 2021)。研究利用MGWR模型对选出的生态服务组合进行一元回归分析，并基于回归结果的相关系数分析生态服务间的权衡协同关系。在相关系数的计算中，采用拟合伏度的开方作为其值，符号与对应的相关系数一致。土壤保持服务在计算中采用土壤侵蚀度衡量，研究将该服务的相关系数取相反数，以便在后续分析时能直观地表达土壤保持与其他服务间的权衡协同关系。

图13所统计的生态服务各年均相关系数表明，1986年—2015年间汾河流域的生物多样性和产水量之间呈现协同关系，其中林地的协同关系最明显为0.85，耕地最弱0.62，30年间两服务之间的协同关系不断变强。1986年—2015年间汾河流域的碳固定和生物多样性之间呈现协同关系，其中林地的协同关系最明显为0.40，水体最弱为0.26，两服务之间的协同关系在1995年和2015年出现两次下降，2005年出现显著抬升。1986年—2015年

汾河流域的粮食生产和产水量之间呈现权衡关系，其中耕地的权衡关系最明显为-0.31，未利用地最弱接近于0，1986年—2005年间两服务之间的权衡关系不断变强，2005年—2015年两者的权衡关系有所减弱。1986年—2015年间汾河流域的土壤保持和生物多样性之间呈现协同关系，其中林地的协同关系最显著为0.32，建设用地最弱为0.20，两服务之间的协同关系在1995年和2015年出现两次下降，2005年出现显著抬升。1986年—2015年间

汾河流域的水源涵养和产水量之间呈现协同关系，其中林地的协同关系最显著为0.53，耕地最弱为0.39，1986年—2005年间两服务之间的协同关系不断变强，2005年—2015年两者的协同关系有所减弱。总体上，1986年—2015年间汾河流域内单项生态系统服务之间以协同关系为主导，仅粮食生产GP和产水量WY之间呈现显著的权衡关系，协同关系中水源涵养WC与产水量WY之间的协同关系最显著，平均协同率为75.6%。

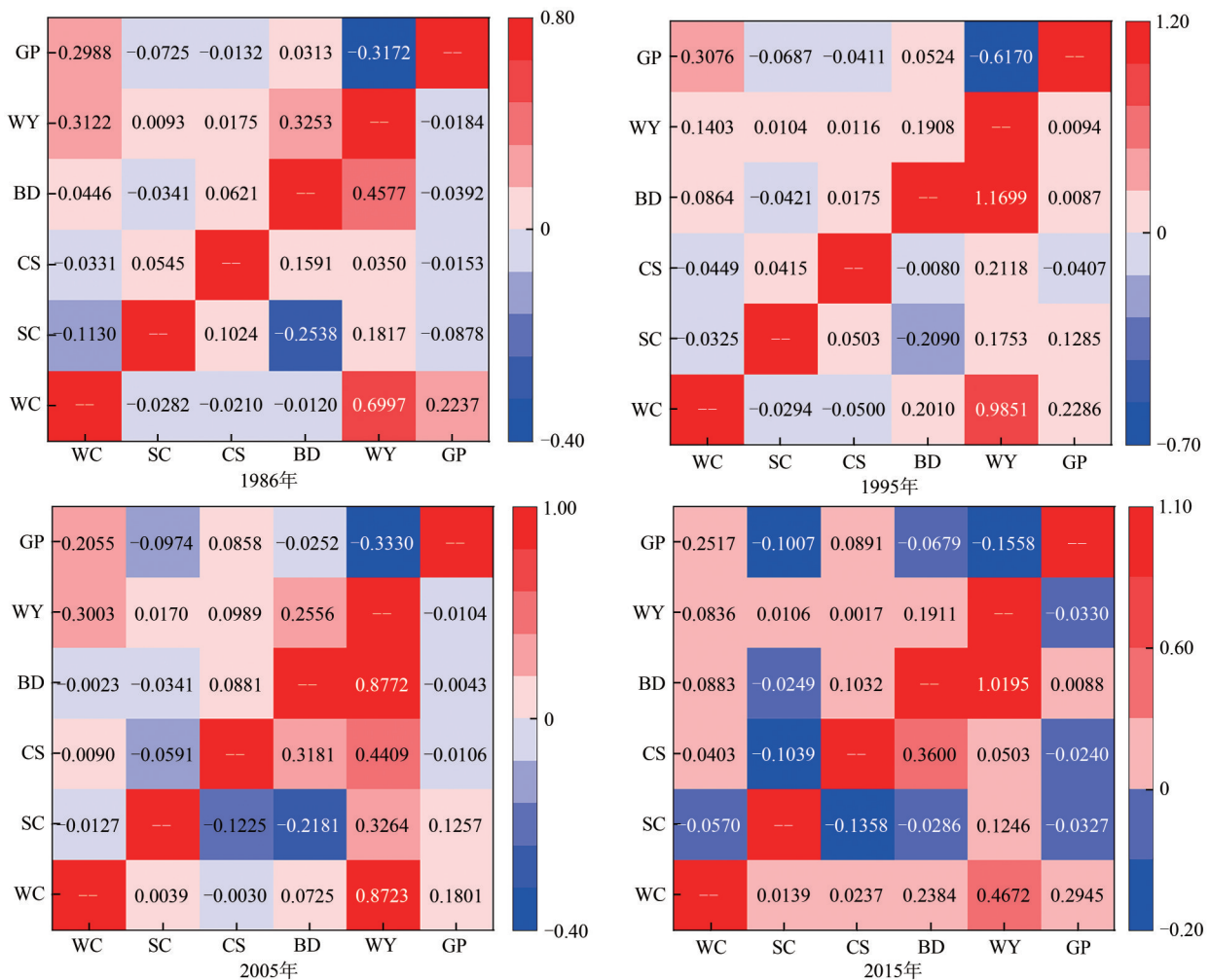


图12 基于MGWR模型多元回归的回归系数

Fig. 12 The regression coefficients of multiple regression results of MGWR

4.4 土地利用变化与生态系统服务权衡和协同演变响应分析

土地利用变化和转移会影响生态系统服务的权衡协同关系。研究基于各时期土地利用分类结果以及生态系统服务权衡协同关系内插结果图，分析了30年间土地类型转移与生态系统服务权衡和协同关系变化之间的关系。通过表2可见，在CS和BD之间的权衡协同关系上，水体转移至耕地

或林地后、草地转移至耕地后两者的协同关系大幅增加，增幅约为40%—60%，同时林地退化后两者之间的协同关系会有所减弱。在SC和BD之间的权衡协同关系上，耕地转移成建筑用地和未利用地后、林地退化成草地后两者之间的协同关系会出现大幅下降，最大减幅约为75%。在BD和WY之间的权衡协同关系上，水体和建筑用地转移成耕地，耕地和建筑用地转移为草地后两者的协

同关系会显著增加，增幅约为30%—60%，然而，当林地退化为未利用地后，两者之间的协同关系会下降。在WC和WY之间的权衡协同关系上，耕地和建设用地转移为草地后两者的协同关系呈现上升态势，林地退化成草地或未利用地后两者的协同关系出现大幅下降，其中林地退化至未利用地后下降幅度最大约为40%。在GP和WY之间的

权衡协同关系上，耕地和未利用地转移为林地后两者的权衡关系呈现大幅上升态势，增幅约为40%，耕地转移为水体或未利用地时两者的权衡关系呈现大幅下降态势，降幅约为30%—40%。综上所述，土地利用转移会显著影响生态服务权衡协同关系，从而改变区域的生态环境。

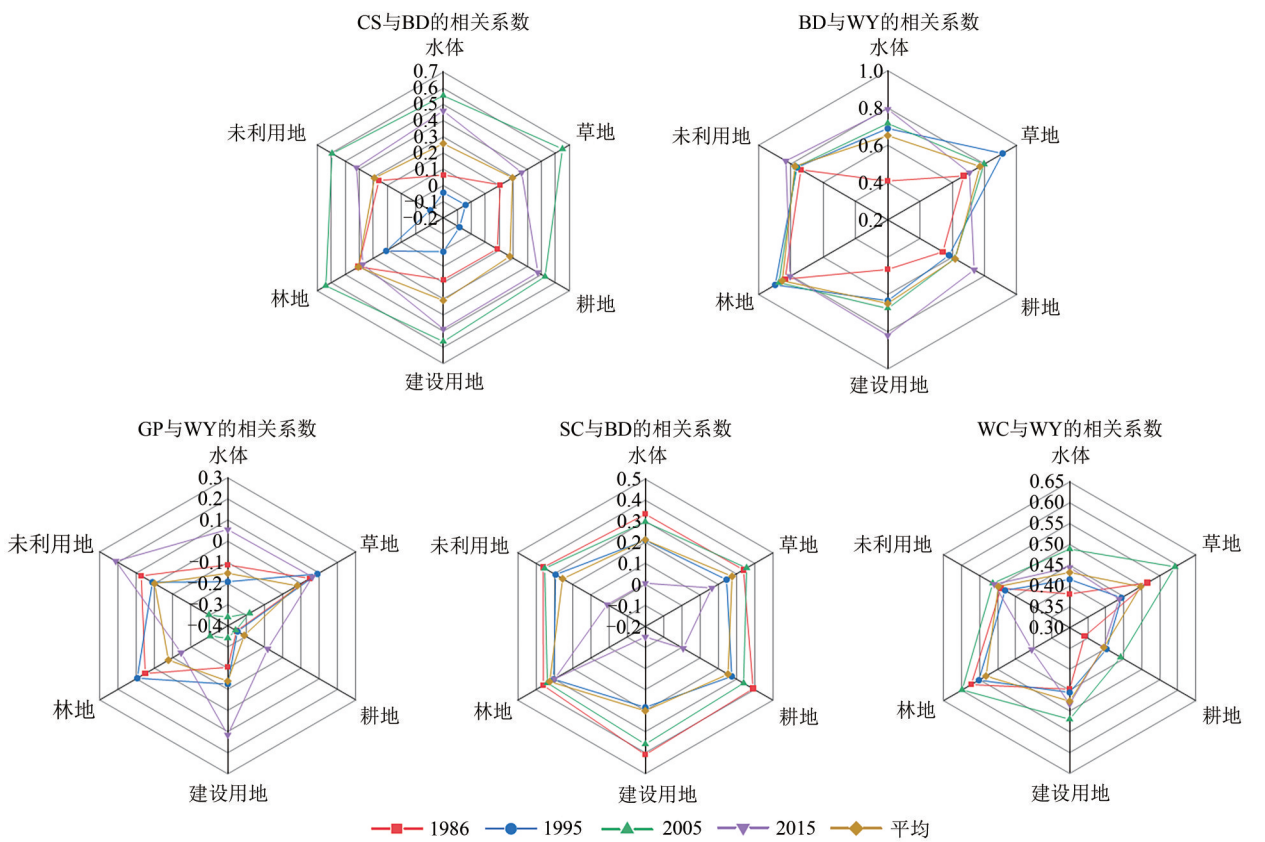


图 13 1986 年—2015 年汾河流域不同土地利用类型生态系统服务权衡协同关系
Fig. 13 The ecosystem services' trade-offs synergies of the different land use in the Fenhe River basin from 1986 to 2015

表 2 1986 年—2015 年汾河流域土地利用变化与生态系统服务权衡协同变化的关系
Table 2 The relationship between the land use change and the trade-offs change among ecosystem services in the Fenhe river basin from 1986 to 2015

权衡协同 关系变化	碳固定(CS)— 生物多样性(BD)		土壤保持(SC)— 生物多样性(BD)		生物多样性(BD)— 产水量(WY)		水源涵养(WC)— 产水量(WY)		粮食生产(GP)— 产水量(WY)	
	转变类型	变化度	转变类型	变化度	转变类型	变化度	转变类型	变化度	转变类型	变化度
协同—协同	2—3	0.38	3—6	−0.75	1—3	0.68	6—3	0.09		
	5—1	−0.07	3—4	−0.71	3—2	0.42	4—2	0.07		
	5—2	−0.02	2—6	−0.34	4—2	0.32	3—2	0.05		
			5—6	−0.25	4—3	0.57	5—6	−0.40		
			5—2	−0.19	5—6	−0.05	5—2	−0.14		
协同—权衡			2—4	−0.37					3—5	−0.31
									6—5	−0.40
权衡—协同	1—3	0.62							3—1	0.46
	1—5	0.41							3—6	0.41
									1—5	−0.30
权衡—权衡									3—4	0.41

注：1—6 分别代表水体、草地、耕地、建设用地、林地、未利用地。

5 讨论

生态系统服务关系受两种机制影响：生态系统服务共同的驱动机制以及生态系统服务之间的相互作用。其中，土地利用条件是主要的驱动因素之一，土地利用冲突和一致性对生态系统服务权衡协同关系具有显著的影响（Bennett等，2009；Xu等，2017）。其中土地利用冲突是指一种土地利用类型在用于一种生态系统服务时便不能再用于另一种生态系统服务，导致两种服务将呈现权衡关系。土地利用一致性指一种土地利用类型能够同时提供多种生态系统服务，促进不同服务之间的协同关系（张紫怡等，2022）。

基于前文的分析，CS和BD的协同关系在水体转移至耕地或林地、草地转移至耕地后协同关系大幅增加，这是由于林地和耕地是CS和BD的主要支持地类，两者都具有较强的植被固碳能力和较高的NDVI年累积值。SC和BD的协同关系在林地退化成草地后呈现大幅下降态势，这是由于林地为土壤保持的主要支持地类，林地较高的植被覆盖度和树木根系的蓄水作用可以有效降低水土流失，而草地的根系较短、植被覆盖度较低，虽然能支持生物多样性，但对于减缓地表水流、固结土壤的作用较弱，不具有较好的土壤保持服务支持能力。BD与WY的协同关系在林地退化成裸地后两者呈现下降趋势，这是由于林地是BD和WY的主要支持地类，两者协同关系显著，而裸地不是BD和WY的支持性地类，生物多样性和产水量均为呈现低值。WC与WY的协同关系在林地退化成草地或未利用地后两者的协同关系出现大幅下降趋势，这是由于林地是WC与WY的主要支持地类，产水量和水源涵养量呈现高值，而草地和未利用地由于植被覆盖度低，根系的水源涵养能力远低于林地，因此地类对WC和WY的支持能力远差于林地。GP和WY的权衡关系，在耕地和未利用地转移为林地后呈现大幅上升趋势，这是由于耕地不仅具有较高的粮食生产价值，耕地中的作物还可以提供产水量服务，但是林地、草地作为WY的主要提供地类，不能用于粮食生产，因此GP与WY之间具有土地利用冲突，且两者在林地的权衡关系大于耕地。

综上所述，土地利用变化是生态系统服务关系变化的主要驱动因素。流域内的植被退化和城

市化进程会引起GP和WY之间的权衡关系下降，BD和WY等其他生态系统服务之间的协同关系下降。

6 结论

基于遥感影像的土地利用解译结果与生态系统服务相结合探讨了汾河流域1986年—2015年生态系统服务的演化机理，研究表明：

（1）多尺度地理加权回归模型能有效探测区域生态系统服务存在的空间异质性，减弱由于空间异质性带来的分析误差，提高多种生态系统服务关系的监测精度；

（2）利用多尺度地理加权回归模型获得最佳生态系统服务组合的方式，能有效降低生态系统服务分析时的数据冗余，提高工作效率；

（3）土地利用变化是生态系统服务关系变化的主要驱动因素。1986年—2015年间汾河流域内的植被退化和城市扩张引起粮食生产和产水量之间的权衡关系下降，导致生物多样性和产水量等其他生态系统服务之间的协同关系下降；

（4）1986年—2015年间汾河流域土地利用动态变化程度呈现先下降后上升的态势。受到城市扩张、人口增长的影响，30年间建筑用地面积呈现增长态势，未利用地面积呈现减少态势，两者的动态变化程度均在1995年—2015年达到最值。草地面积呈现先减少后增加态势，耕地和林地面积呈现先增加后减少态势，水体面积变化总体趋于稳定；

（5）1986年—2015年间汾河流域内单项生态系统服务之间以协同关系为主导，其中水源涵养与产水量服务之间的协同关系最显著，平均协同率为75.6%。粮食生产和产水量服务之间呈现显著的权衡关系，且权衡关系先上升后减弱。

参考文献(References)

- Bennett E M, Peterson G D and Gordon L J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12(12): 1394-1404 [DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x]
- Chen Y G. 2009. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics. *Geographical Research*, 28(6): 1449-1463 (陈彦光. 2009. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进. *地理研究*, 28(6): 1449-1463) [DOI: 10.11821/yj2009060002]
- Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton

- P and Van Den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630): 253-260 [DOI: 10.1038/387253a0]
- Dai E F, Wang X L, Zhu J J and Gao J B. 2015. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Advances in Earth Science*, 30(11): 1250-1259 (戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 2015. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. *地球科学进展*, 30(11): 1250-1259) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2015.11.1250]
- Dobbs C, Nitschke C R and Kendal D. 2014. Global drivers and trade-offs of three urban vegetation ecosystem services. *PLoS ONE*, 9(11): e113000 [DOI: 10.1371/journal.pone.0113000]
- Fotheringham A S, Yang W B and Kang W. 2017. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) *Annals of the American Association of Geographers*, 107(6): 1247-1265 [DOI: 10.1080/24694452.2017.1352480]
- Fu M D, Tang W J, He Y J and Zhu Y P. 2021. Ecological risk assessment and spatial identification of ecological restoration from the ecosystem service perspective: a case study in source region of Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 41(10): 3846-3855 (付梦娣, 唐文家, 刘伟伟, 何跃君, 朱彦鹏. 2021. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例. *生态学报*, 41(10): 3846-3855) [DOI: 10.5846/stxb202004200948]
- Gao J B and Wang H. 2019. Spatio-temporal tradeoff of karst water yield and soil erosion based on GWR model: a case study in Sancha River Basin of Guizhou Province, China. *Mountain Research*, 37(4): 518-527 (高江波, 王欢. 2019. 基于 GWR 模型的喀斯特地区产流量与土壤侵蚀权衡的时空特征——以贵州省三岔河流域为例. *山地学报*, 37(4): 518-527) [DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000444]
- Gong S H, Xiao Y, Zheng H, Xiao Y and Ouyang Z Y. 2017. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 37(7): 2455-2462 (龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖赓, 欧阳志云. 2017. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 37(7): 2455-2462) [DOI: 10.5846/stxb201512012406]
- Li D H, Zhang X Y, Wang Y, Zhang X, Li L and Lu L. 2021. Evolution process of ecosystem services and the trade-off synergy in Xin'an River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 41(17): 6981-6993 (李冬花, 张晓瑶, 王咏, 张潇, 李磊, 陆林. 2021. 新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系. *生态学报*, 41(17): 6981-6993) [DOI: 10.5846/stxb202010102575]
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2008. SL 190-2007 Standards for classification and gradation of soil erosion. Beijing: China Water and Power Press (中华人民共和国水利部. 2008. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社)
- Oshan T M, Li Z Q, Kang W, Wolf L J and Fotheringham A S. 2019. MGWR: a python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6): 269 [DOI: 10.3390/ijgi8060269]
- Ouyang Z Y, Wang R S and Zhao J Z. 1999. Ecosystem services and their economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(5): 635-640 (欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 1999. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 10(5): 635-640)
- Pan T, Wu S H, Dai E F and Liu Y J. 2013. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(1): 183-189 (潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 2013. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 24(1): 183-189) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0140]
- Radeloff V C, Dubinin M, Coops N C, Allen A M, Brooks T M, Clayton M K, Costa G C, Graham C H, Helmers D P, Ives A R, Kolesov D, Pidgeon A M, Rapacciuolo G, Razenkova E, Suttidate N, Young B E, Zhu L and Hobi M L. 2019. The dynamic habitat indices (DHIs) from MODIS and global biodiversity. *Remote Sensing of Environment*, 222: 204-214 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.009]
- Shen Y Q, Xiao Y, Ouyang Z Y and Zhang P. 2020. Water conservation service evaluation based on ecosystem quality in Southwestern China. *Mountain Research*, 38(6): 816-828 (沈钰仟, 肖赓, 欧阳志云, 张平. 2020. 基于生态系统质量的水源涵养服务评估——以西南五省为例. *山地学报*, 38(6): 816-828) [DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000558]
- Sun Y J, Ren Z Y, Zhao S N and Zhang J. 2017. Spatial and temporal changing analysis of synergy and trade-off between ecosystem services in valley basins of Shaanxi Province. *Acta Geographica Sinica*, 72(3): 521-532 (孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 2017. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. *地理学报*, 72(3): 521-532) [DOI: 10.11821/dlxb201703012]
- Wang G B. 2020. Quantification and Evaluation of Typical Ecological Services in Haihe River Basin based on Remote Sensing and GIS. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 82 (王国斌. 2020. 基于遥感和 GIS 的海河流域典型生态服务量化与评估. 徐州: 中国矿业大学: 82) [DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.000226]
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, Chen W H and Li S M. 2015. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 30(8): 1243-1254 (谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 2015. 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. *自然资源学报*, 30(8): 1243-1254) [DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001]
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, Xiao Y and Chen C. 2008. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 23(5): 911-919 (谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 2008. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 23(5): 911-919) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2008.05.019]
- Xu S N, Liu Y F, Wang X and Zhang G X. 2017. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: a case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Science of the Total Environment*, 598: 297-306 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.009]
- Yang J, Xie B P and Zhang D G. 2021. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem services trade-off synergy in the Yellow River Basin.

- Journal of Desert Research, 41(6): 78-87 (杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 2021. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性. 中国沙漠, 41(6): 78-87) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00088]
- Yang Q Q, Xu G L, Li A J, Liu Y T and Hu C S. 2021. Evaluation and trade-off of ecosystem services in the Qingyijiang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 41(23): 9315-9327 (杨强强, 徐光来, 李爱娟, 刘永婷, 胡春生. 2021. 青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究. 生态学报, 41(23): 9315-9327) [DOI: 10.5846/stxb202009032293]
- Yang X N, Zhou Z X, Li J, Fu X, Mu X M and Li T. 2016. Trade-offs between carbon sequestration, soil retention and water yield in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China. Journal of Geographical Sciences, 26(10): 1449-1462 [DOI: 10.1007/s11442-016-1337-5]
- Yu D Y and Hao R F. 2020. Research progress and prospect of ecosystem services. Advances in Earth Science, 35(8): 804-815 (于德永, 郝蕊芳. 2020. 生态系统服务研究进展与展望. 地球科学进展, 35(8): 804-815) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.069]
- Zhang X M, Xie H L, Shi J Y, Lv T G, Zhou C H and Liu W D. 2020. Assessing changes in ecosystem service values in response to land cover dynamics in Jiangxi province, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(9): 3018 [DOI: 10.3390/ijerph17093018]
- Zhang Z Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y L, Lu Y C and Ren Q R. 2022. Spatial non-stationary response of the ecosystem services synergy and tradeoff to influencing factors: a case study of ecological function area in Fujian Province. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(1): 111-125 (张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 刘耀林, 陆砚池, 任其然. 2022. 生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应——以福建省生态功能区为例. 武汉大学学报(信息科学版), 47(1): 111-125) [DOI: 10.13203/j.whugis20200700]

Evolution mechanism of ecosystem service relationship in the Fenhe River Basin based on multiscale geographically weighted regression

LIU Jun¹, YU Boyun¹, YANG Wenfu²

1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Monitoring and Protection of Natural Resources in Mining Cities, Ministry of Natural Resources, Jinzhong 030600, China

Abstract: The trade-offs and synergies of ecosystem services are important indicators for understanding regional ecological evolution mechanisms. Many studies have taken administrative regions as a whole to describe the trade-offs and synergies of ecosystem services. However, the researchs on the spatial heterogeneity of regional ecosystem services and the different impact of various ecosystem services remains lacking. In our study, the Fenhe River basin was taken as the study area. Based on the land use classification results obtained by interpreting remote sensing images of 1986, 1995, 2005, and 2015, statistical data, and ecological data, we used the multiscale geographically weighted regression (MGWR) to analyze the trade-off and synergy between ecosystem service's indicators of the Fenhe River basin. The influence of land transfer on the trade-off synergy and the evolution mechanism of the Fenhe River Basin's ecosystem services was quantitatively analyzed by combining MGWR with the land use. The results show that: (1) MGWR can detect the spatial heterogeneity in the trade-off synergy of ecosystem service, and thus accurately revealing the internal relationship between multiple ecosystem services. (2) Using MGWR to obtain the best combination of ecosystem services can effectively reduce data redundancy and improve work efficiency. (3) Land use conversion is a major driver of the evolution of ecosystem service's trade-off synergy. (4) Vegetation degradation in the Fenhe River basin will reduce the trade-off between grain production and water yield and decrease the synergy between other ecological services like the synergy of biological diversity and water yield. (5) From 1986 to 2015, the synergistic relationship between individual ecosystem services in the Fenhe River basin was dominant. The synergistic relationship between water conservation and water yield was the most significant, with an average synergistic rate of 75.6%. The point of this study is the use of MGWR in solving the spatial heterogeneity of regional ecosystem service. We found that MGWR can not only reduce the analysis error caused by spatial heterogeneity but also obtain the optimal ecosystem service combination efficiently, which means it can reduce the data redundancy of ecosystem service analysis. The results can provide a reference for land use optimization and ecosystem service improvement in the Fenhe River basin.

Key words: remote sensing, ecosystem services, Trade-offs and Synergies, MGWR, land use, Fenhe River basin

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1810203); The Basic Applied Research Projects of Shanxi Province (No. 201901D111466, 202203021221043)