

秦巴山区生态系统服务与居民福祉 耦合关系的时空变化

李文青, 赵雪雁, 杜昱璇, 马平易

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 保护生态系统、提高居民福祉是实现联合国2030可持续发展目标的核心内容。在分析秦巴山区生态系统服务与居民福祉时空演化特征的基础上, 采用弹性系数揭示了二者的时空耦合关系。研究发现: (1) 1990—2018年秦巴山区水源涵养总量、土壤保持总量均呈波动下降趋势, 碳储量总量则呈缓慢增长趋势, 且各生态系统服务呈不同的空间分异特征。(2) 1990—2018年居民福祉呈上升趋势, 增幅高达220%, 并呈“南高北低”的分布格局。(3) 县域尺度上, 三种生态系统服务与居民福祉明显不协调发展。其中, 水源涵养、固碳服务与居民福祉的耦合关系均以“福祉增—服务减”为主, 占比分别为88.75%、62.5%; 而土壤保持服务与居民福祉的耦合关系则以“双增”为主, 占比为57.5%。此外, 各项生态系统服务与居民福祉反向变化区多分布于汉江河谷盆地和秦岭山脉中段。研究结果可为促进贫困山区生态系统服务与居民福祉协调发展提供决策依据。

关键词: 秦巴山区; 生态系统服务; 居民福祉; InVEST模型; 耦合关系

生态系统作为人类可持续发展的基础性资源, 其变化将直接或间接地影响人类福祉^[1]。进入21世纪以来, 全球人口激增、经济快速发展、人类活动强度及其对自然资源需求的增加, 已使全球生态系统服务严重受损, 自然生态系统长时间处于失调状态^[2], 预计未来50年全球生态系统服务仍将持续减弱^[3,4]。如何降低人类活动对生态系统的负面影响, 并提高生态系统服务功能, 促进其与人类福祉协调发展, 已成为全球广泛关注的热点话题。为此, 全球土地计划 (GLP)、未来地球计划 (FE)、《千年生态系统评估》(MA)、联合国《2030年可持续发展议程》均强调要促进生态系统保护, 协调生态系统服务与人类福祉的关系。在中国, 随着城镇化、工业化的快速推进, 资源紧缺、生态退化、环境污染等问题日益凸显^[5], 尤其在贫困山区, 生态保护与生计发展之间的矛盾更为尖锐, 如何在保护生态的同时, 提高居民福祉已成为当前亟待解决的重要问题。

目前就生态系统服务与居民福祉关系已有大量研究^[6]。从研究方法来看, 多基于Costanza等^[7]开发的生态系统服务价值当量表和InVEST模型来估算生态系统服务的价值量和物质量; 福祉水平评价多基于人类发展指数^[8]、生活满意度^[9]、国家福祉指数^[10]及全球幸福指数^[11]等, 而二者的关系研究则多利用数理统计模型或空间分析模型。生态系统服务功能的变化通过影响居民的安全、基本物质需求等进而对居民福祉产生影响^[12]。其中, Jones等^[13]发现生态系统服务对人类福祉的各方面都有贡献, 一旦生态系统受损, 会对健康和物质福祉产生负面影响; Ciftcioglu等^[14]研究发现生态系统供给服务与维持良好

收稿日期: 2020-08-16; 修订日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971268); 中国科学院A类战略性先导科技专项 (XDA19040502)

作者简介: 李文青 (1996-), 女, 甘肃通渭人, 硕士, 主要从事生态经济研究。E-mail: 3289854504@qq.com

作者简介: 赵雪雁 (1971-), 女, 甘肃武都人, 博士, 教授, 主要从事生态经济研究。E-mail: zhaoxy@nwnu.edu.cn

生活的基本物质相关性较高,而文化服务与发展良好社会关系存在较高的相关性;Wei等^[15]发现生态系统服务的供需失调可能会导致需求不足,从而影响人类福祉;徐建英等^[16]研究发现不同类型的生态系统服务对居民福祉的贡献各不相同;刘家根等^[17]、王博杰等^[18]则指出居民福祉和生态系统服务间的关系是双向的,并在时空上存在动态变化,二者间的关系异常复杂,并非只是简单的线性关系。总体来看,已有研究多关注生态系统服务对人类福祉的贡献、人类福祉对生态系统服务的依赖程度等,而较少考虑二者间的相互耦合关系,尤其较少考察二者耦合关系的动态性及区域差异性。准确刻画生态系统服务与居民福祉的动态关系和区域差异性,不仅有助于实现生态系统的科学管理,还有助于促进区域的可持续发展。因此,亟需从长时间序列维度出发,厘清生态系统服务与居民福祉的双向关系。

山区因特殊的地理位置,提供着比其他生态系统更丰富的生态系统服务,如涵养水源、固碳释氧、防止水土流失等^[19]。但山区往往经济发展水平较低,且居民生计高度依赖自然资源,导致生态环境破坏,生态系统供给居民福祉的能力不断下降,生态系统服务与居民福祉之间严重失调^[20]。厘清山区生态系统服务与居民福祉的耦合关系,有助于寻求促进生态系统服务与居民福祉“共赢”的有效策略。秦巴山区不仅是中国重要的生态功能区,也是中国14个连片特困地区之一,当地农户生计严重依赖于自然资源,加剧了生态保护与生计发展间的矛盾,使得该区可持续发展严重受阻。鉴于此,本文以秦巴山区为案例区,利用InVEST模型、弹性系数等方法,分析1990—2018年生态系统服务与居民福祉的耦合关系及其时空分布特征,旨在为促进贫困山区生态系统服务与居民福祉协调发展提供决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

秦巴山区涉及河南、湖北、重庆、四川、陕西和甘肃五省一市的80个县(市、区),国土总面积为 $2.25 \times 10^5 \text{ km}^2$,包括秦岭山地、大巴山山地和汉江河谷盆地三个主要地貌单元,地势起伏大(图1)。其中,山地、丘陵海拔多在1000~2500 m,盆地、平原海拔多在200~1000 m。该区气候类型多样,垂直变化显著。多年平均降雨量为800~1700 mm,但降雨时空分布不均,其中80%的降水集中在夏季,且由南向北递减。该区水系发达,水资源丰富,地跨长江、黄河、淮河三大流域,是淮河、汉江、丹江、洛河等河流的发源地。同时,森林覆盖率达53%,是国家重要的生物多样性和水源涵养生态功能区^[20]。

秦巴山区经济发展水平较低,是典型的集中连片特困区。2018年总人口达3467万人,其中,农村贫困人口101万人,贫困发生率为3.6%^[21];人均GDP为2.60万元,农民人均纯收入和城镇居民人均可支配收入分别为10869元和26827元,相当于全国水平的76%和68%。

1.2 数据来源

本文数据主要包括土地利用数据、气象数据、土壤数据和统计年鉴数据。其中,1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2018年土地利用数据来源于中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据库,分辨率为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$;气象数据来源于资源环

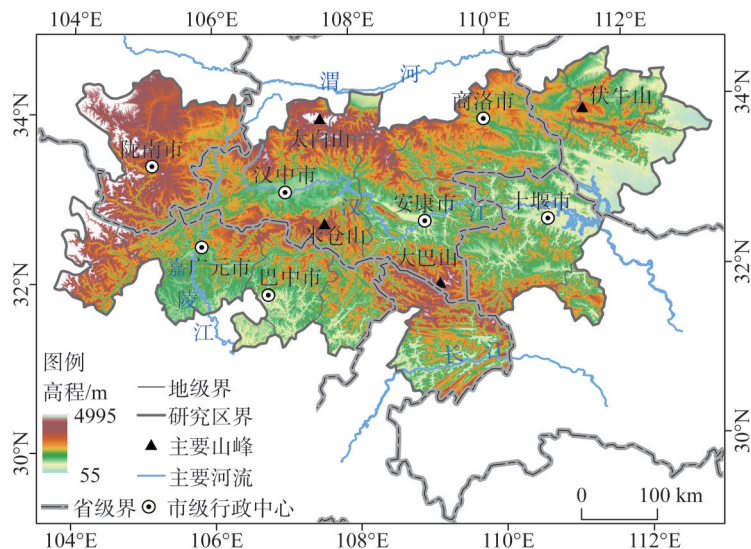


图1 研究区位置图

Fig. 1 The location of the study area

境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>); 潜在蒸散量数据来源于《全球干旱指数和潜在蒸散 (ET₀) 气候数据库 v2》; DEM数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m×30 m, 在 ArcGIS 10.3 中对下载的 DEM 数据进行镶嵌、裁剪和填注处理; 土壤数据来源于世界土壤数据库。在 GIS 中对所有栅格数据进行重分类和转换投影, 分辨率统一转化为 100 m×100 m, 投影统一转化为 Albers_cgcs2000。居民福祉评估所需数据主要来源于 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及秦巴山区 5 省 1 市 80 县的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

现有文献中较多探讨了供给服务对居民福祉的影响, 而较少考虑调节服务、文化服务和支撑服务对居民福祉的重要性^[22]。秦巴山区作为我国生态安全屏障建设的重点区域, 提供着丰富的调节和支撑服务, 尤其提供着丰富的涵养水源、固碳、土壤保持等服务^[19]。但因该区地形破碎, 水土流失较为严重, 调节和支撑服务严重受损, 限制了居民对基本物质、安全环境等福祉的获取, 进而加剧了地区贫困。故本文利用 InVEST 模型主要评价秦巴山区水源涵养、土壤保持、固碳三种生态系统服务, 以探析秦巴山区重要生态功能区调节服务与居民福祉间的复杂关系。InVEST 模型作为当前生态系统服务价值评估的主要工具之一, 能够对生态系统服务进行不同尺度的综合和动态评估, 并将结果进行可视化表达, 在生态系统服务研究领域得到了广泛应用^[23]。

(1) 水源涵养服务评估模型

秦巴山区是我国重要的水源涵养功能区, 利用 InVEST 水源涵养模型计算该区的水源涵养服务量^[24], 具体计算方法为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \left(\frac{1}{R_{xj}}\right)} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \times ET_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量 (mm); AET_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量 (mm); P_x 为栅格单元 x 的降水量 (mm); ω_x 为修正植被年可用水量与降水量的比值; R_{xj} 为干燥指数; Z 为Zhang系数, 本文参考相关文献取值为30^[25]; AWC_x 为栅格单元 x 的土壤有效含水量 (mm); K_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数; ET_x 为参考作物蒸散。

(2) 土壤保持服务评估模型

土壤侵蚀是阻碍秦巴山区社会经济发展的主要生态环境问题, 近年来秦巴山区土壤侵蚀状况虽有改善, 但水土保持仍是该区实现可持续发展中需重点关注的问题。故采用InVEST模型中的土壤保持模块计算该区的土壤保持量^[26]:

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x \quad (5)$$

式中: $SEDRET_x$ 为栅格单元 x 的土壤保持量 (t); $RKLS_x$ 、 $USLE_x$ 分别表示土壤潜在侵蚀量 (t)、实际土壤侵蚀量 (t)。具体计算公式如下:

$$RKLS_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (6)$$

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (7)$$

式中: R_x 为降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; K_x 为土壤可蚀性; LS_x 为坡长—坡度因子; C_x 为植被覆盖因子; P_x 为管理因子。

(3) 固碳服务评估模型

采用InVEST模型中的固碳模块计算秦巴山区的固碳服务。其中, 碳储量主要包括地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和生物碳储量, 碳密度数据参考相关文献^[27]。

$$G_{\text{碳}} = G_{\text{above}} + G_{\text{below}} + G_{\text{dead}} + G_{\text{soil}} \quad (8)$$

式中: $G_{\text{碳}}$ 为生态系统总碳储量 (t); G_{above} 为地上部分碳储量 (t); G_{below} 为地下部分碳储量 (t); G_{dead} 为死亡有机物碳储量 (t); G_{soil} 为土壤碳储量 (t)。

1.3.2 居民福祉水平评估

(1) 居民福祉指标体系构建

《千年生态系统评估报告》提出福祉主要指人类在物质、精神和健康方面的需求, 包括基础生活材料、安全、健康、良好的社会关系和选择与行动的自由等五方面^[28]; Summers等^[29]则指出居民福祉由人类基本需求、经济需求、环境需求以及主观幸福感组成。本文基于《千年生态系统评估报告》中的福祉内涵及相关研究^[30,31], 考虑数据的可获得性, 从收入、物质需求与健康、安全三个维度出发构建了秦巴山区居民福祉评价指标体

系。在评估中,首先,通过利用极差标准化法对各指标进行标准化处理,并运用熵权法确定各指标权重^[32];然后,通过加权求和,计算秦巴山区各县区的居民福祉指数;最后,以各县区居民福祉的均值来评估秦巴山区整体居民福祉水平(表1)。

(2) 冷热点分析

采用冷热点分析有效识别秦巴山区居民福祉的空间集聚程度^[33],公式如下:

表1 居民福祉指标体系

Table 1 Residents' well-being indicator system

一级指标	二级指标	权重
收入	农民人均纯收入	0.341
	城镇居民可支配收入	0.303
物质需求与健康	人均粮食消耗量	0.008
	人均蔬菜消耗量	0.032
	人均肉类消耗量	0.070
安全	人均水资源占有量	0.121
	人均粮食产量	0.056
	人均耕地面积	0.069

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}(d)x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (9)$$

式中: W_{ij} 为权重; x_i 为 i 的样本值。若 $G_i^*(d)$ 值为正数时,表明 i 地区是居民福祉的高值集聚区,反之,则为低值集聚区。

1.3.3 生态系统服务与居民福祉的耦合关系

利用“生态系统服务—福祉弹性系数”模型分析秦巴山区生态系统服务与居民福祉之间的耦合关系^[34,35],其计算公式为:

$$\eta_i = \Delta M_i / \Delta P_i = (M_i / M_{i-1} - 1) / (P_i / P_{i-1} - 1) \quad (10)$$

式中: η_i 为生态系统服务—福祉弹性系数; i 为年份; ΔM_i 、 ΔP_i 分别表示县级行政区生态系统服务变化率、居民福祉变化率; M_i 、 M_{i-1} 分别为 i 时期、 $i-1$ 时期的生态系统服务; P_i 、 P_{i-1} 分别为 i 时期、 $i-1$ 时期的居民福祉。当 $\eta_i > 0$ 时,生态系统服务与居民福祉同向变化,称为“同向变化区”。其中,若 $\Delta P_i > 0$,说明生态系统服务上升的同时,居民福祉水平也上升,因而将该区划为“双增区”;若 $\Delta P_i < 0$,说明生态系统服务下降的同时,居民福祉水平也在降低,将该区划为“双减区”;当 $\eta_i < 0$ 时,表明生态系统服务与居民福祉反向变化,称为“反向变化区”。其中,若 $\Delta P_i > 0$,说明居民福祉水平在上升的同时,生态系统服务降低,将该区划为“福祉增—服务减反向区”,若 $\Delta P_i < 0$,说明居民福祉在降低的同时,生态系统服务上升,将该区划为“福祉减—服务增反向区”。

2 结果分析

2.1 生态系统服务的时空特征

2.1.1 水源涵养服务的时空特征

1990—2018年秦巴山区水源涵养量呈波动下降趋势,从1990年的 8.59×10^9 mm降至2018年的 6.27×10^9 mm,降幅为27% (图2a)。其中,1990—1995年秦巴山区水源涵养量明显降低,从 8.59×10^9 mm降低至 6.7×10^9 mm,降幅为22%;1995—2005年水源涵养量显著增加,从 6.7×10^9 mm增加至 10.5×10^9 mm,增幅达56.72%;2005—2018年秦巴山区水源涵养量又呈逐年递减趋势,从 10.5×10^9 mm降低至 6.27×10^9 mm,降幅达40.29%。从变

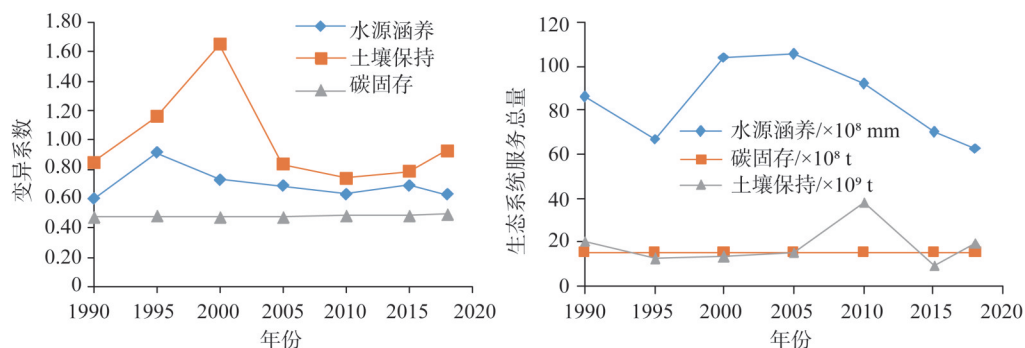


图2 生态系统服务变异系数及生态系统服务总量

Fig. 2 Coefficient of variation of ecosystem services and total ecosystem services

异系数来看, 水源涵养服务的变异系数呈波动上升趋势 (图2b), 增幅为5%, 说明该区域水源涵养服务的区域差异趋于扩大。

从空间分布来看 (图3a), 秦巴山区水源涵养量总体呈“南高北低, 由南向北递减”的分布格局。水源涵养量高值区主要分布在大巴山区和四川盆地北部的仪陇县、平昌县、巴州区、宣汉市一带; 水源涵养量的次高值区主要分布于汉江流域上游的汉中市、安康市; 而水源涵养量低值区主要集中分布于秦岭北坡的太白县、周至县一带, 这与秦巴山区降雨量的空间分布格局基本一致。总体来看, 1990—2018年秦巴山区水源涵养量高值区趋于收缩, 低值区趋于扩张。其中, 1990—1995年高值区主要分布于陇南山区南部和四川盆地北部的仪陇县、平昌县、巴州区、宣汉市一带, 且呈收缩态势; 1995—2000年高值区由陇南山区南部和大巴山绵延区向鄂西丘陵平原交错带扩张; 2000—2018年与之相反, 高值区处于收缩状态, 且集中连片分布于四川盆地北部和三峡库区。

2.1.2 水土保持服务的时空特征

1990—2018年秦巴山区水土保持量呈波动下降趋势 (图2a), 从1990年的 2.07×10^{10} t降至2018年的 2×10^{10} t, 降幅为3.4%。其中, 1990—1995年秦巴山区水土保持量下降显著, 从1990年的 2.07×10^{10} t降至1995年的 1.27×10^{10} t, 降幅为38.65%; 1995—2010年水土保持量显著增加, 增加至 3.81×10^{10} t, 增幅高达200%; 2010—2015年秦巴山区水土保持量又显著下降, 降至 0.98×10^{10} t, 降幅为74.27%; 2015年后又有所上升。1990—2018年秦巴山区水土保持服务变异系数呈波动上升趋势 (图2b), 增幅为8.24%, 说明秦巴山区水土保持的区域差异趋于扩大, 尤其在1995—2005年间, 变异系数增减变化尤为剧烈, 可见在该时段内水土保持空间差异变动较大。

1990—2018年水土保持量总体呈“西高东低”的空间分布特征, 高值区主要分布于大巴山区、陇南山地和秦岭山区中西部, 如四川和重庆北部、甘肃陇南市和陕西太白、周至、佛坪、宁陕等县区; 低值区位于汉江平原、南阳盆地, 如汉中、安康以及豫西、鄂西的大部分县区 (图3b)。其中, 1990—2000年水土保持服务高值区主要分布于陇南山区和大巴山区, 年际变化呈向陇南山区西缘收缩趋势; 2000—2010年水土保持高值区又趋于扩张, 高值区由陇南山区和大巴山区逐渐向汉江河谷盆地、秦岭山区以及三峡库区北部扩延; 2010—2018年与之相反, 高值区呈收缩态势。

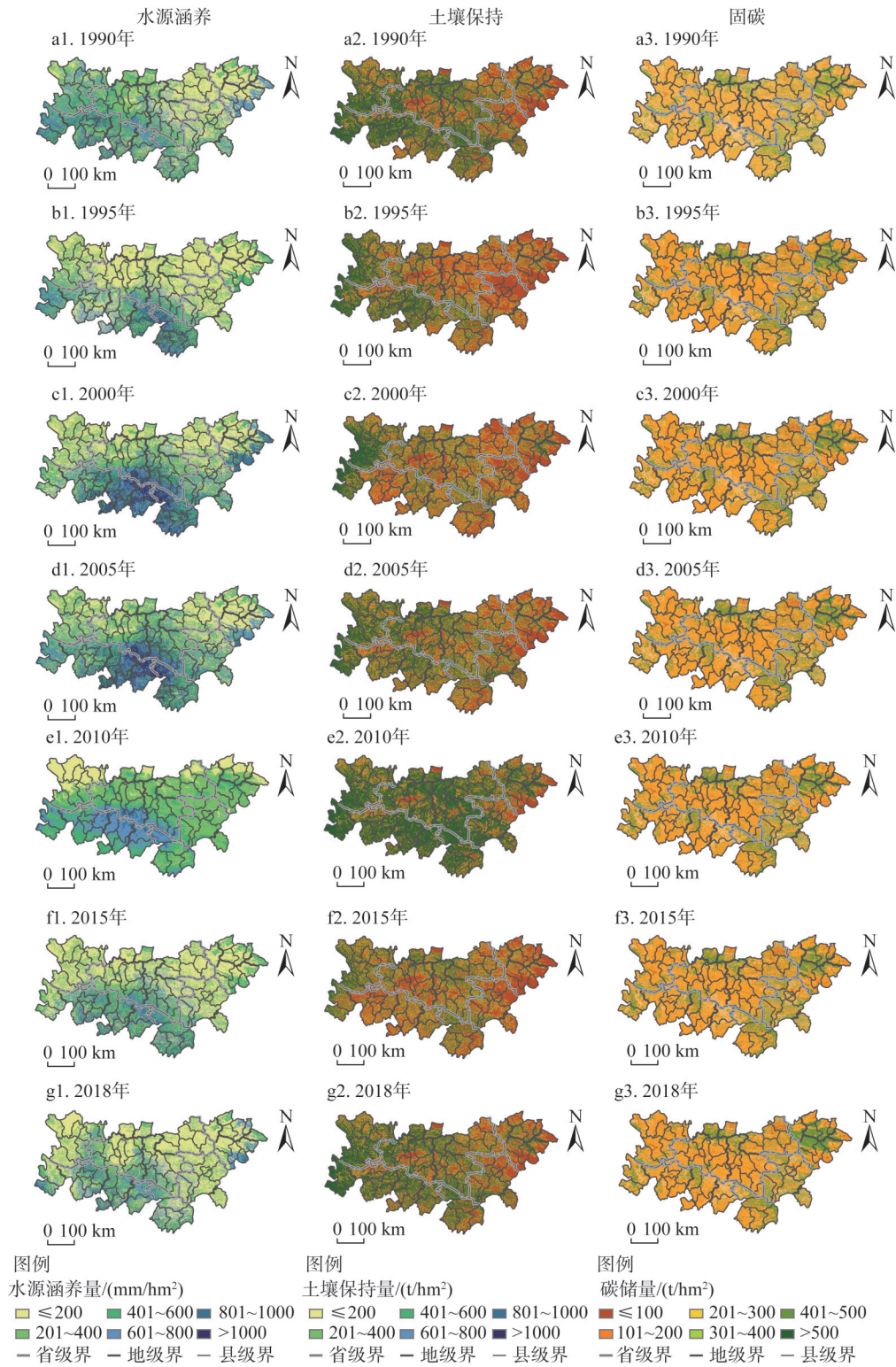


图3 1990—2018年秦巴山区水源涵养、土壤保持、固碳的时空分布

Fig. 3 Spatial-temporal distribution of water conservation, soil conservation, and carbon sequestration in Qinba Mountains from 1990 to 2018

2.1.3 固碳服务的时空特征

1990—2018年秦巴山区碳储量略有上升(图2a),从 1.54×10^9 t增至 1.57×10^9 t,增幅为2%。具体来看,1990—1995年碳储量由 1.54×10^9 t增至 1.56×10^9 t,增幅为1.3%;1995—2000年碳储量从 1.56×10^9 t降至 1.54×10^9 t,降幅为1.28%;2000—2018年碳储量呈增加趋势,增幅为2%。从变异系数来看(图2b),1990—2018年秦巴山区固碳服务的变异系数增幅为2.08%,表明固碳服务的区域差异趋于扩大。

1990—2018年秦巴山区碳储量总体呈“中间低,四周高”空间分布特征(图3c)。高值区主要分布于秦岭西段、伏牛山区、大巴山区及鄂西丘陵平原交错带,如湖北西北部、四川北部、河南西部和陕西太白、周至、宁陕等县区;低值区主要分布于汉江河谷盆地和嘉陵江河谷地区,如汉中市和安康市等。从年际变化来看,碳储量的空间分布格局整体变化较小,但相较于1990年,2018年四川北部、陕西东部和河南西部各县区均呈扩张态势,其中,河谷盆地区(如汉台区、城固县、汉滨区等)的碳储量略有下降。

2.2 居民福祉的时空特征

1990—2018年秦巴山区居民综合福祉呈上升趋势,从1990年的0.15上升至2018年的0.48,增幅达220%(图4)。其中,1990—2005年居民福祉提升较为缓慢,增幅为40%,2005—2018年居民福祉提升较快,增幅达128.57%。从变异系数来看,由1990年的0.31降至2018年的0.16,降幅为48.39%。表明秦巴山区居民福祉水平区域差异趋于缩小。

采用自然断点法将居民福祉分为高水平区、较高水平区、中等水平区、较低水平区和低水平区五个等级(图5)。1990—2018年秦巴山区居民福祉变化较明显,居民福祉水平总体呈“南高北低”的分布格局。其中,1990—2010年高水平区趋于收缩,有12.5%的县区由高水平区转移为中等和较低水平区,低水平区由河南西部及商洛市西南部县区转至陇南西部县区;2010—2018年有15%的县区向高水平区转移,高水平区由四川北部向东扩张,有6.25%的县区向低水平区转移,秦岭中部的商州、柞水、周至等县区由中等水平区转为低水平区,较高和中等水平区略有收缩,并且趋于集中。

从秦巴山区居民福祉的空间集聚特征来看(图6),1990—2018年居民福祉的空间关系呈“热缩冷胀”态势,即秦巴山区居民福祉高水平区集聚态势趋于减弱,而低水平区集聚态势趋于增强。其中,1990—2010年热点区和冷点区均趋于收缩,热点区主要分布在四川北部县区,冷点区由河南西部及商洛市西南部县区转向陇南市。2010—2018年热点区和冷点区均趋于扩张,热点区由四川北部向重庆北部云阳县、奉节县、巫山县一带扩延,秦岭中段商州、洛南、镇安等周边连片县区则由不显著区转为冷点区。

2.3 生态系统服务与居民福祉时空耦合关系

2.3.1 水源涵养与居民福祉的时空耦合特征

以秦巴山区水源涵养服务分级设色作为底色,以福祉水平做分级显示来反映水源涵

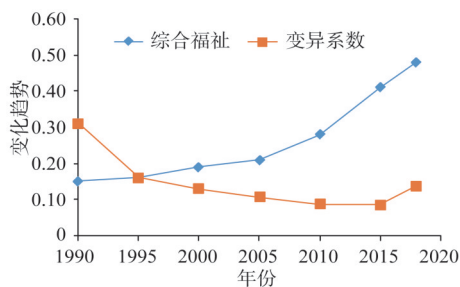


图4 1990—2018年秦巴山区居民福祉变化趋势

Fig. 4 Changing trend of residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018

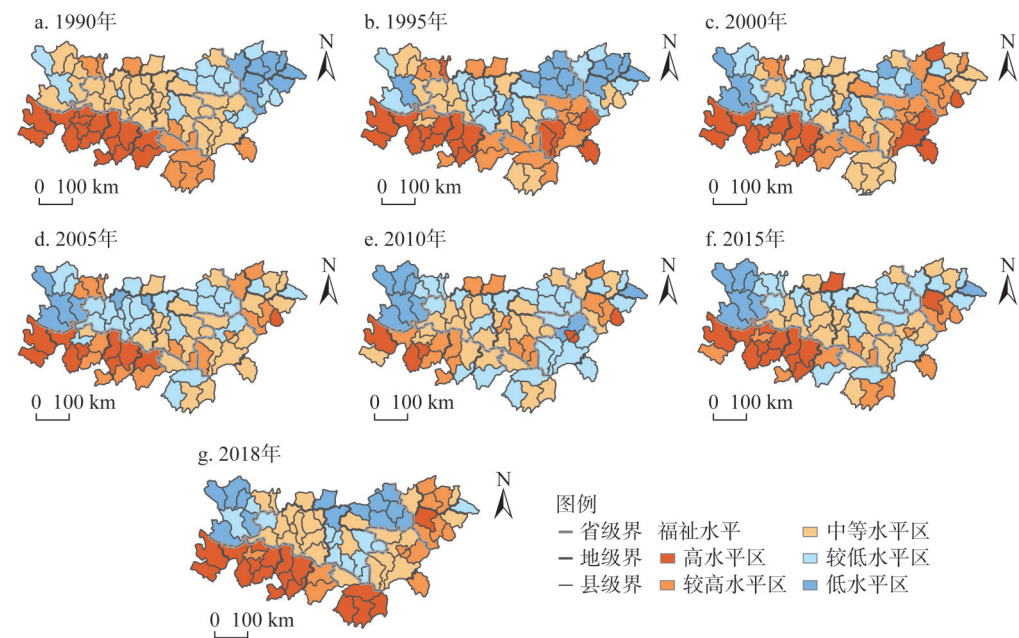


图5 1990—2018年秦巴山区居民福祉的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018

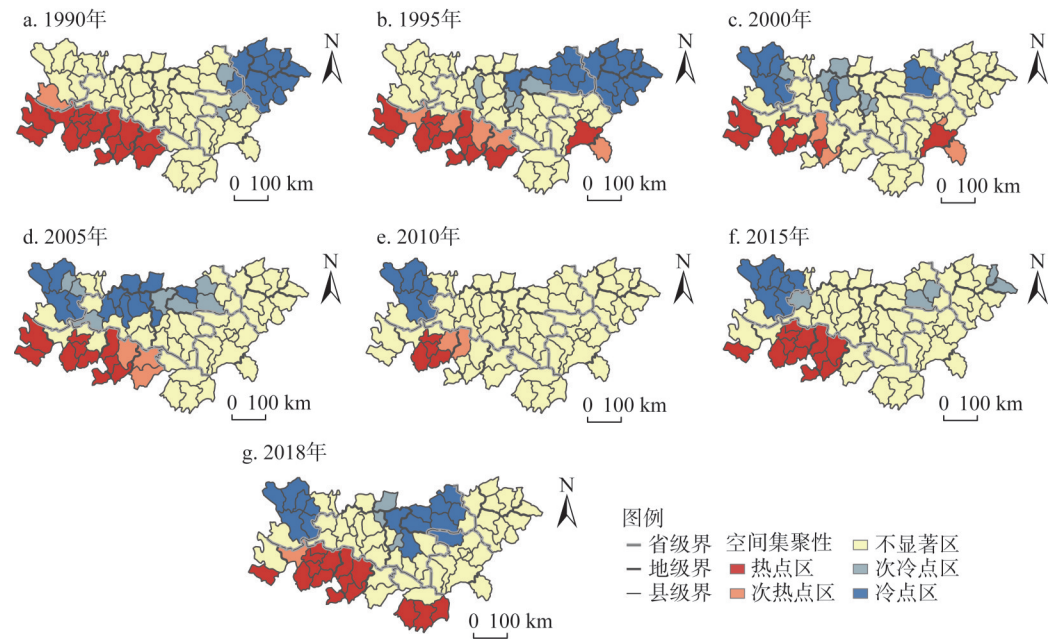


图6 1990—2018年秦巴山区居民福祉的时空格局

Fig. 6 Spatial-temporal pattern of residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018

养服务与居民福祉的时空耦合格局（图7a）。1990—2018年秦巴山区水源涵养服务与居民福祉的“双高”县区主要分布在四川盆地北部，“双低”县区集中分布在秦岭山区，“低水源涵养—高居民福祉”的县区主要分布在汉江河谷盆地。

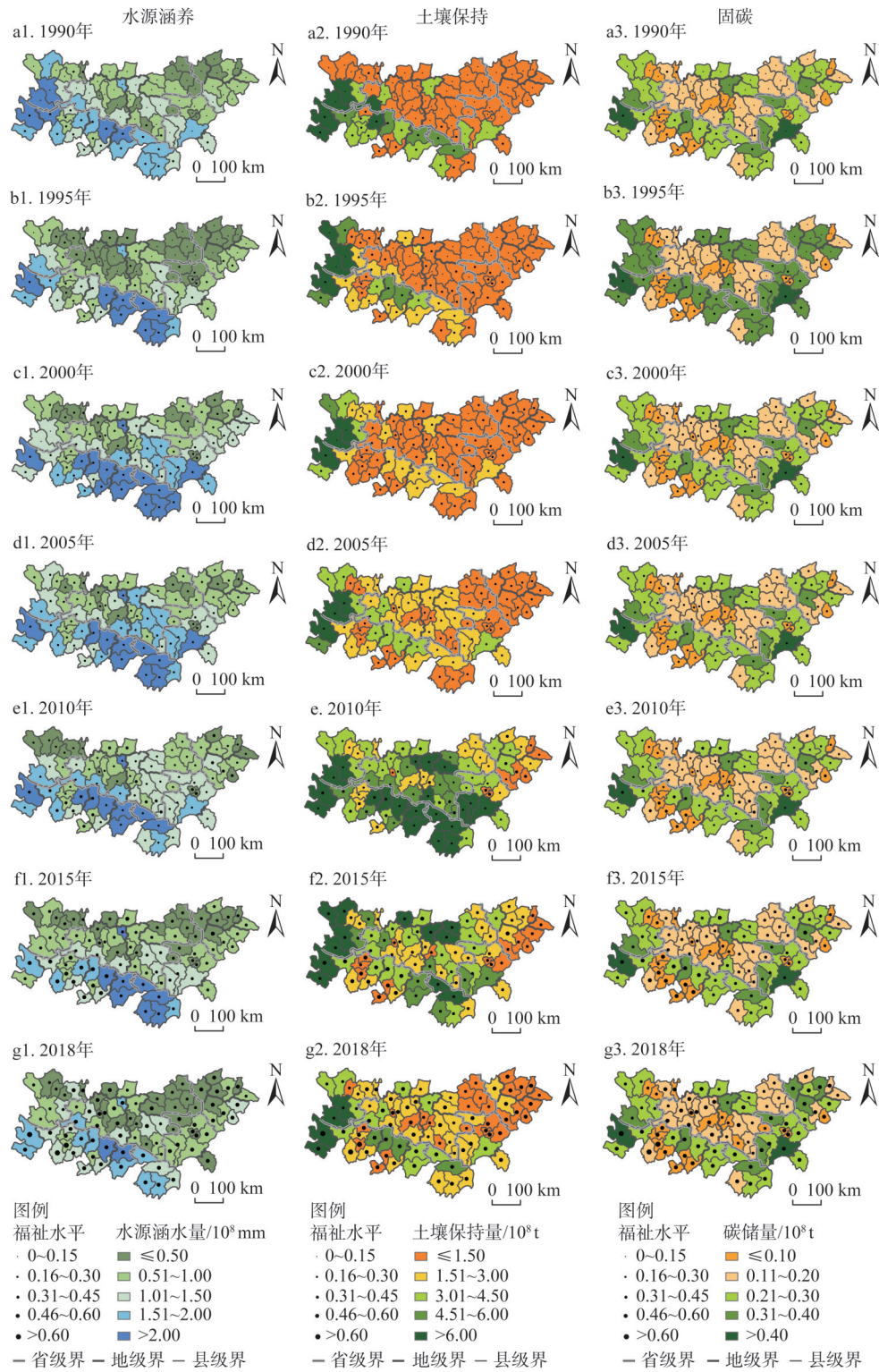


图7 1990—2018年秦巴山区水源涵养、土壤保持、固碳与居民福祉的时空耦合格局

Fig. 7 Spatio-temporal coupling patterns of water conservation, soil conservation, carbon sequestration and residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018

1990—2018年秦巴山区仅有11.25%的县区属于水源涵养服务与居民福祉的“双增区”，而88.75%的县区属于反向区，水源涵养服务下降而居民福祉水平上升（表2）。具体来看，1990—1995年间水源涵养服务与居民福祉以反向变化为主。其中，同向变化的县区比例为30%，而反向变化的县区占比高达70%。1995—2005年水源涵养与居民福祉以“双增区”为主，但反向变化趋于扩大，反向变化的县区比例由8.75%上升至42.5%。2005—2018年秦巴山区水源涵养服务与居民福祉以反向变化区为主。其中，2005—2015年反向变化强度趋于增强，反向变化县区占比由65%上升至81.25%，增幅为25%；2015—2018年反向变化强度减弱，反向变化县区占比降至63.75%，降幅为21.54%。

表2 1990—2018年秦巴山区水源涵养与居民福祉耦合关系

时间段/年	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2018	1990—2018
双增区	12.50 (10)	88.75 (71)	55.00 (44)	35.00 (28)	18.75 (15)	30.00 (24)	11.25 (9)
双减区	17.50 (14)	2.50 (2)	2.50 (2)	0	0	6.25 (5)	0
福祉增—服务减反向区	67.50 (54)	5.00 (4)	38.75 (31)	65.00 (52)	81.25 (65)	62.50 (50)	88.75 (71)
福祉减—福祉增反向区	2.50 (2)	3.75 (3)	3.75 (3)	0	0	1.25 (1)	0

注：括号内为该类型的县区个数（个），下同。

从空间分布来看（图8），1990—2018年秦巴山区大部分县区以“福祉增—服务减反向区”为主，“双增区”零星分布在伏牛山东部的洛宁、嵩县、汝阳等县区和秦巴山区中南部的旬阳县、汉阴县、万源市和巴州区。其中，1990—2000年，水源涵养服务与居民福祉的“双增区”大幅扩张，由重庆三峡库区和大巴山东南部县区扩张至除陇南山区以外大部分县区，且连片分布；2000—2015年“双增区”趋于收缩，由连片分布于秦巴山区大部分区域转向分散分布于陇南西北部、重庆三峡库区以及河南省的洛宁、汝阳、鲁山县；2015—2018年“双增区”略有扩张，并分散分布于汉江河谷上游、商洛市西南部

2.3.2 土壤保持与居民福祉的时空耦合特征

1990—2018年秦巴山区土壤保持与居民福祉的“双高”县区集中分布于四川盆地北

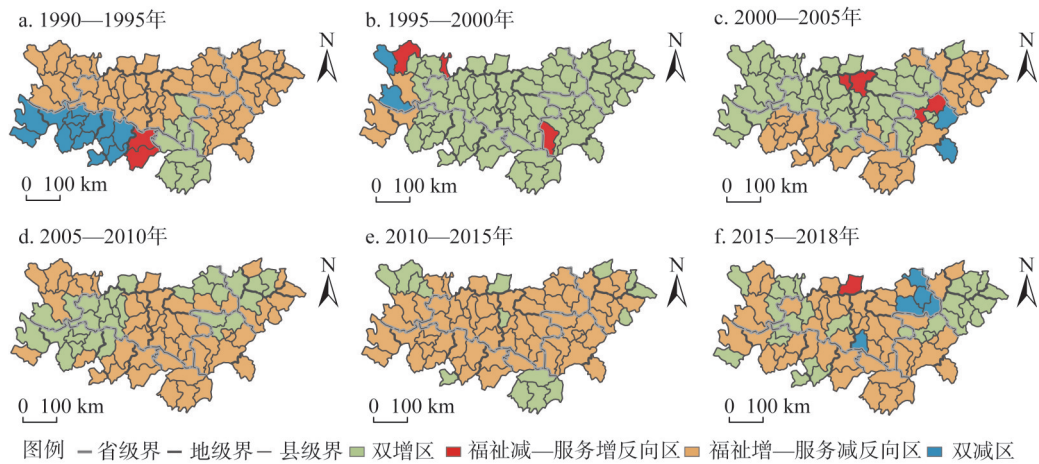


图8 1990—2018年水源涵养与居民福祉弹性系数演变的空间格局

Fig. 8 Spatial pattern of the evolution of elasticity coefficient of water conservation and residents' well-being from 1990 to 2018

部丘陵山地区，“双低”县区主要分布于秦岭东部。“低土壤保持—高居民福祉”县区主要分布于汉江河谷盆地及低山丘陵地区（图7b）。

1990—2018年秦巴山区土壤保持服务与居民福祉的耦合关系以“双增”变化为主（表3），有57.5%的县区属于土壤保持服务与居民福祉的“双增区”，42.5%的县区属于“福祉增—服务减反向区”。具体来看，1990—2010年土壤保持服务与居民福祉的耦合特征表现为双增变化为主，且同向变化强度趋于增强，“双增”县区占比由6.25%上升至100%；2010—2015年土壤保持服务与居民福祉以反向变化为主，所有县区均为“福祉增—服务减反向区”；2015—2018年土壤保持与居民福祉的耦合关系又以“双增”模式为主，“双增”县区占比高达91.25%。

表3 1990—2018年秦巴山区土壤保持与居民福祉耦合关系

Table 3 Coupling relationship between soil maintenance and residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018 (%)

时间段/年	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2018	1990—2018
双增区	6.25 (5)	56.25 (45)	68.75 (55)	100.00 (80)	0	91.25 (73)	57.50 (46)
双减区	15.00 (12)	2.50 (2)	0	0	0	2.50 (2)	0
福祉增—服务减反向区	73.75 (59)	37.50 (30)	25.00 (20)	0	100.00 (80)	1.25 (1)	42.50 (34)
福祉减—服务增反向区	5.00 (4)	3.75 (3)	6.25 (5)	0	0	5.00 (4)	0

从空间分布来看（图9），1990—2018年土壤保持服务与居民福祉的“双增区”主要分布于伏牛山及周边地区、豫西丘陵平原交错带和秦岭山区西部。其中，1990—2010年土壤保持与居民福祉的“双增”县区大幅扩张，由陇南西部山区扩张至秦巴山区全域；2010—2015年秦巴山区全域均转变为“福祉增—服务减反向区”；2015—2018年“双增”县区又趋于扩张，除周至县、紫阳县和商洛市部分县区外，其他县区均为“双增区”。

2.3.3 固碳服务与居民福祉的时空耦合特征

1990—2018年秦巴山区碳储量呈“中间低，四周高”的分布格局，而居民福祉水平呈“南高北低”的分布格局。碳储量与居民福祉“双高”的县区主要分布在大巴山区和三峡库区，“低碳储量—高居民福祉”县区主要分布于秦巴山区中心腹地（图7c）。

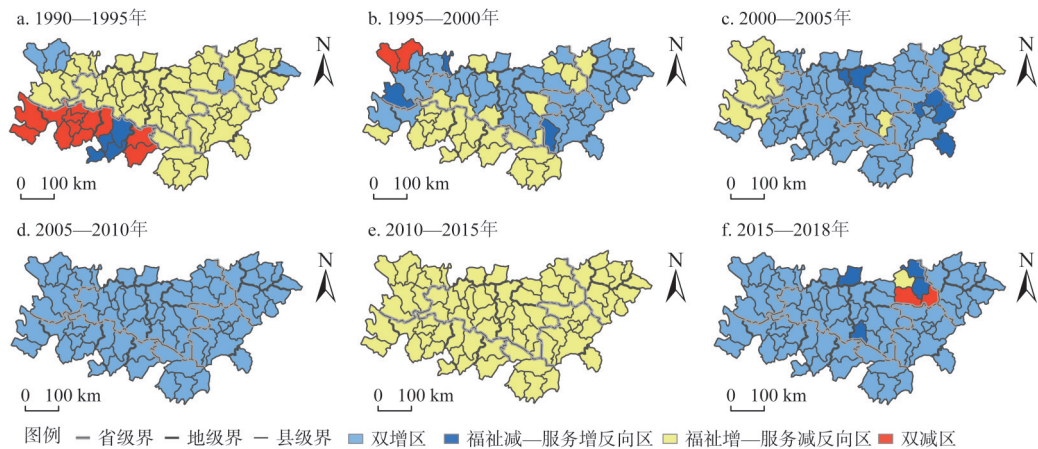


图9 1990—2018年秦巴山区土壤保持与居民福祉弹性系数演变的空间格局

Fig. 9 Spatial pattern of the evolution of elasticity coefficient of soil conservation and residents' well-being from 1990 to 2018

1990—2018年秦巴山区有37.5%的县区为固碳服务与居民福祉的“双增区”，62.5%的县区为反向变化区，固碳服务下降而居民福祉水平上升（表4）。具体看来，1990—2005年固碳服务与居民福祉的耦合特征表现为同向变化强度增强，“双增”县区占比由13.75%上升至62.5%。其中，1990—2000年固碳服务与居民福祉的耦合关系以“福祉增—服务减反向区”为主；2000—2005年以“双增区”为主。2005—2015年该区固碳服务与居民福祉的耦合特征表现为同向变化强度逐渐减弱，“双增”县区占比降至23.75%，降幅为62%。其中，2005—2010年固碳服务与居民福祉的耦合关系以“双增区”为主，而2010—2015年转为以“福祉增—服务减反向区”为主。2015—2018年固碳服务与居民福祉的耦合关系以反向变化为主，其中，同向变化强度略有增加，“双增”县区占比增至31.25%。

表4 1990—2018年秦巴山区固碳服务与居民福祉耦合关系

时间段/年	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2018	1990—2018
双增区	13.75 (11)	16.25 (13)	62.50 (50)	61.25 (49)	23.75 (19)	31.25 (25)	37.50 (30)
双减区	10.00 (8)	6.25 (5)	1.25 (1)	0	0	5.00 (4)	0
福祉增—服务减反向区	66.25 (53)	77.50 (62)	31.25 (25)	38.75 (31)	76.25 (61)	61.25 (49)	62.50 (50)
福祉减—服务增反向区	10.00 (8)	0	5.00 (4)	0	0	2.50 (2)	0

从空间分布来看（图10），1990—2018年“双增”县区不仅在大巴山区分散分布，还在伏牛山及周边县区集中连片分布。其中，1990—2005年固碳服务与居民福祉的“双增区”大幅扩张，由分散分布于陇南山区、汉中盆地部分县区扩张至陇南山区、大巴山区绵延区、秦岭山脉中段以及汉江河谷低山丘陵等地区，且连片分布。2005—2015年“双增”县区趋于收缩，收缩至四川北部、秦岭中部部分县区，且呈分布分散；2015—2018年“双增”县区略有扩张，且分散分布于陇南山区、四川盆地北部、南阳盆地、伏牛山区以及三峡库区。

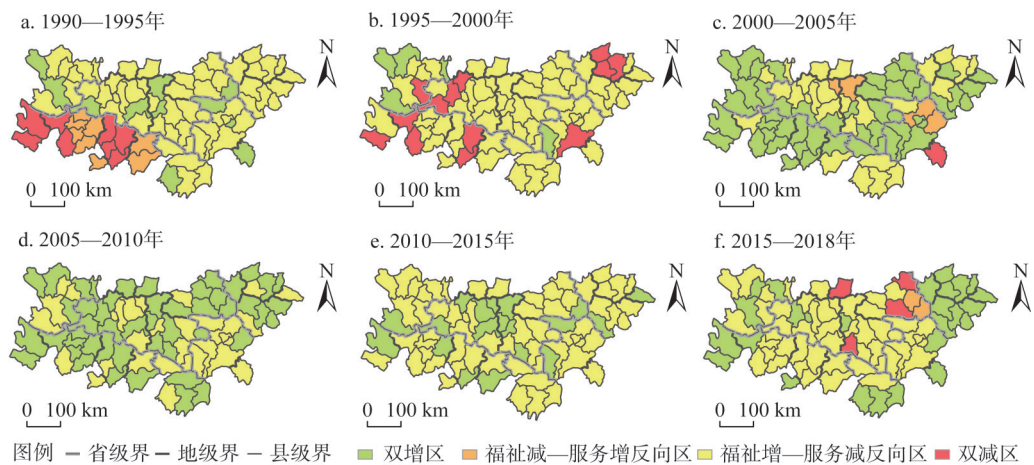


图10 1990—2018年秦巴山区固碳服务与居民福祉弹性系数演变空间格局

Fig. 10 Spatial pattern of the evolution of elasticity coefficient of carbon sequestration and residents' well-being in Qinba Mountains from 1990 to 2018

3 讨论

秦巴山区作为重要的集中连片贫困区，居民生计高度依赖自然生态系统。本文发现1990—2018年秦巴山区水源涵养量呈波动下降趋势，且呈“南高北低，由南向北递减”的空间分布特征。已有研究显示，植被覆盖、降雨量、蒸散量是影响水源涵养服务的重要因素^[36]。1990—2000年秦巴山区林地和草地面积共减少49748 hm²，降幅为0.32%；2000年实施退耕还林（草）工程以来，山区25°以上陡坡耕地退耕，植被覆盖有所增加，2000—2010年林地和草地面积增加56346 hm²，增幅为0.36%；但此后，受降雨、快速城镇化等因素的影响，尤其随着河谷盆地城市扩张速度较快，城市周边植被覆盖遭受严重破坏^[37]，使得该区植被覆盖面积又呈下降趋势，2010—2018年间林地和草地减少48565 hm²，降幅为0.31%。总体来看，秦巴山区全域的植被覆盖经历了“先增后降”的变化过程。刘宪锋等^[38]的研究表明因2010年后秦巴山区干旱事件的增加，植被覆盖度呈下降趋势，进一步佐证了本文研究结果。此外，秦巴山区近30年平均降雨量整体呈“南高北低，由南向北递减”的分布格局（图11a），同时潜在蒸散量呈山地区低、河谷盆地高的分布特征（图11b）；又因山地植被覆盖度高，对降雨的拦截能力较强，蒸散低，故山地区水源涵养服务高于河谷盆地。宁亚洲等^[39]在秦岭水源涵养研究中也发现水源涵养与降雨呈显著正相关，与蒸散量呈显著负相关，与森林覆盖度呈弱正相关。

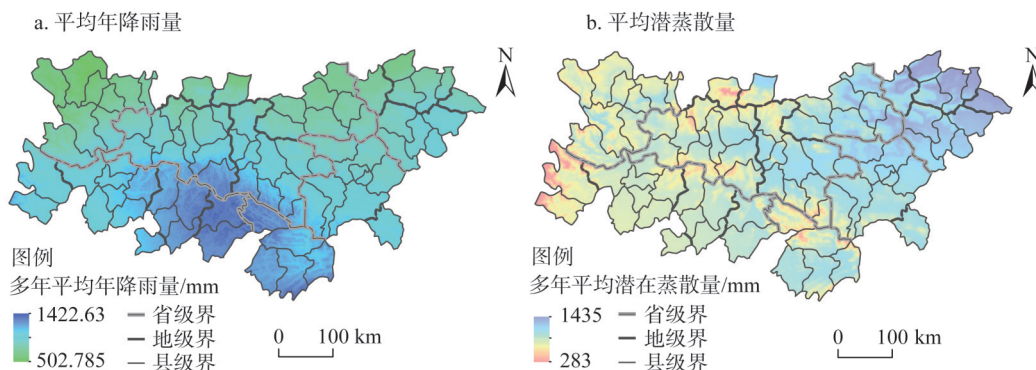


图11 1990—2018年秦巴山区多年平均年降雨量及多年平均潜蒸散量空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of annual mean precipitation and annual mean latent evapotranspiration in Qinba Mountains from 1990 to 2018

土壤保持量呈波动下降趋势，总体呈“西高东低”的空间分布特征，大巴山区、陕南山地和秦岭山地以高值区为主。这与秦巴山区降雨、地形、土壤和植被密切相关，降雨量越多，坡度越大，土壤裸露面积越大，导致水土流失潜力越大，但山地人为干扰少，植被覆盖度高，因此实际土壤保持量较高；河谷盆地地形平坦，但城镇化水平较高，建设用地面积增幅达72.96%，植被覆盖度较小，所以土壤保持量较低。饶恩明等^[40]研究也发现土壤保持功能较强的区域主要位于灌丛林和森林生态系统。

固碳服务总体呈微弱增加趋势，区域差异趋于扩大，且呈“中间低，四周高”的空间分布特征。该区山地区有大面积天然林分布，且随着退耕还林（草）工程的稳健推进，人工林、草地面积有所增加，但因退耕还林（草）方式和年限对固碳服务有较大影

响,使得固碳服务的增长具有一定的滞后性^[41]。此外,因河谷盆地建设用地明显扩张,植被覆盖降低,使河谷盆地区的固碳服务有所降低,从而使该区的固碳服务总体呈缓慢增长态势,且区域差异趋于扩大。孙滨峰等^[42]也发现森林地区的固碳能力较高,在人为干扰严重的城市蔓延区固碳能力则较低。

1990—2018年秦巴山区居民福祉增长比较显著,增幅高达220%,其区域差异趋于缩小,这与国家大力实施扶贫政策密切相关。近30年来,秦巴山区扶贫成效显著,尤其自2014年以来精准扶贫战略的实施,居民收入大幅提升,居民福祉显著提高^[43,44]。本文还发现,1990—2018年秦巴山区各生态系统服务与居民福祉的耦合关系以反向变化为主,尤以“福祉增—服务减反向区”占主导,说明居民福祉的提高是以生态系统服务功能的降低为代价的。耿甜伟等^[45]在陕南秦巴山区的研究也发现土地垦殖率、人均GDP与生态系统服务间均存在显著负相关关系。

由于调节服务和支持服务的变化对居民福祉的影响存在一定间接性,从而使生态系统服务与福祉的关系可能具有滞后效应,但受数据的限制,本文暂未考虑生态系统服务与福祉关系的滞后效应,在下一步的研究中,将重点探析生态系统服务变化对居民福祉产生的间接影响;在评估生态系统服务时,基于模型使用手册以及前人研究的成果,设置了InVEST模型中的部分参数,如生物物理表、汇流累积量阈值等,未来将进一步对秦巴山区进行实地监测,增强参数的精确性,从而提高生态系统服务评估结果的准确度;在分析生态系统服务与居民福祉的耦合关系时,首先按照县域边界将栅格化的生态系统服务物质质量统计成县域总量,然后经过极差标准化处理后与县域居民福祉水平进行耦合分析,该方法较难精确地反映县域内部生态系统服务与居民福祉的空间异质性;未来将进一步关注人文要素空间化的方法,开展更精细化的生态系统服务与居民福祉耦合关系研究,为贫困山区制定更精准的发展政策提供支持。

4 结论与建议

4.1 结论

厘清生态系统服务与居民福祉之间的复杂关系有助于推动贫困山区可持续发展。本文以秦巴山区为案例区,采用InVEST模型、弹性系数等方法,在评估秦巴山区水源涵养、土壤保持、固碳服务的基础上,分析了生态系统服务与居民福祉的时空格局以及二者的耦合关系时空变化特征,得出以下结论:

(1) 1990—2018年秦巴山区水源涵养量呈波动下降趋势,降幅为27%,且呈“南高北低,由南向北递减”的空间分布特征;土壤保持量也呈波动下降趋势,降幅为3.4%,总体呈“西高东低”的空间分布特征,其空间差异变动较大;而碳储量呈缓慢增长态势,增幅为2%,并呈“中间低,四周高”的空间分布特征,区域差异趋于扩大。

(2) 1990—2018年秦巴山区居民福祉呈上升趋势,增幅高达220%,总体呈“南高北低”的分布格局,且区域差异趋于缩小。同时其高水平区集聚态势趋于减弱,而低水平区集聚态势趋于增强。

(3) 1990—2018年秦巴山区水源涵养与居民福祉、固碳服务与居民福祉的耦合关系均以“福祉增—服务减反向区”为主,但前者由北向南转移,而在伏牛山以东、南阳盆地及其北部地区收缩,四川盆地北部扩张,呈集中连片分布。土壤保持服务与居民福祉

的耦合关系以“双增”型为主,其由陇南山地西部大幅扩张至除周至县、紫阳县和商洛市以外的所有县区。此外,在山区居民福祉和三种生态系统服务基本呈双增趋势,而河谷盆地居民福祉上升、三种生态系统服务则呈下降趋势。

4.2 建议

鉴于上述结论,根据生态系统服务与居民福祉的耦合类型分类施策,促进贫困山区的可持续发展,提出以下建议:

对于“福祉增—服务减反向区”,要严格遵守生态红线,实施25°以上的坡耕地退耕还林(草),加强森林生态系统的保护与建设,加大高标准基本农田建设力度,大力推进山水林田湖草生态保护与修复工程;对于“福祉减—服务增反向区”,应优化扶贫策略,精准施策,引导当地居民转变发展观念,增强区域发展内生动力,并根据秦巴山区独特的资源优势挖掘其潜在价值,促进生态旅游扶贫、电商扶贫等,增加经济产出;对于生态系统服务和居民福祉“双减区”,要严格遵守“三线”界限,完善生态补偿机制,因地制宜制定适合秦巴山区的补偿方案。同时,转变发展观念和经济增长方式,加快推进产业结构优化,降低对生态系统的干扰程度。控制城市开发边界,严格控制高耗能、高排放、低效益产业,建立绿色产业体系。

参考文献(References):

- [1] 郑德凤,王燕燕,刘晓星,等.基于生态系统服务的中国生态福祉区划时空格局与潜力分析.生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 645-653. [ZHENG D F, WANG Y Y, LIU X X, et al. Temporal-spatial pattern and potential analysis of China's ecological well-being zone based on ecosystem services. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(5): 645-653.]
- [2] LIQUETE C, CID N, LANZANOVA D, et al. Perspectives on the link between ecosystem services and biodiversity: The assessment of the nursery function. Ecological Indicators, 2016, 63: 249-257.
- [3] 张琦,余国培.联合国千年生态评估及其启示.世界地理研究, 2006, 15(4): 1-5. [ZHANG Q, YU G P. On the Millennium Ecosystem Assessment. World Regional Studies, 2006, 15(4): 1-5.]
- [4] 赵士洞,张永民.生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望.地球科学进展, 2006, 21(9): 895-902. [ZHAO S D, ZHANG Y M. Ecosystems and human well-being: The achievements, contributions and prospects of the Millennium Ecosystem Assessment. Advances in Earth Science, 2006, 21(9): 895-902.]
- [5] 张晓玲,吕晓.国土空间用途管制的改革逻辑及其规划响应路径.自然资源学报, 2020, 35(6): 1261-1272. [ZHANG X L, LYU X. Reform logic of territorial space use regulation and the response path of land spatial planning. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1261-1272.]
- [6] 巩杰,徐彩仙,燕玲玲,等.1997—2018年生态系统服务研究热点变化与动向.应用生态学报, 2019, 30(10): 3265-3276. [GONG J, XU C X, YAN L L. A critical review of progresses and perspectives on ecosystem services from 1997 to 2018. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3265-3276.]
- [7] COSTANZA R, ARGE, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(15): 253-260.
- [8] 王圣云,罗玉婷,韩亚杰,等.中国人类福祉地区差距演变及其影响因素:基于人类发展指数(HDI)的分析.地理科学进展, 2018, 37(8): 1150-1158. [WANG S Y, LUO Y T, HAN Y J, et al. Regional difference and determinants of human well-being in China: Based on the analysis of human development index. Progress in Geography, 2018, 37(8): 1150-1158.]
- [9] AGUADO M, GONZALEZ J A, BELLOTT K, et al. Exploring subjective well-being and ecosystem services perception along a rural-urban gradient in the high Andes of Ecuador. Ecosystem Services, 2018, 34: 1-10.
- [10] OTOIU A, TITAN E, DUMITRESCU R. Are the variables used in building composite indicators of well-being relevant? Validating composite indexes of well-being. Ecological Indicators, 2014, 46: 575-585.

- [11] KING M, RENÓ V, NOVO E. The concept, dimensions and methods of assessment of human well-being within a socio-ecological context: A literature review. *Social Indicators Research: An International and Interdisciplinary Journal for Quality-of-Life Measurement*, 2014, 116(3): 681-698.
- [12] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 等. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响. *资源科学*, 2017, 39(3): 533-544. [QIAO X N, ZHANG T, YANG Y J, et al. Spatial flow of ecosystem services and impacts on human well-being in the Weigan River Basin. *Resources Science*, 2017, 39(3): 533-544.]
- [13] JONES S K, BOUNDAOGO M, DECLERCK F A, et al. Insights into the importance of ecosystem services to human well-being in reservoir landscapes. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100987.
- [14] CIFTCIOGLU G C, EBEDI S, ABAK K. Evaluation of the relationship between ornamental plants: Based ecosystem services and human well-being: A case study from Lefke Region of North Cyprus. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 278-288.
- [15] WEI H, FAN W, WANG X, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [16] 徐建英, 王清, 魏建瑛. 卧龙自然保护区生态系统服务福祉贡献评估: 当地居民的视角. *生态学报*, 2018, 38(20): 7348-7358. [XU J Y, WANG Q, WEI J Y. Assessment of the contribution to human well-being by ecosystem services in Wolong Natural Reserve from the perspective of local communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7348-7358.]
- [17] 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. *生态学报*, 2018, 38(5): 1687-1697. [LIU J G, HUANG L, YAN L J. Influence of ecosystem services on human well-being: A case study of Tonglu county, Zhejiang province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1687-1697.]
- [18] 王博杰, 唐海萍. 人类福祉及其在生态学研究中的应用与展望. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(5): 697-702. [WANG B J, TANG H P. Human well-being and its applications and prospects in ecology. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(5): 697-702.]
- [19] YU Y Y, LI J, ZHOU Z Y, et al. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: How to respond, and where should be priority conservation?. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123264.
- [20] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系表达. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477. [YU Y Y, LI J, ZHOU Z X, et al. Multi-scale representation of trade-offs and synergistic relationship among ecosystem services in Qinling Daba Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5465-5477.]
- [21] 孙久文, 张静, 李承璋, 等. 我国集中连片特困地区的战略判断与发展建议. *管理世界*, 2019, 35(10): 150-159. [SUN J W, ZHANG J, LI C Z, et al. Strategic judgments and development suggestions on the development of poverty-stricken areas in China. *Management World*, 2019, 35(10): 150-159.]
- [22] 马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289. [MA L, LIU H, PENG J, et al. A review of ecosystem services supply and demand. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289.]
- [23] 徐昔保, 杨桂山, 江波. 湖泊湿地生态系统服务研究进展. *生态学报*, 2018, 38(20): 7149-7158. [XU X B, YANG G S, JIANG B. Progress in lake-wetland ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7149-7158.]
- [24] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676. [BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi province by InVEST model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.]
- [25] 潘翔, 吴娜, 徐中民, 等. 精准扶贫视角下生态系统服务与多维贫困耦合协调差异: 以甘肃秦巴山贫困核心区为例. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(7): 879-889. [PAN X, WU N, XU Z M, et al. Coordination difference between ecosystem service and multidimensional poverty under precise poverty alleviation standpoints: A case study of Gansu Qinba Mountain poverty-stricken core areas. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7): 879-889.]
- [26] 陈姗姗, 刘康, 李婷, 等. 基于InVEST模型的商洛市水土保持生态服务功能研究. *土壤学报*, 2016, 53(3): 800-807. [CHEN S S, LIU K, LI T, et al. Evaluation of ecological service function of soil conservation in Shangluo city based on InVEST model. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 800-807.]
- [27] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010. [LIU Y C, GAO X L, FU C, et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4002-4010.]

- [28] 黄甘霖, 姜亚琼, 刘志锋, 等. 人类福祉研究进展: 基于可持续科学视角. 生态学报, 2016, 36(23): 7519-7527. [HUANG G L, JIANG Y Q, LIU Z F, et al. Advances in human well-being research: A sustainability science perspective. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7519-7527.]
- [29] SUMMERS J K, SMITH L M, CASE J L, et al. A Review of the elements of human well-being with an emphasis on the contribution of ecosystem services. *AMBIO-A Journal of the Human Environment*, 2012, 41(4): 327-340.
- [30] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究: 以安定区为例. 生态学报, 2019, 39(2): 637-648. [LIU D Q, ZHANG J Q, GONG J, et al. Spatial and temporal relations among land-use intensity, ecosystem services, and human well-being in the Longzhong Loess Hilly Region: A case study of the Anding district, Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 637-648.]
- [31] YANG H B, DIETZ T, WU Y, et al. Changes in human well-being and rural livelihoods under natural disasters. *Ecological Economics*, 2018, 151: 184-194.
- [32] 赵筱青, 李思楠, 普军伟, 等. 云南喀斯特山区国土空间优化分区与管控. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2339-2357. [ZHAO X Q, LI S N, PU J W, et al. Optimal partitions and control of territorial space in karst mountainous areas of Yunnan province. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2339-2357.]
- [33] 胡雪瑶, 张子龙, 陈兴鹏, 等. 县域经济发展时空差异和影响因素的地理探测: 以甘肃省为例. 地理研究, 2019, 38(4): 772-783. [HU X Y, ZHANG Z L, CHEN X P, et al. Geographic detection of spatial-temporal difference and its influencing factors on county economic development: A case study of Gansu province. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 772-783.]
- [34] 戈大专, 龙花楼, 张英男, 等. 中国县域粮食产量与农业劳动力变化的格局及其耦合关系. 地理学报, 2017, 72(6): 1063-1077. [GE D Z, LONG H L, ZHANG Y N, et al. The pattern and coupling relationship of county grain yield and agricultural labor change in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 1063-1077.]
- [35] 赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1471-1482. [ZHAO X Y, LIU J H, WANG R, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1471-1482.]
- [36] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1728-1743. [LIU D Q, CAO E J, ZHANG J Q, et al. Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang Watershed of Gansu. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1728-1743.]
- [37] 章金城, 周文佐. 2006—2015年秦巴山区植被光合有效辐射吸收比例的时空变化特征. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1453-1463. [ZAHNG J C, ZHOU W Z. Spatial-temporal changes of fraction of absorbed photosynthetically active radiation in Qinling-Daba Mountains from 2006 to 2015. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1453-1463.]
- [38] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报, 2015, 70(5): 705-716. [LIU X F, PAN Y Z, ZHU X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716.]
- [39] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 等. 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素. 生态杂志, 2020, 39(9): 3080-3091. [NING Y Z, ZHANG F P, FENG Q, et al. Temporal and spatial variation of water conservation function in Qinling Mountain and its influencing factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(9): 3080-3091.]
- [40] 饶恩明, 肖焱. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(24): 8741-8749. [RAO E M, XIAO Y. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8741-8749.]
- [41] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059. [FU B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [42] 孙滨峰, 赵红, 逯非, 等. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(14): 4975-4983. [SUN B F, ZHAO H, LU F, et al. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 4975-4983.]
- [43] 李小云, 于乐荣, 唐丽霞. 新中国成立后70年的反贫困历程及减贫机制. 中国农村经济, 2019, (10): 2-18. [LI X Y, YU L R, TANG L X. The process and mechanism of China's poverty reduction in the past seventy years. *Chinese Rural Economy*, 2019, (10): 2-18.]

- [44] 陈志钢, 毕洁颖, 吴国宝, 等. 中国扶贫现状与演进以及2020年后的扶贫愿景和战略重点. 中国农村经济, 2019, (1): 2-16. [CHEN Z G, BI J Y, WU G B, et al. Post-2020 rural urban integrative poverty reduction strategy: Development status, evolution, new vision and key areas. Chinese Rural Economy, 2019, (1): 2-16.]
- [45] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727. [GENG T W, CHEN H, ZHANG H, et al. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7): 1714-1727.]

Spatio-temporal changes of the coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being in Qinba Mountains Area

LI Wen-qing, ZHAO Xue-yan, DU Yu-xuan, MA Ping-yi

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Protecting ecosystems and improving the well-being of people are at the core of achieving the UN 2030 Sustainable Development Goals. Based on the analysis of the spatio-temporal evolution characteristics of ecosystem services and residents' well-being in Qinba Mountains, this paper reveals the spatio-temporal coupling relationship between ecosystem services and residents' well-being using the elastic coefficient. The results showed that: (1) The total water conservation and soil conservation showed a fluctuating decreasing trend, while the total carbon storage showed a slow increasing trend, and the ecosystem services showed different spatial differentiation characteristics from 1990 to 2018. (2) The well-being of residents is on the rise, with an increase of 220%, and the distribution presents a pattern of "high in the south, but low in the north". (3) At the county level, due to the differences in resource endowment and economic level, the three ecosystem services and residents' well-being are obviously not coordinated. Among them, the coupling relationship between water conservation, carbon sequestration services and residents' well-being was dominated by "welfare increase - service decrease", accounting for 88.75% and 62.5%, respectively. However, the coupling relationship between soil conservation services and residents' well-being was dominated by "double increase", accounting for 57.5%. At the same time, the reverse changes of ecosystem services and residents' well-being were mainly distributed in the Hanjiang River valley basin and the central part of the Qinling Mountains. The results of this study can provide a decision-making basis for promoting the coordinated development of ecosystem services and residents' well-being in poverty-stricken mountainous areas.

Keywords: Qinba Mountains Area; ecosystem services; residents' well-being; InVEST model; coupling relationship