

甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系

钱彩云, 巩 杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成

(兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 甘肃白龙江流域是长江上游主要的水源涵养区 and 环境脆弱区, 近几十年来高强度的人类活动加剧了生态环境压力, 因此开展白龙江流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究对该区域的可持续发展具有重要意义。本文通过生态系统服务变化指数(ESCI)、空间自相关、相关系数法, 定量分析了1990-2014年甘肃白龙江流域生态系统服务时空变化过程、空间集聚特征及生态系统服务间的权衡与协同关系。结果表明: ① 1990-2014年间产水量、碳储量、土壤保持和农作物生产4种典型生态系统服务的ESCI值变化迥异, 空间分布各具特色, 具体表现为: 产水量ESCI极值变化超过1倍且前后两时段(1990-2002年, 2002-2014年)分布格局有较大出入, 而两时段内的碳储量ESCI值变化相同, 分布格局也相似, 土壤保持ESCI值两极化趋势较农产品生产不明显, 但这两者后一时段均与前一时段的ESCI分布相反; ② 4种典型生态系统服务存在空间自相关, 局部上正相关类型“组团”出现, 集聚性较强, 负相关类型散布, 集聚性低, 空间异质性显著; ③ 两种供给服务(产水量与农作物生产)呈负相关的权衡关系, 两种调节服务(碳储量与土壤保持)呈正相关的协同关系, 不同的供给和调节服务之间关系既有权衡也有协同关系; ④ 数值关系上, 不同生态系统服务之间的权衡/协同关系在Moran's I 和相关系数上表现不一; 空间格局上, 生态系统服务间的权衡/协同关系异质性显著。

关键词: 生态系统服务; 时空变化; 权衡与协同; 甘肃白龙江流域

DOI: 10.11821/dlxb201805007

1 引言

生态系统服务(Ecosystem Services)是指人类直接或间接从生态系统中获取的收益^[1], 是人类—自然环境耦合系统的研究重点^[2]。生态系统服务研究涉及全球、国家、省市、县区、流域等不同空间尺度, 以及森林、草地、农田、湿地、海洋等多种生态系统类型。生态系统服务时空变化是生态系统服务研究的重要组分, 也是全面分析区域生态系统服务状况及其作用机制的基础。早期生态系统服务时空变化研究多是静态或截面的^[3], 3S技术的引入推动了多时段生态系统服务及其价值评估, 生态系统服务制图也得到了快速发展。生态系统服务空间制图是改善人类福祉、确保生态系统服务可持续供应等政策与措施制定的前提^[4], 可为生态系统可持续管理提供定量化信息^[5]。当前多数生态系统服务评价和制图研究多集中在大尺度, 这在一定程度上制约了评价结果在中小尺度的应用^[6]。因此, 急需强化中小尺度的生态系统服务评估、制图与变化研究, 为区域自然—社会—经济复合系统协调发展提供科学支撑。

收稿日期: 2017-07-03; 修订日期: 2018-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771196, 41271199) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771196, No.41271199]

作者简介: 钱彩云(1992-), 女, 安徽安庆人, 硕士, 研究方向为土地利用变化与生态评价。E-mail: qiancy15@lzu.edu.cn

通讯作者: 巩杰(1975-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态学、生态系统服务, 环境遥感与生态评价方面的科研与教学工作。E-mail: jgong@lzu.edu.cn

正确认知生态系统服务之间的关系,是开展多种生态系统服务可持续管理决策的前提,有助于人类福祉的全面提升^[7]。生态系统服务分类和评估量化了不同生态系统的经济效益和生态效益,人们认识到生态系统服务在类型和数量上均存在着权衡或协同关系^[8]。生态系统服务权衡是指两种生态系统服务此消彼长的情形^[9],也称为冲突或竞争关系^[10];协同是指两者同增同减的情形^[8]。不同时空尺度下的不同类型生态系统服务之间权衡/协同关系各异,这推动了生态系统服务之间的相互作用和权衡管理决策研究^[11]。Dymond等^[12]发现造林可以控制土壤侵蚀且增加碳汇,但会损失产水量;Larsen等^[13]对全球3500个受威胁物种、碳储存及淡水供应进行了权衡分析;Howe等^[14]分析了全球生态系统服务被用于人类福祉的大量案例成果,发现权衡记录几乎是协同增效的3倍,“预设双赢”不具有普遍意义,权衡更能实现理想的结果;饶胜等^[15]、Zhou等^[16]、杨晓楠等^[17]分别利用极值法、玫瑰图、生产可能性边界法、相关系数法等开展了生态系统服务研究,探讨了不同生态系统服务之间及不同生态系统类型之间的权衡或协同关系。可见,生态系统服务的权衡与协同研究不仅有助于深入理解不同服务类型之间相互关联的作用因子及机制,更有助于准确分析比较它们之间的关系,指导人类更加合理地开发利用自然资源^[18]。生态系统服务理念正在被纳入决策与管理^[19],已成为资源使用和管理决策的有效工具之一。

流域是自然界中一个具有明显物理边界且综合性强的独特地理单元。世界是由大大小小的不同流域所构成的,无论你在哪里,都在某一流域内^[19],区域生态环境问题都与流域资源破坏和不合理管理有关,从流域的角度来解决环境问题并实现社会经济可持续发展是一条更为有效的系统综合途径。可见,流域既是区域生态、经济和社会发展等复杂问题研究的焦点,也是地球系统科学的主要研究对象之一^[20],当前,中国流域尺度的生态环境监测网络尚不健全,成果较为零散,亟待开展系统与综合研究。近年来,甘肃白龙江流域生态学研究正在引起关注,已有研究多侧重于生态系统服务评估及其影响因素分析^[21-22],对生态系统服务变化的表征多是通过不同年份或时间段的服务量差异来体现,缺少量化工具进行统一描述,涉及生态系统服务间关系研究的报道较为少见。本文基于3S和生态系统服务功能与权衡综合评价模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff, InVEST)开展流域生态系统服务制图,借助生态系统服务变化指数(Ecological services change index, ESCI)来表征流域1990-2014年间生态系统服务时空变化,利用SPSS相关性分析流域生态系统服务之间数值上的权衡与协同关系,并引入双变量空间自相关方法探讨流域生态系统服务之间空间上的权衡与协同关系,充分揭示权衡协同关系在空间上的异质性,研究可为理解流域生态系统服务时空变化与可持续管理提供科学依据。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

白龙江流域位于甘肃省和四川省境内,甘肃段主要由迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区 and 文县组成,共5个县区,人口约为123.77万人(2014年),是一个多民族聚集区。流域介于32°36'N~34°24'N和103°00'E~105°30'E之间,总面积约为1.84万km²。地处内陆,属东亚季风区,年均温2~15℃,年均降水500~900mm。区域地势西北高东南低,海拔568~4866m,地貌景观多样,植被群落种类繁多,素有“一山有四季、十里不同天”之说。由于受特殊的地形地貌、多发自然灾害和自然资源限制,是甘肃省“十二五”农村扶贫重点区。而近年来,逐渐形成了林果、茶业、特色农产品、矿业、旅游业

等多元特色产业体系,社会经济得到了一定的发展。此外,研究区森林资源丰富,是甘肃省主要的材林基地和矿产地之一。

2.2 数据来源

研究数据主要来源于森林资源二类调查数据、研究区邻近的 18 个气象站点 1990-2014 年日降水数据、甘肃省第二次土壤普查资料、《甘肃土壤》、数字高程 DEM 数据、统计数据及野外实测土壤碳密度数据等。分别以 1990 年、2002 年、2014 年 7-8 月的 Landsat TM/ETM+ 遥感影像作为数据源来获得研究区的土地利用类型,利用 ENVI 4.7 和 ArcGIS 10.2 对影像进行处理,得到土地利用类型空间分布图(经过实地验证与比对,总体分类精度为 84.68%),并建立土地利用类型属性数据库。

2.3 生态系统服务的计算

本文主要基于 InVEST 模型或模块原理,计算产水量、碳储量、土壤保持量及农作物生产 4 项典型生态系统服务。

2.3.1 产水量 InVEST 模型中产水模块基于水量平衡原理,同时考虑气候、地形、植被、土壤等因素,以栅格为单元定量评估不同景观组分的产水能力。其计算公式为:

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

$$\frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} = 1 + \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} - \left[1 + \left(\frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} \right)^W \right]^{1/W} \quad (2)$$

$$PET_{(x)} = K_{c(x)} \times ET_{O(x)} \quad (3)$$

$$W_{(x)} = \frac{AWC_{(x)} \times Z}{P_{(x)}} + 1.25 \quad (4)$$

式中: $Y_{(x)}$ 为某景观类型的年产水量 (mm); $AET_{(x)}$ 为栅格单元的年实际蒸散发量 (mm); $P_{(x)}$ 为栅格单元的年降水量 (mm); $PET_{(x)}$ 为栅格单元 x 的潜在蒸散量; $K_{c(x)}$ 为作物蒸散发系数; $ET_{O(x)}$ 为参考 (作物) 蒸散量; $AWC_{(x)}$ 为植物可利用含水量; $W_{(x)}$ 为经验参数; Z 为 zhang 系数^[23]。

2.3.2 碳储量 InVEST 模型中碳储量以各土地利用类型或植被类型为评估单元,以 4 种碳库的平均碳密度乘以各评估单元的面积来评估区域生态系统碳储量。其计算公式如下:

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

式中: C_{tot} 为总碳储量 (t/hm^2); C_{above} 为地上生物碳储量; C_{below} 为地下生物碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量; C_{dead} 为枯落物碳储量。

2.3.3 土壤保持 土壤保持量计算是基于沉积物保留模块开展的,该模块在通用土壤流失方程的基础上,考虑了地块本身拦截上游沉积物的能力,使得计算结果更加科学准确。

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (6)$$

$$USLE = R \times K \times LS \times P \times C \quad (7)$$

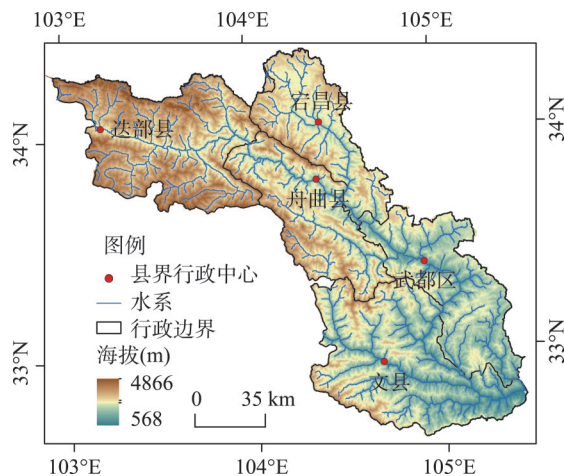


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of the research area

$$SD = RKLS - USLE \quad (8)$$

式中: $RKLS$ 是基于研究区特定地貌气候条件及裸地情形下的潜在土壤侵蚀量 (t); $USLE$ 是考虑了管理、工程措施的实际土壤侵蚀量 (t); SD 为土壤保持量 (t); R 为降雨侵蚀因子 $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子 $t \cdot hm^2 \cdot h / (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为土壤保持措施因子。

2.3.4 农作物生产 InVEST 模型中农作物生产模块尚处于测试阶段, 不能完全使用, 因此本文参考 InVEST 模型农作物生产模块的计算原理^[24], 以单位土地利用面积上的农作物产量来表征农作物生产功能。

$$F_{(x)} = \frac{CY_{(x)}}{A_{(x)}} \quad (9)$$

式中: $F_{(x)}$ 为农作物生产功能 (t/hm^2); $CY_{(x)}$ 是行政区内农作物产量 (t); $A_{(x)}$ 是行政区面积 (hm^2)。

2.4 生态系统服务变化指数 ESCI 借助生态系统服务变化指数 $ESCI$ ^[25] 对各项生态系统服务的变化进行刻画, 用以指征每项生态系统服务的相对增益或损失。ESCI 值为 0 时表明生态系统服务没有变化, 即无增益无减损; 当为负值时表示有减损; 为正值时表示有增益。其计算公式为:

$$ESCI_x = \frac{ES_{CUR_x} - ES_{HIS_x}}{ES_{HIS_x}} \quad (10)$$

式中: $ESCI_x$ 代表单个生态系统服务变化指数; ES_{CUR_x} 代表最后状态下的生态系统服务; ES_{HIS_x} 代表初始状态下的生态系统服务。

3 研究结果

3.1 生态系统服务变化状况

3.1.1 生态系统服务的时间变化 分别以 1990 年和 2002 年数据作为最初生态系统服务状况; 相应地, 以 2002 年和 2014 年数据为最终生态系统状况, 得到 1990-2002 年和 2002-2014 年两时段的 4 种生态系统服务的 ESCI (表 1)。由表 1 知, 产水量、碳储量、土壤保持和农作物生产的 ESCI 变化迥异。

从损益变化来看, 除农作物生产在 2002-2014 年间为完全增益状态外, 其他 3 种服务在 1990-2002 年及 2002-2014 年间均有增减。从 ESCI 数值来看, 产水量在两个时段的 ESCI 最大值相差超过 1 倍, 表明局部地区的产水服务变化加剧; 碳储量 ESCI 值在两个时段内几近相同, 表明流域内的碳储量变化比较均匀; 而土壤保持 ESCI 极值均有变化且趋向两极分化 (即最大值变大, 最小值变小), 这种两极分化趋向表明流域土壤保持增益、减损的异质性增强; 农作物生产 ESCI 值的变化表明, 流域农作物生产不断增强, 增益状态发展显著。

利用 GIS 技术对流域的产水量、碳储量、土壤保持及农作物生产的 ESCI 进行空间化制图, 得到不同研究时段内 4 种生态系统服务 ESCI 的空间变化分布情况 (图 2)。其中, 产水量在不同时期内 ESCI 分布格局有较大出入, 流域中部从 1990-2002 时段的减损状态转变为 2002-2014 时段的增益状态, 程度明显, 而南北两端局地减损突出 (图 2a、2e)。

表 1 1990-2014 年不同研究时段甘肃白龙江流域生态系统服务变化指数

Tab. 1 The range of ESCI from 1990 to 2014 of Bailongjiang watershed (BLJW) in Gansu

	产水量	碳储量	土壤保持	农作物生产
1990-2002 年	[-1, 1.93]	[-1, 1.12]	(-0.27, 0.51)	(-0.32, 0.20)
2002-2014 年	[-1, 4.09]	[-1, 1.12]	(-0.43, 0.78)	(0.59, 4.26)

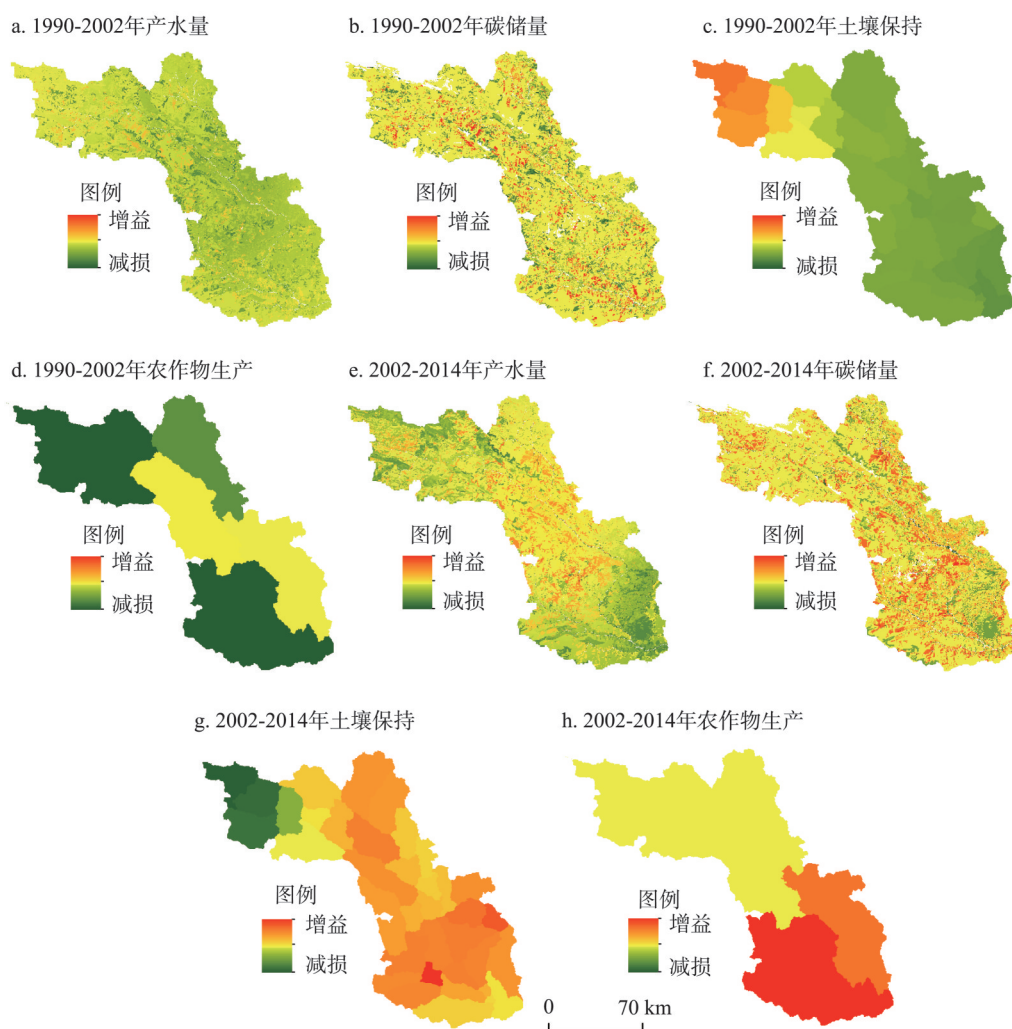


图2 不同研究时段内甘肃白龙江流域ESCI空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of ESCI from 1990 to 2014 of BLJW in Gansu

碳储量无论是总体还是局部的分布格局大致相似,但在2002-2014年流域内部的增益范围相较于1990-2002时段更大(图2b、2f)。土壤保持在前后两时段表现出完全相反的分布格局:1990-2002年间仅流域北部表现出增益状况且增益不明显,中部和南部均表现为减损,越往南部减损加剧;2002-2014年间,流域北部转增益为减损,同时流域中部和南部转减损为增益,转变幅度均大于前一时段,流域南部的局部地区增益显著(图2c、2g)。农作物生产在流域北部和南部表现较为一致的变化态势,即南、北部均表现出增益的状态且变化显著,而中部地区则维持着不明显的增益状态(图2d、2h)。

3.2 生态系统服务的空间集聚特征

生态系统服务变化指数ESCI不仅能反映生态服务的时序变化,也能反映某一种特定生态服务变化的方向,可较全面地指征生态系统服务在时间尺度上的变化状况。本文基于ArcGIS 10.2空间统计的局部自相关模块,以流域内行政区的乡镇范围为基本单元,开展流域生态系统服务空间特征分析,反映空间尺度上的生态系统服务变化状况。

3.2.1 流域生态系统服务的局部自相关分析 由于自然环境演化、社会经济发展以及人类

活动的干扰等作用,空间自相关在整个研究区并不一定是均质的,可能随着空间位置的不同发生变化。因此本文在4种生态系统服务均存在全局空间自相关Moran's I 指数(表2)的前提下,基于绘制LISA图进行局部自相关分析,探究其是否存在空间异质性。

表2 甘肃白龙江流域生态系统服务的Moran's I 估计值
Tab. 2 Estimation of Moran's I of ecosystem services of BLJW in Gansu

	产水量	碳储量	土壤保持	农作物生产
1990年	0.266	0.150	0.584	0.175
2002年	0.300	0.186	0.598	0.198
2014年	0.189	0.214	0.570	0.588

甘肃白龙江流域4种生态系统服务呈现出差异化的集聚特征,空间异质性显著。与1990年相比,2002年流域产水服务显著高高集聚单元由7个上升到12个,集中区域从流域南部扩增至西北部(图3a、3b),显著低低集聚单元无论是数目还是集中区域都大致相同(图3a、3b);2014年产水服务显著高高集聚单元上升到14个,集中区域转移到西北部和西南部(图3a、3c),显著低低单元减少到4个,集中区域有所缩减(图3a、3c),未发生明显转移;2002年流域碳储量显著高高集聚单元由1990年的6个上升到11个,集中区域从流域中部扩张至西北部(图3d、3e),显著低低集聚单元变化不大;2014年碳储量显著高高集聚单元为10个,集中区域与2002年大致相似,即主要分布在流域西北部和中部(图3e、3f),而显著低低单元与2002年区别不大;土壤保持功能在1990年、2002年和2014年中,显著高高集聚单元数目上没有明显变化,但2002年显著高高集聚单元分布区域主要为流域西北部和南部(图3h),这与1990年及2014年都集中在流域南部的分布格局差别很大(图3g、3i),显著低低集聚单元在数目和分布区域均无明显变化(图3g、3h、3i);农作物生产的显著高高集聚单元持续增长,且2014年的增长幅度较大(2014年数目多出近1倍),集聚区域由流域北部转移到流域东南部分(图3j、3k),再扩张到东南部的大部分地区(图3k、3l);2002年显著低低集聚单元数目(5个)与1990年持平,至2014年数目增长至8个,但集中区域范围变化不大,主要在流域中部和北部的少数地区(图3j、3k、3l)。

综上所述,甘肃白龙江流域4种典型生态系统服务在空间分布上呈现出一定的集聚性规律,正相关类型(高高集聚和低低集聚)“组团”,集聚性较强;负相关类型(高低集聚和低高集聚)散布,集聚性低。

3.2 典型生态系统服务的权衡/协同关系

3.2.2 权衡/协同关系的数值体现 以乡镇单元为基础,进行生态系统服务的分区统计,再将其数值进行标准化(Z-score),并计算整个研究时段(1990-2014年)的变化量,最后将变化值导入SPSS中进行双变量相关性分析,从而得到产水量、土壤保持、碳储量及农作物生产之间的相关性(表2)。相关性分析表明:流域产水量与土壤保持、产水量与碳储量、产水量与农作物生产之间均有较强的权衡协同关系(相关系数绝对值最高达0.621);而土壤保持、碳储量和食品供给这3种服务相互之间则均呈较弱的权衡关系(相关系数最大绝对值仅为0.169)(表2)。具体来讲:产水量与土壤保持、产水量与碳储量都为正相关,均呈相互增益的协同关系(相关系数分别为0.551和0.621),主要是由于水是联系和控制生态系统类型、结构、过程和功能的关键要素之一^[26],稳定的水源供给也是维护流域其他生态系统服务的基础^[19];农作物生产与产水量、农作物生产与土壤保持及农作物生产与碳储量、土壤保持和碳储量均为负相关,呈此消彼长的权衡关系(相关系数分别为0.311、0.169、0.163和0.019),其中农作物生产与产水量的权衡关系更为突出,因此,在制定区域农业生产与发展政策需要更加谨慎。根据MA的分类体系^[1],产水量和农作物生产属于供给型服务,碳储量和土壤保持属于调节型服务。从表2可知,流

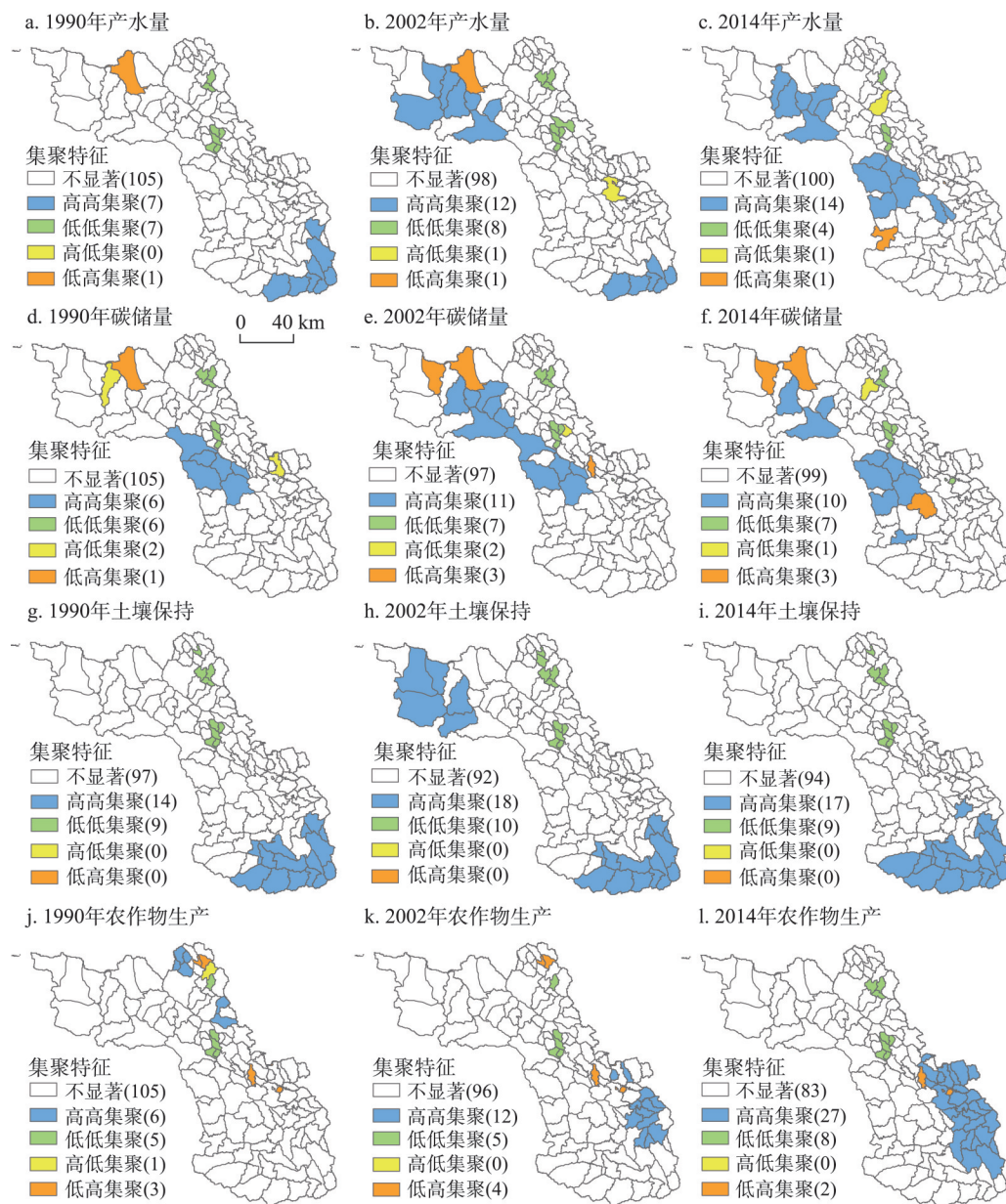


图3 1990-2014年甘肃白龙江流域4种典型生态系统服务局部LISA图

Fig. 3 LISA cluster map of four typical ecosystem services from 1990 to 2014 of BLJW in Gansu

域的两种供给服务呈负相关的权衡关系，此消彼长；而两种调节服务呈正相关的协同关系，共同增益；但不同的供给和调节服务之间关系既有权衡也有协同关系，这说明不同服务产生机制各异，相互作用方向不同。

3.2.3 权衡/协同关系的空间表达 为了解流域内不同生态系统服务在空间上的权衡/协同关系，本文以乡镇为基础单元，将生态系统服务分区统计结果赋值到矢量图层中，后导入GeoDA软件，利用Weight模块建立空间权重矩阵，并在Space模块进行生态系统服务双变量局部空间自相关分析，分析结果的显著度均高于99%。

对比SPSS相关性分析（表3）和Moran's *I*指数（表4）可知，甘肃白龙江流域4种典型生态系统服务间数值权衡协同关系是：产水量与农作物生产时空上均呈权衡关系；碳储量—产水量与土壤保持—产水量在时空上均呈现协同关系；而土壤保持—农作物生产、碳储量—农作物生产在时间上均表现为弱权衡关系，空间上亦均为协同关系；碳储量—土壤保持时空表现均较为模糊，权衡/协同关系不明。

表3 甘肃白龙江流域4种生态系统服务相关关系
Tab.3 The relationship among ecosystem services of BLJW in Gansu

生态系统服务	产水量	土壤保持	碳储量	农作物生产
产水量	1.000			
土壤保持	0.551**	1.000		
碳储量	0.621**	-0.019	1.000	
农作物生产	-0.311**	-0.169	-0.163	1.000

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关。

表4 甘肃白龙江流域4种生态系统服务局部自相关 Moran's *I*
Tab.4 The Bivariate Local Moran's *I* among ecosystem services of BLJW in Gansu

生态系统服务	产水量—农作物生产	土壤保持—农作物生产	碳储量—农作物生产
Moran's <i>I</i> 指数	-0.494	0.075	0.063
生态系统服务	碳储量—产水量	土壤保持—产水量	碳储量—土壤保持
Moran's <i>I</i> 指数	0.329	0.135	0.005

在双变量空间自相关分析中，高高集聚及低低集聚均表示协同关系，高低集聚及低高集聚均表示权衡关系。由图4可知，生态系统服务间的权衡/协同关系空间异质性显著，具体为：产水量—农作物生产与碳储量—农作物生产权衡均表现在武都南部、东北部、迭部中部及宕昌南部，另宕昌北部表现为产水量—农作物生产的权衡；协同均表现在武都西北部及迭部北部，宕昌北部表现为碳储量—农作物生产的协同；土壤保持—农

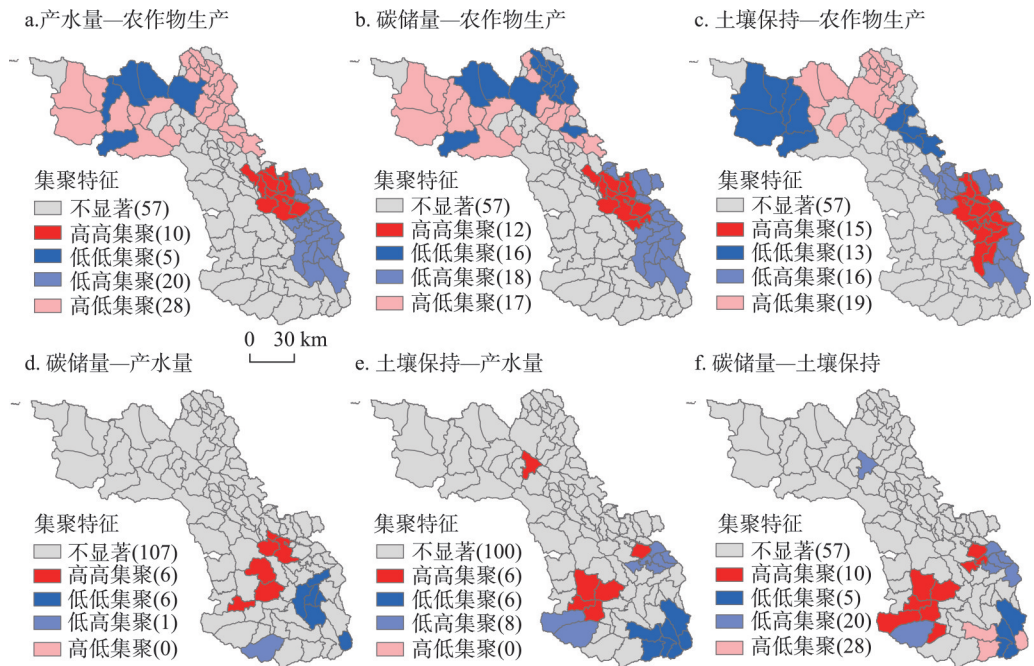


图4 甘肃白龙江流域4种典型生态系统服务间局部LISA图
Fig. 4 LISA cluster map between two typical ecosystem services of BLJW in Gansu

作物生产权衡表现在武都北部、南部、宕昌大部分地区及迭部东北部,协同表现在武都中部、迭部县大部分地区及宕昌县南部;碳储量—产水量空间上主要表现为协同关系,分布在武都西北部、南部及文县北部;土壤保持—产水量权衡表现在武都中部及文县西南部,协同表现在文县南部及北部地区;碳储量—土壤保持权衡表现为武都中北部及文县南部,协同表现为文县西部及东南部等。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 1990-2014年间,甘肃白龙江流域产水量、碳储量、土壤保持和农作物生产这4种典型生态系统服务的ESCI值域变化迥异:其各自的ESCI值域表现出持平、两级分化和倍增等不同变化趋势;且空间分布各具特色:①相同研究时段内,不同生态系统服务的ESCI分布格局不同;②不同研究时段内,相同生态系统服务的ESCI分布不同。

(2) 流域产水量、碳储量、土壤保持和农作物生产4种生态系统服务在全球上均呈现明显的集聚特征,其中产水量和土壤保持的Moran's I 先增后减,碳储量及农作物生产服务的Moran's I 均呈增长趋势。局部呈现出差异化的集聚特征且空间分布格局变化明显,4种典型生态系统服务的显著高高及显著低低集聚单元数目均有增减变化,集中区域的分布范围或位置上亦有变化。

(3) 流域的两种供给服务(即产水量与农作物生产)呈负相关的权衡关系,两种调节服务(即碳储量及土壤保持)呈正相关的协同关系,且不同的供给和调节服务之间关系既有权衡也有协同关系,具体来看,产水量与土壤保持、产水量与碳储量和产水量与农作物生产之间均呈较强的权衡协同关系,土壤保持、碳储量和农作物生产之间则均呈较弱的权衡关系。

(4) 空间格局上,生态系统服务间的权衡/协同关系异质性显著;数值关系上,产水量—农作物、碳储量—产水量、土壤保持—产水量4种服务在Moran's I 指数和相关性系数上表现一致,土壤保持—农作物生产、碳储量—农作物生产表现相反,碳储量—土壤保持表现均较为模糊,权衡/协同关系不明。

4.2 讨论

近25年来,由于人类活动干扰、自然灾害频发、退耕还林还草政策的实施等,白龙江流域生态系统结构已经发生了重大变化:相较于1990年,2014年流域的耕地面积减少了34.84%,林地面积增加了30.79%,草地减少了16.56%,居民工矿及城市建设用地增加了66.57%,水域增加了90.87%,未利用地减少了11.88%。生态系统结构的变动在很大程度上会导致生态系统服务功能发生相应的转变^[27]。

人类活动可通过土地利用直接或间接地改变景观格局,并有研究表明^[22]:除与农作物生产服务呈正相关关系外,其他生态系统服务与人类活动均为负相关关系。且白龙江流域灾害多发,使得景观结构稳定性下降,破碎化程度加剧^[28],降低流域生态系统服务,而气温、降水等气候因子在不同尺度、不同区域、不同程度上都影响着生态系统服务。因此流域4项典型生态系统服务ESCI的值域和空间分布在两个时段均表现出不同特征,即生态系统服务减损/增益状态发生改变,主要受土地利用变化、人类活动、气温、降水以及自然灾害等因素的共同影响。

研究表明,甘肃白龙江流域的4种典型生态系统服务间权衡大于协同,这印证了“发展中国家土地释放策略比土地共享更适合”的观点,即可通过生态系统管理来提高单

位面积农作物生产能力,就能释放出部分土地,促进更大尺度上的协同效应^[29]。在4种典型生态系统服务间的权衡/协同关系研究中,所得结论与他人研究^[30-31]基本一致。其中,农作物生产与其他3种生态系统服务之间呈现负相关关系,不仅体现了农业生产用地和其他产业用地(尤其是林地和草地)之间的竞争性,也说明区域粮食生产和保护环境之间存在一定的矛盾冲突。因此,在进行流域规划时需谨慎地权衡各类用地、科学划定“耕地红线”,以实现“保障粮食安全,守护生态环境”的双赢局面。但对于土壤保持和碳储量的权衡协同关系研究在不同的区域得到的结论也不同。如白杨^[32]在白洋淀地区的研究表明这两者之间存在显著的正相关;Egoh等^[33]在南非研究表明这两者之间表现为显著的负相关;林世伟^[34]在“三江并流区”的研究发现两者间的几乎没有相关性;而在本研究中两者之间表现为微弱的负相关(相关系数仅为0.019)。其可能原因是不同地域的自然及社会环境存在显著差异,致使研究结果表现出区域上的明显差异性。

相关系数法能够直接揭示生态系统服务权衡/协同的数值关系,双变量空间自相关可表征生态系统服务的权衡/协同的空间关系,但仍无法充分反映生态系统服务内部机理和作用机制,未来还需要借助别的方法手段进一步的探讨和深入分析。此外,生态系统服务可分为支持、供给、调节、文化等多种类型,本研究仅对供给服务和调节服务这两种进行分析,未来应加强白龙江流域生态系统服务的全面评估,并在此基础之上,依据生态系统服务的空间自相关分布格局,对流域进行划区,针对性的提出生态系统服务及人类活动管控对策和建议。

参考文献(References)

- [1] MA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, D C: Island Press, 2005.
- [2] Liang Youjiang, Xu zhongmin, Zhong Fanglei, et al. An spatial ecosystem services approach based on LUCC: A case study of Ganzhou District of Zhangye city. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4758-4766. [梁友嘉, 徐中民, 钟方雷, 等. 基于LUCC的生态系统服务空间化研究: 以张掖市甘州区为例. *生态学报*, 2013, 33(15): 4758-4766.]
- [3] Li Shuangcheng, Liu Jinlong, Zhang Caiyu, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm geography. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1618-1630. [李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630.]
- [4] Zhang Liwei, Lü Yihe, Fu Bojie, et al. Mapping ecosystem services for China's ecoregions with a biophysical surrogate approach. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 161: 22-31.
- [5] Cai Wenbo, David G, Zhang Lang, et al. Identifying hotspots and management of critical ecosystem services in rapidly urbanizing Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191: 258-267.
- [6] Owuor M A, Icely J, Newton A, et al. Mapping of ecosystem services flow in Mida Creek, Kenya. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 140: 11-21.
- [7] Peng Jian, Hu Xiaoxu, Zhao Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960-973. [彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.]
- [8] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 2008, 319: 321-323.
- [9] Rodriguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-off across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11: 28-41.
- [10] Li Peng, Jiang Luguang, Feng Zhiming, et al. Research progress on trade-off and synergies of ecosystem services: An overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5219-5229. [李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.]
- [11] Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576. [傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.]
- [12] Dymond J R, Ausseil A G, Djanibekov N, et al. How attractive are short-term CDM forestations in arid regions? The case of irrigated cropland in Uzbekistan. *Forest Policy and Economics*, 2012, 21: 108-117.

- [13] Larsen F W, Londoño-Murcia M C, Turner W R. Global priorities for conservation of threatened species, carbon storage, and freshwater services: Scope for synergy? *Conservation Letters*, 2011, 4(5): 355-363.
- [14] Howe C, Suich H, Vira B, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergy in real world. *Global Environment Change*, 2014, 28: 263-275.
- [15] Rao Sheng, Lin Quan, Wang Xiahui, et al. The trade-off between grassland ecosystem services in Zhenglan Banner. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 81-86. [饶胜, 林泉, 王夏晖, 等. 正蓝旗草地生态系统服务权衡研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 81-86.]
- [16] Zhou Z X, Li Jing, Guo Z Z, et al. Trade-offs between carbon, water, soil and food in Guanzhong-Tianshui economic region from remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 145-156.
- [17] Yang Xiaonan, Li Jing, Qin Keyu, et al. Trade-off between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Region. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1762-1773. [杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 等. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系. *地理学报*, 2015, 70(11): 1762-1773.]
- [18] Naidoo R, Balmford A, Constanza R, et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *PNAS*, 2008, 28: 9495-9500.
- [19] Maes J, Egoh B, Willemen L, et al. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 2012, 1: 31-39.
- [20] Wei Xiaohua, Sun Ge. *Watershed Ecosystem Processes and Management*. Beijing: Higher Education Press, 2009. [魏晓华, 孙阁. *流域生态系统过程与管理*. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [21] Zhang Ying, Xie Yuchu, Qi Shanshan, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1583-1593. [张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征. *资源科学*, 2016, 38(8): 1583-1593.]
- [22] Zhang Lingling. *Ecosystem services assessment and its driving forces in the Bailongjiang Watershed of Gansu* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [张玲玲. *甘肃白龙江流域生态系统服务评估及影响因素* [D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [23] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 89-97.
- [24] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, et al. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/#invest-models>.
- [25] Li Jing, Li Hongyan, Zhang Liang. Ecosystem service trade-offs in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3053-3062. [李晶, 李红艳, 张良. 关中—天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. *生态学报*, 2016, 36(10): 3053-3062.]
- [26] Fu B J, Wang S, Su C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 4-10.
- [27] Li Hongjian, Ren Zhiyuan, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs-synergies analysis among ecosystem services in Northwestern Valley Basin: Taking Yinchuan Basin as example. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1731-1738. [李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析: 以银川盆地为例. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1731-1738.]
- [28] Chen Guan, Meng Xingmin, Tan Long, et al. Comparison and combination of different models for optimal landslide susceptibility zonation. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2014, 47(4): 283-306.
- [29] Yang Guofu. *Relationship among ecosystem services in the coupled human and natural systems* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. [杨国福. *人类—自然耦合系统中生态系统服务间关系研究* [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.]
- [30] Sun Yijie, Ren Zhiyuan, Zhao Shengnan, et al. Spatial and temporal changing analysis of synergy and trade-off between ecosystem services in valley basins of Shaanxi province. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3): 521-532. [孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 等. 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*, 2017, 72(3): 521-532.]
- [31] Wang Dashang, Li Yifeng, Zheng Hua, et al. Ecosystem services' spatial characteristics and their relationship with residents' well-being in Miyun Reservoir Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 70-81. [王大尚, 李屹峰, 郑华, 等. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系. *生态学报*, 2014, 34(1): 70-81.]
- [32] Bai Yang, Zhuang Changwei, Ouyang Zhiyun, et al. Spatial characteristic between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 177-183.
- [33] Egoh B, Reyers B, Rouget M, et al. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa.

Biological Conservation, 2009, 142: 553-562.

- [34] Lin Shiwei. Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services in the Three Parallel River Region [D]. Kunming: Yunnan University, 2016. [林世伟. “三江并流区”生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.]

Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services:

A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu

QIAN Caiyun, GONG Jie, ZHANG Jinxi, LIU Dongqing, MA Xuecheng

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education) / College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Bailongjiang watershed in Gansu belongs to the upper reaches of Yangtze River water conservation area and the environment fragile area with frequent landslides and debris flow. Recently, the high-intensive human activities have caused the deterioration of natural systems. Therefore, it is of great significance to study the changes of ecosystem services and its trade-offs. In this paper, the spatial and temporal changes, spatial aggregation and the trade-offs/synergies between ecosystem services from 1990 to 2014 were quantitatively analyzed via the ecosystem service change index, spatial autocorrelation and correlation coefficient. The results showed that the ESCI ranges of the four typical ecosystem services types, namely, water yield, carbon storage, soil conservation and crop production were different from 1990 to 2014 with the difference of spatial distribution. There are spatial autocorrelation in four typical ecosystem services with obvious clustering characteristics. The cluster character and agglomeration of positive correlation of the local scale is strong, the agglomeration of the negative correlation type is low and scattered, and the spatial heterogeneity is significant. There is a negative correlation trade-offs between the two provisioning services (water yield and crop production), and positive correlation synergies between the two regulating services (carbon stocks and soil conservation). The relationships between the provisioning and regulating services have both trade-offs and synergies. There were both strong positive correlation synergies between water yield and soil conservation, and between water yield and carbon storage, and there were weak negative correlation trade-offs between soil conservation and crop production. As for the numerical relation, the trade-offs/synergies of ecosystem service changed differently in terms of Moran's I and correlation coefficient. There is significant heterogeneity of trade-offs/synergies between ecosystem services on the spatial pattern.

Keywords: ecosystem services; spatiotemporal change; trade-offs/synergies; Bailongjiang Watershed in Gansu