

陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析

孙艺杰¹,任志远¹,赵胜男¹,张 静^{1,2}

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119; 2. 陕西理工大学历史文化与旅游学院, 汉中 723001)

摘要: 陕西河谷盆地是区域主要粮食基地和社会经济中心,人口增长、城镇化和工业化的加快发展,使得该地区生态环境受到人类活动的强烈冲击,生态环境面临着潜在的巨大危机,严重影响社会经济的可持续发展。本文选取西北地区经济中心—关中盆地和陕西省生态保护指定区—汉中盆地进行对比研究,以1990-2010年的生态系统服务数据(NPP、保水服务、食物供给)分析生态服务时空差异,通过相关分析、线性和幂函数回归等方法分析了生态系统服务协同与权衡的时空差异。结果表明:NPP与保水是协同关系,NPP与食物供给、保水与食物供给是权衡关系;21年中,两大盆地的协同关系均呈减弱趋势,权衡关系为加强趋势,且关中盆地的变化速度要高于汉中盆地;NPP与保水的协同程度,在关中盆地东部的耕地区域以及汉中盆地的宁强县与略阳县西部最强,以关中的铜川市和汉中的西乡县最弱;NPP与食物供给的权衡程度,在关中盆地的铜川市和西安市境内的秦岭区域以及汉中盆地的西乡县南部制约关系更为突出,以关中的宝鸡市及汉中的略阳县最弱。

关键词: 陕西河谷盆地;生态系统服务;权衡与协同

DOI: 10.11821/dlxb201703012

1 引言

生态系统服务是指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效应,为人类直接和间接从生态系统得到的所有收益^[1-2]。生态系统作为生物圈的基本单元,包括维持人类生存与发展的食物、淡水、生产生活的原材料等供给服务,也包括维持生态系统与环境动态平衡的初级生产、土壤形成、气候调节等支持服务和调节服务,以及愉悦人类精神文化层面的审美、娱乐、旅游等文化服务^[3-5]。由于生态系统服务种类的复杂性、空间的异质性以及人类需求的选择,生态服务之间的关系出现动态变化,表现为此消彼长的权衡、相互增益的协同等形式^[6]。所谓权衡(tradeoffs)是指某些类型生态系统服务的供给,由于其他类型生态系统服务使用的增加而减少的状况;协同(synergies or co-benefits)是指两种或多种生态系统服务同时增强的情形^[7-8]。由于人类对于生态系统的利用正在快速增长,根据千年生态系统评估(MA)报告研究结果,发现全球24项生态服务中约有15项(60%)正处于退化或不可持续利用状态(包括70%的调节服务和文化服务),严重威胁着区域乃至全球的生态安全。因此,探讨生态系统服务之间的权衡与协同关系,分析其时空格局、类型特征、形成的驱动因素、响应速率等,找

收稿日期: 2016-07-14; 修订日期: 2016-11-08

基金项目: 教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004); 国家自然科学基金项目(41371523) [Foundation: The Major Project of Key Research Institute of Humanities and Social Science of the Ministry of Education, No.14JJD840004; National Natural Science Foundation of China, No.41371523]

作者简介: 孙艺杰(1991-), 女, 辽宁兴城人, 硕士生, 研究方向为资源环境遥感与GIS。E-mail: jessicasun@snnu.edu.cn

通讯作者: 任志远(1953-), 男, 陕西兴平人, 教授, 博士生导师, 主要从事国土资源开发与生态环境评价等研究。

E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

到经济发展与环境保护的平衡点、现实利益与未来发展的平衡点显得紧迫而必要^[6]。近年来,生态系统权衡与协同研究已成为国内外相关学科研究的前沿与热点^[6-16]。Willemens通过相关分析得出了荷兰乡村各种服务之间权衡与协同关系,从而划分生态服务多样性的热点和冷点区域^[10];Nelson运用规划、保护和发展土地利用情景,分析了生态服务权衡与协同关系,并进行优化选择,发现碳储存付费可以缓解权衡关系^[17];Bohensky通过情景设定分析了非洲南部流域内生态系统服务之间的时空特征以及不同尺度的权衡与协同关系^[18];饶胜、林泉等运用极值法分析草原生态系统中畜产品供给服务与防风固沙调节服务之间的权衡关系,并得出了生态系统服务价值量最大的生物量分配方案^[19-20]。虽然目前生态服务的权衡与协同研究已取得了一些可观的成就,但仍存在一些问题,包括:对于生态系统服务的研究主要为单个时间节点的静态研究^[18, 21-23],缺乏长时间序列的动态研究;对于权衡与协同的研究多基于统计关系的数量分析,以反映区域的整体差异,缺乏区域内部时空差异的空间表达。

本文选取位于湿润区的汉中盆地、半湿润半干旱区的关中盆地为主要研究对象,以1990-2010年两大盆地的生态服务价值量(支持服务中的NPP,调节服务中的保水服务,供给服务中的食物供给)为基础,分析生态服务价值的时间变化和空间分布特征,通过相关分析、时间序列的线性回归等方法,探索两大盆地生态系统服务协同与权衡关系的时空特征,并对关中和汉中盆地进行对比研究,分析经济发展区域与环境保护区域生态服务关系的差异,为不同区域制定相应生态服务管理决策提供理论基础,为深化西北地区生态系统服务提供决策依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

关中盆地和汉中盆地都隶属于陕西省河谷盆地,境内土地肥沃,历史悠久,考虑到自然数据与社会经济数据的统一,本文以囊括关中盆地及汉中盆地的地级市为主要研究区域(图1)。关中盆地位于陕西省中部,介于陕北黄土高原与陕南秦岭山地之间,西起宝鸡,东至潼关,南依秦岭,北靠北山,地势西高东低,南北高中部低,关中地区经济发达,人口稠密,历史悠久,是陕西省乃至整个西北地区的政治中心、经济中心、文化中心。汉中盆地位于陕西省南部,介于秦岭与大巴山之间,西起勉县武侯镇,东至洋县龙亭,东西长约116 km,南北宽约5~25 km。汉中盆地为秦巴山地之间的断陷盆地,地势与关中盆地类似,整体为“两山夹一川”的地貌骨架,地貌类型丰富,汉中以农林业为主,农业发达,素有“鱼米之乡”、“天府之国”的美称。

2.2 数据来源

本文数据主要包括:①从地理空间数据云(<http://www.giscloud.cn/>)下载Landsat 5 TM影像,空间分辨率为30 m;②分辨率为30 m的DEM数据;③1990年、2005年土

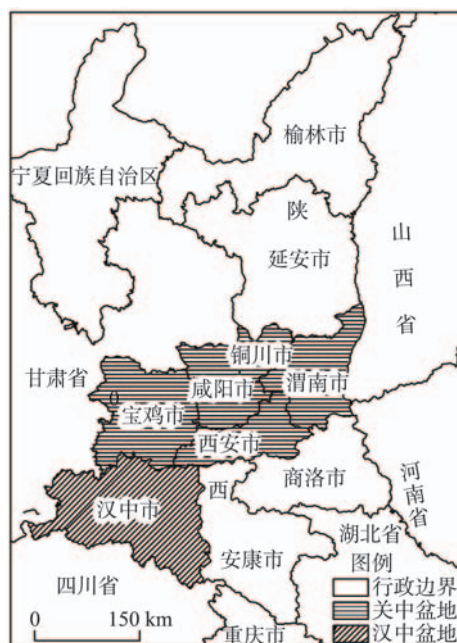


图1 研究区概况

Fig. 1 Study area

地利用数据由地球系统科学数据共享平台 (www.geodata.cn) 提供, 1995年、2000年土地利用数据来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn); ④ 1:100万土壤类型、土壤质地以及植被类型数据集; ⑤ 由中国气象科学数据共享服务网提供的气象数据; ⑥ 相关社会统计数据, 来源于《陕西统计年鉴》《西安统计年鉴》《铜川统计年鉴》《汉中统计年鉴》《咸阳统计年鉴》《宝鸡统计年鉴》《渭南统计年鉴》及野外考察数据; ⑦ 其他数据, 包括道路交通、水系、行政边界等, 来自于国家基础地理数据库。

3 研究方法

3.1 NPP 价值量测评

植被净第一性初级生产力 (NPP) 是指陆地植被在单位时间、单位面积内, 通过光合作用产生的有机同化物去除自养呼吸而剩余的有机物质总量, 它反映了植被群落在自然环境中生产有机物的能力^[24]。CASA 模型是广泛应用的 NPP 测评模型^[25-27], 表达式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: $NPP(x, t)$ 表示像元 x 在月份 t 的净第一性生产力 ($\text{g} \cdot \text{C}/\text{m}^2$); $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在月份 t 的光和有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在月份 t 的实际光能利用率 ($\text{g} \cdot \text{C}/\text{MJ}$)。

NPP 由物质质量转化为价值量, 利用标煤法模型^[28], 计算模型如下:

$$V = \frac{AQ_1}{BQ_2} \times P \quad (2)$$

式中: V 表示 NPP 价值量 (元); A 表示 NPP 物质质量 ($\text{t} \cdot \text{C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); B 表示标准煤系数, 为 1; Q_1 表示 NPP 的物质质量所折合而成的热量 (6.7 kJ/g); Q_2 表示标准煤所折合而成的热量 (10 kJ/g); P 为单位标准煤的价格。

3.2 保水服务价值量测评

植被的保水服务主要通过林冠截流、枯枝落叶层保水和土壤理水作用实现^[29], 一方面在丰水期调节洪峰, 另一方面在枯水期补给河流, 调蓄流量, 从而防止水土流失, 涵养水源。考虑到研究区的实际情况及特殊位置, 以植被的蓄水能力来估算研究区的保水服务物质质量, 因此选择了综合蓄水能力法^[30-31], 具体估算模型如下:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (3)$$

式中: Q 表示保水总物质质量; Q_1 表示植被林冠截留量; Q_2 表示枯落物最大持水量; Q_3 表示土壤层截留量。

$$Q_1 = \text{降水量}(\text{mm}) \times \text{林冠截留率}(\%) \times \text{面积}(\text{hm}^2) \times 10 \quad (4)$$

$$Q_2(t) = \text{枯枝落叶层的干重}(\text{t}/\text{hm}^2) \times \text{饱和吸水率}(\%) \times \text{面积}(\text{hm}^2) \quad (5)$$

$$Q_3(t) = \sum_{i=1}^n FMC \times \text{面积}(\text{hm}^2) \times h_i \times 10^4 \quad (6)$$

$$FMC = 0.003075 \times n_1 + 0.005886 \times n_2 + 0.008039 \times n_3 + 0.002208 \times OM - 0.14340 \times \rho \quad (7)$$

式中: 降水量由气象数据差值获得, 林冠截留率、枯枝落叶层干重、饱和吸水率均在结合植被类型数据, 参考前人研究成果获得。FMC 表示田间最大持水量; h_i 表示土壤 i 的厚度 (本文取全区平均值 0.6 m); n_1 表示土壤砂粒含量百分比; n_2 表示土壤粉砂含量百分比; n_3 表示土壤黏粒含量百分比; OM 表示土壤有机质含量百分比; ρ 表示土壤容重 (g/cm^3)。其中, FMC 所涉及参数均由土壤类型及土壤质地数据集获得。

保水物质量转化为价值量,采用工程替代法^[31],计算模型如下:

$$V = L \times \frac{Q}{Q_g} \times V_g \quad (8)$$

式中: V 表示保水服务价值量; Q 表示保水服务物质量; Q_g 表示可替代生态系统的某工程的含水量; V_g 表示替代工程的价值; L 表示发展阶段系数。

3.3 食物供给价值量测评

食物供给是生态系统中重要的供给服务之一,食物是人类从生态系统中获取的基本物质,对人类发展具有决定性的基础作用^[32]。本文结合土地利用数据及统计年鉴数据,测评研究区内各土地利用的食物总产值,实现食物供给的空间化。为了方便计算,本文将研究区划分为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的栅格,故 $A_i = 1 \text{ km}^2$ 。具体计算公式如下:

$$G_i = A_i \times N_i \quad (9)$$

式中: G_i 表示研究区中栅格所对应的食物 i 的总产值 (元); A_i 表示研究区中食物 i 占有的面积 (km^2); N_i 表示食物 i 的单位面积产值 (元/ km^2)。

$$N_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (10)$$

式中: F_i 表示食物在研究区中的总产值; S_i 表示食物 i 在研究区中的总面积,本文中, S_i 即为各土地利用类型的总面积。

食物供给总产值数据来源于《陕西省统计年鉴 1991-2011》,其中种植业总产值对应土地利用类型中的耕地面积,牧业总产值对应草地面积,渔业总产值对应水域总面积。

4 结果与分析

4.1 河谷盆地生态服务价值的时空变化

通过相关模型计算,得到连续 21 年关中盆地和汉中盆地的 NPP、保水和食物供给价值量,图 2 表示河谷盆地每种生态服务价值量的空间变化情况。从 1990-2010 年的 NPP 价值量变化率来看 (图 2a、2b), 关中盆地中部的大片耕地及部分山地均为负增长,包括西安市、咸阳市南部、铜川市以及宝鸡市的凤翔县与岐山县,而呈现正增长的区域主要分布在盆地东西两侧,包括宝鸡市西部、渭南市的韩城、合阳县、潼关县与华阴县。汉中盆地则呈现明显的东西分异,西部的略阳县、勉县、留坝县、宁强县均为正值递增,而其余西部各县均呈现负值递减,且低值中心集中于佛坪县、洋县东部、西乡县中部及镇巴县;从多年保水价值量的变化率来看 (图 2c、2d), 关中盆地呈现负增长的有建设用地、水域及部分林地,主要集中于渭河、西安市及咸阳市市区、宝鸡市的太白县及凤县与陇县、渭南市东部的黄河边缘及潼关县,呈现正增长的区域主要分布于关中盆地中心的耕地及盆地边缘的林地,集中于西安市的大部分地区和咸阳市的东南部。汉中盆地呈现负增长的主要分布于盆地的东南部,包括镇巴县、西乡县南部、南郑县东部,呈现正增长的主要位于盆地东部及西部的山地,包括西乡县东北部、洋县、佛坪县及略阳县、宁强县、勉县;从食物供给多年变化率来看 (图 2e、2f), 关中盆地呈现正增长的区域主要为耕地,其中咸阳市耕地的增长率最快,其次为西安市,呈现负增长的区域主要为建设用地周边及林地分布区,最明显的是西安市市区,其次为铜川市、西安市南部与宝鸡市的西部与南部、渭南市的南部与北部。而汉中盆地,表现为耕地为较高的正增长,主要分布在盆地中部,包括汉中市大部、勉县中部、南郑县北部、城固县中部、洋县南部等区域,而林地、建设用地区域均为负增长,主要分布于盆地南北部,包括留坝县、佛坪县、洋县北部、勉县北部、南郑县南部、西乡县南部。

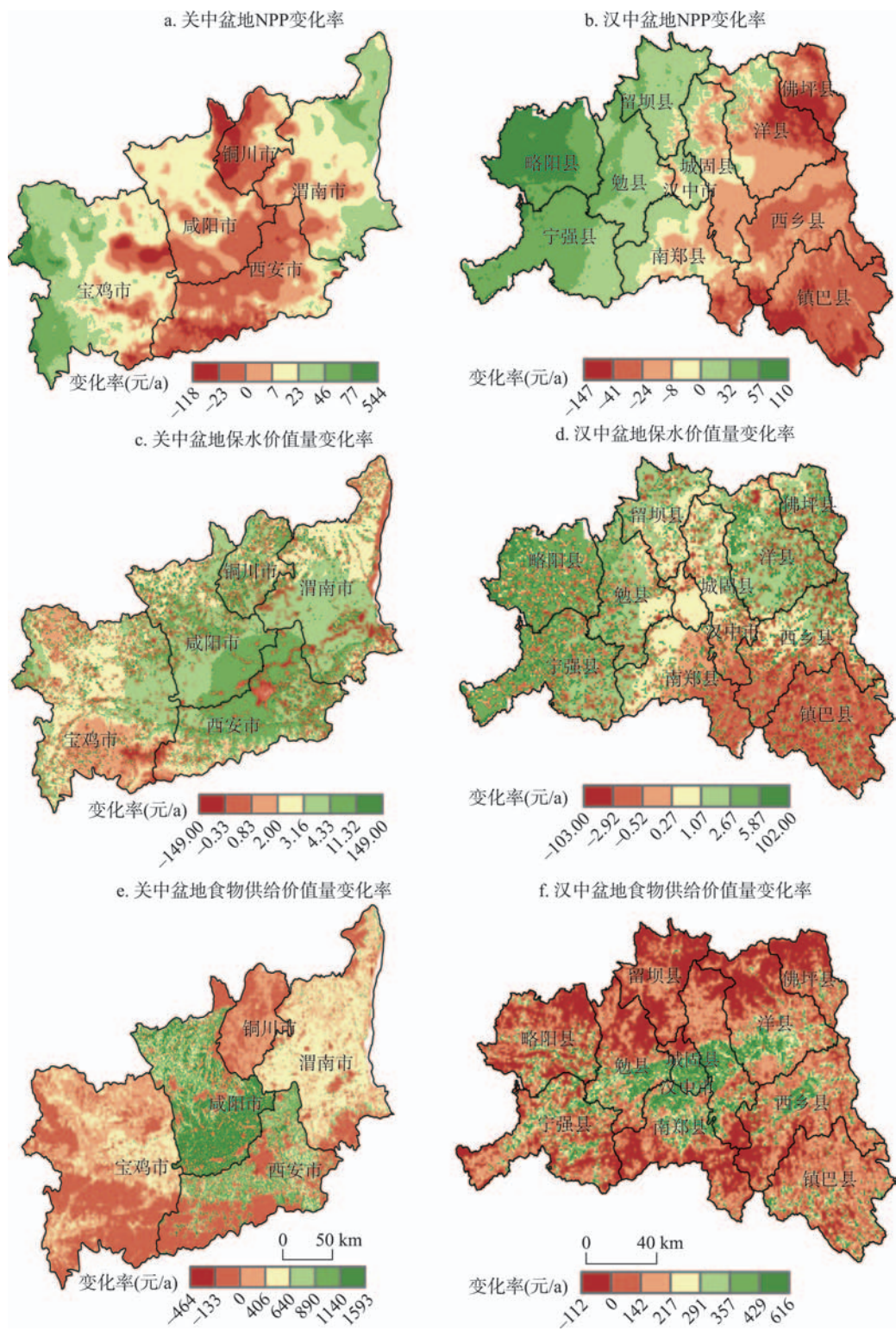


图2 1990-2010年陕西河谷盆地生态服务价值空间变化分布图

Fig. 2 The spatial distribution of ecological service value in valley basins of Shaanxi, 1990-2010

4.2 河谷盆地生态系统服务权衡与协同分析

验证生态服务之间的关系为权衡或者是协同的方法主要有相关分析、聚类分析、PPF 曲线等^[5, 9, 33-35]。参考前人研究成果, 为了实现时空序列数据的空间表达, 本文选择采用相关分析验证 NPP、保水服务、食物供给之间的相互关系。以陕西省关中盆地和汉中盆地作为研究对象, 对三大服务 21 年的栅格数据求多年平均, 采用 ArcGIS 平台并运用 Spatial Analyst Tools 下的波段集统计工具^[5], 对 3 种服务的相关性进行计算 (表 1)。

表 1 陕西省河谷盆地不同生态系统服务价值量多年均值的相关系数

Tab. 1 The correlation coefficient of annual mean value among ecosystem services in valley basins of Shaanxi

	关中盆地			汉中盆地		
	NPP	保水服务	食物供给	NPP	保水服务	食物供给
NPP	1.000	0.097**	-0.429**	1.000	0.388**	-0.207**
保水服务		1.000	-0.101**		1.000	-0.318**
食物供给			1.000			1.000

注: **: 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

由表 1 中的统计检验结果可知, 在关中盆地与汉中盆地中, 食物供给与 NPP、食物供给与保水服务均存在着显著的负相关性; NPP 与保水服务之间均存在着显著的正相关性。生态系统服务之间的权衡与协同关系可以通过相关系数的取值来判断^[35]。由此可知, 在关中与汉中盆地的区域尺度内, NPP 与保水服务存在着空间协同关系, NPP 与食物供给存在着空间权衡关系, 保水服务与食物供给亦存在空间权衡关系。分析其成因可知, NPP 与保水服务能力较强的林草地区域, 其食物供给能力较弱; 而食物供给能力强的耕地区域, 其 NPP 与保水服务能力较弱。

4.3 生态服务权衡与协同的时间变化

为了定量分析 NPP、保水及食物供给之间的空间异质性及其时间变化特征, 本文分别选择 NPP 与食物供给、NPP 与保水服务两组生态系统服务进行空间相关性分析 (图 3)。图 3 中所示相关系数均通过了显著性检验, 由相关系数的时间变化可判断权衡与协同的强弱变化。

在 NPP 与保水服务方面, 从波动程度的大小来看, 关中盆地两种服务的相关系数最大值为 1992 年的 0.22, 最小值为 2004 年的 0.03, 标准差为 0.06; 而汉中盆地的最大值为 2000 年的 0.60, 最小值为 1995 年的 0.06, 标准差为 0.14 (图 3)。可见, 汉中盆地两大服务相关系数多年波动的幅度和离散程度均大于关中盆地, 其空间协同比关中盆地强, 但不及关中盆地稳定。从多年变化率的趋势来看, 1990-2010 年间, NPP 与保水服务的相关

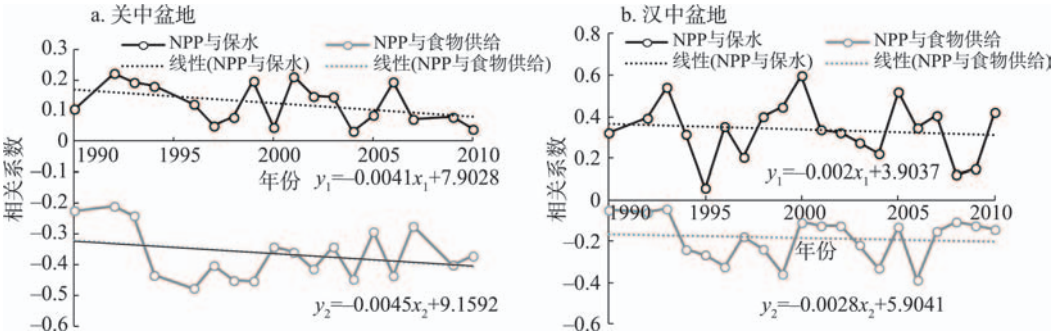


图 3 1990-2010 年陕西省两盆地生态系统服务之间的相关系数时间变化

Fig. 3 The temporal variation of the correlation coefficient among ecosystem services in two basins of Shaanxi, 1990-2010

系数在关中盆地与汉中盆地均呈现波动式的递减趋势, 关中盆地的递减率为 $-0.0045/a$, 略大于汉中盆地的 $-0.0028/a$, 说明NPP与保水服务的空间协同关系在波动变弱, 且关中盆地比汉中盆地变弱趋势更强。

在NPP与食物供给方面, 从波动程度的大小来看, 两种服务在关中盆地的相关系数最小值为1996年的 -0.40 , 最大值为1992年的 -0.15 , 标准差为 0.08 ; 汉中盆地的最小值为2006年的 -0.35 , 最大值为1990年的 -0.02 , 标准差为 0.08 。可见, 关中盆地两种服务间的空间权衡波动幅度小于汉中盆地, 但它们之间的离散程度比较相似。从多年变化率来看, NPP与食物供给之间的相关系数亦均呈现递减趋势, 关中盆地相关系数递减率为 $-0.0041/a$, 要小于汉中盆地的 $-0.002/a$ 。这说明NPP与食物供给之间的空间权衡关系在波动中变强, 此消彼长的趋势变得愈发明显, 关中盆地的权衡变化趋势稍快于汉中盆地。

4.4 生态服务权衡与协同的空间差异

4.4.1 NPP与保水服务 目前对于生态服务权衡与协同的研究方法, 主要包括图形比较法、情景分析法以及模型模拟等。关中盆地和汉中盆地净初级生产力、保水服务和食物供给都具有明显的区域差异性, 并且随着时间变化各服务均呈现不同的变化趋势和特点。本文对关中盆地及汉中盆地1990-2010年间NPP与保水服务、NPP与食物供给数据进行线性拟合及非线性(幂函数)拟合, 数据拟合单元为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 栅格, 分析了21年中不同生态服务权衡与协同关系的时间变化空间分布特征(图4, 图5)。

NPP与保水服务在整体上存在着空间协同关系, 但是不同区域的协同关系在时间变化上存在着显著差异。在关中盆地中, NPP和保水相互增益的协同关系在整个盆地均广泛存在(图4a, $a > 0$), 协同关系较强的区域主要分布于盆地东西部的耕地及东北与西南角的林地与草地, 包括渭南市市辖区、华县、大荔县、华阴市、澄城县、合阳县及韩城; 宝鸡市的风县、太白县、千阳县与凤翔县; 咸阳市的城市郊区、兴平市; 西安市的周至县北部及户县北部。协同关系较弱的区域主要分布于生态服务呈现递减变化趋势的区域, 如塬梁广布的铜川市及西安市南部秦岭, 这些地域21年间NPP与保水服务均呈现较强的递减趋势, 因而二者空间协同较弱。同时, 关中盆地NPP与保水服务的协同关系在盆地东部的耕地变化趋势更为突出(图4b, $a > 1$), NPP的增长伴随着保水的幂函数增长, 主要包括渭南市的大荔县、渭南市辖区东郊、蒲城县东南部。由图4b分析所得, 汉中盆地中NPP与保水服务的协同关系在盆地中广泛存在(图4c, $a > 0$), 协同关系较强的区域主要集中于盆地的中西部地区, 包括略阳县、宁强县中西部、勉县、留坝县、城固县北部及汉中市北部、镇巴县西部及南郑县东南角。协同较弱的区域则主要位于盆地东部, 与NPP及保水服务递减区域重合, 包括佛坪县、洋县、西乡县以及镇巴县东部。另外, 在盆地西部的低山丘陵及秦岭南部中低山区域协同关系则表现更为突出(图4d, $a > 1$), NPP增加伴随着保水服务的幂函数增长, 包括略阳县及宁强县, 而这些地域与NPP和保水服务的增长区域重合。

4.4.2 NPP与食物供给 两大盆地NPP与食物供给权衡关系的空间分布特征比协同关系更为复杂。首先, 关中盆地中生态服务之间的权衡关系在盆地内广泛存在(图5a, $a < 0$), 其中权衡关系较强的区域主要有铜川市塬梁区域、西安市市辖区大部分、西咸新区及咸阳市周边、宝鸡市的岐山县、扶风县以及凤翔县一带的黄土台塬向关中平原过渡区域、西安市及宝鸡市境内的秦岭地区。另外, 权衡关系较弱的区域主要有宝鸡市的北部区县以及南部的风县、渭南市东北部3个区县。从幂函数的拟合来看, 在铜川市的耀州区、宝鸡市的风翔县与岐山县以及西安市南部的秦岭北麓这些区域, NPP与食物供给的制约关系更为凸显(图5b, $a < -1$)。在这些区域, NPP的递减伴随着食物供给的幂函数增长。这些区域均为地形区的过渡区域, 地形坡度较大, 但同时耕地垦殖及林地破坏严

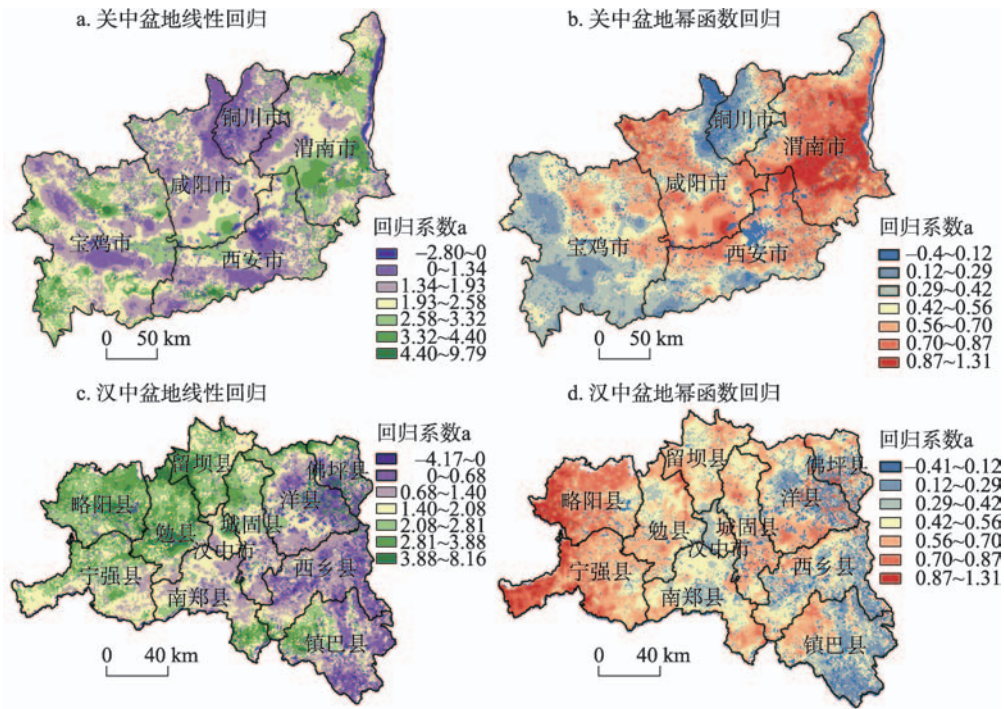


图4 1990-2010年陕西省盆地NPP及保水服务协同关系

Fig. 4 The synergy between NPP and water conservation in valley basins of Shaanxi, 1990-2010

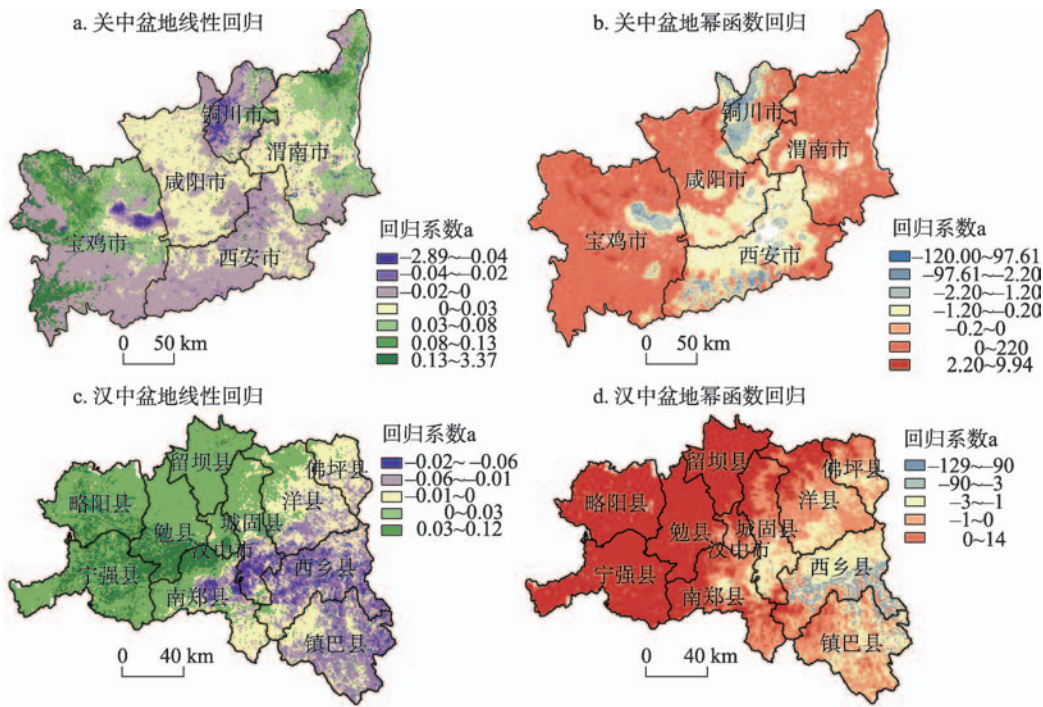


图5 1990-2010年陕西省河谷盆地NPP及食物供给服务权衡关系

Fig. 5 The trade-off between NPP and food supply in valley basins of Shaanxi, 1990-2010

重, 人类利用过度, 因此调节服务与供给服务之间的权衡关系在这些地区表现得尤为突出。

NPP与食物供给的权衡关系在汉中盆地表现为明显的东西分异。具体表现为: 东部权衡关系明显, 西部权衡关系较弱, 与NPP在1990-2010年中的多年变化率空间分布特征类似。两种服务制约关系明显的区域主要位于米仓山一带以及汉江两岸的低山丘陵区(图5c、5d, $a < 0$), 包括西乡县的大部分、镇巴县的东部、城固县的南部, 其中西乡县的南部权衡关系尤为突出, NPP的增长伴随着食物供给的幂函数下降, 原因在于此处森林破坏严重, 毁林开荒、工程建设等导致NPP快速递减; 同时土地开发利用过度, 食物供给迅速递增, 二者叠加造成了此处NPP与食物供给的显著权衡关系。此外, 汉中盆地西部权衡关系较弱, 主要位于盆地中部及西部的低山丘陵区, 包括南郑县西北部、勉县南部、宁强县东部与略阳县南部等区域。

4.5 两盆地的差异及原因分析

运用空间分析、线性回归、幂函数回归等方法对陕西河谷盆地NPP与保水服务、NPP与食物供给协同与权衡关系的时间变化以及区域差异进行了分析, 发现两地存在着如下差异: ① 汉中盆地NPP与保水服务的协同程度整体高于关中盆地, 而关中盆地NPP与食物供给的权衡程度整体高于汉中盆地; ② 无论是协同还是权衡, 关中盆地生态服务之间的变化率均快于汉中盆地, 且波动幅度、离散度均高于汉中盆地; ③ 从协同的空间分布来看, 关中盆地主要表现为盆地中部与周边之间的分异, 盆地中部强、周边弱, 并且协同程度最强的地级市为渭南市, 最弱的为铜川市; 汉中盆地则主要为东西分异, 西部强, 东部弱, 其中协同程度最强的区县为勉县, 最弱的为西乡县; ④ 从权衡的空间分布来看, 关中盆地主要为中部与东西部分异, 中部强、东西部弱, 其中权衡程度最强的地级市为西安市, 最弱的为宝鸡市; 汉中盆地主要为东西分异, 东部强、西部弱, 其中权衡程度最强的区县为镇巴县, 最弱的为略阳县。

从整体上来看, 关中盆地比汉中盆地协同程度要低, 但权衡程度要高, 这主要与两大盆地之间巨大的环境、社会、经济差异密切相关。关中盆地作为西北地区重要的经济发展中心, 社会经济快速发展, 人口增加, 建设用地不断扩张, 占用了大量耕地, 使得支持、调节、供给和文化服务均受到不同程度的削弱, 同时也加大了食物供给与需求的矛盾。西安市大面积连片建设用地的存在使得此区域成为NPP、保水服务、食物供给的低值中心, 而其扩张区域则成为3大服务的递减高值区, 此为造成西安市权衡程度最高的原因之一。其次, 林地、草地、水域是NPP和保水服务能力提供的主要贡献地类, 对于支持和调节服务能力的提高至关重要, 而21年中在其重要供给区域(秦岭、北山、巴山、渭河等)均呈现不同程度的递减趋势, 也使得服务间的权衡关系在这些地区程度较高。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 对于陕西河谷盆地生态服务权衡与协同的研究中发现, NPP与保水服务均呈现相互增益的协同关系, 而NPP与食物供给、保水服务与食物供给均呈现此消彼长的权衡关系。21年间, 两大盆地生态服务间的协同关系均呈现减弱趋势, 权衡关系均呈现增强趋势, 这种趋势的变化程度关中盆地甚于汉中盆地。

(2) 关中盆地NPP与保水服务的协同关系在1990-2010年中不同地域存在变化差异: 盆地东西部的耕地、东北和西南角的林草地, 表现为明显的线性增长关系, 尤其在东部的耕地区域, 增长关系呈现幂函数增长, 其中以渭南市协同程度最强, 铜川市协同程度最弱。在汉中盆地中, 协同关系在西北的山地区域为线性增长, 在宁强县与略阳县

的西部地区两大服务的增长关系则呈现为幂函数增长,在各区县中,以勉县协同程度最强,西乡协同程度最弱。

(3) NPP 与食物供给权衡关系时间变化的空间特征比协同更为复杂。在关中盆地中,贯穿盆地中部的区域,NPP 的增长伴随着食物供给的下降,而在铜川市及西安市境内的秦岭区域,NPP 与食物供给的制约关系则更为突出,NPP 的增长伴随着食物供给的幂函数下降,其中以西安市权衡程度最强,以宝鸡市权衡程度最弱。在汉中盆地的东部区域,NPP 与食物供给的权衡关系则表现的较为明显,尤其在西乡县南部,NPP 的增长伴随着食物供给的幂函数下降,其中以镇巴县权衡程度最强,以略阳县权衡程度最弱。

5.2 讨论

目前针对生态系统服务价值评估及其权衡与协同分析的研究对象主要为某一年的空间分析或者几个时间点之间的时空分析,而针对连续时间序列的时空分析则研究较少。本文在评估了研究区连续 21 年生态服务价值的基础上,分析其权衡与协同的时空差异,更加细致地研究了生态系统服务的时空特征,从而为生态系统服务之间相互关系与相互作用的机理研究奠定基础。其次,将经济发达的关中盆地与生态环境良好的汉中盆地进行对比研究,分析不同区域内生态系统服务的差异,以及生态服务间权衡与协同的差异,为因地制宜实践生态系统服务管理提供案例。生态系统服务的种类很多,但文中仅选取了支持、调节和供给 3 种服务,缺乏对多种服务的评估,以及两两服务之间的相互关系分析。对于空间权衡的时空特点本文做了初步探讨,但是没有涉及到时间权衡,不能给出决策建议的具体实施方法。因此结合土地利用数据进行情景分析,探讨不同情景下生态服务权衡与协同的发展特点,找到经济发展与环境保护的“双赢”决策,是接下来要研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Robert C, Ralph A, Rudolf de-Groot. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(5): 253-260.
- [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997: 1-25.
- [3] Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 1-10. [李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10.]
- [4] Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Progress in Geography*, 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. *地理科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.]
- [5] Li Shuangcheng, et al. *The Geography of Ecosystem Services*. Beijing: Science Press, 2014: 172-199. [李双成, 等. *生态系统服务地理学*. 北京: 科学出版社, 2014: 172-199.]
- [6] Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390. [李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.]
- [7] Rodriguez J P, Beard T D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 747-760.
- [8] John B-Bradford, Anthony W-D'Amato. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *The Ecological Society of America*, 2012, 10(4): 210-216.
- [9] Raudsepp-Heare C, Peterson C D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *PNAS*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [10] Louise W, Lars H, Martinus E F. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [11] Miren O, Beatriz Fernandez-de-Manuel. Co-benefits and trade-off between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289(10): 1-9.

- [12] Butler James R A, Wong Grace Y, Metcalfe Danie J. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 17(8): 1-16.
- [13] Pan Ying, Zhen Lin, Long Xin, et al. Ecosystem service interactions and their affecting factors in Jinghe watershed at county level. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1203-1209. [潘影, 甄霖, 龙鑫, 等. 泾河流域县域尺度生态系统服务相互关系及影响因素. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1203-1209.]
- [14] Li Peng, Jiang Luguang, Feng Zhiming, et al. Research progress on trade-offs 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.]
- [15] Lin Quan, Wu Xiuqin. Progress on trade-offs in ecosystem services. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(6): 100-105. [林泉, 吴秀芹. 生态系统服务冲突及权衡的研究进展. *环境科学与技术*, 2012, 35(6): 100-105.]
- [16] Lu Nan Lu, Fu Bojie, Jin Tiantian. Trade- off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [17] Erik N, Guillermo M, James R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [18] Erin B, Albert Van-Jaarsveld. Future ecosystem services in a southern African river basin: A scenario planning approach to uncertainty. *Conservation Biology*, 2006, 20(4): 1051-1061.
- [19] 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.]
- [20] Li Quan. A method for trade-off between grassland ecosystem services [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. [林泉. 草地生态系统服务权衡的方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.]
- [21] Bryan Brett A. Incentives, land use, and ecosystem services: Synthesizing complex linkages. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27(3): 124-134.
- [22] Li Yuncheng, Liu Changming, Yu Jingjie. Tradeoff of conflict between wetland protection and farmland reclamation in the Sanjiang Plain, Heilongjiang Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 39-42. [李云成, 刘昌明, 于静洁. 三江平原湿地保护与耕地开垦冲突权衡. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 39-42.]
- [23] Li Jing, Li Hongyan, Zhang Liang. Ecosystem service trade-offs and in the Guanzhong-Tianshui economic of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 1-10. [李晶, 李红艳, 张良. 关中一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): 1-10.]
- [24] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [25] Li Wei1, Zhang Guoming, Li Zhaojun. The spatio-temporal pattern of net primary productivity of terrestrial ecosystem in East Asia region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4173-4183. [李伟, 张国明, 李兆君. 东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4173-4183.]
- [26] Dong Dan, Ni Jian. Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1855-1866. [董丹, 倪健. 利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.]
- [27] Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1197-1211. [张懿锂, 祁威, 周才平. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. *地理学报*, 2013, 68(9): 1197-1211.]
- [28] Ren Zhiyuan, Liu Yanxu. Contrast in vegetation net primary productivity estimation models and ecological effect value evaluation in Northwest China. *Chinese Journal of Eco- Agriculture*, 2013, 21(4): 494-502. [任志远, 刘焱序. 西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价. *中国生态农业学报*, 2013, 21(4): 494-502.]
- [29] Chen Yinzen. Research on the function of the water conservation and the soil protection of forest in Three-Gorges area, Yangtze River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. [陈引珍. 三峡库区森林植被水源涵养及其水土保持功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.]
- [30] Qin Jiali, Yang Wanqin, Zhang Jian. Assessment of ecosystem water conservation value in the Upper Minjiang River, Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(4): 453-458. [秦嘉励, 杨万勤, 张健. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(4): 453-458.]
- [31] Li Jing, Ren Zhiyuan. Spation temporal change of water conservation value of Loess Plateau ecosystem in northern Shaanxi Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(2): 240-244. [李晶, 任志远. 陕北黄土高原生态系统涵养水源

- 价值的时空变化. 生态学杂志, 2008, 27(2): 240-244.]
- [32] Zhang Yisheng. The food supply situation simulation analysis based on Logistic model [D]. Shandong Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. [张义升. 基于 Logistic 模型的食物供给情况模拟分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.]
- [33] Maria R Felipe-Lucia, Comin A Francisco, Elena M Bennett-Elena. Interactions among ecosystem services across land uses in a floodplain Agroecosystem. *Ecology and Society*, 2014, 19(1): 1-20.
- [34] Yang Xiaonan, Li Jing, Qin Keyu, et al. Trade-offs 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.]
- [35] Liu Yanxu, Xu Guang, Jiang Hongyuan, et al. Synergy between ecosystem services and ecosystem health in the forest area of Northeast China. *Progress in Geography*, 2015, 34(6): 761-771. [刘焱序, 徐光, 姜洪源, 等. 东北林区生态系统服务与健康协同分析. 地理科学进展, 2015, 34(6): 711-761.]

Spatial and temporal changing analysis of synergy and trade-off between ecosystem services in valley basins of Shaanxi Province

SUN Yijie¹, REN Zhiyuan¹, ZHAO Shengnan¹, ZHANG Jing^{1,2}

(1. College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. College of History and Tourism, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

Abstract: The valley basins, the main grain output area and socio-economic center of Shaanxi Province, are experiencing population growth, rapid urbanization and industrialization. However, the eco-environment is suffering as a result of destructive human economic activities (forest and grassland clearance for farmland expansion, deforestation and vegetation damage) and is potentially facing a huge ecosystem crisis, from the likes of soil erosion and vegetation coverage reduction - all of which hinder local sustainable social and economic development. Because of complicated conditions and its significant location, the Guanzhong Basin, the economic center of Northwest China, and the Hanzhong Basin, an ecological preservation area in Shaanxi Province, were chosen for comparing and analyzing the spatial and temporal disparities between ecosystem services. In this study, we use several mathematical methods including the correlational analysis method, and the linear and power function regression methods to calculate the spatial and temporal differences between the two areas based on ecosystem services data from 1990 to 2010 (NPP, water conservation and food supply). From this, we find that NPP and water conservation have a synergistic relationship, and that there is also a trade-off between NPP and food supply, and between water conservation and food supply. In addition, between 1990 and 2010, this synergistic relationship shows a downward trend while the trade-off relationship demonstrates an upward trend. Furthermore, the rate of change in the Guanzhong Basin is faster than that in the Hanzhong Basin. In terms of the synergistic relationship between NPP and water conservation, the strongest evidence can be found in cultivated land in the east of the Guanzhong Basin and in the west of Ningqiang county and Lueyang county in the Hanzhong Basin; the lowest is observed in Tongchuan city and Xixiang city. When exploring the trade-off between NPP and food supply, we find that the strongest trade-off relationship is in Tongchuan city and the Qinling Mountains in Xi'an and the south of Xixiang county, while the weakest is in Baoji city and Lueyang county.

Keywords: Shaanxi; valley basin; ecosystem services; trade-off and synergy