

# 宾县生态系统服务时空格局及权衡协同关系

宁 静, 石东伟, 周思宇, 夏子良

(东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:**东北黑土区是我国重要的生态功能区,也是主要的粮食产区,持续多年的开垦利用,加剧了该地区生态环境的恶化,因此探究黑土区生态系统服务的时空分异特征及协同权衡关系对该区域社会经济生态协调发展有重大意义。以宾县为研究区,综合利用 InVEST 模型、RUSLE 模型、CASA 模型、R 语言和 GeoDA 软件,定量测度该县 2000—2020 年产水量、土壤保持和碳固定 3 种生态系统服务的时空格局及权衡与协同关系。结果表明:(1) 从时间变化看,产水量呈上升趋势,碳固定和土壤保持呈先降低后上升的波动变化趋势;(2) 从空间分布看,产水服务高值区表现为由中部向四周递减的趋势,碳固定和土壤保持服务总体呈现为南高、东低的空间分布格局。(3) 权衡协同关系表明,2000—2020 年,协同关系是宾县生态系统服务间的主导关系;数值上,3 种生态系统服务的协同关系持续增强,具体表现在相关系数和 Moran's  $I$  指数的增加;空间上,正、负相关集聚性明显,权衡协同关系分布空间分异性显著。综上,宾县生态系统服务变化呈上升趋势,南部区域生态系统服务较强,未来应在空间上促进生态系统服务协同发展。

**关键词:**生态系统服务; 空间格局; 权衡协同; 宾县

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0293-08

## Spatial and Temporal Patterns of Ecosystem Services and Trade-off Synergistic Relationships in Bin County, Heilongjiang Province

NING Jing, SHI Dongwei, ZHOU Siyu, XIA Ziliang

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The northeast black soil region is an essential ecological zone and a major grain-producing area in China. The continuous reclamation and utilization for many years has aggravated the deterioration of the ecological environment in this region, so it is of great relevance to inquire into the spatial and temporal differentiation characteristics of ecosystem services and synergistic trade-offs in the black soil region for the coordinated socio-economic-ecological development of this region. Taking Bin County as the study area, we quantitatively measured the spatiotemporal patterns and trade-offs and synergistic relationships of three ecosystem services, namely water production, soil conservation and carbon fixation from 2000 to 2020 in the county using the InVEST, RUSLE, CASA model, R language and GeoDA software. The findings indicated that: (1) the temporal variation of water production showed an increasing trend, while carbon fixation and soil conservation showed a tendency to decrease and then increase; (2) the spatial distribution showed that the high value of water production service presented a decreasing trend from the central part to the surrounding area, while carbon fixation and soil conservation services presented a spatial distribution pattern of high in the south and low in the east; (3) the trade-off synergistic relationship showed that the synergistic relationship was the dominant relationship among ecosystem services in Bin County from 2000 to 2020; numerically, the synergistic relationship of the three ecosystem services continued to increase, which was evidenced by the increase of correlation coefficient and Moran's  $I$  index; spatially, the positive and negative correlation clustering was obvious; spatially, the positive and negative correlations clustered significantly, and the distribution of trade-off synergistic relationships was spatially divergent. In summary, changes in ecosystem services in

收稿日期:2021-07-15

修回日期:2021-08-06

资助项目:国家自然科学基金项目“农林交错区生态环境脆弱性及生态安全综合研究”(41971217)

第一作者:宁静(1978—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,研究方向为土地生态问题及 3S 技术。E-mail:njing\_today@163.com

Bin County are on an upward trend, with stronger ecosystem services in the southern region, and synergistic development of ecosystem services should be promoted spatially in the future.

**Keywords:** ecosystem services; spatial pattern; trade-off synergy; Bin County of Heilongjiang Province

生态系统服务是人类社会生存可持续发展的环境基础,人类能从自然生态系统中所获取物质和产品<sup>[1-2]</sup>。生态系统作为一个整体,其提供的生态系统服务具有多样性和空间分布异质性的特点<sup>[3]</sup>,随着全球经济高速发展及人类对自然资源攫取的不断增加,导致不同生态系统类型的生态系统服务在不同空间尺度上均有所下降,生态系统服务间的关系也变得更加动态多元,常见的则有互相助益的协同关系和互相制衡的权衡关系<sup>[4-6]</sup>。东北黑土区是世界仅存“三大黑土区”之一,黑土区土质肥沃,产粮能力高,被誉为“耕地中的大熊猫”。多年来人们为追求更大的经济利益,在黑土区进行了大规模开垦利用,导致黑土区生态环境问题频发,其中水土流失问题最为严重,流失面积约占黑土区总面积的 26.73%<sup>[7]</sup>,由此导致的生态环境变化也相应引起了生态系统服务及其权衡协同关系的变化,因此,在黑土区生态环境退化的背景下,对生态系统服务的时空格局特征及其权衡/协同关系的动态变化研究,能够更好地把握黑土区生态环境的变化趋势,为管理者制定黑土区保护政策提供新的研究视角及建议。

当前,生态系统服务的时空特征及权衡协同关系的研究已成为地理学科、生态学科及环境科学等的研究热点,国内外学者基于多种研究方法,在不同空间尺度上开展了生态系统服务的空间结构、流动效应以及权衡协同关系的表现形式、驱动机制和尺度效应等方面的研究<sup>[8-9]</sup>,Howe 等<sup>[10]</sup>运用系统制图的方法在全球尺度上分析了 2000—2013 年大量关于生态系统服务的案例研究,发现权衡关系几乎是协同关系效应的三倍;Karimi 等<sup>[11]</sup>采用 Spearman 秩相关分析法分析了英国米尔顿凯恩斯、贝德福德和卢顿在内的城市地区的 6 种不同生态系统服务的相关性,并通过主成分分析、K 均值聚类分析多种生态系统服务的分布、空间权衡协同效应,发现碳储量与其他 5 种生态系统服务均呈负相关;聂名萱等<sup>[12]</sup>基于多源数据,利用双变量空间自相关方法识别了苏锡常地区 3 种生态系统服务间的相关关系,结果发现,碳储存与食物供给服务、维持生物多样性服务表现为协同关系,而食物供给与维持生物多样性表现为权衡关系。Feng 等<sup>[13]</sup>引入贝叶斯信念网络半定量模型,将潜在影响因素与生态系统服务供给联系起来模拟生态过程,通过贝叶斯概率推理,识别了京津冀地区生态系统服务

的关系,研究发现生境质量、碳储量和土壤保持服务存在权衡。陈心盟等<sup>[14]</sup>通过对青藏高原的研究,探究不同土地利用情景模拟下生态系统服务的时空差异。孟浩斌等<sup>[15]</sup>以三峡库区为研究区,分别从全域和基于热点区的综合分区 2 种尺度上分析了生态系统服务的权衡协同关系,结果表明两种尺度下生态系统服务的相关系数有明显差异。东北黑土区是我国重要的生态功能区,其包含的产水量、土壤保持和碳固定是典型生态系统服务,研究其变化及 3 种服务的权衡协同关系对平衡经济发展与环境保护有重要意义。崔景轩等<sup>[16]</sup>研究了不同气候条件下水源涵养量的空间分异特征,此外还发现土地利用方式的变化是影响水源涵养量的重要因素,总体表现为林地>农田>草地>湿地;黑土区水土流失严重,而宾县作为水土流失治理试点工程之一,研究其土壤保持量的时空分异差异及动态变化,有利于分析和评估黑土区的水土流失治理情况。碳固定在生态系统服务中起着重要的气候调节作用,是衡量区域内生态系统功能的重要指标,黄麟等<sup>[17]</sup>研究了东北地区陆地生态系统的碳固定服务时空变化,研究表明森林生态系统碳固定服务最强,与宾县碳固定服务的研究结果基本一致,强化环境保育政策,将有利于碳固定服务的提升。

从以上研究可以发现,学者们对生态系统服务的研究在不同空间尺度上已取得很大进展,但仍处在一些不足。从研究方法上看,当前生态系统服务权衡协同关系主要有数学统计法、空间分析法、生态系统服务流动性分析法以及情景分析法等<sup>[18]</sup>,较少研究同时结合时间、空间角度比较分析权衡与协同的整体关系;从研究区域上看,多集中于流域、水源区及经济发达地区,有关东北黑土区生态系统服务的研究则较为少见,此外由于生态系统服务具有时空动态性和尺度效应,同一空间尺度下可能存在多种生态系统服务<sup>[19]</sup>,因此需要开展省市—县市—乡镇—栅格等多尺度空间尺度的多类型生态系统服务的权衡/协同关系研究。基于此,文章选取位于典型黑土区东部边缘宾县为研究区,以 1 km×1 km 格网作为评价单元,综合运用 InVEST 模型、CASA 模型和 RUSLE 模型,定量测度 2000—2020 年生态系统产水量、碳固定和土壤保持服务的时空分布格局,并利用 R 和 GeoDA 软件,借助 Pearson 相关分析法和双变量局部空间自相关方法,从时空两个角度探讨生态系统服务间

权衡关系变化特征,并比较其时空上权衡关系的差异,揭示其动态性和空间异质性,以期为该县区域发展和生态环境重点保护区的制定提供科学参考。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

宾县位于黑龙江省南部,隶属于哈尔滨市,地理位置位于 126°55′—128°19′E,45°30′—46°01′N,地处张广才岭和松江平原交汇处,总面积约 3 843.16 km<sup>2</sup>,共辖 5 乡 12 镇(图 1)。宾县地势东南高,西北低,平均海拔高度 405 m;宾县位于松花江南岸,境内有 8 条主要河流,水文地质条件复杂,多年平均地表径流量为 4.11 亿 m<sup>3</sup>;气候属于寒温带大陆性季风气候,年均降水量为 570 mm,春季干旱少雨,夏季潮湿多雨。宾县位于典型黑土区东部边缘,主要土壤类型为黄黑土和黑土,黑土主要分布于漫岗丘陵区,黑土土质较为疏松,抗水蚀能力极弱<sup>[20]</sup>,主要土地利用类型为耕地和林地,耕地面积大约 1 673.81 km<sup>2</sup>,面积比例达 43.5%,主要分布于

中部丘陵区 and 北部平原区,该区域交通便利,是主要的农业区。林地面积达 32.1%,分布于东南部地势较高,植被覆盖度高,是宾县的生态屏障。



图 1 研究区位置及高程

### 1.2 数据来源

本文数据主要包括:(1)以地形数据、遥感数据、气象数据、土壤数据在内的自然环境数据;(2)以获取模型计算中相关参数设置的参考文献数据,以上均经投影重采样为 WGS\_1 984\_UTM\_Zone\_52 N,空间分辨率 30 m 的栅格数据(表 1)。

表 1 数据来源

数据类型	数据名称	数据来源	备注
自然环境数据	土地利用数据	地理空间数据云平台	经由 Landsat8 遥感影像解释
	数字高程数据(DEM)	( <a href="http://www.gscloud.cn/sources/">http://www.gscloud.cn/sources/</a> )	ASTER GDEM 数据
	气象数据	国家气象信息中心( <a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a> )	经由普通克里金插值,包括降雨、日温、日照、风速等日值数据
	归一化植被指数(NDVI)	美国国家航天航空局( <a href="https://www.nasa.gov/">https://www.nasa.gov/</a> )	来源于 MODIS 产品,MOD13Q116d 数据按月合成
	土壤数据	寒区旱区科学数据中心( <a href="http://westdc.westgis.ac.cn/">http://westdc.westgis.ac.cn/</a> )	包含粉粒、砂砾、黏土、土层深度等数据
参考文献数据		崔景轩 <sup>[16]</sup> 、张翀 <sup>[22]</sup> 、祁宁 <sup>[23]</sup> 等	用于 InVEST 产水量模型中 kc 和碳固定模型参数设置

## 2 研究方法

### 2.1 产水量服务

产水服务是表征区域内水源供给及其保障的能力,选择 InVEST 模型中 Water yield 模块基于水量平衡原理,栅格单元产水量大小为其降水量与实际蒸散量的差值。计算公式为:

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \tag{1}$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[ 1 + (\frac{PET_x}{P_x})^w \right]^{\frac{1}{w}} \tag{2}$$

$$PET_x = K_{c_x} \times ETO_x \tag{3}$$

$$W_x = \frac{AWC_x \times Z}{P_x} + 1.25 \tag{4}$$

式中: $Y_x$ 、 $AET_x$ 、 $P_x$ 、 $PET_x$  分别为研究区内每个单元栅格内  $x$  的多年平均产水量(mm)、年均实际蒸散量(mm)、年均降水量(mm)和潜在蒸散量(mm); $W$  为非物理参数; $K_{c_x}$  为每栅格单元的植物的蒸散发系数; $ET0_x$  则为植物的参考蒸散量;式中  $AWC_x$  是植

被土壤中的有效含水量; $Z$  为季节常数 Zhang 系数,经线性拟合得出  $Z$  的最优值为 4.12。

### 2.2 土壤保持服务

土壤保持服务表征绿色植被保护土壤及其肥力的能力,本文运用修正的通用土壤侵蚀模型(RUSLE)来估算宾县的土壤保持量<sup>[21]</sup>,计算公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times C \times P \tag{5}$$

式中: $A_c$  为年均土壤保持量[t/(hm<sup>2</sup>·a)];是潜在侵蚀量  $A_p$  和实际侵蚀量  $A_r$  的差值,潜在土壤侵蚀量是指未采取任何水土保持措施条件下的土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)],而实际土壤侵蚀量则指在基于范围内植被覆盖以及利用水土保持措施下的土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]。 $R$  为多年平均降雨侵蚀力因子,由 Wischmeier 经验公式求得; $K$  为土壤可侵蚀量因子,采用 EPIC 模型计算; $LS$  分别为坡长、坡度因子,采用 Zhang 的方法计算,无量纲; $C$  为植被的覆盖度与经营管理因子,引用蔡崇法提出的的计算; $P$  为水土保持管理因子。



### 2.3 碳固定服务

碳固定是指在植被生长过程中通过光合作用固定碳和释放氧气的过程<sup>[22]</sup>,本项目拟采用改进的 CASA 模型测算 NPP,通过光合作用方程,NPP 可转换为碳存量。计算公式如下:

$$Mc=Nc\times\beta\times\sum NPP\tag{6}$$

式中:Mc 为植被固定大气中 CO<sub>2</sub> 中碳的含量;Nc 为 CO<sub>2</sub> 中 C 的含量,即 27.27%;β=1.63,表示植被每生产 1 kg 有机物会固定 1.63 kgCO<sub>2</sub>。

### 2.4 权衡与协同关系分析

为了深入地探讨生态系统产水量、土壤保持和碳固定服务三者权衡协同关系的时空变化特征。时间动态变化上,可借助 Pearson 相关系数,定量表达连续变量间的线性相关程度<sup>[23]</sup>。相关系数>0,表明两个变量间为同增同减的协同关系,反之为此消彼长的权衡关系。空间动态变化上,可借助双变量局部空间自相关实现两两生态系统服务所呈现的权衡协同分布关系,双变量 LISA 聚类图中的不同集聚类型表示权衡区或协同区,具体表现为 5 类:高一高集聚协同区、低—低集聚协同区、高一低集聚权衡区、低—高集聚权衡区、以及不显著区<sup>[24]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 产水量生态系统服务的时空格局变化

产水量的大小反映区域水源供给与保障的能力,产水量高说明土壤和土地覆被的水源涵养能力低,反之说明水源涵养能力高。

宾县生态系统产水服务的时空分布情况如下(见图 2—3),从时间特征来看,2000—2020 年,宾县产水

量介于 0~206.19(mm),年平均产水量分别为 76.03 (mm),111.42(mm)和 118.93(mm),20 a 间,年平均产水量增加了 42.90(mm),2010 年和 2020 年的蒸散量分别增加了 8.5%和 7.0%,年均降水量分别降低了 25.84%和 23.12%,降水量增幅更大,产水量增加,表明水源涵养能力增强;从空间特征来看,产水量整体上呈现为由中部高、四周低的分布格局,这主要是因为中部区域地势相对平缓,主要土地利用类型为耕地,蒸散量较小,东南部多为低山林区,人类活动足迹较少,密林遍布,植被覆盖高,气温较低,植被蒸散量大;而北部区域邻近松花江,水草丰茂,土地用地类型多为水田,蒸散量也较大,因此产水量较低。从变化情况来看,2000—2020 年宾县生态系统服务产水量的变化值为-146.57~184.03(mm),增加区域面积占全面的 94.96%,集中分布在中部以东区域,减少区域多分布在宾县西部和松花江沿岸区域。

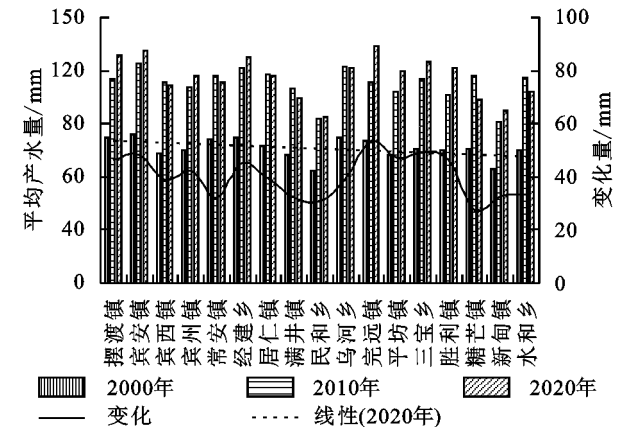


图 2 2000—2020 年宾县(乡镇)生态系统产水服务时间变化趋势

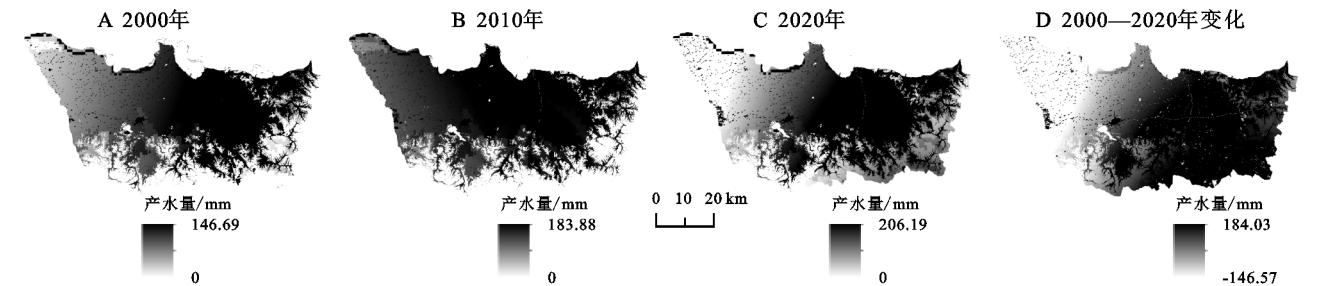


图 3 2000—2020 年宾县生态系统产水服务时空分布及变化

### 3.2 土壤保持生态系统服务时空格局变化

土壤保持服务是水源涵养、保持土壤肥力和植被固着等服务功能的重要基础,土壤保持量高,表明区域内水土保持功能强<sup>[25]</sup>。宾县生态系统土壤保持服务时空分布情况图 4—5,从时间特征来看,2000 年、2010 年、2020 年宾县年平均土壤保持量分别为 22.64,12.45,23.49 t/hm<sup>2</sup>,多年平均土壤保持量为 19.53 t/hm<sup>2</sup>,多年来,土壤保持量呈降低趋势,总体来看,土壤保持量呈现

为先减少后增加的趋势。土壤保持量不仅受到降水量的影响,还与植被覆盖度高低有关,2010 年以来宾县建设用地增加较多,植覆盖度降低,导致土壤保持量下降。从空间特征来看,土壤保持量呈西南高、东北低的分布格局,高值区约占总面积的 24%,主要分布在西南部区域,该区域地形复杂,土地利用类型以林地和草地为主,植被丰富,保水功能较强,能够减少土壤侵蚀量。低值区主要分布东北部区域,该区域地势较低,属于低河漫滩区,

用地类型多以旱地和水田为主,植被类型单一,拦截泥沙能力弱,因此土壤保持量较低。从变化情况来看,2000—2020 年宾县生态系统土壤保持量的大小在 4 071.15 ~ 1 071.61 t/hm<sup>2</sup> 范围内变化,减少区域为 95.41%,表明全县绝大部分区域土壤保持量均有所下降,增加区域主要分布在宾县北部边缘区域和宾县西南部。

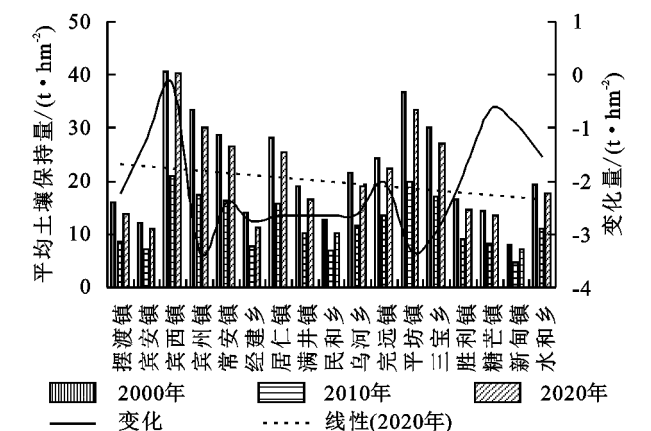


图 4 2000—2020 年宾县(乡镇)生态系统土壤保持服务时间变化趋势

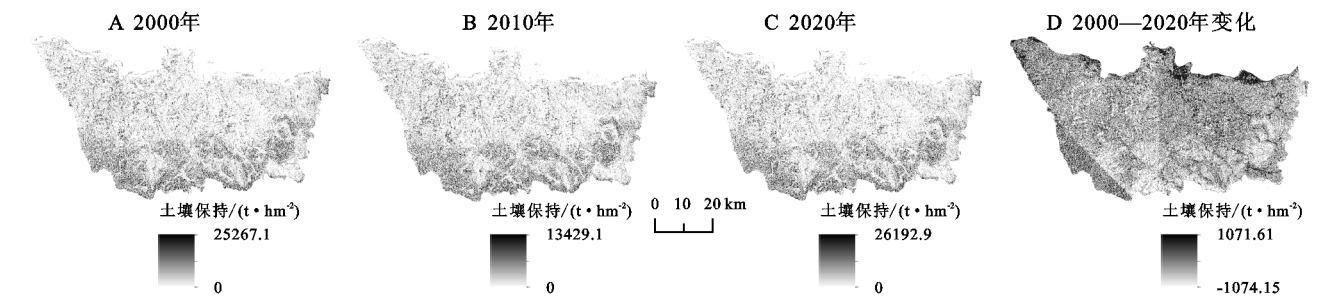


图 5 2000—2020 年宾县生态系统土壤保持服务时空及分布

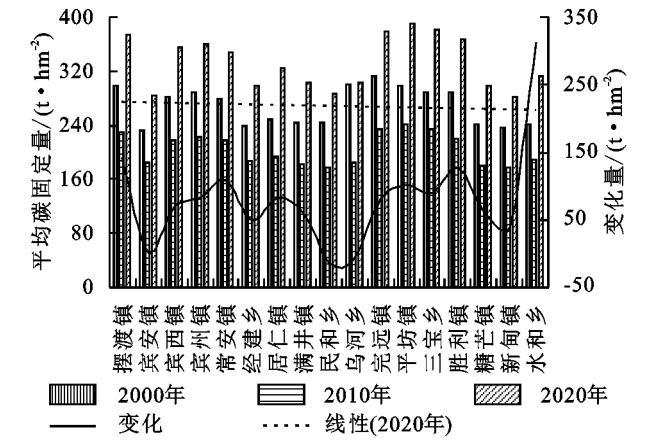


图 6 2000—2020 年宾县(乡镇)生态系统碳固定服务时间变化趋势

**3.4 生态系统服务权衡与协同关系的时空特征分析**  
**3.4.1 生态系统服务权衡与协同关系的时间变化**  
基于 1 km 栅格尺度,对生态系统服务进行分区统计,首先将产水量、土壤保持和碳固定 3 种生态系统服务数值进行标准化(Z-score),其次通过 R 软件,绘制散点图矩阵,以此探究 3 种生态系统服务在时间上的相关特性<sup>[27]</sup>。

**3.3 碳固定生态系统服务时空格局变化**

碳固定主要基于植被光合作用原理<sup>[26]</sup>,表明区域内气候调节变化能力的强弱,碳固定量值的高低,表示生态系统固碳作用对区域气候的影响程度。宾县生态系统碳固定服务时空分布情况图 6—7,从时间特征来看,2000—2020 年宾县年均碳固定量依次为 271.64, 208.81, 339.47 t/hm<sup>2</sup>,多年平均值为 273.31 t/hm<sup>2</sup>,年均碳固定量呈先降低后上升的趋势,表明气候调节能力从空间特征来看,碳固定呈东南高西北低的分布格局,空间异质性显著。2000 年、2010 年、2020 年高值区面积占比分别为 57.20%, 57.07% 和 66.25%,分布于东南部林区,该区域地形复杂,林地密布,植被覆盖度高,碳固定能力较高,低值区则分布于中部丘陵区 and 北部平原区,植被覆盖度低,碳固定能力弱。从变化情况来看,2000—2020 年宾县生态系统碳固定量的变化值介于一 307.66 ~ 468.65 t/hm<sup>2</sup>,增加区域(96.7%)远大于减少区域(3.30%),减少区域主要分布在研究区宾县中部以北区域,呈现为由周围向中间逐渐降低的空间分布格局。

碳固定与产水量、土壤保持服务的相关系数均 > 0,呈现为正相关关系,碳固定与土壤保持服务的协同关系显著,产水量与土壤保持服务相关性关系微弱,权衡协同关系不明显。具体表现为:2000—2020 年,产水量和碳固定服务在 2000—2020 年的相关系数由 2000 年(0.007)上升到 2020 年(0.31),表明协同程度增强;产水量与土壤保持服务的相关关系微弱,相关系数由 2000 年的 -0.014 逐年增加到到 0.058,说明相关关系由微权衡转变为微协同,两者相关关系的转变证实了生态系统服务权衡协同关系具有可逆性这一特性;2000 年、2010 年和 2020 年土壤保持与碳固定服务始终表现为显著的协同关系,相关系数在 0.4 ~ 0.5 范围上升,年际变化平稳,协同程度稳定增强。  
**3.4.2 生态系统服务权衡与协同关系的空间变化**  
借助 GeoDA 软件,对宾县生态系统产水量、土壤保持和碳固定服务进行双变量空间自相关分析(图 8),分析结果的显著度均高于 95%。在双变量空间自相关分析中,高一高和低—低集聚均表示协同关系,而高一低和低—高集聚则表示为权衡关系<sup>[28]</sup>。

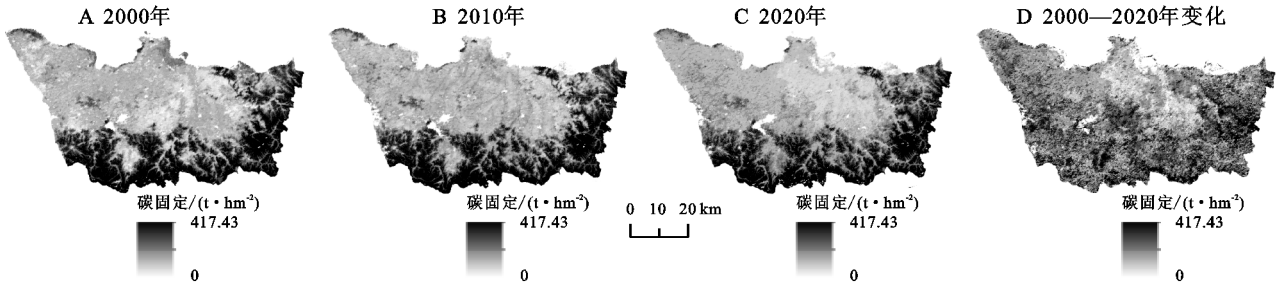


图 7 2000—2020 年宾县生态系统碳固定服务时空分布及变化

生态系统产水量、土壤保持和碳固定服务的权衡/协同关系具有时空异质性,具体表现为:(1) 产水量与碳固定服务,2000 年和 2010 年主要为高一低和低一高集聚的权衡类型(25.58%,21.54%)。2000 年高一低集聚类型主要集中在研究区中部,低一高集聚类型集中在东南部;2010 年高一低集聚类型大幅减少,东南部低一高集聚类型增加;2020 年产水量与碳固定服务间的关系类型转变为以高一高和低一低集聚为主的协同类型(18.96%),协同关系主要分布于研究区北部松花江邻岸和东南部低山林区;2000—2020 年高一低和低一高集聚单元由 1 032 个不断减少至 529 个,表明权衡区域不断缩减,变化类型主要

为低一高集聚转变为高一高集聚,变化区域则集中在宾县东南部。(2) 产水量和土壤保持服务,2000—2020 年均是以高一低和低一高集聚为主的权衡类型(18.84%,18.82%,17.67%),空间集聚分布稳定,低一高集聚权衡关系多处于研究区西南部林区,而高一低集聚权衡关系则散乱分布在在研究区中部以北区域;(3) 碳固定与土壤保持服务,2000—2020 年均主要表现为协同关系(24.12%,24.47%,24.96%),低一低集聚栅格单元占协同关系的 59.78%,表明协同关系在空间上以低一低集聚为主导,低一地集聚区多集中于研究区北部区域,高高集聚则分布于西南部低山丘陵区。

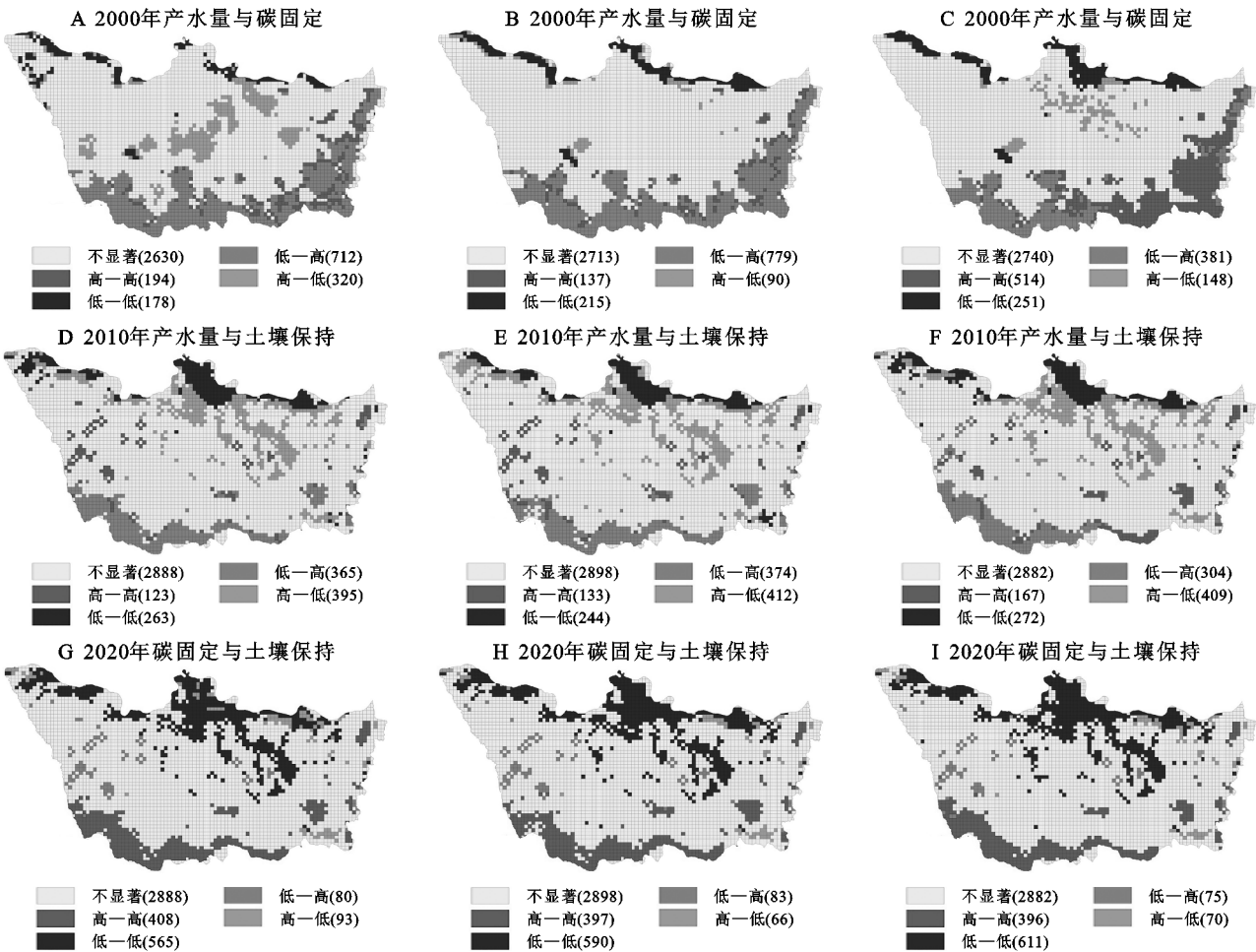


图 8 2000—2020 年宾县生态系统服务权衡与协同关系的空间分布



3.4.3 生态系统服务权衡与协同关系的时空比较

通过对比生态系统服务间权衡与协同关系的时间变化和空间变化(表 2)可知,宾县 3 种生态系统服务的权衡/协同关系是:土壤保持和碳固定服务在时空上均呈显著的协同关系;产水量与土壤保持服务在时空上相关性均表现微弱。时间上,由负相关转变为正相关,空间上亦由微弱的权衡关系转变为微弱的协同关系,权衡/协同关系不明显;产水量与碳固定服务的相关关系在时空上表现不一致,时间上表现为不断加强的协同作用,而空间上由弱权衡转变为显著的协同关系。

表 2 宾县生态系统服务局部自相关 Moran's I			
年份	产水量—碳固定	产水量—土壤保持	碳固定—土壤保持
2000	−0.010	−0.015	0.425
2010	0.011	0.029	0.428
2020	0.275	0.064	0.441

4 讨论

土地利用方式的转变与生态系统服务的权衡协同关系密切。2000—2020 年,宾县生态系统结构未发生显著变化(表 3),与 2000 年相比,2020 年研究区耕地面积减少了 2.78%,林地面积增加了 1.53%,草地面积基本不变,未利用地面积减少了 3.24%,水域面积增加了 66.34%,建设用地面积增加了 51.22%。主要原因是 90 年代末以来,开始实施退耕还林还草政策,以及城镇化建设的推进等,致使林地面积稳定增加,建设用地大面积扩张,生态系统结构的改变在很大程度上能够导致生态系统服务产生相应的变化<sup>[29]</sup>。因此,为保证生态系统服务和土地资源的可持续利用,建议从严格控制建设占用耕地,保证黑土区优质耕地不被占用,禁止无节制的土地复垦,避免水土流失进一步加强;合理规划土地资源,盘活未利用地,选取合适的区域进行改造利用;设立生态系统服务高值区为生态保护区,以此增强该区域的生态功能。

表 3 2000—2020 年宾县土地利用/覆被类型						
km <sup>2</sup>						
年份	耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用地
2000	2413.50	372.85	786.76	32.62	74.82	146.88
2005	2359.76	371.96	793.04	58.71	81.02	143.69
2010	2372.39	377.26	801.51	50.27	83.37	142.57
2015	2383.63	381.51	794.18	53.96	84.62	143.29
2020	2346.75	372.40	798.76	54.26	113.14	142.12

充分了解黑土区生态系统服务的时空分异和权衡协同关系变化,是协调生态系统管理的多元目标,是制定生态系统管理政策的重要前提。该研究在 1 km 格网尺度上,对宾县产水量,土壤保持和碳固定服务进行定量测算及权衡关系分析,发现宾县生态系统服务的分布

特征与该县由东南山地至北部丘陵到平原逐渐向松花江倾斜的地形地貌有关,南部山地丘陵地区土壤保持和碳固定服务能力均高于平原地区,产水服务能力低于平原地区;此外其权衡协同关系的空间分布特征也存在明显差异,这一结论与他人研究结论基本一致,其中祁宁等<sup>[30]</sup>在划分东北地区生态功能区的研究中发现,东北部森林生态平衡区主要分布在黑龙江东部,以及大兴安岭和小兴安岭山脉,该区域水源涵养、土壤保持和固碳功能相互平衡,呈现为显著的正相关关系,但也与其他研究成果存在差异,如戴路炜等<sup>[31]</sup>在北方农牧交错带发现权衡关系主要存在于产水量与土壤保持、产水量与碳固持当中;林世伟<sup>[32]</sup>在“三江并流区”生态系统服务的空间权衡关系研究中表明土壤保持和碳储量几乎不存在相关性,其原因是生态系统服务及其权衡协同关系具有动态性和空间异质性,生态系统服务及其权衡协同关系随着不同时空尺度下的社会自然条件变化而变化。本文采用广泛利用的相关分析法,用以分析时间尺度上生态系统服务权衡关系变化,采用双变量局部空间自相关分析空间尺度上生态系统服务的集聚分散情况,未能解释其内部生态系统服务的相互作用机制,此外仅选取产水量、土壤保持和碳固定 3 种生态系统服务,忽略了其他生态系统服务的研究价值,因此,未来应从覆盖多种生态系统服务类型、构建栅格—乡镇—县域多级评价单元,寻求更为科学的方法研究生态系统服务的内部机制变化等方面进行更深入的研究。

5 结论

- (1) 2000—2020 年,时间上,宾县产水量呈上升趋势,碳固定和土壤保持表现为先减少后增加的波动变化趋势。空间上,宾县产水量呈中部高、四周低的分布格局,碳固定表现为由东南向西北递减的趋势,土壤保持则呈西南部高东北部低的态势。
- (2) 2000—2020 年,相关分析表明,协同关系是宾县产水量、土壤保持和碳固定 3 种生态系统服务间的主导关系,其中产水量与碳固定服务的协同关系稳步增强,产水量与土壤保持服务,由微弱的权衡关系转变为协同关系,碳固定与土壤保持服务正相关性显著,协同程度最高;空间分析表明,生态系统服务权衡协同关系的空间分布异质性显著。产水量与碳固定服务间由以低—高集聚为主的权衡关系转变为以高一高集聚为主的协同关系,变化区域集中于东南部;产水量与土壤保持服务均是呈以低—高和高—低集聚为主的权衡类型;碳固定与土壤保持服务的协同关系稳定,以低—低和高—高集聚为主导。

(3) 2000—2020年,产水量与土壤保持、产水量与碳固定服务的 Moran's *I* 指数值和相关系数值在时空上存在一定差异,而碳固定与土壤保持服务在时空上基本一致,均表现为显著的协同关系。

#### 参考文献:

- [1] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [2] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services: The need for standardized environmental accounting units [J]. Ecological Economics, 2007,63(2/3):616-626.
- [3] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters, 2009,12(12):1394-1404.
- [4] 张静静,赵天旭,梁丹.伏牛山地区森林生态系统服务空间差异分析[J].生态环境学报,2020,29(7):1285-1291.
- [5] 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[J].地理研究,2013,32(8):1379-1390.
- [6] Paul R J, Douglas B T, Bennett E M, et al. Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services[J]. ECOLOGY AND SOCIETY, 2005, 11(1):709-723.
- [7] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
- [8] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J].地球科学进展,2015,30(11):1250-1259.
- [9] 潘竞虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].农业工程学报,2017,33(17):280-289.
- [10] 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 synergies in the real world[J]. Global Environmental Change, 2014,28:263-275.
- [11] Karimi J D, Corstanje R, Harris J A. Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: trade-offs and synergies in urban landscapes[J]. Landscape Ecology, 2021,36(6):1817-1835.
- [12] 聂名萱,黄思华,濮励杰,等.快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析:以苏锡常地区为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1088-1099.
- [13] Feng Z, Jin X, Chen T, et al. Understanding trade-offs and synergies of ecosystem services to support the decision-making in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Land Use Policy, 2021,106:105446.
- [14] 陈心盟,王晓峰,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J].地理研究,2021,40(1):18-34.
- [15] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.三峡库区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):566-575.
- [16] 崔景轩,李秀芬,郑海峰,等.典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J].生态学报,2019,39(9):3026-3038.
- [17] 黄麟,刘纪远,邵全琴,等.1990—2030年中国主要陆地生态系统碳固定服务时空变化[J].生态学报,2016,36(13):3891-3902.
- [18] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.
- [19] 吴炜,项文化,勾蒙蒙,等.中亚热带3种次生林生态系统服务权衡与协同[J].森林与环境学报,2019,39(3):256-264.
- [20] 宁静,杨子,姜涛,等.东北黑土区不同垄向耕地沟蚀与地形耦合规律[J].水土保持研究,2016,23(3):29-36.
- [21] 王晓峰,程昌武,尹礼唱,等.新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J].生态学杂志,2020,39(3):990-1000.
- [22] 张翀,任志远.陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评[J].地理研究,2015,34(8):1522-1534.
- [23] Li T, Lü Y, Fu B, et al. Bundling ecosystem services for detecting their interactions driven by large-scale vegetation restoration: Enhanced services while depressed synergies [J]. Ecological Indicators, 2019, 99: 332-342.
- [24] 蒙古军,郭力仁,朱丽君,等.黑河中游耕地多功能性时空变化及权衡[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):823-835.
- [25] 刘洋.基于 InVEST 模型的疏勒河流域生态系统服务功能时空演变[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
- [26] Fang J, Yu G, Liu L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16):4015-4020.
- [27] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学杂志,2019,38(2):521-531.
- [28] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [29] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J].地理研究,2020,39(1):64-78.
- [30] 祁宁,赵君,杨延征,等.基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2020,40(9):2827-2837.
- [31] 戴路炜,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2020,40(9):2863-2876.
- [32] 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.