#### DOI: 10.5846/stxb202205041231

荔童,梁小英,张杰,耿雨,耿甜伟,石金鑫.基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析——以陕北黄土高原为例.生态学报,2023,43(16):6758-6771.

Li T, Liang X Y, Zhang J, Geng Y, Geng T W, Shi J X. Ecosystem service trade-off and synergy relationship and its driving factor analysis based on Bayesian belief network; a case study of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16):6758-6771.

# 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱 动因子分析

——以陕北黄土高原为例

荔 童<sup>1,2</sup>,梁小英<sup>1,2,\*</sup>,张 杰<sup>1,2</sup>,耿 雨<sup>1,2</sup>,耿甜伟<sup>3</sup>,石金鑫<sup>1,2</sup>

1 西北大学城市与环境学院,西安 710127

2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127

3太原师范学院地理科学学院,晋中 030619

摘要:了解生态系统服务的权衡协同关系及其驱动因子效应是实现生态系统有效管理和改善人类福祉的基础。以陕北黄土高 原为例,定量评估其 2018 年土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务,在构建贝叶斯网络生态系统服务模型的基础上,通过节 点的重要性分析识别影响生态系统服务的关键节点,利用联合概率分布、概率推理和情景模拟探讨生态系统服务权衡协同关系 及其驱动因子效应。结果表明:(1)陕北黄土高原各类生态系统服务空间异质性较强。其中,土壤保持、产水服务和固碳服务 的空间分布情况较为一致,高值区集中在东南部,低值区在西北部,呈"南高北低"的分布特征;粮食供给呈"中部高、南北低"的 分布特征。(2)土壤保持、产水服务和固碳服务之间互为协同关系,粮食供给分别与土壤保持、产水服务、固碳服务为权衡关 系。其中,产水服务与固碳服务的协同关系、产水服务与粮食供给的权衡关系较强。(3)土地利用、降水和 NPP(Net primary production)是影响生态系统服务权衡协同关系的主要驱动因子,其中土地利用主要影响生态系统服务的协同关系,而降水和 NPP 在影响协同关系的同时对权衡关系也有一定的制约作用。研究发现:不同驱动因子在不同状态下产生相同的协同(或权 衡)方式,相同驱动因子在不同状态则会造成协同(或权衡)方式的差异。研究对于认识多种生态系统服务间的复杂关系及其 驱动因子差异,为后续提出改善生态系统管理和提高人类福祉的对策与措施,具有重要的理论和实践价值。 关键词:生态系统服务权衡协同;贝叶斯网络;概率推理;驱动因子;陕北黄土高原

## Ecosystem service trade-off and synergy relationship and its driving factor analysis based on Bayesian belief network: a case study of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province

LI Tong<sup>1,2</sup>, LIANG Xiaoying<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, GENG Yu<sup>1,2</sup>, GENG Tianwei<sup>3</sup>, SHI Jinxin<sup>1,2</sup>

1 College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China

3 Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

**Abstract**: Understanding the trade-offs and synergies among various ecosystem services and the differences in their driving factors, which is the foundation for effective ecosystem management and improved human well-being. Taking the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province as the study area. Firstly, the soil conservation, water production services, grain

基金项目:国家自然科学基金项目(42171256,41971271)

收稿日期:2022-05-04; 网络出版日期:2023-03-09

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liangxy@ nwu.edu.cn

supply and carbon sequestration services were quantitatively assessed in the the study area in 2018. Secondly, based on the Bayesian network ecosystem service model, key nodes affecting ecosystem services were identified by node importance analysis. Finally, joint probability distribution, probabilistic reasoning and scenario simulation were used to explore the synergistic relationship of ecosystem service trade-offs and their driving factors. The results showed that: (1) The spatial heterogeneity of various ecosystem services was strong in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. In terms of soil conservation, water production and carbon sequestration services, the spatial distribution of these three services was relatively consistent, that was, the high value area was concentrated in the southeast, and the low value area was in the northwest, showing the distribution characteristics of high in the south and low in the north. But for grain supply, it showed a distribution pattern of high in the middle and low in the north and south. (2) There was a synergistic relationship among soil conservation services, water production services and carbon sequestration services. However, soil conservation, water production and carbon sequestration services had trade-offs with grain supply, respectively. Among them, the synergistic relationship between water production service and carbon sequestration service, and the trade-off relationship between water production service and grain supply were relatively strong. (3) Anthropogenic and natural factors such as land use, precipitation and NPP (Net primary production) were the main driving factors affecting the trade-offs and synergies of ecosystem services in the study area. Among them, land use factors mainly affected the synergetic relationship between the ecosystem services, while precipitation and NPP factors not only affected the synergetic relationship but also restricted the trade-offs relationship to a certain extent. Further research showed that, land use, precipitation and NPP drivers produced the same synergy or trade-off in different states. Conversely, the same drivers in different states would lead to differences in the way of synergy or trade-off. This study had important theoretical and practical value for understanding the complex relationships among various ecosystem services and their driving factors, and for proposing countermeasures and measures to improve ecosystem management and human well-being.

Key Words: trade-offs and synergies of ecosystem services; Bayesian belief network; probabilistic inference; driving factor; the Loess Plateau in northern Shaanxi Province

自 2005 年千年生态系统评估发表以来,生态系统服务(Ecosystem Services,ES)研究已逐渐受到学术界的 关注<sup>[1-2]</sup>。其中,探讨和分析不同生态系统服务之间的权衡与协同作用已成为重要方向之一<sup>[3-5]</sup>;且如何辨 识生态系统服务之间多重非线性关系及其影响因素的研究已成为该方向的研究热点之一,它对实现生态系统 管理可持续发展和改善人类福祉,具有重要的理论和现实意义。

目前,有关生态系统服务之间的相关关系,即权衡与协同关系及其驱动因子分析已取得较大进展。研究 大多采用相关分析<sup>[6-9]</sup>、空间制图<sup>[10-13]</sup>、情景分析<sup>[14-16]</sup>、最小二乘回归和地理加权回归<sup>[17]</sup>等方法,虽可直观 地揭示生态系统服务间的相关性,但在反映生态系统服务间的非线性关系方面略有不足,在准确表达生态系 统服务间权衡协同关系的内在机理及其驱动因素方面还有较大提升空间。基于贝叶斯网络模型在表达多要 素间非线性关系的优势,已有学者采用该模型探讨单一生态系统服务与多因素间的相关性研究。比较有代表 性的如李晶等<sup>[18]</sup>和 Dang 等<sup>[19]</sup>,前者利用贝叶斯网络模拟水源涵养服务过程,根据设置的不同土地利用情景 预测 2050 年的水源涵养服务状态概率,对关天经济区水源涵养服务空间格局进行优化;后者基于贝叶斯网络 模型探讨环境和人为因素对水稻供给服务产生的影响,优化水稻供给能力并为农业的可持续发展提供决策支 持。上述研究主要是基于贝叶斯网络探讨多种因素对单一服务的影响,对于多种 ES 权衡协同及其驱动因素 效应差异的研究较少。即在一定区域范围内,如何构建基于多种生态系统服务的贝叶斯网络模型、辨识生态 系统服务间的多重非线性关系及其驱动因子,正是本文的研究重点和要解决的关键问题。

基于此,本文以陕北黄土高原为研究对象,在定量评估其2018年土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务的基础上,构建基于贝叶斯网络的生态系统服务模型,利用联合概率分布分析4种ES的权衡协同关系,最

后探讨影响 ES 权衡协同关系的驱动因子及其效应差异。研究对于提升对多种生态系统服务复杂关系的认识、提高研究区生态系统的整体效益均具有重要意义。

#### 1 研究区概况和数据来源

#### 1.1 研究区概况

陕北黄土高原位于中国黄土高原地区的中心地带, 陕西省北部,地理坐标 35°16′—39°34′N,107°15′— 111°15′E。地势西北高、东南低,基本地貌类型为黄土 塬、梁、峁、沟、塬。地域南北长、东西窄,总面积为 92521.4 km²,占全部黄土高原总面积的 12.6%(图1)。 气候类型为温带大陆性半干旱气候,年均温为 8— 12℃,年降水为 350—600 mm。区域土地利用类型以 耕地、林地和草地为主,呈西北耕地向东南林地和草地 过渡的空间格局。该区行政区划包括榆林市和延安市, 下辖府谷、神木和榆阳等 25 个县(市/区),2018 年总人 口达 767.72 万人,人口密度为 83 人/km²。

作为高度敏感的生态脆弱区之一,陕北黄土高原一 直是政府和学者关注的焦点区域<sup>[20-21]</sup>,连续 15 年的退 耕,使得该区各类 ES 变化明显。加之陕西乡村振兴战 略的逐步落实,势必对该区 ES 的供给、需求和调节产 生多样性影响。本文以陕北黄土高原为案例地,为分析 区域生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子提供了 良好的研究平台。



1.2 数据来源与处理

研究数据主要包括:(1)气象数据:气温、降水空间插值数据,分辨率1km,来源于国家地球系统科学数据 中心(http://www.geodata.cn);(2)2018年土地利用数据:分辨率30m,来源于中国科学院资源环境科学数据 中心(http://www.resdc.cn);(3)NDVI、NPP数据:分辨率为1km、500m,来源于美国国家航天航空局 (NASA)提供的数据(https://search.earthdata.nasa.gov/search);(4)DEM数据:分辨率90m,来源于地理空间 数据云平台(http://www.gscloud.cn);(5)人口密度数据:分辨率1km,来源于世界人口数据集(http://www. worldpop.org);(6)土壤数据:采用基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,比例尺为1:100万,来源 于寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)。以上数据均在ArcGIS 10.6平台上进行数据预处理, 将所有栅格数据重新采样,空间分辨率为1km。此外,数据均采用 Albers 投影。

2 研究方法

#### 2.1 生态系统服务量化

结合研究区水资源短缺、水土流失严重、生态环境脆弱等地理特征和资源环境状况,本文选择土壤保持、 产水服务、粮食供给和固碳服务等评估其生态系统功能,并采用 InVEST 模型、ArcGIS 等方法对上述服务进行 量化。

#### 2.1.1 土壤保持

利用 InVEST 模型的泥沙输移比模块对土壤保持服务进行评估,该模块以通用的水土流失方程为基础, 考虑上游水源截留沉积的泥沙量。计算公式:

$$SR = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \tag{1}$$

式中, *SR* 为土壤侵蚀总量(t);*R* 为降雨侵蚀性因子(MJ mm hm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup>),采用 Wischmeier 和 Mannering<sup>[22]</sup>提出的公式计算;*K* 为土壤可蚀性因子(t hm<sup>2</sup>h MJ hm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup>),*LS* 为坡度坡长因子,无量纲;*C* 为植被覆盖和作物管理因子,无量纲,参照蔡崇法等<sup>[23]</sup>的研究成果;*P* 为水土保持措施因子,无量纲。

#### 2.1.2 产水服务

利用 InVEST 模型中的产水模块计算产水量,计算公式:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)}\right) \times P(x)$$
(2)

式中, Y(x)、AET(x)、P(x)分别为栅格单元 x 的年产水量(mm)、年实际蒸发量(mm)、年降水量(mm),具体计算步骤详见包玉斌等<sup>[24]</sup>的研究。

#### 2.1.3 固碳服务

利用 InVEST 模型的碳储量模块对固碳服务总量进行计算,模块包括地上物质、地下物质、土壤和死亡有机物碳储量,求其和获得总碳储量。计算公式:

$$C_{\rm tot} = C_{\rm above} + C_{\rm below} + C_{\rm soil} + C_{\rm dead}$$
(3)

式中, $C_{tot}$ 为总碳储量(t), $C_{above}$ 、 $C_{below}$ 分别为地上、地下生物量中的碳量(t/hm<sup>2</sup>), $C_{soil}$ 为土壤中的碳量(t/hm<sup>2</sup>), $C_{dead}$ 为死亡有机物中的碳量(t/hm<sup>2</sup>),各部分碳储量参数根据文献资料获得<sup>[25]</sup>。

### 2.1.4 粮食供给

粮食供给服务作为生态系统服务中最为基础的供给服务之一,对于人类生存与发展有着不可或缺的作用。研究表明粮食供给与 NPP 之间具有很强的相关性<sup>[26]</sup>,本文将粮食的总产量按照栅格 NPP 值与耕地总 NPP 值的比值来分配,确定各栅格的粮食供给能力,计算公式:

$$\operatorname{Grain}_{i} = \frac{\operatorname{Grain}_{j}}{\operatorname{NPP}_{j}} \times \operatorname{NPP}_{i}$$
(4)

式中, Grain<sub>i</sub>和 Grain<sub>j</sub>分别是网格 i和县 j的粮食产量(kg); NPP<sub>i</sub>是网格 i 耕地的净初级生产力, NPP<sub>j</sub>是县 j耕地的净初级生产力之和(kgC/m<sup>2</sup>)。

2.2 基于贝叶斯网络的生态系统服务模型

2.2.1 模型构建

贝叶斯网络(Bayesian belief network, BBN)由 Pearl<sup>[27]</sup>于 1988 年提出, 是一种基于概率推理的图形网络。 BBN 的构建包括两个步骤: 一是网络结构学习, 确定贝叶斯概念网络的节点和连接节点的箭头。其中, 节点 表示变量的概率分布, 箭头表示变量之间的相互依赖关系; 二是网络参数学习, 确定各节点的条件概率表, 反 映节点之间因果关系的强弱<sup>[28-30]</sup>。

本文使用 Netica 软件构建基于贝叶斯网络的生态系统服务模型(简写为 BBN-ES 模型)。首先,根据生态 系统服务的过程机理,选择各生态过程中的相关变量作为节点,对贝叶斯网络进行结构学习。构建的贝叶斯 概念网络共包含 14 个节点和 17 个箭头。其中,土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务等 4 种生态系统服 务为目标节点,人口密度、坡度、降水、土地利用、气温、NDVI、土壤可蚀性、降雨侵蚀、蒸散发、NPP 等 10 个变 量为影响因子节点。其次,利用 ArcGIS 软件对数据图层进行离散化处理,具体变量离散化分级标准(表 1), 土地利用节点为离散变量,根据中科院土地利用覆盖分类体系划分为 6 类;其它节点为连续变量,利用自然断 点法划分为低、较低、中、较高、高 5 种状态。并创建 1 km×1 km 渔网提取各图层栅格值,对贝叶斯网络进行参 数学习。最后,将提取的 78366 个样本数据带入网络进行样本训练,获得贝叶斯网络所有节点的条件概率表, 即 BBN-ES 模型构建完成(图 2)。

#### 2.2.2 模型验证

本文利用误差矩阵评估模型精度。误差矩阵是通过比较分类结果的预测值与实际值,即将正确分类的样

本数除以样本总数得到分类结果的精度<sup>[31]</sup>。误差矩阵的每一列代表预测类别,列总和表示预测类别数目;每 一行代表实际类别,行总和表示实际类别数目。通过在研究区创建 3 km×3 km 渔网生成采样点作为验证数 据,共 8962 个。利用 Netica 软件对 4 个目标节点进行准确性测试,计算其误差矩阵评估模型精度。

序号 Serial number	节点 Nodes	状态和范围 Status and range	单位 Unit						
1	人口密度	低[0,626),较低[626,2361),中[2361,5978),较高[5978,12512),高[12512,26621]	$\lambda/km^2$						
2	坡度	低[0,1),较低[1,2.1),中[2.1,3.3),较高[3.3,5.1),高[5.1,13.1]	0						
3	降水	低[325.7,369.3),较低[369.3,392.5),中[392.5,417.1),较高[417.1,441.1),高[441.1,475.1]	mm						
4	土地利用	耕地,林地,草地,水域,建设用地,未利用地							
5	气温	低[6.5, 8.8),较低[8.8, 9.7),中[9.7, 10.6),较高[10.6, 11.6),高[11.6, 14.7]	$^{\circ}$						
6	NDVI	低[0.2, 0.4),较低[0.4, 0.5),中[0.5, 0.6),较高[0.6, 0.8),高[0.8, 1]							
7	土壤可蚀性	低 $[0.12, 0.17),$ 较低 $[0.17, 0.3),$ 中 $[0.3, 0.36),$ 较高 $[0.36, 0.4),$ 高 $[0.4, 0.45]$							
8	降雨侵蚀	低[162.9, 215),较低[215,242.6),中[242.6, 273.4),较高[273.4, 309.7),高[309.7, 364.2]							
9	蒸散发	低[805, 890.2),较低[890.2, 935.5),中[935.5, 978.6),较高[978.6, 1018.6),高[1018.6, 1073.4]	mm						
10	NPP	低[0,2603),较低[2603,3501),中[3501,4517),较高[4517,5605),高[5605,8590]	kgC/m <sup>2</sup>						
11	土壤保持	低[0,388.1),较低[388.1,1257),中[1257,2962),较高[2962,5956),高[5956,8209]	t						
12	产水服务	低[0,28.8),较低[28.8,133.9),中[133.9,226),较高[226,263.4),高[263.4,367.1]	mm						
13	粮食供给	低[0,50.9),较低[50.9,142.6),中[142.6,220.7),较高[220.7,288.6),高[288.6,432.9]	t						
14	固碳服务	低[0,157.3),较低[157.3,340.8),中[340.8,686.9),较高[534.8,686.9),高[686.9,1337.1]	t						

表 1 各节点状态

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; NPP:净初级生产量 Net primary production

#### 2.3 ES 权衡协同关系的驱动因子分析

#### 2.3.1 ES 的权衡协同关系

利用贝叶斯网络的联合概率分布分析 ES 间的相关关系。其中,联合概率由贝叶斯网络所有节点的条件 概率分布确定,计算公式如下:

$$P(X_1, X_2, \cdots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i \mid \text{parents}(X_i))$$
(5)

式中, $P(X_1,X_2,\dots,X_n)$ 表示一个联合概率分布, $P(X_i | \text{parents}(X_i)$ 表示条件概率分布。在联合概率分布图中, ES 间的相互作用可视化为成对的联合概率分布,每个像素代表服务 1 和服务 2 发生的联合概率  $P(ES_1 = x, ES_2 = y)$ ,由  $ES_1$ 和  $ES_2$ 在各自状态下的条件概率 x 和 y 计算得到。像素颜色的深浅程度代表两服务间的联合 概率大小,颜色越深,表明概率越高,一个联合概率分布内的像素值总和为 1。若两种服务的联合概率分布呈 "I"型分布,则表示这两种服务为协同关系;若两种服务的联合概率分布呈"L"型分布,则为权衡关系<sup>[32]</sup>。 2.3.2 影响因子对生态系统服务的重要性分析

基于 Netica 软件敏感性分析,通过计算方差缩减探讨 BBN-ES 模型中影响因子节点对生态系统服务节点 的相对重要性大小<sup>[33]</sup>。计算公式:

 $VR = V(Q) - V(Q | F) = \sum_{q} p(q) \times [X_q - E(Q)]^2 - \sum_{q} p(q | f) \times [X_q - E(Q | F)]^2$ (6)

式中,*VR*为方差缩减,表示相对重要性大小;*V*(*Q*)、*E*(*Q*)分别为生态系统服务*Q*的方差和期望;*V*(*Q*|*F*)、 *E*(*Q*|*F*)为变量*F*条件下生态系统服务*Q*的方差和期望;*X<sub>q</sub>*是与状态*q*对应的真实数值。*VR*值越大表明该 节点对目标节点的相对重要性大,即其对 ES 节点的影响越大;反之表明对 ES 节点的影响越小。本文选取 *VR*>0.5%的影响因子作为影响生态系统服务的关键节点。



图 2 构建 BBN-ES 模型



F1、F2分别表示各栅格图层

http://www.ecologica.cn

2.3.3 驱动因子分析

本文借鉴 Feng 等<sup>[34]</sup>的研究,根据生态系统服务的权衡协同关系和节点的重要性分析,通过设置 BBN-ES 模型中 ES 节点的不同状态概率值作为情景,利用贝叶斯网络的概率推理,计算 4 种情景下影响生态系统服务 关键节点状态的后验概率相对先验概率的变化,并依据研究区的实际情况,将概率变化最大值大于 35%的关 键节点确定为影响 ES 权衡协同关系的驱动因子。

依据 ES 的相关关系,设置如下4种情景:

情景 I:将具有协同关系的 A 服务和 B 服务最大化,即设置其"高=100%";

情景Ⅱ:将具有协同关系的A服务和B服务最小化,即设置其"低=100%";

情景 Ⅲ:将具有权衡关系的 A 服务最大化、B 服务最小化,即设置 A 服务"高=100%"、B 服务 "低=100%";

情景 IV:将具有权衡关系的 A 服务最小化、B 服务最大化,即设置 A 服务"低=100%"、B 服务 "高=100%"。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务的空间分布

图 3 为 2018 年研究区的土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务的空间分布图。由图 3 可知,4 种生态 系统服务均呈现出较强的空间异质性。其中,土壤保持、产水服务和固碳服务的空间分布较为一致,呈现出 "南高北低"的特征;而粮食供给则呈现出"中部高、南北低"的空间分布。



图 3 2018 年研究区的 4 种生态系统服务空间分布图 Fig.3 Spatial distribution map of four ES in the study area in 2018

结合表1和图3可知:土壤保持服务的高值主要分布在研究区的东南部、中部和东北部区域,呈带状分布 且与河流的走向保持一致,所占面积2183.5 km<sup>2</sup>;低值则在北部和西北部聚集成片,面积为66245.3 km<sup>2</sup>。土 壤保持服务区域差异的原因在于高值区所在的延长、宜川和黄龙等县植被覆盖度高,而低值区所在的神木、榆 阳和横山等市(区、县)建设用地占比较大,易发生水土流失。

产水服务的高值集中在研究区的南部区域,且北部呈现高值、较高值交错分布,高值区所占面积 2359.3 km<sup>2</sup>;低值分布在研究区的西部和中东部,中南部有零星分布,面积为 48851.3 km<sup>2</sup>。高值区所在的黄陵、宜川和黄龙等县区域林草地分布广泛,有利于产水服务;而低值区所在的定边、靖边和横山等县植被覆盖度较低。

粮食供给的高值集中在研究区中西和中东部区域;低值分布范围较为广泛,分布在研究区东北部和南部, 面积为 62451.9 km<sup>2</sup>。这是由于高值区所在的定边、横山和子洲等县域的耕地面积大,粮食供给能力较强;而 低值区所在的富县和宜川县等区域林草地分布较广,耕地面积相对较小,粮食供给能力相对较弱。

固碳服务的高值区和低值区的分布与产水服务基本一致,低值集中在西北部外,在研究区中部有零星分布,且固碳服务的中值集中在研究区东北部、中西部和中南部,所占面积49961.6 km<sup>2</sup>;高值和低值分布的原因与产水服务类似。

**3.2** BBN-ES 模型及验证

构建的 2018 年研究区 4 种生态系统服务的贝叶斯网络如图 4 所示。经过参数学习后的贝叶斯网络反映



图 4 2018 年研究区生态系统服务的贝叶斯网络 Fig.4 Bayesian network of ESs in the study area in 2018

http://www.ecologica.cn

16 期

43 卷

了研究区 2018 年真实情况的先验概率。其中,土壤保持服务由低到高的 5 种状态概率分别为 71.6%、18.4%、 5.01%、2.67%和 2.36%;产水服务 5 种状态概率分别为 52.8%、15.6%、9.04%、20%和 2.55%;粮食供给服务各状态概率为 67.5%、2.33%、25.2%、3.21%和 1.81%;固碳服务各状态概率分别是 22.5%、6%、54%、10.9%和 6.59%。土壤保持、产水服务和粮食供给低状态概率均超过 50%,表明研究区控制侵蚀和拦截泥沙的能力较弱、总体产水服务水平较低、粮食供给服务明显不足;而固碳服务 22.5%(<50%)的地区处于低水平,其在中等及以上的地区占 71.49%,表明研究区总体固碳服务水平较高,主要是退耕还林(草)工程实施后,研究区的林草地面积增加,植被覆盖率的增强有利于固碳服务。

模型验证以土壤保持服务为例,预测土壤保持状态与实际土壤保持状态误差矩阵见表 2,土壤保持精度 为 74.4%;表中第一行第一列表示有 5970 个实际为低状态的样本被正确预测,第二列的 100 表示有 100 个低 状态样本被错误预测为较低状态。同理,计算产水服务、粮食供给、固碳服务精度分别为70.0%、75.9%、73.5%,BBN-ES 模型总体精度为 73.5%,表明模型具有较高的精度,模拟效果好,对上述 4 种 ES 节点概率预 测具有较强的可靠性。

Table 2         Error matrix of soil conservation service prediction										
灾际状态	预测状态 Prediction status									
Actual status	低 Lower	较低 Low	中 Middle	较高 High	高 Higher	行总和 Row sum				
低 Lower	5970	100	0	0	0	6070				
较低 Low	1653	659	5	0	0	2317				
中 Middle	218	239	38	0	0	495				
较高 High	13	33	28	0	0	74				
高 Higher	0	3	3	0	0	6				
列总和 Column sum	7854	1034	74	0	0	8962				
土壤保持精度 Soil conservation accuracy		74	4.4%							

表 2 土壤保持服务预测误差矩阵

#### 3.3 ES 权衡协同关系的驱动因子分析

#### 3.3.1 ES 权衡协同关系分析

基于 BBN-ES 模型,利用联合概率分布和相关系数得到土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务等 4 种服务两两间的相关关系(图 5)。据图可知,2018 年研究区的土壤保持、产水服务与固碳服务两两间呈"I"型概率分布,互为协同关系;其中,产水服务与固碳服务的协同关系最强(r=0.52)。究其原因,研究区自 1999年实施退耕还林(草)工程后,截止 2018 年其林草地面积迅速增加,林地增加 12.2%,草地增加 3.5%,林地将吸收的土壤水分凝结成靠近林草地的降雨,有利于产水服务<sup>[35]</sup>;同时,1999—2018 年研究区年均降水量为 183.2—432.6 mm,而 2018 年降水量为 325.7—475.1 mm,有明显的增加趋势,这也会提高其产水服务。且植被覆盖度的增加也会提高固碳能力,同时也会减少雨水对土壤的侵蚀增加土壤保持能力。而粮食供给分别与土壤保持、产水服务、固碳服务呈"L"型概率分布,即存在权衡关系;其中,产水服务与粮食供给的权衡关系最强(r=-0.62)。结合图 1 和图 3 可知,2018 年研究区土地利用类型以耕地、林地、草地为主,粮食供给能力较高的耕地区域,其土壤保持、产水服务和固碳服务相对较弱;而土壤保持、产水服务和固碳服务较高的林草地区域,粮食供给能力较弱。

#### 3.3.2 影响因子对生态系统服务的重要性分析

影响因子节点对生态系统服务节点的重要性分析结果见表 3。依据 2.3.2 中设置判断关键节点的规则 (VR>0.5%),结合表 3 可知,土壤保持服务的关键节点包括坡度、土地利用、土壤可蚀性、降雨侵蚀、降水和 NPP,其中坡度的 VR 值最大(7.91%),表明其对土壤保持的变化影响最大,原因在于研究区实施退耕还林 (草)工程后,大量耕地转化为林地和草地,植被覆盖度的提升增强了植被的固土持沙能力,有利于土壤保



图 5 2018 年研究区 4 种生态系统服务联合概率分布图

Fig.5 Joint probability distribution map of four ESs in the study area in 2018

\* \* \* 表示 P<0.01 的显著性水平; P(ES1, ES2)表示服务 1 和服务 2 发生的联合概率

持<sup>[36]</sup>。影响产水服务的关键节点包括降水、降雨侵蚀、NPP 和蒸散发,且4个节点的 VR 值均在 2%以上,表明其对产水服务增加影响较大。对于粮食供给服务而言,主要受到 NPP、降水和降雨侵蚀等3个因子的影响,其 VR 值均>10%。影响固碳服务的依次为 NPP、降水、NDVI 和降雨侵蚀,其中 NPP 的 VR 值最大(4.83%),表明其对固碳服务的变化影响最为显著,原因在于 NPP 与区域的植被覆盖度密切相关,植被覆盖度的增加有利于固碳服务。

Table 3 Importance analysis of biological environmental factor nodes to ES nodes									
表面性排序	土壤保持 Soil conservation		产水服务 Water production services		粮食供	给	固碳服务 Carbon sequestration services		
里安性排序					Grain su	ipply			
ordering	节点名称 Node name	VR/%	节点名称 Node name	VR/%	节点名称 Node name	VR/%	节点名称 Node name	VR/%	
1	坡度	7.91	降水	14.00	NPP	26.00	NPP	4.83	
2	土地利用	4.48	降雨侵蚀	10.60	降水	15.40	降水	2.45	
3	土壤可蚀性	3.57	NPP	9.71	降雨侵蚀	11.00	NDVI	2.14	
4	降雨侵蚀	2.02	蒸散发	2.31	气温	0.19	降雨侵蚀	1.97	
5	降水	1.44	土地利用	0.25	土地利用	0.11	气温	0.10	
6	NPP	0.75	气温	0.09	坡度	0.03	土地利用	0.08	
7	蒸散发	0.11	人口密度	0.01	蒸散发	0.02	蒸散发	0.01	
8	人口密度	0.05	NDVI	0	人口密度	0	人口密度	0	
9	NDVI	0	土壤可蚀性	0	土壤可蚀性	0	土壤可蚀性	0	
10	气温	0	坡度	0	NDVI	0	坡度	0	

表 3 影响因子节点对生态系统服务节点的重要性分析

VR:方差缩减 Variance reduction

因此,确定坡度、土地利用、土壤可蚀性、降雨侵蚀、降水、NPP、蒸散发和 NDVI 为 4 种服务的 8 个关键节点,为下文分析 ES 权衡协同关系的驱动因子奠定基础。

3.3.3 驱动因子分析

依据 3.3.1 权衡协同关系结果设置 4 种情景(表 4)。利用贝叶斯网络的概率推理,计算 4 种情景下影响 生态系统服务 8 个关键节点状态的后验概率相对先验概率的变化(表 5),确定土地利用、降水和 NPP 是影响 ES 权衡协同关系的主要驱动因子。

Table 4         Scenario setting and description of trade-off and synergy								
关系类型 The relationship type	情景名称 Name of the scenario	情景描述 Description of the scenario						
协同关系	情景 I	土壤保持、产水服务和固碳服务设置"高=100%"输入 BBN-ES						
Synergies	情景Ⅱ	土壤保持、产水服务和固碳服务设置"低=100%"输入 BBN-ES						
权衡关系	情景Ⅲ	土壤保持、产水服务和固碳服务设置"高=100%"且粮食供给"低=100%"输入 BBN-ES						
Trade-offs	情景Ⅳ	土壤保持、产水服务和固碳服务设置"低=100%"且粮食供给"高=100%"输入 BBN-ES						

表 4 权衡协同情景设置及其说明

由表 5 可知:在协同-情景 I 和情景 II 中,土地利用、降水、NPP 等 3 个节点的概率变化最大值均大于 35%;在权衡-情景 III 和情景 IV 中,土地利用、降水和 NPP 结点的概率变化最大值均大于 35%,由此确定土地利用、降水、NPP 是影响 ES 权衡协同的驱动因子。其中,土地利用主要影响生态系统服务的协同关系,而降 水和 NPP 在影响协同关系的同时对权衡关系也有一定地制约作用。

Table 5 Probability change table of key node status in four scenarios												
关键节点	协同-情景 I Synergy-scenario I					协同-情景 II Synergy-scenario II						
Key nodes	А	В	С	D	Е	F	А	В	С	D	Е	F
坡度 Slope	-2.3	-8.7	-0.1	8.3	2.89		6.6	6.1	-3.2	-7.68	-1.79	
土地利用 Land use	-10.4	-7.71	-22.5	1.56	3.02	36.05 *	-1.2	-0.6	1.9	-0.2	-0.02	0.08
土壤可蚀性 Soil erosion	13.98	-3.9	3	2.67	-15.6		-0.15	3.3	-0.54	-0.39	-2.1	
降雨侵蚀 Rainfall erosion	-29.51	-24.91	13.1	12.5	28.9		25.4	2.4	-7.86	-10.27	-9.56	
降水 Precipitation	-28.08	-16.95	-16.28	38.2*	23.06		36.7*	-5.9	-11.22	-13.77	-5.71	
蒸散发 Evaporation	-14.54	-20.66	-9.18	17	27.5		-0.1	1.8	0.2	-0.8	-0.9	
NPP	-13.65	-26.62	-9.19	4.4	45.2*		26.5	3.3	-8.74	-11.49	-9.56	
NDVI	14.1	3.3	-7.1	-11.4	1.3		6	-1	-0.1	-0.2	-4.59	
关键节点		权衡-情	景 III Tra	de-offs-So	cenario III		权衡-情景 IV Trade-offs-Scenario IV					
Key nodes	А	В	С	D	Е	F	А	В	С	D	Е	F
坡度 Slope	-2.5	-8.8	-0.1	8.4	3.01		17.8	3.8	-10.7	-9.15	-1.79	
土地利用 Land use	-10	-8.86	-21.9	1.61	3.36	35.75 *	-1.2	-1.1	1.5	-0.15	0.1	0.89
土壤可蚀性 Soil erosion	13.88	-3.9	3	2.66	-15.6		0.04	2.5	-0.48	-0.34	-1.7	
降雨侵蚀 Rainfall erosion	-31.55	-24.97	13.1	12.5	31		34.4	2.3	-11.09	-13.49	-12.07	
降水 Precipitation	-28.13	-16.98	-16.56	48.5*	23.16		41.8 *	-0.6	-15.52	-17.96	-7.74	
蒸散发 Evaporation	-9.55	-20.69	-12.19	17.1	25.5		0.2	1.5	-0.2	-0.9	-0.5	
NPP	-13.93	-37.2	-10.33	13.6	47.98*		-12.3	41 *	-4.1	-15.15	-9.2	
NDVI	14.2	3.7	-7	-11.66	0.9		6	-1.2	-0.5	-0.4	-3.76	

	表 5	4种情景下关键节点状态的概率变化表/%	
T-11- 5	D L .		

\*表示关键结点的概率变化值大于 35%;在关键节点土地利用中,A 代表耕地,B 代表林地,C 代表草地,D 代表水域,E 代表建设用地,F 代表未利用地;其他节点中,A 代表低状态,B 代表较低状态,C 代表中状态,D 代表较高状态,E 代表高状态

(1)在协同情景中,不同驱动因子在不同状态下产生相同的协同方式。如情景 I,降水较高值、NPP 高值

状态下,均可促使3种ES的高值协同;同时,相同驱动因子在不同状态则会造成协同方式的差异。譬如,降水 在低值状态下促使3种ES的低值协同(情景II),而较高值状态下表现为高值协同。

(2) 在权衡情景中,不同驱动因子在不同状态下产生相同的权衡方式。如情景 III, NPP 高值、降水较高值 状态下,均可促使 3 种高值 ES(土壤保持、产水服务和固碳服务)与低值粮食供给权衡;同时,相同驱动因子在 不同状态下亦会产生权衡方式的差异。譬如, NPP 在较低值状态下促使 3 种低值 ES 与高值粮食供给的权衡 (情景 IV),而高值状态下则呈现 3 种高值 ES 与低值粮食供给的权衡关系。

#### 4 讨论

4.1 BBN-ES 模型

本文基于构建的贝叶斯网络, 探讨多种 ES 权衡协同及其驱动因素效应差异, 对于认识多种 ES 间复杂关系, 为后续提出改善生态系统管理和提高人类福祉的对策与措施, 具有重要的理论和实践价值。本文构建的 BBN-ES 模型总体精度为 73.5%, 4 种生态系统服务中粮食供给精度最高(75.9%)、产水服务精度最低 (70.0%), 表明贝叶斯网络在模拟生态系统服务供给过程准确, 对生态系统服务节点概率预测具有较强的可 靠性。模型虽具有较高的精度, 但简单通过自然断点法对连续变量分级有可能导致模型参数的设定具有潜在 的不确定性<sup>[37]</sup>。因此, 依据研究区的实际情况对变量进行分级, 可进一步提升模型的精度。

#### 4.2 ES 权衡协同关系

本文基于 BBN-ES 模型,利用联合概率分布和相关系数分析 ES 间的权衡协同关系。2018 年研究区的土壤保持、产水服务与固碳服务之间互为协同关系,粮食供给分别与土壤保持、产水服务和固碳服务为权衡关系,该结论与孙艺杰等<sup>[38]</sup>、韩磊等<sup>[39]</sup>的研究成果一致,可见贝叶斯网络方法在揭示 ES 间复杂的非线性关系方面具有一定的优势。需要注意的是,本研究只是对研究区 2018 年的 ES 间的权衡协同关系进行探讨,并未涉及随时间变化对 ES 间关系的影响,因此,未来有必要采取切实有效的模型与方法,基于长时间序列分析 ES 权衡协同关系的时空动态变化趋势。

4.3 ES 权衡协同关系的驱动因子

本文在情景分析和相对概率变化的基础上,确定影响 ES 权衡协同关系的驱动因子,并进一步探讨了不同情景下主要驱动因子的效应,即驱动因子及其在不同状态下对权衡与协同的影响。通过分析发现:不同驱动因子在不同状态下产生相同的协同(或权衡)方式;相同驱动因子在不同状态则会造成协同(或权衡)方式的差异。

研究区自实施退耕还林(草)工程后,林草地面积的迅速增加提升了植被覆盖度,NPP 与降水、植被覆盖 度等密切相关,降水量和植被覆盖度的增加有利于 NPP<sup>[40-42]</sup>。因此,为了优化研究区生态系统的整体效益, 应尽可能加强生态系统服务之间的协同关系,减弱权衡关系。政府部门在进行相关决策工作时,应重点关注 土地利用、降水和 NPP 等驱动因子,特别是土地利用的的结构和格局,如耕地、森林和草地的空间分布。需要 说明的是,不同驱动因子判定标准的设定,可导致确定主要驱动因子及其效应的差异。本文将概率变化最大 值高于 35%的关键节点确定为驱动因子,具有一定的主观性,未来仍需进一步讨论。因此,确定适宜于研究 区的驱动因子判断标准,是后续提出针对性对策与措施的前提和基础。

#### 5 结论

本文以陕北黄土高原为研究区,定量评估其2018年的土壤保持、产水服务、粮食供给和固碳服务,将生态 系统服务与贝叶斯网络结合构建 BBN-ES 模型;在 ES 的权衡协同关系与情景分析基础上,探讨影响多种生态 系统服务权衡协同关系的驱动因子。主要结论如下:

(1)从空间分布特征来看,陕北黄土高原的土壤保持、产水服务和固碳服务呈"南高北低"的分布特征;粮 食供给服务呈现出"中部高、南北低"的分布特征。 (2) 从权衡协同关系来看, 陕北黄土高原土壤保持、产水服务和固碳服务之间互为协同关系, 粮食供给分别与土壤保持、产水服务、固碳服务为权衡关系。其中, 产水服务与固碳服务的协同关系、产水服务与粮食供给的权衡关系较强。

(3) 从情景分析结果来看, 土地利用、降水和 NPP 是影响 ES 权衡协同关系的主要驱动因子, 其中土地利 用主要影响生态系统服务的协同关系, 而降水和 NPP 在影响协同关系的同时对权衡关系也有一定地制约作 用。研究发现: 不同驱动因子在不同状态下产生相同的协同(或权衡)方式, 相同驱动因子在不同状态则会造 成协同(或权衡)方式的差异。

#### 参考文献(References):

- [1] Assessment M E. Our human planet: summary for decision-makers. Washington: Island Press, 2005.
- [2] Vihervaara P, Kumpula T, Tanskanen A, Burkhard B. Ecosystem services: A tool for sustainable management of human-environment systems. Case study Finnish Forest Lapland. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 410-420.
- [3] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 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.
- [4] 彭建,胡晓旭,赵明月,刘焱序,田璐. 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.
- [5] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. Ecosystem Services, 2017, 28: 264-272.
- [6] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, Liu Y X, Chen Y Q. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China. Science of the Total Environment, 2017, 574: 57-64.
- [7] 方露露,许德华,王伦澈,牛自耕,张明.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究.地理研究,2021,40(3):821-838.
- [8] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. 生态学报, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [9] 王良杰,马帅,许稼昌,朱殿珍,张金池.基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究——以南方丘陵山地带为例.生态学报,2021, 41(5):1716-1727.
- [10] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性.中国沙漠, 2021, 41(6):78-87.
- [11] 汪晓珍,吴建召,吴普侠,上官周平,邓蕾. 2000—2015 年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和 NPP 服务的时空分布与权衡/协同关系.水土保持学报, 2021, 35(4):114-121, 128.
- [12] 王晓峰,马雪,冯晓明,周潮伟,傅伯杰.重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征.生态学报,2019,39(20): 7344-7355.
- [13] 宁静,石东伟,周思宇,夏子良.宾县生态系统服务时空格局及权衡协同关系.水土保持研究, 2022, 29(5): 293-300.
- [14] 陈登帅,李晶,杨晓楠,刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. 生态学报, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [15] 林媚珍,刘汉仪,周汝波,龚建周.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究.地理研究,2021,40(9):2657-2669.
- [16] Wu J X, Zhao Y, Yu C Q, Luo L M, Pan Y. Land management influences trade-offs and the total supply of ecosystem services in alpine grassland in Tibet, China. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 70-78.
- [17] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. Applied Geography, 2019, 108: 64-73.
- [18] 曾莉,李晶,李婷,杨晓楠,王彦泽.基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化.地理学报,2018,73(9):1809-1822.
- [19] Dang K B, Windhorst W, Burkhard B, Müller F. A Bayesian Belief Network-Based approach to link ecosystem functions with rice provisioning ecosystem services. Ecological Indicators, 2019, 100: 30-44.
- [20] 刘军会,高吉喜,马苏,王文杰,邹长新.中国生态环境敏感区评价.自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
- [21] 沈明, 沈镭, 钟帅, 张超, 孔含笑. 基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化. 资源科学, 2016, 38(10): 1962-1974.
- [22] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(1): 131-137.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,黄丽,张光远.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究.水土保持学报,2000, 14(2):19-24.
- [24] 包玉斌,李婷,柳辉,马涛,王怀香,刘康,沈茜,刘心浩.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.
- [25] 程积民,程杰,杨晓梅,刘伟,陈芙蓉.黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征.生态学报,2012,32(1):226-237.

6771

- [26] Zhang Y N, Long H L, Tu S S, Ge D Z, Ma L, Wang L Z. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: implications for sustainable land management. Ecological Indicators, 2019, 107: 105550.
- [27] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems-Networks of plausible inference-Judea Pearl. Artificial Intelligence, 1991, 48(1): 117-124.
- [28] 黎斌,何建华,屈赛,黄俊龙,李一挥.基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法.生态学报,2018,38(3):800-811.
- [29] 郑涛,陈爽,张童,徐丽婷,马丽雅.基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究.自然资源学报,2020,35(12):2980-2994.
- [30] 关小东,何建华.基于贝叶斯网络的基本农田划定方法.自然资源学报,2016,31(6):1061-1072.
- [31] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 1991, 37(1): 35-46.
- [32] Landuyt D, Broekx S, Goethals P L M. Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale. Ecological Indicators, 2016, 71: 327-335.
- [33] Landuyt D, Broekx S, Engelen G, Uljee I, Van der Meulen M, Goethals P L M. The importance of uncertainties in scenario analyses—A study on future ecosystem service delivery in Flanders. Science of the Total Environment, 2016, 553: 504-518.
- [34] Feng Z, Jin X R, Chen T Q, Wu J S. Understanding trade-offs and synergies of ecosystem services to support the decision-making in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Land Use Policy, 2021, 106:105446.
- [35] Karamigolbaghi M, Ghaneeizad S M, Atkinson J F, Bennett S J, Wells R R. Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment. Geomorphology, 2017,295: 529-536.
- [36] 包玉斌,黄涛,吕林涛.陕北黄土高原实施退耕还林还草工程后的土壤保持效应.宁夏大学学报(自然科学版),2021,42(3):1-8.
- [37] Xue J, Gui D W, Lei J Q, Sun H W, Zeng F J, Feng X L. A hybrid bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. Advances in Water Resources, 2017, 110: 445-458.
- [38] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,段艺芳.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例.生态学报,2019,39 (10):3443-3454.
- [39] 韩磊,杨梅丽,刘钊,赵永华,赵子林,张永锋.基于土地利用的黄丘区生态系统服务权衡与协同关系研究——以延安市为例.生态学报,2022,42(20):1-11.
- [40] 刘洋洋,王倩,杨悦,刚成诚,章钊颖,同琳静,李建龙.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素.应用生态学报,2019,30
   (7):2309-2319.
- [41] 刘铮,杨金贵,马理辉,柯增鸣,胡宇美,岩晓莹.黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素.应用生态学报,2021,32(1): 113-122.
- [42] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 延军平, 汪成博, 武亚群. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素. 地理研究, 2020, 39(1): 140-151.