

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏娟, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化：以汾河流域为例

蔡进^{1,2}, 危小建^{1,2,3*}, 江平⁴, 梁玉琦^{1,2}

(1. 东华理工大学自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013; 2. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013; 3. 江西省测绘地理信息工程技术研究中心, 南昌 330025; 4. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 了解生态系统服务(ESs)间权衡协同关系强度对于汾河流域地区的生态环境管理和恢复至关重要, 然而, 迄今为止, 对该地区ESs间关系强度变化的驱动变量和空间格局优化仍然缺乏足够的研究. 在定量评估汾河流域2000年和2020年6种生态系统服务的基础上, 引入了生态系统服务权衡协同指数(TSI)定量衡量两两ES间权衡协同关系的强度, 同时构建了贝叶斯生态系统服务权衡协同关系强度网络, 识别了权衡协同强度的驱动变量, 通过敏感度分析确定了关键变量对权衡协同关系强度的影响程度, 并在空间格局上刻画了ESs权衡协同关系强度的优化区. 结果表明: ①2000年和2020年汾河流域6种ESs时空差异较为显著, 在时间尺度上, 产水量、净初级生产力、粮食供给、土壤保持和碳储量均呈现波动上升的趋势, 在空间尺度上, 6种生态系统服务在20年里空间分布变化较小. ②碳储量与生境质量、土壤保持以及净初级生产力的TSI在空间上呈现出四周高中部低的格局; 与产水量有关的5对服务中TSI最大的地区均分布在流域西部和南部; 粮食供给与其他服务之间的TSI自北向南呈现“高-中-高”的分布特征. ③敏感性分析发现, 产水量与土壤保持和生境质量的强度均受到降水、根系限制性深度和降雨侵蚀等的显著影响, 且根据关键变量不同状态的条件概率, 发现汾河流域中部的文水县、清徐县和祁县等是权衡协同强度的高值区, 可作为生态修复重点区域. 研究结果对于认识多种生态系统服务间权衡与协同强度的复杂关系及其驱动变量, 对后续提出生态环境可持续治理和政策制定具有重要的理论和实践意义.

关键词: 生态系统服务(ESs); 权衡协同指数(TSI); 贝叶斯网络; 区域优化; 汾河流域

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2780-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202305204

Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin

CAI Jin^{1,2}, WEI Xiao-jian^{1,2,3*}, JIANG Ping⁴, LIANG Yu-qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Province Engineering Research Center of Surveying, Mapping and Geographic Information, Nanchang 330025, China; 4. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Understanding the strength of trade-off and synergistic relationships among ecosystem services (ESs) is crucial for ecological management and restoration in the Fenhe River Basin. However, there is still a lack of sufficient research on the driving variables and spatial pattern optimization of the strength of ESs relationships in this area. Based on the quantitative assessment of six ESs in the Fenhe River Basin in 2000 and 2020, the ecosystem services trade-off synergy index (TSI) was introduced to quantitatively measure the strength of trade-off and synergistic relationships between each pair of ESs. A Bayesian network was constructed to identify the driving variables of trade-off and synergistic relationships, and sensitivity analysis was conducted to determine the degree of influence of key variables on the strength of these relationships. The optimization area of the strength of ESs trade-off and synergistic relationships was characterized in spatial patterns. The results showed that: ① There were significant spatiotemporal differences in the six ESs in the Fenhe River Basin in 2000 and 2020. In terms of time scale, water yield, net primary productivity, crop productivity, soil conservation, and carbon storage all showed a trend of fluctuating increase. In terms of spatial scale, the spatial distribution changes in the six ESs were relatively small over the 20 years. ② The TSI of carbon storage was high in the surrounding area and low in the middle, showing a four-high and four-low pattern. The areas with the highest TSI between grain supply and other services were distributed from north to south. ③ Sensitivity analysis found that the strength of water yield, soil conservation, and habitat quality were significantly affected by precipitation, plant root depth restriction, and rainfall erosion. According to the conditional probability of different states of key variables, Wenshui County, Qingxu County, and Qi County in the central part of the Fenhe River Basin were identified as high-value areas for trade-off and synergistic relationships, which could be used as key areas for ecological restoration. These findings have important theoretical and practical significance for understanding the complex relationship between multiple ESs trade-off and synergistic relationships and their driving variables and for proposing sustainable ecological environment management policies.

Key words: ecosystem services (ESs); trade-off synergy index (TSI); Bayesian network; regional optimization; Fenhe River Basin

收稿日期: 2023-05-23; 修订日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168010); 江西省研究生创新专项(YC2023-S558, YC2023-S559)

作者简介: 蔡进(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态评价和土地利用规划, E-mail: 1599081926@qq.com

* 通信作者, E-mail: 631000872@qq.com

生态系统服务(ecosystem services, ESs)是指由生态系统所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用, 为人类直接或间接从生态系统所获得的各种惠益^[1], 是维持和改善生态系统服务, 实现区域可持续发展的基本条件^[2]. 生态系统服务在空间上具有异质性的特点, 在某一区域的既定景观中, 多种生态系统服务会受到自然和社会经济等多种变量的影响, 时空共现形成相互增益的协同关系与此消彼长的权衡关系^[3]. 如何判定生态系统服务之间的权衡协同关系及其影响因素, 实现区域权衡协同关系的优化已成为该方向的研究热点之一, 它对提升生态系统服务能力, 提高区域自然社会生态系统的弹性具有重要意义, 同时也是落实生态文明战略和增强人类福祉的有效途径^[4].

现阶段, 生态系统服务之间的权衡协同关系及其影响因素的研究仍然是地理学、生态学以及生态经济学关注的重点之一^[5,6]. 国内外学者通过统计学方法^[7-9]、空间分析法^[10,11]和生态模拟及情景分析^[12,13]等方法进行了大量的研究. 这些方法大多将研究区作为整体来测度单一的时间节点, 无法量化由复杂的地理过程引起的多种变量对生态系统服务权衡协同的影响以及各影响因素之间的作用关系^[14-16]. 贝叶斯网络是一种强大的数据分析和推理模型, 在表达驱动变量非线性之间的关系时具有独特的优势, 它可以将各变量之间的相互作用通过构建一个概率模型并以网络的形式表达出来^[17-20]. 已有学者基于贝叶斯网络进行过生态系统服务与多因素的相关性研究. 如曾莉等^[21]基于贝叶斯网络以2010年数据为基础建立了水源涵养的贝叶斯服务模型, 并构建3种情景对其进行空间格局优化; Peng等^[22]在分析植被净初级生产力(NPP)、土壤保持(SC)和产水量(WY)三者之间关系的基础上, 建立了贝叶斯模型, 之后进行场景仿真得到ES优化的多场景方案; 荔童等^[23]通过贝叶斯网络构建生态系统服务模型, 利用情景模拟分析了生态系统服务权衡协同关系和驱动因子. 以上研究虽然都是基于贝叶斯网络对生态系统服务进行的空间格局优化和权衡协同关系方面的研究, 但是直接研究多种生态系统服务在空间上的权衡协同关系的强度[生态系统服务权衡与协同指数^[24](trade-off synergy index, TSI)]及其驱动变量, 有助于从空间显式的角度, 动态地提出更具有针对性的生态系统服务优化保护措施. 已有研究没有直接建立多种生态系统服务权衡协同关系的强度与不同驱动变量的贝叶斯模型, 进而识别不同驱动变量对多种生态系统服务权衡协同关系强度的作用

关系, 更没有对权衡协同关系的强度进行空间格局的优化.

基于此, 本文以2000年和2020年汾河流域的相关数据进行分析, 从影响生态系统服务的诸多变量中确定出对研究区ESs影响最大的变量作为关键因变量, 同时利用TSI计算出研究区ESs间的权衡协同关系强度, 构建贝叶斯网络模型, 选取关键因子计算出变量的关键状态, 获取汾河流域ESs权衡与协同的强度优化区域, 以期对汾河流域未来的健康可持续发展奠定基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汾河流域地理位置介于110°30'~113°32'E, 35°20'~39°00'N之间, 纵贯山西省境中部. 汾河是黄河的第二大支流, 同时也是黄土高原重要的组成部分^[25,26], 全长约716 km, 流域面积39 741 km², 自北向南流经忻州市、太原市和吕梁市等6个市, 于万荣县汇入黄河(图1). 降水年际变化大, 主要集中在夏季且年内分配十分不均匀. 流域内耕地面积约占山西省总耕地面积的30%, 是山西省重要的商品粮基地. 矿藏资源丰富, 特别是沿河两岸分布着丰富的煤铁等矿产资源, 是重要煤矿与发电厂址所在地. 汾河流域是山西省人口密集区、经济发达区以及重要的生态功能区, 在山西省经济社会发展中占有十分重要的地位^[27]. 但近年来, 随着人口增长和过度的开发利用以及汾河流域处于黄土高原独特的地理区位, 导致流域内水土流失加剧, 生态环境十分脆弱.

1.2 数据来源

本文研究数据主要包括土地利用数据、地理基础数据和土壤类型数据等, 具体信息见表1.

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

针对研究区自然地理特征, 选取关键生态系统服务. NPP是评估陆地生态系统质量与固碳能力的关键指标^[28], 因此被纳入评估, 通过参考传统的遥感估算模型(CASA)计算植被NPP^[29,30]. 生境质量是生态系统服务水平的重要表征, 是区域生态安全保障和人类福祉提升的关键环节^[31], 因此利用InVEST模型原理计算生境质量^[32]. 汾河流域地处黄土高原, 水土流失严重, 因此选取土壤保持衡量流域水土保持情况. 基于修正通用土壤流失方程, 同时综合考虑地块对上游沉积物的拦截能力进行计算土壤保持^[33]. 此外, 该区域水资源匮乏, 而产水服务对整个流域生态平衡具有重要作用, 因此利用InVEST模

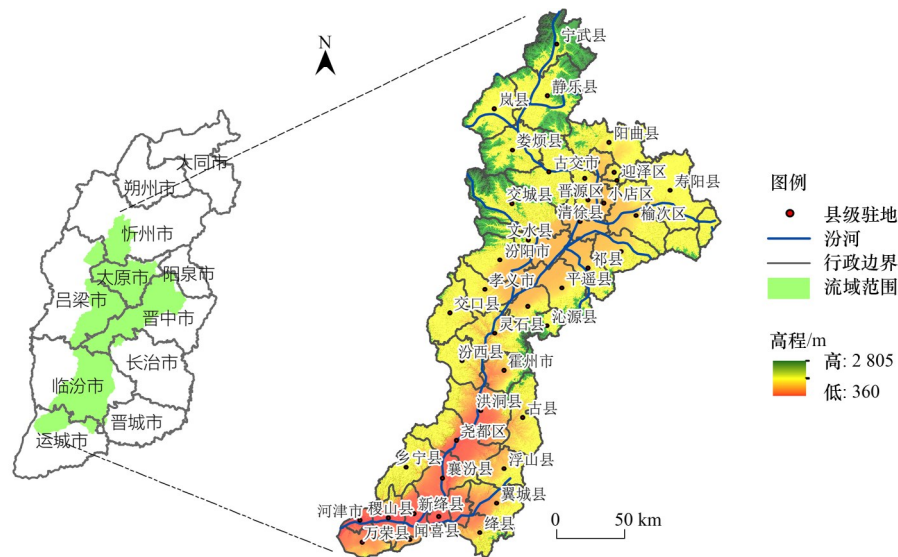


图1 汾河流域行政区划示意
Fig. 1 Administrative division of the Fenhe River Basin

表1 研究区主要数据来源
Table 1 Main data sources of the research area

数据类型	数据描述	数据来源
基础地理信息数据	行政区县和河流等数据	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn/ngcc/)
土壤数据	土壤质地类型数据	世界土壤数据库(HWSD)
高程数据	30 m分辨率	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
气象数据	2000年和2020年包括降水和蒸散发等数据	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
NDVI数据	2000年和2020年1 km分辨率	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
土地利用数据	2000年和2020年30 m分辨率	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
社会经济统计数据	2000年和2020年各县粮食产量	山西省统计年鉴2001与山西省统计年鉴2021

型对流域内复杂的物理过程进行模拟计算产水量^[34]. 由于碳储量服务能够影响流域小气候并指示人类活动,是揭示生态系统变化的关键指标,因此也被纳入评估^[35]. 粮食生产与民生息息相关,在考虑自然

生态系统时,应纳入评估范围.有研究发现农作物与NDVI之间具有显著的线性关系^[36, 37],因此本文通过NDVI计算粮食供给水平.各项服务评估方法见表2.

表2 生态系统服务评估方法
Table 2 Assessment methods for ecosystem services

评估类型	评估方法	参数含义
产水量(WY)	$Y_{sj} = \left(1 - \frac{AET_{sj}}{p_x}\right) \times P_x$	Y_{sj} 为年产水量; P_x 为栅格单元 x 的年均降雨量; AET_{sj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的实际年平均蒸散发量
碳储量(CS)	$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	C_{total} 为碳总量; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 和 C_{dead} 分别为地上、地下、土壤和死亡生物碳储量
土壤保持(SC)	$SC = R \times K \times L \times S(1 - C \times P)$	SC为土壤保持量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为作物与覆盖因子; P 为水土保持措施因子(L 、 S 、 C 和 P 无量纲)
生境质量(HQ)	$Q_{sj} = H_j \left(1 - \frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + K^z}\right)$	Q_{sj} 为土地利用类型 j 中像元 x 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性; z 为常数2.5; D_{sj} 为土地利用类型 j 中像元 x 的威胁源加权平均值, K 为半饱和系数0.5
粮食供给(CP)	$CP_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times CP_{sum}$	CP_i 为耕地栅格 i 的粮食产量; CP_{sum} 为县域粮食产量; $NDVI_i$ 为耕地栅格 i 的NDVI值; $NDVI_{sum}$ 为县域NDVI总值
净初级生产力(NPP)	$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t)$	$APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射, $\varepsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率

1.3.2 生态系统服务权衡协同强度量化

生态系统服务之间的权衡协同关系较为复杂,少有研究对生态系统服务间的权衡协同的强度进行定量测量.基于此,本文引入TSI衡量生态系统服务

之间权衡与协同作用的强度并以此为基础进行后续的研究,计算公式如式(1)所示.

$$TSI = 1 - \|\Delta ES_i\| - \|\Delta ES_j\| \tag{1}$$

式中, ΔES_i 和 ΔES_j 为2000年和2020年类型 i 和类型 j

的ES值的差异.TSI为权衡协同指数,取值范围为0~1.该数值越大,表示ES之间权衡和协同的作用强度越高.在计算前已经所有的ES值进行了归一化,以消除它们在不同维度之间的影响,增加结果的可靠性.

1.4 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同强度的空间格局优化

1.4.1 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络是1988年由Pearl提出又被叫做信念网络(belief network).经过模型的不断改进,已成为近年来研究的热点.贝叶斯网络是一种有效的不确定性知识表达和推理工具^[38],一个贝叶斯网络主要是由一个有向无环图、条件概率表、代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成.每个节点都包含变量的离散状态、离散状态对应概率分布和条件概率表^[39],节点之间的相互关系由箭头表示.贝叶斯网络蕴涵了条件独立性假设,因此,贝叶斯网络所表示的所有节点的联合概率就可以表示为各节点条件概率的乘积,如式(2)所示.

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi X_i) \quad (2)$$

式中, $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为一个联合离散概率分布, $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为随机变量, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为随机变量的最大值.

通过量化上述6种生态系统服务和计算生态系

统服务之间的TSI,筛选出影响生态系统服务权衡协同强度的各个驱动变量作为贝叶斯网络节点,按照内在因果关系,构建出生态系统服务的贝叶斯网络,如图2所示.借助ArcGIS软件对节点对应的栅格图层进行离散化,并根据研究区各个变量分布的实际情况,运用Netica软件将每个驱动变量进行分级:可以分为最高(highest)、高(high)、中(medium)和低(low)这4个等级.具体分级标准如表3所示.剩余各节点的条件概率表由条件概率公式计算获得,如式(3)所示.

$$P(B|A) = P(AB)/P(A) \quad (3)$$

式中, $P(AB)$ 为事件A与B的联合概率,即2个事件共同发生的概率; $P(A)$ 为A的先验概率,即事件A发生的概率;同理, $P(B)$ 为事件B发生的概率.

1.4.2 生态系统服务权衡协同强度关系格局优化

完成汾河流域贝叶斯网络模型构建后,下一步是利用条件概率表和敏感性因子确定关键变量关键状态子集.借助Netica软件和ArcGIS处理各驱动变量对应的栅格数据,获得条件概率表和概率分布.用ArcGIS可视化子集空间,绘制各变量不同等级所对应的关键变量关键状态子集同时发生的区域.关键变量关键状态子集的选择参考文献[41],具体有以下两个步骤.

(1) 确定各变量的关键状态 根据节点各状态

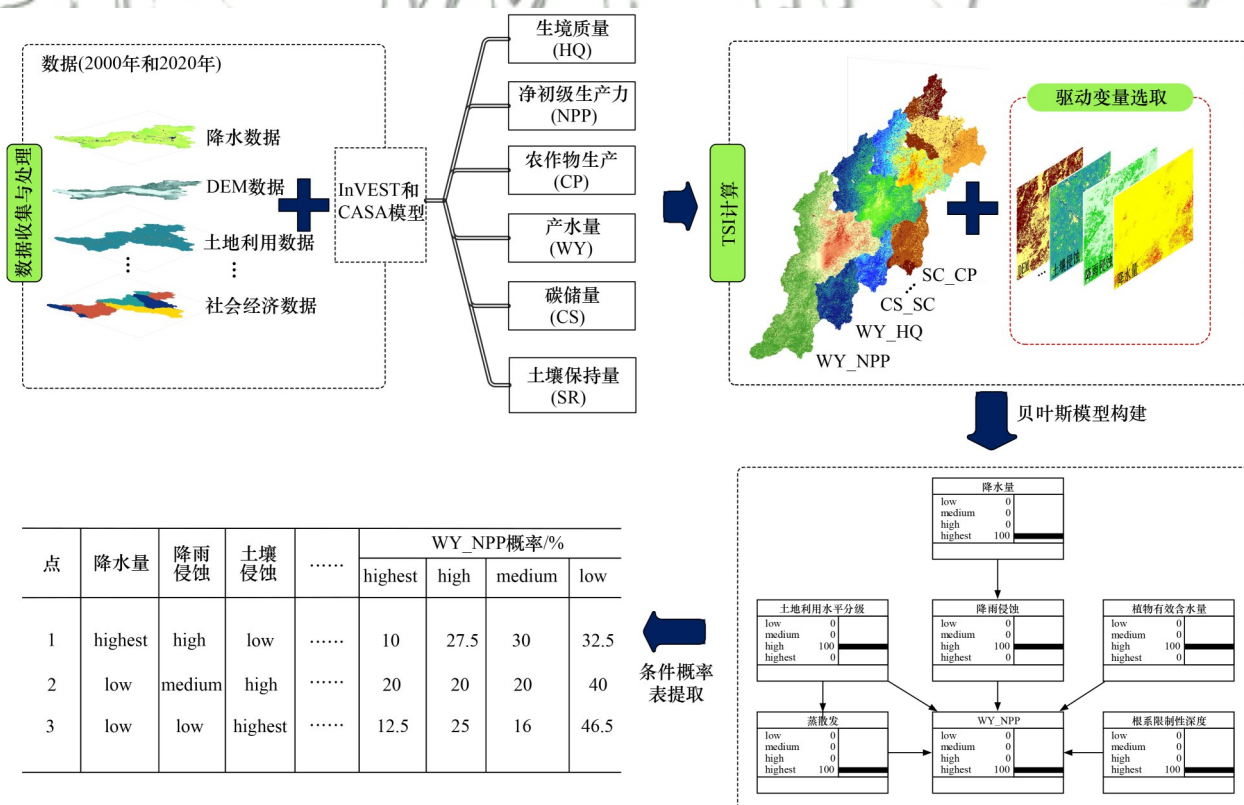


图2 贝叶斯网络构建原理

Fig. 2 Principles of Bayesian network construction

表 3 驱动变量状态分级¹⁾

Table 3 Drive variable state grading

序号	驱动变量	状态名称	实际值范围
1	植物有效含水量/mm	low	0.05~0.17
		medium	0.17~0.21
		high	0.21~0.25
		highest	0.25~0.3
2	降雨侵蚀/ $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})^{-1}$	low	569.64~839.39
		medium	839.39~1 063.43
		high	1 063.43~1 255.46
		highest	1 255.46~1 735.54
3	根系限制性深度/mm	low	8.44~32.43
		medium	32.43~62.96
		high	62.96~108.76
		highest	108.76~193.82
4	降水量/mm	low	227.33~287.40
		medium	287.40~328.37
		high	328.37~364.33
		highest	364.33~445.67
5	土壤侵蚀/ $\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot(\text{MJ}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{mm})^{-1}$	low	11 020~11 102
		medium	11 102~11 385
		high	11 385~11 663
		highest	11 663~11 905
6	蒸散发量/mm	low	424~517
		medium	517~589
		high	589~659
		highest	659~784
7	DEM/m	low	360~861
		medium	861~1 240
		high	1 240~1 632
		highest	1 632~2 805
8	土地利用类型	耕地	—
		林地	—
		草地	—
		水域	—
		建设用地	—
		未利用地	—
9	土地利用水平分级 ^[40]	low	1
		medium	2
		high	3
		highest	4

1) “—”表示无实际值

的概率及各指标状态组合的联合概率，根据贝叶斯网络计算每个驱动变量与各服务间的条件概率，选取不同等级对应各个指标的条件概率最大时作为变量的关键状态. 当各驱动变量处在最高、高、中和低这 4 种不同级别时，也会对应 highest、high、medium 和 low 这 4 种变量状态集合. 变量状态集合处于 highest 时，表明此时该生态系统服务权衡协同强的可能性最大.

(2) 确定最优状态子集 Netica 软件提供了敏感性分析^[42]. 敏感性分析主要用于评价驱动变量节点

对其他生态系统服务节点的相对重要性，从而确定生态系统服务关键状态子集. 利用方差缩减量 (variance reduction, VR) 计算各个影响因子的敏感程度，计算公式如下：

$$\text{VR} = V(\text{ES}) - V(\text{ES}|I) = \sum_s p(s) \times (s - E[\text{ES}])^2 - \sum_s p(s|I) \times (s - E[(\text{ES}|I)])^2 \quad (4)$$

式中，VR 为方差缩减量， $V(\text{ES})$ 为某一生态系统服务的方差， $E[\text{ES}]$ 为某一生态系统服务的期望；

$V(ES|I)$ 和 $E(ES|I)$ 分别为在已知变量 I 的条件下某一生态系统服务的方差和期望。 s 为输出变量状态的真实数值。 VR 值越大, 表明该节点对输入节点越敏感。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务时空动态分析

计算了2000年和2020年产水量、净初级生产力、土壤保持量、粮食供给、碳储量和生境质量这6种生态系统服务并制图(图3), 各项生态系统服务呈现显著的时空分异规律。产水量服务在时间上呈显著的增长趋势, 2000年平均产水量为238.82 mm, 2020年增长到了432.01 mm。空间上呈现西南部高, 东北部低的特征, 高值区主要集中在翼城县、绛县和万荣县等区域; 低值区主要集中在北部的阳曲县和静乐县。2020年产水量高值区域较为分散, 主要原因是受季风气候影响, 降水量较往年同期偏多,

降水重心发生变化, 导致区域降水量年际差异明显, 所以在一定程度上影响了降水量的空间分布。NPP在年际中呈现增长趋势, 在空间上呈四周高, 中间低的格局, 高值区域呈环绕状分布在研究区域四周, 用地类型以森林为主。低值区域呈条带状集中在流域中部, 出现低值区的原因主要是流域范围内建设用地聚集, 植被覆盖率低。从区域总体来看, 汾河流域生境质量平均值为0.63, 从空间分布上看, 表现为西北部高, 中部和东南部低, 这是因为西北部生物多样性丰富, 而中部、东北部和东南部以农田和建设用地为主, 耕地和建设用地与人类活动区域接近, 生物多样性更容易受到威胁, 所以生境质量普遍低于以林地和草地为主的西北部用地类型。

土壤保持服务从2000年的 $498.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2020年的 $1\,028.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较2000年大约增加了1倍。土壤保持服务的高值区主要为林地和草地, 而建设用地和耕地的服务价值最低。由此可知, 林地

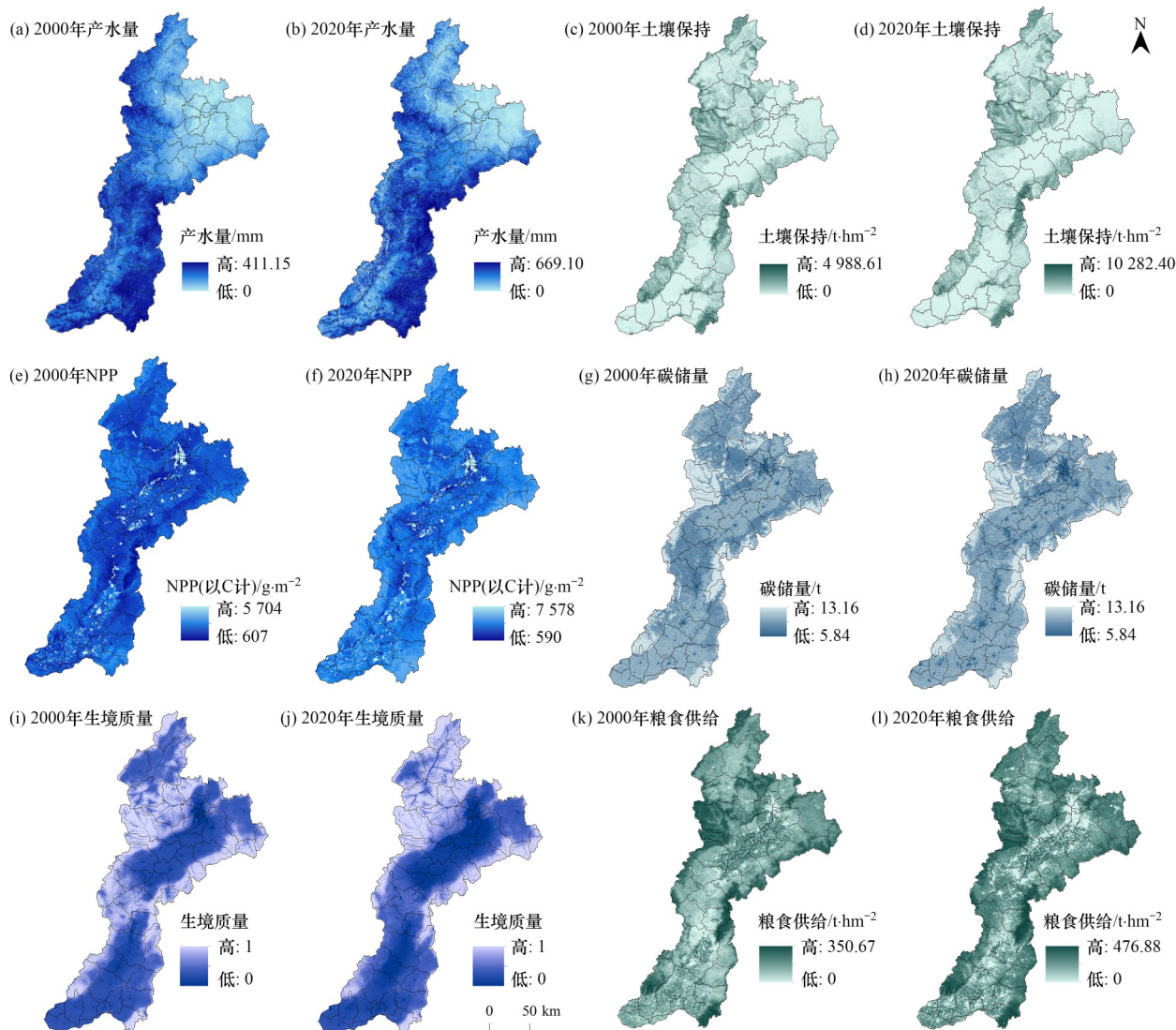


图3 汾河流域生态系统服务量空间变化与分布

Fig. 3 Spatial variation and distribution of ecosystem services in the Fenhe River Basin

和草地可以通过降低风速, 滞留土壤起到土壤保持的作用. 碳储量的空间分布格局明显, 西部服务价值最高, 中部最低, 碳储量的空间分布与土地利用格局呈现出高度的一致性. 具体来说, 草地和林地的碳储量服务供给能力最高, 固碳释氧能力最强, 中部条带状分布以建设用地为主, 固碳释氧能力较差. 粮食供给的高值区主要分布在流域盆地地区, 这些地区地势相对平坦, 适合发展农业, 这与耕地的空间分布相一致.

2.2 权衡协同关系强度的空间分布

通过 TSI 计算出了 6 种生态系统服务间权衡协同强度并对其进行可视化, 共得到 15 对关系, 结果如图 4 所示. 其中有“无变化”存在的部分表示 2000 年和 2020 年之间生态系统服务间的权衡协同关系强度未发生变化, 没有“无变化”则表示生态系统服务间的权衡协同关系强度在 20 年间发生了变化. 每个服务之间的权衡协同作用强度不尽相同, 但取值

范围均在 0~1 之间(如图 4 中色柱). 总体上看, 产水量与生境质量(WY_HQ)、产水量与碳储量(WY_CS)、产水量与土壤保持(WY_SC)和净初级生产力(WY_NPP)的 TSI 最大的地区均分布在流域西部和南部; 碳储量与土壤保持(CS_SC)、碳储量与生境质量(CS_HQ)和净初级生产力(CS_NPP); 土壤保持与生境质量(SC_HQ)、净初级生产力(SC_NPP)以及生境质量与净初级生产力(HQ_NPP)之间的 TSI 在空间格局上的分布具有极大的相似性, 大致呈四周高中部低的格局分布; 产水量与粮食供给(WY_CP)、碳储量与粮食供给(CS_CP)、土壤保持与粮食供给(SC_CP)、生境质量与粮食供给(HQ_CP)以及净初级生产力与粮食供给(NPP_CP)这 5 种服务的权衡协同强度高值区大致在汾河流域上游和下游地区分布, 流域的中游大部分属于中值区.

2.3 贝叶斯网络的构建与检验

根据上文得到的生态系统服务权衡协同指数进

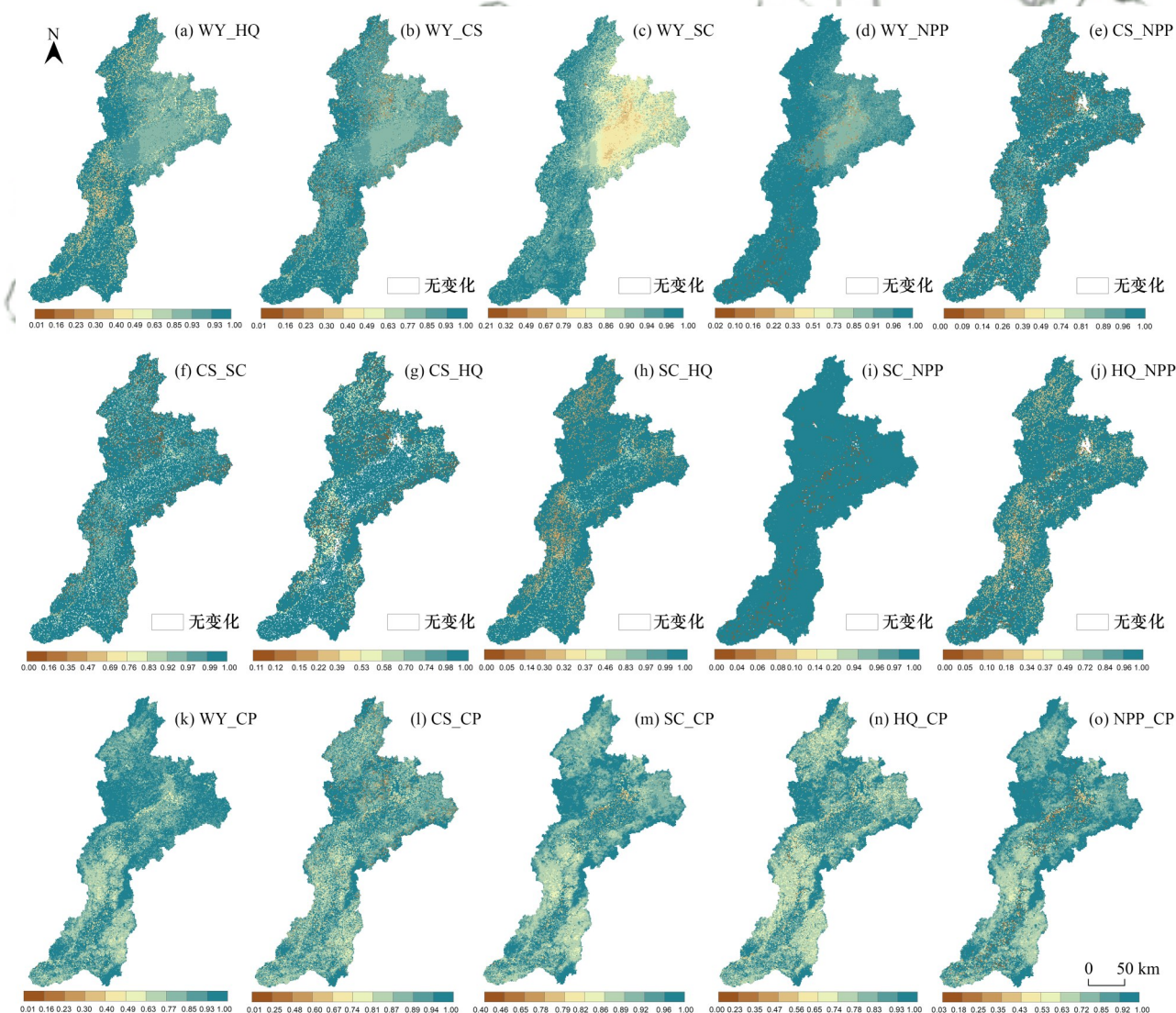


图 4 不同生态系统服务间 TSI 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of TSI among different ecosystem services

行贝叶斯网络的构建. 经过参数学习后总共可以得到 15 个贝叶斯网络. 考虑到贝叶斯网络存在精度问题, 所以还需要在已经构建完成的贝叶斯网络的基础上利用误差评估矩阵进行模型精度检验. 选取精度最高的 SC_HQ、CS_SC、WY_SC 和 WY_HQ 这 4 种服务进行贝叶斯网络呈现(图 5), 其中 SC_HQ 的服务 highest、high、medium 和 low 这 4 种状态的概率分别是 73.10%、5.70%、17.40% 和 3.80%; CS_SC 的 4 种状态的概率为 61.30%、18.00%、8.56% 和 12.20%; WY_SC 的 4 种服务状态的概率分别是 32.60%、25.90%、23.10% 和 18.40%; WY_HQ 的 4 种状态的概率分别是 41.80%、28.50%、20.20% 和 9.51%.

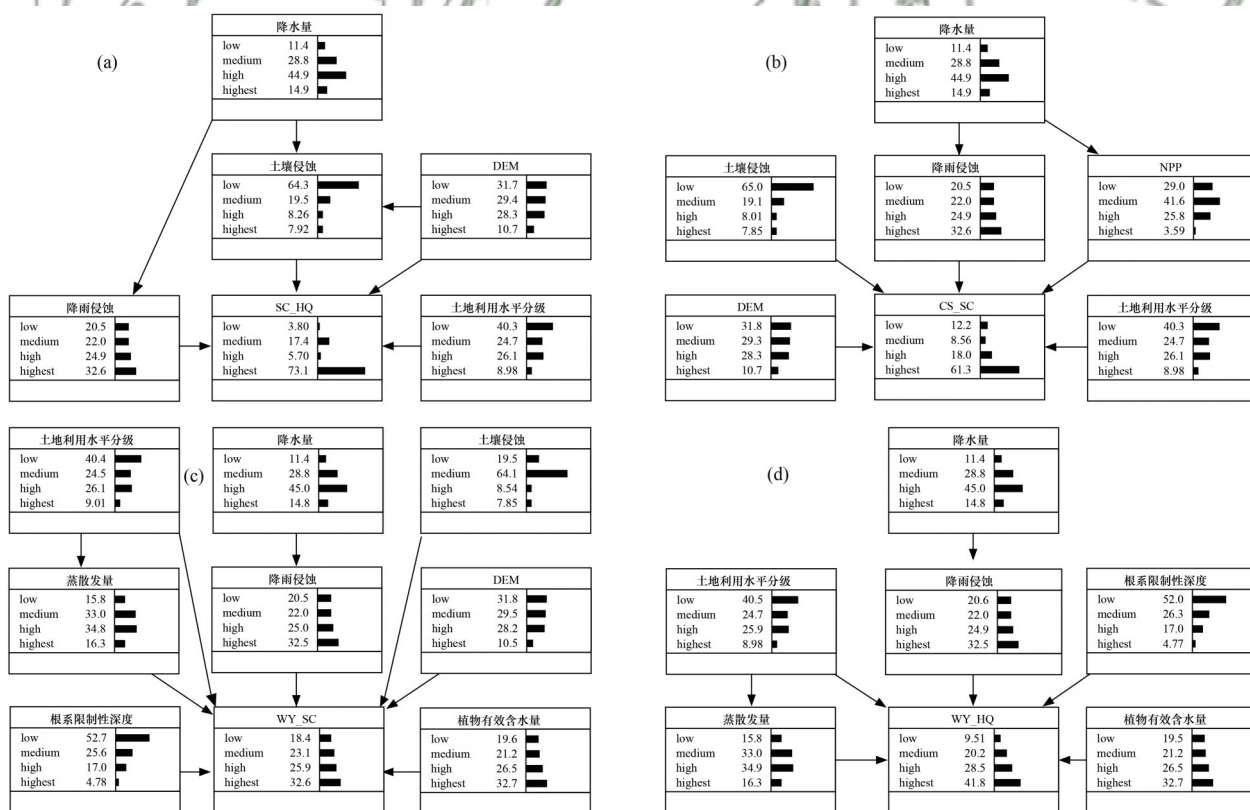
模型预测精度主要通过 Netica 软件的误差矩阵实现. 从图 6 可知, 土壤保持与生境质量(SC_HQ)的精度最高, 可以达到 83.37%, 其次是碳储量与土壤保持(CS_SC), 生境质量与粮食供给(HQ_CP)精度最低, 只有 43.34%. 以 SC_HQ 服务为例对构建的贝叶斯网络模型精度进行验证. 在研究区内通过生成采样点进行数据提取, 共 38 706 个. 预测 SC_HQ 状态与实际 SC_HQ 状态之间的关系见表 4. SC_HQ 总体精度为 83.37%, 表 4 中第 4 行第 5 列表示实际状态为 highest 的 38 649 个样本被正确地预测为 highest 状态,

第 2 列的 19 指的是有 19 个为 highest 状态的样本被错误地预测为 medium 状态. 同理, 重复上述操作计算出 CS_SC、WY_SC 和 WY_HQ 的精度分别是 77.09% (表 5)、76.57%(表 6)和 73.26%(表 7). 结果表明以上 4 对生态系统服务权衡协同强度的模型精度较高, 预测结果具有较高的可靠性.

2.4 生态系统服务权衡协同强度空间格局优化

2.4.1 驱动变量敏感度分析

敏感度分析是量化空间贝叶斯模型中驱动变量依赖程度的方法. 通过贝叶斯模型的正向推理, 对驱动变量进行敏感度分析, 可以得到各变量对 WY_SC、WY_HQ、CS_SC 和 SC_HQ 的影响力大小. 本文通过 Netica 软件的内置函数对贝叶斯变量进行敏感度分析(表 8). 从表 8 中可以看出, WY_SC 共受到 8 个驱动变量的影响, 其中降雨侵蚀、根系限制性深度和降水量是影响 WY_SC 权衡协同关系强度的关键变量; WY_HQ 共受到 6 个驱动变量的影响, 其中降雨侵蚀、蒸散发量和根系限制性深度是影响 WY_HQ 权衡协同关系强度的关键变量; CS_SC 共受到 6 个驱动变量的影响, 其中土地利用水平、NPP 和 DEM 是影响 CS_SC 权衡协同关系强度的关键变量; SC_HQ 共受到 5 个驱动变量的影响, 其中土地利用水平、NPP 和 DEM 是影响 SC_HQ 权衡协同关系



(a)SC_HQ 贝叶斯网络; (b)CS_SC 贝叶斯网络; (c)WY_SC 贝叶斯网络; (d)WY_HQ 贝叶斯网络

图 5 权衡协同关系强度的 Netica 训练结果

Fig. 5 Netica training results weighing the strength of the synergy relationship

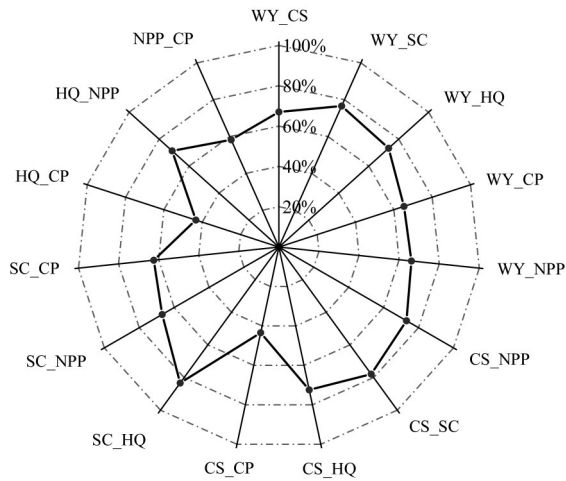


图 6 权衡协同关系强度精度比较
Fig. 6 Trade-off synergistic relationship accuracy comparison

表 4 SC_HQ 预测误差矩阵

Table 4 SC_HQ prediction error matrix

实际状态	预测状态				行总和
	low	medium	high	highest	
low	0	0	0	172	172
medium	0	34	0	4 798	4 832
high	0	2	2	1 481	1 485
highest	0	19	0	32 198	32 217
列总和	0	55	2	38 649	38 706
SC_HQ 精度/%	83.37				

表 5 CS_SC 预测误差矩阵

Table 5 CS_SC prediction error matrix

实际状态	预测状态				行总和
	low	medium	high	highest	
low	31	0	8	2 345	2 384
medium	0	13	6	1 465	1 484
high	5	1	107	4 673	4 786
highest	15	11	60	29 966	30 258
列总和	51	25	181	38 449	38 706
CS_SC 精度/%	77.09				

表 6 WY_SC 预测误差矩阵

Table 6 WY_SC prediction error matrix

实际状态	预测状态				行总和
	low	medium	high	highest	
low	14	14	4	18	598
medium	2	6 207	1 774	550	409
high	2	1 229	6 455	3 374	12 097
highest	2	167	1 898	16 985	25 602
列总和	20	7 628	10 131	20 927	38 706
WY_SC 精度/%	76.57				

强度的关键变量. 每个关键变量的 4 种状态的组合情况都会对应生态系统服务间权衡协同关系强度的 4 种状态并在 Netica 中形成条件概率(表 9). 将条件概率导出后进行关键状态子集的选取. 以 WY_HQ 为

表 7 WY_HQ 预测误差矩阵

Table 7 WY_HQ prediction error matrix

实际状态	预测状态				行总和
	low	medium	high	highest	
low	5	0	44	110	159
medium	2	77	1 263	3 496	4 838
high	3	35	10 431	3 160	13 629
highest	2	42	2 213	17 823	20 161
列总和	12	154	13 951	24 589	38 706
WY_HQ 精度/%	73.26				

例, WY_HQ 处于 highest 状态时对应的关键变量状态的组合是 {降雨侵蚀=highest, 蒸散发=medium, 根系限制性深度=medium}; 处于 high 状态时对应的关键变量状态的组合是 {降雨侵蚀=low, 蒸散发=low, 根系限制性深度=high}; 处于 medium 状态时对应的关键变量状态的组合是 {降雨侵蚀=high, 蒸散发=highest, 根系限制性深度=low}; 处于 low 状态时对应的关键变量状态的组合是 {降雨侵蚀=highest, 蒸散发=high, 根系限制性深度=low}.

2.4.2 权衡协同关系强度的空间格局优化

对 WY_HQ 关键状态子集的要害图层取交集, 并在 ArcGIS 中进行空间化展示. 如图 7(b) 所示, highest 表示 WY_HQ 权衡协同关系强度处于最高时的概率最高的变量组合, 该区域的降雨侵蚀最大, 年蒸散发量较小, 根系限制性深度较小, 主要分布在汾河流域南部的襄汾县、翼城县、稷山县和绛县等. High 表示 WY_HQ 权衡协同关系强度处于较高时概率较高的变量组合, 该区域的降雨侵蚀最低, 年蒸散发量最低, 根系限制性深度较高, 主要分布在清徐县、祁县、榆次区和晋源区. Medium 表示 WY_HQ 权衡协同关系强度处于较低时概率为中等的变量组合, 该区域降雨侵蚀较高, 年蒸散发量最高, 根系限制性深度最低, 主要分布在静乐县和宁武县的交界处, 其他地区零散分布, 较为稀疏. Low 表示 WY_HQ 权衡协同关系强度处于最低时概率最低的变量组合, 此时该区域降雨侵蚀最大, 年蒸散发量较高, 根系限制性深度最低, 主要分布在方山县和沁源县大部, 娄烦县和文水县西部, 灵石县、霍州市和古县东部, 孝义市和乡宁县少许. 同理, 根据条件概率分别对关键状态子集的要害图层取交集得到 WY_SC 的关键状态子集组合[图 7(a)]、CS_SC 的关键状态子集组合[图 7(c)]和 SC_HQ 的关键状态子集组合[图 7(d)].

根据关键状态子集和条件概率共同筛选出优化区. 根据表 9 所示, 当 WY_SC 权衡协同关系强度出现 low (0.600)、medium (0.993)、high (0.864) 和

表8 敏感度分析结果¹⁾
Table 8 Sensitivity analysis results

排序	WY_SC		WY_HQ		CS_SC		SC_HQ	
	节点名称	VR/%	节点名称	VR/%	节点名称	VR/%	节点名称	VR/%
1	降雨侵蚀	8.94	降雨侵蚀	1.87	土地利用水平	1.4	土地利用水平	7.60
2	根系限制性深度	6.74	蒸散发量	1.54	NPP	1.06	NPP	0.06
3	降水量	6.03	根系限制性深度	1.52	DEM	0.90	DEM	0.03
4	蒸散发量	4.72	降水量	1.28	土壤侵蚀	0.85	土壤侵蚀	0.01
5	土壤侵蚀	3.52	土地利用水平	0.37	降雨侵蚀	0.27	降雨侵蚀	0.01
6	土地利用水平	2.16	PAWC	0.29	降水量	0.15	—	—
7	DEM	1.40	—	—	—	—	—	—
8	PAWC	0.81	—	—	—	—	—	—

1) PAWC:植物可利用含水量;VR:方差缩减;“—”表示无相应属性

表9 条件概率
Table 9 Conditional probabilities

项目	降水量	降雨侵蚀	根系限制性深度	low	medium	high	highest
WY_SC	low	medium	high	0.600	0.200	0.167	0.100
	high	low	high	0.002	0.993	0.333	0.002
	high	medium	high	0.045	0.045	0.864	0.028
	high	highest	highest	0.005	0.005	0.021	0.968
WY_HQ	蒸散发	降雨侵蚀	根系限制性深度	low	medium	high	highest
	low	low	high	0.002	0.007	0.962	0.029
	medium	highest	medium	0.002	0.160	0.008	0.974
	high	highest	low	0.364	0.090	0.363	0.182
SC_HQ	highest	high	low	0.167	0.500	0.250	0.125
	土壤侵蚀	DEM	土地利用水平	low	medium	high	highest
	high	high	highest	0.286	0.143	0.250	0.428
	medium	low	high	0.083	0.583	0.083	0.250
CS_SC	high	low	high	0.200	0.200	0.400	0.200
	medium	high	medium	0.001	0.014	0.001	0.983
	DEM	NPP	土地利用水平	low	medium	high	highest
	medium	highest	low	0.500	0.167	0.166	0.167
CS_SC	low	highest	highest	0.071	0.429	0.071	0.428
	high	medium	low	0.125	0.125	0.625	0.125
	highest	low	medium	0.019	0.004	0.005	0.971

highest(0.968)概率时所对应的关键状态子集分别处于不同程度的水平. 对比得到降水量处于高值区间328.37~364.33 mm, 降雨侵蚀处于低值区间569.64~839.39 MJ·mm·(hm²·h·a)⁻¹, 根系限制性深度处于高值区间62.96~108.76 mm时, WY_SC权衡协同关系强度处于中级水平并达到最大可能概率(0.993), 对其进行空间可视化展示[图7(e)]. 优化区域较为集中, 主要分布在文水县、清徐县和祁县三县交界处及晋源区、榆次区和小店区的大部, 阳曲县和平遥县少量分布, 与土地利用类型中的建设用地和耕地相吻合. 当蒸散发量处于中值区间517~589 mm, 降雨侵蚀处于最高值区间1255.46~1735.54 MJ·mm·(hm²·h·a)⁻¹, 根系限制性深度处于中值区

间32.43~62.96 mm时, WY_HQ权衡协同关系强度达到最大概率(0.974), 对其进行空间可视化展示[图7(f)]. 优化区域主要集中在汾河流域南部的稷山县、新绛县、襄汾县和翼城县交界处. 当DEM处于最高区间, 土地利用水平处于中级水平, NPP处于低值区间时, CS_SC权衡协同关系水平出现最高的概率达到0.971, 优化区域主要集中在灵石县和霍州市东部及其与安泽县的交界处[图7(g)]. 当土地利用水平处于中值区间, DEM处于高值区间, 土壤侵蚀处于中值区间时, SC_HQ权衡协同关系强度达到最大可能概率(0.983), 优化部分主要分布在流域上游阳曲县的大部, 古交市、交城县和霍州市等地零星分布[图7(h)].

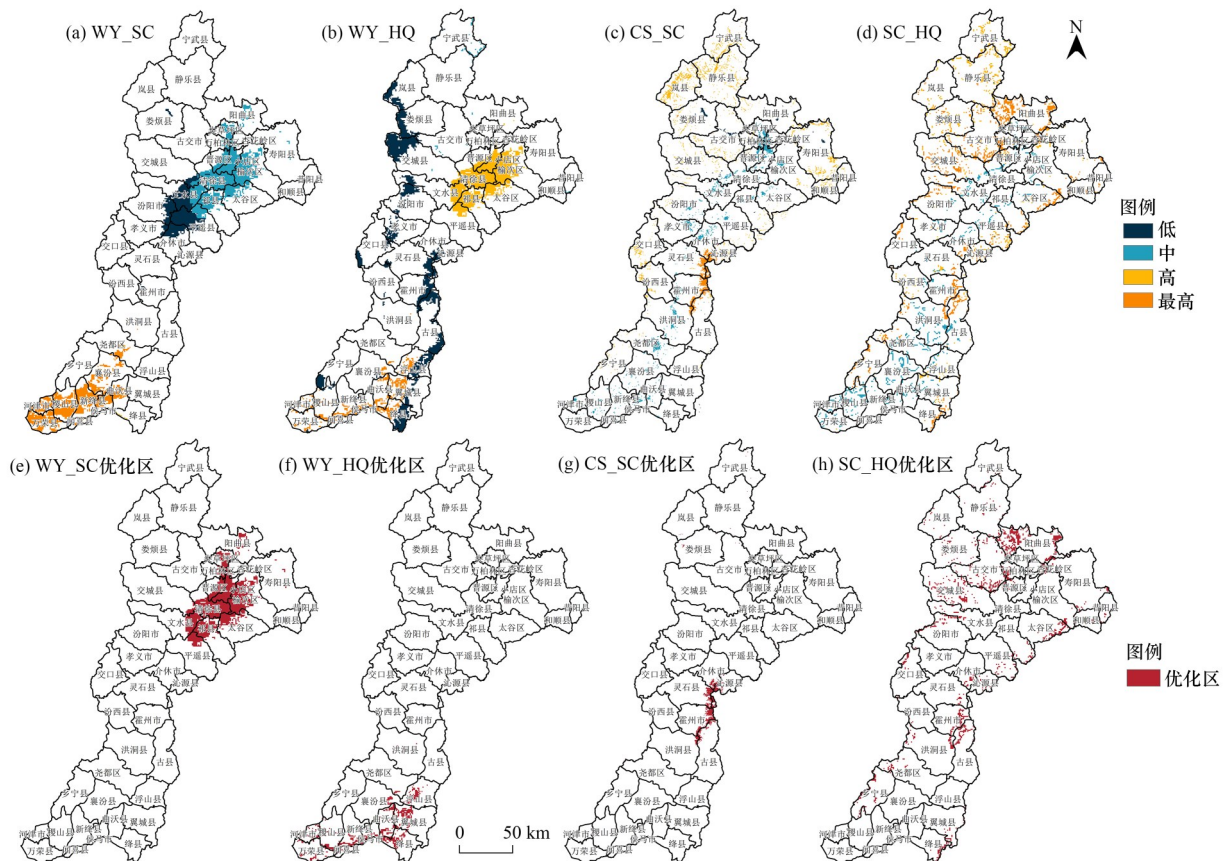


图7 权衡协同关系强度关键状态子集组合及优化区域分布

Fig. 7 Trade-offs of synergistic relationship key state subset combinations and optimization of regional distribution

3 讨论

了解生态系统服务之间的相互关系并构建合理的模型可以对流域内的生态环境进行有效的管理. 本文借助 InVEST 模型和 CASA 模型定量评估得到 6 种生态系统服务的空间格局, 同时引入 TSI 从时间和空间上对汾河流域生态系统服务权衡协同关系的强度进行定量评估. 根据本文的研究结果, 产水量与土壤保持和生境质量均受到降水、根系限制性深度和降雨侵蚀等的显著影响, 同时有研究表明, 降水、地形和土地利用水平等因素是土壤保持和粮食供给服务的主导因素^[43,44], 这与本研究的结果相一致. 汾河流域中部的文水县、清徐县和祁县等是产水量和土壤保持共同的优化区, 对于这一区域应该继续积极实行生态保护策略, 推进林地提质增效. 强化山区的水土保持能力, 防止水土流失, 开展封山育林, 抚育森林等措施提升水源涵养能力, 改善局地小气候. 流域的东部和南部是产水服务、生境质量和碳储量的优化区, 对于这一区域应提高水资源利用效率, 高效利用生态资源的同时合理配置农业空间和生态空间用地比例. 本研究建议政府部门对生态系统服务权衡与协同优化区实施生态保护措

施, 在制定有关政策时重点关注降水量、土地利用水平和蒸散发量等关键变量, 对区域的生态与生产空间进行合理统筹, 这样不仅可以提升当地居民的经济水平和生活质量, 而且还可以提升区域总体的生态系统服务质量, 促进区域生态经济的健康发展.

贝叶斯网络模型允许因果关系和等级依赖关系的存在, 包括变量之间的相互作用及关系中的非线性, 在量化关系和不确定性问题推理等方面具有高度的灵活性. 本文通过各驱动变量的因果关系构建了贝叶斯网络, 探讨多种生态系统服务间的权衡协同关系强度并进行空间优化, 构建的贝叶斯模型精度最高的为 SC_HQ(83.37%), 表明贝叶斯网络可以准确模拟生态系统服务权衡协同关系强度以及可靠预测生态系统服务各关键节点的概率. CS_CP 和 HQ_CP 等模型的精度较低, 可能的原因是部分驱动变量没有纳入考虑范围或者是简单通过 Netica 软件对连续变量分级可能会导致模型参数的设定具有潜在的不确定^[45].

本研究定量分析了不同生态系统服务间复杂关系, 但由于受到数据和方法的限制, 选取了过多的自然环境指标作为模型的关键驱动变量, 对于人类活动因素的考虑较少, 同时选取敏感性占比前 3 的

变量确定关键变量关键状态子集, 具有一定的主观性, 未来还需要进一步地讨论; 仅在流域网格尺度下对生态系统服务间权衡关系进行研究, 而权衡协同关系可能在不同的空间尺度上呈现不同的形式。因此, 选取更为全面的影响因素, 确定适宜于研究区的关键变量判断标准同时将不同尺度纳入生态系统服务评估, 深入分析复杂地理环境因素作用影响下的生态系统服务间的关系是未来研究工作的重点。

4 结论

(1) 2000 年和 2020 年汾河流域 ESs 时空差异性较为显著, 在时间尺度上, 区域内的产水量、NPP、粮食供给、土壤保持和碳储量均呈现波动上升; 在空间尺度上, 生境质量、土壤保持、NPP 和碳储量服务变化较小, 较为稳定。

(2) 生态系统服务间的权衡协同关系强度会受到不同变量的影响。碳储量与生境质量、土壤保持和 NPP 的 TSI 在空间上呈现出四周高中部低的格局; 与产水量有关的 5 对服务中 TSI 最大的地区均分布在流域西部和南部; 粮食供给与其他服务之间的 TSI 呈现高-中-高的分布特征。总体上看降水量、蒸散发量、降雨侵蚀和土地利用水平会对权衡协同关系强度共同产生影响, 只是影响的程度大小各异。

(3) 根据关键变量不同状态的条件概率, 发现 WY_SC 与 WY_HQ 均受到降水、根系限制性深度和降雨侵蚀等的显著影响, 且汾河流域中部的文水县、清徐县、祁县和平遥县是权衡协同高值区, 可作为生态修复重点区域, 未来应调整关键变量关键状态的组合, 实现 ESs 的全面优化。

参考文献:

- [1] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 等. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(8): 1909-1922.
- [2] 周李磊, 苏湘媛, 向洪莉, 等. 重庆市生态系统服务与人类福祉耦合关系模拟[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(5): 2560-2573.
- [3] 左丽媛, 姜远, 高江波, 等. 生态保护红线区生态系统服务多维驱动力的定量分离[J]. 地理学报, 2022, **77**(9): 2174-2188.
- [4] 韩逸, 赵文武, 郑博福. 推进生态文明建设, 促进区域可持续发展——中国生态文明与可持续发展 2020 年学术论坛述评[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1259-1265.
- [5] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 等. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望[J]. 中国土地科学, 2018, **32**(12): 82-89.
- [6] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- [7] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例[J]. 自然资源学报, 2023, **38**(4): 966-982.
- [8] Castillo R M, Feng K S, Sun L X, et al. The land-water nexus of biofuel production in Brazil: analysis of synergies and trade-offs using a multiregional input-output model[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **214**: 52-61.
- [9] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.135.
- [10] Karimi J D, Harris J A, Corstanje R. Using Bayesian belief networks to assess the influence of landscape connectivity on ecosystem service trade-offs and synergies in urban landscapes in the UK[J]. Landscape Ecology, 2021, **36**(11): 3345-3363.
- [11] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, et al. Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies[J]. Ecological Economics, 2018, **150**, doi: 10.1016/j.ecolecon.2018.04.002.
- [12] Wang Z X, Ling X, Yan H M, et al. Optimization of the ecological network structure based on scenario simulation and trade-offs/synergies among ecosystem services in Nanping[J]. Remote Sensing, 2022, **14**(20), doi: 10.3390/rs14205245.
- [13] García N G, Martínez-Fernández J, Fitz C. Environmental scenario analysis on natural and social-ecological systems: a review of methods, approaches and applications[J]. Sustainability, 2020, **12**(18), doi: 10.3390/su12187542.
- [14] Chawanji S, Masocha M, Dube T. Spatial assessment of ecosystem service trade-offs and synergies in Zimbabwe[J]. Transactions of the Royal Society of South Africa, 2018, **73**(2): 172-179.
- [15] Dade M C, Mitchell M G E, McAlpine C A, et al. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: the need for a more mechanistic approach[J]. Ambio, 2019, **48**(10): 1116-1128.
- [16] 温玉玲, 张小林, 魏佳豪, 等. 鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系[J]. 地理科学, 2022, **42**(7): 1229-1238.
- [17] Grafius D R, Corstanje R, Warren P H, et al. Using GIS-linked Bayesian belief networks as a tool for modelling urban biodiversity[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, **189**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.05.012.
- [18] Landuyt D, Broekx S, Goethals P L M. Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale[J]. Ecological Indicators, 2016, **71**, doi: 10.1016/j.ecolind.2016.07.015.
- [19] Forio M A E, Villa-Cox G, Van Echelpoel W, et al. Bayesian Belief Network models as trade-off tools of ecosystem services in the Guayas River Basin in Ecuador[J]. Ecosystem Services, 2020, **44**, doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101124.
- [20] Crossman N D, Pollino C A. An ecosystem services and Bayesian

- modelling approach to assess the utility of water resource development in rangelands of north Australia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, **159**, doi: 10.1016/j.jaridenv.2018.02.007.
- [21] 曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J]. *地理学报*, 2018, **73**(9): 1809-1822.
- Zeng L, Li J, Li T, *et al.* Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(9): 1809-1822.
- [22] Peng L, Chen T T, Deng W, *et al.* Exploring ecosystem services trade-offs using the Bayesian belief network model for ecological restoration decision-making: a case study in Guizhou Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **135**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108569.
- [23] 荔童, 梁小英, 张杰, 等. 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[J]. *生态学报*, 2023, **43**(16): 6758-6771.
- Li T, Liang X Y, Zhang J, *et al.* 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 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(16): 6758-6771.
- [24] Xue C L, Chen X H, Xue L R, *et al.* Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **855**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158834.
- [25] 申豪勇, 李佳, 王志恒, 等. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J]. *中国地质*, 2022, **49**(4): 1127-1138.
- Shen H Y, Li J, Wang Z H, *et al.* Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow river [J]. *Geology in China*, 2022, **49**(4): 1127-1138.
- [26] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4440-4448.
- Zhao C H, Shen H Y, Wang Z H, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe River Basin and influence factors [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4440-4448.
- [27] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. *生态学报*, 2017, **37**(2): 341-348.
- Fu B J, Yu D D, Lü N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 341-348.
- [28] 徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 等. 基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 900-911.
- Xu Y, Huang W T, Zheng Z W, *et al.* Detecting influencing factor of vegetation NPP in southwest China based on spatial scale effect [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 900-911.
- [29] Wu Y Y, Wu Z F. NPP variability associated with natural and anthropogenic factors in the tropic of cancer transect, China [J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(4), doi: 10.3390/rs15041091.
- [30] 施亚林, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2023, **43**(2): 731-743.
- Shi Y L, Cao Y P, Miao S L. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(2): 731-743.
- [31] 周晓艳, 何依依, 黄欣, 等. 三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(11): 259-267.
- Zhou X Y, He Y Y, Huang X, *et al.* Topographic gradient effects of habitat quality and its response to land use change in Hubei Section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(11): 259-267.
- [32] 赵晓同, 王建, 苏军德, 等. 基于InVEST模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(18): 301-308.
- Zhao X J, Wang J, Su J D, *et al.* Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(18): 301-308.
- [33] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, *et al.* Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting [J]. *Landscape Ecology*, 2015, **30**(3): 535-546.
- [34] 韩念龙, 张亦清, 张伟璇. 海南岛土地利用及产水量时空变化模拟[J]. *水资源保护*, 2022, **38**(2): 119-127.
- Han N L, Zhang Y Q, Zhang W X. Simulation of temporal and spatial changes of land use and water yield in Hainan Island [J]. *Water Resources Protection*, 2022, **38**(2): 119-127.
- [35] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 等. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系——以普达措国家公园为例[J]. *地理科学*, 2022, **42**(7): 1283-1294.
- Ma Y W, Pan J F, Cai S Q, *et al.* Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: a case study of the Potatso National Park [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(7): 1283-1294.
- [36] 赵龙才, 李粉玲, 常庆瑞. 农作物遥感识别与单产估算研究综述[J]. *农业机械学报*, 2023, **54**(2): 1-19.
- Zhao L C, Li F L, Chang Q R. Review on crop type identification and yield forecasting using remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, **54**(2): 1-19.
- [37] Rossi R, Pollice A, Bitella G, *et al.* Modelling the non-linear relationship between soil resistivity and alfalfa NDVI: a basis for management zone delineation [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, **159**: 146-156.
- [38] 黄影平. 贝叶斯网络发展及其应用综述[J]. *北京理工大学学报*, 2013, **33**(12): 1211-1219.
- Huang Y P. Survey on Bayesian network development and application [J]. *Transactions of Beijing institute of Technology*, 2013, **33**(12): 1211-1219.
- [39] Liu G W, Fu X Y, Han Q Y, *et al.* Research on the collaborative governance of urban regeneration based on a Bayesian network: the case of Chongqing [J]. *Land Use Policy*, 2021, **109**, doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105640.
- [40] 于明雪, 孙建国, 杨维涛, 等. 基于贝叶斯层次时空模型的甘肃省土地利用程度演变分析[J]. *地理科学*, 2022, **42**(5): 918-925.
- Yu M X, Sun J G, Yang W T, *et al.* Evolution of land use degree in Gansu Province based on Bayesian hierarchical spatio-temporal model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(5): 918-925.
- [41] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于贝叶斯网络的生态系统服务空间格局优化——以泾河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(4): 1268-1280.
- Yu Y Y, Li J, Zhou Z X, *et al.* Spatial pattern optimization of ecosystem services based on Bayesian networks: a case of the Jing River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(4): 1268-1280.
- [42] 郑涛, 陈爽, 张童, 等. 基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(12): 2980-2994.
- Zheng T, Chen S, Zhang T, *et al.* Research on driving mechanism of ecological land loss based on Bayesian network [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(12): 2980-2994.
- [43] Zuo L Y, Gao J B, Du F J. The pairwise interaction of environmental factors for ecosystem services relationships in karst ecological priority protection and key restoration areas [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108125.
- [44] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J]. *地理学报*, 2020, **75**(3): 607-619.
- Dai E F, Wang Y H. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(3): 607-619.
- [45] Strith A, Bebi P, Grêt-Regamey A. Quantifying uncertainties in earth observation-based ecosystem service assessments [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, **111**, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.09.005.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)