

基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化

曾 莉¹, 李 晶¹, 李 婷¹, 杨晓楠², 王彦泽¹

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 以渭河流域关中天水经济区段(简称“渭河流域关天段”)为研究区, 基于贝叶斯网络和水量平衡原理建立了水源涵养服务网络模型; 将CA-Marcov模型与贝叶斯网络模型相结合, 预测了2050年不同土地利用情景及其水源涵养服务分布概率; 提出了关键变量关键状态子集方法, 对研究区水源涵养服务空间格局进行优化。结果表明: ① 保护情景下, 林地面积增长了18.12%, 其主要来源为耕地; 草地和城市面积增长缓慢, 分别增加了0.73%和0.38%; 水体和未利用地分别减少了5.08%和0.92%, 该情景下的水源涵养量值偏高的概率在3种情景中最大, 保护情景的设计对未来的土地利用政策制定具有一定参考价值。② 水源涵养服务的关键影响因素是降水、蒸散发和土地利用, 水源涵养量最高状态对应的关键变量关键状态子集是: {降水=1, 蒸散发=2, 土地利用=2}, 该子集主要分布在年平均降雨量和蒸散发量较大, 植被覆盖率高的地区。③ 研究区适宜优化水源涵养的区域主要分布在天水市麦积区南部、宝鸡市陇县西南部和渭滨区南部、咸阳市旬邑县东北部和永寿县西北部, 以及铜川市耀州区西部。结合贝叶斯网络模型研究水源涵养服务的优化区域, 不仅有助于提升对生态系统水源涵养服务过程的直观认识, 而且增加了情景设计和格局优化的合理性。在此基础上提出的关键状态关键因子方法, 对研究区水源涵养生态环境建设和政策制定都具有重要的意义。

关键词: 水源涵养; 生态系统服务; 贝叶斯网络; 情景分析; 空间格局优化

DOI: 10.11821/dlxb201809015

1 引言

生态系统服务是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用, 水源涵养属于生态系统服务中的调节服务^[1], 指的是生态系统对降水的截留保持量, 主要功能有削减洪峰流量、调节地表径流、增加可利用水资源、减少土壤侵蚀和净化水质等^[2-5]。目前, 关于水源涵养服务的研究相对较少, 主要是不同生态系统中水源涵养服务价值的评估^[6-7]和时空变化研究^[8-11]。近年来, 越来越多的研究关注土地利用变化对水源涵养服务价值的影响^[12-15], 预测未来土地利用变化并分析不同情景下水源涵养服务的变化趋势^[16]。除了分析土地利用所带来的影响, 国内外专家进一步对水源涵养服务空间格局与其影响因素的关系进行了探究, 发现区域的水源涵养能力受气候、土地利用方式、植被覆盖及土壤条件等的综合作用^[17-20]。通过分析土地利用和生态过程变化趋势, 可以为生态系统服务构建情景, 并预测生态系统服务可能存在的脆弱性; 反过来, 生态系统服务在不同时间尺度和空间尺度上的变化趋势, 也可以作为土地利用和环境因子优化配置的

收稿日期: 2017-06-16; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771198, 41771576, 41571512); 中央高校基本科研业务费专项资金(2017CSY011)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771198, No.41771576, No.41571512; The Fundamental Research Funds For the Central Universities, Shaanxi Normal University, No.2017CSY011]

作者简介: 曾莉(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感与GIS。E-mail: 15502935707@163.com

通讯作者: 李晶(1977-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态系统服务。E-mail: lijing@snnu.edu.cn

1809-1822 页

依据^[21]。以上研究虽然对水源涵养服务的空间格局进行了分析,却只对土地利用格局进行了优化,忽略了其他因子的影响,没有真正意义上实现水源涵养服务的格局优化,即在一定区域范围内,如何合理配置土地利用及其他影响因子能使该区域水源涵养服务量最大。如何选取影响水源涵养服务的关键因子以及量化各因子对水源涵养的影响程度,从而给出格局优化建议并划定水源涵养服务优化区,正是本文的研究重点和需要解决的问题。

贝叶斯网络是将多元知识图解可视化的一种概率知识表达与推理模型。它蕴含了网络节点变量之间的因果关系及条件相关关系,结构灵活,可作为一种决策支持工具应用于生态系统服务模拟领域^[22-24],如:Julen等将贝叶斯网络与GIS软件相结合,构建林业生产和生物多样性的权衡关系网络,结合专家意见、自然因子和人为因子为林业管理者提供了3种决策方案^[25];Dal Ferroa等为了提升读者对研究区土壤有机碳减少现象原因的理解,运用贝叶斯网络模拟土壤有机碳的动态变化过程并确定了最大化土壤有机碳积累量,减少温室气体排放量的最优土地利用管理情景是退耕还草、免耕和保护农业^[26];Kinh等将其他生态系统服务、环境和人为因子纳入贝叶斯网络的构建,以种植地点和种植方式为指标,设置了8种情景,为农业生产者预测农业规划情景中的成功概率提供支持^[27]。本文引入贝叶斯网络,模拟水源涵养服务过程,根据研究区的实际情况和发展规划设置土地利用情景,以期预测未来不同情景下的水源涵养服务状态概率分布,并且进一步选取网络中的关键因子,给出水源涵养服务的格局优化策略。

2 研究区概况和数据来源

2.1 研究区概况

渭河发源于甘肃渭源县鸟鼠山,流域面积13.48万km²,全河多年平均径流量103.7亿m³,从宝鸡市进入陕西省,穿过关中平原,于陕西省潼关县注入黄河。渭河流域关天段(图1)多年平均降水约为550mm,海拔240~3700m,区域地势西、南高,东、北低,西、北、南部多为山地,中间为关中平原,地形地貌多种多样,拥有丰富的植被类型。近年来,随着西部大开发逐步推进和建设西部强省战略的深入实施,渭河流域关天

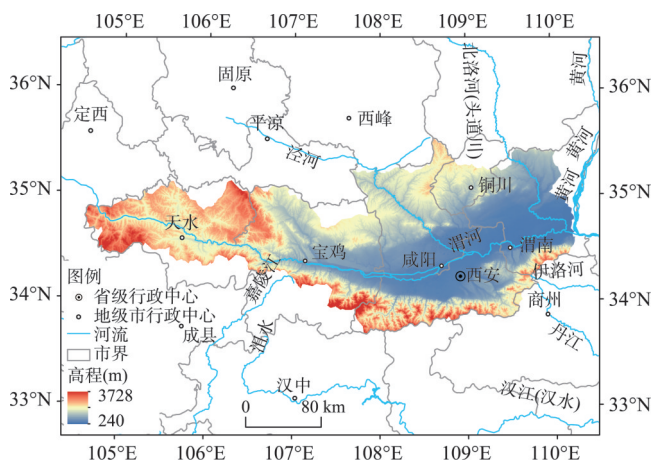


图1 渭河流域关天段行政区划图

Fig. 1 Administrative divisions of the Weihe River Basin

段在陕西省乃至全国空间经济布局中的地位变得至关重要。然而,高速的经济发展和人口增长,导致研究区建设用地需求压力大,耕地持续减少,人地矛盾突出。不合理的土地利用布局和广种薄收、单一经营的农业生产方式使得水土流失严重,流域生态系统及环境发生了不同程度的变化^[28-29]。陕西更是成为全国水土流失最严重的省份之一,全省80%的耕地和70%的人口分布于水土流失区,水土流失面积占全省土地总面积的46.6%^①。因此,研

① 数据来源于《陕西省土地利用总体规划(2006-2020年)》。

究该地区水源涵养服务随土地利用变化的变化情况，优化水源涵养服务格局，对该区域生态环境建设、资源开发、土地治理具有重要的意义。

2.2 数据来源

研究数据主要包括：①渭河流域关天段的基础地理信息数据，包括行政区划、河流、道路、高程、土壤类型数据，主要来源于国家基础信息中心；②2000年、2005年、2010年、2015年的土地利用数据和2010年、2015年植被类型数据，来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)；③气象数据，包括长武、宝鸡、西安、耀县、铜川、武功、华山、天水8个气象站的降水、温度、风速、相对湿度、蒸散发等，数据于中国气象数据网获取；④社会经济统计数据，主要包括人口、GDP等，来源于《陕西省统计年鉴》、《甘肃省统计年鉴》。

3 研究方法

3.1 基于贝叶斯网络的水源涵养服务

3.1.1 贝叶斯网络模型 Pearl^[30]于1988年提出贝叶斯网络 (Bayesian belief networks, BBNs) 的概念，即基于概率推理的图形化网络。贝叶斯网络是一个有向无环图 (Directed Acyclic Graph, DAG)，由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、离散状态对应的概率分布和条件概率表^[22]。条件概率表表达了父节点 X 与子节点 Y 之间的关系强度，表中每一行由父节点的状态组合和条件概率 $P(y|x)$ 组成，即父节点 X 的离散状态 x 发生时，子节点各状态 y 发生的概率。在一个由降水、植被类型和蒸散发组成的网络中，子节点蒸散发的条件概率表如表1所示。条件概率表既可以由专家知识得到，也可以由实际观测数据求出。子节点的概率分布由父节点的概率分布及条件概率表决定，对于没有父节点的节点，它的概率分布则是先验概率分布 $P(X)$ 。所有节点的条件概率分布连乘可以求出贝叶斯网络中所有变量的联合概率 (公式(1))，而联合概率使得贝叶斯网络能够有效的计算网络中任意节点的概率分布，这为本文预测水源涵养服务节点的概率分布提供了理论基础。本文使用Netica软件构建水源涵养服务的贝叶斯网络模型，它功能强大，具有直观而流畅的用户界面，方便用户绘制和更改网络。

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

3.1.2 水源涵养量的计算方法 目前，水源涵养量的计算方法主要有：土壤蓄水估算法、综合蓄水能力法、年径流量法和水量平衡法4种^[13]。水量平衡法是

表1 蒸散发节点的条件概率表

Tab. 1 Condition probability for evapotranspiration node					
植被类型	降水	蒸散发			
		Highest	High	Medium	Low
Highest	Highest	0.0647	52.15	38.991	8.794
Highest	High	0.104	55.123	37.712	7.061
Highest	Medium	0.16	58.139	35.251	6.451
Highest	Low	0.314	80.038	19.586	0.0628
High	Highest	1.036	48.705	26.425	23.834
High	High	1.104	25.153	49.202	24.54
High	Medium	1.139	22.322	47.41	29.129
High	Low	0.704	48.415	50.792	0.088
Medium	Highest	0.813	0.675	12.462	86.049
Medium	High	3.265	2.664	41.71	52.36
Medium	Medium	2.248	5.154	34.65	57.948
Medium	Low	1.249	8.005	90.68	0.0662
Low	Highest	4.66	1.553	9.709	84.078
Low	High	32.642	2.554	26.257	38.547
Low	Medium	15.281	2.488	23.099	59.133
Low	Low	17.687	4.082	77.751	0.68

注：Highest、High、Medium、Low 分别表示状态为最高、高、中、低。

指区域水量输入和输出的差值,从水量平衡的角度出发,降水量与森林蒸散量以及其他消耗的差即为水源涵养量^[31],它是研究水源涵养机理的基础,可以充分体现区域降水分配情况,能够比较准确地计算出水源涵养量。因此,选用水量平衡法对2010年渭河流域关天段水源涵养量进行估算,并根据此模型选取变量作为构建水源涵养服务贝叶斯网络的节点。以渭河流域关天段植被类型数据为基础,计算不同土地利用类型的水源涵养量,累加后得到研究区的水源涵养总量,计算公式为:

$$Q=10\times\sum S_i(P_i-E_i-R_i)$$

(2)

式中: Q 为研究区水源涵养总量,单位 m^3/a ; S_i 为土地利用类型 i 的面积,单位 hm^2 ; P_i 为土地利用类型 i 的年降水量,单位 mm/a ; E_i 为土地利用类型 i 的年蒸散量,单位 mm/a ; R_i 为土地利用类型 i 的地表径流量,单位 mm/a 。

3.1.3 基于贝叶斯网络的水源涵养服务模型 根据水量平衡原理,筛选出与水源涵养相关的影响因子,分别是降水、植被类型、2010年土地利用、土壤类型、蒸散发和地表径流。而水源涵养服务主要由降水、蒸散发和地表径流控制,蒸散发受降水和植被类型影响^[32],地表径流与降水、土地利用、土壤类型有关^[33]。因此构建水源涵养服务的贝叶斯概念网络如图2所示,借助ArcGIS软件,将节点所对应的栅格图层进行离散化处理,根据研究区中各变量的实际分布情况,将上述每个变量栅格数据分为4个等级:最高、高、中、低。为方便行文,将这4个等级分别称为状态1、2、3、4。例如,“降水=2”表示降水介于681~817 mm/a之间,具体离散化分级标准如表2所示。其中,蒸散发数据来源于2010年250 m空间分辨率的MODIS数据,地表径流数据是通过SWAT模型计算得到,2010年水源涵养数据是通过水量平衡法计算得到。将离散化的栅格数据图层的值提取到一个单一的栅格数据层,将其属性表输入贝叶斯网络模型,即可获得2010年水源涵养的贝叶斯网络的所有节点的概率分布。在此基础上,网络中各节点的条件概率表由条件概率公式计算获得,公式为:

$$P(B|A)=\frac{P(AB)}{P(A)}$$

(3)

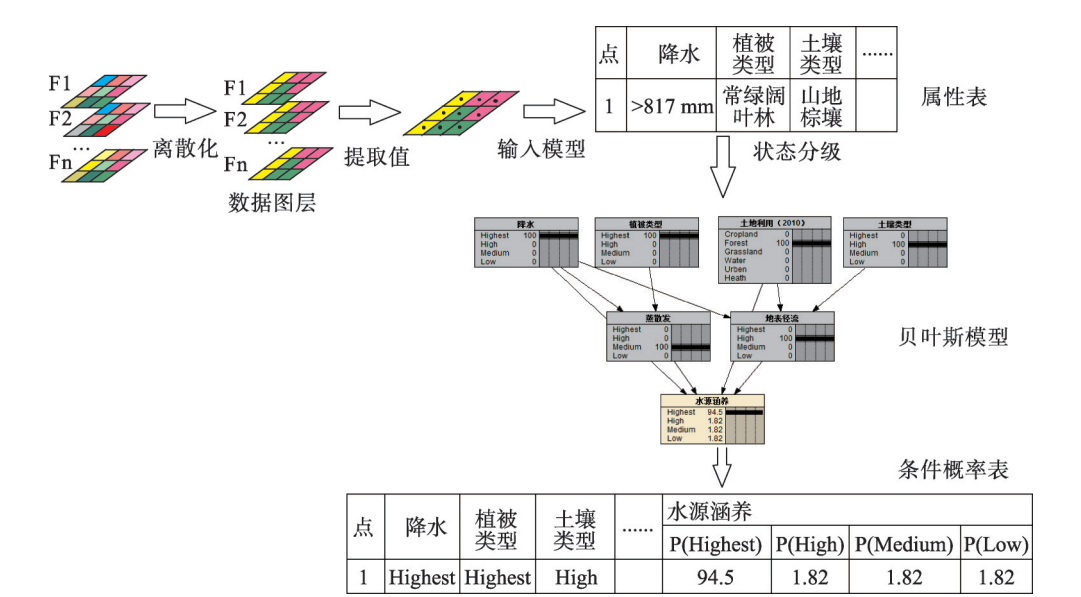


图2 水源涵养服务贝叶斯网络构建原理

Fig. 2 Schematic diagram of Bayesian belief network construction for water conservation

表2 水源涵养因子状态分级

Tab. 2 State classification of water conservation factors

序号	因子	状态名称	状态编号	实际值范围
1	降水(mm/a)	Highest	1	817~996
		High	2	681~817
		Medium	3	529~681
		Low	4	0~529
2	植被类型	Highest	1	常绿阔叶林, 常绿针叶林, 落叶阔叶林, 落叶针叶林, 乔木园地, 稀疏林, 针阔混交林
		High	2	灌木绿地, 灌木园地, 落叶阔叶灌, 乔木绿地, 稀疏灌木林
		Medium	3	草本绿地, 草本沼泽, 草丛, 旱地, 水田, 稀疏草地, 草原
		Low	4	采矿场, 工业用地, 河流, 湖泊, 交通用地, 居住地, 空, 裸土, 裸岩, 水库, 运河, 沙漠/沙地
3	土地利用	Cropland	1	耕地
		Forest	2	林地
		Grassland	3	草地
		Water	4	水体
		Urban	5	城市
		Heath	6	未利用地
4	土壤类型	Highest	1	沼泽土, 水稻土, 淤淀黑土, 潮土, 灰褐色土型淤淀土, 褐土型淤淀土, 轻度盐化淤淀土
		High	2	亚高山草甸土, 山地棕壤, 山地淋溶褐土, 暗棕壤, 棕壤, 山地草原土, 粗骨土, 褐土, 黄壤土, 黄棕壤, 山地草甸草原土
		Medium	3	耕种山地淋溶褐土, 耕种山地灰褐土, 耕种山地碳酸盐褐土, 耕种山地草甸草原土, 耕种山地褐土
		Low	4	壤土, 新积土, 紫色土, 红土, 风沙土, 黄褐土, 石质土, 黄绵土, 石灰岩土
5	蒸散发(mm/a)	Highest	1	10913~65535
		High	2	6003~10913
		Medium	3	4668~6003
		Low	4	1765~4668
6	地表径流(mm/a)	Highest	1	59~89
		High	2	34~59
		Medium	3	15~34
		Low	4	0~15
7	水源涵养(t/hm ² ·a)	Highest	1	1103~1468
		High	2	917~1103
		Medium	3	163~917
		Low	4	0~163

注: Highest、High、Medium、Low 分别表示状态为最高、高、中、低。

式中: $P(AB)$ 是 A 与 B 的联合概率, 即两个事件共同发生的概率; $P(A)$ 是 A 的先验概率, 即事件 A 发生的概率。同理, $P(B)$ 是事件 B 发生的概率。

3.2 不同情景下水源涵养服务预测

3.2.1 土地利用情景模拟 土地利用预测方法主要有马尔科夫随机过程模型、系统动力学预测模型、人工神经网络预测模型、CA 模型、CA-Markov 模型、CLUE-S 模型等^[34]。CA-Markov 模型集成了马尔科夫 (Markov) 定量化预测与元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 模拟复杂系统空间变化的能力, 不仅可以从数量上, 还可以从时间上进行土地利用时空格局模拟, 因此使用 CA-Markov 模型, 模拟研究区 2050 年 3 种情景下的土地利用格局。

① 以 2000 年、2005 年各土地利用类型之间的转化面积作为马尔科夫状态转移概率矩阵元素；② 根据耕地、林地、草地、水域、城镇用地、未利用地的土地利用类型特点选取坡度、离道路距离、离城市中心距离、离水域距离作为驱动因子，并根据不同的地类转换特点选取限制性因子，计算转换类型的潜力分布，如耕地转化为林地潜在分布；③ 以 2005 年为基准年，预测 2010 年的土地利用并与真实的 2010 年土地利用做 kappa 精度检验，对土地利用类型模拟预测效果进行定量评价；④ 以 2000 年、2005 年土地利用现状图为基础，模拟预测 2050 年不同情景下的土地利用格局。

已有研究表明，在短时间内土地利用类型发生变化的主要驱动力是国家政策、经济发展和人口增长等社会因素^[35]。结合研究区 2015 年统计年鉴数据，利用经济发展和人口增长关键因素构建情景，具体指标如表 3 所示。基于 3 种情景下各区县关键因素指标值，利用插值方法实现指标空间化分配，生成特定情景下土地利用类型转换的潜力分布，预测 2050 年土地利用。在计划情景中，反映土地利用变化依据自身发展过程进行演化，即按当前的经济发展趋势自然演变的未来土地利用变化；在保护情景中，参考《陕西省土地利用总体规划（2006-2020）》中协调土地利用与生态建设、因地制宜地改善土地生态环境的任务规定，反映限制城市扩张速度，减缓经济发展，保护生态环境的土地利用变化情况；在开发情景中，参考《陕西省国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》中打造关中城市群、推进大西安建设的城镇化发展政策，反映的是经济加速发展，城市化进程加快时各土地利用类型的变化情况。

3.2.2 水源涵养服务预测模型

贝叶斯网络具有强大的不确定性问题处理能力，能用条件概率率表达各个信息要素之间的相关关系，在有限的、不完整的、不确定的信息条件下进行学习和推理。因此，将 CA-Marcov 模型与贝叶斯网络模型相结合，利用 2010 年的水源涵养服务网络和 2050 年不同情景下的土地利用类型构建了 2050 年的水源涵养服务预测模型（图 3）：以 2010 年水源涵养服务网络为第一模型，借助 Netica 和 ArcGIS 处理各节点对应的栅格数据，获得 2010 年水源涵养服务网络各节点的条件概率表和概率分布，以 2050 年

表 3 研究区社会经济统计值及情景设计

Tab. 3 Social and economic statistics and scenario design in the study area

地区	生产总值增长率(%)				常住人口增长率(%)			
	2015 年	计划	保护	开发	2015 年	计划	保护	开发
西安	11.53	12	10	15	4.64	6	4.5	8
渭南	7.71	7.5	6	9	3.46	4	3.5	6
宝鸡	6.27	6.5	5.5	8	3.55	4	3.5	6
铜川	0.65	0.6	0.5	1	3.79	4	3.8	4.5
咸阳	12.08	13	11	15	3.98	5	4.0	6
杨凌示范区	13.57	14	10	15	4.93	6	5.0	6.5
天水	8.9	9	8	10	0.35	0.4	0.3	0.6

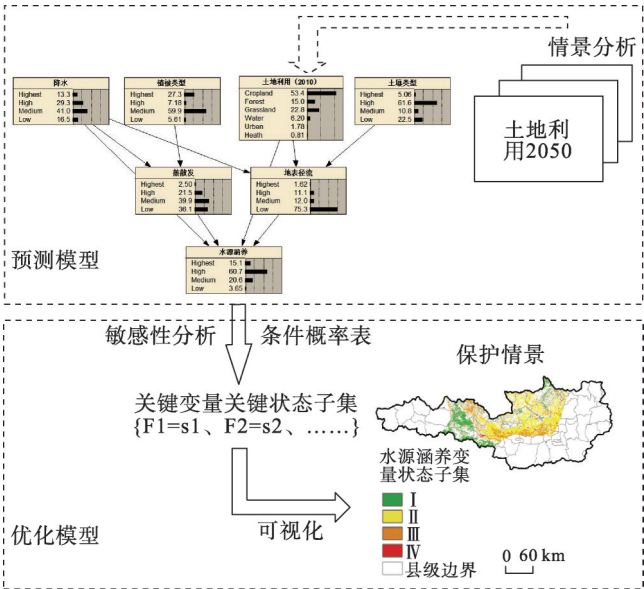


图 3 水源涵养服务的预测和优化原理
Fig. 3 Prediction and optimization principle of water conservation service function

情景分析下的水源涵养服务网络为第二模型, 引入土地利用的不确定性, 与2010年各节点分布相关联的不确定度集成到条件概率表中, 由公式(1)得到2050年不同情景下水源涵养的概率分布。

3.3 水源涵养服务的空间格局优化

当完成2050年水源涵养服务贝叶斯网络模型的构建后, 利用条件概率表和敏感性分析确定关键变量关键状态子集, 将子集空间可视化, 即可绘制水源涵养节点的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(图3)。关键变量关键状态子集的确定主要包括如下两个过程:

(1) 确定各变量的关键状态。根据贝叶斯网络模型, 导出影响因子状态的概率及两两影响因子状态组合的联合概率, 据此计算两两影响因子的条件概率, 选取水源涵养节点不同等级所对应的影响因子的条件概率最大的状态作为变量的关键状态, 当水源涵养服务等级各处于最高、高、中、低4种状态时, 将其对应的变量状态集合分别称为“变量关键状态子集Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ”。等级越高, 在对应的子集发生区域的水源涵养能力高的概率越大。

(2) 确定关键变量。为了评价贝叶斯网络节点的相对重要性, Netica提供了敏感性分析^[36], 它评估了水源涵养服务节点是否会敏感地感知其他影响因子节点的变化。敏感性分析可以通过方差缩减(Variance Reduction)计算。方差缩减表示变量 ES 的方差和已知变量 I 条件下的变量 ES 方差之差, 计算公式如下:

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

式中: s 表示输出变量的状态。为了方便对比, 将方差缩减值单位化为范围在0~1之间的相对方差缩减。 VR 值越大, 水源涵养节点对输入节点的敏感性越强。对3种情景下的水源涵养服务关键变量关键状态子集分别确定后, 选取子集Ⅰ面积与研究区总面积比值最大的情景作为水源涵养服务最优的情景, 将该情景下的关键变量关键状态子集Ⅰ认定为最优状态子集, 根据最优状态子集并结合最新的土地利用规划政策划分优化区。

4 结果与分析

4.1 水源涵养服务的贝叶斯网络模型及校验

2010年水源涵养服务的贝叶斯网络如图4所示, 水源涵养服务状态最高、高、中、低的概率分别是0.151、0.607、0.206、0.037。通过水量平衡公式计算2015年的水源涵养量, 在研究区随机采集200个点数据, 将所有点数据所在位置的2015年的降水、植被类型、土地利用和土壤类型数据输入网络, 计算出模拟预测的水源涵养服务等级, 利用误差矩阵评估水源涵养服务贝叶斯网络模型的精度^[37], 计算出预测的水源涵养服务等级与实际计算的水源涵养服务等级误差矩阵如表4所示, 总体精度为75.5%, 表明该模型预测结果有良好的识别度, 对未来水源涵养服务的等级预测结果具有较强的可靠性。

4.2 不同情景下水源涵养服务预测结果

对比分析2010年土地利用预测图和真实的土地利用分布图, kappa系数达到0.884, 说明土地利用模拟的精确度和可信度较高, 可用于未来土地利用变化预测。利用IDIRSI软件模拟3种土地利用情景, 预测得到的研究区土地利用变化和分布类型分别如表5和图5所示, 保护情景下耕地面积降低比率为13.22%; 林地面积上升比率为18.12%; 草地面积降低比率为0.73%; 水体面积下降比率为5.08%; 建筑用地面积上升比率为0.38%; 而

未利用地下降了0.92%。而计划情景中,耕地、水体面积都有所降低,林地面积有所增长。开发情景中,耕地降低比率为11.52%,城镇用地上升了5.04%。对比3种情景,整体趋势都是耕地减少,城镇用地和林地增加,这符合退耕还林和研究区经济发展的大背景。耕地减少最多的是保护情景,而城镇用地增加最多的是开发情景。计划情景下,耕地,水域,草地减少,城镇用地增加,虽然林地面积有所增加,但是增加幅度介于保护情景和开发情景之间,且城市扩张程度高于保护情景,因此整体的生态环境质量在3种情景里居中,开发情景下的生态环境质量最差,保护情景下的生态环境质量最高。

将3种情景(计划情景、保护情景和开发情景)下的土地利用类型分别作为水源涵养服务贝叶斯网络的输入数据,得到2050年各情景下的水源涵养服务贝叶斯网络。保护情景下水源涵养服务状态最高、高、中、低的概率分别是0.184、0.574、0.206、0.036;计划情景下分别是0.171、0.580、0.205、0.045;开发情景下则分别是0.171、0.565、0.204、0.060。3种情景下的水源涵养状态分布概率具有相似性,即研究区的水源涵养量值分布在917~1103 t/ha·a范围内的概率最大,低于163 t/ha·a的可能性最小。同时也具有差异性,即保护情景下水源涵养量值偏高的概率最大,其次是计划情景和开发情景,表明保护情景下的土地利用方式更有利于增强水源涵养服务。

4.3 水源涵养服务空间格局优化

对2010年水源涵养服务的贝叶斯网络进行敏感性分析,结果如表6所示。降水的方差缩减值是0.53235,在所有节点中最高,表明降水对最终水源涵养量的变化影响最大,其次是蒸散发和土地利用。其余变量的方差缩减值都小于0.1,表明水源涵养服务对其变化的感知能力较弱。因此,选取降水、蒸散发和土地利用作为不同情景下确定水源涵养服务等级的关键变量,即对水源涵养服务产生影响最大的变量。从Netica软件导出2050年不同情景下的贝叶斯网络的各节点与水源涵养节点的状态之间的条件概率表,它表示

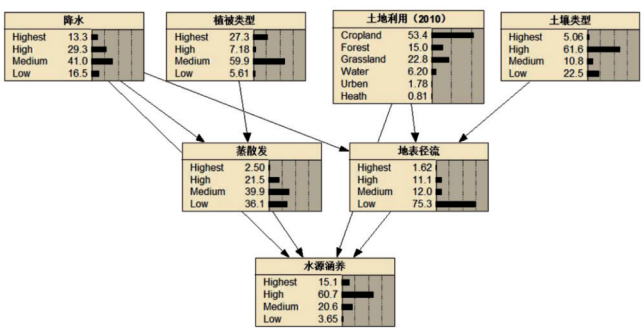


图4 2010年水源涵养服务贝叶斯网络
Fig. 4 Bayesian network of water conservation in 2010

表4 水源涵养服务等级预测误差矩阵
Tab. 4 Error matrix of water conservation service suitability prediction

实际水源涵养等级	预测水源涵养等级				行总和
	最高	高	中	低	
最高	92	9	0	0	101
高	38	59	0	0	97
中	1	1	0	0	2
低	0	0	0	0	0
列总和	131	69	0	0	200
总体精度(%)	75.5				

表5 研究区土地利用变化(%)			
Tab. 5 land use change in the study area			
土地利用类型	保护情景	计划情景	开发情景
耕地	-13.22	-8.42	-11.52
林地	18.12	13.07	13.27
草地	0.73	-1.00	-0.94
水体	-5.08	-5.05	-5.00
城市	0.38	2.25	5.04
未利用地	-0.92	-0.85	-0.85

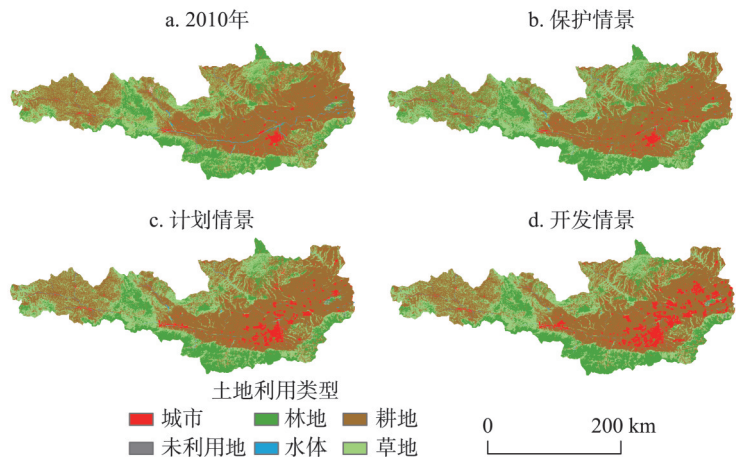


图5 研究区土地利用类型图
Fig. 5 Land use map of the study area

当某一地理位置的水源涵养服务处于不同状态时，对应位置的各种变量状态的组合情况及对应的条件概率。经统计得到3种情景下的关键变量关键状态子集选取是相同的，关键变量关键状态子集Ⅰ={降水=1，蒸散发=2，土地利用=2}，关键变量关键状态子集Ⅱ={降水=3，蒸散发=4，土地利用=1}，关键变量关键状态子集Ⅲ={降水=4，蒸散发=3，土地利用=1}，关键变量关键状态子集Ⅳ={降水=3，蒸散发=1，土地利用=5}。

对各子集所包含的要素图层取交集，表示子集中各变量状态同时满足的分布情况，将上述变量关键状态子集进行空间化展示（图6）。其中子集Ⅰ是水源涵养能力为最高等级的概率最高的变量集合，该集合对应的区域年平均降雨量大，年蒸散发量较大，植被覆盖率高，主要分布在天水市麦积区南部、宝鸡市渭滨区南部和陇县西南部，麟游县，凤翔县，千阳县少许离散分布、咸阳市旬邑县东北部，永寿县西北部，淳化县、礼泉县和泾阳县的交界处、铜川市耀州区西部。子集Ⅱ是水源涵养能力为中等的概率较高的变量集合，对应的区域年平均降雨量较小，年平均蒸散发量很小，主要土地利用类型是耕地，主要分布在关中平原西北部地区和北山山系，具体包括宝鸡市凤翔县中部、咸阳市淳化县、彬县、乾县、三原县北部、泾阳县和礼泉县中部、铜川市耀州区东南部。子集Ⅲ是水源涵养能力为中等的概率最高的变量集合，该集合对应的区域年平均降雨量较小，年平均蒸散发量较小，植被覆盖率高，主要分布在陇县东北部、凤翔县南部、岐山县和扶风县中部、乾县和礼泉县南部。子集Ⅳ是水源涵养能力为较低的概率最高的变量集合，该集合对应的区域年平均降雨量较低，年平均蒸散发量很大，土地利用类型主要是城市，主要分布在宝鸡市金台区，以及凤翔县、乾县、礼泉县、三原县和铜川市耀州区、王益区等区县的主城区。

在保护情景中，子集Ⅰ的占地面积比例最高，为5.55%；在计划情景中，其值为

表6 水源涵养服务对各节点的敏感性		
Tab. 6 Sensitivity of water conservation services to each node		
节点名称	方差缩减	相对百分比
水源涵养	1.49285	100
降水	0.53235	35.7
蒸散发	0.11014	7.38
土地利用(2010)	0.10628	7.12
地表径流	0.05903	3.95
植被	0.02189	1.47
土壤类型	0.00015	0.00975

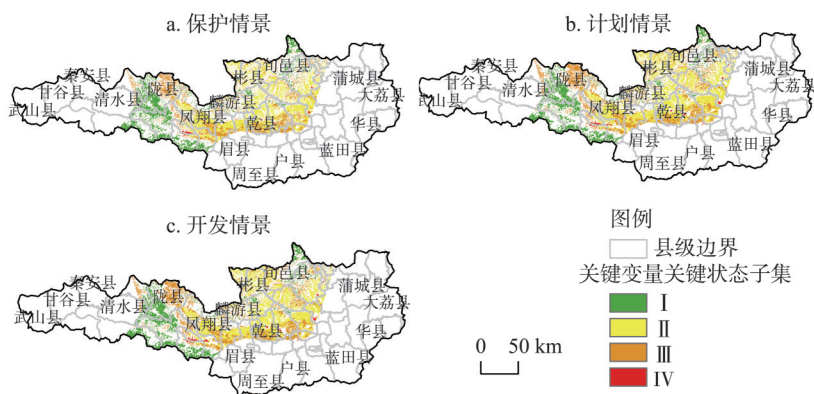


图6 3种情景下水源涵养服务关键变量关键状态子集分布
Fig. 6 Key state subset distribution of key variables in water conservation services under different scenarios

5.27%；而在开发情景中，该子集的比率为5.34%。因此，对渭河流域关天段进行水源涵养生态环境建设，应当参考保护情景，结合《陕西省土地利用总体规划（2006-2020年）》制定的土地利用方向，即综合整治宝鸡市北部千山、陇山山地丘陵区，有效控制水土流失，抚育保护森林资源，农林、林牧相结合；对咸阳北部的丘陵山区、中部台塬沟壑区及泾、渭河干流加强生态环境建设，保护天然林资源，建设防护林，推广淤地坝河流域治理工程，恢复生态，促进人与自然和谐发展；对铜川耀州区继续推进耀州全国山区综合开发示范、全国“坡改梯”示范县（区）工作，加快土地生态建设步伐。因此，研究区水源涵养服务格局的优化应将天水市麦积区南部、宝鸡市陇县西南部和渭滨区南部、咸阳市旬邑县东北部和永寿县西北部，以及铜川市耀州区西部划定为重点优化区域，加强绿化工程的建设（图7）。

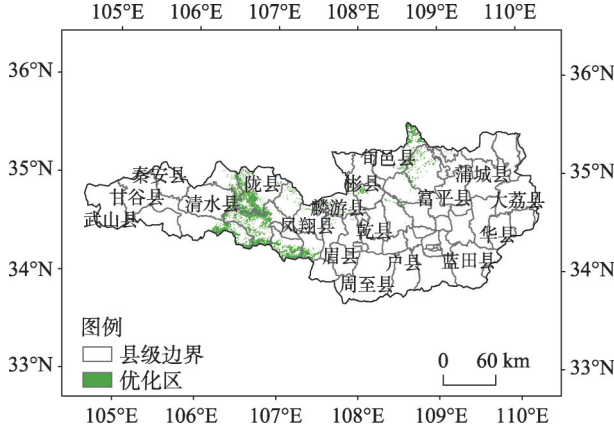


图7 水源涵养服务优化区
Fig. 7 The optimized region of water conservation service

5 讨论

5.1 情景设计

土地利用变化对水源涵养服务具有重要影响^[17]，本文利用CA-Marcov模型模拟土地利用变化，以2005年为基准年，预测2010年的土地利用并与真实的2010年土地利用做kappa精度检验，kappa系数达到0.884，表明土地利用模拟的精确度和可信度较高，对于土地利用变化预测有较好的模拟效果。情景分析是探索现有的土地利用方式和政策选择所存在的风险的有效工具^[16, 38]，本文同时考虑了自然因子和人文因子对土地利用变化的影响。选取坡度、离道路距离、离城市中心距离、离水域距离作为土地利用类型转化的驱动力因子，将经济发展和人口增长指标作为限制性因子，预测未来的3种土地利用情

景。利用CA-Marcov模型结合社会经济指标设置土地利用情景,而不是简单地在网络中设置节点状态作为情景,跟以往的贝叶斯网络研究相比^[39],提高了情景设置的可靠性。然而,部分影响土地利用变化的驱动因子具有不确定性、未来新的政策制定难以把握等问题将导致土地利用类型反复变化,如何克服这类不确定性是土地利用变化预测未来需要解决的难题。本文将土地利用预测模型与贝叶斯网络耦合,土地利用预测的不确定性通过条件概率表传递到水源涵养服务节点。与使用其他非统计模型相比,考虑了每种情景下土地利用分布的不确定性对水源涵养服务分布概率的影响,提高了对未来水源涵养服务分布预测的准确性。

5.2 贝叶斯网络的不确定性分析和模型改进

总体上,贝叶斯网络的不确定性包括结构不确定、输入数据不确定、参数不确定^[40]。本文根据水量平衡原理和文献资料,将水源涵养服务与贝叶斯网络相结合,清晰透明地展示了水源涵养服务的过程关系。虽然结合土地利用预测模型考虑了经济发展和人口增长等人类活动的影响,但还有其他因子如气温、坡度、保护区政策等对水源涵养服务也有一定的影响,接下来的研究应当考虑将更多的影响因子纳入网络,降低由于对水源涵养服务过程理解不全面带来的结构不确定性,以使研究结果更加贴合实际。本文的输入数据来源于实测或计算得到的栅格数据,没有缺失数据,不确定性极低。模型参数的不确定性是由贝叶斯网络节点的状态划分产生的,本文使用ArcGIS的自然分类法为网络中的连续变量分级,利用文献资料和专家知识为离散变量分级^[41]。未来还可以采用更精确的方式为节点变量分类,如动态离散化分类^[39]。本文中,水源涵养服务贝叶斯网络模型的总体精度为0.755,表明该模型具有可靠性,可以用于未来水源涵养服务的分布预测。然而,本研究虽然对模型进行了验证,却没有进一步对模型进行校正,在接下去的研究中应该结合以上不确定性分析对模型进行验证和校正,完成模型的改进。

本研究提供了一种开放式的水源涵养服务贝叶斯网络框架,结构灵活,未来还可以构建水源涵养服务与其他生态系统服务之间的关系网络,将生态系统服务功能、人类活动、自然因子和政策包含其中,探究不同情景下各种生态系统服务间的权衡协同关系,分析各驱动因子对生态系统服务间权衡协同关系的影响。

6 结论

以渭河流域关天段为研究区,将情景分析和贝叶斯网络模型相结合,对2050年研究区的土地利用类型进行情景模拟,利用网络模型耦合分别构建3种情景下的水源涵养服务的贝叶斯网络模型并预测其水源涵养量。将贝叶斯网络模型与水源涵养服务相结合,提出了关键变量关键状态子集方法,对水源涵养影响因子之间的关系以及影响因子与水源涵养服务的关系进行了研究,从而完成水源涵养服务的空间格局优化。主要结论为:

(1) CA-marcov模型对研究区的土地利用预测具有较好的模拟效果,在该模型结合社会经济指标设置的3种土地利用情景中,保护情景的林地面积增长最多,其主要来源为耕地,城市面积扩张程度远低于其他情景,该情景下的水源涵养量偏高的概率在3种情景中最大,即水源涵养能力最强。

(2) 对水源涵养服务影响程度由高到低的关键因子依次是降水、蒸散发和土地利用,水源涵养量最高状态对应的关键变量关键状态子集对应的区域年平均降雨量大,年蒸散发量较大,植被覆盖率高,主要分布在天水市麦积区南部、宝鸡市渭滨区南部和陇县西南部、咸阳市旬邑县东北部和永寿县西北部、铜川市耀州区西部,淳化县、礼泉县和泾阳县的交界处以及麟游县、凤翔县、千阳县零星分布。

(3) 研究区适宜优化水源涵养的区域主要分布在天水市麦积区南部、宝鸡市陇县西南部和渭滨区南部、咸阳市旬邑县东北部和永寿县西北部, 以及铜川市耀州区西部。

参考文献(References)

- [1] Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919. [谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [2] Chen Dongli, Yu Xinxiao, Liao Banghong. Analysis on the function of conservation water of the chinese forest ecosystem. *World Forestry Research*, 2005, 18(1): 49-54. [陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.]
- [3] Tang J, Fang J-P, Li P, et al. The function and value of water conservation of forest ecosystem in Gongbo Nature Reserve of Tibet. *Asian Agricultural Research*, 2012, 4(1): 68-70.
- [4] Brauman K A, Daily G C, Duarte T K E, et al. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Social Science Electronic Publishing*, 2007, 32: 67-98.
- [5] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2403-2409.
- [6] Xiao Tong, Wang Junbang, Chen Zhuoqi. Vulnerability of grassland ecosystems in the Sanjiangyuan Region based on NPP. *Resources Science*, 2010, 32(2): 323-330. [肖桐, 王军邦, 陈卓奇. 三江源地区基于净初级生产力的草地生态系统脆弱性特征. *资源科学*, 2010, 32(2): 323-330.]
- [7] Zhao Shuo, Hu Haibo, Ma Bing. The assessment on water conservation function of the key non-commercial forest in Jiangsu Province. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2014, 41(4): 15-20. [赵硕, 胡海波, 马冰. 江苏省重点生态公益林涵养水源功能评估研究. *江苏林业科技*, 2014, 41(4): 15-20.]
- [8] Wu Dan, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Spatiotemporal dynamics of water regulation service of grassland ecosystem in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 256-260. [吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 256-260.]
- [9] Li Shimei, Xie Gaodi. Spatial and Temoral heterogeneity of water conservation service for meadow ecosystem. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(2): 88-93. [李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性. *中国草地学报*, 2015, 37(2): 88-93.]
- [10] Li Jing, Ren Zhiyuan. Spatiotemporal 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.]
- [11] 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.]
- [12] Fu Bojie, Zhang Liwei. Land- use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446.
- [13] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534. [张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.]
- [14] Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Liu Yong. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 157-161. [赵传燕, 冯兆东, 刘勇. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展. *山地学报*, 2003, 21(2): 157-161.]
- [15] Wen Zhi, Zhao He, Liu Lei, et al. Effects of land use changes on soil water consevation in Hainan Island, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 1-12. [文志, 赵赫, 刘磊, 等. 海南土地利用变化对土壤水源涵养功能的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 1-12.]
- [16] Guo Yanfeng. Land use change and its impacts on water conservation services in Jiangxi Province based on CLUE model [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2011. [郭延凤. 基于CLUE模型的江西省土地利用变化及其对水源涵养服务的影响[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2011.]
- [17] Fan Yaning, Liu Kang, Chen Shanshan, et al. Spatial pattern analysis on water conservative fuctionality of land ecosystem in northern slope of Qinling Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 50-56. [范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 等. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 50-56.]

- [18] Chen Shanshan, Liu Kang, Bao Yubin, et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1546-1554. [陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. *地理科学*, 2016, 36(10): 1546-1554.]
- [19] Tang Yuzhi, Shao Quanqin. Water conservation capacity of forest ecosystem and its spatial variation in the upper reaches of Wujiang River. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(7): 987-999. [唐玉芝, 邵全琴. 乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究. *地球信息科学学报*, 2016, 18(7): 987-999.]
- [20] Pamukcu P, Erdem N, Serengil Y, et al. Ecohydrologic modelling of water resources and land use for watershed conservation. *Ecological Informatics*, 2016, 36(Suppl.): 31-41.
- [21] Wang Shuming, Zhang Zhihua. The systematic coupling of landscape pattern, ecological process and ecosystem services: A review of Fu Bojie's ideas of landscape ecology. *Journal of Poyang Lake*, 2017(2): 78-83, 127. [王书明, 张志华. 景观格局—生态过程—生态系统服务的系统耦合: 傅伯杰景观生态学思想述评. *鄱阳湖学刊*, 2017(2): 78-83, 127.]
- [22] 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.
- [23] Pérez- Miñana E. Improving ecosystem services modelling: Insights from a Bayesian network tools review. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 85: 184-201.
- [24] Landuyt D, Broekx S, D'hondt R, et al. A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46: 1-11.
- [25] Gonzalez-Redin J, Luque S, Poggio L, et al. Spatial Bayesian belief networks as a planning decision tool for mapping ecosystem services trade-offs on forested landscapes. *Environmental research*, 2016, 144: 15-26.
- [26] Dal Ferro N, Quinn C, Morari F. A Bayesian belief network framework to predict SOC dynamics of alternative management scenarios. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179: 114-124.
- [27] Dang K B, Windhorst W, Burkhard B, et al. A Bayesian Belief Network: Based approach to link ecosystem functions with rice provisioning ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2018.
- [28] Shang Hua. Study on the water resources and ecological environment in Weihe River. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(5): 89-92. [尚华. 陕西渭河流域水资源与生态问题研究. *水土保持研究*, 2007, 14(5): 89-92.]
- [29] Zhan Chesheng, Qiao Chen, Xu Zongxue, et al. Ecological landscape patterns in Guanzhong part of the Weihe River Basin based on remote sensing. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2349-2355. [占车生, 乔晨, 徐宗学, 等. 基于遥感的渭河关中地区生态景观格局变化研究. *资源科学*, 2011, 33(12): 2349-2355.]
- [30] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference. Morgan Kaufmann Publishers, 1988, 70(2): 1022-1027.
- [31] Xiao Han, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 481-484. [肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探: 以海南岛尖峰岭热带森林为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 481-484.]
- [32] Cheng Chunxiao, Xu Zongxue, Zhang Shurong, et al. Temporal- spatial variation in evapotranspiration in the Heihe River basin and their correlation with different meteorological/hydrological factors. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, 50(5): 535-542. [程春晓, 徐宗学, 张淑荣, 等. 黑河流域上中游植被蒸散发时空演变趋势及其影响因子分析. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(5): 535-542.]
- [33] Chen Xiaoyan, Zhang Na, Wu Fangfang. Impacts of rainfall and land use on urban surface runoff: A case study of area surrounding the North Moat in Beijing, China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1391-1402. [陈晓燕, 张娜, 吴芳芳. 降雨和土地利用对地表径流的影响: 以北京北护城河周边区域为例. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1391-1402.]
- [34] Chen Ying, Wang Guojie. Progress of the research in LUCC forecasting models. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(4): 484-487. [陈莹, 王国杰. 土地覆盖变化预测模型研究进展. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(4): 484-487.]
- [35] Gan Hong, Liu Yansui, Wang Dawei. Simulation and analysis of the human driving factors of land use type conversion. *Resources Science*, 2004, 26(2): 88-93. [甘红, 刘彦随, 王大伟. 土地利用类型转换的人文驱动因子模拟分析. *资源科学*, 2004, 26(2): 88-93.]
- [36] Landuyt D, Broekx S, Engelen G, et al. The importance of uncertainties in scenario analyses: A study on future ecosystem service delivery in Flanders. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 504-18.
- [37] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(1): 35-46.

- [38] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [39] Xue J, Gui D, Lei J, et al. 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.
- [40] Chen S H, Pollino C A. Good practice in Bayesian network modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37 (17): 134-145.
- [41] Li Ting, Li Jing, Wang Yanze, et al. The spatial flow and pattern optimization of carbon sequestration ecosystem service in Guanzhong-Tianshui Economical Region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3953-3969. [李婷, 李晶, 王彦泽, 等. 关中—天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3953-3969.]

Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks

ZENG Li¹, LI Jing¹, LI Ting¹, YANG Xiaonan², WANG Yanze¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: This study, taking the Weihe River Basin in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China as a case, establishes a water conservation ecosystem service network model. Based on Bayesian belief networks, the model forecasts the distribution probability of water conservation ecosystem services projected under different land-use scenarios for the year 2050 with a CA-Marcov model. A key variable subset method is proposed to optimize the spatial pattern of the water conservation ecosystem service. There were three key study findings. First, under the protection scenario, the area of woodland increased by 18.12%, mainly from the conversion of cultivated land. The grassland and cities increased by 0.73% and 0.38%, respectively. The water and unused land were reduced by 5.08% and 0.92%, respectively. The probability of high water conservation value under this scenario is the largest in the three scenarios, and the design of protection scenario is conducive to the formulation of future land use policies. Second, the key factors influencing water conservation ecosystem service include precipitation, evapotranspiration and land use. The state set corresponding to the highest state of water conservation ecosystem service is {precipitation = Highest, evapotranspiration = High, land use = High}, mainly distributed in areas with high annual average rainfall and evapotranspiration and high vegetation coverage. Third, the regions suitable for optimizing water conservation ecosystem service are mainly distributed in the southern part of Maiji District in Tianshui, southwest of Longxian and south of Weibin District in Baoji, northeast of Xunyi County and northwest of Yongshou County in Xianyang, and west of Yaozhou District in Tongchuan. Identifying the optimization regions of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks, not only helps to develop a better understanding of the water conservation ecosystem services processes, but also increases the rationality of the scenario design and pattern optimization. On this basis, the key variable subset method is crucial to sound eco-environment construction and policy formulation in the study area.

Keywords: water conservation; ecosystem services; Bayesian belief networks; scenario analysis; spatial pattern optimization