DOI: 10.5846/stxb202011192979

王正伟,王宏卫,杨胜天,刘勤,高一薄,衡嘉尧,张惠婷.基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例.生态学报,2022,42(1):91-104.

Wang Z W, Wang H W, Yang S T, Liu Q, Gao Y B, Heng J Y, Zhang H T.Identification and optimization strategy of ecological security pattern of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: Taking Baicheng County as an example.Acta Ecologica Sinica,2022,42(1):91-104.

基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略
——以拜城县为例

王正伟[1,2],王宏卫[1,2,*],杨胜天[1,3],刘 勤[4],高一薄[1,2],衡嘉尧[1,2],张惠婷[1,2]

1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046

3 北京师范大学水科学研究院,北京 100875

4 新疆大学旅游学院,乌鲁木齐 830046

摘要:识别生态保护关键区域,优化新疆县域生态空间结构,对促进绿洲区域经济与生态环境和谐发展,提升人类福祉具有重要意义。以拜城县为研究区,通过生态系统服务价值综合评定结果确定生态保护的核心“源”区,利用最小阻力模型,结合 GIS 空间分析技术及 CA-Markov 模型,识别拜城县生态安全格局,分析其发展变化趋势,探究生态空间布局调整策略,完善县域生态空间网络体系,结果表明:(1)研究期内,拜城县生态系统服务价值总量逐年上升,其中水源涵养、废物处理价值量增长最高,不同服务类型增长率差异较小。(2)分析 2009、2016、2019 拜城县生态安全格局特征发现,县域生态安全布局整体存在“源”地分布不均、廊道结构破碎且网络化程度低、生态脆弱区面积较大的现状特征。(3)基于 2009、2016、2019 年生态保护格局,同时依据生态“源”地及生态保护重要性用地的变化趋势,模拟 2029 年生态“源”地及其重要性等级区域分布,结合县域自然地理特征及总体发展规划,提出构筑“两带、三功能、四区、多中心、十廊道”的拜城县生态空间布局体系,为绿洲地区生态安全及区域生态文明建设提供参考。

关键词:生态系统服务;生态廊道;生态安全格局优化;拜城县

Identification and optimization strategy of ecological security pattern of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: Taking Baicheng County as an example

WANG Zhengwei[1,2], WANG Hongwei[1,2,*], YANG Shengtian[1,3], LIU Qin[4], GAO Yibo[1,2], HENG Jiayao[1,2], ZHANG Huiting[1,2]

1 *College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*

2 *Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*

3 *College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

4 *College of Tourism, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*

Abstract: It is important to identify the key areas of ecological protection and optimize the ecological spatial structure in Xinjiang, it means a lot to promote the harmonious development of oasis economy and ecological environment, and to

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(41861037);自治区人民政府地方公派出国留学成组配套项目(L06)

收稿日期:2020-11-19; **网络出版日期**:2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wanghw_777@163.com

enhance human welfare. Taking Baicheng County as the study area, on the basis of fully considering the level of ecosystem service function, the core ecological "source" areas of environmental protection were determined through the comprehensive evaluation of ecosystem service value. We also used the least resistance model, combined with the GIS spatial analysis technology and CA-Markov model, to identify the ecological security pattern, analyze its trend of development and improve the ecologically spatial network system of Baicheng County. The results showed as follows: (1) During the study period, the total value of ecosystem services in Baicheng County has increased gradually, among which the value of water conservation and waste treatment increased the most, while the growth rate of each ecosystem service type had a little difference. (2) According to the ecological security pattern of Baicheng County in 2009, 2016 and 2019, the overall environmental security layout was characterized by the uneven distribution of source areas, broken corridor structure, low network degree, and large area of ecologically fragile regions. (3) According to the ecological protection pattern in 2009, 2016 and 2019, based on the changing trend of ecological "source" sites and ecological protection importance sites, we simulate the distribution of ecological "source" sites and their importance levels in 2029. Based on the county's natural and geographical characteristics as well as the overall development plan, we also put forward the ecologically spatial layout system of Baicheng County. That is "two belts, three functions, four districts, multiple centers and ten corridors", which provides a reference for the ecological security and regional ecological civilization construction in the oasis area.

Key Words: ecosystem service; ecological corridor; optimization of ecological security pattern; Baicheng County

半个世纪以来,随着社会经济的快速发展以及城市化进程的不断推进,生态安全问题已经日益突出,并成为世界各国关注的焦点[1],党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业"五位一体"总体布局,并将国土空间格局优化提升到了战略高度,生态安全格局作为实现区域生态安全的基本途径和重要保障,被确定为国土空间开发和保护的三大战略格局之一[2]。广义的生态安全强调生态系统能够保障人类生活健康不受损害,经济发展和社会安定不受威胁[3],狭义的生态安全指生态系统发挥生态系统服务功能和维持生物多样性所需要的自身结构完整性与健康程度。生态安全格局是由区域生态"源"地及沟通生态系统服务流动的生态廊道共同构成[4],对国土空间格局优化,维护景观格局整体性与区域生态安全具有重要意义[5—6]。

国外关于生态安全格局的相关研究始于 20 世纪 80 年代初,早期主要集中在景观安全格局和土地利用优化两个方面。随着对生态安全重要性认识的不断深入,相关研究逐渐向以自然生态系统为主,并与社会经济相互耦合的方向发展,侧重对区域性生态问题背景下的区域生态系统功能及过程、生物多样性及生态系统的评估及其协调关系的研究[7],并加强对自然及社会经济系统耦合协调关系的分析,注重生态保护与修复[8—10]。国内研究始于 20 世纪 90 年代,学者经过近 20 年来的持续探索,对于生态安全格局的研究已从早期相关概念的辩析、理论探讨发展到区域生态风险及生态系统评价[11—12],注重生态安全格局的相关研究[13—15],并逐步形成由"源"地、廊道、节点、网络等要素组成的生态安全空间优化模式[16—17]。杜悦悦等从生物资源保护、水资源安全以及营养物质保持等方面评估生态重要性,识别生态"源"地和景观廊道,同时构建了山区生态安全格局[18];杨天荣等通过生态服务重要性及生态环境敏感性识别生态"源"地,对关中城市群生态空间布局优化展开研究[19];方莹等利用生境质量模型、生境风险评估模型等方法诊断生态"夹点"及生态障碍点,确定烟台市国土空间生态保护和修复的关键区域[20];对于新疆生态安全的相关研究,有学者通过构建基于突变级数法的生态安全评价指标体系,对土地生态安全进行探索性分析[21],并利用最小阻力模型,从点、线、面综合视角对渭干-库车河绿洲进行景观格局优化[22],划分生态用地重要性保护分区,进而设置生态用地规划情景[23]。综合来看,新疆地区生态问题的相关研究,内容多集中于景观类型优化,生态保护区划分及生态用地规划方面,从全局角度构筑生态保护格局,优化生态空间保护网络体系的研究较少。

作为我国典型的干旱气候区,新疆脆弱的生态环境和稀疏的植被覆盖类型在很大程度上限制着区域生态系统功能的有效发挥,进而导致生态问题频发,严重威胁着当地居民生存环境。因此本研究基于生态系统服

务价值综合评定结果,识别 2009、2016、2019 年拜城县生态安全格局,并依据研究期内生态“源”地及生态保护重要性用地的发展变化趋势,结合生态环境特征及县域总体发展规划,提出拜城县生态安全布局调控的优化发展思路,以期优化县域生态空间布局,筑牢区域生态安全屏障、保障绿洲地区生态安全,并为绿洲地区生态文明建设提供一定的参考。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

拜城县地处新疆塔里木盆地北缘的山间盆地,位于 80 °37′39″E—83 °02′25″E,41 °24′08″N—42 °38′52″N 之间,地势西北高东南低,自然坡降较大,地形复杂,年均气温 7.6℃,年均降水量 171.13mm,属温带大陆性干旱气候。拜城县县域总面积为 1.91 万 km^2,下辖 4 镇 10 乡 1 个国有农牧场、1 个管委会。县区水域面积约 $114km^2$,占全域总面积的 0.72%,境内河流分布广,主要河流有克孜尔河、木扎提河、喀拉苏河等水系,主要耕作土地类型为绿洲灌淤土,属于典型的新疆内陆河流域绿洲。拜城县 2018 年末常住人口为 24.7 万人,年末地区生产总值(GDP) 68.95 亿元,近年来随着经济社会的快速发展,人类活动对生态环境影响逐渐凸显,偏远山区存在乱砍滥伐现象,同时生活垃圾随意丢弃、污水随意排放、县域缺乏较为完备的垃圾处理设施及处理厂,造成生态环境恶化、资源浪费、人与自然关系失调、人地矛盾突出、经济与环境的矛盾日益尖锐等一系列问题,生态安全问题仍不容乐观。

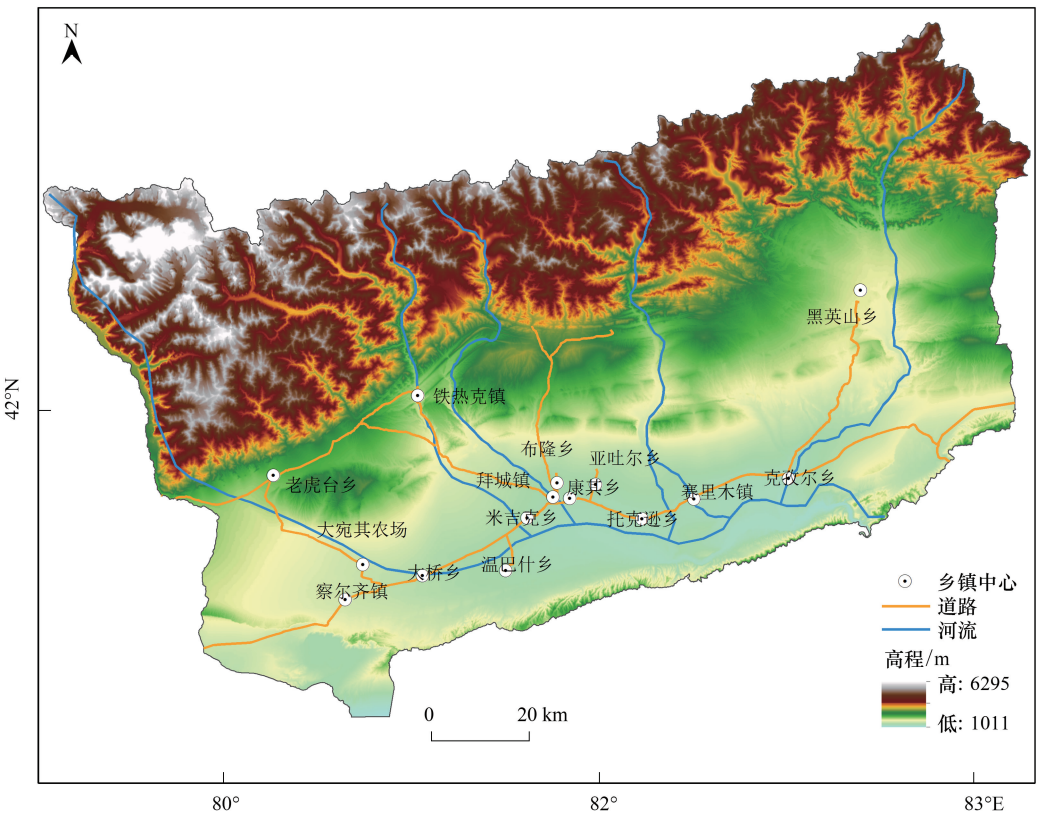

图 1　研究区概况

Fig.1　Location of the study area

1.2　数据来源

本文使用的数据有:社会经济数据来源于 2009—2019 年《新疆统计年鉴》、《拜城县统计年鉴》以及统计公报;2009、2016、2019 土地利用数据(比例尺 1:50000)、规划文本来源于拜城县国土部门;DEM 和坡度数据

(30m 分辨率)来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),土壤侵蚀数据、NDVI 等均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值评估

本文在借鉴谢高地等[24]研究成果的基础上,结合拜城县地处西北内陆,大陆性气候条件影响下干旱少雨,天然植被稀疏等实际情况,采用新疆地区生物量因子 k_s(k_s=0.58)对生态系统服务价值系数进行修正,同时参考前人相关研究[25],将人类活动因素考虑在内。因谢高地当量表的测算与支付意愿相关,而支付意愿主要取决于支付能力水平,因而将研究区居民人均可支配收入调整系数 k_j纳入到拜城县生态系统服务价值系数修正当中,制定出拜城县单位生态系统服务价值当量表,为全面反映区域生态系统服务的各项价值,兼顾生态和社会成份,本文选取了食物生产、原材料、气体调节、气候调节、废物处理、水源涵养、土壤形成与保护、生物多样性、娱乐文化等 9 项生态系统服务,运用 Constanza 等建立的生态系统服务价值(ESV)测算模型[26](式 1—3),计算拜城县生态系统服务价值。

$$\mathrm{ESV} = \sum_{k=1}^{n} (A_k \times VC_k) \tag{1}$$

$$VC_k = e_k \times k_s \times k_j \times \frac{1}{7} \times \frac{V_t}{S_t} \tag{2}$$

$$k_j = \frac{R_1}{R_0} \tag{3}$$

式中:ESV 为生态系统服务价值,A_k为第 k 类土地利用类型的面积(hm^2),VC_k为调整后生态系统服务价值系数(元 $hm^{-2}a^{-1}$),k_s为新疆生物量因子 0.58,k_j为研究区居民人均可支配收入调整系数,V_t为研究区第 t 年粮食作物总产值(万元),S_t为第 t 年研究区耕地面积(hm^2)。

敏感性指数(CS)可以反映一定时间内 ESV 对于生态系统服务价值系数的依赖程度,将各项系数分别上下调动 50%,计算出相应的弹性系数(CS)值,公式为:

$$CS = \left| \frac{(\mathrm{ESV}_j - \mathrm{ESV}_i)/\mathrm{ESV}_i}{(VC_{jk} - VC_{ik})/VC_{ik}} \right| \tag{4}$$

式中:ESV_j 和 ESV_i 分别表示调整前后生态系统服务价值的大小,VC_{jk} 和 VC_{ik} 分别表示调整前后生态系统服务价值系数的大小。

2.2 生态“源”地的识别

生态系统服务的量化,能够为判断区域生态系统服务功能强弱提供一定的依据[27],服务价值越大,表明生态系统为人类提供的惠益越多,对区域生态安全维护的重要性也越强[28],因此借助 Arcgis 空间分析中的“冷热点”分析工具(Getis-Ord G_i^*),对 2009—2019 年拜城县生态系统服务价值空间分布结果进行“冷热点”识别,提取 99%置信水平上的生态“源”地备选区[17],因生态“源”地需具备一定规模才能阻隔外界对其核心区的影响[29],根据拜城县用地实际情况,剔除备选区面积小于 3km^2的斑块将其视作生态“源”地。

2.3 最小累计阻力面的建立

最小累计阻力面表示生态用地从“源”向其他景观单元所耗费的累计距离[30—31],基于 Arcgis 中的 cost distance 工具来建立生态用地间能量流的空间运动阻力面,本研究考虑的阻力因子包括高程、坡度、地形起伏度、距水体距离、距道路距离、距居民点距离、NDVI、土壤侵蚀度、土地覆被类型。因各阻力因子等级范围不同,生态“源”地向外扩张过程中所需克服的阻力也有很大差异,因而参考前人关于不同要素阻力系数设定的相关研究[32],结合已有数据和研究区用地实际,将 9 个指标划数据划分为 5 个等级,分别设定阻力系数(表 1),建立阻力面。运用层次分析法确定权重,加权求和得到拜城县生态用地扩张的空间阻力面分布(图 2)。

表 1　生态用地阻力系数与阻力值

Table 1　Resistance factors and resistance coefficients of ecological land expansion

阻力因子 Resistance Factors	阻力系数 Resistance coefficient						权重 Weights
	1	10	20	40	70	100	
高程 Elevation /m	4035—6295	3390—4035	2746—3390	2109—2746	1586—2109	1011—1586	0.056
坡度 Slope/(°)	43.06—75.73	33.26—43.06	24.65—33.26	14.85—24.65	5.94—14.85	0—5.94	0.042
地形起伏度 Topographic relief /m	784—1681	566—784	411—566	248—411	98—248	0—98	0.041
距水体距离 Distance from water area/km	0—1	1—3	3—5	5—10	10—20	20<	0.242
距道路距离 Distance from the road/km	> 20	10—20	5—10	2—5	1—2	0—1	0.026
距居民点距离 Distance from Residential land/km	> 20	10—20	5—10	2—5	1—2	0—1	0.026
归一化植被指数 Normalized Vegetation index	0.67—0.92	0.52—0.67	0.38—0.52	0.23—0.38	0.10—0.23	0—0.10	0.175
土壤侵蚀度 Soil erosion	11	11—13	13—23	23—24	24—26	26—33	0.118
土地覆盖类型 Land cover type	森林	水域	湿地	草地	农田	荒漠	0.274

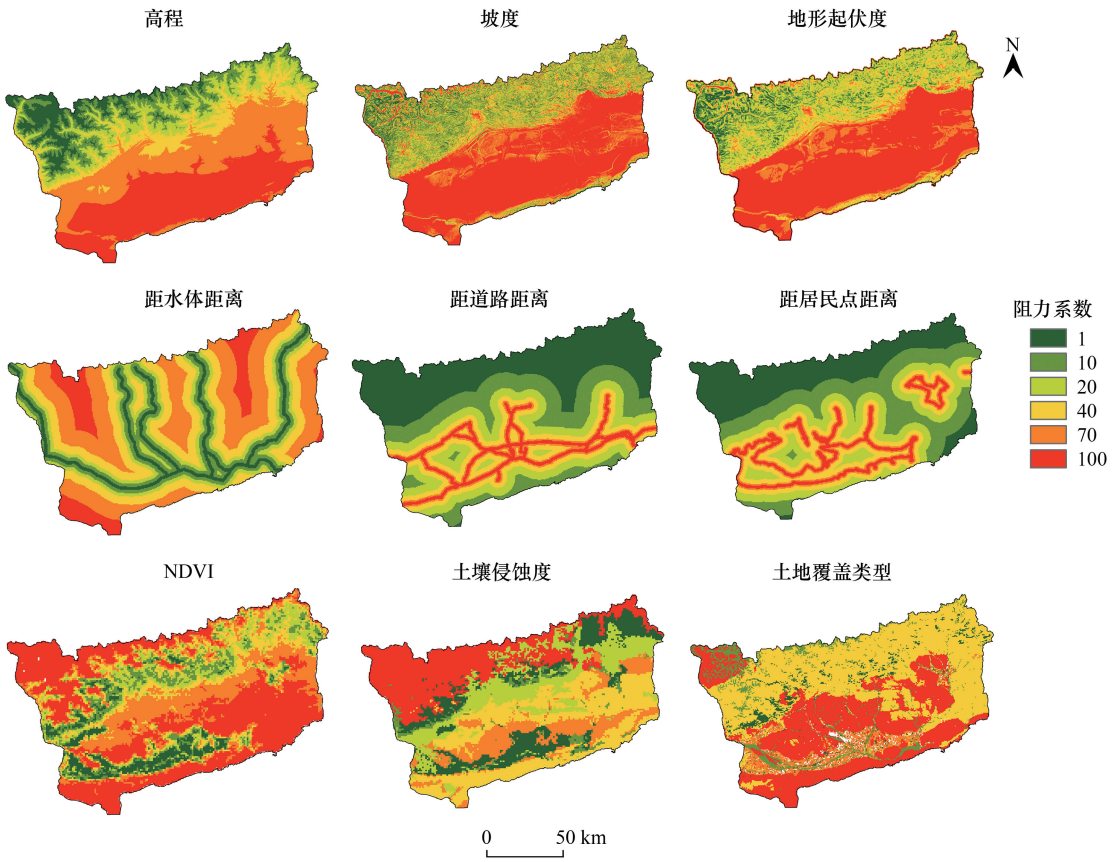

图 2　2019 年生态阻力单要素评价结果

Fig.2　The results from single factor evaluation ecological resistance in 2019

2.4　生态廊道构建

生态廊道是生态系统中生物、能量流动的便捷通道[33—34],能够增强生态“源”地间的联系和防护功能。通过 Arcgis 中的 cost distance 分析得到不同安全等级“源”地所对应的累计消耗距离表面,运用水文分析工具对其进行填洼、流向、汇流累计量处理,并确定合理阈值,得到各“源”地间累计阻力最小的消耗路径,对其进

行矢量化处理,输出一条光滑的曲线,即为生态廊道。

2.5 生态网络结构评价

本文通过生态网络结构指数评价方法,选用网络闭合度(α 指数)、节点连接率(β 指数)、网络连接度(γ 指数)等指标对生态网络进行评价[35],其计算公式如下:

$$\alpha = \frac{(L - V + 1)}{(2V - 5)} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{L}{V} \tag{6}$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)} \tag{7}$$

式中:L 表示生态廊道数(条);V 代表生态节点个数。网络闭合度 α 用来描述网络中回路出现的程度,值越大,表明供物种迁移扩散的路径越多;节点连接率 β 用来描述网络中各节点的平均连接数,值大于 1 表明网络连接水平较复杂;网络连接度 γ 用来表示网络中节点的连接程度,值越大表明网络节点连接性越高。

3 生态系统服务价值估算结果及分析

3.1 生态系统服务静态价值估算

经计算拜城县 2009 年、2016 年、2019 年单位农田自然粮食产量的年均经济价值分别为 1842.35 元/hm^2、2521.29 元/hm^2、3499.66 元/hm^2,基于此得到适用于研究区范围的生态系统服务价值系数表(以 2019 年为例(表 2))。将系数表与研究区各土地利用类型面积相乘,得到拜城县各年生态系统服务价值(表 3)及其单项服务价值量在研究期内的变化情况(图 3)。

表 2 2019 年拜城县不同土地利用类型单位面积生态系统服务价值系数

Table 2 The ecosystem service value coefficient of different land use types per unit area in Baicheng County in 2019

对应生态系统类型 Ecosystem service	土地利用类型 Land use type					
	林地 Wood land	草地 Grass land	耕地 Cultivated land	水域 Water area	沼泽 Swamp	未利用地 Unutilized land
食物生产 Grain production	448.789	584.786	1359.968	489.588	720.783	27.199
原材料 Raw material	4052.704	489.588	530.387	326.392	475.989	54.399
气体调节 Gas regulation	5875.061	2039.952	979.177	3277.523	693.584	81.598
气候调节 Climate regulation	5535.069	2121.550	1319.169	18427.565	2801.534	176.796
水源涵养 Water conservation	5562.269	2067.151	1047.175	18277.968	25526.597	95.198
废物处理 Waste treatment	2339.145	1795.158	1890.355	19583.537	20195.523	353.592
土壤形成与保护 Soil formation and erosion control	5467.071	3046.328	1999.153	2706.336	557.587	231.195
生物多样性保护 Biodiversity conservation	6133.455	2543.140	1387.167	5018.281	4664.690	543.987
娱乐文化 Entertainment culture	2828.733	1183.172	231.195	6378.249	6038.257	326.392

分析表 3 可知,拜城县 2009、2016、2019 年生态系统服务价值总量分别为 113.81 亿元、155.74 亿元、232.63亿元,价值量呈持续升高的趋势。就各年单项生态系统服务价值来看,水源涵养的价值量最高,约占当年价值总量的 21%,其次是废物处理,约占当年价值总量的 18%,食物生产和原材料价值量接近,各项价值量中食物生产价值量最低。从图 3 单项价值量的变化来看,2009—2019 年间单项价值量增长最多的是水源涵养,增长约 25.84 亿元,占各类服务总量的 22%,其次是废物处理,十年间增长约 21.52 亿元,占各类服务总量

的 18%,单项增长量最少的是食物生产和原材料,增长量分别为 3.54 亿元和 3.98 亿元,共占总增长量的 6%。

表 3　2009、2016、2019 年拜城县单项生态系统服务价值计算

Table 3　Value of single ecosystem service in Baicheng County in 2009, 2016 and 2019

	食物生产 Grainproduction	原材料 Raw material	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水源涵养 Water conservation	废物处理 Waste treatment	土壤形成与保护 Soil formation and erosion control	生物多样性保护 Biodiversity conservation	娱乐文化 Entertainment culture
2009	3.438	3.441	10.156	12.141	23.840	20.461	14.761	15.975	9.599
2016	4.706	4.709	13.895	16.612	32.625	28.001	20.196	21.858	13.134
2019	6.980	7.418	20.741	24.623	49.683	41.983	29.606	32.176	19.422

对价值系数表进行敏感性分析可知:2009—2019 年拜城县各项生态服务的弹性指数均小于 1,表明 ESV 相对于 *VC* 缺乏弹性(表 4),研究结果可信。

表 4　敏感性分析结果

Table 4　Sensitivity analysis results

		森林 Forest	草地 Grassland	农田 Farmland	水体 Water body	湿地 Wetland	荒漠 Desert
弹性系数	2009	0.075	0.527	0.045	0.293	0.006	0.054
Elasticity coefficient	2016	0.098	0.527	0.045	0.293	0.006	0.054
	2019	0.098	0.498	0.049	0.306	0.004	0.045

从 2009 年、2016 年、2019 年各项生态系统服务变化率(图 4)来看,十年间每项生态系统服务价值量都在稳步上升。从 2009—2016 年来看,虽然食物生产增长量仅为 1.268 亿元,但增长率为 36.86,为各项服务中最高;其次是废物处理,增长率为 36.85%。增长率较低的服务类型是气体调节,增长率为 36.81%,其余各项生态系统服务类型增长率相差较小,均在 36.82%—36.84%之间。2016—2019 年之间各项生态系统服务类型增长率均有上升,增长率最高的服务类型是原材料,增长率为 57.53%;增长率最低的服务类型是土壤形成与保护,增长率为 46.59%。从多年平均变化率来看,拜城县各生态系统服务类型多年平均变化率为 10.48%,其中原材料的增长率最快,多年平均变化率为 11.56%,土壤形成与保护和生物多样性保护的变化率相对较小。

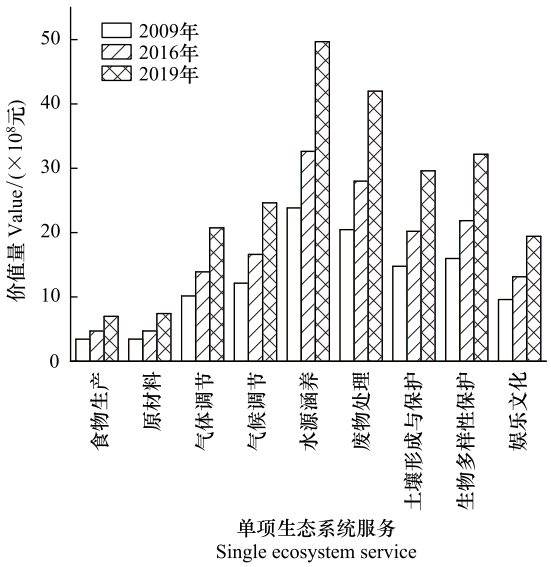

图 3　2009、2016、2019 年单项生态系统服务价值量对比

Fig.3　Comparison of the value of single ecosystem services in 2009, 2016 and 2019

3.2　生态安全格局的建立

生态系统服务价值是生态保护、三生空间划定和生态补偿标准制定的重要基础[36],也是判断区域生态系统功能强弱的重要依据。通过定量计算生态系统服务价值,识别其空间集聚程度,不仅可以反映出区域内生态功能强弱的空间差异性,以此为基础识别生态“源”地,构建的区域生态安全格局在空间分布上也更加精确,生态稳定机制也更加均衡。基于此,本文以生态系统服务价值综合评价结果为基础,提取 99%置信水平生态系统服务价值热点区,确定 2009、2016、2019 年 3 个年份的生态保护“源”地。并在参考前人研究同时结合研究区用地实际,将阻力因子划分为 5 个等级,分别设定

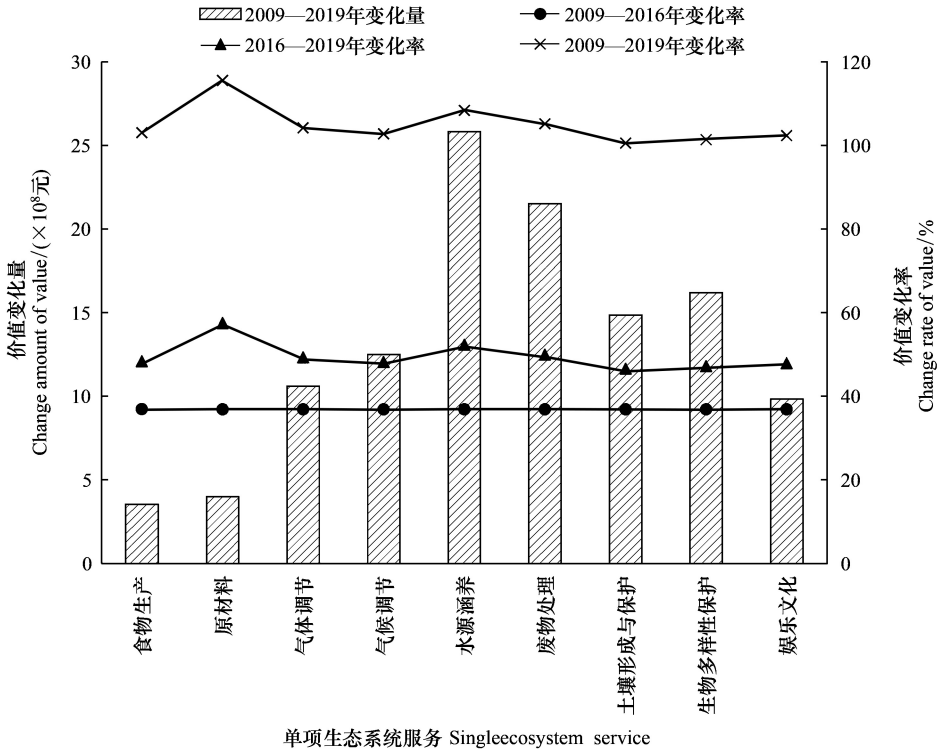

图 4 2009、2016、2019 年拜城县单项生态系统服务价值变化率及变化量

Fig.4 Change rate and amount of ecosystem service values in Baicheng County in 2009, 2016 and 2019

阻力系数,以衡量生态“源”地空间运动的生态过程及生态功能流动与传递所遇到的空间阻力,得到研究区生态扩张累计阻力面,进而划分生态保护重要性等级,阻力值越小,生态用地扩张适宜度越强,生态重要性越高;阻力值越大,生态用地扩张适宜度越弱,生态重要性越低。最后基于 Arcgis 中的 cost distance 工具,得到由生态重要性等级区、生态“源”地、生态节点、生态廊道、潜在廊道所组成的 2009、2016、2019 年三个时间年份的生态安全格局。

3.2.1 生态“源”地的确定

绿洲生态用地的“源”是物种扩散和维持的基地,一般为生境质量较好,生态服务功能较强的地区。基于 Arcgis 空间分析模块中的 Getis -Ord G_i^* 分析工具,对 2009、2016、2019 年拜城县生态系统服务价值的空间结果进行“冷热点”分析,按照 99%置信水平提取三个时间序列的生态系统服务价值热点区,作为拜城县 2009、2016、2019 三个年份的生态“源”地备选地,同时结合拜城县用地实际情况,将备选区域剔除面积小于 3km^{2}的斑块,将其视作为生态“源”地如(图 5)。

3.2.2 生态用地保护重要性等级划分

通过阻力因子加权求和得到拜城县生态扩张累计阻力面(图 6),通过图 6 分析可知,2009—2019 年间,拜城县生态用地保护累计阻力值空间分布变化明显。从整体来看,高值区主要分布在研究区中部大桥乡、亚吐尔乡及南部克孜尔乡、北部老虎台乡等植被覆盖量少、受人类活动影响大的地区,用地多为裸岩石砾地、空闲地等类型。低值区范围较广,在研究区南部和北部山区具有较大面积分布,主要位于南部绿洲区察尔齐镇、温巴什乡、北部山区黑英山乡、米吉克乡等草地、水体分布面积较大的区域。从纵向变化来看,2009—2019 年变化较大的区域主要位于黑英山乡,托克逊乡等靠近河流的区域。以生态扩张累计阻力值为属性,基于 Arcgis 软件中的空间分析工具和自然断点法将拜城县生态系统安全等级分为低值区、中值区、次高值区、高值区 4 个区域,将其分别对应为生态保护等级中的生态核心区、生态缓冲区、生态过渡区、生态脆弱区,得到相应的拜城

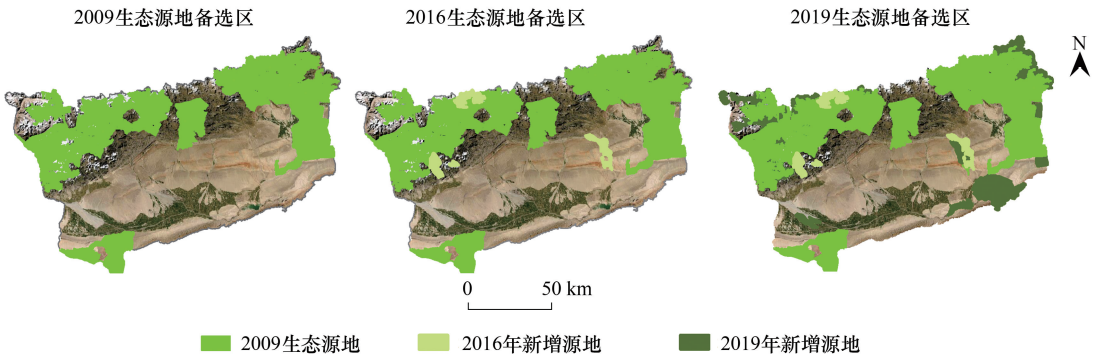

图 5　拜城县 2009、2016、2019 生态源地备选区

Fig.5　Alternative ecological source area of 2009, 2016and 2019 in Baicheng County

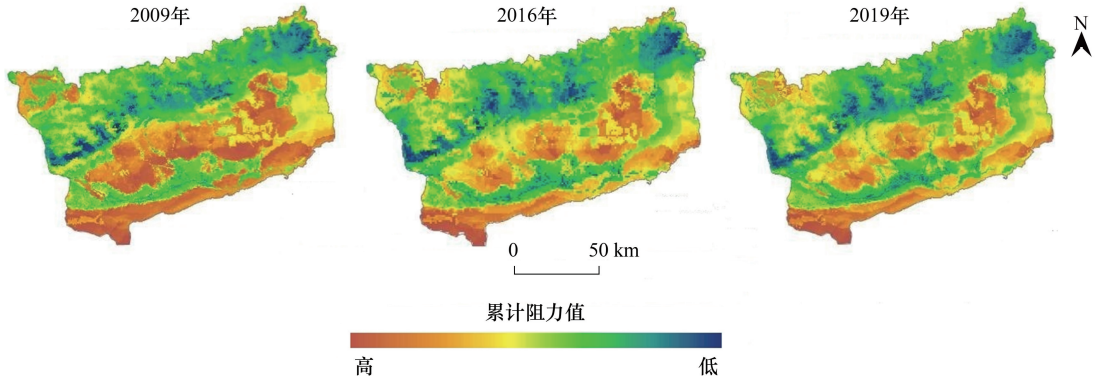

图 6　拜城县 2009、2016、2019 生态用地保护累计阻力面

Fig.6　The cumulative resistance surface for ecological land protection in Baicheng County in 2009, 2016and 2019

县生态用地保护重要性分布图(图 7)。生态扩张累计阻力值越低说明该区域生态用地扩张适宜度越强,重要性越高,需要加强保护。生态扩张累计阻力值越高说明该区域生态用地扩张适宜度越弱,重要性程度越低,不需要过多的投入保护。从 2009—2019 年时间序列来看,2009—2019 年期间生态核心区减少 6.82km^2,生态缓冲区面积增加 75.67km^2,生态过渡区面积增加 1406.35km^2,生态脆弱区面积减少 1450.40km^2。研究期内,拜城县生态用地等级整体有所好转,低重要性区域保护面积有所减少。

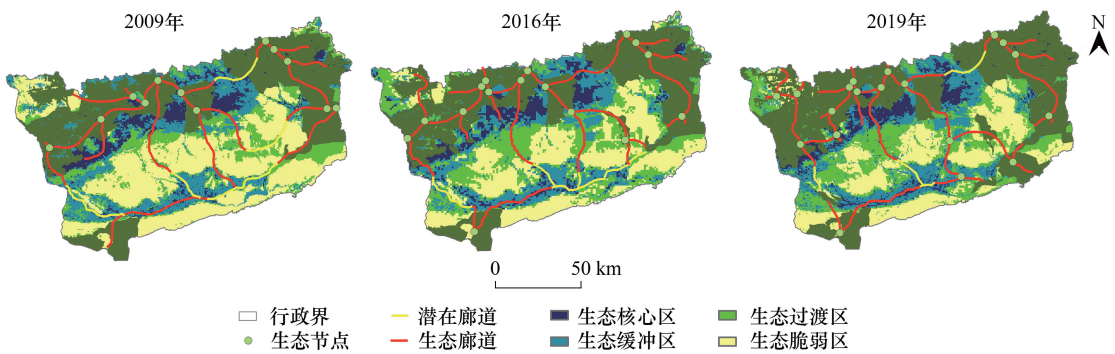

图 7　拜城县 2009、2016、2019 不同安全水平生态安全格局

Fig.7　Ecological Security pattern of different Security levels of 2009, 2016 and 2019 in Baicheng County

3.2.3 生态安全格局识别

将“冷热点”分析后得到的2009、2016、2019年拜城县生态系统服务价值的空间分布结果,按照99%置信水平,并结合研究区用地实际情况,剔除小于3km^{2}的土地斑块,得到拜城县生态“源”地空间分布,同时利用Arcgis中的最小累积阻力模型(MCR)分析得到对应的生态廊道,进而识别出由生态用地保护重要性区域、生态源地、生态廊道及节点所构成的拜城县2009、2016、2019年三个时期的生态安全格局(图7)。

从2009—2019年拜城县生态安全格局识别结果来看,拜城县生态“源”地斑块数量较多,面积也较大,生态“源”地斑块集聚化程度高,主要集中分布在拜城县北部及东部地区,南部山区仅有零星分布。从生态“源”地斑块数量来看,2009年拜城县生态安全格局中“源”地斑块有9块,总面积4985.00km^2,占研究区总面积的31%,“源”地对应天山主干南麓,是需要严格保护的基础性生态用地,也是保障拜城县正常发挥生态功能的关键。2016年生态安全格局中生态“源”地斑块数为11块,总面积为5101.98km^2,占研究区总面积的32%,在2009年基础上,“源”地面积增加116.98km^2,斑块数量也有增加,增加的“源”地位于北部天山中段南麓。2019年拜城县生态安全格局中“源”地总面积为5830.28km^2,占研究区总面积的37%,与2016年安全格局相比,“源”地面积增加728.30km^2,说明拜城县生态“源”地的整合度正逐步提高,抵抗生态胁迫的能力和生态恢复能力有所提高。基于生态系统服务现状的廊道识别方法识别出的拜城县生态廊道包括两部分,一部分主要是沿着河流展开,另一部分是连通不同“源”地之间的安全通道。其中2009年拜城县“源”间生态廊道16条,长672.08km,2016年拜城县“源”间生态廊道19条,长686.07km,2019年拜城县“源”间生态廊道30条,长744.63km,2009—2019年期间,潜在廊道逐渐减少,廊道连通性逐渐提高,表明研究期内拜城县生态安全水平逐渐提高、生态“源”地面积扩大,廊道网络结构有所完善。

在识别2009—2019年期间拜城县生态安全格局演变过程的基础上,将生态“源”地和生态保护重要性等级区域分布视为不同的景观类型,利用IDRISI软件中的CA-Markov模型,考虑高程、坡度、荒漠用地的影响,结合层次分析法,创建生态安全等级分布区及生态“源”地的适宜性图集,基于拜城县2009—2019年景观类型转移矩阵,以2019年为基期年份,将迭代次数设置为10,模拟得到拜城县2029生态“源”地扩张情况及生态安全等级区域分布(图8),并用Kappa系数对模拟结果进行验证,得到Kappa系数为0.75,模拟效果较好。与2019年相比,2029年拜城县模拟“源”地面积增加1264.61km^2。生态保护重要性用地中生态核心区面积减少160.53km^2,生态缓冲区面积增加22.63km^2,生态过渡区面积增加136.13km^2,生态脆弱区面积减少126.32km^2。可知拜城县2019—2029年间生态“源”地面积持续扩大,生态功能增强。生态保护重要性用地安全状况整体虽有所好转,但生态保护核心区面积持续减少,生态扩张适宜区逐渐萎缩,生态过渡区和生态脆弱区空间分布依然较广,不利于县域生态安全的维护和生态服务水平的提升。因此有必要在2019年现状生态安全格局的基础上,依据2029年拜城县生态“源”地及生态保护重要性用地的模拟结果及未来10年可能存在的生

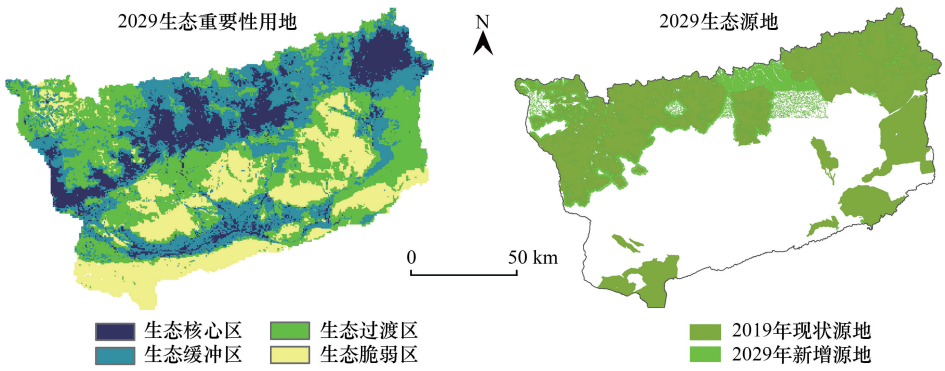

图8 拜城县2029年生态源地及生态保护重要性等级区域模拟分布

Fig.8 Simulated distribution of ecological source area and ecological protection importance level in Baicheng County in2029

态安全相关问题为导向,探讨拜城县生态安全优化策略。

4　拜城县生态安全格局优化策略

生态安全格局是基于生态系统服务价值现状而提出的相应规划策略,在绿洲生态用地建设和开发中能提供一定的参考价值,在识别 2009—2019 年期间拜城县生态安全格局,分析其发展变化的同时,依据 2029 年拜城县生态“源”地及生态保护重要性用地的模拟结果,推测拜城县未来生态发展及可能出现的问题,将其作为今后的优化调整依据,同时结合拜城县自然地理特征及生态保护发展规划,依据要素协同理论及空间各要素相互作用机理,构思拜城县 2019 年现状生态安全格局基础上的布局优化思路:以山、水、林、田、城为基底要素,以生态节点、乡镇中心作为生态绿心,以串联辐射生态“源”地和“源”间廊道的主要河流水系和道路交通作为疏通廊道,以绿色产业分区作为县域发展组团,依据生态用地重要性等级区域分布比重,营造生态安全防护带,划分北、中、南不同功能定位的生态分区。通过拓展生态绿心点缀生态基底,以自然廊道和人工廊道连通各生态功能分区,协调生态组团共同发展,构筑起“两带、三功能、四区、多中心、十廊道”的拜城县生态空间布局优化模式(图 9),打造拜城县协同化、复合型、多层次的生态网络空间结构(表 5)。

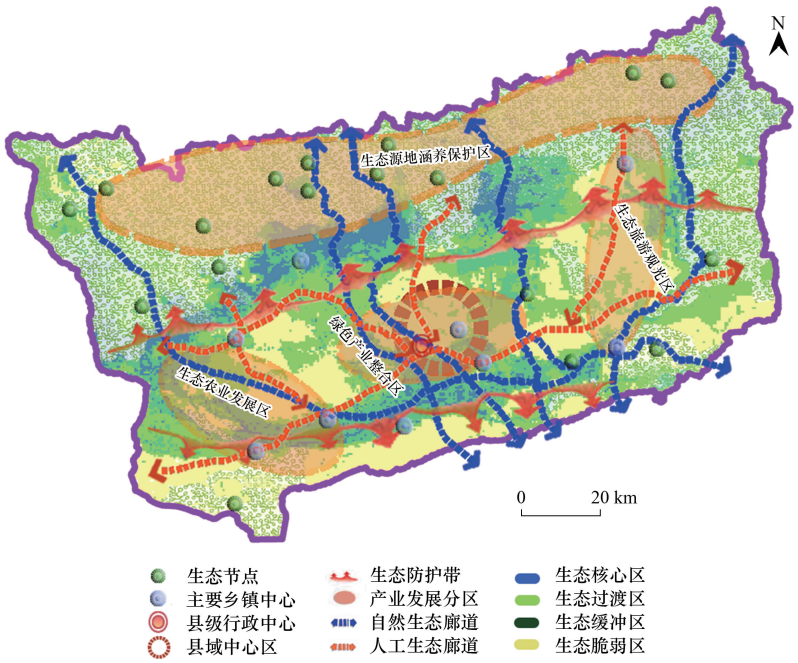

图 9　拜城县生态空间布局优化方案

Fig.9　Optimization Scheme of Ecological Spatial layout in Baicheng County

表 5　“两带、三功能、四区、多中心、十廊道”概念解析

Table 5　Concept analysis of “two belts, three functions, four districts, multiple centers and ten corridors”

相关概念 Relevant concepts	概念解析 Concept of analytical
两带 Two belts	北部天山南麓生态防护带、南部却勒塔格山生态防护带
三功能 Three functions	北部山地生态保育区、中部生态经济发展区、南部生态恢复治理区
四区 Four districts	生态源地涵养保护区、生态农业发展区
	绿色产业整合区、生态旅游观光区
多中心 Multiple centers	以生态节点、县域行政中心、主要乡镇中心及其空间范围内的综合性公园为主的生态绿色中心
自然生态廊道 Natural ecological corridor	以喀普斯浪河、台勒维丘克河、喀拉苏河、克孜勒河、木扎尔特河为主轴的自然疏通廊道
人工生态廊道 Artificial ecological corridor	以国道 579 线、县道 346 线、县道 345 线、县道 344 线为主轴线的人工疏通廊道

4.1 打造生态防护屏障,划定生态功能分区

依据生态重要性用地的区域空间分布,打造北部天山生态防护带、南部却勒塔格山生态防护带,以此划分北部、中部、南部生态发展功能分区。其中北部天山南麓丘陵地区为生态“源”地涵养保护区,因将其视作拜城县生态安全维护的基础,提高其水源涵养和生物多样性保护的生态系统功能,未来 10 年内应在此区域内加强生态涵养和植被覆盖,注重生态“源”地建设,扩展生态“源”地面积;中部为生态经济发展区,其西侧种羊场、大宛其农场、大桥乡应强化发展生态农业、形成特色种植、养殖基地;东侧通过整合龟兹文化、姑墨文化,发展生态旅游观光,协调旅游资源共享,同时注重荒漠化治理与增加植被覆盖;南部生态恢复治理区应加强生态系统保护和水环境治理,通过扩大生态斑块面积,注重绿色植被覆盖,加强生态用地重要性保护,减少生态脆弱区域占比,推进生态环境治理工程和保护区建设,提高区域的生态稳定性。整体构造北养水源、中优耕地、南增绿地的区域生态发展方案。

4.2 打通生态连接通道,构筑生态网络体系

通过以木扎尔特河为主轴线打造拜城县中央生态文化景观带,连通以喀普斯浪河、台勒维丘克河、喀拉苏河、克孜勒河为轴线的自然生态廊道,及以国道 579 线、县道 346、县道 345 线、县道 344 线为轴线的人工生态廊道,组建起“一中心,十廊道”的生态网络疏通结构体系,构筑起生态连接的网络化通道,并加大对自然生态廊道和人工生态廊道的绿化建设,提高生态廊道的空间连接性,优化生态廊道网络结构,以提高县域景观连通性,促进生态流、信息流、物质流的流动和扩散。

4.3 加强生态绿心建设,协同生态发展组团

基于生态安全格局识别结果,以生态服务功能较强的生态“源”地、生态节点要素及其空间分布为基础,以生态“源”地几何中心点为圆点,分别设置 2km、5km、8km、10km 的缓冲区作为生态“源”地的作用辐射范围,同时发展县域中心区、主要乡镇及其空间范围内的综合性公园为主的生态绿色中心,加强生态保护与环境治理,注重生态绿心扩展建设,由点及片、由片及面,形成经纬交织、星罗棋布的县域多中心生态绿心空间结构体系,以提高区域生态环境整体质量。同时以廊道串联绿色产业发展分区,协同东、中、西绿色产业发展组团,增强经济发展网络化结构,构建“三组团,多中心”的绿心组团县域生态保护框架。

4.4 生态安全网络结构优化估算

基于 2019 年拜城县生态廊道结构破碎、网络联系程度依然较低现状,以 2029 年生态“源”地及重要性保护区域分布的模拟结果及未来可能出现的问题为依据,结合县域生态保护规划对拜城县生态空间布局进行优化调整,并对优化后的生态网络结构进行连通度估算(表 6)。通过分析,优化后相比 2019 年,生态“源”地面积将增加 1264.61km^2,生态廊道数目增加 10 条,廊道长增加 1269.56km。借助生态网络结构定量评价优化后的网络连接程度,结果表明,优化后生态网络闭合度较 2019 年增长 0.06,节点连接率增长 0.1,网络连接度增长 0.09。表明优化后的生态网络相比 2019 年网络结构更加复杂,生态网络的 α、β、γ 指数明显增高,生态廊道的连通性增强,生态网络结构更优,可有效提高拜城县生态系统功能,降低景观破碎化程度。优化后的生态安全格局将更有利于保障县域生态安全。

表 6 生态网络景观组分及结构指数估算

Table 6 Estimation of Landscape components and structure Index of Ecological Network

指标 Indicator	2009 生态网络 Ecological network of 2009	2019 生态网络 Ecological network of 2019	2029 生态网络 Ecological network of 2029
源地面积 The source area/km^2	4985.00	5829	7093.61
廊道数 Number of corridor	16	30	40
生态节点 Number Ecological node	12	18	18
总长度 The total length/km	672.08	744.63	2014.19
α 指数 Index of the α	0.26	0.42	0.48
β 指数 Index of the β	1.33	1.67	1.77
γ 指数 Index of the γ	0.53	0.58	0.67

5　结论与讨论

5.1　结论

(1)从生态系统服务价值来看,2009—2019 年期间,拜城县生态系统服务价值逐年升高,价值量从 2009 年的 11.38 亿元增加到 2019 年的 23.26 亿元,价值量增加近两倍。从单项服务价值量来看,研究期内价值量变化最大的服务类型是水源涵养,其次是废物处理,食物生产和原材料价值量变化最小。

(2)通过 Arcgis 空间分析,并基于最小阻力模型,将拜城县划分为生态核心区、生态缓冲区、生态过渡区、生态脆弱区 4 个不同水平的生态安全区。同时在 2009—2019 年生态系统静态服务价值测算结果基础上,通过 Arcgis“冷热点”分析确定了生态用地的“源”,识别 2009、2016、2019 年生态综合安全格局,同时分析发现县域生态安全布局整体存在“源”地分布不均、廊道结构破碎且网络化程度低、生态脆弱区面积较大的现状特征。

(3)基于 2009、2016、2019 年生态安全现状及其发展演变规律,模拟 2029 年拜城县生态“源”地及生态重要性保护区域的空间分布,同时依据拜城县自然地理特征及县域总体规划,构筑“两带、三功能、四区、多中心、十廊道”的拜城县生态空间布局优化模式,建设多层次、复合型的生态网络空间结构,优化后生态“源”地面积明显扩大,生态网络结构指数明显提高,生态网络结构更优,景观连通性更强。

5.2　讨论

本研究以生态系统服务的功能等级确定了绿洲生态用地中的“源”,通过确定具有较强生态服务功能的生态“源”地和能有效连通自然界物质能量的生态廊道,识别拜城县生态安全格局,构筑起保障绿洲地区区域生态安全的屏障体系,并根据“源”地分布不均、廊道结构破碎且网络化程度低的现状特征,结合当地自然条件及县域总体规划,提出“两带、三功能、四区、多中心、十廊道”的生态安全布局优化模式,为干旱区绿洲生态用地规划和建设用地布局提供一定参考,但囿于数据获取的限制,本文只选择一些主要的生态服务类型和相关阻力因子来识别生态“源”地,建立阻力面,对人为因素及影响考虑较少。同时虽通过参考相关研究,结合研究区实际确定了拜城县生态廊道的空间位置,但对关键生态节点,生态辐射廊道等组分的研究不够深入,对各组分在生态安全格局优化中的作用程度未做深入分析,在生态安全格局优化策略中,基于识别的生态廊道现状,将县域内主干河流、道路作为自然、人工疏通廊道设计纳入拜城县生态网络结构体系建设当中,虽有一定的可操作性,但对其具体建设方案、应发挥功能未进行分类设计和详细探讨,对生态网络结构体系及网络韧性的研究不够深入。

区域生态环境建设过程是一个持续、动态的过程,在温宿县脆弱的生态环境条件下,生态要素的空间格局会随着区域经济社会的发展和人类活动影响而产生一定程度的变动,对未来生态安全布局优化发展的策略也会因土地政策和环境变化而有所偏差。在今后的研究中,生态安全格局建设应与国土空间开发利用、规划与管控进一步结合,依据国土空间生态安全格局建设要求,进行县域生态分区发展建设,过程中需充分考虑现有的生态“源”地能否满足维护区域生态安全和建设的需求,以及“源”地保护修复措施、新增“源”地的面积阈值、生态廊道长度、宽度和生态廊道建设与本地关键物种保护精确衔接等核心问题。同时也应注重廊道沿线绿化建设,以提高其损害防护能力、维护和增强生态廊道通道功能,使之成为更稳定的生态系统组分。针对当前温宿县荒漠面积大,荒漠化程度高,生态建设和生态保护以工程性修复为主,缺乏对生态要素统筹布局的建设方式,不利于生态系统整体功能的有效发挥,本文在县域生态安全格局优化策略中,尝试将“山、水、林、田、湖、草”生命共同体理念引入优化策略当中,但“山、水、林、田、湖、草”作为温宿县生态环境的重要组份,如何统筹各要素的系统功能,协调彼此之间相互联系,相互影响的作用关系? 如何以国土空间规划为引领,在生态安全格局构建过程中通过点、线、面等不同生态要素的多尺度流通和扩散,形成由点及片、由片及面的区域生态要素生命共同体? 如何有效连接区域生态用地与非生态用地,促进生态发展与乡村、城市等人类社会的耦合协作关系,将人与生态要素构建为密切联系、互惠互益的“人-自然-社会”复合生态系统等一系列问题,应是

当前相关研究所关注的重点内容。下一步研究应密切关注区域生态要素的动态发展变化,持续加强对生态系统不同组分结构、功能的深入分析,以“山、水、林、田、湖、草、沙”生命共同体理念为引导,统筹区域国土空间开发、经济发展与人文环境,提高区域生态安全建设的科学性和前瞻性,以合理发挥不同生态要素功能和效益,促进区域生态安全和社会经济的协调发展。

参考文献(References):

[1] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例. 生态学报, 2019,39(07): 2298-2310.
[2] 樊杰.我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略.中国科学院院刊, 2016, 31(01): 1-12.
[3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬.区域生态安全格局: 概念与理论基础.生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
[4] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
[5] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 王志涛, 冯菲. 冀西北间山盆地区景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569.
[6] 杜巧玲, 许学工, 刘文政.黑河中下游绿洲生态安全评价.生态学报, 2004, 24(9): 1916-1923.
[7] Brand U, Vadrot A.Epistemic selectivities and the valorisation of nature: The cases of the Nagoya protocol and the intergovernmental science-policy platform for biodiversity and ecosystem services(IPBES). Law,Environment and Development Journal,2013,9(2): 202-220.
[8] Liu J G, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S X.Systems integration for global sustainability.Science, 2015, 347(6225): 1258832.
[9] Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E, Asrar G R, Busalacchi A J, Cahalan R F, Cane M A, Colwell R R, Feng K S,Franklin R S,Hubacek K, Miralles-Wilhelm F, Miyoshi T, Ruth M, Sagdeev R, Shirmohammadi A, Shukla J, Srebric J, Yakovenko V M, Zeng N.Modeling Sustainability: Population, Inequality, Consumption, and Bidirectional Coupling of the Earth and Human Systems. National Science Review, 2016, 3(4): 470-494.
[10] Dong S K, Kassam K S, Tourrand J F, Boone R B. Building Resilience of Human-Natural Systems of Pastoralism in the Developing World[M]. Interdisciplinary Perspectives.New York: Springer, 2016.
[11] 杜巧玲, 许学工, 刘文政.黑河中下游绿洲生态安全评价.生态学报, 2004, 24(9): 1916-1923.
[12] 杨庆媛.西南丘陵山地区土地整理与区域生态安全研究.地理研究, 2003, 22(6): 698-708.
[13] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
[14] 徐海根, 包浩生.自然保护区生态安全设计的方法研究.应用生态学报, 2004, 15(7): 1266-1270.
[15] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波.北京市生态安全格局及城市增长预景.生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
[16] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序.基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例.应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
[17] 吴健生, 岳新欣, 秦维.基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例.地理研究, 2017, 36(3): 429-440.
[18] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨旸, 彭建.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例.生态学报, 2017, 37(24):8241-8253.
[19] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(03): 441-452.
[20] 方莹, 王静, 黄隆杨, 翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(01): 190-203.
[21] 刘时栋, 徐丽萍, 张婕. 新疆土地生态安全时空变化. 生态学报, 2019, 39(11): 3871-3884.
[22] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 方斌, 张兆勇, 刘香云. 渭干河-库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化. 生态学报, 2019,39(15): 5473-5482.
[23] 刘枝军, 王宏卫, 杨胜天, 王媛媛, 王盼, 李根生. 极端干旱区绿洲生态用地规划. 生态学报, 2018, 38(22): 7950-7959.
[24] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, (02): 189-196.
[25] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究.中国生态农业学报, 2005(03):10-13.
[26] 吴小曼. 基于生态系统服务价值的唐县土地利用结构优化研究[D]. 河北农业大学, 2018.
[27] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.
[28] 王晓峰, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 自然杂志, 2012, 34(05): 273-276+298.
[29] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应: 以江苏盐城海滨湿地为例.生态学报, 2010, 30(5): 1157-1166.
[30] 张继平, 乔青, 刘春兰, 王海华, 裴厦. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. 生态学报, 2017, 37(19): 6313-6321.
[31] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(03): 441-452.
[32] 胡海. 基于最小累计阻力模型的土地整理规划方法研究[D]. 华中师范大学, 2013.
[33] Degtyarev V. The Middle Aldan River Basin: A Key Migration Corridor for the Eastern Population of the Siberian Crane Within the Lena River Basin (Russia). The Wetland Book. 2016.
[34] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 周联, 孙宁. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建.长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
[35] 殷炳超, 何书言, 李艺, 李杨帆. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4373-4382.
[36] 潘洪义, 张琴, 李加安, 徐婕, 黄佩. 基于动态当量的彝汉交错深度贫困区生态系统服务价值时空演变研究. 生态学报, 2020, 40(22): 1-12.