

DOI: 10.5846/stxb201908281782

杨亮洁, 王晶, 魏伟, 杨永春, 郭泽呈. 干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例. 生态学报, 2020, 40(17): 5915-5927.

Yang L J, Wang J, Wei W, Yang Y C, Guo Z C. Ecological security pattern construction and optimization in Arid Inland River Basin: A case study of Shiyang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5915-5927.

干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化 ——以石羊河流域为例

杨亮洁^{1,*}, 王晶¹, 魏伟¹, 杨永春², 郭泽呈¹

¹ 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

² 兰州大学资源环境学院, 兰州 730070

摘要:生态安全格局识别及构建是保障干旱区生态安全、实现可持续发展的基本空间途径。石羊河流域是典型的干旱内陆河流域,其生态环境极为脆弱、敏感。基于石羊河流域生态本底特征,选取并定量评估水资源、生物多样性、水土保持和沙漠化 4 种生态系统服务,识别生态源地;以建筑物指数和植被净初级生产力为阻力因子,应用加权叠加法构建基本阻力面,并运用最小累积阻力模型及水文分析法识别生态廊道和生态功能节点,进行生态安全格局构建及优化。结果表明:(1)2005—2015 年,石羊河流域生态源地增加,生态环境质量趋于好转,特别是下游民勤绿洲区及上游祁连山区源地面积增加明显。2005、2010、2015 年生态源地面积占流域总面积的比重分别为 16.7%、14.7%、19.8%;(2)2005—2015 年,生态廊道明显增加,流域整体生态安全格局网络趋向复杂完善。2005 年和 2010 年提取的生态节点都为 36 个,2015 年的生态节点为 35 个,生态廊道从 2005 年的 23 条增加到 2015 年 47 条,部分潜在廊道发展演化为廊道;(3)基于 2005—2015 年生态安全格局分析,构建了以“二带区、三绿洲、五廊道、多中心”为核心的“绿洲廊道功能区”的优化格局模式,以期对石羊河流域生态环境治理与恢复以及区域可持续发展规划提供借鉴与决策依据。

关键词:生态安全格局;最小累积阻力模型;安全水平;生态节点;廊道;石羊河流域

Ecological security pattern construction and optimization in Arid Inland River Basin: A case study of Shiyang River Basin

YANG Liangjie^{1,*}, WANG Jing¹, WEI Wei¹, YANG Yongchun², GUO Zecheng¹

¹ School of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

² School of Resources and Environmental, Lanzhou University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The identification and construction of ecological security pattern is the basic spatial approach to guarantee the ecological security of arid areas and realize sustainable development. Shiyang River Basin is a typical Arid Inland River Basin with extremely fragile and sensitive ecological environment. Based on the ecological background characteristics of Shiyang River Basin, this paper selected and evaluated four ecosystem services, including water resources, biodiversity, soil and water conservation and desertification, to identify ecological source areas. Using a new index-based built-up index (IBI) and net primary productivity (NPP) as resistance factors, the basic resistance surface was constructed by the weighted superposition method. The ecological corridor and ecological function node were identified by the minimum cumulative resistance (MCR) model and hydrological analysis, and the ecological security pattern was constructed. The results showed that (1) from 2005 to 2015, Shiyang River Basin's ecological source area increased, and the ecological quality improved,

基金项目:国家自然科学基金项目(41961030, 41501176, 41861040, 41761047)

收稿日期:2019-08-28; 网络出版日期:2020-07-08

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

especially in Minqin oasis area in the lower reaches and Qilian mountain area in the upper reaches. In 2005, 2010 and 2015, the proportions of ecological source area in the total area of the basin were 16.7%, 14.7%, and 19.8%. (2) The spatial and temporal pattern of ecological corridor and ecological node showed that from 2005 to 2015, the total number of ecological nodes in Shiyang River Basin did not change significantly, while the number of ecological corridors increased significantly, and the overall ecological security pattern network in the basin tended to be complex and perfect. In both 2005 and 2010, 36 ecological nodes were extracted. In 2015, 35 ecological corridors were extracted. The number of ecological corridors increased from 23 in 2005 to 47 in 2015. (3) Based on the ecological security pattern analysis from 2005 to 2015, the optimal layout mode of “functional area of oasis corridor” with “two zones, three oases, five corridors, and multiple centers” as the core was proposed. This study provides reference and decision-making basis for ecological environment management and restoration, regional layout and planning of Shiyang River Basin.

Key Words: ecological security pattern; minimum cumulative resistance; safety level; ecological node; corridor; Shiyang River Basin

生态安全格局是景观安全格局的一种,为区域提供综合的生态系统服务^[1],维护区域生态安全。近年来,生态环境破坏的严峻性及生态环境保护的重要性,越来越受到各界人士的广泛关注,特别是沙化、荒漠化、水土流失严重、生态极其脆弱的西北内陆区^[2]。党的十八大报告中提出将生态安全格局作为三大战略格局目标之一^[3]。“十三五”规划纲要中确立以保护修复荒漠化生态系统,加快风沙源区的治理,遏制沙化扩展。在 2017 年的第十九次全国代表大会上,习总书记倡议以优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络等作为战略发展目标^[4]。因此,生态脆弱区生态安全格局构建具有重要现实意义,是当今社会可持续发展面临的新主题之一,也是近年来的一个研究重点^[5]。目前,基于生态安全格局以获取、分析区域生态环境状况,已成为当下被广泛接受和运用的生态环境评价方法之一^[6]。

生态安全格局的研究起源于 1915 年美国学者曼宁^[7]提出的自然资源和自然系统为基础的土地分类思想。1950 年欧美国家开始出现绿色廊道、缓冲区等一些生态安全格局中的名词^[8]。近年来,国外的研究扩展了生态安全问题,利用不同的视角关注人与自然之间的相互关系。Esbah^[9]通过矩阵效应分析得到在城市化进程中,相邻保护区间具有边缘效应。Karen^[10]通过城市土地覆被变化的空间显示概率预测,探讨人类城市化扩张对生物多样性的影响。Hayward^[11]利用最小成本路径模拟物种的迁徙路径。不同视角的研究丰富了生态安全格局理论内涵及构建方式。

国内对生态安全格局的研究起步较晚,20 世纪 80 年代我国学者基于景观生态学,以景观格局空间异质性分析景观生态稳定性^[12]。20 世纪 90 年代^[13]开始研究区域生态安全格局,以景观安全格局为理论基础构建区域安全格局,并借助环境遥感和地理信息技术手段运用空间叠加、多指标综合评估^[14]等手段识别生态用地,研究范围大到国土尺度^[15]小到县区城市^[16-18]范围。当前国内研究主要是基于“源-汇”理论^[19],应用最小累积阻力模型^[20],生境质量评估等方法^[21-22],构建区域保护体系。例如田雅楠^[23]基于“源-汇”理论构建“点-线-面”三位一体的立体保护体系,张继平、乔青等人^[24]采用最小累积阻力模型模拟生态用地空间扩张过程,根据不同情境规划生态用地;吴健生^[25]采用景观连通性分析、生境质量评估等方法提取重要斑块构建深圳市安全格局,但是研究区多集中于东部及沿海地区经济相对发达地区,关于西部地区敏感脆弱的生态环境质量,基于景观生态学视角从景观连接度等方面的研究较少^[26],同时缺乏时间序列上的演变分析。

石羊河流域作为我国西北干旱区生态退化的典型区域之一,水土资源开发力度大、土地沙漠化、水资源短缺等问题使其生态极为脆弱^[27],生态安全问题极为严重。因此,本文以石羊河流域作为典型样区,采用最小累积阻力模型,提取流域中重要的生态源地、生态廊道、缓冲区等,优化配置节点、斑块廊道等要素,构建石羊河流域生态安全格局,剖析 2005—2015 年石羊河流域生态安全格局的时空演化规律,进而设计石羊河流域生态空间结构优化布局方案,以期优化石羊河流域生态空间结构、保障区域生态安全,促进区域可持续发展提

供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊以东,黄河以西及祁连山脉以北的区域^[28],经纬度范围为 $101^{\circ}22'$ — $104^{\circ}16'E$, $36^{\circ}29'$ — $39^{\circ}27'N$,深居大陆内部。气候类型以温带大陆性干旱气候为主,蒸发强烈,日照时间长,全年降水少且集中,水资源供需矛盾突出。地势南高北低呈现由西南向东北倾斜的趋势,南部主要为祁连山区,属于高寒半干旱湿润区,植被类型主要以旱生稀疏灌木、山地森林草原、灌丛草原等为主,其冰雪融水和大气降水是石羊河流域用水的主要来源;中部为平原灌溉区,是人类居住和发展的主要聚集地;北部为低山丘陵区,有大片荒漠区,靠近沙源地,年降水量小于 150 mm,属于温暖干旱区。流域土地面积约为 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1),全流域包括 3 市 8 县(区),具体包括金昌市的永昌县及金川区全部,张掖市肃南裕固族自治县和山丹县的部分地区,武威市的古浪县、凉州区、民勤县及天祝县部分地区,流域总人口达 231.45 万人,其中武威市人口占总人口的 70% 以上。

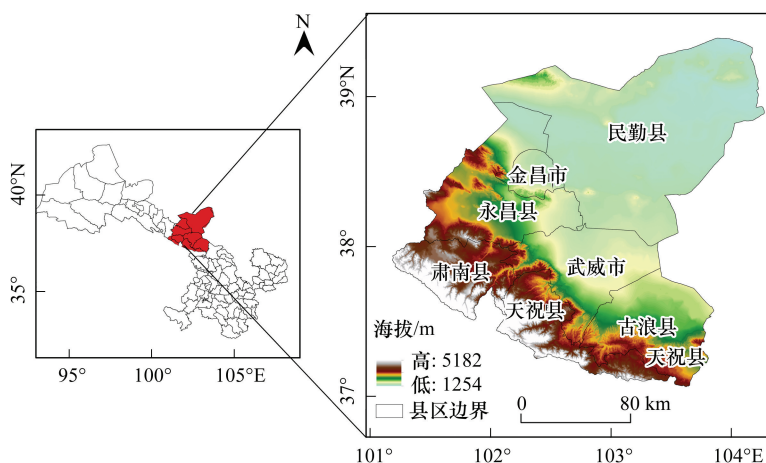


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Geographical location of Shiyang River Basin

1.2 数据源与处理

本文所使用的数据包括 2005 年、2010 年和 2015 年三期 Landsat TM/OLI 遥感影像数据,来源于美国地质调查局网站(<http://earthexplorer.usgs.gov>),空间分辨率为 30 m,影像轨道号为 13133、13233、13134、13234,影像中云量小于 10%,满足研究需求。用 ENVI 5.3 软件对影像数据进行处理,将原始 DN 值转为辐射亮度值,再进行大气校正、几何校正以及镶嵌和裁剪。土地利用现状数据是用 Landsat TM/OLI 影像,在 ArcGIS 10.2 软件中通过人工目视解译与计算机自动解译相结合提取土地利用类型,依据中国科学院《中国土地利用分类系统》的分类标准分为 6 大类。DEM 数据来自地理数据空间云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率均为 $30 \times 30 \text{ m}$ 。河流和水系数据来源于石羊河流域信息系统专题数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网中的《中国地面气候资料年、月、日值数据集》(<http://data.cma.cn>),植被净初级生产力(NPP)数据来自于 MOD17A3 产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),数据产品重采样成 30 m;地下水埋深观测数据及站点数据来源于武威市水务局(<http://www.gssl.gov.cn/>)和民勤县水务局(www.minqin.gansu.gov.cn/);土壤数据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 区域生态安全格局构建

基于俞孔坚、周锐等^[8,29]提出的生态安全格局构建方法,结合研究区生态安全格局综合评价结果,识别区域生态安全格局的“源地”;采用最小累积阻力模型计算源地间的相对阻力,建立生态源地扩张阻力面,进而识别核心区、缓冲区、优化治理区、廊道、潜在廊道、辐射廊道及生态战略节点等其他生态安全格局组分,构建流域生态安全格局。

2.1.1 生态源地识别

根据石羊河流域独特的自然地理条件和生态环境特征,综合考虑指标选取的重要性的和数据的可获取性等基本原则,从水资源、生物多样性、土地沙漠化和水土保持 4 个方面选取 11 个指标,应用多种算法识别生态源地(表 1)。

表 1 生态安全格局源地识别的指标及方法
Table 1 Index and method for identification of ecological security pattern source area

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	指标作用 Index function	方法 Methods
生态源地 Ecological source	水资源安全格局	河网密度	+	线密度计算法
		地下水埋深	-	普通克里金插值法
		距水源地的距离	+	欧式距离法
	水土保持安全格局	坡度	+	DEM 提取坡度
		土壤类型		土壤类型分类
		年降水侵蚀力	-	降水侵蚀指数
	土地沙漠化格局	NPP	+	数据产品重采样
		沙漠化程度	-	沙漠化指数
		年平均降水量	+	样条函数插值法
	生物多样性安全格局	生物多样性	+	生物丰度指数
		土地利用类型	-	土地利用类型分类

(1)降水侵蚀指数 降水侵蚀指数表征由降雨而导致土壤侵蚀的潜在能力,数值越高水土流失越严重。测度公式如下^[30]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5(\log p_i^2 - \log p)} - 0.8188 \tag{1}$$

式中,R 是年降水侵蚀力, p_i 为各月平均降水量, p 为年平均降水量。

(2)沙漠化指数 地表反照率(Albedo)的变化是影响陆地表面辐射特征的一个重要参量,反映沙漠化程度。植被指数(NDVI)反映地表植被覆盖度的减少而沙漠化程度加剧。本研究借鉴曾永年^[31]的 Albedo-NDVI 方法来表征沙漠化过程。计算公式如下:

$$DI = -DDI = \frac{1}{k_i} \times NDVI_{\text{标}} + Albedo_{\text{标}} \tag{2}$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \tag{3}$$

$$Albedo = 0.365 \rho_{Blue} + 0.130 \rho_{Red} + 0.373 \rho_{NIR} + 0.085 \rho_{SWIR1} + 0.072 \rho_{SWIR2} - 0.0018 \tag{4}$$

式中, $NDVI_{\text{标}}$ 为标准化处理后的植被指数, $Albedo_{\text{标}}$ 为标准化处理后的地表反照率,用遥感影像数据反演得到 $Albedo$ ^[32] 和 $NDVI$,其中 ρ_{Blue} ρ_{Red} ρ_{NIR} ρ_{SWIR1} ρ_{SWIR2} 分别为 Blue、Red、NIR、SWIR₁、SWIR₂等波段的反射率; k_i 根据 Albedo-NDVI 反演模型中的斜率来确定的, i 代表 2005 年、2010 年和 2015 年。

(3)生物丰度指数物种 丰富程度可以表征生态系统的生产力与稳定性,生物丰度指数越高说明生态恢

复的能力越强。计算公式如下^[33]：

$$f = (0.35 \times \text{林地} + 0.21 \times \text{草地} + 0.28 \times \text{水域用地} + 0.11 \times \text{耕地} + 0.04 \times \text{建筑用地} + 0.01 \times \text{未利用地}) / \text{区域面积}$$
 (5)

(4)土壤类型和土地利用类型分类 土壤类型和土地利用类型的分类主要参考中国科学院《中国土地利用分类系统》和《中国土壤分类系统》的标准以及魏伟的相关研究^[34],根据土壤类型和土地利用类型对生态环境的相对重要性分为 5 种不同的安全水平用地(表 2)：

表 2 土壤类型和土地利用类型分类标准					
Table 2 Classification criteria for soil types and land use					
	高度安全水平 Maximum safety level	较高安全水平 Higher safety level	中度安全水平 Moderate safety level	较低安全水平 Lower level of safety	低度安全水平 Low level of safety
生态源阻力值 Source resistance value	1	2	3	4	5
土地利用类型 Land use classification	水域	林地	草地	耕地	建设用地和未利用地
土壤类型 Soil classification	草毡土、寒冻土、黑钙土、黑毡土、栗钙土、	草甸土、粗骨土、灌漠土、灰钙土、棕钙土	灰棕漠土、新积土	盐土、潮土、泥炭土、灰褐土、	残余盐土、石质土、风沙土

(5)指标权重计算 依据各指标对生态环境的影响将其分为正向指标和负向指标,正向指标指生态环境质量越好其值越大,负向指标反之,采用极值法对各指标进行标准化^[35]处理,并用熵权法^[36]计算各指标权重(表 3)。

表 3 各指标权重												
Table 3 Weight of index												
年份 Year	A	N	D	G	W	R	L	B	LU	S	E	T
2005	0.14	0.72	0.14	0.09	0.87	0.02	0.02	0.02	0.31	0.69	0.77	0.15
2010	0.11	0.74	0.15	0.08	0.88	0.02	0.02	0.02	0.34	0.66	0.77	0.15
2015	0.10	0.70	0.20	0.09	0.87	0.02	0.02	0.02	0.30	0.70	0.75	0.17

A:年均降水 Average annual precipitation;N:植被净生产力 NPP;D:沙漠化指数 DI;G:地下水 Groundwater;W:水网密度 Water network density;R:距河流距离 Distance from river;L:距湖泊距离 Distance from lake;B:生物丰度 Biological abundance;LU:土地利用 Land use classification;S:坡度 Slope;E:降水侵蚀 Rainfall erosion;T:土壤类型 Soil classification

(6)生态源地的提取 生态源地是指维护区域生态安全和可持续发展必须加以保护的区域,由各生态过程对生态系统功能所发挥作用的不同而确定。根据各指标权重计算 4 个子系统的安全水平指数,采用自然断点法(Natural Breaks)将各单一景观过程的生态安全格局重分类为高度安全水平、较高安全水平、中度安全水平、较低安全水平和低度安全水平 5 个等级,将 4 个子系统的高度安全水平区叠加作为石羊河流域的生态保护源地。

2.1.2 最小累积阻力面的构建

(1)基本阻力面 人类活动和植被对生态系统具有显著的影响,人类活动的强度越大,生态过程的空间移动性的阻力就越大,植被指数越高,生态价值越高,生态过程的阻力也就越小。本文用建筑用地指数(IBM)^[37]和归一化植被指数(NDVI)表征人类活动强度大小和植被生态价值的两个阻力因素,构建基本阻力面。

建筑物指数：

$$IBM = \frac{\left\{ \frac{2\rho_{MIR}}{(\rho_{MIR} + \rho_{NIR})} - \left[\frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} + \frac{\rho_G}{(\rho_G + \rho_{MIR})} \right] \right\}}{\left\{ \frac{2\rho_{MIR}}{(\rho_{MIR} + \rho_{NIR})} + \left[\frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} + \frac{\rho_G}{(\rho_G + \rho_{MIR})} \right] \right\}}$$
 (6)

式中, ρ_G 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{MIR} 分别为 Green、Red、NIR、MIR 等波段的反射率。

将建筑物指数 (IBI) 和归一化植被指数 (NDVI) 等权重综合叠加得到基本阻力面, 利用自然断点法将基本阻力面划分为 1 到 5 级, 1 级阻力值最小, 5 级阻力值最大。

(2) 最小累积阻力面 依据源地和基本阻力面, 基于 ArcGIS 10.2 软件中的 Cost-Distance 模块, 采用最小累积阻力模型 (minimum cumulative resistance, MCR) 生成最小累积阻力面, 基本公式^[38]如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (7)$$

式中, f 是未知的正函数, 用来反映空间中的任意一点的最小阻力和到源地的距离和景观基面特征的一个正相关关系, D_{ij} 是物种从源 j 到空间某景观基面 i 空间距离, R_i 是景观 i 对某物种运动的阻力系数。

2.1.3 生态安全格局构建

生态安全格局是依据生态功能的重要程度和生态用地的价值划分研究区^[39], 基于最小累积阻力面, 运用自然断点法将研究区的生态用地划分为生态核心区、生态缓冲区、生态过渡区、生态优化区和生态治理区 5 个等级。为保证区域生态系统的稳定性, 促进物质能量流动, 在研究区内识别生态流向的高效通道和联系路径, 本文利用 ArcGIS 软件中水文分析工具^[40], 以最小累积阻力面为基础, 通过洼地填充、水流方向、水流聚集等工具, 通过反复调试阈值确定汇流累积量的值, 提取最小累积阻力面的谷线, 识别出廊道、辐射廊道^[41-42]、潜在廊道。廊道和辐射廊道相辅相成, 辐射廊道是以源为中心, 向外辐射的所有低阻力谷线, 辐射廊道越多说明生态系统越稳定。廊道与廊道之间, 存在阻力值谷线但未识别出廊道为潜在生境廊道。生态功能节点是流域内生态资源丰富、生态系统服务价值高的节点, 主要在最小耗费路径的交叉处提取^[43-44], 并将生态功能节点分为三个等级^[25], 促进物质能量流动从高级节点流向低级节点, 保证区域内生态系统的优化组合。

2.2 石羊河流域生态空间结构优化布局

依据石羊河流域生态安全格局的构建, 识别主要生态安全格局组分并剖析其时空分布特征, 依据研究区自然地理特征及当前土地利用现状, 参考杨天荣等^[45]提出的“绿心廊道组团网络式”生态空间结构优化组合模式和郭荣朝^[46]等提出的“廊道组团网络化”的生态空间结构优化组合模式, 对石羊河流域生态安全格局进行空间优化重组。

以识别出的生态源地为基地, 依托地形地貌特征构筑生态安全防护带, 划分石羊河流域生态功能分区; 以主要河流水系、源间廊道、潜在廊道及辐射廊道, 连通功能区, 构建区域生态廊道网络体系; 以不同安全级别生态源地景观类型为生态基质, 统筹主要绿洲区, 结合关键生态战略节点, 强化生态绿洲 (绿心) 保护建设。通过绿洲区、生态节点、廊道网络等“点—线—面”生态空间结构要素的优化重组, 构建一个多层次、复合型“绿洲廊道组团网络化”干旱内陆河流域生态空间结构体系。

3 结果与分析

3.1 石羊河流域生态安全格局

3.1.1 生态源地识别

(1) 水资源安全水平格局 石羊河流域水资源安全水平的评价结果显示 (图 2): 2005—2015 年, 石羊河流域水资源安全格局呈现河网密度越大、距离地表水源地越近安全性越高, 空间上呈现以绿洲为高安全核心的圈层式的空间格局。高度和较高安全水平基本沿着河网分布; 中度安全水平在河流缓冲区范围内, 离水源地近; 而较低和低度安全水平区主要集中在中下游干旱荒漠、半荒漠区。水资源的波动变化主要集中在中下游较低和低度安全水平区。

(2) 生物多样性安全格局 2005—2015 年, 石羊河流域生物多样性水平略有提高, 高安全水平区大体上呈现以上游祁连山水源涵养和河网为“伞面和伞骨”, 河流干流为伞柄的“伞状”空间结构模式 (图 2), 较高安全水平区主要分布在 4 大绿洲区 (武威的盆地绿洲区、金川及河西堡绿洲、昌宁绿洲、民勤绿洲), 低水平区主

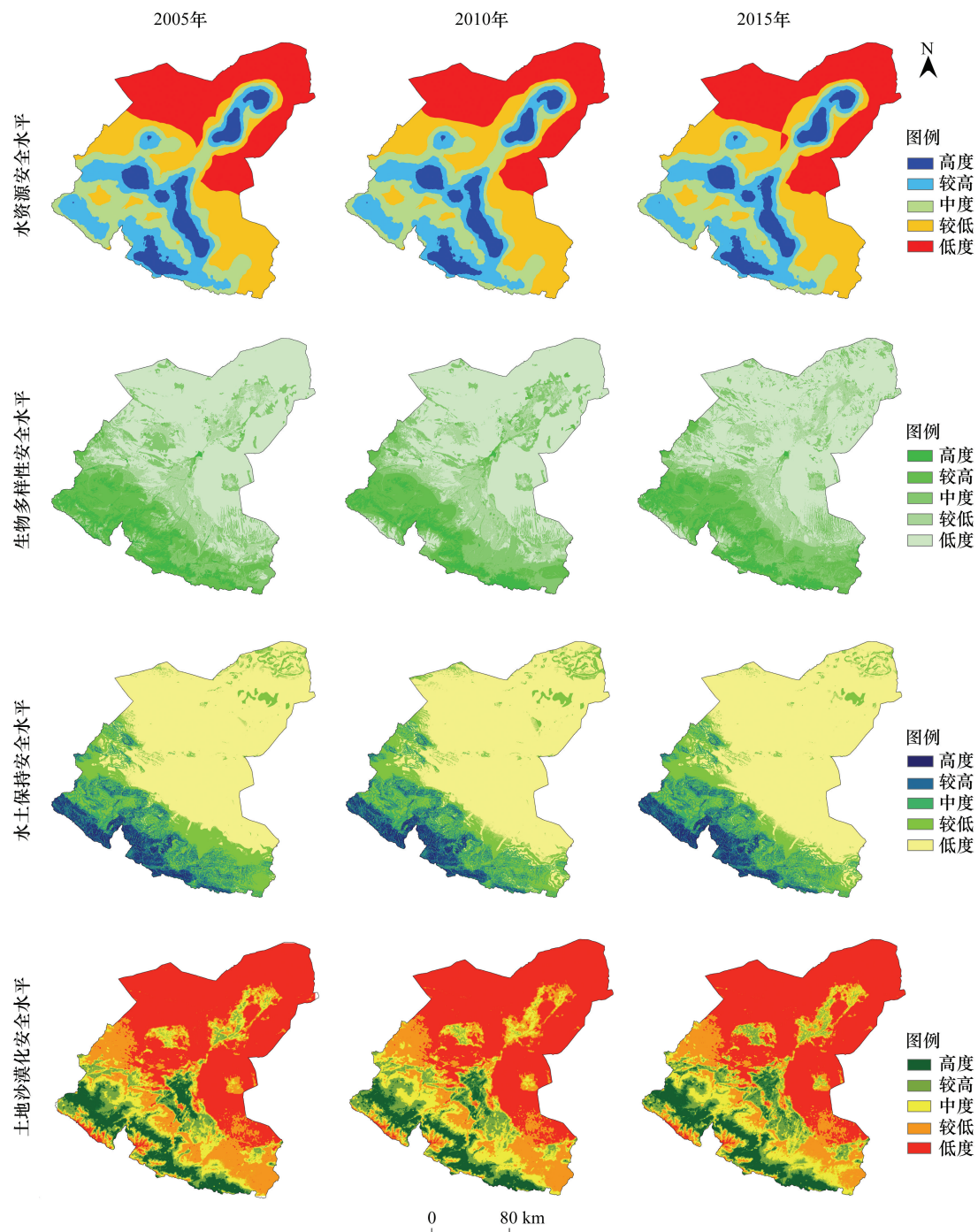


图2 安全水平时空格局

Fig.2 Spatial and temporal pattern of safety level

要分布在荒漠区。2005—2010年石羊河上游东部地区较高安全水平的区域略有减少,下游绿洲区中度安全水平的面积增加。2015年中下游地区生物多样性水平略有提高,多以小面积斑块增长,破碎度高。

(3) 水土保持安全格局 2005—2015年,石羊河流域水土保持安全格局基本稳定,水土保持安全水平低,水土流失严重(图2)。空间上呈现西南方的祁连山水源涵养区为高水平区,其余地区大多均为低安全水平区。

(4) 土地沙漠化格局 石羊河流域干旱荒漠区面积大,土地沙化严重,尤其是下游地区的民勤县东部和西部毗邻我国第四大沙漠——腾格里沙漠,北边紧挨着我国第三的沙漠——巴丹吉林沙漠,土地沙化十分严重,荒漠

化面积占到总面积的 80%以上^[47]。2005—2015 年,石羊河流域土地沙化趋势减弱,高度安全水平区的面积增加(图 2)。2005—2010 年,上游和中游高度安全水平区面积增加,2015 年,下游绿洲区高和较高安全水平区面积增加,流域东部的低水平区向较低安全水平区转移较明显,流域土地沙漠化状况整体呈现好转趋势。

(5)综合生态源地的时空特征 源地一般为生境质量较高的区域,对生态环境具有正向推动的作用^[48],是物种维持和扩散的起始点和生态保护的底线。基于对石羊河流域水资源、生物多样性、荒漠化以及水土保持安全水平的评价结果,识别出生态源地分布,如图 3 所示。2005—2015 年,石羊河流域生态源地面积整体增加,生境质量好转。生态源地主要分布在上游祁连山区和中下游绿洲区。上游祁连山区为水源涵养区是石羊河流域生态安全的基本区域,是城市化发展与资源环境开发建设的生态底线,必须严格禁止开发建设活动。2005—2010 年,研究区南部的生态源地减少,包括天然植被退化的区域,中部地区的生态源地增加,这与中游地区的红崖山水库的蓄水调蓄有关,2010 年源地面积占研究区面积 14.7%。2015 年,研究区的生态源地增加较明显,占区域面积 19.8%,生态环境质量恢复显著。

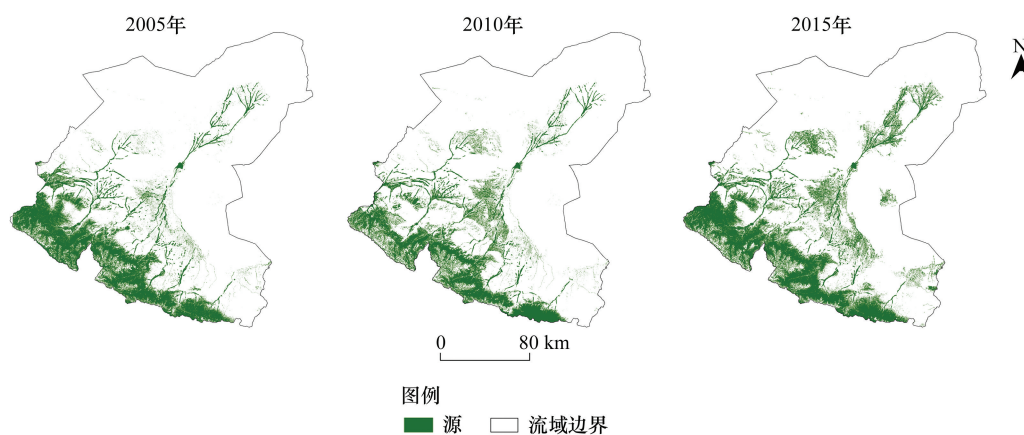


图 3 生态源地时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of ecological sources

3.1.2 阻力面时空变化特征

(1)基本阻力面年际变化 生态源地扩张最小累积阻力面年际变化显示(图 4):2005—2015 年,石羊河流域基本阻力面高值区面积呈现先增加后减少的势态,总体呈减少趋势,生态环境质量总体好转,生态质量好转的区域占总变化面积的 59%(增加的区域表示高阻力值区转向低阻力值区,是生态质量转好的区域,反之,

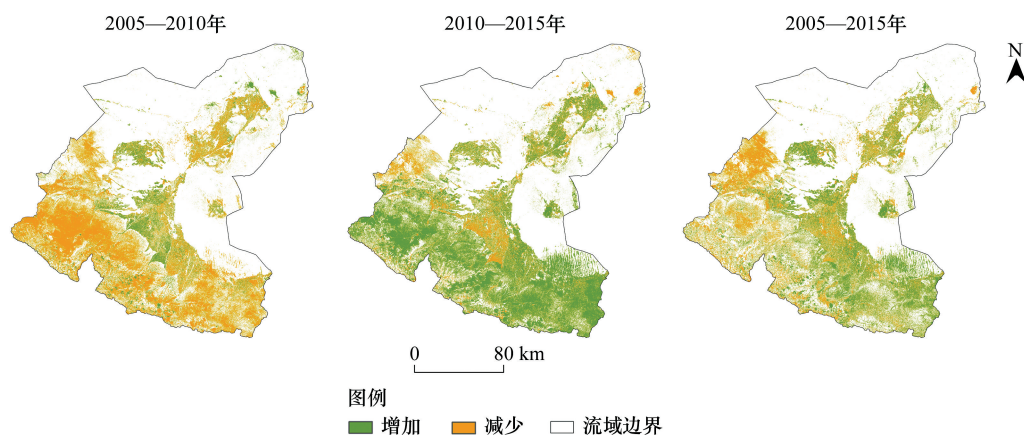


图 4 阻力面年际变化图

Fig.4 Interannual variation diagram of resistance surface

减少的区域是生态质量下降区)。前 5 年减少区面积所占比重较大,生态环境质量恶化,恶化部分主要集中在上游以及下游绿洲区,后 5 年研究区内高阻力值区向低阻力值区转换明显,上游以及中下游绿洲区生态环境质量趋向好转,说明生态治理周期长并存在一定的滞后期。

(2)生态用地的年际变化 石羊河流域生态用地明显增加,生态质量变好的面积占总面积的近 47%,生态环境质量明显趋于好转,特别是 2005—2015 年中下游绿洲区生态环境质量好转趋势明显(表 4、图 5、图 6)。2005—2010 年,生态用地略有减少,生态环境质量略有下降,生态环境质量转好的区域占总变化面积比重较小(约 23%),主要在民勤县西北和东南部。2010—2015 年环境质量转好的区域占总变化面积比重上升(约 37%),主要分布于上游地区和下游绿洲区。

表 4 5 种生态功能区各阶段转换路径及比重/%

转换路径 Transfer path	2005—2010	2010—2015	2005—2015
生态核心区→生态缓冲区 Ecological core area→Ecological buffer area	25.28	6.10	16.30
生态核心区→生态过渡区 Ecological core area→Ecological transition area	0.06	0.21	0.41
生态缓冲区→生态核心区 Ecological buffer area→Ecological core area	7.08	22.55	14.81
生态缓冲区→生态过渡区 Ecological buffer area→Ecological transition area	18.61	17.04	29.32
生态缓冲区→生态优化区 Ecological buffer area→Ecological optimization area	0.00	0.00	0.02
生态过渡区→生态核心区 Ecological transition area→Ecological core area	0.07	0.40	0.35
生态过渡区→生态缓冲区 Ecological transition area→Ecological buffer area	5.03	4.80	4.01
生态过渡区→生态优化区 Ecological transition area→Ecological optimization area	14.06	18.05	27.94
生态过渡区→生态治理区 Ecological transition area→Ecological management area	0.00	0.00	0.03
生态优化区→生态核心区 Ecological optimization area→Ecological core area	0.00	0.01	0.02
生态优化区→生态缓冲区 Ecological optimization area→Ecological buffer area	0.39	0.08	0.23
生态优化区→生态过渡区 Ecological optimization area→Ecological transition area	4.88	1.26	2.24
生态优化区→生态治理区 Ecological optimization area→Ecological management area	6.57	10.18	14.61
生态治理区→生态过渡区 Ecological management area→Ecological transition area	0.00	0.00	0.00
生态治理区→生态优化区 Ecological management area→Ecological optimization area	2.01	0.55	0.45
转换关系累计 Cumulative transformation	84.04	81.23	110.74
不变关系累计 Cumulative invariant	915.96	918.77	889.26

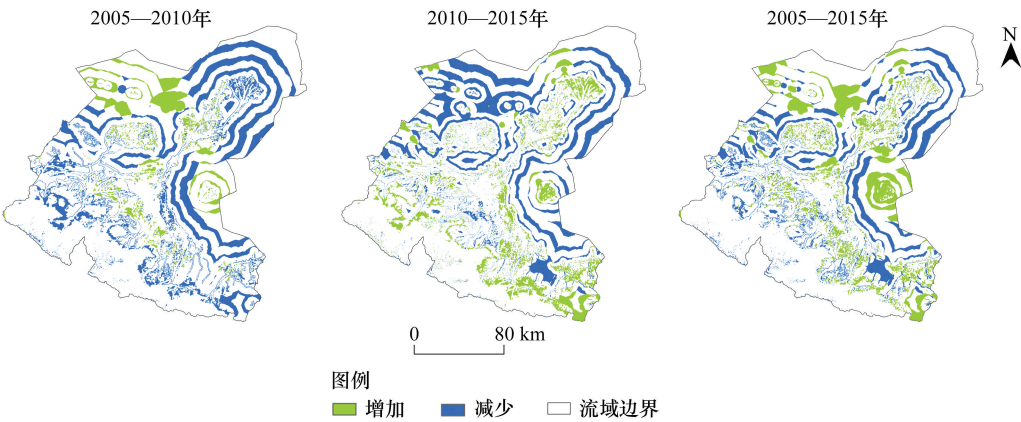


图 5 生态用地年际变化图

Fig.5 Interannual variation of ecological land use

3.1.3 综合生态安全格局构建

在阻力面建立的基础上,分别识别不同安全水平区、源间廊道、潜在廊道、辐射廊道、生态功能节点,并对

其进行叠置组合,构建了石羊河流域生态安全格局(图6)。

整体上,2005—2015年,石羊河流域生态用地增加,生态质量逐渐好转,生态安全格局网络体系趋于复杂完善。2005年生态安全格局中识别出36个战略点,包括一级节点5个,二级节点6个,三级节点25个,21条潜在廊道,23条廊道和众多枝状的辐射廊道,生态战略节点主要分布在廊道交汇处,生态廊道贯穿了整个石羊河流域,2005年的生态廊道主要从南到北有四条主线连接南北主要“源”地,中间的一条主线沿着石羊河干流分布,潜在生态廊道横向连接纵向廊道,部分纵向廊道连接小部分源地与廊道相交,总体生态安全网络格局简单。2010年生态安全格局有36个生态节点其中一级节点5个,二级节点9个,三级节点22个,42条生态廊道和22条潜在廊道,与2005年相比,廊道增多,源与源之间的连通性和网络联系更强,2005年的一些潜在廊道在2010年发展成为廊道,流域上游地区横向和纵向的廊道相互交错,加强了区域之间的联系。2015年提取了35个生态节点,5个一级节点,11个二级节点和19个三级节点,47条廊道和16条潜在廊道,廊道的主线依然沿着石羊河干流及各支流分布,源地面积增加,生态廊道数量增加,在流域的东部和西部部分地区之间的潜在廊道发展为廊道。2005—2010年,潜在廊道主要集中在石羊河上游和中游过渡的地区,是水土保持的重点区域,因此,该地区保持原有廊道的同时着重发展潜在廊道,2010—2015年,廊道明显增加,生态安全格局网络体系趋向复杂完善,生态缓冲区向外围进一步扩张,生态环境质量逐渐好转。

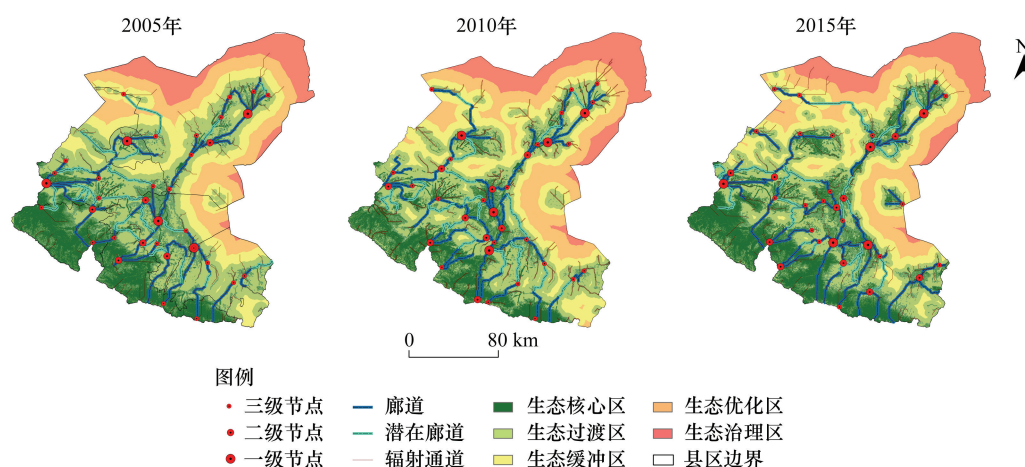


图6 石羊河流域生态安全格局时空演化

Fig.6 Comprehensive ecological security pattern changes in Spatial and temporal

县区尺度上(表5),生态核心区波动变化大致呈现先减少后增加的趋势;生态缓冲区除民勤县和金昌市外,其余县区基本呈现先增加后减少的趋势;生态过渡区除民勤县、武威市和天祝县略有所减少外,其余区域都有一定程度的增加;除了肃南县和天祝县大部分位于生态核心区和缓冲区外,其余县区的优化区和治理区的面积都有所增加。民勤县位于石羊河下游绿洲区域,人类活动聚集,靠近沙漠源区,生态安全具有不稳定性,2005—2015年,民勤生态核心区略有增加,生态缓冲区从2005年的占民勤总面积的25.85%下降到2015年的15.06%,沙漠治理区的面积呈现增加趋势,民勤县依然是石羊河流域生态安全问题的重点关注区。

整体上,受研究区地形及生态源地等分布特征影响,廊道多呈西南—东北走向分布,研究区内生态优化区和治理区面积大,生态脆弱。因此,有必要对流域进行生态空间优化布局,设立防护带,增强防护作用,提高生态环境质量。

3.2 石羊河流域生态空间结构优化布局设计

依据石羊河流域生态安全本底特征的分析及相关政策导向,对石羊河流域各要素优化重组。通过以中下游的绿洲源地为生态绿心,其他用地为基质要素,以主要源地间的生态低阻力区为廊道,介于绿洲区与沙漠区的地带为生态防护带,以生态防护带外的区域为主要治理区,以祁连山北麓地区为水土保持防护带,防护带以

南为水源涵养生态功能区,最终形成绿心点缀基质的三大绿洲区,环绕绿洲区的生态防护带,连接各功能分区的五大主要廊道,构建以“二带区、三绿洲、五廊道、多中心”为核心的“绿洲廊道功能区”的复合型生态空间结构优化体系(图 7)。

表 5 各县区生态安全水平面积比/%
Table 5 Ecological security level area ratio of each county

年份 Year	区划类型 Sectional type	区县 Counties						
		民勤	古浪	肃南	武威	金昌	永昌	天祝
2005	核心区	10.39	27.38	92.52	49.02	39.25	35.05	91.67
	缓冲区	25.85	53.12	7.48	30.80	57.76	45.31	8.27
	过渡区	26.82	15.08	—	15.06	3.00	16.34	0.06
	优化区	23.70	4.42	—	5.12	—	3.30	—
	治理区	13.25	—	—	—	—	—	—
2010	核心区	9.23	16.83	80.20	42.81	38.19	27.77	83.86
	缓冲区	22.85	54.76	19.77	33.78	53.73	48.59	15.63
	过渡区	26.72	20.37	0.03	13.60	8.08	20.72	0.51
	优化区	24.51	8.04	—	9.72	—	2.92	—
	治理区	16.69	—	—	—	—	—	—
2015	核心区	12.89	29.93	87.84	47.05	39.17	30.16	88.09
	缓冲区	15.06	40.01	11.56	28.91	39.90	38.29	11.56
	过渡区	22.97	18.57	0.59	10.20	19.87	23.01	0.34
	优化区	25.78	10.03	—	13.59	1.07	8.37	—
	治理区	23.30	1.46	—	0.24	—	0.17	—

(1) 构筑生态安全防护带,强化“两区”生态环境质量

为保证三大绿洲区的有序发展,防止风沙的进一步吞噬,因而在介于沙漠区和绿洲区极度脆弱地区构建防护带,防止沙化入侵。祁连山北麓生态防护带位于祁连山区与绿洲区的过渡地带,该地区具有保持水土的重要意义。以民勤县下游沙漠区为主的治理优化区和祁连山水源涵养生态功能区,是生态优化布局中的两个重要区域。南部的水源涵养区是整个石羊河的水源地,维持绿洲区正常发展的保障,应加强封育保护,保证水源涵养。优化治理区以沙漠为主,生境质量最差,是绿洲区发展的最大威胁,采用生态措施固定沙源,实施节水灌溉措施,种植沙漠植被进一步提高植被盖度。

(2) 统筹“三绿洲”间关系,构筑廊道网络

基于民勤绿洲、昌宁绿洲和走廊盆地绿洲三大主要绿洲区,以西大河、东大河、石羊大河以及古浪河等为轴线,形成主要自然生态廊道,通过五大廊道增加各绿洲区之间的连通性,更加利于绿洲的发展,两者相辅相成共同促进石羊河流域生态环境发展,构筑更加完善的生态安全格局网络体系。加强生态战略节点、水源地的保护力度,维护重要生态区域,推动能量流、生态流和物种之间扩散。进一步涵养水源、维护生物多样性,优化调

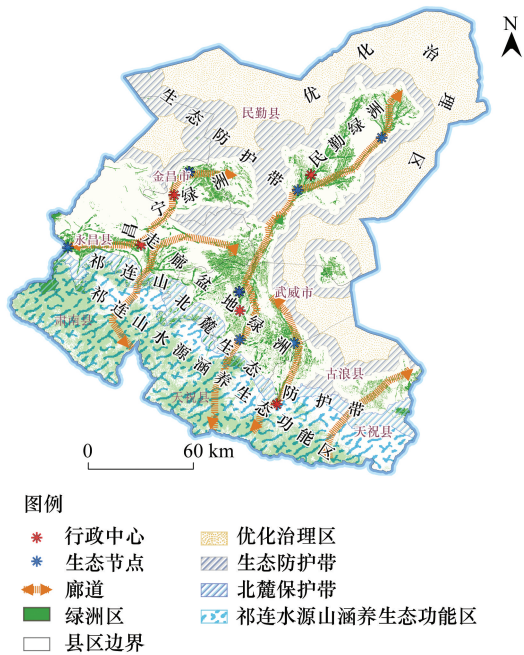


图 7 生态空间结构优化布局设计图
Fig.7 Design drawing of optimized layout of ecological space structure

节绿洲区的人地关系。

(3) 积极响应政府规划,优化生态空间结构

2007 年《石羊河流域重点治理规划》的总体布局中提出,上游地区需加强封育保护,继续建设祁连山水源涵养林区,中下游地区强化节水,进行灌区节水改造,建设绿洲防护林体系。《石羊河流域生态环境综合治理规划》中预计在 2050 年建成祁连山水源涵养区、走廊盆地绿洲功能区、北部荒漠与绿洲交互功能区和荒漠区。本文立足相关政策及规划,以空间形式重构空间边界,从空间视角实现空间治理,对流域内空间结构进行科学合理的划分,推动区域可持续发展。

4 结论与讨论

本文运用距离分析、叠加分析和地统计分析等空间分析方法,利用最小累积阻力模型(MCR)构建 2005—2015 年石羊河流域生态安全格局,分析生态安全水平时空特征,并提出优化方案。主要结论有:

(1) 通过沙漠化、水资源安全、水土保持安全和生物多样性安全性评价,识别生态安全水平高区作为生态源地,2005、2010、2015 年生态源地分别占总区域的 16.7%、14.7%、19.8%;主要分布在祁连山生态保护区,该区域应严格禁止开发建设活动并加强生态保护;2005—2015 年,生态源地呈现出逐年增长的趋势,石羊河流域生态恢复明显。

(2) 基于 MCR 模型将研究区划分为生态核心区、生态缓冲区、生态过渡区、生态优化区和生态治理区 5 种不同安全水平区,生态安全水平由低向高安全水平转化的面积占总转换面积的 47%,生态环境质量好转。2005—2015 年,石羊河流域生态安全格局网络体系更加完趋于复杂、完善。2005 年,识别出 36 个战略点,21 条潜在廊道,23 条廊道和众多枝状的辐射通道,2010 年,识别出 36 个生态节点 42 条生态廊道和 22 条潜在廊道,源与源之间的连通性和网络联系加强,2015 年识别出 35 个生态节点,47 条廊道和 16 条潜在廊道,廊道的主线依然沿着石羊河干流及各支流分布,源地面积增加,生态廊道数量增加,在流域的东部和西部部分地区之间的潜在廊道发展为廊道,流域生态安全格局网络稳定性提升。

(4) 基于生态安全格局组分的优化重组,提出构建以“二带区、三绿洲、五廊道、多中心”为核心的“绿洲廊道功能区”的复合型生态空间结构优化体系,加快推进石羊河流域形成多层次、复合型生态空间格局体系,加强生态脆弱的石羊河流域的生态环境保护与恢复。

通过构建区域生态安全格局,进而优化干旱内陆河生态空间结构,有助于缓解生态脆弱的干旱内陆河流域社会经济发展与生态保护之间的矛盾,促进该地区生态系统与社会经济持续协调发展。本文依据研究区气候和生态环境特征,选取水资源、水土保持、生物多样性和沙漠化 4 个子系统综合评价干旱内陆河流域的生态安全水平,能够更为客观的表征研究区的生态安全水平。生态源地的识别采用了多子系统叠加的方法,综合考虑了生物、沙漠、水土和水资源各个方面的因素,通过各单一格局分别提取源地的方式具有针对性,从而区别于直接将林地或自然保护区作为生态源地,或基于多种生态过程分析后将生境质量高的地区作为生态源地的方法。需要说明的是本文中 NPP 是通过数据重采样获得,在分辨率上可能会对沙漠化格局的结果产生一定的影响,今后对指标的选择及处理需要进一步的完善,使其结果的科学性和准确性更高,其次论文在构建生态安全格局缺乏对社会经济方面的考虑,在优化格局设计中只考虑自然生态廊道,没有考虑人工廊道的构建,使得生态安全格局网络结构简单,相互联通水平较低,在今后的研究中会将社会经济要素及自然廊道和人工廊道有机结合进行深入的研究,使得石羊河流域生态安全格局构建及优化设计更加合理。

参考文献(References):

- [1] 俞孔坚,王思思,李迪华,乔青. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.
- [2] 郭兵,孔维华,姜琳. 西北干旱荒漠生态脆弱性动态监测及驱动因子定量分析. 自然资源学报, 2018, 33(3): 412-424.
- [3] 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(1): 1-12.
- [4] 张蕾,危小建,周鹏. 基于适宜性评价和最小累积阻力模型的生态安全格局构建——以营口市为例. 生态学杂志, 2019, 38(1): 229-236.

- [5] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [6] 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.
- [7] McFarland J H. A National plan study brief. by Warren H. Manning. published as a special supple- published as a special supplement to landscape architeclure for July, 1923. National Municipal Review, 1924, 13(6): 366-366.
- [8] Von Haaren C, Reich M. The German way to greenways and habitat networks. Landscape and Urban Planning, 2006, 76(1/4): 7-22.
- [9] Esbah H, Cook E A, Ewan J. Effects of increasing urbanization on the ecological integrity of open space preserves. Environmental Management, 2009, 43(5): 846-862.
- [10] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [11] Hayward M W. The need to rationalize and prioritize threatening processes used to determine threat status in the IUCN Red List. Conservation Biology, 2009, 23(6): 1568-1576.
- [12] 俞孔坚, 王恩思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [13] 刘洋, 蒙古军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [14] 徐德琳, 邹长新, 徐梦佳, 游广永, 吴丹. 基于生态保护红线的生态安全格局构建. 生物多样性, 2015, 23(6): 740-746.
- [15] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [16] Jogo W, Hassan R. Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: the case of the Limpopo wetland in southern Africa. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1569-1579.
- [17] 李咏红, 香宝, 袁兴中, 刘孝富. 区域尺度景观生态安全格局构建——以成渝经济区为例. 草地学报, 2013, 21(1): 18-24.
- [18] 王耕, 苏柏灵, 王嘉丽, 朱正如. 基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变——以大连市瓦房店为例. 生态学报, 2015, 35(3): 670-677.
- [19] 熊星, 唐晓岚, 叶海跃, 王军围, 刘澜. 基于“源汇”格局的传统乡村景观保护与管控策略. 地域研究与开发, 2019, 38(6): 120-125.
- [20] 付梦娣, 罗建武, 田瑜, 赵志平, 李俊生. 基于最小累积阻力模型的自然保护区网络构建与优化——以秦岭地区为例. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1135-1143.
- [21] 吴健生, 毛家颖, 林倩, 李嘉诚. 基于生境质量的城市增长边界研究——以长三角地区为例. 地理科学, 2017, 37(1): 28-36.
- [22] 戴云哲, 李江风, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1340-1351.
- [23] 田雅楠, 张梦晗, 许荡飞, 张圣微. 基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建. 生态学报, 2019, 39(7): 2311-2321.
- [24] 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.
- [25] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [26] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 童笑笑, 周文佐, 陈若滴, 张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [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] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595.
- [29] 周锐, 王新军, 苏海龙, 娄翼来. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [30] 王娇, 程维明, 祁生林, 周成虎, 张文杰, 全迟鸣. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析——以河北太行山区为例. 地理研究, 2014, 33(4): 614-624.
- [31] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 徐豁. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究. 地理科学, 2006, 26(1): 75-81.
- [32] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [33] 程鹏, 黄晓霞, 李红哲, 李霞, 张琳. 基于主客观分析法的城市生态安全格局空间评价. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 924-933.
- [34] 魏伟. 基于 CLUE-S 和 MCR 模型的石羊河流域土地利用空间优化配置研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [35] 王志杰, 苏娜. 南水北调中线汉中市水源生态脆弱性评价与特征分析. 生态学报, 2018, 38(2): 432-422.
- [36] 孙凡博, 赵春子. 基于熵权法的水资源可持续利用评价——以延边朝鲜族自治州为例. 延边大学学报, 2018, 40(4): 26-31.
- [37] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [38] 魏伟, 雷莉, 范雯, 周俊菊, 师玮, 颜斌斌. 基于累积耗费距离理论的石羊河流域水土资源优化配置. 生态学杂志, 2015, 34(2): 532-540.
- [39] 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.
- [40] 刘媛. 基于 MCR 模型的志丹县土地利用生态安全格局构建[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [41] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [42] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 王熠辉, 郑艳东, 张长春. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(3): 1015-1024.
- [43] 张豆, 渠丽萍, 张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [44] 郑茜, 曾菊新, 罗静, 崔家兴, 孙璇. 武汉市生态网络空间结构及其空间管治研究. 经济地理, 2018, 38(9): 191-199.
- [45] 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(3): 441-452.
- [46] 郭荣朝, 宋双华, 苗长虹. 城市群结构优化与功能升级——以中原城市群为例. 地理科学, 2011, 31(3): 322-328.
- [47] 张雪蕾, 王万瑞, 王刘明, 王帅兵, 李常斌. 石羊河流域干旱变化趋势及气候影响因素. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 598-603, 608-608.
- [48] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.