

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.031

基于MCR模型的市域生态空间网络构建

郭家新¹ 胡振琪^{1,2} 李海霞³ 刘金兰¹ 张雪¹ 赖小君¹

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116;
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 针对目前城市化进程中以中心城区为核心的生态规划因忽视自然与城市之间的空间动态变化而导致城乡人居环境不协调的问题,以唐山市生态空间网络构建为出发点,基于形态学空间格局分析方法(MSPA)、最小累积阻力模型(MCR)对市域生态源地进行识别,提取生态源地间潜在生态廊道,结合重力模型定量分析廊道重要度,并构建唐山市生态空间网络。结果表明:生态源地提取与识别是城市生态网络构建的关键节点,通过识别市域生态源地共33 642个,面积245 674.52 hm²,主要分布于北部山地保护区、中部林地生态保护区和南部湿地保护区,景观类型多为草地和林地,其次为水体;通过斑块重要指数等量化景观要素对生态空间的重要度,识别出30块重要生态源地作为生态廊道的关键节点;基于最小累积阻力和重力模型计算并构建潜在435条关键生态廊道,草地景观、林地景观和水体景观分别占总廊道的51.21%、30.74%和16.46%;源地间的生态作用力及廊道适宜性差异明显,源地14和17之间的相互作用力最大,为14 562.77,源地2和21之间的相互作用力最小,为1.06;源地25(开平区陡河水库)和源地18(滦州市青龙山省级保护区)为南北生态流动的关键源地,在今后的工作中应重点保护和管理。本研究可为唐山市国土空间规划、生态空间构建和生态保护红线管控提供有效支撑,也为类似区域的生态保护管理和生态空间网络构建研究提供了参考。

关键词: 生态空间网络; 形态学空间格局分析; 最小累积阻力模型; 唐山市

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0275-10

OSID:



Construction of Municipal Ecological Space Network Based on MCR Model

GUO Jiaxin¹ HU Zhenqi^{1,2} LI Haixia³ LIU Jinlan¹ ZHANG Xue¹ LAI Xiaojun¹

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The urban ecological space network is the key link to the natural environment and ecosystem, which is also the foundation for maintaining urban ecological security. In the current urbanization process, the core ecological planning based on the central urban area ignores the dynamic changes of the space between nature and the city, which leads to the incoordination of the ecological environment of urban and rural human settlements, and the method and theory of ecological network simulation and analysis are still in development stage. Taking the construction of the ecological space of Tangshan City as the starting point, based on the morphological spatial pattern analysis method (MSPA) and the minimum cumulative resistance model (MCR) to identify the city's ecological sources, and the potential ecological corridors between the ecological sources were extracted, combined with gravity the importance of corridors was quantitatively analyzed and the ecological space network of Tangshan City was constructed. The results showed that the extraction and identification of ecological sources was an important node in the construction of urban ecological network. Through identification and analysis, there were 33 642 urban ecological sources, covering an area of 245 674.52 hm², and mainly distributed in the northern mountain protection area, the central forest ecological protection area and the southern wetland protection area, the landscape types were mostly grassland and woodland, followed by water bodies. By quantifying the

收稿日期: 2020-06-18 修回日期: 2020-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771542)和国家公益性行业科研专项(200911015-3)

作者简介: 郭家新(1992—),男,博士生,主要从事土地复垦与生态修复研究, E-mail: guojx199211@163.com

通信作者: 胡振琪(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事土地复垦与生态修复研究, E-mail: huzq1963@163.com

importance of landscape elements to the ecological space through patch importance index and other quantified importance, totally 30 important ecological sources were identified as key nodes of ecological corridors. Based on the minimum cumulative resistance and gravity model, totally 435 potential key ecological corridors were calculated and constructed, accounting for 51.21%, 30.74% and 16.46% of grassland landscape, woodland landscape and water landscape, respectively. In addition, the ecological forces and the suitability of the corridors between the source areas were significantly different. The interaction force between the sources 14 and 17 was 14 562.77, and the interaction force between the sources 2 and 21 was the smallest of 1.06. Among them, source area 25 (Douhe River Basin in Kaiping District) and source area 18 (Qinglongshan Provincial Nature Reserve of Luanzhou City) were the key ecological source areas for the ecological exchange between the north and the south. In the future work, the protection and management should be focused on. The research result can provide effective support for land space planning, ecological space construction and ecological protection red line control in Tangshan City, and also can provide reference and demonstration for similar regional ecological protection management and construction of ecological space network.

Key words: ecological space network; morphological spatial pattern analysis; minimum cumulative model; Tangshan City

0 引言

生态空间网络是指在特定尺度空间内能识别线性生态廊道特征、有效联系各类生态斑块、并反映空间要素组合规律及结构功能特征的空间组织体系^[1-2]。在经济稳步发展的同时,也会引发耕地破坏、林草地损毁、湿地退化等生态环境问题,使区域生态系统不平衡,且难以恢复,生态网络中重要生态源地逐渐退化或消失^[3-4]。从20世纪70年代起,生态网络研究逐渐被国外学者关注,在模型构建、种群与群落的网络分析、生物多样性保护、景观规划与生态环境保护等方面进行了较多的研究和探索。近年来,景观生态学理论及方法成为生态空间网络格局的研究热点,因其有助于发现不同生态系统的相似性和差异性,故展示了较好的应用潜力^[5]。我国对生态空间网络的研究起步较晚,但发展较为迅速。现有研究多局限于从土地类型方面识别重要生境斑块而构建廊道,并从综合性、稳定性等方面评价生态网络体系的科学性,对景观类型结构性数据研究关注较少^[6-10]。

目前,关于生态网络构建过程已形成基本的模式,包括构建阻力面、生态源地的识别与潜在生态廊道的提取,且不断向量化转变。形态学空间格局分析(Morphological spatial pattern analysis, MSPA)基于图论学原理,结合栅格运算方式在像元级尺度识别生态源地^[11-14]。生态廊道提取通常基于土地类型、地形等因素赋予权重,并构建综合阻力面,表征了地表景观类型对生态流动的阻力影响。最小累积阻力(Minimum cumulative resistance, MCR)模型通过阻力面的权重生成最佳路径,用于提取潜在生态廊道,但这种常规方法忽视了生态源地之间的生态

作用力。重力模型被广泛应用于城市空间结构的优化研究,后来也被应用于城市经济、区域环境间相互作用结构^[15-16]研究。

近年来,我国国土空间规划与管理愈发强调生态空间的重要性,充分识别城市生态空间成为划定生态保护红线、确定城市开发边界和空间管制等政策实施的迫切需求^[17-18]。本文以我国华北地区资源型城市——唐山市为研究对象,根据遥感图像解译土地利用类型,采用MSPA方法识别研究区的核心区景观要素,然后通过选取整体连通性指数(Integral index of connectivity, IIC)、可能连通性(Probability of connectivity, PC)等景观指数,量化重要性程度,提取生态源地,采用最小累积阻力模型构建研究区潜在生态网络和生态廊道,基于重力模型对生态廊道进行分级,并提出区域生态保护管理和构建生态空间网络的建议,以期为唐山市国土空间规划、生态空间构建和生态保护红线管控提供有效支撑,也为类似区域生态空间网络研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

唐山市位于河北省东部、华北平原东北部,渤海湾中心地带,介于117°31'~119°19'E, 38°55'~40°28'N,属暖温带半湿润季风气候,呈现出明显的大陆性气候特征,年平均气温12.5℃,常年降水量500~700 mm,辖区面积 1.43×10^6 hm²(图1)。北依燕山,毗邻京津,境内有南湖湿地、唐津运河生态公园、曹妃甸湿地公园、乐亭县金银滩国家森林公园保护区、遵化鹞峰山森林保护区、迁西景忠山森林保护区、迁安徐流口森林保护区等国家级或省级重点生态保护区。102国道、112国道、205国道、京哈铁路

等主要交通干线构成了县域生态空间网络的重要骨架。但是,由于唐山市长期以来经济优先的发展策略导致环境污染,生态格局破坏,环境日益恶化^[19-20]。通过空间规划引导实现绿色网络体系的完善与构建,合理利用良好的自然山水格局,以实现唐山市生态网络体系修复和发展显得尤为重要。

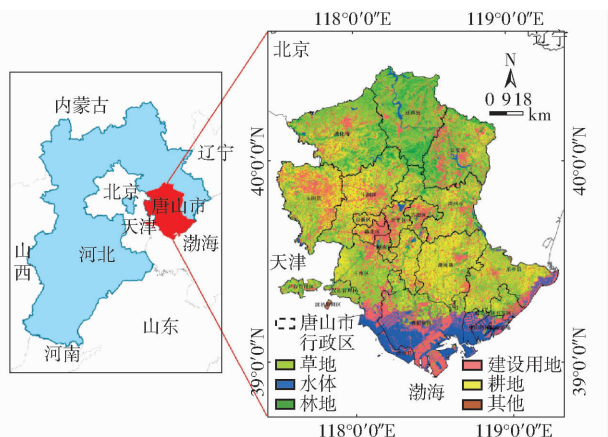


图 1 研究区及土地利用分布图

Fig. 1 Study area and land use distribution map

1.2 数据处理

本研究主要采用 Landsat8 OLI 卫星数字产品 2018 年 8 月 30 m 分辨率的遥感影像(地理空间数据云)、30 m 分辨率数字高程数据(地理空间数据云)和 2018 年唐山市行政边界数据(唐山市自然资源和规划局)。通过 ENVI 和 ArcGIS 软件对遥感影

像进行预处理,然后运用最大似然法进行监督分类,提取林地、草地、水体、建设用地、耕地和其他主要景观要素等。最后通过高精度航拍数据对解译的土地利用进行精度验证。最后通过 ArcGIS 软件完成基本图件的制作。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 MSPA 景观格局分析

MSPA 分析方法^[21]不同于传统生态理论的粗提取方式,而是基于图形学原理,运用开闭运算等数学方法对栅格图像进行识别、分割,并解译研究区地类要素,从而得出像元层面的景观生态斑块。根据解译后的唐山市土地利用数据,提取林地、草地、水体要素作为 MSPA 分析的前景数据,建设用地、耕地等作为背景数据。将数据二值化栅格处理,运用 Guidos Toolbox 分析软件,采用八邻域图像细化分析方法^[22]快速准确地提取像素目标和矢量化跟踪,最后得到 7 种互不相交的景观类型,分别为核心区、桥接区、岛状斑块、支线、边缘区、环道区和孔隙(图 2)。最后对分析结果进行面积等统计(表 1),提取核心区斑块作为连通性分析的生态源地。景观类型及颜色符号详情参见 Guidos Toolbox 手册^[23]。

1.3.2 重要生态源地识别与评价

生态源地的选取是构成生态网络最为重要的空间骨架,通过景观连通性指数识别重要生态源地构建生态空间网络具有一定的生态学意义。景观连通性是指景观要素在空间单元之间的相互连续性,能

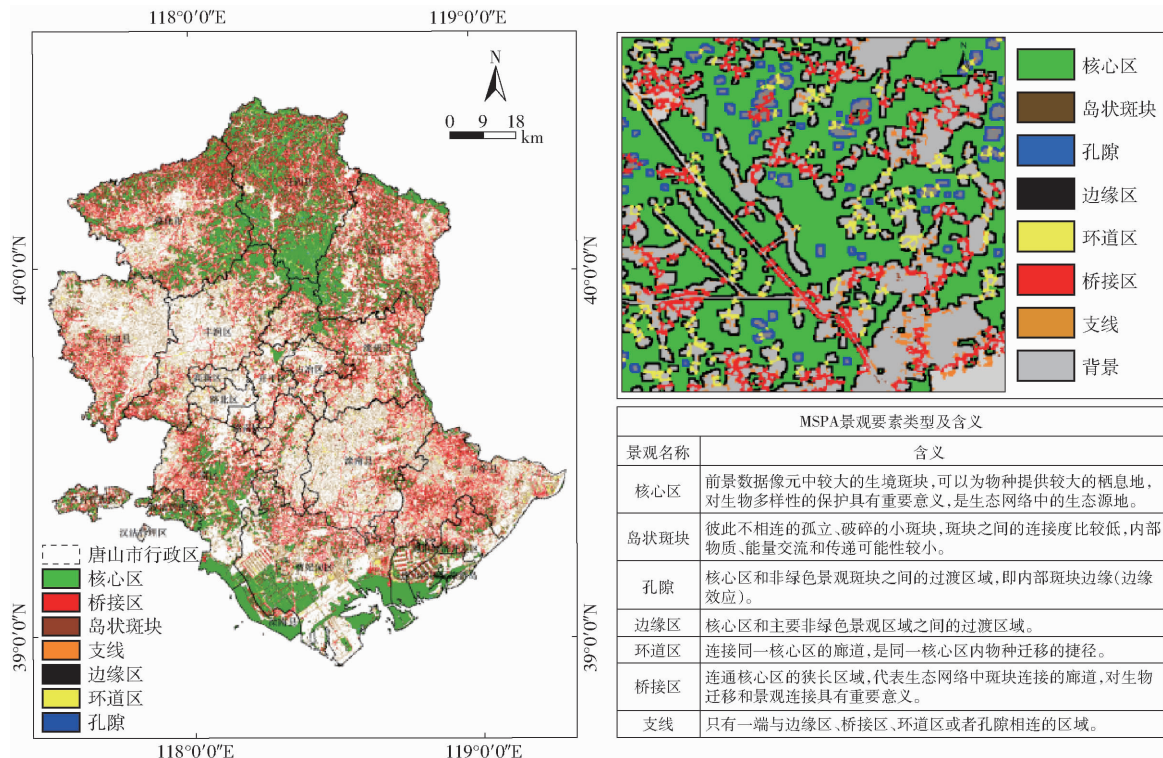


图 2 基于 MSPA 的景观分类及含义

Fig. 2 Landscape classification and meaning based on MSPA

表1 唐山市不同景观要素面积与比例

Tab. 1 Area and proportion of different landscape elements in Tangshan City

景观类型	总面积 $A/$ hm^2	面积百分比/ %	草地		林地		水体	
			面积 $C/$ hm^2	百分比 $C/A/\%$	面积 $L/$ hm^2	百分比 $L/A/\%$	面积 $S/$ hm^2	百分比 $S/A/\%$
核心区	245 674.52	34.03	102 637.94	41.78	79 285.79	32.27	63 750.79	25.95
桥接区	235 585.61	32.63	185 115.05	78.58	38 518.18	16.35	11 952.38	5.07
岛状斑块	70 958.27	9.83	56 236.73	79.25	5 643.53	7.95	9 078.01	12.79
支线	50 633.77	7.01	42 096.63	83.14	5 182.14	10.23	3 355.00	6.63
边缘区	80 054.82	11.09	51 470.84	64.29	18 195.24	22.73	10 388.74	12.98
环道区	28 797.35	4.00	20 267.32	70.38	5 363.07	18.62	3 166.96	11.00
孔隙	10 210.86	1.41	6 964.12	68.20	2 904.18	28.44	342.56	3.35
总计	721 915.20	100	464 788.63	64.39	155 092.13	21.48	102 034.44	14.13

够量化表征某要素在生态源地之间物质扩散和迁移的难易程度。目前, MSPA 分析常用景观连接指数包括: 整体连通性指数 (IIC)、可能连通性指数 (PC)、斑块重要性指数 (dI) 等。本文基于文献[24 -

26], 选用 IIC、PC 景观指数, 基于 Conefor 软件将斑块连通距离阈值设置为 1 500, 连通概率设为 0.5, 对核心区进行重要生态源地识别, 并通过中介中心性度量 (Q_i) 进行重要生态源地评价 (表 2)。

表2 重要生态源地景观连通指数与面积统计

Tab. 2 Landscape connectivity index and area statistics of important ecological sources

源地编号	dI_{IIC}	dI_{PC}	Q_i	面积/ hm^2	源地编号	dI_{IIC}	dI_{PC}	Q_i	面积/ hm^2
1	0.91	0.93	0.80	24 809.70	16	0.30	0.32	0.19	1 611.57
2	0.72	0.74	0.61	13 046.70	17	0.29	0.31	0.18	1 574.13
3	0.63	0.65	0.52	7 742.87	18	0.29	0.31	0.18	1 564.36
4	0.62	0.64	0.51	7 294.75	19	0.29	0.31	0.18	1 545.36
5	0.58	0.60	0.47	5 352.88	20	0.27	0.29	0.16	1 443.61
6	0.55	0.57	0.44	3 644.06	21	0.26	0.28	0.15	1 404.12
7	0.53	0.55	0.42	2 662.41	22	0.25	0.27	0.14	1 346.48
8	0.52	0.54	0.41	2 532.71	23	0.25	0.27	0.14	1 340.06
9	0.52	0.54	0.41	2 436.37	24	0.24	0.26	0.13	1 325.56
10	0.51	0.53	0.40	2 293.44	25	0.22	0.24	0.11	1 189.22
11	0.51	0.53	0.40	1 871.51	26	0.21	0.23	0.10	1 170.42
12	0.50	0.52	0.39	1 747.66	27	0.20	0.22	0.09	1 107.42
13	0.50	0.52	0.39	1 744.52	28	0.20	0.21	0.08	1 078.58
14	0.49	0.51	0.38	1 645.06	29	0.20	0.21	0.08	1 067.16
15	0.49	0.51	0.38	1 640.39	30	0.20	0.21	0.08	1 039.91

$$I_{IIC} = \frac{1}{A_L^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}} \quad (1)$$

$$I_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}^*}{A_L^2} \quad (2)$$

$$dI = \frac{I - I_{remove}}{I} \quad (3)$$

$$dI_{IIC} = \frac{I_{IIC} - I_{IICremove}}{I_{IIC}} \quad (4)$$

$$dI_{PC} = \frac{I_{PC} - I_{PCremove}}{I_{PC}} \quad (5)$$

a_i, a_j ——斑块 i, j 的面积, hm^2

l_{ij} —— i 到 j 的最短路径

I_{PC} ——可能连通性指数, 取值 0 ~ 1

P_{ij}^* ——物种在斑块 i, j 间扩散的最大概率

dI ——斑块重要性指数, 取值 0 ~ 1

I ——景观指数

dI_{IIC} ——要素在景观中整体重要程度, 取值 0 ~ 1

$I_{IICremove}$ ——在景观中除去某要素后景观整体连接度指数

dI_{PC} ——要素在景观中可能重要程度, 取值 0 ~ 1

$I_{PCremove}$ ——在景观中除去某要素后景观可能连接度指数

式中 I_{IIC} ——整体连通性指数, 取值 0 ~ 1

A_L ——景观总面积, hm^2

n ——斑块总数

将 $dI_{IIC} > 0.2$ 、 $dI_{PC} > 0.2$ 的生态斑块划定为重要生态源地。

由于 Conefor 2.6 计算中不同斑块对景观连接性贡献方式不同,选取中介中心性度量(Q_i)对完整生态网络中不同斑块进行重要程度界定。式中 Q_i 量化斑块 i 在整个生态斑块中重要程度(其中 Q_i 越接近 1 说明其在生态源地的面积占比越大,重要性越大), $dPC_{connector}$ 量化了斑块 i 在整个生态网络中连接重要性

$$dPC = dPC_{intra} + dPC_{flux} + dPC_{connector} \quad (0 < dPC \leq 1) \quad (6)$$

$$Q_i = \frac{dPC_{connector}}{dPC} \quad (0 < Q_i \leq 1) \quad (7)$$

式中 dPC_{intra} —— 斑块自身属性(如面积)对自身连接性的贡献

dPC_{flux} —— 斑块以自身属性(如面积)为权重,到每一个斑块产生的最大生态流

$dPC_{connector}$ —— 斑块作为连接点对维持景观中其他斑块连接性的作用,用于评价斑块位置的重要性

借助 Conefor 软件对研究区域的重要生态源进行中介中心性指数分析计算,并将计算结果进行定性分类:将 $0.5 \leq Q_i$ 划定为较高栖息地; $0.2 < Q_i < 0.5$ 划定为中等栖息地; $0 \leq Q_i \leq 0.2$ 划定为一般栖息地(图 3),并结合市域生态保护区空间分布,最终实现对研究区潜在生态网络中生态源斑块内涵的定性。

1.3.3 基于最小累积阻力模型的潜在生态网络构建
生态物质的流动在内部需要克服一些阻力。研

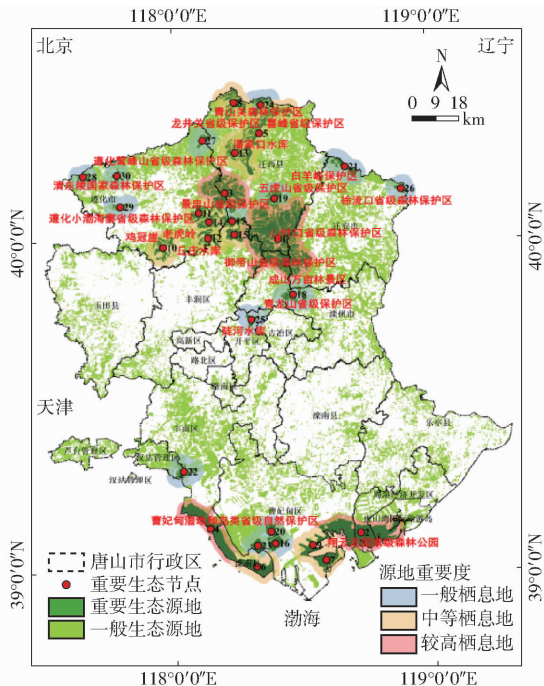


图3 唐山市生态源地与生态保护区分布图

Fig.3 Distribution map of ecological source areas and ecological protection areas in Tangshan City

究区的阻力要素由 17 个因素评估,包括景观因子(核心区、桥接区等)、土地利用(林地、草地等)、高程因子等。每个因子的阻力根据评估系统设定(表 3)。此外,发展策略将影响某些因素的阻力,并最终影响研究区生态流动的最小累积消耗阻力。例如,植被覆盖度越高,水网越近,生态保护模式中的生态阻力越小。

表 3 阻力层权重与因子阻力

Tab.3 Resistance layer weights and factor resistance values

阻力层	权重	阻力因子	阻力
MSPA 景观类型	0.45	核心区	5
		桥接区	10
		环道区	30
		支线	40
		岛状斑块	50
		边缘区	60
		孔隙	70
土地利用类型	0.30	背景	100
		林地	5
		草地	10
		水体	10
高程 h	0.25	耕地	50
		建设用地	100
		$h < 200$ m	5
		$200 \text{ m} \leq h < 600$ m	50
		$600 \text{ m} \leq h < 800$ m	80
		$h \geq 800$ m	100

最小累积阻力模型可以确定起始源和目标源之间的最短路径,表示生态流从一个生态源地到另一个生态源地克服生态阻力面的最小累积距离^[27]。该方法是在 GIS 平台支持下,通过生态源和阻力系数的设置,来确定核心区之间的连接路径。结合 MSPA 分析结果,提取相应的生态源地,不同源地具有不同的生态能量,它们辐射和传递能量的能力不仅与其面积有关,而且与生态源的类型和形状有关。本文对不同的土地覆盖类型分别赋值,构成阻力面模型。景观阻力越大,表明物种迁移难度较大。

$$V_{CR} = \sum R_{ij} W_i \quad (8)$$

式中 V_{CR} —— 生态阻力面

R_{ij} —— 第 i 个栅格单元的第 j 个指标的安全指数

W_i —— 第 i 个指标的权重

$$M_{CR} = f_{\min} \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} D_{ij} R_i \quad (9)$$

式中 M_{CR} —— 最小累积阻力

f_{\min} —— 反映 M_{CR} 与变量 D_{ij} 、 R_i 之间正比关系的函数

D_{ij} ——生态源从 j 穿过 i 的空间距离

R_i ——物种穿越某景观表面 i 的阻力

基于 ArcGIS 10.4 的空间分析模块通过建立的

生态阻力面(图 4a)计算生态斑块间欧氏距离和成本加权距离确定生态源地间最小路径,并对冗余路径进行剔除,构成分析的潜在生态廊道(图 4b)。

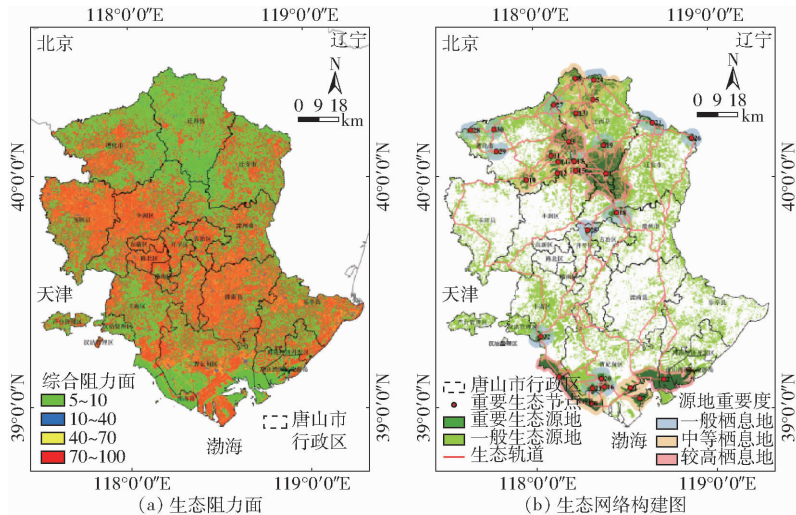


图 4 基于最小累积阻力模型的生态阻力面和生态网络构建图

Fig. 4 Ecological resistance surface and ecological network construction diagram based on minimum cumulative resistance model

1.3.4 基于重力模型的重要生态廊道识别

19 世纪,学者研究城市系统的相互作用时将重力模型引入到地理空间的研究中,并用于分析城市之间贸易的相互作用以及国家之间贸易交流形式的研究。本文尝试将重力模型引入景观生态领域,可以定量评价源地斑块间的相互作用强度,从而科学判定潜在生态廊道的相对重要性^[28-30],计算式为

$$F = G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\frac{\ln a_i \ln a_j}{P_i P_j}}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}}\right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln a_i \ln a_j}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (10)$$

式中 F ——生态重力

G_{ij} ——斑块 a 、 b 之间的生态引力

N_i 、 N_j ——两斑块的权重

P_i 、 P_j ——斑块 i 、 j 的阻力

L_{ij} ——斑块 i 到 j 之间廊道的累积阻力

L_{\max} ——研究区中所有廊道阻力的最大值

通过重力模型可以计算出生态源地之间的生态引力。值越高,表明生态源地之间的联系越紧密,能量传递和物质迁移就越频繁。重力模型的计算结果如图 5 所示,将生态引力大于 150 的廊道作为一级廊道,共计 59 条;生态引力大于 10 而小于等于 150 的作为二级廊道,共计 161 条;其他作为三级廊道,共计 215 条,得到研究区生态网络图如图 6 所示。

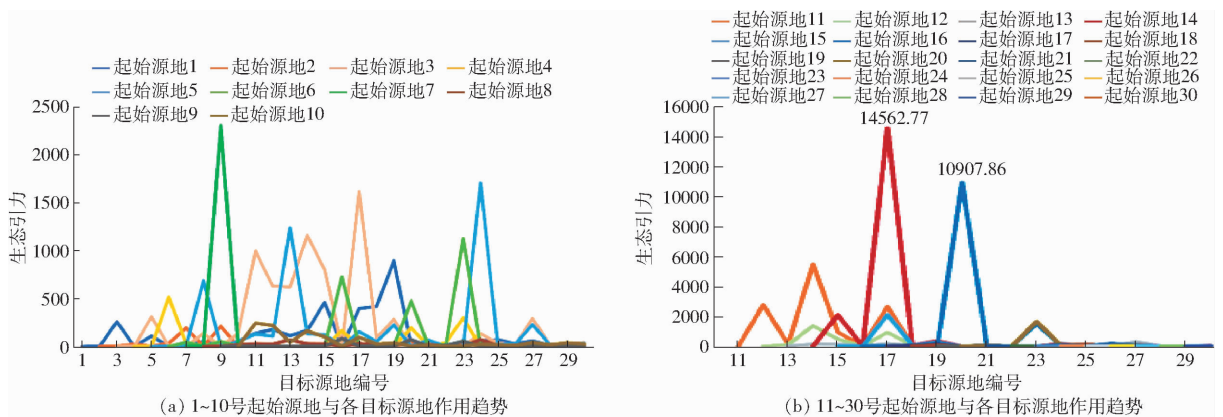


图 5 起始源地到目标源地之间的生态引力(源地 1~30)

Fig. 5 Interaction force between initial source and target source (source 1 ~ 30)

2 结果分析

2.1 基于 MSPA 的景观格局分析

如表 1 和图 2 所示,基于 MSPA 分析的唐山市

景观要素面积 721 915.20 hm^2 ,其中核心区面积为 245 674.52 hm^2 ,占研究区景观要素面积的 34.03%,景观类型多为草地,其次为林地和水体;且主要分布于遵化市东南部、迁西县、迁安市西部、丰

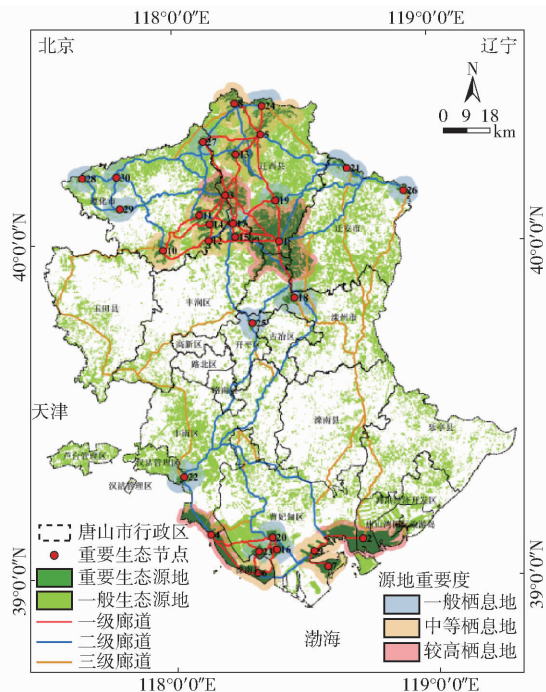


图6 唐山市重要生态源地与生态廊道构建图

Fig. 6 Construction map of important ecological sources and ecological corridors in Tangshan City

润区东北部自然保护区以及曹妃甸区南部湿地保护区。其中北部核心区呈东西向条带式分布,中部和南部呈集聚状态,面积较大,稳定性较强;中南部较为稀少,且破碎化较严重,更加表明研究区南北地区之间核心斑块连通性较差,生态流动困难;桥接区是连接核心区的狭长区域,其面积 235 585.61 hm^2 ,占研究区景观要素面积的 32.63%,代表生态网络中的连接廊道,主要为山区郊野、河流沿岸及交通道路两侧林草地景观斑块,如市域北部燕山山脉、迁西县和迁安市境内滦河沿岸、玉田县和丰润区境内 G1 高速两侧林地生态带等,构成物质流动的重要景观要素;岛状斑块是孤立的绿地景观,且不与其他斑块相连接,面积 70 958.27 hm^2 ,占景观要素面积的 9.83%,可以作为生态要素流动的临时栖息地,可以间接提高生态斑块的连通性。边缘区面积为 80 054.82 hm^2 ,占景观要素面积的 11.09%,边缘区是核心区和非绿色景观区域之间的过渡区域,可产生物种生存的边缘效应,边缘区面积越多,则适宜物种生存的核心区就越多,即表示分散越严重。

2.2 重要生态源地识别与评价分析

重要生态源地是生态网络的关键节点,其斑块面积大,生态资源充足,有利于物质、能量和信息的交换,而且能更有效地维持和发挥景观生态功能,通过核心区(生态源地)各斑块的整体连通性指数(IIC)、可能连通性指数(PC)以及斑块重要性指数(dI)表征计算结果,将分别大于 0.2 的 30 块核心区

生态斑块划定为重要生态源地。如图 3 所示,重要生态源地主要分布于市域北部和南部湿地,而且都是唐山市生态保护用地的集中分布区,生态环境质量现状较好,但是原划定的生态保护区整体存在系统碎片化问题,南北各保护区相互孤立,互不连通,特别是位于中部分界点的陡河流域与南部湿地保护区距离较远,产生严重的生态流动断面,导致保护区内部物质循环和生态要素流动性不足。

结合唐山市国家级、省级自然保护区分布情况以及表 2 计算结果分析,源地 1 的 dI_{IIC} 和 dI_{PC} 最大,分别为 0.91 和 0.93,面积 24 809.70 hm^2 ,位于迁西县南部和迁安市西部山叶口省级森林公园等连片山林保护区;源地 2 dI_{IIC} 和 dI_{PC} 分别为 0.72、0.74,面积 13 046.70 hm^2 ,主要包含翔云岛国家级森林保护区等;源地 3 位于遵化市和迁西县交界处,主要分布着景忠山、卧龙山等森林保护区;源地 4 主要包含曹妃甸南部湿地和鸟类省级自然保护区等。源地 5~15 各连通性指数在 0.2 以上,属于中等偏下,主要分布于市域北部的山区、流域附近;其余斑块连通性指数相差不大,面积在 1 000 hm^2 以上,但整体指数较低,对整个研究区的连通性贡献程度基本一致。

通过中介中心性度量(Q_i)计算重要生态源地重要程度,可以为网络体系现状的重要斑块保护以及远期的生态网络发展指引提供科学依据。根据表 2 中 Q_i 计算结果,将源地 1~4 划定为较高栖息地;源地 5~15 划定为中等栖息地;源地 16~30 划定为一般栖息地;从而实现了研究区域潜在生态网络中生态源地斑块内涵的确定(图 3)。

2.3 关键生态廊道提取分析

通过构建的生态阻力面发现(图 4a),唐山市从北向南阻力逐渐增大,阻力较低的地区主要位于北部和西南部,由于迁西县、遵化市山区林地、草地资源和南部曹妃甸区湿地资源丰富,在严格限制经济发展的同时,使水域、湿地和林草地资源得到更好的保护;而阻力较大的地区位于市域中部的中心城区(丰润区、开平区、路北区、古冶区、路南区)、玉田县东和中南部滦南县,这里大多由耕地覆盖,建设用地集中,构成生态屏障,导致局部区域引起较高的生态阻力。从阻力面构建可以看出,研究区内经济优先的发展趋势已经严重阻碍生态能量的流动,由于生态廊道形成,可以使不同景观要素之间构成连接桥^[31]。

结合提取的 30 个重要生态源构建 435 条总长度为 3 651.98 km 的潜在生态廊道(图 4b),廊道宽度为 30 m,总面积为 10 955.46 hm^2 (表 4)。草地在廊道中的面积为 5 610.44 hm^2 ,占总廊道面积的

51.21% ; 林地在廊道中的面积为 3 368.10 hm², 占总廊道面积的 30.74% ; 水体在生态廊道中起到一定阻碍作用, 然而水体周边的绿地是作为源地和廊道的重要建设区, 适宜物种活动, 面积 1 803.17 hm², 占总廊道面积的 16.46% ; 在未来廊道内部景观建设中以草地、林地和水域作为景观规划要素可以降低建设成本, 还能够有效实现生态物种迁移和生物多样性的保护。建设用地人为活动频繁的区域能够阻碍物种迁移和扩散, 占总廊道面积的 1.29%。穿过建设用地和耕地的生态廊道占比较小, 更加

反映了人为活动和生产生活导致区域生态质量较差。潜在生态廊道分布于整个研究区, 使得生态空白区与大型生态斑块之间的生态联系更加紧密。其间的桥接区(山区郊野、河流沿岸及交通道路两侧林草地景观斑块)和岛状斑块(孤立的绿地要素)有机地融入生态网络。通过生态廊道将位置较为分散的源地和其他分布较为集中的源地构成有机整体, 实现了生态关键点与大型生态斑块之间的有效连接, 为市域生态网络体系的构建奠定了基础。

表 4 唐山市土地利用类型在廊道中的面积与百分比

Tab.4 Area and proportion of land use types in corridors in Tangshan City

廊道类型	总计/ hm ²	草地		林地		水体		建设用地		耕地	
		面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
一级廊道	1 552.14	757.58	48.81	672.23	43.31	118.59	7.64	3.11	0.20	0.62	0.04
二级廊道	3 900.32	1 760.69	45.14	1 463.22	37.51	630.77	16.17	35.11	0.90	10.53	0.27
三级廊道	5 503.00	3 092.17	56.19	1 232.65	22.40	1 053.81	19.15	103.45	1.88	20.91	0.38
总计	10 955.46	5 610.44	51.21	3 368.10	30.74	1 803.17	16.46	141.67	1.29	32.06	0.29

源地之间的作用强度表明潜在生态廊道的相互作用力。通过重力模型计算结果绘制直观图(图 5)来表示起始源地到各目标源地之间的作用力。由图 5 可以看出, 源地 14 和 17、源地 16 和 20 之间的相互作用力较大, 分别为 14 562.77 和 10 907.86, 分别位于景忠山省级保护区和曹妃甸湿地鸟类省级自然保护区范围内, 表明源地之间的连通性最强, 物质流和能量流的迁移更加频繁, 今后工作中应重点保护。相比之下源地 2 和 21 之间的相互作用力最小, 为 1.06, 说明景观阻力大, 生态廊道之间的物质交换能力困难, 必将导致物质流和能量流无法迁移。因此在未来规划中应在廊道间增加生态源地, 改善生境质量提高廊道的生境适宜性, 促进物质流和能量流的迁移。

根据重力模型计算廊道的相互作用力对廊道进行分级(图 6), 其中一级廊道主要是市域范围内划定的生态保护区与其他源地之间所构建的生态网络, 主要集中在市北部和南部。如北部源地 1、5 和 10, 以及南部源地 2、4 和 6 作为重要节点, 相互形成密集的一级廊道骨架, 将迁西县、遵化市和丰润区东部境内的青山关森林保护区、龙井关省级保护区、景忠山省级保护区、山叶口省级保护区、御带山省级保护区、万亩林省级保护区、青龙山省级保护区以及南部曹妃甸湿地鸟类省级自然保护区、翔云岛国家森林公园等相互连接, 在今后的规划中应加强防护林建设, 重点保护其生态环境, 保证源地的连通。二级廊道的主要作用是提升位置相对分散的源地的物质连接性, 贯穿于市域的南北两地, 密集分布于遵化

市西北部清东陵国家森林公园保护区、鹞峰山省级森林保护区、小渤海寨省级森林保护区; 迁安市北部白羊峪保护区、徐流口省级森林保护区; 曹妃甸南部湿地。其中源地 25(开平区陡河水库)和源地 18(滦州市青龙山省级保护区)为南北生态交流的关键生态源地, 应严格控制和保护其周边的生态, 加强水域环境和人工林防护以及南北生态断裂点修复, 保证物质循环流动。三级廊道主要为景观作用力较小的生态斑块。分布于市域边缘, 使得区域形成较好的生态保护屏障, 在一定程度上约束了市域周边环境的危害, 保障了区域生态安全。

总体看来, 一级廊道和二级廊道构成研究区生态网络的主体骨架, 是生态源地与其他源地相互连通的重要保障。三级廊道主要以市域周边斑块较小的生态源为连接节点, 从另一方面可以保护周边生态脆弱性景观避免损害。因此一级廊道和二级廊道的保护是未来工作的重点。另外, 生态网络中玉田县、滦南县和乐亭县境内连接的廊道较少, 生态网络不够完善, 需要在今后增补生态源地来完善整体网络, 加强内部生态联系, 缓解城市发展生态保护的矛盾, 促进土地资源的合理利用。

2.4 讨论

当前, 国土空间生态修复与保护亟待提出系统方法, 也是未来空间规划研究的重要内容^[32-34]。市域生态空间网络是与自然环境及生态系统连接的关键纽带, 是维护城市生态安全的基础, 也是国土空间规划中生态保护红线划定后需要重点管控的基本单元。但是, MSPA 分析法在生态网络构建研究中仍

存在局限性,整个研究过程通过重要生态源地构建生态网络体系,在空间上反映生态景观的连通,但是由于个别生态斑块面积较大且数量悬殊,在分析过程中没有针对生态特性分类进一步考虑,因此今后应加强生态网络的复杂性研究,找到可识别、最优的生态网络构建模式。

3 结论

(1) MSPA 方法对于研究区景观要素的识别较为敏感,通过景观连通性指数(IIC、PC)和中介中心性度量(Q_i)对研究区生态源地进行提取,以识别的30个核心区斑块作为重要生态源地,定量分析了唐山市生态景观连通性和生态要素的重要程度,基于城市生态现状较为精确地构建了生态空间网络。

(2) 基于MCR模型综合考虑MSPA景观要素、

土地利用类型及高程构建综合阻力面以及市域范围内适宜生态保护的生态廊道,在一定程度上约束了市域周边环境的危害,保障了区域生态安全,改善了区域生态保护路径,为绿色基础设施网络构建与生态保护规划的制定提供新的思路和方法。

(3) 基于重力模型综合考虑并量化生态源地之间的相互作用,构建唐山市生态保护的三等级廊道。处于一级廊道的主要是市域范围内划定的生态保护区与其他源地之间所构建的生态网络,主要集中在市北部和南部,相互形成密集的一级廊道骨架,其中源地14和17、源地16和20之间的相互作用力较大。二级、三级廊道多以桥接区等景观要素贯穿于市域的南北两地,其中源地25(开平区陡河水库)和源地18(滦州市青龙山省级保护区)为南北生态交流的关键生态源地,应严格控制和保护其周边的生态,避免环境遭到破坏。

参 考 文 献

- [1] 苏凯,于强,YANG Di,等.基于多场景模型的沙漠-绿洲交错带林草生态网络模拟[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):243-253.
SU Kai, YU Qiang, YANG Di, et al. Simulation of forest-grass ecological network based on multi-scene model in typical desert-oasis ecotone[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):243-253. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190929&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.029. (in Chinese)
- [2] 王戈,于强,YANG Di,等.包头市层级生态网络构建方法研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):235-242,207.
WANG Ge, YU Qiang, YANG Di, et al. Construction method of hierarchical ecological network in Baotou City [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):235-242,207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190928&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.028. (in Chinese)
- [3] LIN Q, MAO J, WU J, et al. Ecological security pattern analysis based on InVEST and least-cost path model: a case study of Dongguan Water Village[J]. Sustainability, 2016, 8(2):172.
- [4] 刘歆,角媛梅,王梅,等.基于图论的哈尼梯田区河渠网络关键节点和廊道评价[J].生态学杂志,2018,37(1):287-294.
LIU Xin, JIAO Yuanmei, WANG Mei, et al. Evaluation of key nodes and corridors of river and canal network in Hani Rice Terraces based on graph theory[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1):287-294. (in Chinese)
- [5] ANDREA De M, AMEDEO G, MATTEO C, et al. Comparative ecological network analysis: an application to Italy[J]. Land Use Policy, 2019, 81(1):714-724.
- [6] HU Zhenqi. Special issue on land reclamation in ecological fragile areas [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(1):1-2.
- [7] 裴燕如,武英达,于强,等.荒漠绿洲区潜在生态网络增边优化鲁棒性分析[J/OL].农业机械学报,2020,51(2):172-179.
PEI Yanru, WU Yingda, YU Qiang, et al. Robust analysis of potential ecological network edge enhancement in desert oasis area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):172-179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002019&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.019. (in Chinese)
- [8] 李保杰,顾和和,纪亚洲.矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J].农业工程学报,2012,28(3):251-256.
LI Baojie, GU Hehe, JI Yazhou. Evaluation of landscape pattern changes and ecological effects in land reclamation project of mining area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3):251-256. (in Chinese)
- [9] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].煤炭学报,2020,45(1):351-359.
HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):351-359. (in Chinese)
- [10] 胡振琪.再论土地复垦学[J].中国土地科学,2019,33(5):1-8.
HU Zhenqi. Re-exploration of land reclamation science[J]. China Land Science, 2019, 33(5):1-8. (in Chinese)
- [11] SANTIAGO S, LUCÍA P H. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2):91-103.
- [12] SANTIAGO S, CHRISTINE E, CORALIE M, et al. Network analysis to assess landscape connectivity trends: application to European forests (1990-2000)[J]. Ecological Indicators, 2010, 11(2):407-416.
- [13] SANTIAGO S, LIÓN R. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape[J]. Ecography, 2010, 33(3):523-537.
- [14] ÖRJAN B, SANTIAGO S. Ranking individual habitat patches as connectivity providers: integrating network analysis and patch removal experiments[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(19):2393-2405.

- [15] 王戈,于强,YANG Di,等.基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):258-266,312.
WANG Ge, YU Qiang, YANG Di, et al. Hierarchical ecological network structure based on complex network analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 258-266, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190728&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.028. (in Chinese)
- [16] 陈裕婵,张正栋,万露文,等.五华河流域非点源污染风险区和风险路径识别[J].地理学报,2018,73(9):1765-1777.
CHEN Yuchan, ZHANG Zhengdong, WAN Luwen, et al. Identifying risk areas and risk paths of non-point source pollution in Wuhua River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1765-1777. (in Chinese)
- [17] 鄢文聚,宇振荣.中国农村土地整治生态景观建设策略[J].农业工程学报,2011,27(4):1-6.
YUN Wenju, YU Zhenrong. Ecological landscaping strategy of rural land consolidation in China [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 1-6. (in Chinese)
- [18] 匡文慧,刘纪远,陆灯盛.京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应[J].地理学报,2011,66(11):1486-1496.
KUANG Wenhui, LIU Jiyuan, LU Dengsheng. Pattern of impervious surface change and its effect on water environment in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1486-1496. (in Chinese)
- [19] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等.典型资源型城市生态承载力评价——以唐山市为例[J].生态学报,2015,35(14):4852-4859.
JIN Yue, LU Zhaohua, TAN Feifei, et al. Assessment of ecological carrying capacity on the typical resources-based cities: a case study of Tangshan City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4852-4859. (in Chinese)
- [20] 李文君,杨明川,史培军.唐山市资源型产业结构及其环境影响分析[J].地理研究,2002,21(4):511-518.
LI Wenjun, YANG Mingchuan, SHI Peijun. Analysis for the relationship between Tangshan industrial structure and its environmental impacts [J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 511-518. (in Chinese)
- [21] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns [J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [22] 崔凤奎,王晓强,张丰收,等.二值图像细化算法的比较与改进[J].河南科技大学学报(自然科学版),1997,18(4):50-54.
CUI Fengkui, WANG Xiaoqiang, ZHANG Fengshou, et al. The comparison and betterment to thinning algorithm of two-tone image [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 1997, 18(4): 50-54. (in Chinese)
- [23] PETER Vogt, KURT Ritters. GidooToolbox: universal digital image object analysis [J]. European Journal of Remote Sensing, 2017, 50(1): 352-361.
- [24] 刘常富,周彬,何兴元,等.沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择[J].应用生态学报,2010,21(10):2508-2516.
LIU Changfu, ZHOU Bin, HE Xingyuan, et al. Selection of distance thresholds of urban forest landscape connectivity in Shenyang City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2508-2516. (in Chinese)
- [25] 许峰,尹海伟,孔繁花,等.基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J].生态学报,2015,35(19):6425-6434.
XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Developing ecological networks based on mspa and the least-cost path method: a case study in bazhong western new district [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6425-6434. (in Chinese)
- [26] 郭家新,胡振琪,袁冬竹,等.黄河流域下游煤矿采煤塌陷区耕地破碎化动态演变——以济宁市为例[J/OL].煤炭学报:1-15[2021-01-08].
GUO Jiaxin, HU Zhenqi, YUAN Dongzhu, et al. Dynamic evolution of cultivated land fragmentation in coal mining subsidence area of the Lower Yellow River Basin: a case study of Jining City [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-15 [2021-01-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20200923.1021.004.html>. (in Chinese)
- [27] 黄雪飞,吴次芳,游和远,等.基于MCR模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建[J].农业工程学报,2019,35(10):243-251.
HUANG Xuefei, WU Cifang, YOU Heyuan, et al. Construction of rural landscape ecological corridor in water network plain area based on MCR model [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 243-251. (in Chinese)
- [28] 李山,王铮,钟章奇.旅游空间相互作用的引力模型及其应用[J].地理学报,2012,67(4):526-544.
LI Shan, WANG Zheng, ZHONG Zhangqi. Gravity model for tourism spatial interaction: basic form, parameter estimation, and applications [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(4): 526-544. (in Chinese)
- [29] WANG Haijun, ZHANG Bin, LIU Yaolin, et al. Urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(2): 297-318.
- [30] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应[J].应用生态学报,2016,27(7):2119-2127.
YU Yaping, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Scale effect of Nanjing urban green infrastructure network pattern and connectivity analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2119-2127. (in Chinese)
- [31] 张继平,乔青,刘春兰,等.基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究[J].生态学报,2017,37(19):6313-6321.
ZHANG Jiping, QIAO Qing, LIU Chunlan, et al. Ecological land use planning for Beijing City based on the minimum cumulative resistance model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6313-6321. (in Chinese)
- [32] 胡振琪,李勇,陈洋,等.2019年土地科学研究重点进展评述及2020年展望——土地工程与信息技术分报告[J].中国土地科学,2020,34(2):93-102.
HU Zhenqi, LI Yong, CHEN Yang, et al. Progress review on land science research in 2019 and prospects for 2020: the sub-report on land engineering and land information technology [J]. China Land Science, 2020, 34(2): 93-102. (in Chinese)
- [33] 陈明星,梁龙武,王振波,等.美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考[J].地理学报,2019,74(12):2467-2481.
CHEN Mingxing, LIANG Longwu, WANG Zhenbo, et al. Geographical thinking on the relationship between beautiful China and land spatial planning [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2467-2481. (in Chinese)
- [34] 胡振琪,肖武.关于煤炭工业绿色发展策略的若干思考——基于生态修复视角[J].煤炭科学技术,2020,48(4):35-42.
HU Zhenqi, XIAO Wu. Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 35-42. (in Chinese)