

干旱区景观格局综合优化: 黑河中游案例

蒙吉军 王晓东 周朕[†]

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; [†]通信作者, E-mail: zhouzhen2014@126.com

摘要 选择黑河中游为研究区, 通过生态系统服务价值、景观连接性和生境质量识别核心生态源地, 根据显性阻力、隐性阻力、地形和道路数据构建生态阻力面, 基于最小累积阻力模型识别生态廊道网络与节点, 并进行生态功能分区, 进而从点、线、面进行景观格局优化。结果表明: 1) 黑河中游生境质量较好的斑块仅占总面积的 13.77%, 主要由湿地、高-中覆盖度草地和耕地构成, 集中分布在东南部大起伏中高山以及黑河干流两侧; 2) 主干生态廊道呈东南-西北走向贯穿整个研究区, 辅助生态廊道主要连接核心生态源地与主干生态廊道, 分支廊道主要分布在东部, 连接相邻主干廊道(或是源地), 生态节点多分布在生态廊道薄弱的地方; 3) 根据累积阻力值频率突变与空间分布特点, 将黑河中游分为生态缓冲区、生态连通区、生态过渡区和生态边缘区 4 个功能区, 并在此基础上针对生态源地、生态廊道和生态节点提出建设策略。研究结果可为黑河中游生态系统管理提供切实可行的科学指导。

关键词 最小累积阻力模型; 生态源地; 生态廊道; 生态功能分区; 格局优化; 黑河中游
中图分类号 K903

Integrated Landscape Pattern Optimization in Arid Region: A Case Study of Middle Reaches of Heihe River

MENG Jijun, WANG Xiaodong, ZHOU Zhen[†]

Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;
[†] Corresponding author, E-mail: zhouzhen2014@126.com

Abstract Middle reaches of Heihe river was chosen as the study area, and meanwhile the core ecological source was identified by biodiversity service, landscape connectivity and habitat quality, and the ecological resistance surface was built by recessive ecological resistance, comprehensive ecological resistance, topography data and street data. Based on the Minimum Cumulative Resistance Model, the ecological corridor network and ecological nodes were identified and a landscape function regionalization was proposed, finally the landscape pattern was optimized from point, line and surface three levels. The results are as follows. 1) The patches with better habitat quality accounted for only 13.77% of the total area, are mainly composed of wetland, high and medium covered grassland and cultivated land, concentrated distributed in the big ups and downs mountains in southeast and the both sides of the main stream of Heihe River. 2) The main ecological corridor throughout the study area from southeast to northwest, the core ecological source and the main ecological corridors are connected by the subsidiary ecological corridors, adjacent main corridors (or sources) are connected by branch corridors, which is mainly distributed in the east; ecological nodes are mainly distributed in the weak parts of ecological corridors. 3) Based on the frequency and spatial distribution feature of the minimum cumulative resistance, the area is divided into ecological buffer area, ecological connected area, ecological transition area and ecological edge area four functional areas, construction strategies aiming at ecological sources, ecological corridors and ecological nodes are proposed. The results can provide feasible scientific guidance for ecosystem management in middle reaches of Heihe River.

Key words minimum cumulative resistance model; ecological source; ecological corridor; ecological function regionalization; pattern optimization; middle reaches of Heihe River

西北干旱区是我国典型的生态脆弱区。近年来,随着气候变化和人类活动的加剧,生态系统普遍退化,水土流失、荒漠化、牧草地退化等问题加剧^[1-2],严重威胁区域生态安全与可持续发展^[3-4]。景观生态安全格局是实现区域生态安全的基本保障和重要途径^[5],对于维护区域生态系统安全,维持区域生态系统结构和过程的健康及完整具有重要意义^[6]。景观生态安全格局关注生态格局、过程 and 功能的相互作用及其对区域生态效益的影响^[7],由一些对控制或维护某种生态过程非常关键的局部、点和空间关系构成,通过建立针对景观要素扩张的阻力面,并根据扩张趋势确定不同要素和不同等级的安全格局,就能够实现对景观空间结构的有效控制^[8]。干旱区景观格局优化研究可以实现各种景观类型在空间和数量上的优化,能够将生态系统管理的对策措施落实到具体的空间地域,有助于了解干旱区景观格局与生态过程、景观功能与社会经济活动之间的关系,为干旱区土地资源的合理利用、土地利用规划和荒漠化防治提供理论依据,对改善干旱区生态环境质量,保障生态系统安全具有重要的意义^[9-11]。

景观格局优化通过调整、优化各种景观类型在空间上和数量上的分布格局,使其产生最大的综合效益(生态、经济和社会效益),其本质是利用景观生态学原理解决土地合理利用的问题^[12]。近年来,国内外已形成以景观生态规划为主的研究方法,主要包括概念模型、数学模型和计算机模拟等方面,涵盖线性规划、灰色系统规划、层次分析和系统动力学等模型^[12],其应用涉及土地利用结构、资源调控与配置、土壤养分平衡和物种活动空间格局设计等领域^[13]。如何在空间上构建一些能够制约生态过程的、不可替代的生态景观组分(如生态源地、生态节点、生态廊道等),划定不同类型的生态功能区,成为景观格局优化的关键和难点^[14-16]。目前,许多学者基于根据景观生态学的“源-汇”理论^[6],从生态系统服务^[17]、生境质量^[9]以及生态过程^[14]等方面的重要性分析来进行生态源地的识别,已形成较为成熟和系统的方法,被国内学者广泛采用。随着景观格局优化理论的完善及 GIS 空间分析技术的发展,基于生态适宜性原理,根据地理学距离-耗费定律建立的最小累积阻力模型,在阻力面构建和生态廊道与节点识别中发挥了重要作用^[9,18]。另外,元胞自动机模型^[19]、情景分析^[20]和

GAP 分析^[21]等应用于景观生态安全格局的构建,构建了一系列格局-过程耦合模型^[22]。总体看来,从生态源地的确定到生态阻力面的建立,以及在此基础上进行生态安全格局构建的框架,由于能较好地揭示景观格局与生态过程和功能的关系^[8],已在景观格局优化、土地利用规划和物种保护管理中得到广泛应用^[23-24]。

黑河是西北干旱区的内陆河,地处古丝绸之路和现今欧亚大陆桥咽喉处的河西走廊中部,也是国家“一带一路”战略布局的关键节点。黑河中游是全流域人类活动最密集、绿洲最集中、经济最发达的地区,也是景观变化最活跃的地区。多年来,由于黑河中游绿洲无序扩张,城市化进程加快^[25],产生很多生态环境问题,如土地盐碱化^[26]、沙漠化^[27]、景观破碎化^[28],区域生态安全面临较大威胁。本文基于生态适宜性原理,采用最小累积阻力模型,通过显性阻力面和隐性阻力面的构建,对黑河中游景观格局进行综合优化,以期为干旱区空间规划和生态系统管理提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑河流域自莺落峡至正义峡之间为中游,流程 185 km,介于 E97°20'—102°12', N38°08'—39°57' 之间,包括甘肃省张掖市的山丹、民乐、甘州、临泽、高台及肃南明花区等行政区,总面积约为 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地处河西走廊中段,属于温带大陆性干旱气候,年降水量为 104~328 mm,年蒸发量为 1639~2341 mm。地势南高北低,东高西低,中部为绿洲、荒漠相间分布的走廊平原。

1.2 数据来源

本文所用的 2011 年土地利用数据源于中国科学院“八五”项目“黑河流域生态-水文过程集成研究”,解译精度为 93%。将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类,分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。基础地理信息数据(包括行政区划、道路、河湖水系等)来源于寒旱区科学数据中心的“数字黑河”项目(黑河计划数据管理中心,2011)。DEM 数据来自国家科学数据服务平台(<http://www.cnrc.cn/zcfw/sjfw/gjksjxx/>),分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; NDVI 数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据(<http://www.gscloud.cn>),2011 年 Landsat7 的 16d 合成 NDVI 产品(共 23 期),

分辨率为 30 m × 30 m; 黑河湿地自然保护区数据来源于张掖市环境保护局。

2 研究方法

本研究基于景观生态学的理论, 通过生态服务价值、景观连接性和生境质量识别生态源地, 综合景观类型因子、地貌特征因子和道路因子构建阻力面, 基于最小累积阻力模型识别生态节点和生态廊道并进行生态功能区划分, 在此基础上进行黑河中游景观生态安全格局的综合优化。技术路线如图 1 所示。

2.1 生态源地综合识别

生态源地是物种扩散和维持的景观斑块源点, 具有内部同质性以及向四周扩张或向“源”汇集的能力^[6]。从生态安全的角度看, 生态源地至少要实现以下目标: 保证生态系统服务的可持续性, 维护现有景观过程的完整性, 防止生态系统退化^[4,17]。因此, 本文从生态系统服务功能、景观连接性、生境质量 3 个方面来识别生态源地。

2.1.1 生态系统服务价值评估

一般而言, 生态服务价值高的生态系统能为物种提供良好生境, 不同的土地利用类型保持生物资源的能力不同。我们根据谢高地等^[29]制定的生态系统服务价值当量, 同时参考干旱区的相关研究结

果^[30], 确定了基本生态系统服务价值当量(表 1)。

由于植被覆盖度的差异, 即使相同的生态系统, 其服务功能也会存在显著差异。已有研究表明, NDVI 与生态系统服务价值之间存在很好的相关性, NDVI 值越高, 生态系统服务价值越高^[15]。本文对研究区 2011 年 Landset7 的 16d 合成 NDVI 数据(共 23 期)求平均值, 再根据下式修正生态系统服务价值当量:

$$DL' = \frac{NDVI_i}{NDVI_t} \times DL_0, \quad (1)$$

DL' 为基于 NDVI 修正的生物多样性服务当量, NDVI_{*i*} 为栅格 *i* 对应的 NDVI 均值, NDVI_{*t*} 为栅格 *i* 对应的景观类型 *t* 中所有栅格的 NDVI 均值, DL₀ 为栅格 *i* 对应的景观类型 *t* 的基本生物多样性服务

表 1 黑河中游基本生态系统服务价值当量
Table 1 Basic equivalent value per unit area of ecological service in the middle reaches of Heihe River

景观类型	当量因子(<i>E</i> ₀)	景观类型	当量因子(<i>E</i> ₀)
林地	5.59	耕地	1.70
高覆被草地	4.52	湿地	160.24
中覆被草地	3.53	建设用地	0.10
低覆被草地	2.58	荒漠和戈壁	0.10

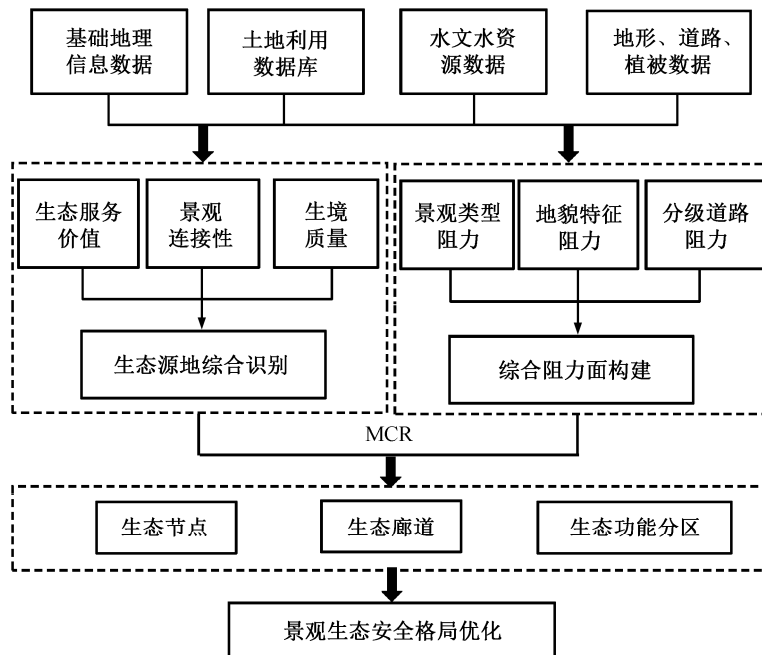


图 1 研究技术路线
Fig. 1 Roadmap of study

当量。由于研究区建设用地、荒漠戈壁和湿地 NDVI 值偏小,故只对耕地、林地和草地生态系统的服务功能进行修订。

2.1.2 景观连接性分析

景观连接性反映景观对生态流运行的便利或阻碍程度,是保护生物多样性和维持生态系统稳定性和整体性的关键^[4,31]。PC 指数能够较准确地反映斑块的连接状况,是衡量景观格局与功能的重要指标^[16],计算公式如下:

$$dPC = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100\%, \quad (2)$$

其中, dPC 为单个斑块的重要值, PC 表示景观中所有斑块的指数值, PC_{remove} 为去除单个斑块后剩余斑块的指数值, dPC 值越高,表示该斑块在研究区景观连接中的重要性越高,其核心作用也越强。通过 ArcGIS 10.0、插件模块 Conefor Inputs for ArcGIS 10.0 和 Conefor Sensinode 2.6,根据研究区实际情况,本文分别以湿地、林地、草地和耕地作为生境斑块,以研究区整体作为背景景观,进行景观连通性分析。

2.1.3 生境质量评价

具有较高的生境质量是生态源地的基本属性。生境质量取决于靠近栖息地的人类活动强度^[32]。一般来说,生境质量随着附近土地利用强度增加而降低^[33]。因此,可以通过分析生境斑块在所处基质中受到的各种威胁的综合影响来评估生境质量。

InVEST 模型的生境评价模块(Habitat Quality)正是基于此进行生境质量评价。衡量生境质量有 4 个方面:生态威胁因子的影响范围、生态威胁因子源头距离生境的远近、生境对于生态威胁因子的敏感程度及法律保护情况与保护区的设立。

本研究按照 InVEST 模型的操作指南进行生境质量评价。首先,确定低覆被草地、中覆被草地、高覆被草地、林地和湿地作为生境,参考 InVEST 模型操作指南和相关研究^[34-35]确定威胁源(表 2)。然后,根据研究区实际情况,进行各衡量要素的威胁数据设置,确定危险要素的权重和对生态用地的最大影响距离、不同用地类型对各威胁源的敏感性(表 3)。考虑到黑河湿地自然保护区在保护生物多样性、改善区域生态环境和维系流域绿洲生态安全

表 2 黑河中游生态威胁因子属性
Table 2 Attributes of threat data in the middle reaches of Heihe River

威胁因子 THREAT	最大影响距离 MAX_DIST/km	权重 WEIGHT	衰退线性相关性 DECAY
耕地	8	0.7	0
城市	10	1	0
农村居民点	5	0.6	0
工矿用地	8	0.8	0
一级道路	3	1	1
二级道路	1	0.7	1
荒漠	10	0.5	0

表 3 黑河中游景观类型对生态威胁因子敏感度
Table 3 Habitat types and sensitivity of habitat types to each threat in the middle reaches of Heihe River

地类名称	自然属性	耕地	城市用地	农村居民点	工矿用地	一级道路	二级道路	荒漠
林地	1	0.8	0.2	0.8	0.9	0.5	0.3	0.2
高覆被草地	1	0.7	0.2	0.8	0.9	0.5	0.3	0.4
中覆被草地	0.7	0.7	0.2	0.7	0.8	0.5	0.3	0.4
低覆被草地	0.4	0.7	0.2	0.7	0.8	0.6	0.4	0.5
湿地	1	1	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8
耕地	0.4	0	1	1	1	0.6	0.6	0.8
城市用地	0	0	0	0	0	0	0	1
农村居民点	0	0	0	0	0	0	0	1
工矿用地	0	0	0	0	0	0	0	1
一级道路	0	0	0	0	0	0	0	1
二级道路	0	0	0	0	0	0	0	1
荒漠	0.1	0.5	0	0	0	0	0	0

均具有重要意义, 本文将其核心区的保护度设为 1, 缓冲区的保护度设为 0.8, 其他区域统一设置为 0.2。最后, 通过 ArcGIS 10.0 加载 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块, 将威胁源数据导入模块, 进行生境质量评估。

2.1.4 生态源地综合识别

生态系统服务价值反映斑块生物多样性的丰富度, 景观连接性反映斑块维持景观生态流畅通的能力, 生境质量反映斑块受人类活动的干扰程度。在识别生态斑块重要性时, 三者处于同等重要的位置。因此, 采用自然断点法, 分别将斑块重要性分为 5 级, 从 5 至 1 依次代表最重要、重要、次重要、一般重要和不重要, 然后进行等权叠加, 采用分位法将总分值划分为 5 级。面积大的生态斑块的生态适应性强, 生态服务价值高, 往往能够为高等级物种提供安全的栖息环境。参照相关研究^[36]和流域尺度特点, 将面积大于 10 km² 的最重要斑块作为核心生态源地。

2.2 生态阻力面的综合构建

2.2.1 生态阻力因子体系的建立

生态流在穿越景观要素或土地类型时需要克服一定的阻力, 往往在穿越不适宜生境时要克服较大的阻力。生态流不仅受景观类型的影响, 还受自然条件、人为干扰和其他因素的影响。不同阻力因子影响生态流扩散的阻力不同^[37]。生态阻力面综合了影响生态流运行的各因素^[38], 成为模拟生态流在空间运行的常用方法。由于生态流运行和物种扩散是复杂的生物过程, 单纯以景观斑块类型和斑块边界、形状作为生态阻力(即显性阻力)变化的依据, 不能准确地模拟生态阻力过程。地统计学中的 Kriging 插值法以空间自相关性为基础, 能充分反映空间事物之间的相互影响(即隐形阻力)。因此, 本文将传统的景观类型因子构建显性阻力面与 Kriging 插值法模拟景观斑块之间隐性的物质和能量交换构建隐形阻力面结合起来模拟景观类型生态阻力过程。结合地形和道路交通因子, 构建阻力因子体系(表 4)。参考文献[34,36,39]确定各因子的权重和阻力系数。

2.2.2 生态阻力面的建立

本文采用最小耗费距离模型来构建阻力面。最小耗费距离是从目标斑块到最近源斑块的累积耗费距离, 代表一种加权距离的形式, 而非实际的空间距离。“耗费”的概念形象地反映出物种(或生态

表 4 阻力因子权重与系数
Table 4 Resistance factor weight and coefficient

阻力因子	权重系数	指标	阻力系数	
景观类型*	显性阻力	0.28	湿地	1
			林地	10
			高覆被草地	15
			中覆被草地	20
			低覆被草地	25
			耕地	30
			建设用地	100
		荒漠和戈壁	80	
	隐性阻力	0.12	Kriging 插值	-
地貌因子 ^[39]	0.15	0.15	<8	1
			8~15	10
			15~25	50
			25~35	75
			>35	100
			<25	1
			25~50	10
起伏度(°)	0.15	0.15	50~70	50
			70~100	75
			>100	100
			0~200	100
			200~400	80
距离一级道路 距离(铁路、国道、省道)(m)	0.15	0.15	400~800	60
			800~1600	40
			1600~3200	20
			>3200	1
			0~150	100
道路因子 ^[34,36]	0.15	0.15	150~250	80
			250~450	60
			450~800	40
			800~1000	20
			>1000	1

注: *根据各景观类型生态服务价值当量修正值确定景观类型的阻力系数。

流)移动过程中需要耗费的代价^[8]。基本的计算公式如下:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i, \quad (3)$$

其中, MRC 为最小耗费值, D_{ij} 为物种从源地 j 到景观单元 i 的空间距离, R_i 为景观单元 i 对某物种运动的阻力系数, f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

运用 ArcGIS 10.0 空间分析模块中的成本距离工具, 以生态源地为要素源数据, 以综合景观阻力面为耗费数据, 得到围绕生态源地的累积阻力分布图, 其中每个栅格的耗费值代表其通过不同景观类型到达源地所产生的耗费。

2.3 生态廊道、生态节点识别与生态功能分区

2.3.1 生态廊道的识别

生态廊道是连接相邻生态源地的通道, 在维持生态系统稳定、降低生境破碎化程度以及保障景观要素之间生态过程畅通有序方面具有重要作用。在累积阻力图上, 廊道是相邻两“源”之间的阻力低谷, 是相邻两“源”之间最容易联系的通道, 有利于物种在“源”间及“源”与基质间的流动。本研究通过 ArcGIS 中的 cost path 模块, 以核心生态源地作为输入的源, 以综合阻力面作为输入的阻力, 计算每个生态源地斑块到其他各斑块的阻力累加值, 得到源地最小累积阻力面; 在最小累积阻力面上, 生成每两个生态源地斑块之间的最小阻力路径, 即生态廊道。本文采用 ArcGIS 密度分析模块, 以 500 m 为搜索范围, 将研究区生态廊道分为主干廊道、辅助廊道和分支廊道。

2.3.2 生态节点的识别

生态节点也称战略点, 是生态系统中连接相邻生态源地的景观组分, 一般分布在生态廊道的最薄弱处, 对建立两个或多个生态源地之间的生态联系具有控制意义和关键作用。识别方法如下: 首先, 借鉴 GIS 空间分析模块中的水文分析方法, 提取累积阻力面的“山脊线”, 即阻力面阻隔生态流运行的最大阈值; 然后, 通过栅格计算, 获取“山脊线”和生态廊道的交点, 即可获得生态节点的空间位置。本文从生态建设的需要, 进一步识别现状生态节点和待建生态节点。

2.3.3 生态功能分区

本文基于生态过程与格局相互作用的理论, 在 ArcGIS10.0 中采用 1/2 标准方差对累积阻力值进行分级统计, 划分阻力值区间。根据阻力值频率突变和空间分布的特点确定临界阈值, 进行生态功能区划分。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

黑河中游生态系统服务价值较高的斑块(最重要、重要和次重要)仅占总面积的 30.26%, 主要由黑河干流沿岸的湿地、林地、耕地和东南部的高、中覆盖度草地构成(图 2(a))。耕地斑块所占面积比例大, 且集中分布于黑河两岸, 连接性较好; 林地斑块面积较小, 且分布零散; 草地斑块的面积较大, 分布较均匀; 湿地斑块面积较小, 但分布相对集中(图 2(b))。生境质量较好的斑块(最重要、重要和次重要)仅占总面积的 13.77%, 多分布于黑河湿地自然保护区、受人类活动影响较小的东南部山地以及西部沼泽(图 2(c))。核心生态源地斑块共有 20 块, 面积为 816.26 km², 主要分布在东南部大起伏中高山以及黑河干流两侧, 主要由湿地、高中覆盖度草地和耕地构成(图 2(d))。

3.2 生态廊道、生态节点识别与生态功能分区

景观综合阻力面与最小累积阻力面如图 3 所示。基于最小累积阻力表面识别生态廊道和生态节点, 并进行生态功能分区。

3.2.1 生态廊道识别

黑河中游主干生态廊道呈东南-西北走向(图 4(a)), 贯穿整个研究区, 将绝大多数核心生态源地连接起来, 成为生态流和物种扩散的主要通道。辅助生态廊道主要连接核心生态源地与主干生态廊道, 或用于连接没有主干廊道连接的相邻源地, 保障主干廊道生态功能的发挥。分支廊道主要分布在研究区的东部, 主要连接相邻主干廊道, 或连接相邻源地, 主要作用是增加生态流运行和物种扩散的通道。

3.2.2 生态节点识别

黑河中游生态节点多分布在生态廊道薄弱的地方(图 4(b)), 共 71 个, 其中现状生态节点 40 个, 待建生态节点 31 个。根据节点所处廊道等级, 将其分为一级节点、二级节点和三级节点, 节点的级别越高, “踏板”作用越强。

3.2.3 生态功能分区

在 ArcGIS 10.0 中采用 1/2 标准方差对累积阻力值分级统计, 划分为 8 个阻力值区间, 根据阻力值频率突变和空间分布的特点确定临界阈值^[36,40](图 5), 划分生态缓冲区(C1)、生态连通区(C2 和 C3)、生态过渡区(C4 和 C5)和生态边缘区(C6, C7

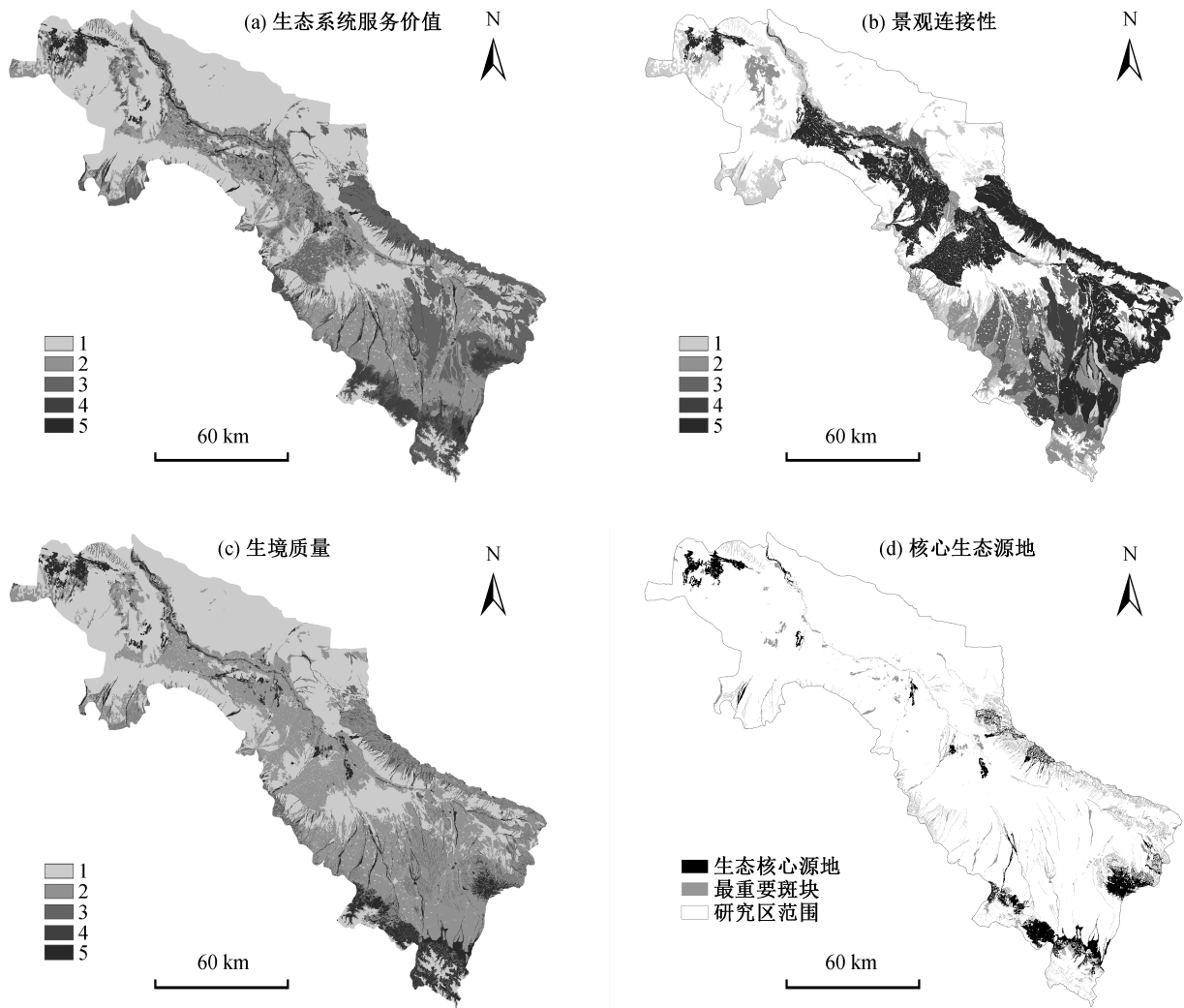


图 2 黑河中游生态源地综合识别

Fig. 2 Integrated identification of ecological source in the middle reaches of Heihe River

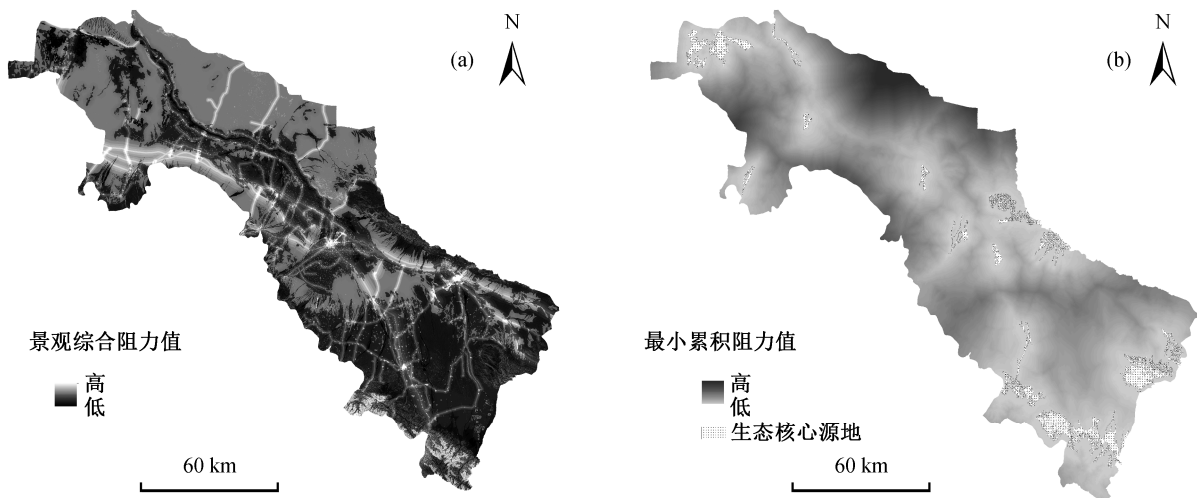


图 3 黑河中游景观综合阻力面(a)与累积阻力面(b)

Fig. 3 Comprehensive ecological resistance surface (a) and the cumulative resistance surface (b)

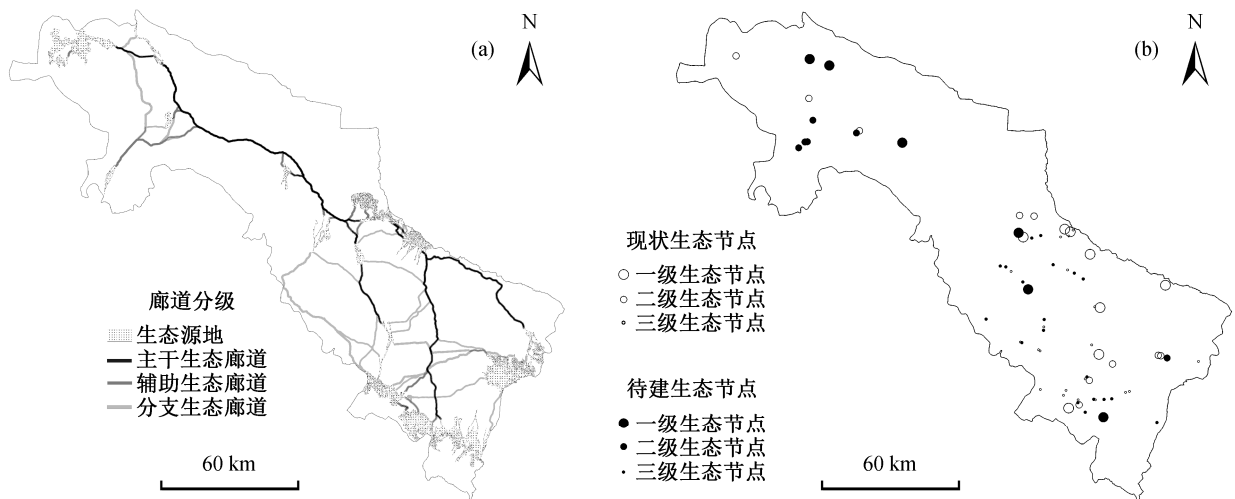


图 4 黑河中游生态廊道(a)和生态节点(b)
Fig. 4 Ecological corridor (a) and nodes (b) in the middle reaches of Heihe River

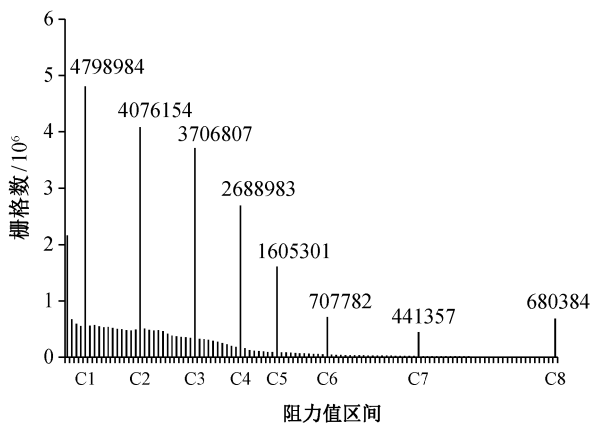


图 5 黑河中游最小累积阻力值频率分布
Fig. 5 Frequency distribution of the minimum cumulative resistance values in the middle reaches of Heihe River

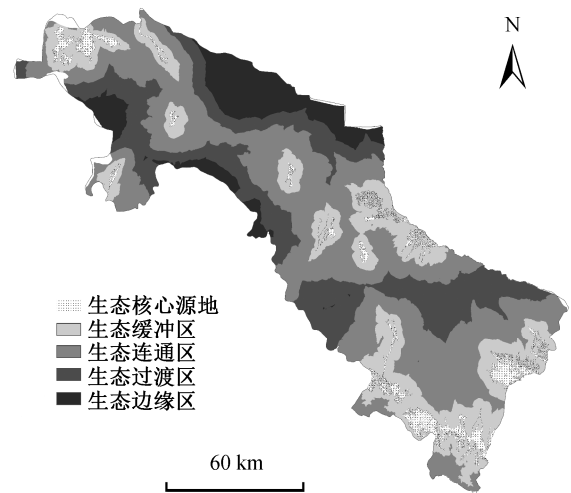


图 6 黑河中游景观功能分区
Fig. 6 Landscape function regionalization in the middle reaches of the Heihe River

和 C8), 分区结果如图 6 所示。

1) 生态缓冲区。占总面积的 25.66%, 分布于核心源地周围, 阻力水平低, 是源地扩展和演替的潜在区域, 对保护核心“源”不受人类活动的干扰和保持与邻近“源”的连接具有关键性作用。若对其进行开发, 将造成可发展源地的大面积丧失, 同时影响核心生态源地的物种扩散和生态流运行。随着阻力水平的提高, 可发展源地面积急剧减少, 发展成本升高。可见, 该地带对开发和保护都很敏感, 故将其作为生态缓冲区, 成为核心生态源的保护屏障, 维护“源”的稳定性和整体性。

2) 生态连通区。占总面积的 41.61%, 是核心源地之间连接的通道, 对区域生态流运行具有重要

作用。随着生态缓冲区边界向外围扩展, 阻力值频率序列仍然呈下降趋势并趋于平缓, 表明该地带对开发敏感性有所降低, 但对物种扩散的阻力随之增加, 已不太适宜“源”的发展。由于该区分布大量耕地和小型生态斑块, 对区域生态流运行有着重要作用, 能够连接相距较远的源地, 因此可以作为生态连通区。

3) 生态过渡区。占总面积的 22.96%, 主要位于绿洲与荒漠、山地与平原的过渡地带, 生态阻力值较高, 发展源地的阻力较大, 对人类干扰的敏感性下降, 故将该地带作为生态过渡区。由于阻力影

响因素复杂, 极易发生生态环境退化现象, 因此需要保护分布在该区域的生态斑块, 尤其是限制开垦荒地的活动, 以维护区域的稳定。

4) 生态边缘区。占总面积的 9.77%, 主要为沙漠、戈壁, 阻力达极大值, 对人类干扰的敏感性较低, 物种扩散和生态流通过困难, 故将其作为生态边缘区。对该区域仍需加强管控, 防止胁迫生态过渡区和威胁“源”之间的连接。

3.3 景观格局优化方案

在上述基础上, 本文提出由点(20 个核心生态源地、71 个生态节点)、线(3 级廊道)、面(4 个生态功能分区)相互交织、有机结合的景观生态安全格局(图 7), 并对核心生态源地、生态廊道和生态节点提出保护策略。

1) 保护现状核心生态源地。核心生态源地主要分布在水资源条件较好的黑河干流两岸和东部中高起伏山区。黑河沿岸同时也是居民点和耕地集中分布区, 要防止耕地扩张对源地的侵占, 在源地边缘地带建立缓冲区, 推进退耕还林还草与生态防护林建设, 保障源地的生态用水; 加强黑河湿地自然保护区的管理, 减少对核心区的干扰。东部中高起伏山区核心源地是黑河中游乃至整个黑河流域重要的水源涵养区, 地势起伏较大, 水土流失风险高, 需加强退耕还林还草, 水源条件允许的区域强化生态林建设; 构建源地缓冲区, 保护源地扩张和自然演替的生态过程, 维护源地景观连接性, 减少人类活

动干扰。

2) 建设生态廊道。生态廊道需要通过有重点、分层次的规划建设来实现。西段主干廊道沿着黑河干流延伸, 是连接东、西源地的唯一有效廊道, 建设中应注意加强黑河湿地自然保护区建设, 保护黑河两岸的自然生态斑块, 尽量减少人类活动的干扰。东部主干廊道从平原地带延伸至山地, 地理环境多样, 建设中要充分利用现有生态斑块, 根据不同的地质地貌特点分段建设。辅助生态廊道数量较少, 长度较短, 但能够将位置较偏的源地与主干廊道或其他源地相连, 建设中需要优先关注未与主干廊道相连的核心生态源地, 特别是西部主干廊道稀疏的区域。分支生态廊道主要分布在东部, 是廊道体系中线路最多、总长度最长的廊道类型, 分支廊道的建设要尽量利用现状自然生态斑块, 提高建设效率。

3) 落实生态节点。现状生态节点以维护为主, 对生态重要性较高的林地、湿地、高覆被草地节点要加强管控, 防止人类活动破坏; 对生态重要性较低的中低覆被草地节点, 可通过植树种草、扩大节点面积来提升生态重要性。待建生态节点则以建设为主, 其中耕地和建设用地节点一般位于水源条件较好的区域, 可通过退耕还林还草和人口外迁进行生态节点建设; 荒漠节点一般位于荒漠与绿洲的过渡地带, 远离源地, 建设难度较大, 可种植耐旱植被, 构建低覆被灌木、草地生态节点。不同等级的节点需要采取不同的建设策略, 处于主干生态廊道的一级生态节点, 利用率高且分布较为稀疏, 需适当提高节点面积, 以增强“踏脚石”的作用; 对于二级和三级生态节点, 则需结合现状生态斑块, 在维持节点中转功能的同时, 充分考虑经济效益。

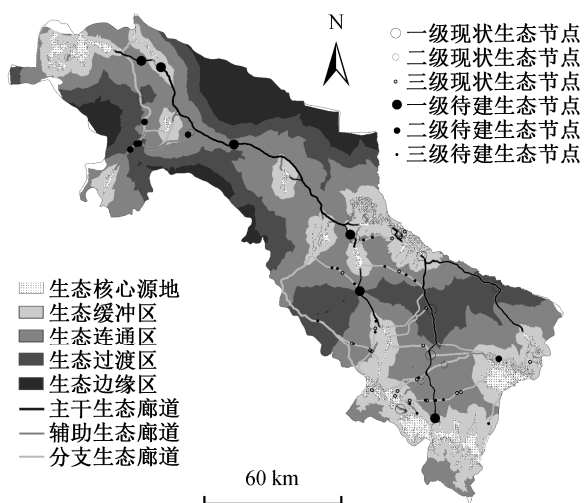


图 7 黑河中游景观生态安全格局

Fig. 7 Landscape ecological security pattern in the middle reaches of Heihe River

4 结论与讨论

本文基于生态服务价值、景观连通性和生境质量进行黑河中游核心生态源地的综合识别, 根据景观类型、地形和道路数据构建生态阻力面, 基于最小累积阻力模型识别生态廊道和生态节点, 并进行生态功能分区, 进而构建景观生态安全格局, 得出结论如下。

1) 黑河中游生境质量较好的斑块主要由高-中覆盖度草地、耕地和湿地构成, 集中分布在东南部大起伏中高山以及黑河干流两侧, 仅占总面积的 13.77%; 耕地和草地面积较大, 耕地集中分布于黑

河两岸,连接性较好,草地分布较均匀;湿地斑块面积较小,但相对集中。主干生态廊道呈东南-西北走向贯穿研究区,辅助生态廊道主要连接核心生态源地与主干生态廊道,分支廊道主要分布在东部;生态节点则主要分布在生态廊道薄弱的地方。

2) 基于生态过程与格局相互作用理论,将黑河中游划分生态缓冲区、生态连通区、生态过渡区和生态边缘区。生态缓冲区分布于核心源地周围,是源地扩展和演替的潜在区域,对保护核心“源”不受人类活动干扰和保持与邻近“源”的连接具有关键作用;生态连通区是核心源地之间连接的通道,对区域生态流运行有着重要作用;生态过渡区主要位于绿洲与荒漠、山地与平原的过渡地带;生态边缘区主要为沙漠和戈壁,物种扩散和生态流通过困难。

3) 黑河中游景观生态安全格局建设要关注核心生态源地、生态廊道和生态节点。第一,要保护现状核心生态源地,防止耕地扩张对源地的侵占,推进退耕还林还草与生态防护林建设,加强黑河湿地自然保护区的管理。第二,要有重点、分层次地规划建设生态廊道,针对连接东西源地、沿着黑河干流延伸的西段主干廊道,采取保护自然斑块、减少人类活动干扰等措施;从平原地带延伸至山地的东部主干廊道,应根据不同的地质地貌特点分段建设。第三,现状生态节点以维护为主,尤其对生态重要性较高的林地、湿地和高覆被草地节点要加强管控;待建生态节点则以建设为主,其中耕地和建设用地节点通过退耕还林还草和人口外迁方式进行建设;荒漠节点可种植耐旱植被,构建低覆被灌木、草地生态节点。

4) 本文综合考虑景观类型、地貌特征和道路因子模拟生态阻力过程,其中景观类型阻力因子从隐形和显性两个方面进行构建,提高了阻力面模拟效果。基于最小累积阻力模型,利用 GIS 工具,采用密度分析和栅格叠加的方法进行生态廊道和节点的识别和优化,丰富了景观格局优化的方法。但是,核心生态源地的识别只考虑斑块面积规模,阻力因子的选择中没有考虑到因子间的阻力效应,以及阻力因子分级赋值的主观性等等,都是今后研究中需要深化和完善的方面。

参考文献

[1] 郭鹏程,包安明. 基于生态压力指数的新疆生态安全时空动态分析. 中国沙漠, 2012, 32(1): 235-243

[2] 张宁,常学礼,李秀梅,等. 基于沙漠化程度的生态安全格局评价. 中国沙漠, 2010, 30(2): 247-253

[3] 喻锋,李晓兵,王宏,等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653

[4] 俞孔坚,李海龙,李迪华,等. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175

[5] 肖笃宁,陈文波,郭福良,等. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358

[6] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449

[7] 叶玉瑶,苏泳娴,张虹欧,等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496

[8] 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

[9] 蒙吉军,朱利凯,杨倩,等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766

[10] 蒙吉军,燕群,向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590-596

[11] 潘竟虎,刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136

[12] 朱磊,刘雅轩. 基于 GIS 和元胞自动机的玛纳斯河流域典型绿洲景观格局优化. 干旱区地理, 2013, 36(5): 946-954

[13] Yue Depeng, Wang Jiping, Liu Yongbing, et al. Ecologically based landscape pattern optimization in northwest of Beijing. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(3): 359-372

[14] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768

[15] 刘洋,蒙吉军,朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989

[16] 李潇然,李阳兵,王永艳,等. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区: 以奉节县为例. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1959-1967

[17] 吴健生,张理卿,彭建,等. 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

[18] 李晶,蒙吉军,毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建: 以鄂尔多斯市准格尔旗为例. 北京大学学报(自然科学版),

- 2013, 49(4): 707–715
- [19] 朱磊, 刘雅轩. 基于 GIS 和元胞自动机的玛纳斯河流域典型绿洲景观格局优化. 干旱区地理, 2013, 36(5): 946–954
- [20] Mao Xiyan, Meng Jijun, Xiang Yunyun. CA-based model for developing land use ecological security pattern in semi-arid areas: a case study of Ordos, Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(1): 269–279
- [21] 王棒, 关文彬, 吴建安, 等. 生物多样性保护的区域生态安全格局评价手段: GAP 分析. 水土保持研究, 2006, 13(1): 192–196
- [22] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). Laxenburg: IIASA, 2008
- [23] Greenberg J A, Rueda C, Hestir E L, et al. Least cost distance analysis for spatial interpolation. *Computers & Geosciences*, 2011, 37: 272–276
- [24] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 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
- [25] 程国栋, 肖笃宁, 王根绪. 论干旱区景观生态特征与景观生态建设. 地球科学进展, 1999, 14(1): 11–15
- [26] 蒙古军, 吴秀芹, 李正国. 黑河流域 LUCC(1988–2000)的生态环境效应研究. 水土保持研究, 2005, 12(4): 17–21
- [27] 李静, 桑广书. 西汉以来黑河流域绿洲演变. 干旱区地理, 2010, 33(3): 480–486
- [28] 赵锐锋, 姜朋辉, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析. 生态学报, 2013, 33(14): 4436–4449
- [29] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196
- [30] 刘海龙, 石培基, 李生梅, 等. 河西走廊生态经济系统协调度评价及其空间演化. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3645–3654
- [31] Taylor P, Fahrig L, Henein K, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993, 68(3): 571–573
- [32] Petrosillo I, Zaccarelli N, Semeraro T, Zurlini G. The effectiveness of different conservation policies on the security of natural capital. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 89(1/2): 49–56
- [33] Forman R L, Goldman C R, Heanue K, et al. *Road ecology: science and solutions*. New York: Island Press, 2003
- [34] Sharp R, Chaplin K R, Wood S, et al. InVEST3.1.0 user's guide: integrated valuation of environmental services and tradeoffs [EB/OL]. (2014)[2014-11-20] <http://www.naturalcapitalproject.org/download.html>
- [35] 刘志伟. 基于 InVEST 的湿地景观格局变化生态响应分析: 以杭州湾南岸地区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [36] 王让虎, 李晓燕, 张树文, 等. 东北农牧交错带景观生态安全格局构建及预警研究: 以吉林省通榆县为例. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 111–115
- [37] 李滨生. 沙漠化地区造林种草的生态效益及其防治沙漠化的作用. 干旱区资源与环境, 1988, 2(4): 56–63
- [38] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. 生态学报, 2011, 31(20): 5928–5936
- [39] 李道进, 逢勇, 钱者东, 等. 基于景观生态学源: 汇理论的自然保护区功能分区研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(21): 53–59
- [40] 张玉虎, 于长青, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 风景区生态安全格局构建方法研究: 以北京妙峰山风景区为例. 干旱区研究, 2008, 25(3): 420–425