

DOI: 10.5846/stxb201803310719

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): - .

Tian Y N, Zhang M H, Xu D F, Zhang S W. Landscape ecological security patterns in an ecological city, based on source-sink theory. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建

田雅楠^{1,2}, 张梦晗¹, 许荡飞³, 张圣微^{1,2,*}

1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018

2 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018

3 张家口市林业工作总站, 张家口 075000

摘要:生态型市域是随着我国生态文明建设不断深入而产生的一批以生态输出为己任, 支撑区域乃至全国生态安全的重要生态型区域, 该类区域景观生态安全格局的构建是协调域内社会经济与生态环境保护的基础。本研究选取典型生态型市域张家口市, 基于“源-汇”理论构建景观生态安全格局, 划定不同保护重点的五大生态功能区, 识别重点生态保护区、重点生态修复区和廊道系统, 以此作为保障城市生态安全的基础, 逐步形成“点-线-面”三位一体的立体保护体系, 同时提出了生态安全格局构建的优先次序, 为张家口市生态安全格局分步骤建设提供依据。研究结果表明, 张家口市景观生态安全格局重点保护区缺失严重, 缺失区域总面积达 1555.77 km², 占生态保护核心区面积的 75.60%, 重点生态修复区域比例较大, 占全区面积的 24.27%, 生态廊道存在 3 个主要缺失区域, 针对张家口市生态安全格局建设任务艰巨的现状, 提出了分步骤建设的构建思路, 即优先进行重点生态修复、重点生态保护缺失区域和生态廊道缺失区域建设, 针对重点生态修复区域面积比例较大提出了分步修复的优先次序, 即水域修复区>林草水修复区>林草修复区>林地修复区>水草修复区>林地修复区>草地修复区, 并提出了优先建设冬奥会场及沿途生态廊道的思路, 此外, 为实现张家口区域生态系统的支撑作用, 需在完成重点区域建设的基础上不断扩大生态保护范围。本研究为欠发达生态型市域景观生态安全格局构建及生态环境保护体系建设提供了范例。

关键词:源-汇景观; 生态型市域; 生态安全; 最小阻力模型; 张家口

Landscape ecological security patterns in an ecological city, based on source-sink theory

TIAN Yanan^{1,2}, ZHANG Menghan¹, XU Dangfei³, ZHANG Shengwei^{1,2,*}

1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2 Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Inner Mongolia, Huhhot 010018, China

3 Forestry work station of Zhangjiakou, Zhangjiakou 075000, China

Abstract: With the growth of ecological civilization in China, a city in an ecozone takes the ecological protection as the main responsibility and affords the ecological security of the region and even the whole country. The landscape ecological security pattern of this kind of region is the basis for the protection of the social economy and the ecological environment in a coordination domain. This study selected Zhangjiakou, which is a typical ecozone city, as the research area. Based on source-sink theory, five major ecological functional areas with different protection key points were identified to construct the landscape ecological security pattern, while the key ecological protection areas, ecological restoration areas, and corridor

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41561044, 51779116)

收稿日期: 2018-03-31; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsw@imau.edu.cn

system were located, which are the basis for ensuring urban ecological security. With these areas, the three-dimensional protection system, with a "point-line-polygon", were constructed. Additionally, the priority on the structure of ecological security pattern was put forward, which provides the basis for the construction of the ecological security pattern for Zhangjiakou. The results showed that the key protection areas for the landscape ecological security pattern of Zhangjiakou were missing, and the total area of the missing area was 1555.77 km², which accounted for 75.60% of the area of the ecological protection core. The proportion of the key ecological restoration area was larger, accounting for 24.27% of the whole area, and there were three main missing areas in the ecological corridor. In addition, to realize the supporting role of the regional ecology of Zhangjiakou, the ecological protection scope should be continuously expanded until the completion of the construction of the key area. This study provides an example of the construction of an ecological security pattern for an underdeveloped eco-city and the construction of an ecological environment protection system.

Key Words: source-sink landscape; ecological city; ecological security; the minimum cumulative resistance model; Zhangjiakou

随着生态文明建设不断推进,我国生态环境保护越来越重视整体生态安全格局的建立与维护,区域发展不仅要根据自身的需求,同时要满足更高尺度乃至全国生态安全保障体系的要求,由此形成了一批能够对区域生态环境起到重要生态支撑作用的区域,该类区域以提供生态输出、维持更大尺度区域乃至全国的生态安全为区域自身发展的前提和目标,注重人与自然间的自然性和谐^[1],将这类区域称为“生态型区域”。党的十九大进一步强调“必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念”,可见国家在生态文明建设上的决心,在这一理念的指导下,生态型区域如何转变发展模式,探索一条绿色发展道路,实现自身生态系统的完善与维护,从而在区域上起到真正的生态支撑作用,成为该类型区域亟待解决的问题。景观格局与过程是景观生态学研究中的核心内容^[2],资源短缺、环境污染、生态恶化等诸多问题的出现均与景观格局演变密切相关^[3]。区域景观生态安全格局的构建不仅能够保障区域生态安全,对于指导社会经济发展和生态环境保护均具有重要意义^[4-5],是实现区域社会经济发展和生态环境建设的基础。然而,目前通过合理设置生态用地,有效提高城市生态服务功能和保障城市生态安全,仍缺乏深入而又系统的研究^[3]。“源-汇”景观理论是探究不同景观类型在空间上的动态平衡对生态过程影响,从而找到适合一个地区的景观空间格局^[2]。该理论自提出以来在非点源污染控制^[6-8]、区域空间规划^[9-12]、适宜性评价^[13-15]、城市生态安全格局构建^[16-20]等许多领域得以应用,为建立能够保障生态服务功能得以有效实现的景观生态安全格局提供了理论支撑。

在京津冀协同发展的大背景下,张家口市无论是在《国家主体功能区划》中,还是在“河北省新两翼建设”以及《北京城市总体规划》中均作为生态保护的重点区域,同时还是“国家山水林田湖生态保护修复”的试点区域,冬奥会的申办更加剧了张家口生态环境建设的紧迫性,如何建立合理的生态安全格局、保障其生态环境支撑和水源涵养的功能得以实现,如何找准“绿色办奥”与本地发展的结合点,使张家口市成为向世界展示山清水秀、蓬勃发展新中国的窗口,这些促使张家口市成为我国生态型市域的典型区域。张家口市要实现对于区域生态环境的支撑,走绿色发展之路,首先必须从总体上完成景观生态格局的合理布设,构建区域景观生态安全格局,并以此为基础确定社会经济发展和生态环境保护的目标和方向。其次,张家口市目前整体社会经济发展相对滞后,生态环境相对脆弱,景观生态安全格局需要分批分步骤实施。本研究试图在“源-汇”理论的指导下,构建以生态保护为主要任务的生态型市域景观生态安全格局,识别不同等级的生态保护与生态修复区域及廊道等保护目标,确定保障城市生态安全的重点生态区域,并通过保护目标等级的划分,确定区域生态保护建设的优先次序,为实现欠发达地区分步骤建立和完善景观生态安全格局,探索一条欠发达地区生态兴市、生态强市的路子提供范例。

1 材料与方法

1.1 区域概况

张家口市地处内蒙古高原与华北平原的过渡带,以大马群山为界,地貌类型分坝上、坝下两大地貌单元。截至 2016 年,张家口市辖 6 区 10 县,总面积 35904.08 km²,全市总人口 441.1 万人。张家口不仅是承东启西、沟通南北的咽喉要地,更是京津冀重要的水源涵养区和生态环境支撑区,在地域文化上是晋文化、京畿文化、草原文化的连接带,在生态系统上是内蒙古高原生态系统向华北平原生态系统的重要过渡带,因此在区域生态安全框架中起到重要的生态屏障作用,无论是首都经济圈还是河北新两翼建设,都将张家口市作为重要的生态支撑区,其生态安全格局不仅关系到区域的发展与定位,同时对于整个国家的生态安全格局也起着至关重要的作用。张家口地区历史上曾是“风吹草低见牛羊”的生态圣地,后因清朝末年开围放垦和建国初到 20 世纪 80 年来 30 多年伴随人口快速增长带来的有组织大规模开垦,农业用地面积高达 61% 以上,原本良好的生态环境遭到严重破坏,近年来高耗水产业的兴起使原本脆弱的生态环境雪上加霜,现状生态环境质量与支撑区域生态环境的要求有较大差距。加之该区域社会经济发展落后,贫困人口众多,改变现有发展模式,分步骤建立区域景观生态安全格局显得尤为紧迫。

1.2 “源-汇”理论

“源-汇”理论最初源于大气科学,后被引入到景观生态学领域,该理论将空间格局和生态过程有机结合在一起,为探索格局与过程的关系提供较好的理论基础^[21]。“源”景观是指在格局与过程研究中,那些能促进生态过程发展的景观类型;“汇”景观是那些能阻止延缓生态过程发展的景观类型^[2]。不同的景观类型对整个区域所起到的作用不同,景观类型按照对整个区域的物种流、物质流和能量流起到的作用分为“源”和“汇”,同时一些景观类型起到传输的作用,如林地、草地、湿地、水域等起到“源”的作用;另外一些景观类型如生物生产用地、建设用地等起到“汇”的作用;各种河流、绿色廊道等起到传输的作用。本研究中采用面积较大的景观组分和良好格局信息的林地核心斑块作为景观“源景观”^[22],其余作为“汇”。

1.3 最小累计阻力模型

最小累计阻力模型是以“源-汇”理论为基础,最小累积阻力指扩展主体从源经过不同阻力的景观阻抗到达目的地(汇)所消耗的费用或克服阻力所作的功,反映了一种潜在可达性^[9]。最小累计阻力模型是把不同景观类型相互转化和景观格局的改变看作景观要素通过克服阻力来实现,它反映了景观要素空间运动的趋势^[23]。最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance,简称 MCR)可以用来建立阻力面,该模型考虑三个方面的因素,源、距离和景观介质特征^[24],基本公式如下^[5,25]:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

式中, D 为距离, R 为阻力系数,最关键的过程在于如何确定扩展源和阻力系数^[9]。

扩展源:在景观中有一些能够促进生态过程发展的景观类型称之为“源景观”^[26],生态源景观是由具有高生态服务功能的景观类型组成的景观组分,常由林地、水域和草地构成^[27],可将土地利用方式典型且相对稳定的景观单元作为“源”^[17]。张家口市为典型的生态型区域,选取作为生态系统重要支撑的具有一定规模的草地、林地和水域作为扩展源,借鉴以往研究成果^[26,28],选取面积>20 hm²的空间上具有连续性的核心林地和草地以及面积大于 5 hm²的水域作为源景观。

阻力面:根据以往研究以及张家口市自然地理特征,本研究分别选取草地、林地和水域作为“源”,耕地、园地、建筑用地、交通用地和未利用地作为“汇”,根据土地利用的特征设定阻力值。本文设定 1 为最小阻力系数,表示某一景观单位可以自由移动,在区域为最适宜空间,100 为最大阻力系数,景观单元无法移动,为最不宜空间^[21]。根据张家口市生态功能支撑区的定位,将促进生态系统支撑的景观类型设定为低阻力值,对于生态系统源类型扩张起到阻碍作用的景观类型设定为阻力高值,具体而言,对于生态系统类型的保护建筑

用地和地交通用地阻力最大,取值 100、未利用地次之,取值 70,耕地和园地具有不同生态系统支撑功能,其阻力分别为 60 和 50,该区域草地生态系统面临较为严重的退化风险,因此对于生态系统的支撑具有一定的阻力,取值 10,林地和水域阻力最小,取值 1^[21]。根据公式(1)可以通过 ArcGIS 的 cost-distance 功能实现阻力面的构建。

1.4 数据来源

数据来源于张家口市国土部门提供的《2015 年张家口市土地利用分类》栅格数据,精度为 1 km×1 km,涉及土地利用类型包括耕地、园地、林地、草地、交通用地、水域、未利用地、建筑用地。生态保护地源于《河北省主体功能区规划》中的禁止开发区,主要包括保护区、水源地、森林公园、湿地公园、重要湿地、风景名胜区等。

2 结果与分析

2.1 源景观分布特征

根据源景观识别方法,三类生态源景观分布如图 1 所示。草地源景观总面积 10684 km²,占全市草地面积的 79.20%,其中天然牧草占比 4%、人工草地占比 16%、其他草地占比 80%,天然牧草主要分布在坝上地区,包括行政区域主要涉及尚义、张北、康保和沽源县,面积占比低,草原退化严重,破碎度较高,坝下丘陵区主要以其他草地类型为主。林地源景观总面积 7066 km²,占全市林地面积的 64.07%,其中有林地面积占比 32%、灌木林占比 29%、其他林地占比 39%,主要分布在坝下山地,行政区域涉及崇礼、赤城、怀来、逐鹿县,近年来张家口市对林地建设较为重视,特别是申奥成功以来,提出了明确的森林覆盖率要求,但目前对于森林质量的建设还有待增强。水域源景观总面积 657.79 km²,占全市水域面积的 85.49%,主要分布在张家口的几大流域,包括永定河流域、潮白河流域、大清河流域和内陆河流域,张家口市近些年的水资源环境状况堪忧,水污染问题特别是面源污染问题严峻,许多流域出现河道断流,流域内水土流失严重,区域水源涵养能力不足。

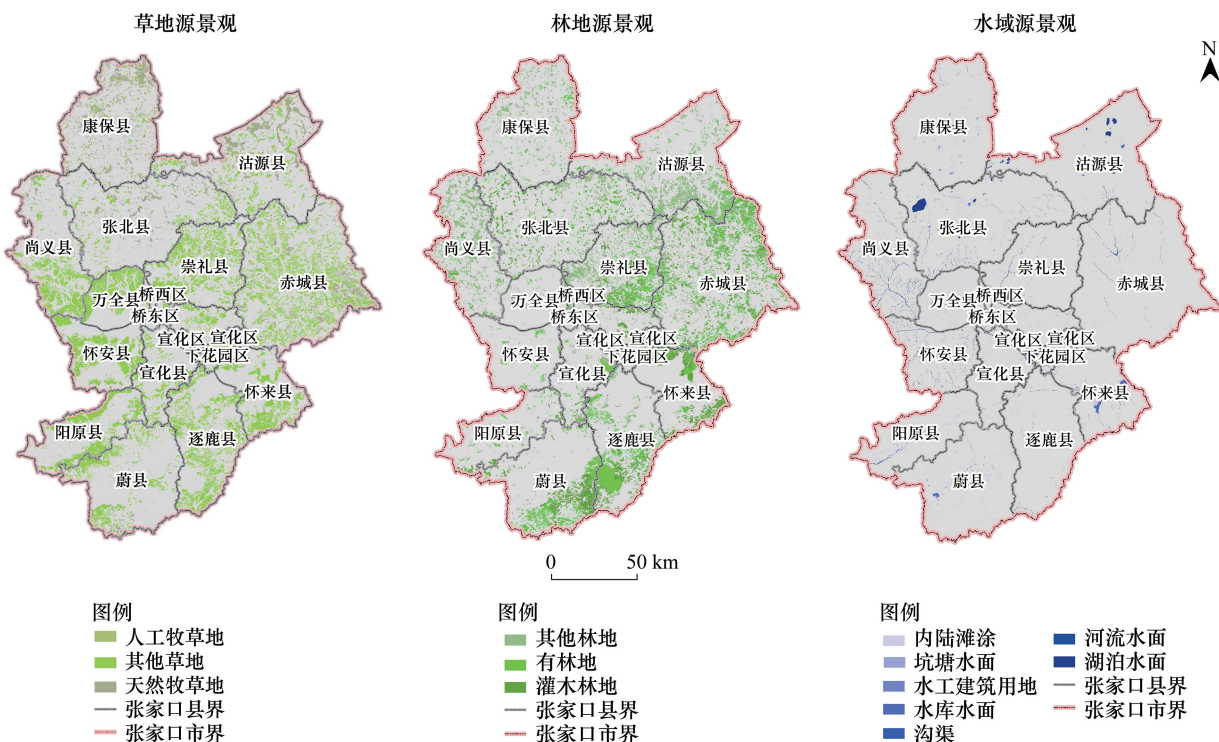


图 1 源景观识别

Fig.1 The identification of source region

2.2 阻力面分布特征

通过 MCR 分析不同源景观的阻力分布情况(图 2),草地阻力值分布范围为 0—42562,阻力高值区主要集中在人类活动干扰较高的市域周边以及蔚县,坝上草原为天然牧草的主要集中分布区,而坝上区域的草地源扩张阻力中等偏上区域分布广泛,康保县、张北以及尚义县的北部阻力值较高,使草地源扩张受到严重阻碍,区域呈现高度破碎化(图 2a)。林地阻力值分布范围为 0—37992,阻力高值和低值区分布较为集中,阻力高值区主要分布在坝下丘陵地区(图 2b)。水域阻力值分布范围为 0—99180,阻力高值和低值区分布最为集中,呈现由向北向东南逐渐升高的趋势(图 2c)。将不同源景观阻力在 ArcGIS 中进行叠加,叠加结果如图 2d 所示。叠加后阻力值分布范围为 0—34648,综合阻力高值区主要分布在东南区域,大清河流域、潮白河流域和潮白河与永定河分水岭。

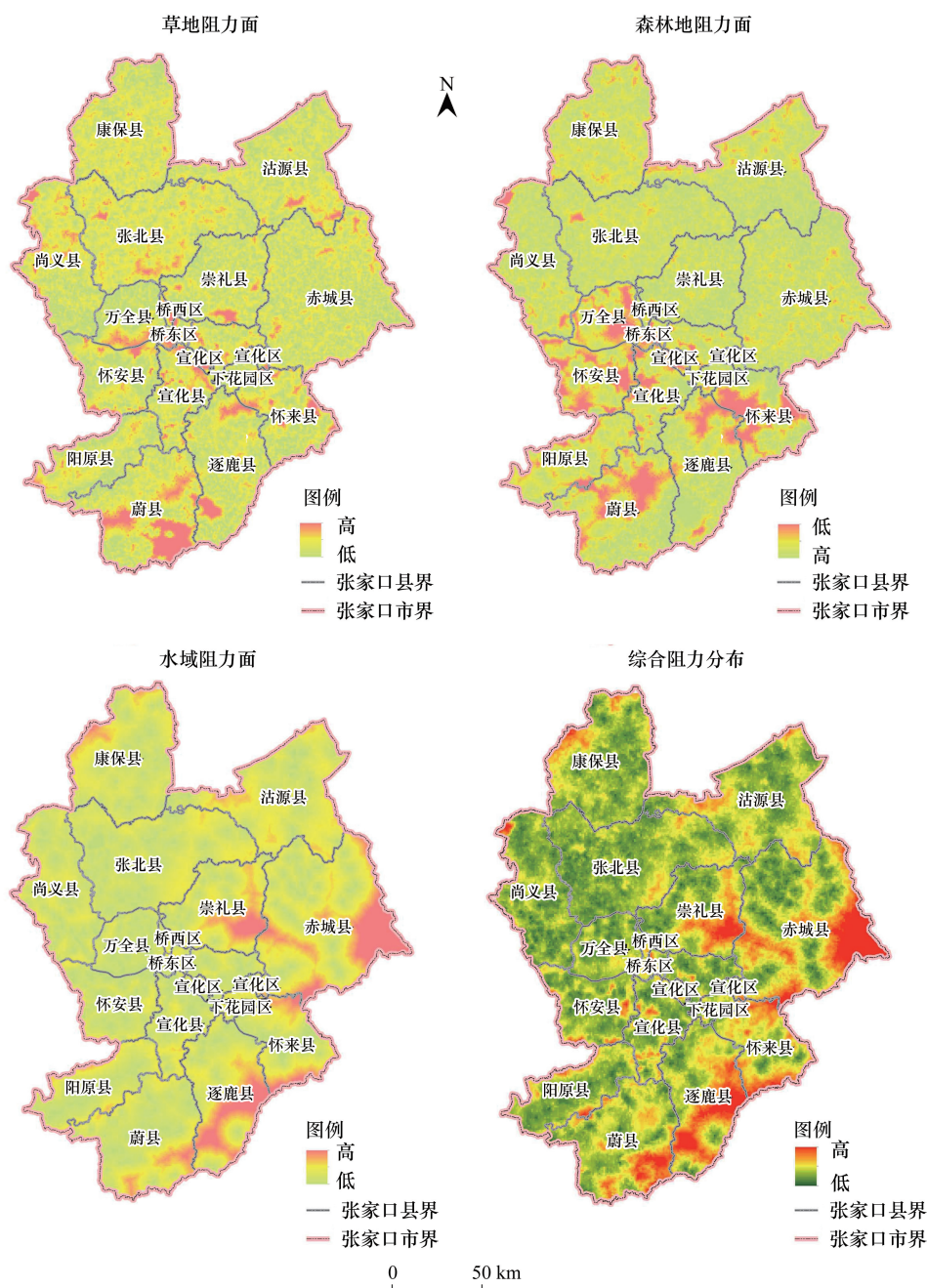


图 2 不同源景观阻力面分布图

Fig.2 The distribution of resistance surface in different sources

2.3 区域生态功能分区

阻力值越大表明该区域生态要素特征越不稳定,要进行生态修复,反之则为生态特征较为稳定,要保护与稳定^[21],因此,根据综合阻力值突变点将张家口市生态功能分成 5 个等级,每个功能区具有不同的生态功能和保护重点,从而形成张家口市生态安全的总体格局,其分级结果如图 3 所示。生态阻力低值区为生态保护区,高值区域为生态修复区域。生态保护核心区面积 2057.821 km²,占区域面积的 6%,生态保护核心区在全市分布较为均匀,构成了区域保护的核心框架,其生态阻力值低,具有能够支撑保护源扩展的足够大的“源景观”类型,是建立保护区域的优先区域。生态保护重要区面积 19661.82 km²,占区域面积的 54%,形成区域生态安全保障的重要支撑区域,起到连接生态保护核心区以及作为生态保护核心区缓冲区的作用。生态保护过渡区面积 8601.364 km²,占区域面积的 23%,是生态保护区域向生态修复区域过渡的重要区域,对于生态型市域,在社会经济发展允许的基础上,应逐步建设为生态保护重要区,增大森林、草地和湿地等生态源景观的面积,降低区域破碎度,提高生态系统的数量和品质;生态修复重要区面积 5444.50 km²,占区域面积的 15%,该区域受到人类干扰频繁,区域生态支撑能力不足,甚至遭到破坏,是进行生态修复的主要区域,重点进行水土保持、水源涵养等生态修复。生态修复极重要区 648.052 km²,占区域面积的 2%,生态阻力最高的区域,同时也是优先进行生态修复的区域。

2.4 重点生态修复区

为了确定生态修复区的修复优先次序和修复重点,根据阻力值的分布确定突变点,将草地阻力高于 8000 的区域作为草地阻力生态修复的重点区域,其区域分布如图 4a 所示,草地阻力修复重点区域面积 1538.64 km²,占全市面积的 4.18%;将林地阻力高于 10000 的区域作为林地阻力生态修复的重点区域,其区域分布如图 4b 所示,林地阻力修复重点区域面积 2121.17 km²,占全市面积的 5.76%;将水域阻力高于 20000 的区域作为水域阻力生态修复的重点区域,其区域分布如图 4c 所示,水域阻力修复重点区域面积 4247.89 km²,占全市面积的 11.54%。

将不同源景观生态修复区域进行叠加分级,结果如图 4d 所示,修复区总面积 8932.05 km²,占全区面积的 24.27%。修复顺序按照林草水修复区 7.53 km²、林草修复区 519.09 km²、林水修复区 99.18 km²、水草修复区 398.55 km²、林地修复区 2121.17 km²、草地修复区 1538.64 km²和水域修复区 4247.89 km²。结合生态功能分区生态修复重点区域的分布范围,其重点修复顺序为水域修复区>林草水修复区>林草修复区>林水修复区>水草修复区>林地修复区>草地修复区。

重点生态修复区主要集中在永定河流域,永定河流域最终汇入官厅水库,是北京的重要水源涵养地,特别是永定河重要分支的洋河流域,其流经张家口市城市发展的中心区域,面临的生态修复压力巨大,该区主要为林地、草地和林草修复区;另一个重要的生态修复片区分布在永定河的另一个支流桑干河流域,该区域同样为林地、草地和林草修复区;第三大生态修复区位于大清河流域,其修复重点为水域、草地和草水修复区;此外还有处于永定河和潮白河分水岭的水土保持重要修复区、位于潮白河流域的水土保持和草地重要修复区以及零

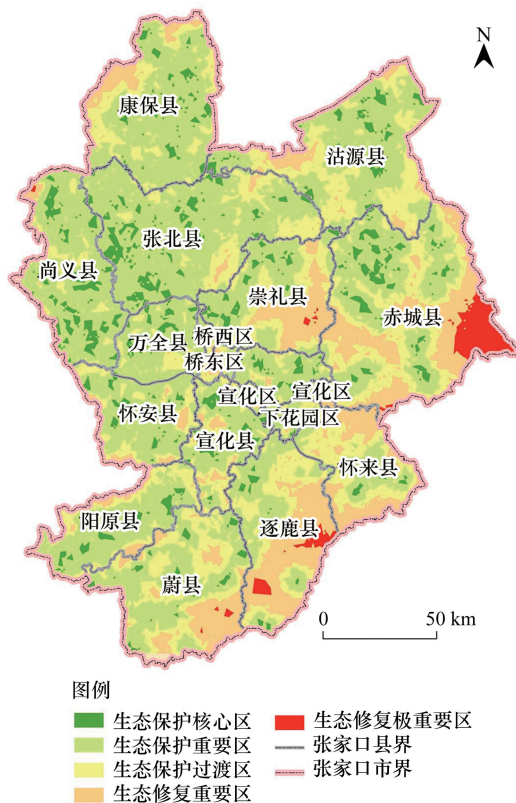


图 3 生态功能分区图

Fig.3 The Ecological functional zoning map

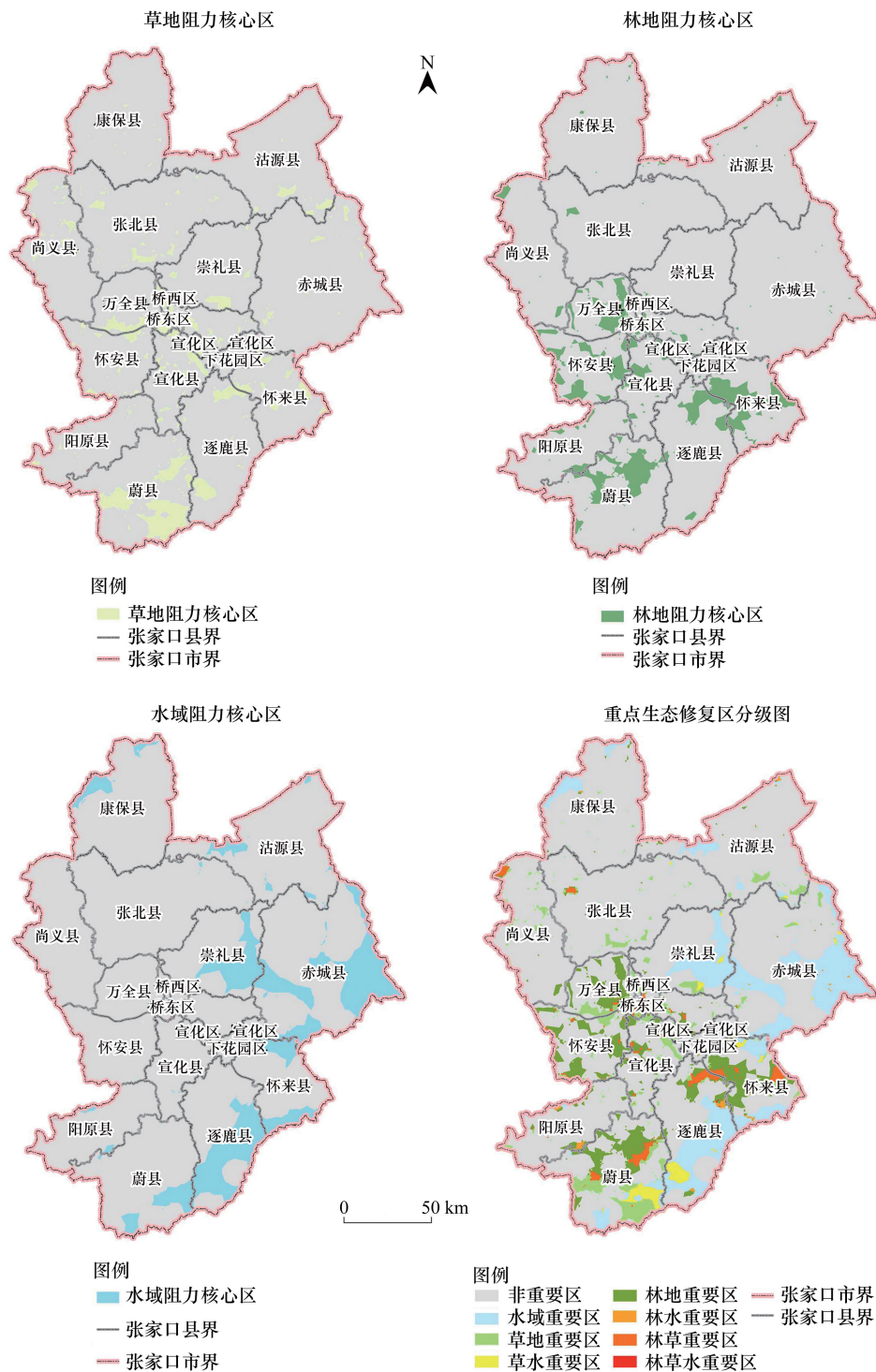


图 4 不同类型重点生态修复区分布图

Fig.4 The distribution of key ecological restoration region in different types

散分布于内陆和流域的草地生态修复区。

2.5 重点生态保护核心区识别

为了确定区域生态保护的优先次序,根据生态保护核心区的分布范围,分析现有生态保护地的分布范围,如图 5 所示。将张家口市现有保护地作为中心,其 10 km 范围内作为生态保护辐射区域^[29],与生态功能分区中的生态保护核心区进行叠加,未在生态保护辐射区域内的核心区即为重点生态保护缺失区域,如图 6 所示

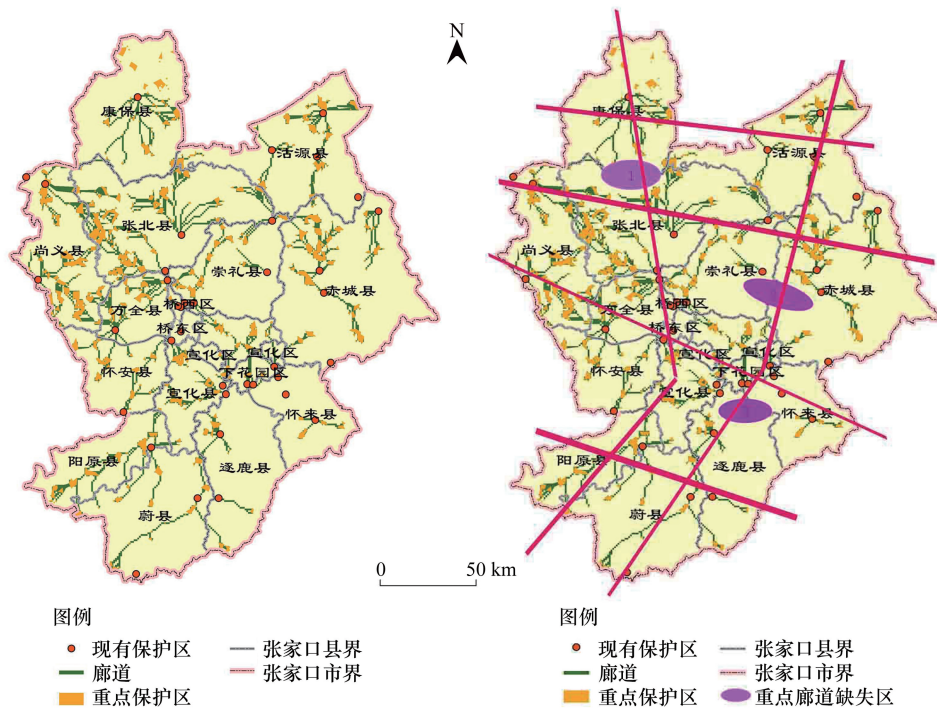


图 7 廊道分布图

Fig.7 Corridor distribution map

基础,生态保护核心区和重点生态修复区为重点,“四横两纵”生态廊道为连接的“点-线-面”三位一体的立体保护格局。五级生态功能区划明确了全域的保护重点,其中生态保护核心和重点生态修复区分别为区域重点“源景观”和“汇景观”,共占整个区域面积的 30%,是支撑整个张家口市生态安全格局的基本骨架,对重点“源景观”的保护和对重点“汇景观”的修复是构建区域生态安全格局的重中之重。

张家口市生态安全格局除占区域面积 6% 的生态保护核心区外,生态保护重要区占区域面积的 54%,其生态系统类型主要为林地、湿地和草原,同样需要不断加大保护力度,防止区域破碎化程度加强,有关研究表明,区域内至少有 50% 以上的土地应作为保护区才有利于物种的空间运动不受景观破碎化的影响^[5,31],因此维护张家口市生态型地区的支撑地位,保护生态重要区的生态系统安全同样是核心。应不断加大退耕还林、还草、还湿力度,削减区内基本农田面积,为扩大森林、草原和湿地生态系统留足空间,从而起到保障水源涵养功能得以有效发挥。研究不仅考虑了区域生态系统现状,同时考虑了现有保护体系,通过与现有保护体系进行对比,识别了现有保护区域的缺失部分,同时对于生态修复重点区域进行了等级划分,这些有助于区域实行分类分批建立和完善区域生态保护体系。

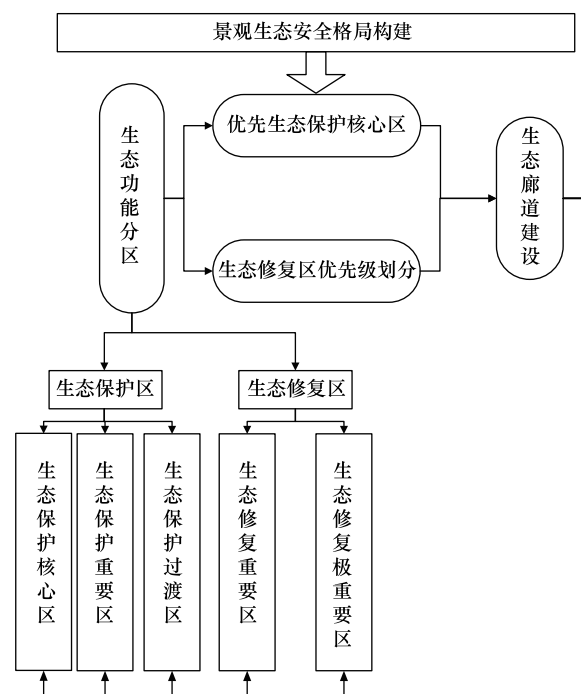


图 8 景观生态安全格局构建流程图

Fig.8 The flow chart of landscape ecological security pattern construction in Zhangjiakou

通过本研究确定景观生态安全格局的构建流程如图 8 所示,首先要明确区域的发展定位,生态型城市要为区域乃至国家的发展提供生态支撑,因此必须优先保障其特定的生态功能得以实现,从而能够真正起到对区域的生态支撑作用,其发展定位要优先考虑生态功能得以保障,生态支撑作用得以发挥。就张家口市而言,作为重要的首都水源涵养区和生态环境支撑区域,必须保障足够的生态“源景观”-即生态保护区,同时对于受到人类干扰较高的区域,要重点考虑建立生态修复区,从而保障生态功能得以正常发挥,此外还要结合重点保护区和关键生态廊道建设等生态保护关键区,形成“点-线-面”三位一体的立体生态安全保护格局体系。

“源-汇”理论为区域景观生态安全格局的构建提供了新的途径,其对生态过程的关注使得区域生态安全格局的构建更能体现格局和过程的关系,本研究基于该理论提出了张家口市景观生态安全格局的分步建设对策,对于经济发展相对落后,生态系统功能要求较高的生态型市域而言具有较高的现实性意义。本研究选取不同的景观类型作为源汇景观过程中,其阻力等级的确定仅参考了现有研究,对于不同阻力值的划定是否对生态安全格局产生影响尚有待进一步研究,对于生态安全格局的有效性可以进一步在时间和空间上进行验证。

4 结论

张家口市是重要的生态型区域,对于保护区域和全国的生态安全具有重要意义,冬奥会的成功申办不仅成为张家口社会经济与生态保护的新契机,更对张家口的生态环境提出了更高的要求。本研究针对张家口生态系统特征,构建了张家口市景观生态安全格局,形成了以五级生态功能分区为基础,生态保护核心区和重点生态修复区为重心的“四横两纵”生态廊道为连接的“点-线-面”三位一体生态安全格局,通过建立完整的生态保护体系、生态修复体系和廊道体系,实现张家口市整体生态功能提升。

张家口生态保护体系建设重点以完善现有生态保护地为主,坝上地区以建立草原保护区和湿地保护链为主,坝下山地区以森林保护区建设为主,坝下丘陵地区主要为永定河上游的湿地保护体系建设。生态修复体系应重点加强永定河流域综合整治和生态修复,加强上游水源涵养林建设,注重加强幼龄林抚育管理,推进低质低效林改造,提升森林质量,加大水土保持整治力度,结合流域生态功能定位,对于承担重要水生态服务功能的水源涵养区、河流廊道、重要湿地、河岸防护林等区域,科学划定河湖管理保护范围以及生态保护红线,保障并维持其自然结构特征和生态功能。充分利用河流水系和公路沿线建立生态廊道,重点完善生态廊道缺失点的廊道体系建设,结合生态保护体系,逐步形成“四横两纵”的保护网络体系。

本研究结合张家口现有的景观格局体系与生态保护体系,指出了张家口市生态保护的重点与缺口,为城市未来发展格局调整提供了理论基础,同时本研究提出了张家口市分步骤建设的重点,即优先建设重点生态修复区、重点生态保护区和生态廊道,逐渐扩大保护体系建设的范围,这有助于欠发达地区逐步改善社会经济发展体系和筹集资金。此外本研究表明,根据生态型区域的发展定位,张家口市为了完成支撑区域生态安全的重任,其生态缺口巨大,在今后的生态环境建设中应着重建立生态补偿机制。

参考文献 (References):

- [1] 黄爱宝. 生态型政府理念与政治文明发展. 深圳大学学报: 人文社会科学版, 2006, 23(2): 21-25.
- [2] 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.
- [3] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [4] 史振华, 程婕, 王百田. 天津市城镇扩展生态安全格局初探. 干旱区资源与环境, 2009, 23(5): 11-14.
- [5] 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.
- [6] 王金亮, 谢德体, 邵景安, 倪九派, 雷平. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地地面源污染源-汇风险识别. 农业工程学报, 2016, 32(16): 206-215.
- [7] 黄宁, 王红映, 齐涛, 刘启明, 黄云凤, 李剑雄. 基于“源-汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架——以厦门市马銮湾流域为例. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3325-3334.
- [8] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 杜悦悦. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. 生态学报, 2016, 36(11): 3137-3145.

- [9] 钟式玉, 吴箐, 李宇, 程金屏. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构——以广州市新塘镇为例. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3173-3179.
- [10] 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.
- [11] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 郑标, 王海云, 刘翠霞. 基于最小累积阻力模型的生态用地空间布局优化. 农业工程学报, 2016, 32(16): 248-257.
- [12] Yu Q, Yue D P, Wang J P, Zhang Q B, Li Y T, Yu Y, Chen J X, Li N. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns: a typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou (Inner Mongolia). Journal of Cleaner Production, 2016, 163(S): S54-S67.
- [13] 李健飞, 李林, 郭冻, 杜世宏. 基于最小累积阻力模型的珠海市生态适宜性评价. 应用生态学报, 2016, 27(1): 225-232.
- [14] 吴春华, 胡远满, 黄培泉, 刘森, 任东风. 基于最小阻力模型阜新市城市及农村居民点适宜性评价研究. 资源科学, 2013, 35(12): 2405-2411.
- [15] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [16] 王琦, 付梦娣, 魏来, 韩煜, 史娜娜, 李俊生, 全占军. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4546-4554.
- [17] 李晶, 蒙古军, 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.
- [18] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 周朕, 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.
- [19] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. Habitat International, 2018, 71: 110-124.
- [20] 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.
- [21] 张云路, 李雄, 田野. 基于景观生态学“源-汇”理论的市域尺度生态功能分区——以内蒙古通辽市为例. 生态学报, 2018, 38(1): 65-72.
- [22] 潘竞虎, 杨旺明, 刘莹. 兰州市景观生态功能评价和格局优化. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 96-103.
- [23] 尹发能, 王学雷. 基于最小累积阻力模型的四湖流域景观生态规划研究. 华中农业大学学报, 2010, 29(2): 231-235.
- [24] 俞孔坚, 游鸿, 许立言, 袁弘. 北京市住宅用地开发压力与城市扩张预警——基于阻力面的分析. 地理研究, 2012, 31(7): 1173-1184.
- [25] 俞孔坚, 李迪华, 吉庆萍. 景观与城市的生态设计: 概念与原理. 中国园林, 2001(6): 3-10.
- [26] 熊繁, 邵景安. 不同土地利用情景下农村景观生态格局优化. 中国农业资源与区划, 2016, 37(2): 11-21.
- [27] 唐丽, 罗亦殷, 罗改改, 李军, 刘沁楚, 李金钊. 基于粒度反推法和 MCR 模型的海南省东方市景观格局优化. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3393-3403.
- [28] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 徐定德, 陈田田. 基于景观生态安全格局的低丘缓坡土地资源开发利用——以四川省泸县为例. 生态学报, 2016, 36(12): 3646-3654.
- [29] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
- [30] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. 生态学报, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [31] Franklin J F, Forman R T T. Creating landscape patterns by forest cutting: Ecological consequences and principles. Landscape Ecology, 1987, 1(1): 5-18.