

# 风域视角京津冀生态廊道空间格局识别

陈艳梅<sup>1</sup>,高吉喜<sup>2</sup>,年蔚<sup>3</sup>,张璐<sup>4</sup>,冯朝阳<sup>4\*</sup> (1.河北师范大学资源与环境科学学院,河北省环境变化遥感识别技术创新中心,河北省环境演变与生态建设实验室,河北石家庄 050024; 2.生态环境部环境卫星应用中心,北京 100094; 3.秦皇岛市经济技术开发区第四中学,河北秦皇岛 066004; 4.中国环境科学研究院生态所,北京 100012)

**摘要:** 在风域视角下,分析大尺度生态廊道形成的关键因子,构建最小累计阻力模型和通风效益评测模型,以京津冀为研究区,利用气象、遥感及其他基础地理数据等,阐述研究区近地面风场特征,识别区域内生态廊道空间格局,结果表明:研究区全域近地面多年平均风速为 2.07m/s.冬季,研究区多年平均风速呈张家口坝上一北京—天津沿海高两侧低格局,主导风向为偏北风;夏季,多年平均风速呈现西北部和东南部高,中东部和西南部低的格局,主导风向为偏南风.冬季,在研究区筛选出 34 个社会经济源地,识别出 5 条一级生态廊道,走向从西北向东南或从北向南,7 条二级生态廊道,走向主要从西向东;夏季,在研究区筛选出 68 个生态源地,识别出 5 条一级生态廊道,走向从东南向西北或从南向北,6 条二级生态廊道,走向主要从东向西.合并精简冬夏连通性能较好的生态廊道,优选出 5 条一级生态廊道,总长度 3073.04km,以南北向为主,5 条二级生态廊道,总长度 1582.06km,以东西向为主,初步形成京津冀“五纵五横”生态廊道格局.

**关键词:** 生态廊道; 风域; 最小累计阻力模型; 通风效益评测模型; 京津冀

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)07-3418-09

## Identification of ecological corridors' spatial pattern in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of wind domain.

CHEN Yan-mei<sup>1</sup>, GAO Ji-xi<sup>2</sup>, NIAN Wei<sup>3</sup>, ZHANG Lu<sup>4</sup>, FENG Chao-yang<sup>4\*</sup> (1.Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resource and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2.Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 3.Fourth Middle School of Qinhuangdao Development Zone, Qinhuangdao 066004, China; 4.Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2021,41(7): 3418~3426

**Abstract:** Based on the key factors of large-scale ecological corridor formation from the perspective of wind domain, the minimum cumulative resistance model and ventilation benefit evaluation model were built. Taking Beijing-Tianjin-Hebei region as the study area, meteorological data, remote sensing and other basic geographical data were used to analyze the characteristics of near-surface wind field and identify the spatial pattern of ecological corridors. The multi-year average wind speed was 2.07m/s in the study area near ground. For winter, the multi-year average wind speed showed high values along the Zhangjiakou Dam-Beijing-Tianjin coastal area and low on both sides, and the prevailing direction was northerly wind. For summer, the multi-year average wind speed was high in the northwest and southeast, and low in the mid-east and southwest, and the prevailing direction was southerly wind. For winter, 34 social and economic sources were screened out, five first-level ecological corridors were identified, and their trend was from northwest to southeast or from north to south; seven second-level ecological corridors were identified, and their trend was mainly from west to east. For summer, 68 ecological sources were screened out, five first-level ecological corridors were identified, and their trend was from southeast to northwest or from south to north; and six second-level ecological corridors were identified, and their trend was mainly from east to west. Five first-level north-south ecological corridors with a total length of 3073.04km and five second-level east-west ecological corridors with a total length of 1582.06km were selected by combining and simplifying the ecological corridors with better connectivity performance for winter and summer. They initially constructed the spatial pattern of “five vertical and five horizontal” ecological corridors in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

**Key words:** ecological corridors; wind domain; minimum cumulative resistance model; ventilation benefit evaluation model; Beijing-Tianjin-Hebei region

生态廊道缘于绿带、绿道、廊道等,作为沟通自然生态空间和人类集聚区的桥梁,已成为保障人居环境优美与区域生态安全的关键地带.生态廊道是一种或几种生态介质作用下能量和物质流动的通

收稿日期: 2020-11-21

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(20BJY047);国家重点研发计划项目(2017YFC0506603)

\* 责任作者, 研究员, fengchy@craes.org.cn

道或载体,主要由带状山水林草湖等生态系统组成,能有效调控地理—生态过程,具有保护生物多样性、增加生态连通性、提升生态功能等作用。风域是以空气为载体,以风为生态介质连接形成的多功能区域综合体<sup>[1]</sup>。风域视角中小尺度生态廊道对城市污染物扩散有益,而大尺度生态廊道具有独特的功能:一是统筹整合各类生态廊道,架构区域生态网络体系,提高生态系统稳定性。二是有效衔接城市与城市、城市与生态空间,提升广大生态空间平衡碳氧、调节气候等生态功能。三是强化城市群用地效率管控,合理限制中心城市增长边界,防止关键生态空间被挤占,便于共建共享城市群之间、城市群内部的绿色基础设施,提升城市群一体化发展水平<sup>[2-3]</sup>。风域视角大尺度生态廊道研究的意义在于引导和优化国土空间开发方向、提升人居环境适宜性,并为调整和完善城市群空间规划、协同推进区域生态体系建设以及构建区域生态安全格局提供科学依据<sup>[4-6]</sup>。

生态廊道研究主要围绕其生态连通性与生态功能。在西方,生态安全问题不严重,研究主要侧重研究方向:一是维护生物多样性,研究多用生态廊道来连接相互隔离或破碎的生境,以减少物种灭绝率;提出当廊道宽度适宜、内部结构合理、食物充足时,孤立斑块间物种才能顺利交流并生存繁衍<sup>[7]</sup>。二是提供休闲游憩功能,认为生态廊道建设能提高城市、区域甚至洲际水平的生态连通性,为人们生活、旅游提供更多户外空间,如伦敦东南绿链、北美绿道网络、欧洲绿带计划等<sup>[8]</sup>。在中国,人口众多,城市用地规模急剧扩张,人类活动对自然景观影响深刻,主要关注研究方向:一是提升城市环境质量,研究者在北京、深圳、杭州、厦门等城市开展了相关探索,提出生态廊道建设不仅能增加生态连通性、集约优化土地利用方式,还具有生态隔离与防护、降低和缓解城市污染等生态功能<sup>[9-10]</sup>。二是对区域生态安全格局形成的作用,研究多结合山水形胜,探索生态廊道引导与优化空间结构、维护和强化山水格局连续性、恢复河道及海岸自然形态等作用<sup>[11]</sup>,探讨生态廊道对城市群空间布局的优化作用,提出在宏观尺度应由多市共建生态型、网络化、多功能的生态廊道工程<sup>[2-3,12]</sup>。总之,基于生态连通性,国外侧重其维护生物多样性和休闲游憩功能,国内则更关注其对城市环境质量和区域生态安全的影响,但上述研究在大

尺度相关成果还较少。

风介质驱动下的生态廊道研究侧重其通风与缓解热岛效应。20 世纪 70 年代,德国气象学家与城市规划者合作,探索城市通风廊道构建的理论方法,成果多用于引导城市规划。随后,由于全球变暖趋势增加,奥地利、瑞典、波兰、英国、日本等国家也开始相关研究<sup>[13-14]</sup>。研究多是将城市下垫面分为作用空间、生态补偿空间与通风廊道,该廊道主要把郊区新鲜空气引导至城市中心区<sup>[15]</sup>。在中国,伴随着雾霾事件频发、城市热岛效应加剧,通风走廊、绿色风廊、楔形绿地等研究逐步引起国内学术界的关注。香港是国内此领域研究的先驱,从 2003 年开始,香港中文大学启动了相关研究项目,为香港城市通风廊道建设提供了策略性指引<sup>[16]</sup>。随后有大量相关成果出现,如:研究者分析了北京市区通风潜力区分布以及通风廊道对小气候的调节作用<sup>[17-18]</sup>,利用武汉市自然生态楔形绿地构建城市风廊,引城外凉风入市<sup>[19]</sup>,根据风环境特征和地形特征,构建南京市不同等级的绿色风廊<sup>[20]</sup>,还有多位学者对中国不同气候区的城市通风廊道建设提出了相关建议<sup>[21-24]</sup>。上述团队探索构建不同类型或等级的通风廊道,在调节气温、营造生态宜居环境等方面发挥了巨大作用。然而,国内外风域视角相关研究,主要集中于城市和街区尺度,立足于城市群或宏观尺度相关成果还比较缺乏。

生态廊道研究方法包括实测法、物理模拟法和综合模拟法等<sup>[8,25]</sup>。风介质驱动下生态廊道研究方法包括现场监测、风洞试验和计算机流体力学模拟等<sup>[26]</sup>。实测法或现场监测法可以获得一手数据资料,但需要耗费大量人力物力,且主要应用于局地尺度,物理模拟法和风洞试验法的可靠性尚需进一步验证。计算机综合模拟法将是重要发展方向,但随着城市群快速发展,区域下垫面变得越来越复杂,大尺度综合模拟仍需根据实际,从机理方面对模型和关键参数进行完善。

本研究在前人研究基础上,建立风域视角最小累计阻力模型和通风效益评测模型,以京津冀地区为例,分析研究区近地面风场特征,利用计算机综合模拟法测算研究区冬夏最小累计阻力面空间分布,识别研究区内生态廊道空间格局,以期为区域生态环境协同共建提供方法与依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

京津冀位于华北地区,东临渤海,113°27'E~119°50'E,36°05'N~42°40'N,总面积为 21.72 万 km<sup>2</sup>。地势西北高、东南低,地貌类型复杂多样,西部和北部为太行山、燕山山脉,两山交汇处是冀西北间山盆地,区域最北部是内蒙古高原最南端一坝上高原,东南为华北平原北端。气候为典型的温带半湿润半干旱大陆性气候,降水量自东南向西北递减。区域内水系较多,主要包括海河、滦河、辽河和坝上西部内流河诸河。区域大部分地区地带性植被为温带落叶阔叶林,北部坝上地区为温带草原,由于人类活动频繁,该区域自然植被受到不同程度的破坏,发育的地带性土壤类型主要有栗钙土、棕壤、褐土和潮土等。

### 1.2 数据来源

研究所使用主要数据包括气象、遥感、土地利用类型以及其他数据。气象数据来源于国家气象信息中心,主要是中国地面累年月值数据集(1981~2010年),选取京津冀三省(市)共 171 个站点的风场数据。遥感数据主要是 2010 年气溶胶产品,是 NASA

的 Level 2 级数据,空间分辨率为 8km、时间分辨率为 2 次/d。土地利用类型数据是 2010 年土地利用类型矢量图,来源于原河北省国土资源厅、全国生态保护红线办公室。其他数据如 DEM 数据、自然保护区、水系及线性工程分布矢量图等来源于原河北省地理信息局、河北省生态保护厅、河北省水利厅等。

### 1.3 风域视角最小累计阻力模型构建

1.3.1 模型构建 在大气边界层最下层,风行过程中下垫面性质不同,摩擦阻力不同,利用地一气之间相互作用原理,构建最小累计阻力模型,表达式为:

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

式中:MCR 为最小累计阻力值; $\int_{\min}$  为最小阻力函数; $D_{ij}$  为风从源地  $j$  到源地  $i$  的空间距离; $R_i$  为单元网格某阻力因子  $i$  对风的阻力。该模型建立的关键是阻力因子与相关计算参数选取,以及源地确立。

1.3.2 阻力因子及相关参数的确定 (1)土地利用因子:不同土地利用类型地面粗糙度具有差异,地面粗糙度越大,风行过程中遇到的阻力也越大。参考中外学者研究结果<sup>[27]</sup>,确定不同土地利用类型的地表粗糙度,作为土地利用因子赋值的依据,见表 1。

表 1 土地利用类型的地表粗糙度  
Table 1 Surface roughness of land use types

土地利用类型	城市和建设用地	耕地、农牧交错地	草地	林地	水体湿地	未利用地
地表粗糙度(m)	8	3	4	5	0	4

(2)地形因子:地形起伏度和坡度对地面风场有较大影响。地形起伏度利用 DEM 数据和窗口分析法<sup>[28]</sup>获得,表达式为:

$$D_a = H_{a\max} - H_{a\min} \quad (2)$$

式中: $D_a$  为以第  $a$  个栅格为中心的一定窗口内的地形起伏度, $H_{a\max}$  和  $H_{a\min}$  分别为该窗口内高程最大值和最小值。坡度运算利用等量重分类法<sup>[29]</sup>。然后,将地形起伏度和坡度运算结果划分为 5 级,分别赋值。

(3)河流及线性工程因子:河道本身就是风的通道,一般距离河流中心线越远,对风的阻力越大,河流等级及河流周边地形对风场产生较大的影响。另外,高速公路及高铁的修建有利于形成风环境下的生态廊道。利用 ArcGIS 软件中的多环缓冲功能,按距离河流或道路中心线的远近赋值。将河流与所有线性

工程的阻力值进行统筹分析,若 2 个线性工程紧邻,则重叠部分取两者最小值。

(4)风向因子:将风向因子加入到最小累计阻力模型中,体现了本研究的特色。分析研究区 30a 近地面风场特点,根据研究区不同自然地理单元不同季节风向与坡向的交角进行阻力赋值。

在上述阻力因子分析基础上,确定各因子阻力值参数并辅以权重,见表 2。

1.3.3 源地的确立 本研究选取两类源地,一类是社会经济源地,另外一类是生态源地。

(1)社会经济源地的确立:本文主要依据研究区 2010 年公里网格人口密度数据<sup>[30]</sup>、公里网格 GDP 数据<sup>[31]</sup>、1 月和 7 月平均气溶胶光学厚度栅格数据,分析区域人口、经济与大气污染的空间格局特征。第一,在 ArcGIS 软件平台中,将 3 类数据分别按照自

然间断点法分 10 级,再按 1 月和 7 月分别进行数值无量纲叠加.第二,求取 1 月和 7 月社会经济无量纲数值的均值,按照自然间断点法分 3 级,取最高级进

行矢量化.第三,去掉破碎斑块,即作斑块数量与斑块累计面积之间关系曲线,曲线拐点处斑块数作为社会经济源地数量.

表 2 各类阻力因子的阻力值与权重  
Table 2 Resistance value and weight coefficient of various resistance factors

各类因子		阻力值				
		0	1	2	3	4
土地利用因子 (权重 0.2)		水体、道路	草地、耕地、未利用土地	—	林地、园地	建设用地
地形因子 (权重 0.4)	地形起伏度(m)	0~30	30~70	70~200	200~500	>500
	坡度(°)	<5	5~15	15~25	25~35	>35
河流线性工程因子 (权重 0.2)	河流因子 (km)	距离三、四和五级河流中心线分别为<1、<0.5 和<0.2	距离三、四和五级河流中心线分别为<2、<1 和<0.4	距离三、四和五级河流中心线分别为<3、<1.5 和<0.6	距离三、四和五级河流中心线分别为<4、<2 和<0.8	距离三、四和五级河流中心线分别为<5、<2.5 和<1
	线性工程因子(km)	<0.2	<0.4	<0.6	<0.8	<1
风向因子 (权重 0.2)	风向与坡向交角	0°±22.5 平行	—	—	45°±22.5 斜交	90°±22.5 垂直

注:—表示没有数值.

(2)生态源地的确立:本研究选取自然保护区和大型湖泊水库作为生态源地.利用资料收集法,获得研究区内共有 45 个自然保护区,去掉地质遗迹类,共有 41 个.另外,根据遥感影像分析与实地调研,研究区有 27 个面积较大的湖泊水库.上述 41 个自然保护区和 27 个水库作为生态源地.

1.4 生态廊道通风效益评测模型构建

1.4.1 模型构建 为了评测生态廊道及其潜力区中心线两侧各 500m 范围内的连通性,选择廊道长度、曲度、下垫面性质、阻力值、廊道内风速、廊道走向与风向夹角、链接源地数量等 7 个因子,构建生态廊道通风效应评测模型,表达式:

$$u_i = \sum_{j=1}^n \begin{cases} (x_{ij} - \beta_{ij}) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) & j \text{ 为正向因子} \\ (\alpha_{ij} - x_{ij}) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) & j \text{ 为逆向因子} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_i$  为第  $i$  个廊道的通风效益评测指数; $n$  是上述 7 个评价因子; $x_{ij}$  为第  $i$  个廊道的  $j$  评测因子值; $\alpha_{ij}$  和  $\beta_{ij}$  分别为所有参评廊道中  $j$  评测因子的最大值和最小值.针对不同  $j$  因子对廊道通风性能的影响,将因子分为正向和逆向,正向因子数值越大,廊道连通性

越好、级别越高;逆向因子数值越大,廊道连通性越差.通过(3)式计算出某生态廊道  $u_i$  值,当  $u_i \geq 3.5$  为一级生态廊道, $1.75 \leq u_i < 3.5$  为二级风廊,研究未统计小于 1.75 的小型生态廊道.

1.4.2 主要因子的参数选取 上述模型中下面两个因子需要进一步阐释其量化方法.

(1)廊道曲度是衡量廊道结构、气流水平运动能耗的量化指标.通常,曲度越大,表示空气流通中受到的阻力越大,连通性越低,如下式:

$$G_q = \frac{q}{l} \quad (4)$$

式中, $G_q$  为廊道曲度; $q$  为实际长度; $l$  为起点与终点间的直线距离.

(2)由于廊道较长,一条廊道走向与风向夹角在整个区域变化较大,需要对廊道采取分段赋值,再计算廊道的加权平均值.利用 ArcGIS 空间统计模块中的度量地理分布与求取线性方向平均值,确定廊道各段走向,测算走向与风向的交角  $\theta$ ,然后按照  $\theta$  确定分类值,见表 3.

表 3 廊道走向与风向的夹角参数值  
Table 3 Parameter value of angle between corridor direction and wind direction

角度 $\theta$	$0^\circ \leq \theta < 22.5^\circ, 157.5^\circ \leq \theta < 202.5^\circ,$ $337.5^\circ \leq \theta < 360^\circ$	$22.5^\circ \leq \theta < 67.5^\circ, 112.5^\circ \leq \theta < 157.5^\circ,$ $202.5^\circ \leq \theta < 247.5^\circ, 292.5^\circ \leq \theta < 337.5^\circ$	$67.5^\circ \leq \theta < 112.5^\circ,$ $247.5^\circ \leq \theta < 292.5^\circ$
角度关系与分类值	平行:0	斜交:3	垂直:4

评价过程中,下垫面性质按廊道面土地利用类

型赋值,其他因子的取值主要参考 1.3 节中的研究方

法,通过 ArcGIS 软件平台直接获取.

## 2 结果与讨论

### 2.1 京津冀近地面风场特征

分析 1981~2010 年京津冀冬季(以 1 月份代表)、夏季(以 7 月份代表)和全年的多年平均近地面(10m)风场特征,见图 1.

冬季,京津冀近地面多年平均风速空间格局表现为张家口坝上—北京—天津及周边沿海高,风速大于 2.4m/s,两侧燕山山区东部、太行山山前平原北部较低,风速小于 1.5m/s,全域平均风速为 1.90m/s. 张家口—北京—天津是冬季主要的通风道.研究区冬

季主导风向主要为偏北风,坝上高原、燕山山区及山前平原为西北风,河北平原东南部主要为东北风.

夏季,京津冀近地面多年平均风速空间格局表现为坝上高原和东南部平原高,风速大于 2.2m/s,中东部和西南部较低,风速小于 1.6m/s,全域平均风速为 1.88m/s.研究区夏季主导风向为偏南风,北部主要为东南风,南部主要为南风 and 西南风.

全年来看,京津冀近地面多年平均风速空间格局为坝上高原西北部、东部沿海风速大,风速大于 2.5m/s,燕山东部、太行山北部风速小,风速小于 1.6m/s.研究区北部主要盛行偏北风,南部为偏南风.研究区全域多年平均风速为 2.07m/s.

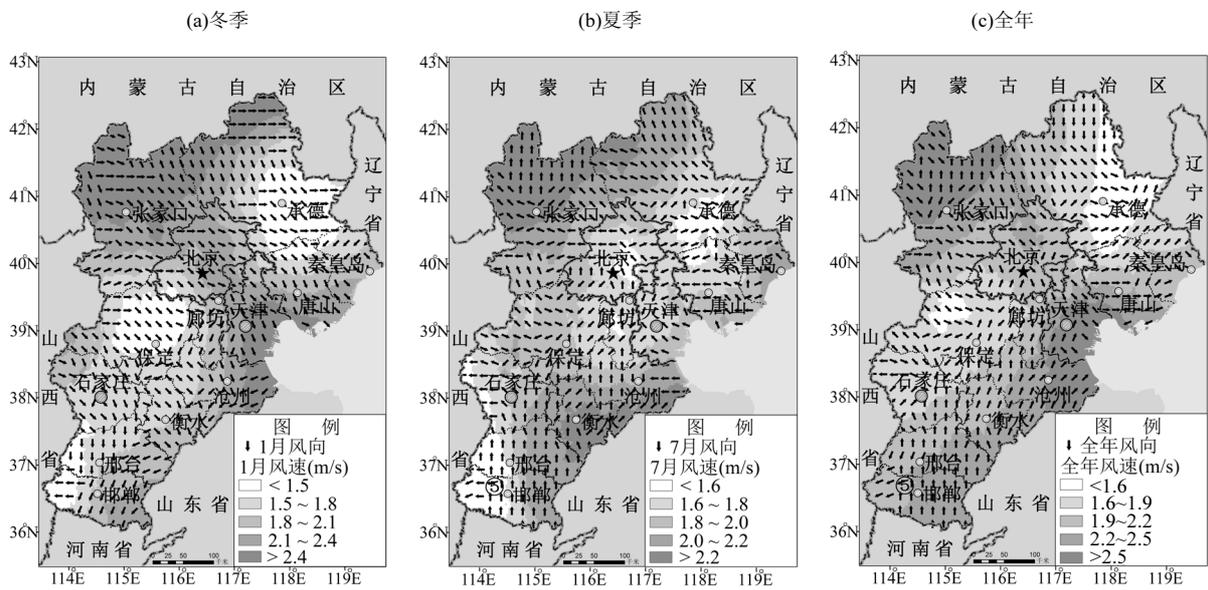


图 1 京津冀冬夏及全年近地面(10m)多年平均风场

Fig.1 Multi-year average near-surface wind field(10m) in winter, summer and the entire year in Beijing-Tianjin-Hebei region

### 2.2 京津冀最小累计阻力面空间分布特征

依据区域内风场特征,冬季考虑到研究区大气污染比较严重,以社会经济源地建立阻力面,基于 1.3.3 方法确定社会经济源地共 34 个,总面积 18478.91km<sup>2</sup>,见图 2(a).夏季植物生长茂盛,生态功能较好,以生态源地建立阻力面,生态源地共 68 个,总面积 8041.45km<sup>2</sup>,见图 2(b).测算出的阻力面数值高低标志着风在运行过程中地—气相互作用力大小,也反映了生态系统以风为生态介质,为人口密集区提供各类生态服务的畅通程度.

冬季和夏季,京津冀最小累计阻力面均呈现燕山、太行山山区高,坝上高原和平原较低的趋势.冬季,区域以北风和偏北风为主导风向,燕山、太行山

区山脉走向与风向垂直或近似垂直,阻力值大,构成风行过程中的生态屏障.夏季,区域以南风和偏南风为主,燕山、太行山区山脉仍是风行过程中的生态屏障,但此时植物生长状况最好,可以为周围区域提供净化空气、平衡碳氧等生态系统服务.坝上高原和河北平原由于地形起伏度较小,整体阻力值偏低.整个区域阻力值最低的区域主要分布于山区沟谷、河流湿地、道路、湖泊水库等所在地.

在阻力面低值区中,将长度较长、与风向的一致性较高的区域识别出来,作为风域内生态廊道及其潜力区.冬季,针对社会经济源地识别出 12 条廊道,夏季,针对生态源地识别出 11 条廊道.

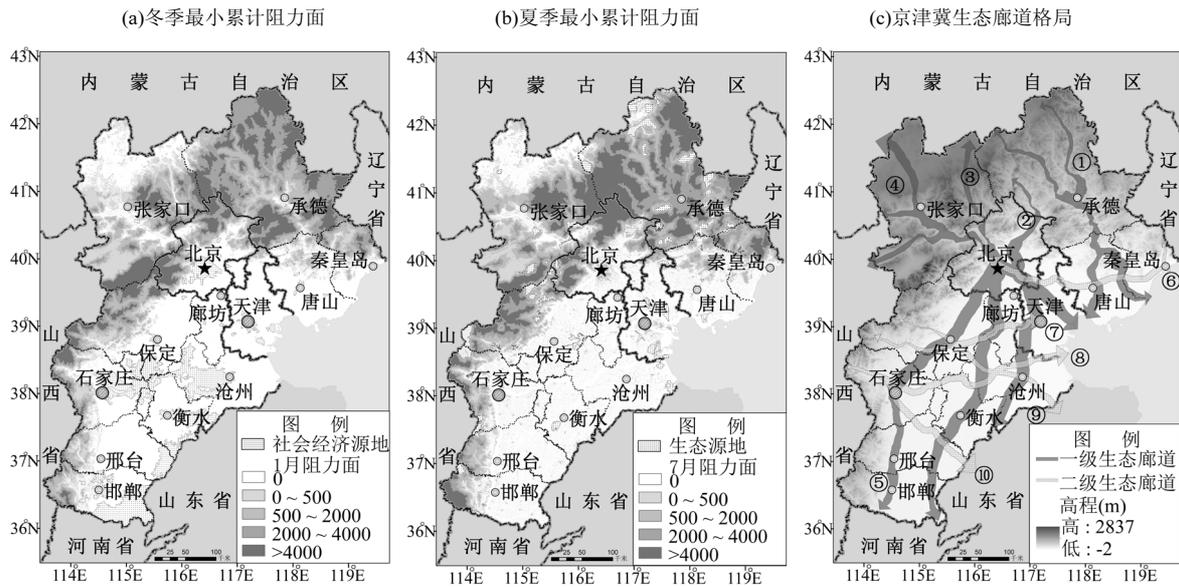


图2 冬夏最小累计阻力面与京津冀生态廊道格局

Fig.2 Spatial distribution of minimum cumulative resistance surface in winter and summer, and ecological corridor in Beijing-Tianjin-Hebei region

2.3 风域视角京津冀生态廊道的空间格局

生态廊道通风效应评测结果见表 4。冬季,  $u_i \geq 3.5$  的一级生态廊道有 5 条, 长度为 3450.25km, 走向从西北向东南, 或从北向南,  $1.75 \leq u_i < 3.5$  的二级生态廊道

有 7 条, 长度为 1826.33km, 走向主要从西向东; 夏季, 评测出一级生态廊道有 5 条, 长度为 3955.76km, 走向从东南向西北, 或从南向北, 二级生态廊道有 6 条, 长度为 1504.29km, 走向主要从东向西。

表 4 生态廊道通风效益( $u_i$ )评测结果

Table 4 Evaluation results of ecological corridor ventilation benefits ( $u_i$ )

季节	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
冬季	4.40	2.84	4.24	4.64	4.07	3.78	3.35	2.51	3.06	2.36	2.70	2.40
夏季	2.85	4.59	2.62	5.02	4.00	5.03	5.40	2.89	3.24	2.88	1.88	

表 5 京津冀一、二级生态廊道基本情况

Table 5 Description to the first and second level ecological corridors in Beijing-Tianjin-Hebei region

级别	编号	主要走向	途经行政区	下垫面主要类型
一级生态廊道	①	冬季自北向南, 夏季相反	承德、唐山、秦皇岛	滦河河谷湿地、裸地和草地、潘家口-大黑汀水库等
	②	冬季自北向南, 夏季相反	承德、北京、天津、沧州、衡水	潮白河河谷湿地、裸地和草地、密云水库、大运河等
	③	冬季自北向南, 夏季相反	张家口、北京、廊坊、沧州、衡水、邢台、白河河谷湿地、裸地和草地、官厅水库、白洋淀、衡水湖湿地、道路防护绿地等	
	④	冬季自西北向东南, 夏季相反	张家口、北京、天津	永定河河谷湿地、裸地和草地、官厅水库、道路防护绿地等
	⑤	冬季自东北向西南, 夏季相反	北京、保定、石家庄、邢台、邯郸	道路防护绿地、山前湖泊湿地、裸地和草地等
二级生态廊道	⑥	冬季自西向东, 夏季相反	北京、廊坊、天津、唐山、秦皇岛	道路防护绿地、湿地、湖泊水库、裸地和草地等
	⑦	冬季自西向东, 夏季相反	保定、廊坊、天津	西大洋水库、河流湿地、白洋淀湿地、裸地和草地等
	⑧	冬季自西向东, 夏季相反	石家庄、衡水、沧州	岗南水库、黄壁庄水库、河流湿地、裸地和草地等
	⑨	冬季自西北向东南, 夏季相反	保定、沧州	安各庄水库、河流湿地、道路防护绿地、裸地和草地等
	⑩	冬季自西北向东南, 夏季相反	石家庄、邢台	道路防护绿地、裸地和草地等

研究区位于季风区, 多数气象站点冬季和夏季

主导风向会发生 180°变化, 研究发现识别出的冬季、

夏季南北向生态廊道主干基本重叠,东西向生态廊道也有部分重叠.按照  $u_i$  值大小,将连通性能较好的生态廊道合并精简,得到风域视角京津冀“五纵五横”生态廊道空间格局,见图 2(c)和表 5.

“五纵”生态廊道主要呈南北走向,总长度 3073.04km,走势与冬夏主导风风向吻合度高,通风能力强,生态服务流转性能较好.这 5 条生态廊道跨越坝上高原、燕山、太行山和河北平原,下垫面以沟谷、河流、湖泊水库、道路防护绿地、裸地等为主,呈南北向串珠状连接着研究区自然保护区、湿地公园和湖泊水库,以及除秦皇岛外的所有地级以上的行政中心.

“五横”生态廊道主要呈东西走向,总长度 1582.06km,走势与主导风风向差异较大,通风能力相对较弱,但可作为生态服务流转的辅助通道.这 5 条生态廊道主要分布在平原区,下垫面性质以河流湿地、湖泊水库与道路防护绿地等为主.“五横”生态廊道作为“五纵”的补充,增加了东西向生态连通性.

## 2.4 讨论

本研究融合景观生态学、生物地理学、应用气象学等相关方法,关注风行过程中地气相互作用原理和人类社会经济活动的干扰,确定风域视角生态廊道识别与等级评测方法,对已经形成的“源地—廊道”区域生态安全格局的研究范式进行拓展.以往研究的源地设置主要考虑生态源地<sup>[4,32]</sup>,本研究不仅考虑生态源地还增加了社会经济源地,重视两类源地之间联系.在阻力面确定时,以往相关研究主要根据土地利用类型直接赋值<sup>[10]</sup>,对驱动力方向重视不足,本研究以风向为驱动力方向,依据不同土地利用类型地面粗糙度确定风行过程中遇到的阻力,测算地形、河流、各类线性工程等对风的诱导作用,重视风向与坡向交角,考虑了诸因子所产生的综合作用.此外,本研究在初步识别出生态廊道后,选择廊道长度、曲度等 7 个因子,再次测算宽度为 1km 的生态廊道面通风效应,依据其连通性能进行分级和优化.

国内各类生态廊道研究主要关注中小尺度<sup>[10,32]</sup>,尤其风环境下生态廊道研究主要集中于城市和街区尺度<sup>[26]</sup>,立足于区域尺度或跨行政边界研究较少,仅在部分发达地区有所尝试,主要利用 WRF 中尺度预报模式模拟区域风环境特征,识别区域通

风潜力地区<sup>[5-6]</sup>.当前,未查阅到风域视角京津冀区域尺度生态廊道研究成果,但有研究者利用最小成本路径方法,识别出 579 条生态廊道<sup>[33]</sup>,未对廊道进行分级,也未关注廊道走向,与本研究结果不同,本研究对廊道进行了分级,还明确生态廊道走向的季节变化及相对稳定性.本研究强调了研究区冬夏季生态廊道走向差异性,冬季主要从北向南或从西北向东南,夏季走向与冬季相反,也正是研究区冬夏风向转换接近 180°,才能将冬夏主要生态廊道合并精简,构建京津冀“五纵五横”生态廊道空间格局.另外,本研究考虑到风域内风的相对稳定性,识别出的生态廊道不能满足地一地之间的精确对应关系,但长期观测统计证明,风向长时间段具有统计学上相对稳定性,如坝上高原西部属于内流河区域,与京津之间从流域视角分析,生态关系不明确,但从风域视角张家口、北京和天津位于同一条生态廊道内,该廊道内冬季盛行西北风,夏季盛行东南风,且多年平均西北风频率高、风速大,三地生态关系明确,张家口坝上地区生态环境保护成效一直关系着京津地区大气环境质量.

风环境下的生态环境问题的产生不受行政边界制约,风场的连续性与大气污染物的流动性,决定了相关研究需要从中小尺度向宏观尺度扩展,要解决的核心问题是生态廊道形成过程及内在作用机理.本研究尝试分析了风域视角大尺度生态廊道形成的影响因素,识别出京津冀区域尺度生态廊道格局.然而,本研究没有利用地面污染监测数据来验证生态廊道的净化空气效应,且针对城市区域的研究方法相对简单,今后应利用城市建成区建筑物高度、地表粗糙度、风场特征等数据,细化中小尺度生态廊道衔接到区域尺度上的技术方法,完善风域视角大尺度生态廊道网络体系构建方法体系.

## 3 结论

3.1 冬季,京津冀近地面多年平均风速呈现张家口坝上一北京—天津沿海高两侧低格局,主导风向为偏北风;夏季风速呈现西北部和东南部高,中东部和西南部低格局,主导风向为偏南风.全年多年平均风速呈现西北坝上与东部沿海风速大,燕山东部、太行山北部风速小格局,北部地区主要盛行偏北风,南部地区主要为偏南风.研究区全域多年平均风速为

2.07m/s.

3.2 冬季,研究区有 34 个社会经济源地,总面积 18478.91km<sup>2</sup>,识别出 5 条一级生态廊道,走向从西北向东南或从北向南,7 条二级生态廊道,走向主要从西向东.夏季,有 68 个生态源地,总面积 8041.45km<sup>2</sup>,识别出 5 条一级生态廊道,走向从东南向西北或从南向北,6 条二级生态廊道,走向主要从东向西.

3.3 京津冀共优选出 5 条一级生态廊道,5 条二级生态廊道,初步形成京津冀“五纵五横”生态廊道格局.“五纵”生态廊道呈南北向,总长度 3073.04km,走向与冬夏主导风风向吻合度高,生态连通性强.“五横”生态廊道呈东西向,总长度 1582.06km,走向与主导风风向差异较大,作为“五纵”的补充,增加东西向生态连通性.

#### 参考文献:

- [1] 高吉喜,陈艳梅,田美荣,等.区域生态学 [M]. 北京:科学出版社, 2015:20-21,205-211.  
Gao J X, Chen Y M, Tian M R, et al. Regional ecology [M]. Beijing: Science Press, 2015:20-21,205-211.
- [2] 杨桂山,徐昔保,李平星.长江经济带绿色生态廊道建设研究 [J]. 地理科学进展, 2015,34(11):1356-1367.  
Yang G S, Xu X B, Li P X. Research on the construction of green ecological corridors in the Yangtze River Economic Belt [J]. Progress in Geography, 2015,34(11):1356-1367.
- [3] 穆少杰,周可新,方颖,等.构建大尺度绿色廊道,保护区域生物多样性 [J]. 生物多样性, 2014,22(2):242-249.  
Mu S J, Zhou K X, Fang Y, et al. The need and the prospects for developing large-scale green corridors to protect biodiversity [J]. Biodiversity Science, 2014,22(2):242-249.
- [4] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望 [J]. 地理研究, 2017,36(3):407-419.  
Peng J, Zhao H J, Liu Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017,36(3):407-419.
- [5] 任庆昌,魏冀明,戴维.区域风环境研究与通风廊道建设实施建议—以珠三角为例 [J]. 热带地理, 2016,36(5):887-894.  
Ren Q C, Wei J M, Dai W. Characteristics of regional wind environment and construction of ventilation corridors:A case study of the Pearl River Delta [J]. Tropical Geography, 2016,36(5):887-894.
- [6] 张少康,刘沛,魏冀明.基于风环境分析的珠三角地区城镇空间规划引导 [J]. 规划师, 2016,32(9):118-122.  
Zhang S K, Liu P, Wei J M. Urban spatial planning of the Pearl River Delta region based on wind environment analysis [J]. Planners, 2016, 32(9):118-122.
- [7] Gilbert-Norton L, Wilson R, Stevens J R, et al. A meta-analytic review of corridor effectiveness [J]. Conservation Biology, 2010,24(3): 660-668.
- [8] 单楠,周可新,潘扬,等.生物多样性保护廊道构建方法研究进展 [J]. 生态学报, 2019,39(2):1-10.  
Shan N, Zhou K X, Pan Y, et al. Research advances in design methods of biodiversity conservation corridors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2):411-420.
- [9] 许从宝,李青晓,田晨,等.城乡规划领域廊道相关研究述评 [J]. 规划师, 2017,33(4):5-11.  
Xu C B, Li Q X, Tian C, et al. Progress of corridor study in urban planning [J]. Planners, 2017,33(4):5-11.
- [10] Shen Z, Wang Y, Fu B. Corridors and networks in landscape: structure, functions and ecological effects [J]. Chinese Geographical Science, 2014,24(3):1-4.
- [11] 俞孔坚,王思思,李迪华,等.北京市生态安全格局及城市增长预警 [J]. 生态学报, 2009,29(3):1189-1204.  
Yu K J, Wang S S, Li D H, et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(3):1189-1204.
- [12] 范小杉,高吉喜,何萍,等.基于生态安全问题的生态保护红线管控方案 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):4749-4754.  
Fan X S, Gao J X, He P, et al. Technical solutions for ecological red-line management based on problems of ecological security [J]. China Environment Science, 2018,38(12):4749-4754.
- [13] Ashie Y, Kono T. Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area [J]. International Journal of Climatology, 2011,31(2):174-188.
- [14] Suder A, Szymanowski M. Determination of ventilation channels in urban area: A case study of Wroclow (Poland) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2014,171(6):965-975.
- [15] Ren C, Ng E Y, Katzschner L. Urban climatic map studies: a review [J]. International Journal of Climatology, 2011,31(15):2213-2233.
- [16] Yuan C, Ng E Y. Practical application of CFD on environmentally sensitive architectural design at high density cities: A case study in Hong Kong [J]. Urban Climate, 2014,(8):57-77.
- [17] 佟华,刘辉志,李延明,等.北京夏季城市热岛现状及楔形绿地规划对缓解城市热岛的作用 [J]. 应用气象学报, 2005,16(3):357-365.  
Tong H, Liu H Z, Li Y M, et al. Actuality of summer urban heat island and the impact of urban planning “wedge-shaped greenland” to reducing the intensity of urban heat island in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005,16(3):357-365.
- [18] 杜吴鹏,房小怡,刘勇洪,等.基于气象和 GIS 技术的北京中心城区通风廊道构建初探 [J]. 城市规划学刊, 2016,(5):79-85.  
Du W P, Fang X Y, Liu Y H, et al. Construction of ventilation corridors in the Beijing central urban area based on meteorology and GIS technology [J]. Urban planning forum, 2016,(5):79-85.
- [19] 李军,荣颖.武汉市城市风道构建及其设计控制引导 [J]. 规划师, 2014,30(8):115-120.  
Li J, Rong Y. Urban design control for wind corridor: Wuhan Case [J]. Planners, 2014,30(8):115-120.
- [20] 翁清鹏,张慧,包洪新,等.南京市通风廊道研究 [J]. 科学技术与工程, 2015,15(11):89-94.  
Weng Q P, Zhang H, Bao H X, et al. Study on ventilation channels of Nanjing city [J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(11): 89-94.
- [21] 赵红斌,刘晖.盆地城市通风廊道营建方法研究—以西安市为例

- [J]. 中国园林, 2014,30(11):32-35.
- Zhao H B, Liu H. Research on the methods of building ventilation corridors among basin cities: Taking the city of Xi'an as the example [J]. Chinese Landscape Architecture, 2014,30(11):32-35.
- [22] 曾穗平.基于“源—流—汇”理论的城市风环境优化与CFD分析方法—以天津市为例 [D]. 天津:天津大学, 2016.
- Zeng H P. Research on the theory of “source-flow-sink” ventilated corridor system construction and planning strategy: The case of the center districts of Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [23] 詹庆明,欧阳婉璐,金志诚,等.基于RS和GIS的城市通风潜力研究与规划指引 [J]. 规划师, 2015,31(11):95-99.
- Zhan Q M, Ouyang W L, Jin Z C, et al. RS And GIS based ventilation potential study and planning [J]. Planners, 2015,31(11):95-99.
- [24] 俞 布,贺晓冬,危良华,等.杭州城市多级通风廊道体系构建初探 [J]. 气象科学, 2018,38(5):625-636.
- Yu b, He X D, Wei L H, et al. Primary exploration for construction of urban multilevel ventilation corridors system in Hangzhou [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018,38(5):625-636.
- [25] Zeller K A, McGarigal K, Cushman S A, et al. Sensitivity of resource selection and connectivity models to landscape definition [J]. Landscape Ecology, 2017,32(4):835-855.
- [26] 张 睿,李红艳.基于风环境要素的城市通风廊道建设研究综述 [J]. 华中建筑, 2018,36(6):44-48.
- Zhang R, Li H Y. Review on building urban ventilation corridors based on the element of wind environment [J]. Huazhong Architecture, 2018,36(6):44-48.
- [27] 李 军,游松财,黄敬峰.基于 GIS 的中国陆地表面粗糙度长度的空间分布 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006,24(2):185-189.
- Li J, You S C, Huang J F. Spatial distribution of ground roughness length based on GIS in China [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2006,24(2):185-189.
- [28] 张 竞,杜 东,白耀楠,等.基于DEM的京津冀地区地形起伏度分析 [J]. 中国水土保持, 2018,(9):33-37.
- Zhang J, Du D, Bai Y N, et al. Analysis of relief amplitude based on DEM in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018,(9):33-37.
- [29] 刘金雅,汪东川,张利辉,等.基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算 [J]. 生态学报, 2018,38(12):4192-4204.
- Liu J Y, Wang D C, Zhang L H, et al. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12):4192-4204.
- [30] 付晶莹,江 东,黄耀欢.中国公里网格人口分布数据集 [EB/Z]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014.DOI:10.3974/geodb.2014.01.06.v1, <http://www.geodoi.ac.cn/doi.aspx?doi=10.3974/geodb.2014.01.06.v1>.
- Fu J Y, Jiang D, Huang Y H. 1km grid population dataset of China [EB/Z]. Global Change Data Repository, 2014.DOI:10.3974/geodb.2014.01.06.V1.
- [31] 黄耀欢,江 东,付晶莹.中国公里网格 GDP 分布数据集 [DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2014.DOI:10.3974/geodb.2014.01.07.V1.
- Huang Y H, Jiang D, Fu J Y. 1km Grid GDP Data of China [DB/OL]. Global Change Data Repository, 2014.DOI:10.3974/geodb.2014.01.07.V1.
- [32] 赵筱青,谭 琨,易 琦,等.典型高原湖泊流域生态安全格局构建—以杞麓湖流域为例 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):768-777.
- Zhao X Q, Tan K, Yi Q, et al. Construction of ecological security pattern in typical plateau lake basin:A case of the Qilu lake basin [J]. China Environment Science, 2019,39(2):768-777.
- [33] 胡炳旭,汪东川,王志恒,等.京津冀城市群生态网络构建与优化.生态学报, 2018,38(12):4383-4392.
- Hu B X, Wang D C, Wang Z H, et al. Development and optimization of the ecological network in the Beijing-Tianjin Hebei metropolitan region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4383-4392.

**作者简介:** 陈艳梅(1970-),女,河北邢台人,教授,博士,主要从事区域生态系统评估、生态安全与生态补偿机制研究.发表论文 30 余篇.