

新疆南部地区风沙扩散风险评价及景观格局优化

史娜娜, 韩煜, 王琦, 汉瑞英, 高晓奇, 赵志平, 刘高慧, 肖能文

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 基于“致灾因子—孕灾环境—承灾体”3个维度, 利用空间主成分分析法(SPCA)开展新疆南部地区风沙扩散风险评价, 然后借助最小累积阻力模型(MCR)优化关键景观格局组分, 构建多层次生态网络。结果表明: ① 区域致灾因子危险性较高, 孕灾环境较为脆弱; 和静县、阿合奇县生态本底较好, 而盆地及其南部各县易于风沙扩散, 尤其是和田地区、且末县及若羌县; 绿洲人口和农业生产高度聚集, 易损性较大。② 46.53%的区域沙源丰富, 立地条件差, 风沙扩散风险较高。区域下垫面植被覆盖度和土壤类型是影响风沙扩散的最主要因素, 风场强度是区域沙源扩散的主要诱因。③ 基于MCR模型, 构建20条生态廊道连通生态源地, 包括5条河流型、9条道路型和6条绿带型廊道; 其中, 1号和4号廊道纵贯塔克拉玛干沙漠, 其余廊道沿塔里木盆地外缘呈圆环形分布; 同时, 判别出30个生态节点, 包括A类生态节点7个, B类生态节点23个, 主要分布在和田地区和巴州, 可以通过建设防护林带、提高地表植被覆盖等措施降低风沙扩散风险。研究结果为中国北方干旱、半干旱地区风沙扩散风险防控与景观格局优化提供了技术支撑。

关键词: 风沙扩散风险评价; 景观格局; 空间主成分分析(SPCA); 最小累积阻力模型(MCR); 新疆南部地区

DOI: 10.11821/dlxb202101006

1 引言

风沙扩散是指在一定风力下, 由风沙活动引起的沙化斑块之间以及沙化斑块与其他景观斑块之间的沙物质扩散现象, 可能会引发沙尘暴、扬尘和浮尘等危害。风沙扩散及其引发的生态灾害问题受到国内外学术界的广泛关注。在中国北方干旱、半干旱地区, 风沙扩散是导致土地荒漠化的主要成因之一^[1]。风力、沙量和下垫面是影响风沙扩散的3个重要因素。风力是风沙扩散的主要动力基础, 风蚀量大小影响风沙运动携带的沙量, 下垫面的立地条件决定着风沙扩散程度^[2]。目前, 已开展风沙灾害的现状、发展趋势、成因及防治、减灾工程效应分析等研究, 而对风沙扩散风险评价却研究较少; 且评价多注重单风险源、单一风险受体^[3-4]。因此, 本文尝试从“致灾因子—孕灾环境—承灾体”3个维度, 充分分析风沙扩散的影响因素及其发生机制, 并从景观格局入手, 探讨防治风沙扩散的方法与措施。

景观格局优化过程依据景观生态学理论, 调整与组合景观组分的空间布局, 以实现

收稿日期: 2019-12-15; 修订日期: 2020-10-27

项目来源: 生态环境部生物多样性保护专项(2020) [Foundation: The Biodiversity Survey and Assessment Project of the Ministry of Ecology and Environment (2020)]

作者简介: 史娜娜(1983-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 工程师, 主要从事生态系统与生物多样性评估。

E-mail: shinn123@163.com

通讯作者: 肖能文(1973-), 男, 湖南益阳人, 博士, 研究员, 主要从事生态学、生物多样性保护研究。

E-mail: xiaonw@163.com

生态效益最大化与区域可持续发展^[5]。最小累积阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance Model, MCR) 的优势在于能够反映景观格局变化对生态过程的影响, 因此, 基于该模型开展的相关研究日臻完善, 诸多学者在生态用地利用率、水环境保护、城市扩展边界确定、生态经济区建设、土地整治、自然保护区建设^[6-11]等多个领域取得了一定进展, 但将其应用于风沙扩散景观格局优化的研究还较少。此外, 生态累积阻力面的构建是 MCR 模型的关键, 但是, 以往研究未能多层次分析阻力值的影响^[12], 并且对阻力值的计算多采用专家打分法或 AHP 法, 主观性较强^[13]。空间主成分分析 (Spatial Principal Component Analysis, SPCA) 的原理是将多个空间变量提取为几个无相关性的主成分, 能够最大限度的简化高维变量, 并使结果清晰的落到每个栅格上。在栅格尺度上, 引入 SPCA 法筛选风沙扩散风险评价指标, 以累积贡献率大于 85% 作为选取依据和标准, 将有效减少评价结果的主观性, 并增强其空间表达效果^[14]。

新疆南部地区风沙扩散风险较高, 景观格局异质性明显, 以其为研究区, 从“致灾因子—孕灾环境—承灾体”视角开展风沙扩散风险评价; 在此基础上, 借助 MCR 模型优化关键景观组分, 构建多层次生态网络, 并设计重点区域景观格局方案, 探讨调控生态过程的有效途径和方法, 以期新疆南部地区风沙扩散风险防控与景观格局优化提供技术支撑。

2 研究区概况、数据来源及方法

2.1 研究区概况

新疆南部地区地处 35°N~45°N 和 72°E~95°E 之间, 辖和田地区、喀什地区、巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏地区、吐鲁番地区、哈密地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州的 50 个县市 (图 1)。区域面积约 124 万 km², 地势中间低、四周高, 由西向东倾斜, 其中, 中部为塔克拉玛干沙漠, 其四周被海拔 4000 m 以上的昆仑山和天山山脉包围。受地形影响, 区内中高山带与荒漠盆地的水热条件差异悬殊, 表现出山地趋向湿润、盆地趋向干燥的特征。从全区域来看, 地表沙物质丰富, 沙尘暴和沙尘天气频发, 年平均沙尘暴日数在 15 d 以上, 且春季风速年内变化最大^[15]; 大风区域差异显著, 盆地东部和东南部年大风日数可达到 30 d^[16], 风沙扩散形成大面积的荒漠景观。2000 年以来, 随着土地利用方式的转变, 风沙扩散的频繁发生既严重威胁当地生态环境, 又影响当地的经济和社会

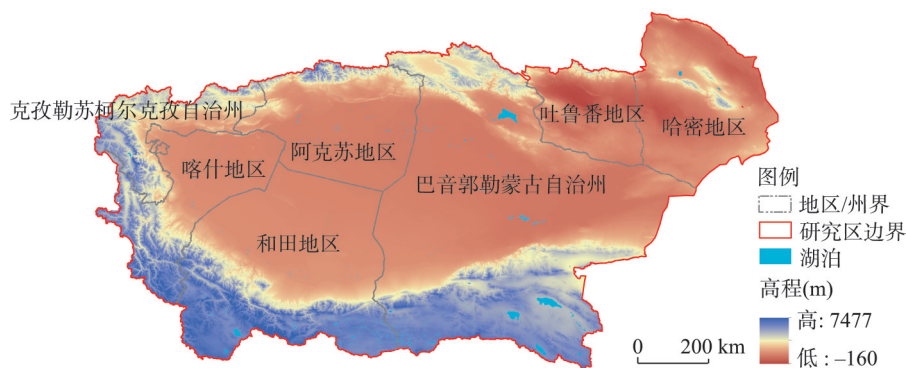


图 1 新疆南部地区概况

Fig. 1 Location of the southern Xinjiang

发展。因此,本文开展风沙扩散风险评价,并与景观格局空间优化相结合,试图寻找风沙扩散防治的最佳模式。

2.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、气象数据、土壤侵蚀数据、土壤数据、NDVI数据和DEM数据。① 土地利用数据(2015年):来源于中国科学院资源环境数据中心,以Landsat TM/ETM+遥感影像为主要数据源,空间分辨率为30 m×30 m,采用中国科学院遥感解译分类标志,解译精度超过90%^[17]。依据区域生态本底特征,最终划分为林地、草地、湿地、农田、城镇、荒漠、冰川/永久积雪7个一级地类和24个二级地类。② 气象数据:包括风场强度、干燥度和湿润指数。其中,风场强度采用风速、土壤湿度、雪盖因子等计算获得(式(1)),数据来源于中国气象科学数据共享服务网,干燥度和湿润指数来源于中国科学院资源环境数据中心;③ 土壤侵蚀数据:来源于中国科学院资源环境数据中心,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),综合侵蚀营力、方式、形态及下垫面等因素,确定不同土壤侵蚀类型和侵蚀强度。④ 土壤数据:采用南京土壤研究所编制的中国1:100万土壤数据库提取研究区数据。⑤ NDVI数据:采用2000—2015年MODIS-NDVI逐月数据(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率500 m×500 m,时间分辨率30 d,采用最大值合成法(MVC)生成研究区2000—2015年NDVI长时间序列数据,用于植被覆盖度计算。⑥ DEM数据:来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m×30 m。⑦ 社会经济数据:包括人口和GDP,来源于《新疆维吾尔自治区统计年鉴(2016)》,利用ArcGIS进行空间化。以县为单元,采用ArcGIS的自然断点法,将人口数量和GDP进行5级分类。所有数据均利用ArcGIS的Resample功能重采样为500 m×500 m。

其中,风场强度的计算公式如下:

$$WFI = \frac{\left[\sum_{i=1}^N S_2 \times (S_2 - S_i)^2 \right] \times N_t \rho}{N \times g} \times SE \times SC \quad (1)$$

式中:WFI为风场强度(kg/m); S_2 为2 m处风速(m/s); S_i 为2 m处临界风速(假定为5 m/s); N 为风速的观测次数(一般500次); N_t 为试验的天数(d); ρ 为空气密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); SE 为土壤湿度因子(无量纲); SC 为雪覆盖因子。

$$SC = 1 - P \quad (2)$$

式中: P 为计算时段内积雪覆盖深度≥2.54 mm的概率。

2.3 研究方法

2.3.1 风沙扩散风险评价模型

(1) 评价指标选取与分级。从自然景观和社会经济角度开展新疆南部地区风沙扩散风险评估。区域风沙扩散风险主要与3类因素有关:① 风沙扩散的致灾因子;② 下垫面孕灾环境;③ 风沙扩散的作用对象,即承灾体的易损性。沙物质是区域风沙扩散的物质基础,下垫面是风沙灾害的承灾体,下垫面抗风沙扩散能力与植被、土壤、地形、土地利用、人口聚集方式等多种因子直接相关。因此,构建涵盖“致灾因子—孕灾环境—承灾体”三位一体的风沙扩散风险评价体系。各评价指标分析依据见表1。风沙扩散风险评价结果划分为5个等级,1~5级别分别表示低度、较低、中度、较高和高度风险。

风沙扩散风险评价致灾因子选取风场强度、干燥度和湿润指数。风场强度(图2a)决定了致灾因子的动力条件,干燥度和湿润指数是风沙扩散的物质基础(图2b、2c)。风沙扩散风险评价中,下垫面孕灾环境选取植被覆盖度、土壤侵蚀、土壤类型、土地利用等指标。

表 1 风沙扩散影响因子分级依据

Tab. 1 The evaluation standard of sandstorm diffusion factors

分级	风场强度(kg/m)	干燥度	湿润指数	植被覆盖度(%)	土壤侵蚀
1	< 50	< 20	450	> 70	微度
2	50~100	20~40	30~40	50~70	轻度
3	100~500	40~60	20~30	20~50	中度
4	500~1000	60~80	10~20	5~20	强度
5	> 1000	> 80	< 10	< 5	极强度
分级	土壤类型	土地利用	人口(万人)	GDP(亿元)	农田面积
1	湖泊水库等	林地、建设用地	< 8	< 20	有
2	草甸土、灌淤土	中高覆盖度草地	8~15	20~30	无
3	石质土、棕漠土	低覆盖草地、耕地、滩地	15~25	30~60	
4	新积土、粗骨土	沼泽地、盐碱地	25~35	60~100	
5	风沙土	沙地、裸土地	> 35	> 100	

① 植被可以通过改善土壤水分状况促进表层土壤稳定或增加界面粗糙度来减少风沙扩散。常采用归一化植被指数 (NDVI) 开展近似估算 (图 2d), 其计算公式为:

$$VC = (NDVI - NDVI_1) / (NDVI_2 - NDVI_1) \quad (3)$$

式中: $NDVI_1$ 为无植被覆盖像元的 NDVI 值; $NDVI_2$ 为完全有植被覆盖像元的 NDVI 值。

② 土壤侵蚀强度以土壤侵蚀模数表示, 研究区的土壤侵蚀类型包括风力侵蚀 (67.22%)、水力侵蚀 (11.18%) 和冻融侵蚀 (21.60%)。土壤侵蚀以风力侵蚀为主, 侵蚀区分布在塔里木盆地、吐鲁番和哈密地区的荒漠区, 是风沙扩散的主要来源; 水利侵蚀主要发生在塔里木河、叶尔羌河、和田河、克里雅河、车尔臣河、博斯腾湖等湿地生态系统; 冻融侵蚀主要发生在天山、昆仑山和阿尔金山等山脉的终年积雪区。《土壤侵蚀分类分级标准》将土壤侵蚀类型分为 6 级, 即微度、轻度、中度、强度、极强度和极重度, 本文将其重分类为 5 级, 即低度 (微度)、较低 (轻度)、中度、较高 (强度、极强度) 与高度 (极重度) (图 2e)。

③ 土壤土质是荒漠化产生和发展的基础, 土壤类型不同, 其土壤母质自身组成及形状存在差异, 因此, 不同土壤类型对侵蚀的抵抗力也各不相同, 那么, 荒漠化发生的潜在可能、发展速度和强度也各有差异。本文根据研究区土壤类型特征, 利用 reclassify 功能, 将土壤类型重分类为 5 类 (图 2f)。

④ 土地利用覆被不同, 表现出不同的下垫面地表特征, 而不同下垫面植被覆盖程度的抗风蚀能力各有差异, 表现出不同的风沙扩散风险 (图 2g)。

风沙扩散风险评价载体选取人口、GDP 和农田面积。作为区域风沙扩散的风险对象, 人口的集聚度 (图 2h)、经济发展的敏感性 (图 2i) 和基础设施易损性 (图 2j) 均与风沙扩散强度有关。

(2) 空间主成分分析。空间主成分分析具有能够最佳综合与简化高维变量的特性, 借助于 GIS 技术将主成分分析结果解析到每一个栅格上, 实现空间可视化。区域风沙扩散风险评价中 SPCA 公式如下^[18]:

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij} \times C_j) \quad (4)$$

式中: R 表示风沙扩散风险评价结果; P_{ij} 表示第 i 个栅格对应的第 j 个主成分; C_j 表示第 j 个主成分的特征值贡献率; i 表示栅格; j 表示主成分。

运用 ArcGIS 的 Principal Components 空间分析工具筛选研究区风沙扩散风险评价指

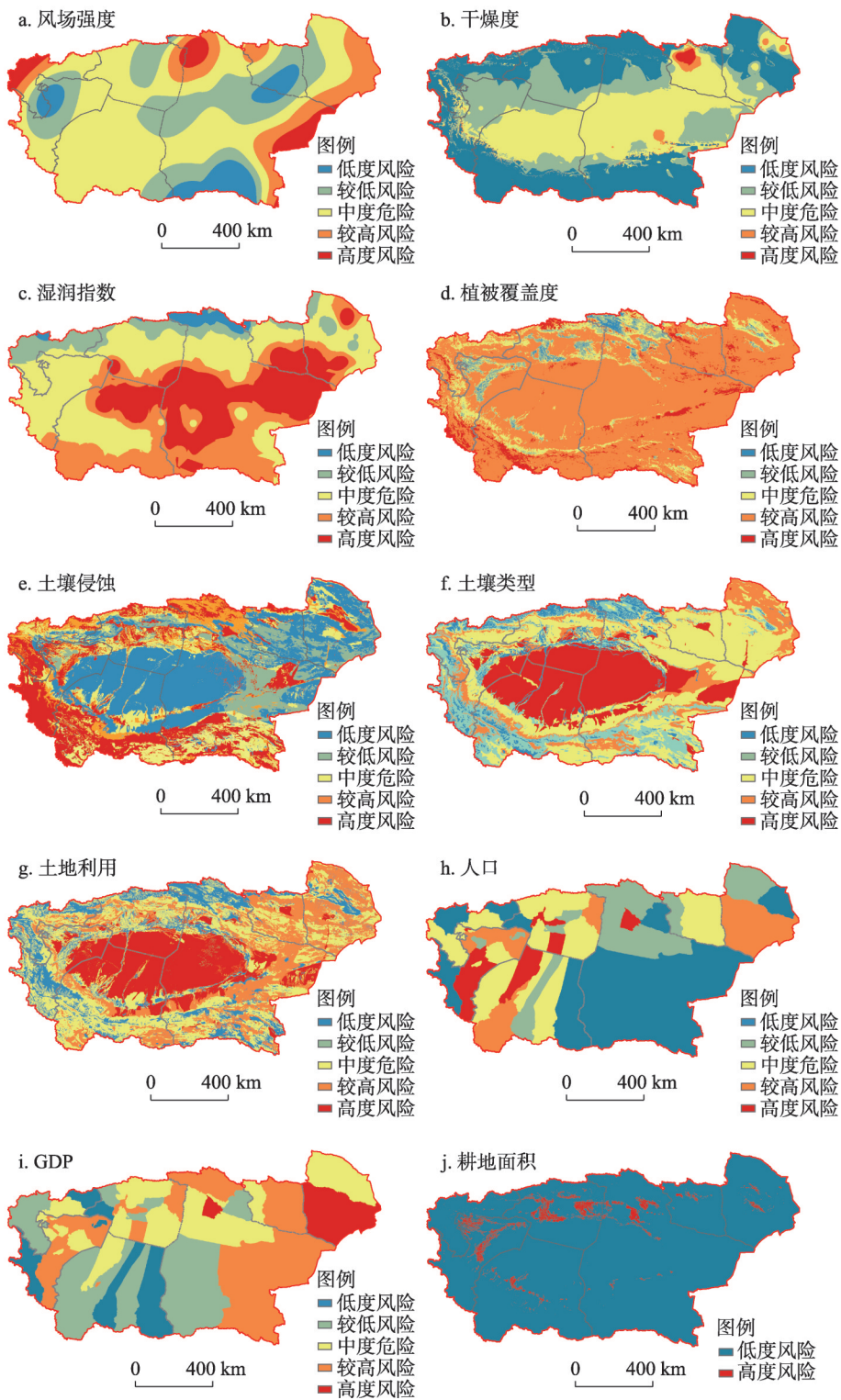


图2 新疆南部地区风沙扩散影响因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the sandstorm diffusion factors in southern Xinjiang

标, 获取累积贡献率大于 85% 的主成分, 并将各主成分的特征值贡献率作为权重, 利用地图代数工具进行空间加权叠加, 并利用 Natural Breaks 进行分级, 从而得到区域风沙扩散风险评价空间分布结果。

2.3.2 景观格局优化模型 最小累积阻力模型可以理解为生态源地之间的生态流克服不同景观要素的阻力所耗费的代价, 因此, 景观阻力的判定是进行景观格局优化的关键。MCR 模型的表达公式为^[19]:

$$MCR = f_{\min} \left[\sum_{i=m} \sum_{j=n} (D_{ij} \times R_i) \right] \quad (5)$$

式中: MCR 表示从源扩散至空间某点处的最小累积阻力值; f_{\min} 表示 MCR 与变量 $(D_{ij} \times R_i)$ 之间的正函数; D_{ij} 表示从源 j 扩散至空间某点穿过生态表面 i 的距离; R_i 是生态表面 i 对源扩散方向的阻力值。

(1) 生态源地识别。“源地”对维持景观结构、过程和功能具有重要作用, 生态源地的面积大小对减缓区域风沙扩散具有重要的生态学意义^[20]。根据区域自然生态特征, 综合考虑生态源地在空间上的延展性和连续性, 确定对减缓区域风沙扩散具有生态意义的草地、林地、以及具有水源涵养和径流调蓄功能的湿地作为生态源地。根据草地、林地、湿地的面积、空间分布等, 剔除零星分布的小斑块, 最终遴选面积大于 10 km^2 的草地和面积大于 0.1 km^2 的湿地作为生态源地。

(2) 生态阻力面构建。景观的空间异质性促使物质流、能量流和生态流要克服不同异质性空间的阻力才能进行交流^[21]。值得注意的是, 各个阻力因子的赋值直接影响着潜在生态廊道的构建, 这是因为 MCR 模型是通过获取生态源地与目标之间的最小累积阻力值来构建生态网络^[22]。基于空间主成分分析, 并利用 ArcGIS 中的 Cost Distance 工具生成累积耗费距离表面, 进而利用 Natural Breaks 法将综合阻力值划分为 1~5 个等级, 即低阻力、较低阻力、中等阻力、较高阻力与高阻力。

(3) 生态廊道辨识。生态廊道是相邻生态源地之间进行物种迁移和扩散的重要路径, 具有重要的生态系统服务功能^[13]。就 MCR 模型生态阻力面而言, 生态廊道就是考虑了生态源地、费用距离和景观界面特征的相邻生态源地之间的低阻力通道。在生成生态阻力面的基础上, 利用 cost path 依次提取每个源到其他所有源的最小耗费路径, 并剔除重复路径, 从而获得低累积阻力的生态廊道。按照生态廊道的性质, 将其划分为河流型、道路型和绿带型生态廊道。

(4) 生态节点识别。生态节点在生态网络结构中至关重要, 同时也是生态廊道中最薄弱的地方, 是有效连接相邻生态源地的“垫脚石”^[9], 应对其准确判定并重要保护。生态节点包括两类, 即生态廊道之间的交点、生态廊道和最小阻力路径的交点, 并根据区域生态节点的性质, 将其划分为河流型、道路型、耕地型、草地型和林地型生态节点。

3 结果与分析

3.1 风沙扩散风险分析

3.1.1 基于 SPCA 的风险评价 经过空间主成分分析, 共生成 10 个主成分, 其中, 前 6 个主成分的累积贡献率达到 85%, 能够有效概括风沙扩散风险的综合信息 (表 2)。各主成分所对应的原始评价因子载荷如表 2 所示。

表 2 主成分载荷矩阵
Tab. 2 Load matrix of principal components

维度	指标	主成分									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
致灾因子	风场强度	-0.235	0.018	-0.155	-0.267	-0.090	0.603	-0.034	0.350	0.588	-0.089
	干燥度	-0.652	-0.199	0.468	0.090	0.488	0.165	-0.023	0.027	-0.200	0.021
	湿润指数	-0.059	0.069	0.102	-0.026	0.082	-0.313	-0.667	-0.084	0.411	0.505
孕灾环境	植被覆盖度	0.027	0.561	-0.266	0.618	0.264	0.193	-0.141	0.293	-0.128	0.056
	土壤侵蚀	0.258	-0.182	0.296	0.542	0.120	0.084	0.180	-0.345	0.549	-0.210
	土壤类型	0.493	-0.036	0.223	-0.197	0.160	0.535	-0.473	-0.187	-0.290	-0.107
	土地利用	0.104	-0.069	0.017	0.054	-0.078	0.358	0.395	-0.139	-0.076	0.816
承灾体	人口	-0.043	0.768	0.467	-0.284	-0.067	-0.025	0.219	-0.210	0.099	-0.049
	GDP	0.438	-0.068	0.224	-0.208	0.480	-0.226	0.231	0.594	0.120	0.093
	耕地面积	-0.031	0.081	-0.518	-0.280	0.630	-0.020	0.141	-0.462	0.118	-0.026

在致灾因子中，干燥度在第3主成分载荷较高（0.468），表明区域多风干燥的天气特征加速了风沙扩散的风险程度。在孕灾环境中，土壤类型在第1主成分载荷较高（0.493），植被覆盖度在第2主成分载荷较高（0.561），反映下垫面变化对风沙扩散影响强烈。在承灾体中，GDP在第1主成分载荷较高（0.438），人口在第2主成分载荷较高（0.768），反映了社会经济发展对土地的需求增加，促使土地利用类型发生转换，进而改变地表植被覆盖。

对比各风沙扩散评价因子空间分布，在致灾因子（图2a~图2c）中，风场强度盆地周边高中间低；干燥度中间高边缘低，与区域降水趋势一致；湿润指数北高南低。在孕灾环境中（图2d~图2g），植被覆盖度较高风险占比最大，该区植被覆盖度在10%以下；土壤类型以风沙土为主，裸土、裸岩面积较大，风沙扩散较为容易；土壤侵蚀以风蚀为主；土地利用类型以荒漠为主，其次为草地，风沙扩散风险由盆地中心向四周逐渐减小。在承灾体的3个评价因子（图2h~图2j），均呈现由绿洲为中心，风沙扩散风险向外围逐渐减小的趋势。

3.1.2 综合评价 运用ArcGIS的Natural Breaks功能将风沙扩散程度由低到高划分为低风险区、较低风险区、中等风险区、较高风险区和高度风险区（图3）。① 低度风险区主要

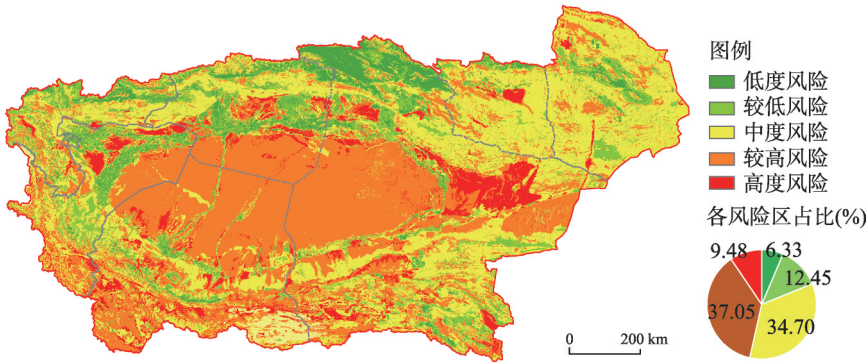


图 3 新疆南部地区风沙扩散风险评价等级
Fig. 3 Sand diffusion risk classification in southern Xinjiang

分布在和静县、阿合奇县、拜城县及和田县、于田县、且末县、若羌县绿洲等,人口密度较大,面积7.83万 km^2 ,占比6.33%。该区湿润指数较高,土地利用以草地和林地为主,植被覆盖度30%~60%,土壤类型为草甸土、草毡土、暗冷钙土等,土壤有机质含量较高,风沙扩散风险较小。② 较低风险区主要分布在低风险区外围,面积15.4万 km^2 ,占比12.45%。该区土地利用类型以灌林地和疏林地为主,下垫面植被覆盖度较好,引起风沙扩散的风险较低。③ 中度风险区主要分布在哈密地区、吐鲁番地区、阿克苏地区北部及其它县市与沙漠相接区等,面积42.93万 km^2 ,占比34.70%。该区是风沙扩散由低向高过度的缓冲带,湿润程度一般,土壤呈现向风沙土过度趋势,土地利用类型为中低覆盖草地、农田,可在一定程度上缓解风沙扩散。④ 较高风险区主要分布在塔里木盆地及其周边,涉及尉犁县、沙雅县、阿克苏市、巴楚县、麦盖提县、墨玉县、皮山县、洛浦县、策勒县、于田县、民丰县、且末县和若羌县等,面积45.85万 km^2 ,占比37.05%。该区干燥度较大,湿润指数较低,荒漠占据主导地位,土壤类型以风沙土、寒漠土为主,风沙活动较多的春秋季节,起沙现象频繁多发。⑤ 高度风险区主要分布在若羌县北部、喀什内陆三角洲区域,面积11.72万 km^2 ;占比9.48%。该区湿润指数小,以沙地、裸土为主,土壤构成为荒漠风沙土,上覆植被少,覆盖度较低,易形成风蚀现象,风沙扩散风险强度大。

区域风沙扩散具有4大特征:① 区域风沙扩散风险偏高,下垫面变化对风沙扩散风险的影响较大,特别是土壤类型和植被覆盖度因子直接影响着风沙扩散强度和范围,同时,高风场强度和低湿润指数加速了风沙扩散进程。② 高度风险区主要分布在受流动沙丘扩展、蔓延影响的绿洲边缘,河流下游沙漠化发生发展地带,绿洲内部零星沙丘(沙地)分布地区及部分受风沙危害影响的重要交通运输线沿岸。将沙源地与高度风险区、土壤侵蚀模数、土壤结皮因子等进行空间叠加后识别出风沙扩散的8大源头,分别为喀什噶尔河—叶尔羌河流域绿洲边缘、阿克苏新和—沙雅流动沙丘地带、塔里木河下游农垦区、吐鲁番绿洲南缘沙化地带、塔里木河下游库若公路、罗布泊洼地—库木塔格沙漠地带、塔克拉玛干沙漠南缘且末至若羌公路、和田地区7县市绿洲边缘(图4)。塔克

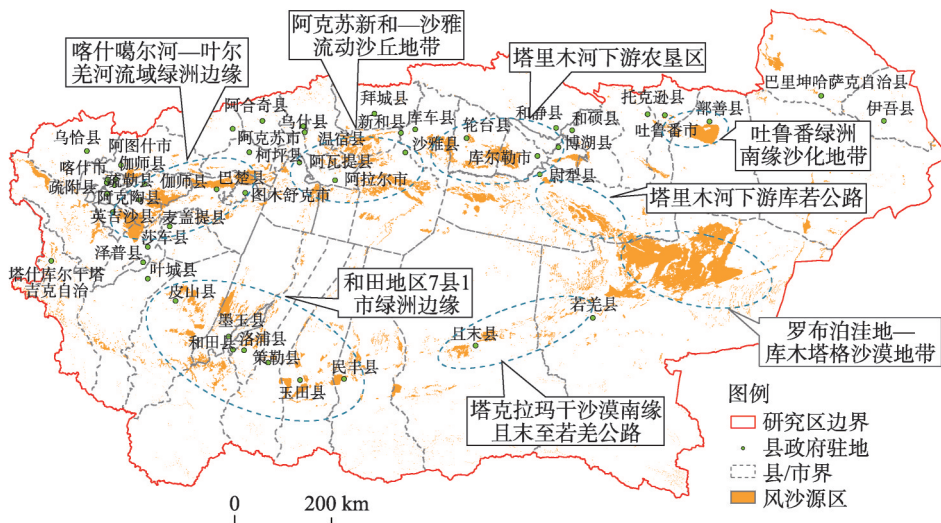


图4 新疆南部地区八大风沙源区

Fig. 4 Eight sandstorm sources in southern Xinjiang

拉玛干沙漠作为重要的风沙源区,此次计算并未包含在内,主要是因为这八大风沙源区人类活动影响较大,土壤结皮易受破坏,土壤侵蚀模数较高,引发风沙扩散的风险较高。③区域风沙扩散风险是多种因素空间权衡作用的结果,需要综合考虑致灾因子、孕灾环境及承灾体状况。④区域下垫面生态脆弱性较高,高度风险区与低度风险区之间连通受阻。风沙扩散风险空间分布的不平衡性限制了生态系统中的物质流、能量流和信息流,不利于区域可持续发展。

3.2 景观格局优化组分确立

3.2.1 生态源地确立 新疆南部地区的生态源地以草地型为主(图5),主要分布在和静县、阿合奇县、拜城县、皮山县、伊吾县、塔什库尔干塔吉克自治县的高覆盖草地区,包含部分有林地,占地面积3.08万 km^2 ,此区域植被覆盖度高,人类活动干扰较小,大多处于低度风险区,生态系统较稳定。湿地型生态源地主要分布在车尔臣河诸小河流域及哈密地区诸河流域,面积0.36万 km^2 ,距离高度风险区较远。混合型生态源地包括草地型和湿地型,主要分布在和田河流域、阿克苏河流域、喀什噶尔河—叶尔羌河流域、塔里木河流域库尔勒市和尉犁县的高覆盖草地和主要河流,面积0.46万 km^2 ,距离风沙源区较近,抗外界干扰能力相对较弱。

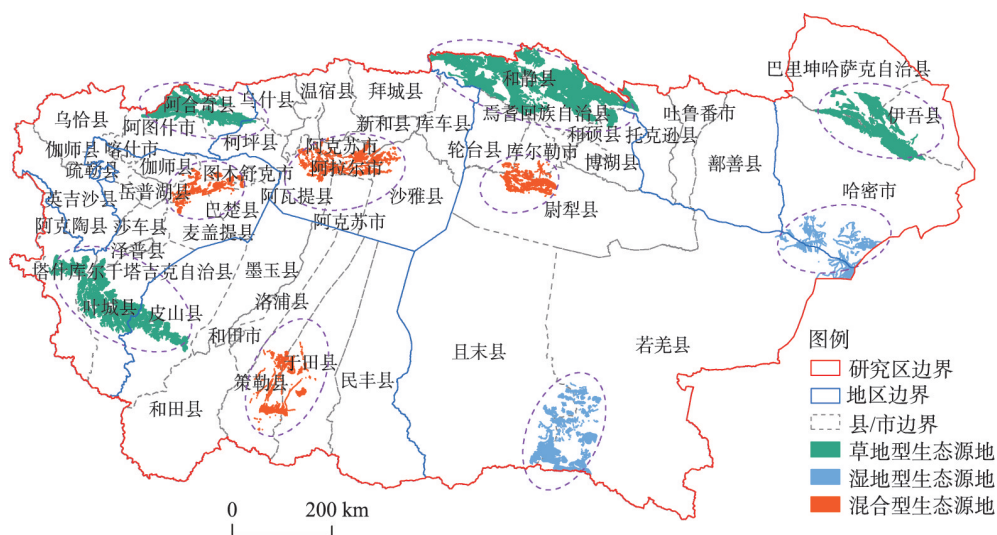


图5 新疆南部地区生态源地空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological sources in southern Xinjiang

3.2.2 生态阻力面分级 区域生态阻力分为4级(图6),其中,低阻力区和较低阻力区占比分别为6.35%和14.59%,其分布与风沙扩散风险的低风险区和较低风险区一致,这些区域植被覆盖度较高,物种相对丰富,人类活动干扰较小,生态流扩展的阻力较小。中阻力区占8.62%,分布在较低级阻力区外围,分布较为分散,在和田县和若羌县集中分布。较高阻力区占41.73%,所占面积最大,盆地外围的各县市均有大面积分布,特别是盆地的东部和南部;该区以稀疏草地、裸土、裸岩、冰川/永久积雪等为主,立地条件较差,加之风沙扩散较为严重,不利于生态流的流通。高阻力区占28.71%,主要为研究区中心的塔克拉玛干沙漠区及区域东部的库姆塔格沙漠区,该区以风沙土为主,风沙扩散程度高,几乎无植被生长。综上,生态源地之间的高阻力区阻碍了生态流的有效运行,因此,有必要构建相应的生态廊道,增强景观组分之间的连通和防护功能,维护区域生态安全,保障区域生态结构稳定、功能发挥。

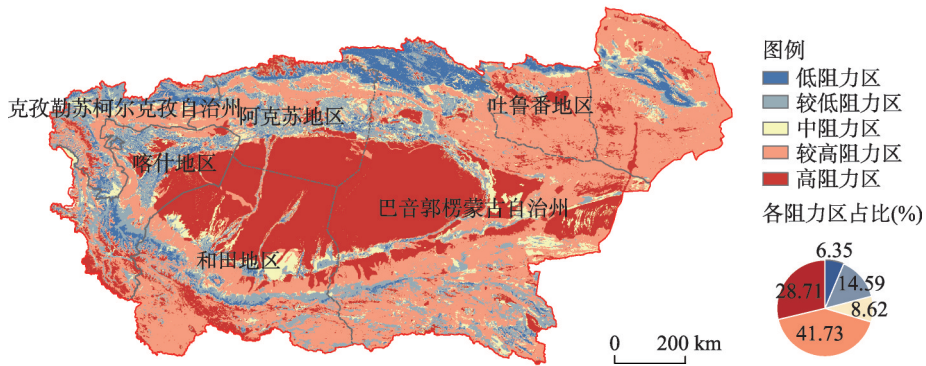


图6 新疆南部地区生态阻力面分级

Fig. 6 Classification of ecological resistance surface in southern Xinjiang

3.2.3 生态廊道构建 研究区共构建20条潜在生态廊道,包括河流型廊道、道路型廊道和绿带型廊道3种(图7)。① 河流型生态廊道有5条,1号廊道沿和田河纵贯塔克拉玛干沙漠,穿越高生态阻力区,地理区位至关重要,是需要重点保护的生态关键要素,9、12、13号廊道是连通塔里木河和叶尔羌河沿途生态源地的重要通道,18号廊道扩展了车尔臣河诸小河流域的生态源地与哈密地区生态源地之间的生态流。② 道路型生态廊道有9条,2号廊道长度最长,经过于田县、民丰县、且末县、若羌县、尉犁县,分布在且末公路和库若公路沿线;4号廊道为纵贯塔克拉玛干沙漠的穿沙公路沿线;6、10、11、14、16号廊道连接相邻源地;3、19号廊道为源地与廊道的连接通道。③ 绿带型廊道有6条,主要分布在塔里木盆地的北部和东部立地条件较好的区域,7、8号廊道连接了区域面积较大的3处草地型生态源地,5号廊道连通了和田流域和车尔臣河诸小河流域的2处湿地型生态源地,15号廊道连通了阿合奇县和阿克苏市的生态源地,17、20号廊道促进了廊道与源地间的联系。

就整个研究区而言,8、10、5、18、19、16、6、7号廊道连通了塔里木盆地外围的

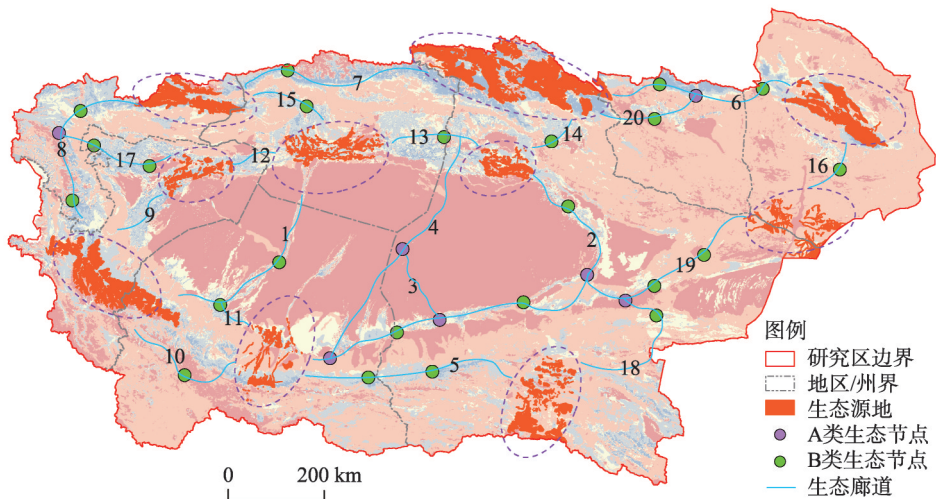


图7 新疆南部地区景观格局优化组分确立

Fig. 7 Establishment of landscape pattern optimization components in southern Xinjiang

生态源地, 12、9、11、2、13号廊道连通了塔里木盆地边缘的生态源地, 1号河流型廊道和4号道路型廊道纵贯塔克拉玛干沙漠, 打造南北连接通道, 有利于生态流的扩展。对河流型生态廊道, 可在廊道边缘设置绿带以增加景观连通度; 对道路型生态廊道, 可适当拓宽两侧绿带宽度; 对绿带型生态廊道, 可扩展其宽度并增强其与源地的连通性。

3.2.4 生态节点判定 根据生态廊道模拟结果和最小累积生态阻力面, 将研究区的生态节点划分为两类: 一类是潜在廊道与潜在廊道的交汇点(A类), 一类是潜在生态廊道与高阻力面的交汇点(B类), 同时考虑生态节点在景观格局优化网络中的重要性, 共识别区潜在生态节点30个, 包括A类生态节点7个, B类生态节点23个(图7)。^① A类生态节点分布于民丰县、且末县、若羌县、吐鲁番市、乌什县, 前3个为道路型生态节点, 其余2个为绿带型生态节点。此类节点是联系生态源地与高生态阻力区的关键点, 在生态功能上, 该点受外界的干扰和冲击较大; 在空间距离上, 该点跨度较大, 致使生态流扩展受限。因此, 生态节点的构建, 有助于减缓风沙扩散, 对增强区域生态安全具有重要的生态意义。^② B类生态节点分布较广, 主要分布于和田县、洛浦县、民丰县、且末县、若羌县、乌恰县、尉犁县、阿克苏市、阿克陶县等, 为绿带型和河流型生态节点。对于此类生态节点, 可利用植被带的缓冲作用减缓风沙扩散强度, 构建景观格局优化网络, 增强景观结构稳定性。具体来说, 宜在河流型生态节点设置湿地植被缓冲带, 增强水源涵养和径流调蓄功能, 减少风蚀; 在道路型生态节点增设绿带屏障, 增强其防风固沙功能, 减弱风沙扩散; 在绿带型生态节点扩大斑块面积, 提高植物多样性, 增强景观异质性, 保障生态系统稳定。

4 结论与讨论

4.1 讨论

风沙扩散引发的风沙灾害, 其发生与发展既与风沙灾害天气密不可分, 还与区域自然及社会经济状况息息相关。基于“致灾因子—孕灾环境—承灾体”视角, 注重多风险源、多受体的风沙扩散因子遴选, 综合反映了区域风沙致灾因子强度、孕灾环境稳定性和承灾体承载能力, 弥补单一因子评价的不足; 同时引入空间主成分分析法(SPCA), 客观计算指标权重, 在栅格尺度上建立了适用于新疆南部地区风沙扩散的风险评估模型。该评估方法简单实用、结果清晰、可操作性强, 对中国北方风沙区风沙灾害防治具有一定的指导意义。

新疆南部地区风沙扩散风险较高且空间分布不平衡, 呈现“盆地低四周高”的特征, 其直接影响因素为植被覆盖度和土壤类型, 这与该区的立地条件密切相关。该区内垫面以荒漠生态系统为主, 上覆风沙土, 沙物质丰富; 其次为稀疏草地, 植被覆盖度较低, 土壤固着能力差, 有利于风沙扩散, 而风沙扩散易蔓延至绿洲边缘、河流下游、交通运输线沿岸等, 给社会经济造成较大的影响。

切断风沙扩散途径能有效降低风沙扩散危害, 虽然新疆南部地区陆续出台了一些政策措施, 取得了较为积极的成效^[23-24], 但该区风沙扩散问题依然较为严重。本文尝试从景观角度出发, 利用MCR模型模拟区域景观格局构建生态廊道, 构建的20条生态廊道连通起整个区域, 纵贯南北的生态廊道和环形廊道更是与区域自然资源分布和立地条件相吻合; 30个生态节点是区域的“垫脚石”。从生态廊道的空间分布来看, 8、10、5、18、19、16、6、7号廊道连通了塔里木盆地外围的生态源地, 12、9、11、2、13号廊道连通了塔里木盆地边缘的生态源地, 1号河流型廊道和4号道路型廊道纵贯塔克拉玛干沙

漠, 打造南北连接通道, 有利于生态流的扩展。对河流型生态廊道, 可在廊道边缘设置绿带以增加景观连通度; 对道路型生态廊道, 可适当拓宽两侧绿带宽度; 对绿带型生态廊道, 开扩展原有斑块面积, 增加景观连通性。区域景观格局网络优化可在一定程度上减缓风沙扩散, 增强区域生态安全, 为区域防沙治沙提供了基础支撑。

MCR模型是响应风沙扩散景观格局优化的有效手段。多数研究在生态源地遴选时以生态良好的湿地、林地、自然保护区、生态系统服务高值区^[25]等为主, 本文以草地和湿地作为生态源地, 主要是考虑到区域立地条件及生态要素的本底特征; 并且将风沙扩散风险评价结果作为景观阻力的赋值依据, 改善了阻力赋值过程中的片面性与主观性。在风沙扩散景观格局构建中, 仍难免存在一定的主观因素。在下一步的工作中, 应尝试多模型的集成和综合运用, 使构建的风沙扩散景观格局更加趋于科学。

4.2 结论

从“致灾因子—孕灾环境—承灾体”3个维度选取评价因子开展区域风沙扩散风险评价, 并基于MCR模型优化区域景观格局。研究结果表明:

(1) 新疆南部地区风沙扩散是致灾因子、孕灾环境及承灾体多种要素综合权衡的结果。致灾因子危险性较高, 八大风沙源区及塔里木盆地沙物质丰富, 在风力作用下极易形成风沙扩散, 带来沙尘天气; 孕灾环境较为脆弱, 塔里木盆地北部的和静县、阿合奇县生态本底较好, 塔里木盆地及其南部各县易于风沙扩散, 特别是和田地区和且末县及若羌县; 承灾体易损性较大, 绿洲人口和农业生产高度聚集, 可以通过建设防护林带、提高地表植被覆盖等措施降低风沙扩散风险。

(2) 新疆南部地区风沙扩散风险较高, 高风险区沙源丰富, 植被覆盖度低, 立地条件差, 生态脆弱, 是沙源重点治理区域。较高风险区主要为沙漠地带, 其分布总体上与孕灾环境较高风险区分布一致, 该区以风沙土为主, 土壤可蚀性高, 对沙漠边缘的绿洲生态造成一定危害, 是沙源重点治理区。SPCA分析结果表明, 区域下垫面植被覆盖度和土壤类型是影响风沙扩散的最主要因素, 风场强度作动力条件, 是区域沙源扩散的主要诱因。因此, 区域风沙防治重点在于优化景观格局, 减少沙源形成。

(3) 基于MCR模型对区域风沙扩散景观格局进行优化, 识别出研究区十大生态源地, 涉及草地型、湿地型和混合型, 面积3.89万km², 占区域总面积的3.14%; 共构建了20条生态廊道, 包括5条河流型、9条道路型和6条绿带型廊道, 总长度6065.45 km; 这些廊道沿塔里木盆地外缘呈圆环形分布, 其中, 1号和4号廊道纵贯塔克拉玛干沙漠, 长度分别为395.09 km和555.36 km, 占廊道总长度的15.67%; 识别出30个生态节点, 包括A类生态节点7个, B类生态节点23个, 主要分布在和田地区和巴州; 在此基础上设计了重点区域景观格局优化方案, 以减缓区域风沙扩散风险。

参考文献(References)

- [1] Wang Sen, Wang Xuejiao, Chen Dongdong, et al. The spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of dust weather in the southern Xinjiang from 1961 to 2017. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(9): 81-86. [王森, 王雪皎, 陈东东, 等. 1961—2017年南疆地区沙尘天气的时空变化特征及影响因素分析. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(9): 81-86.]
- [2] Guan Mengluan, Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Wind-blown sand disaster risk assessment in the Hexi Corridor based on RS and GIS. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(5): 830-835. [管梦鸾, 张正偲, 董治宝. 基于RS和GIS的河西走廊风沙灾害风险评估. *中国沙漠*, 2017, 37(5): 830-835.]
- [3] Wang Jiping. Risk assessment of sandstorm diffusion and landscape pattern optimization in Beijing region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. [王计平. 北京地区风沙扩散风险评价与景观格局优化研究[D]. 北京林业大学, 2007.]

- [4] Li Chengzhi. Study on the desertification monitoring and early-warning in Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012. [李诚志. 新疆沙漠化监测与预警研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.]
- [5] Li Qingpu, Zhang Zhengdong, Wan Luwen, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1420-1437. [李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1420-1437.]
- [6] Jiang W Y, Cai Y L, Tian J J. The application of minimum cumulative resistance model in the evaluation of urban ecological land use efficiency. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23): 714. DOI: 10.1007/s12517-019-4888-9.
- [7] Pollice A, Jona-Lasinio G, Gaglio M, et al. Modelling the effect of directional spatial ecological processes for a river network in Northern Italy. *Ecological Indicators*, 2020, 112. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106144.
- [8] Li F, Ye Y P, Song B W, et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China. *Ecological Modelling*, 2015, 318(24): 194-203.
- [9] Chen Xiaoping, Chen Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611-1618. [陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611-1618.]
- [10] Guo B B, Fang Y L, Jin X B, et al. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: A case study of Chaohu Lake Basin, China. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104569. DOI: 016/j.landusepol.2020.104569.
- [11] Fu Mengdi, Luo Jianwu, Tian Yu, et al. Establishment and fine-tuning of nature reserve networks based on minimum cumulative resistance model: A case study of Mountain Qinling region. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1135-1143. [付梦娣, 罗建武, 田瑜, 等. 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.]
- [12] Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484. [陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.]
- [13] Wang S D, Zhang X Y, Wu T X, et al. The evolution of landscape ecological security in Beijing under the influence of different policies in recent decades. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 49-57.
- [14] Li Lianxiang, Xu Di, Cheng Xianjun, et al. Groundwater quality assessment in Northern Anhui based on multi-layer weighted principal component analysis. *Resources Science*, 2015, 37(1): 61-67. [李连香, 许迪, 程先军, 等. 基于分层构权主成分分析的皖北地下水水质评价研究. *资源科学*, 2015, 37(1): 61-67.]
- [15] Wan Dejun, Mu Guijin, Lei Jiaqiang, et al. The changing characteristic of sand-dust weather in recent 54 years and future trend forecast in the southern margin of Tarim Basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 78-84. [万的军, 穆桂金, 雷加强, 等. 塔里木盆地南缘近 54 年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 78-84.]
- [16] Mao D L, Lei J Q, Zeng F J, et al. Characteristics of wind erosion and deposition in oasis-desert ecotone in southern margin of Tarim Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(6): 658-673.
- [17] Liu Jiyan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802. [刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [18] Wang Qi, Fu Mengdi, Wei Lai, et al. Groundwater quality assessment in Northern Anhui based on multi-layer weighted principal component analysis. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4546-4554. [王琦, 付梦娣, 魏来, 等. 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.]
- [19] Shi Nana, Han Yu, Wang Qi, et al. Construction and optimization of ecological network for protected areas in Qinghai Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1910-1916. [史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 青海省保护地生态网络构建与优化. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1910-1916.]
- [20] Meng Jijun, Wang Ya, Wang Xiaodong, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(7): 1052-1061. [蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 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.]
- [21] Chen Liding, Fu Bojie, Zhao Wenwu. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449. [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.]
- [22] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. *Landscape Ecology: Principles and Applications*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011. [傅博杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及应用*. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.]

- [23] Yue Jian, Arimjiang Yasheng, Lan Li, et al. Indexes and methods of regionalization for sandy desertification prevention and control in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2010, 27(2): 309-318. [岳健, 阿力木江·牙生, 蓝利, 等. 新疆沙漠化防治区划指标和方法. 干旱区研究, 2010, 27(2): 309-318.]
- [24] Arimjiang Yasheng. *Regionalization and prevention of Desertification Control in Xinjiang*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013. [阿力木江·牙生. 新疆沙质荒漠化防治区划及分区防治模式. 北京: 中国林业出版社, 2013.]
- [25] Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710. [彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 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.]

Risk assessment of sandstorm diffusion and landscape pattern optimization in southern Xinjiang

SHI Nana, HAN Yu, WANG Qi, HAN Ruiying, GAO Xiaoqi,
ZHAO Zhiping, LIU Gaohui, XIAO Nengwen
(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the three dimensions of "hazard- formative factors, hazard- formative environments, hazard- affected bodies", we assessed the risk of sandstorm diffusion in the southern Xinjiang using the Spatial Principal Component Analysis (SPCA) method. A multi-level ecological network was built and components of key landscape patterns were optimized by the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model. (1) The risk of hazard was high in this region by single dimension factor analysis. Under the action of wind, eight sandstorm source areas and Tarim Basin were prone to sandstorm diffusion because of the existence of abundant sand materials. The hazard- formative environment was relatively fragile. Hejing and Aheqi counties had relatively good ecological background. In the Tarim Basin and its southern counties, the sandstorm tends to spread, especially in Hotan Prefecture, and counties of Qiemo and Ruoqiang. Oasis population and agricultural production were highly concentrated and vulnerable to environmental factors. (2) Some 46.53% of the area had high risk of sand diffusion due to abundant sand sources and poor site conditions. The most important factors affecting the wind sand diffusion were vegetation coverage and soil types of the underlying surface. The main causes of regional sand source diffusion were the intensity of wind field. (3) Based on the MCR model, 20 ecological corridors were constructed to connect ecological source areas, including five river types, nine road types and six green belt types of corridors. Among them, corridors 1 and 4 connected via Taklimakan Desert, and the rest of the corridors presented a circular distribution pattern at the outer edge of Tarim Basin. At the same time, 30 ecological nodes were identified, including seven class-A ecological nodes and 23 class-B ecological nodes, which were mainly distributed in Hotan and Bayingolin prefectures. The risk of sandstorm diffusion can be reduced by constructing shelterbelts and improving vegetation coverage. Results provide technical support for the prevention and control of sandstorm diffusion and the optimization of landscape patterns in the arid and semi-arid areas of northern China.

Keywords: risk assessment of sandstorm diffusion; landscape pattern; spatial principal component analysis; Minimum Cumulative Resistance model; southern Xinjiang