

引用格式: 丁思睿, 赵一禾, 赵廷宁, 等. 1990—2020年北京市土地沙化时空演变特征及驱动因子分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(3): 620–629. DING Sirui, ZHAO Yihe, ZHAO Tingning, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of land desertification in Beijing from 1990 to 2020[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(3): 620–629.

1990—2020年北京市土地沙化时空演变特征及驱动因子分析

丁思睿¹, 赵一禾², 赵廷宁¹, 姜群鸥¹, 贾雅凡¹, 苏欣羽¹, 杨庆³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 北京市地质环境监测所城市地下水安全防控北京市重点实验室, 北京 100195)

摘要: 【目的】深入探究北京市土地沙化时空分布规律与关键驱动机制, 对制定切实有效的防沙治沙政策, 推动生态建设可持续发展具有重要科学意义。【方法】基于1990—2020年7期Landsat系列遥感影像, 利用地表反照率与归一化植被指数构建特征空间, 结合荒漠化差值指数与地理探测器模型, 揭示北京市土地沙化的空间分布特征及关键驱动因子。【结果】1990—2020年, 北京市沙化土地主要分布于平原与沿河区域, 面积显著减少, 累计减少约3.3万hm²; 不同土地利用类型中, 林地沙化程度相对较重。地理探测器分析表明: 土地沙化受自然与人为因素共同影响, 其中人口密度是关键驱动因子。【结论】1990—2020年, 北京市土地沙化状况显著改善, 但仍有部分沙化土地亟待治理。未来沙化治理应合理调控区域人口密度, 重点围绕沿河植被建设与季节性耕地保护展开, 综合采取水土保持、植树造林等多种措施, 进一步遏制土地沙化扩张趋势。图4表7参35

关键词: 土地沙化; Albedo-NDVI特征空间; 驱动因素; 北京

中图分类号: X171 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)03-0620-10

Analysis of spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of land desertification in Beijing from 1990 to 2020

DING Sirui¹, ZHAO Yihe², ZHAO Tingning¹, JIANG Qun'ou¹, JIA Yafan¹, SU Xinyu¹, YANG Qing³

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Urban Groundwater Safty Prevention and Control Beijing Key Laboratory, Beijing Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100195, China)

Abstract: [Objective] The aim is to deeply explore the spatiotemporal distribution patterns and driving mechanism of land desertification in Beijing, which is essential for formulating effective policies for preventing and controlling desertification and promoting ecological sustainability. [Method] Based on 7 phases of Landsat images from 1990 to 2020, a feature space was constructed using surface albedo (Albedo) and the normalized difference vegetation index (NDVI). Combined with desertification difference index and geographic detector model, the spatial distribution characteristics and key driving factors of land desertification in Beijing were revealed. [Result] From 1990 to 2020, the desertified land in Beijing was primarily distributed in plains and riparian areas, and decreased significantly by approximately 33 000 hm². Among different land use types, the degree of desertification in forest land was severe. The geographic detector analysis showed that land

收稿日期: 2025-08-16; 修回日期: 2025-12-24

基金项目: 北京市企事业单位科技项目 (2023-LYZ-01-001)

作者简介: 丁思睿 (ORCID: 009-0005-5696-6968), 从事生态修复研究。E-mail: dsr200622@163.com。通信作者: 赵廷宁 (ORCID: 0000-0003-1302-2500), 教授, 博士, 从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

desertification was driven by both natural and anthropogenic factors, with population density being a key driving factor. [Conclusion] Land desertification situation in Beijing has significantly improved in 1990–2020, but there are still some desertified areas that require further restoration. Future management strategies should include rational regulation of population density, the focus on vegetation construction along rivers, and protection of cultivated land. Various measures such as soil and water conservation and afforestation should be taken comprehensively to further curb the expansion of land desertification. [Ch, 4 fig. 7 tab. 35 ref.]

Key words: land desertification; Albedo-NDVI feature space; driving factors; Beijing City

中国境内分布有八大沙漠与四大沙地，是土地沙化较为严重的国家之一^[1]。近年来，随城市化进程的快速推进，土地资源压力持续加剧，非农业用地需求持续增长，而且在气候变化引发的干旱、风沙等自然因素影响下，土地沙化问题日益凸显。根据相关研究以及 2019 年全国第 6 次荒漠化和沙化土地监测调查的结果^[2]，中国沙化土地面积仍达 1.69 亿 hm^2 。近年来，中国在土地沙化治理方面采取了京津风沙源治理、“三北”防护林工程、退耕还林还草等多种生态工程措施，并取得了显著成效。国内众多学者广泛利用不同的沙化信息提取指标对沙化土地进行了大量监测研究。刘二燕等^[3]以植被覆盖度为评价指标，分析了降水量和人口密度对科尔沁-浑善达克沙地土地沙化过程的驱动作用；刘博等^[4]基于地表反照率-归一化植被指数 (Albedo-NDVI) 特征空间，揭示了化德地区土地的荒漠化程度及演变规律；李作成等^[5]通过构建植被状况-地表反射率-土壤湿度 (NDVI-Albedo-Wet) 三维特征空间监测模型，分析了青藏高原土地沙化的时空格局变化；詹琪琪等^[6]根据不同分类器的特点，对比了 4 种分类方案在雅江中游河谷地区沙化信息提取中的精度。这些研究为沙区的治理提供了有力的理论支撑，但针对城市土地沙化的研究仍相对有限。国外学者亦从不同角度对城市的土地沙化状况开展了研究。SALHI 等^[7]通过土壤流失评估指出：丹吉尔地区近期过火、休耕及陡坡区域的沙化脆弱性较高；EGIDI 等^[8]依据环境敏感区指数分析，发现意大利中等定居密度地区的土地沙化风险最为突出；PRAKASAM 等^[9]根据不同时期的地面实测影像，量化了北卡纳达地区因森林退化引发的土地沙化程度。因此监测城市沙化土地动态发展，掌握其时空演变特征，探究其关键驱动机制，具有重要科学意义。

北京既是重点防护的核心区域，也是协调京津冀乃至北方地区沙化联防联控的枢纽与示范区。北京市防沙治沙工作开始于 20 世纪 50 年代。这期间营造了防风固沙林，建设了骨干林带和农田林网，实施以五大风沙危害区为重点的治理方案，并结合产业调整、城市绿化建设工程等进行全面综合治理。《北京市第 6 次荒漠化及沙化监测报告》显示：2019 年北京沙化土地面积为 2.2 万 hm^2 ，较 2014 年 (2.7 万 hm^2) 减少了 18.5%，治理成效显著。但近年来针对北京市区土地沙化的研究较少，现有研究集中于大兴区^[10-13]、潮白河流域^[14]等典型区域，且研究时段较短，缺乏多期对比分析，难以全面反映北京土地沙化的分布特征及驱动因素。

因此，本研究基于遥感、气象及人类活动数据，系统分析了 1990—2020 年北京市土地沙化的时空格局，深入辨析其驱动机制，旨在为区域沙化精准治理与生态可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于华北大平原的西北边缘 (39°28′~41°05′N, 115°25′~117°35′E)，总面积为 1.64 万 km^2 ，地势西北高、东南低，西部、北部和东北部三面环山，东南部是一片缓缓向渤海倾斜的平原。境内流经的主要河流有永定河、潮白河、拒马河等。北京市的气候为暖温带半湿润半干旱季风气候，特点为春秋短，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥。

2 研究方法

2.1 数据来源

北京市风沙灾害多发于 3—5 月。谢宜嘉等^[15]研究表明：北京市植被的春季物候平均起始于第 117 天 (即 4 月下旬)，5 月植被已处于生长阶段。为便于计算 NDVI，基于 Google Earth Engine 云计算平

台,本研究选用1990—2020年5月的Landsat系列遥感影像数据,分辨率为30 m×30 m。用ENVI 5.3软件对获取的遥感影像进行几何精校正、辐射校正、影像裁剪等预处理,得到北京市土地沙化遥感影像。此外,本研究为确保所有数据(表1)与遥感影像分辨率保持一致,利用ArcGIS 10.8软件对所有数据进行预处理,通过投影坐标、按掩膜提取、创建渔网、多值提取至点以及普通克里金插值等多项技术操作,将数据分辨率均调整为30 m×30 m,以便后续分析。

表1 数据来源

Table 1 Data sources

数据名称	数据来源
1990—2020年30 m Landsat系列遥感影像	Google Earth Engine云计算平台
1990—2023年1 km全国逐年降水量	国家青藏高原科学数据中心
1990—2023年1 km全国逐年平均气温	国家青藏高原科学数据中心
归一化植被指数(NDVI)	Google Earth Engine云计算平台
1981—2023年1 km全国范围内气象站逐年平均风速	美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心(NCEI)
1990—2020年1 km全国地表蒸散发	国家青藏高原科学数据中心
人口密度(PDD)	1990—2022年全球1 km网格化人口数量、密度数据集 ^[16]
1990—2022年1 km全国地区生产总值(GDP)	资源环境科学数据平台
1990—2020年土地利用	1990—2022年中国30 m土地利用数据集 ^[17]
30 m北京市区县级行政边界矢量	地理监测云平台
1990—2020年北京市各区统计年鉴	北京市统计局

2.2 研究方法

2.2.1 Albedo-NDVI 特征空间构建 为定量表征地表植被覆盖与能量反射特征,本研究采用归一化植被指数(NDVI)与地表反照率(Albedo)等2个关键指标,构建Albedo-NDVI二维特征空间。其中,NDVI反映植被绿度与生物量状况^[18],Albedo表征地表对太阳辐射的反射能力^[19]。同时为保障2个指标量纲统一并增强可比性,分别对NDVI和Albedo进行归一化处理,得到 N_{norm} 与 A_{norm} 。NDVI、Albedo、 N_{norm} 、 A_{norm} 参考文献^[20]计算。

2.2.2 计算荒漠化差值指数(I_{DDI}) 在Albedo-NDVI特征空间中,Albedo与NDVI之间存在显著的线性关系。本研究以 A_{norm} 为因变量、 N_{norm} 为自变量构建线性回归模型。基于该模型,可进一步定义荒漠化差值指数(I_{DDI}),用以反映研究区内沙化状况。线性回归模型与 I_{DDI} 计算参考文献^[21]。

2.2.3 土地沙化信息提取 在Albedo-NDVI特征空间中,不同地表类型沿特定轨迹分布,其中沙化土地的变化路径与特征空间中的某一边界(图1中AC边)接近^[21]。基于此,可通过垂直于该边的直线实现对沙化与非沙化土地的区分。本研究依据北京市第6次荒漠化与沙化监测结果及土壤类型分布,利用自然断点法^[20]对 I_{DDI} 进行分级,将其划分为沙化土地与未沙化土地2个类别,完成土地沙化状况的信息提取。

2.2.4 精度评价 验证分类精度时,可信度高的方法是混淆矩阵与Kappa系数协同验证^[22]。这种组合方法不仅可以精细分类模型的识别能力,还稳健地提升了总体评价可信度。混淆矩阵采用构建参考数据与分类结果交叉对比矩阵的方式(采用总体精度、用户精度、生产者精度3个指标)来量化分类模型的预测性能。该矩阵采用 $n \times n$ 结构,其中行表示参考数据的真实类别,列表示模型的预测结果。Kappa系数可通过消除偶然一致性的影响客观反映模型分类结果与真实情况的吻合程度。总体精度、用户精度、生产者精度、Kappa系数参考文献^[18]计算。

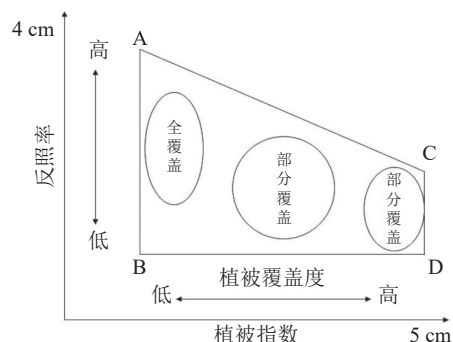


图1 Albedo-NDVI空间关系示意图

Figure 1 Schematic illustrating the Albedo-NDVI spatial relationship

2.2.5 转移矩阵 土地利用转移矩阵可直观反映研究期内不同土地利用类型的沙化加重与改善情况，其计算参考文献 [23]。

2.2.6 单一动态度 单一动态度是一种用于估算沙化土地面积变化速度的方法，可定量分析研究期内各土地利用类型中沙化土地的面积变化强度，其计算参考文献 [24]。

2.2.7 地理探测器 (GeoDetector) 地理探测器是用来研究空间的分异规律及其影响因子的统计方法 [25]。本研究运用其因子探测器与交互探测器模块，探究了北京市土地沙化空间异质性及各因素驱动强度。

①因子探测器。选取植被覆盖、气象因素及人类活动 3 类共 7 种驱动因素 (包括植被指数、年降水量、年平均气温、年平均风速、地表蒸散发、人口密度与地区生产总值)，定量分析其对沙化土地空间分布的影响程度。各因素对沙化土地影响程度的解释力用统计量 q 表示 (计算参考文献 [25])， q 越大，影响越大。②交互探测器。探究 7 种驱动因素之间的交互作用，明确其对土地沙化的影响效应。交互类型见表 2。③最优参数选择。基于地理探测器输入数据为类别型变量，采用 R4.2.1 软件的 GD 包 [26]，针对每个连续型驱动因子，分别测试等间隔、自然断点、分位数等 5 种离散化方法在 3~10 个分类区间下的表现 [27-28]，并选取能产生最大 q 的组合作为该因子的最优离散方案，以确保探测结果的可靠性。

表 2 因子交互作用类型

判断依据	交互类型
$\max[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2)$	双因子增强
$\max[q(x_1), q(x_2)] > q(x_1 \cap x_2) > \min[q(x_1), q(x_2)]$	单因子非线性减弱
$\min[q(x_1), q(x_2)] > q(x_1 \cap x_2)$	非线性减弱
$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性增强
$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立

3 结果与分析

3.1 土地沙化信息提取

3.1.1 Albedo-NDVI 特征空间构建 本研究在各期影像中随机选取 200 个样点，以 NDVI 为自变量，Albedo 为因变量构建特征空间散点图并得到其拟合方程。由图 2 可知：北京市 1990—2020 年 Albedo-NDVI 呈较强负相关，各期决定系数 (R^2) 均高于 0.68。

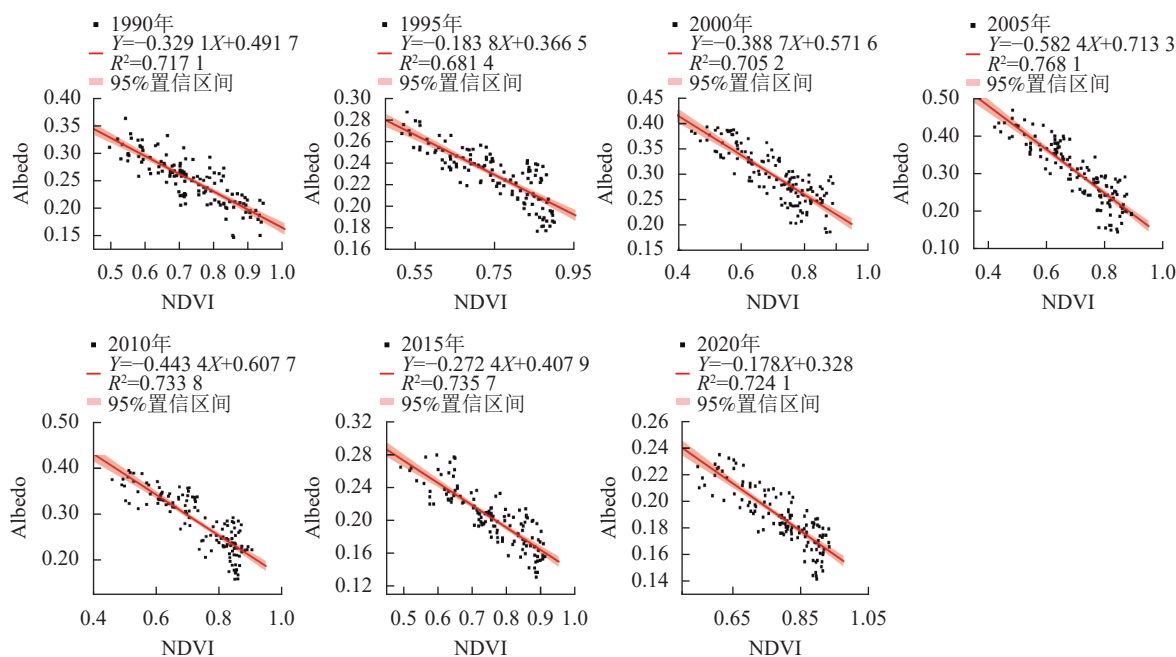


图 2 1990—2020 年 Albedo-NDVI 特征空间

Figure 2 Albedo-NDVI feature space in 1990—2020

3.1.2 荒漠化差值指数 (I_{DDI}) 分级 根据 Albedo-NDVI 拟合方程得到 1990—2020 年荒漠化差值指数 (I_{DDI}) 计算公式及经自然断点法分级后， I_{DDI} 与沙化土地关系见表 3。

表3 荒漠化差值指数分级区间

Table 3 NDVI grading range

年份	计算公式	NDVI	类型	年份	计算公式	NDVI	类型
1990	$I_{DDI\ 1990}=3.038\ 6X-Y$	-0.047~1.054	沙化土地	2010	$I_{DDI\ 2010}=2.255\ 3X-Y$	-0.350~0.643	沙化土地
		1.054~2.962	未沙化土地			0.643~2.216	未沙化土地
1995	$I_{DDI\ 1995}=5.440\ 7X-Y$	-0.005~3.093	沙化土地	2015	$I_{DDI\ 2015}=3.671\ 1X-Y$	-0.009~1.847	沙化土地
		3.093~5.432	未沙化土地			1.847~3.616	未沙化土地
2000	$I_{DDI\ 2000}=2.572\ 7X-Y$	-0.721~0.986	沙化土地	2020	$I_{DDI\ 2020}=5.618\ 0X-Y$	-0.031~3.294	沙化土地
		0.986~2.470	未沙化土地			3.294~5.607	未沙化土地
2005	$I_{DDI\ 2005}=1.717\ 0X-Y$	-0.349~0.571	沙化土地				
		0.571~1.624	未沙化土地				

说明: X. NDVI; Y. Albedo; I_{DDI} . 荒漠化差值指数。

3.1.3 模型精度检验 本研究基于每期影像随机布设的 300 个样本点 (均匀覆盖各土地类型), 结合 Landsat 真彩色影像与 Google Earth 高分辨率地图进行目视解译, 完成荒漠化差值指数模型精度评价。由表 4 可知: 模型总体精度为 81.00%~90.67%, 用户精度与生产者精度分别为 71.14%~92.90% 和 77.40%~92.09%。尽管部分年份如 1990 和 2000 年未沙化土地用户精度、2000 年沙化土地生产者精度较低, 但整体分类精度良好。此外, 7 期 Kappa 系数为 0.619~0.806, 其中 2005 年系数值最高, 较最低的 2000 年提升约 30%。参照 Kappa 系数分级标准, 所有系数值均高于 0.600, 模型分类结果一致性较高, 满足研究要求。

表4 模型检验结果

Table 4 Model testing results

年份	沙化土地用户精度/%	未沙化土地用户精度/%	沙化土地生产者精度/%	未沙化土地生产者精度/%	总体精度/%	Kappa 系数	年份	沙化土地用户精度/%	未沙化土地用户精度/%	沙化土地生产者精度/%	未沙化土地生产者精度/%	总体精度/%	Kappa 系数
	1990	91.39	71.14	80.70				89.08	81.33	0.638	2010		
1995	84.62	86.62	85.21	86.08	85.67	0.713	2015	78.48	90.85	90.51	79.14	84.33	0.688
2000	82.48	79.75	77.40	84.42	81.00	0.619	2020	85.26	86.81	87.50	84.46	86.00	0.720
2005	92.90	88.28	89.44	92.09	90.67	0.806							

3.2 土地沙化时空演变特征

3.2.1 土地沙化时空分布格局 研究结果表明: 1990—2020 年北京市沙化土地呈现西北—东南的地理分布格局, 集中分布在平原与沿河两岸。在平原地区, 沙化土地集中分布在延庆的康庄地区、昌平的南口地区, 怀柔和密云的大沙河地区, 在山前风沙区和房山拒马河地区也有零星分布。在沿河两岸, 沙化土地主要分布于潮白河、永定河、温榆河沿岸。以行政区划来看, 1990—2020 年北京市沙化土地分布于延庆区、怀柔区、密云区、平谷区、昌平区、顺义区、朝阳区、丰台区、房山区、大兴区、通州区共 11 个区。

由图 3 可知: 2010 年前北京及各區沙化土地面积呈缓慢下降趋势 (仅 1995 年略增), 总面积由 1990 年的 5.54 万 hm^2 降至 2010 年的 5.24 万 hm^2 , 降幅约 3%~4%。2010—2020 年则骤减, 至 2020 年沙化土地面积仅为 2.23 万 hm^2 , 其中 2010—2015 年降幅最大, 达 47.46%, 2015—2020 年降幅减缓

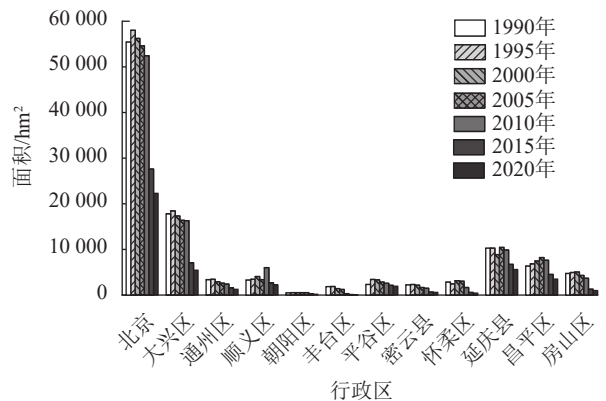


图3 北京市 1990—2020 年沙化土地面积汇总
Figure 3 Summary of desertified land area in Beijing from 1990 to 2020

至 19.23%。从区域分布看，1990—2020 年，大兴区沙化面积占比由 32.14% 减少至 24.52%，位于第 1 位；延庆区占比由 18.45% 增至 25.15%，成为第二大分布区；朝阳区、丰台区占比最小，均不足 1.00%。整体来看，近 30 a 间沙化土地面积缩减明显，尤其在 2010 年后治理效果尤为突出。

3.2.2 土地类型转移分析 为深入解析北京市 1990—2020 年沙化土地的来源类型，更好地量化沙化土地中不同土地利用类型的面积变化强度，本研究利用土地利用转移矩阵和单一动态度 2 种方法计算得出不同土地利用类型中沙化土地的面积(表 5)及动态度(表 6)。

由表 5 可知：1990—2020 年北京市不同土地利用类型的沙化面积总体呈下降趋势。7 期数据中，林地沙化面积占比均最高，但整体持续减少；未利用地占比最低，仅 1995 与 2020 年有轻微沙化外，其余年份无沙化。

由表 6 可知：各土地利用类型在不同时期的沙化变化差异明显，沙化重心持续转移。其中 1990—1995 年水域动态度最高 (15.14%)，1995—2000 年未利用地动态度最高 (-20.00%)，2000—2005 年建筑等用地动态度最高 (3.65%)，2005—2010 年耕地动态度最高 (-11.59%)。2010—2015 年所有地类动态度均为负值，建筑等用地减少最快 (-12.95%)；2015—2020 年草地动态度转为最高 (17.42%)。整体而言，沙化土地来源受土地利用类型变化影响，具有明显的时段差异与类型更替特征。

表 5 不同土地利用类型沙化面积

Table 5 Sankey diagram of desertification area under different land use types

年份	耕地/hm ²	林地/hm ²	草地/hm ²	水域/hm ²	建筑等用地/hm ²	未利用地/hm ²	年份	耕地/hm ²	林地/hm ²	草地/hm ²	水域/hm ²	建筑等用地/hm ²	未利用地/hm ²
1990	6641.32	37874.17	2643.98	1229.44	7041.09	0.00	2010	3655.17	26045.44	957.21	848.67	20941.50	0.00
1995	8777.79	33838.70	2154.19	2160.39	11076.76	6.18	2015	2623.80	16357.10	611.22	634.99	7380.89	0.00
2000	8269.88	32669.09	2271.51	1419.43	11604.10	0.00	2020	2703.60	13176.58	1143.56	487.90	4684.06	102.30
2005	8689.85	28837.31	2060.77	1311.76	13721.31	0.00							

表 6 单一动态度变化

Table 6 Single dynamic degree change

时段	耕地/%	林地/%	草地/%	水域/%	建筑等用地/%	未利用地/%	时段	耕地/%	林地/%	草地/%	水域/%	建筑等用地/%	未利用地/%
1990—1995年	6.43	-2.13	-3.70	15.14	11.46	0.00	2005—2010年	-11.59	-1.94	-10.71	-7.06	10.52	0.00
1995—2000年	-1.16	-0.69	1.09	-6.86	0.95	-20.00	2010—2015年	-5.64	-7.44	-7.23	-5.04	-12.95	0.00
2000—2005年	1.02	-2.40	-1.90	-1.50	3.65	0.00	2015—2020年	0.61	-3.89	17.42	-4.63	-7.31	0.00

3.3 土地沙化影响因素综合分析

本研究选取植被指数、年降水量、年平均气温、年平均风速、地表蒸散发、人口密度与地区生产总值共 7 个自然与人为因素，运用地理探测器中的因子探测与交互探测模型，分别评估各因子的独立解释力及交互作用对土地沙化的影响。

3.3.1 单因素分析 根据 7 a 数据的平均解释力 (q) 排序(表 7)，各因子对沙化土地的影响权重从高到低依次为人口密度、地表蒸散发、地区生产总值、年平均气温、年降水量、植被指数、年平均风速。人口密度是土地沙化的关键驱动因素，地表蒸散发、地区生产总值、年平均气温、年降水量也具有一定影响。植被指数和年平均风速的贡献较弱 ($q < 0.150$)。

同时，各因素对土地沙化的解释力存在显著年际差异。人口密度在多数年份解释力 (q) 均高于 0.350，2010 年达到峰值 (0.428)，为最关键驱动要素；地表蒸散发解释力次之，2020 年最高，为 0.443。地区生产总值、年平均气温与年降水量解释力相近，约 0.190，均在 2020 年达到峰值。而植被指数与风

表7 不同驱动因素对沙化土地的解释力统计

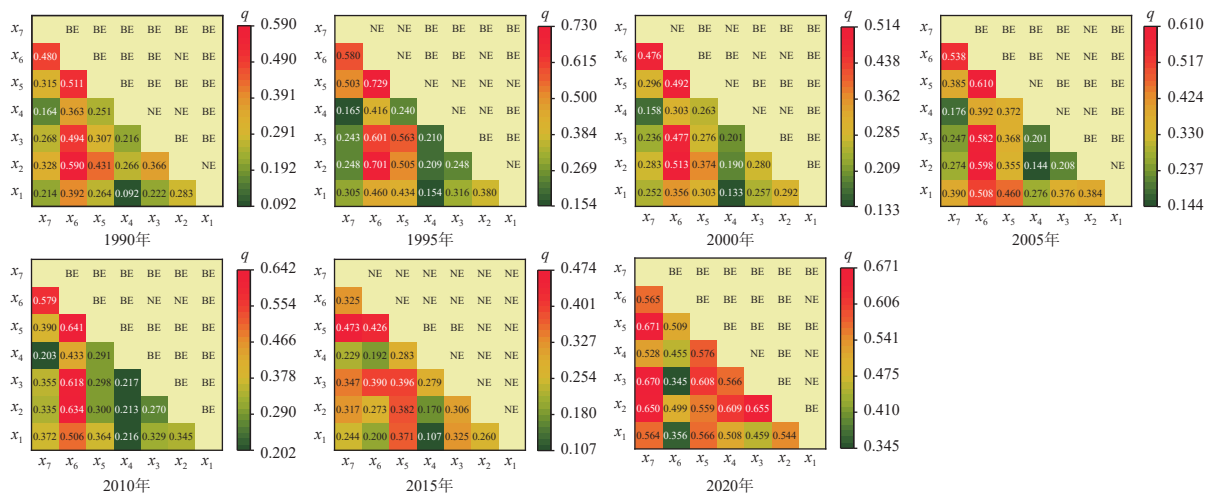
Table 7 Statistical explanation of different driving factors on desertified land

年份	自然和人为因素解释力(q)							年份	自然和人为因素解释力(q)						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1990	0.084	0.193	0.188	0.021	0.248	0.361	0.158	2010	0.208	0.206	0.186	0.046	0.275	0.428	0.185
1995	0.149	0.165	0.194	0.008	0.205	0.414	0.158	2015	0.036	0.056	0.197	0.047	0.244	0.078	0.118
2000	0.127	0.180	0.167	0.008	0.246	0.299	0.142	2020	0.131	0.418	0.269	0.296	0.443	0.176	0.468
2005	0.267	0.107	0.170	0.014	0.334	0.390	0.167	平均	0.143	0.189	0.196	0.063	0.285	0.307	0.199

说明： x_1 . 植被指数； x_2 . 年降水量； x_3 . 年平均气温； x_4 . 年平均风速； x_5 . 地表蒸散发； x_6 . 人口密度； x_7 . 地区生产总值。

速的解释力长期处于低位且变化平缓，表明其影响较为稳定且有限。

3.3.2 双因素分析 图4为1990—2020年7个驱动因素对土地沙化协同作用的解释力。结果显示：任意两因子的交互作用均明显高于其单独作用，因子间普遍存在协同增强效应。1990、2010、2020年地区生产总值与其余因子交互作用，及2000、2010年植被指数与其余因子交互作用，均呈双向增强；2015年地区生产总值、植被指数分别与其余因子呈非线性增强；其余因子交互作用则在双向增强与非线性增强间波动。



x_1 , 植被指数； x_2 , 年降水量； x_3 , 年平均气温； x_4 , 年平均风速； x_5 , 地表蒸散发； x_6 , 人口密度； x_7 , 地区生产总值。BE表示双向增强；NE表示非线性增强。

图4 1990—2020年土地沙化驱动因素交互探测结果

Figure 4 Interactive detection results of driving factors of land desertification from 1990 to 2020

从不同年份看，驱动组合随时间发生演变。1990与2000年，年降水量与人口密度的交互作用最强 ($q > 0.500$)；1995—2010年，地表蒸散发与人口密度的解释力最高 ($q > 0.600$)；2015年后，地表蒸散发与地区生产总值的交互作用跃居主导地位 ($q > 0.450$)。从驱动因素看，1990—2020年地表蒸散发与人口密度的交互作用明显，与各自高贡献度一致。年平均风速除2020年外，与其他因子的交互作用均较弱，其中与植被指数的交互作用在部分年份仅约0.100。

4 讨论

土地沙化是多因子协同驱动的结果，不同阶段自然与人为因素对沙化过程反映出复合的影响机制。本研究基于1990—2020年Landsat遥感影像，构建Albedo-NDVI特征空间与荒漠化差值指数模型，实现了北京市沙化土地的动态识别。与张国桢^[29]、刘克等^[14]采用的专家打分法、遥感影像目视解译相比，本方法在提升提取精度的同时有效降低了人为误差，为城市沙化动态监测提供了可靠技术路径。

北京市沙化土地分布格局受自然基底与外部沙源的共同影响。陈广庭^[30]指出：北京市平原地区长期受潮白河、永定河等河流冲积作用，土壤以砂粒含量高的亚砂土、亚黏土和粗细砂为主，结构松散、黏结力弱，抗侵蚀能力差，为沙化提供了物质基础。同时，北京受周边沙源区(如内蒙古科尔沁沙地、河北宣化盆地)及主要风道(如延庆狼山风口、密云古北口)影响^[31]，尽管年平均风速常年低于 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，

风蚀贡献有限，但外源沙尘输送仍是不可忽视的驱动因素。

自 20 世纪 90 年代以来，随着“三北”防护林、京津风沙源治理、平原造林^[32]等重点治沙工程持续推进，以及两轮百万亩造林绿化工程的实施，城市公园、口袋公园兴建，北京市完成退化草原治理 $2.61 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，新增森林面积 $3.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，植被覆盖度显著提升^[33]，沙化状况显著好转。从土地利用类型看，林地沙化土地占比最高，主要因其组成以固定及半固定沙地为主，经过长时间的发展各方面都趋于稳定^[29]，长期内不会发生显著改善。而耕地因春季植被覆盖度低，NDVI 值波动小，导致其在驱动分析中解释力较弱。因此，生态修复措施对沙化逆转具有主导作用，但遥感时相与植被物候的匹配程度也影响驱动机制的准确识别。

全球气候变暖加剧了北京地区的环境压力，但 2010 年后实施的生态补水政策^[34]有效改善了区域水分条件，促使 2015 年地表蒸散发对沙化的影响程度达到峰值。与此同时，城市化快速发展导致人口集聚与建设扩张，大量占用耕地、林地且过度开采的行为加剧了沙化恶化趋势。2014 年“非首都功能疏解”政策^[35]实施后，人口密度骤减，人口压力显著缓解。人口密度与地表蒸散发交互作用的解释力多年最高，表明北京市沙化过程受“人为-水分”协同机制调控，水分改善可在一定程度上缓解人为压力对沙化的驱动作用。该机制是 2015 年沙化面积降至最低的关键原因，也为生态调控与人口疏解相结合的治理策略提供了理论依据。

本研究在揭示北京市沙化时空演变及其驱动机制方面仍存在一定局限：①模型未引入土壤湿度等指标，后期可引入以提升沙化土地的识别精度；②受数据限制，未引入空间计量模型，难以量化沙化格局的稳定性；③NDVI 在低覆盖区敏感性有限，后续可融合 MODIS-EVI 等数据提升动态监测能力。

5 结论

本研究采用 1990—2020 年 Landsat 长时间序列遥感影像，基于 Albedo-NDVI 特征空间构建荒漠化差值指数模型，实现了北京市高精度土地沙化空间信息提取，再结合地理探测器定量分析了其关键驱动机制。主要结论如下：①30 a 间北京市土地沙化集中分布于平原和沿河两岸，沙化面积显著减少 3.3 万 hm^2 ，整体呈现显著逆转趋势；②驱动机制分析表明：人口密度是关键驱动因素，且年降水量、地表蒸散发量与人口密度的双因子交互作用具有最强的解释力，揭示了“人类活动-水分条件”的协同作用对城市沙化的主导影响；③未来治理应聚焦沿河植被带和季节性耕地，采取水土保持和植树造林等综合措施，并构建“卫星遥感-地面站点-无人机巡检”三位一体的土地沙化监测网络，以实现精准防治与土地资源可持续利用。

6 参考文献

- [1] REN Yu, ZHANG Bo, CHEN Xidong, *et al.* Analysis of spatial-temporal patterns and driving mechanisms of land desertification in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, **909**: 168429. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168429.
- [2] 咎国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. *林业资源管理*, 2023(1): 1-7. ZAN Guosheng, WANG Cuiping, LI Feng, *et al.* Main results and analysis of the sixth national survey on desertification and desertification[J]. *Forest Resources Management*, 2023(1): 1-7. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2023.01.001.
- [3] 刘二燕, 赵媛媛, 周蝶, 等. 科尔沁-浑善达克沙地 2000—2020 年土地沙化时空变化格局[J]. *中国沙漠*, 2024, **44**(4): 46-56. LIU Eryan, ZHAO Yuanyuan, ZHOU Die, *et al.* Spatio-temporal change pattern of land desertification in Horqin-Hunshandake sandy land from 2000 to 2020[J]. *Journal of Desert Research*, 2024, **44**(4): 46-56. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00040.
- [4] 刘博, 霍润斌, 李利阳, 等. 基于 Albedo-NDVI 特征空间的内蒙古化德县荒漠化时空动态监测[J]. *中国地质*, 2025, **52**(4): 1439-1453. LIU Bo, HUO Runbin, LI Liyang, *et al.* Monitoring the spatio-temporal dynamics of desertification in Huade County, Inner Mongolia based on Albedo-NDVI feature space [J]. *Geology in China*, 2025, **52**(4): 1439-1453. DOI: 10.12029/gc20240606002.
- [5] 李作成, 张路, 欧阳志云, 等. 基于 Google Earth Engine 的青藏高原土地沙化模拟与动态评估[J]. *生态学报*, 2023, **43**(4): 1526-1536. LI Zuocheng, ZHANG Lu, OUYANG Zhiyun, *et al.* Simulation and dynamic evaluation of land desertification in Qinghai-Tibet Plateau based on Google Earth Engine[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(4): 1526-1536.

- DOI: [10.5846/stxb202203090566](https://doi.org/10.5846/stxb202203090566).
- [6] 詹琪琪, 赵伟, 杨梦娇, 等. 雅鲁藏布江中部流域土地沙化遥感识别[J]. *地球信息科学学报*, 2022, **24**(2): 391–404. ZHAN Qiqi, ZHAO Wei, YANG Mengjiao, *et al.* Identification of sandy land in the midstream of the Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, **24**(2): 391–404. DOI: [10.12081/dpxxkx.2022.210138](https://doi.org/10.12081/dpxxkx.2022.210138).
- [7] SALHI A, EL HASNAOUI Y, PÉREZ CUTILLAS P, *et al.* Soil erosion and hydroclimatic hazards in major African port cities: the case study of Tangier[J]. *Scientific Reports*, 2023, **13**: 13158. DOI: [10.1038/s41598-023-40135-3](https://doi.org/10.1038/s41598-023-40135-3).
- [8] EGIDI G, QUARANTA G, SALVIA R, *et al.* Urban sprawl and desertification risk: unraveling the latent nexus in a Mediterranean country[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2022, **65**(3): 441–460. DOI: [10.1080/09640568.2021.1886913](https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1886913).
- [9] PRAKASAM C, R A. Impact of changing urban landscapes on forest degradation: a study on a part of Western Ghats, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, **196**(3): 256. DOI: [10.1007/s10661-024-12379-7](https://doi.org/10.1007/s10661-024-12379-7).
- [10] 王晓青, 刘拥军, 申建军. 北京市平原区沙化监测预警评价指标体系初步研究[J]. *西北林学院学报*, 2013, **28**(4): 193–198. WANG Xiaoqing, LIU Yongjun, SHEN Jianjun. Preliminary study on the index system of desertification monitoring, early warning and evaluation in Beijing plain area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, **28**(4): 193–198. DOI: [10.3969/j.issn.1001-7461.2013.04.40](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2013.04.40).
- [11] 张丽颖, 岳德鹏, 王计平, 等. 北京风沙源区风沙活动特征分析及治沙格局初步研究[J]. *水土保持研究*, 2008, **15**(4): 184–188. ZHANG Liying, YUE Depeng, WANG Jiping, *et al.* Analysis on the characteristics of sandstorm activity and preliminary study on sand control pattern in Beijing sandstorm source area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, **15**(4): 184–188.
- [12] 贺然, 徐伟, 王棒, 等. 北京市典型沙地景观动态变化分析——以康庄为例[J]. *水土保持研究*, 2007, **14**(5): 145–148. HE Ran, XU Wei, WANG Bang, *et al.* Analysis on dynamic landscape changes of typical sand in Beijing City: a case study of Kangzhuang as typical damage regions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, **14**(5): 145–148.
- [13] 贾晓红, 吴波, 余新晓, 等. 京津冀风沙源区沙化土地治理关键技术研究及示范[J]. *生态学报*, 2016, **36**(22): 7040–7044. JIA Xiaohong, WU Bo, YU Xinxiao, *et al.* Research and demonstration on key technologies of desertification land control in sandstorm source area of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(22): 7040–7044. DOI: [10.5846/stxb201610172101](https://doi.org/10.5846/stxb201610172101).
- [14] 刘克, 赵文吉, 胡德勇. 基于 RS 和 GIS 的北京潮白河流域沙化现状及成因分析[J]. *水土保持研究*, 2008, **15**(6): 157–160, 163. LIU Ke, ZHAO Wenji, HU Deyong. Status analysis of desertification in Chaobaihe River Basin based on RS and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, **15**(6): 157–160, 163.
- [15] 谢宜嘉, 杨倍倍, 张镇, 等. 2000—2022 年北京市植被春季物候期变化特征分析[J]. *自然资源遥感*, 2025, **37**(2): 185–193. XIE Yijia, YANG Beibei, ZHANG Zhen, *et al.* Analysis on variation characteristics of vegetation phenology in spring in Beijing from 2000 to 2022[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2025, **37**(2): 185–193. DOI: [10.6046/zrzyyg.2023378](https://doi.org/10.6046/zrzyyg.2023378).
- [16] LIU Luling, CAO Xin, LI Shijie, *et al.* A 31-year (1990–2020) global gridded population dataset generated by cluster analysis and statistical learning[J]. *Scientific Data*, 2024, **11**(1): 124. DOI: [10.1038/s41597-024-02913-0](https://doi.org/10.1038/s41597-024-02913-0).
- [17] MCROBERTS R E, WESTFALL J A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates[J]. *Forest Science*, 2014, **60**(1): 34–42. DOI: [10.5849/forsci.12-141](https://doi.org/10.5849/forsci.12-141).
- [18] 于钧. 基于特征空间的科尔沁沙地荒漠化信息提取研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022. YU Jun. *Research on Extraction of Desertification Information of Horqin Sandy Area Based on Feature Space*[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022. DOI: [10.27210/d.cnki.glnju.2022.000718](https://doi.org/10.27210/d.cnki.glnju.2022.000718).
- [19] 薛华柱, 张国东, 周红敏, 等. 几种典型地表类型反照率时序变化特征及其参数化研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(2): 272–283. XUE Huazhu, ZHANG Guodong, ZHOU Hongmin, *et al.* Time series variation characteristics and parameterization of land surface albedo in several typical land cover types[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2019, **55**(2): 272–283. DOI: [10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.02.015](https://doi.org/10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.02.015).
- [20] 李嘉豪, 刘玉国, 赵紫晴, 等. 小滦河流域土地沙化时空动态监测及景观格局演变特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(6): 1322–1332. LI Jiahao, LIU Yuguo, ZHAO Ziqing, *et al.* Temporal and spatial dynamic monitoring of land desertification and evolution characteristics of landscape pattern in Xiaoluanhe River basin[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1322–1332. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220731](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220731).
- [21] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. *地理科学*, 2006, **26**(1): 75–81. ZENG Yongnian, XIANG Nanping, FENG Zhaodong, *et al.* Study on Albedo-NDVI feature space and desertification remote

- sensing monitoring index[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **26**(1): 75–81. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0690.2006.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0690.2006.01.013).
- [22] 张同升, 甘国辉. 土地利用变化的研究理论述评[J]. *中国土地科学*, 2005, **19**(3): 33–37, 64. ZHANG Tongsheng, GAN Guohui. Review on the research theory of land use change[J]. *China Land Science*, 2005, **19**(3): 33–37, 64. DOI: [10.3969/j.issn.1001-8158.2005.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8158.2005.03.007).
- [23] 裴杰, 王力, 柴子为, 等. 基于 RS 和 GIS 的深圳市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(3): 227–233. PEI Jie, WANG Li, CHAI Ziwei, et al. Analysis of land use/cover change and carbon effect in Shenzhen based on RS and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(3): 227–233. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.040](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2017.03.040).
- [24] 张影. 社会生态复合系统视角下的陇中黄土丘陵区土地利用多功能评价——以定西市安定区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. ZHANG Ying. *Land Use Multifunction Assessment from the Perspective of Social-ecological Complex Systems in the Loess Hilly Area of Central Gansu: a Case Study of Anding District, Dingxi*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. DOI: [10.7666/d.D01300488](https://doi.org/10.7666/d.D01300488).
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116–134. WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geographical detector: principle and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116–134. DOI: [10.11821/dlxb201701010](https://doi.org/10.11821/dlxb201701010).
- [26] SONG Yongze, WANG Jinfeng, GE Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, **57**(5): 593–610. DOI: [10.1080/15481603.2020.1760434](https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1760434).
- [27] 何清芸, 牟凤云, 李秋彦, 等. 重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(28): 11955–11962. HE Qingyun, MOU Fengyun, LI Qiuyan, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation coverage and its driving forces in Chongqing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(28): 11955–11962. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.28.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.28.008).
- [28] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, **37**(4): 72–80. ZHANG Ruojing, CHEN Yuehong, ZHANG Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal pattern and driving forces of mountain torrential disasters in Jiangxi Province based on geographic detector with optimal parameters[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, **37**(4): 72–80. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0504.2021.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0504.2021.04.011).
- [29] 张国祯. 北京市沙化土地现状评价及其防治策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. ZHANG Guozhen. *Study on the State Evaluation and Control Strategy of Land Desertification in Beijing*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [30] 陈广庭. 北京平原土壤机械组成和抗风蚀能力的分析[J]. *干旱区资源与环境*, 1991(1): 103–113. CHEN Guangting. Analysis of soil mechanical composition and wind erosion resistance in Beijing Plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1991(1): 103–113. DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.1991.01.012](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.1991.01.012).
- [31] 郑艺, 赵文吉. 基于遥感和 GIS 的北京北部洪积区土地沙化现状研究[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2009, **30**(2): 47–51. ZHENG Yi, ZHAO Wenji. Research into the status of desertification in the alluvial fan to the north of Beijing, based on RS and GIS[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2009, **30**(2): 47–51. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9398.2009.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9398.2009.02.012).
- [32] 韦艳葵. 北京平原地区森林资源状况及经营策略[J]. *林业资源管理*, 2022(2): 10–18. WEI Yankui. Forest resources status and management strategy in Beijing Plain Area[J]. *Forest Resources Management*, 2022(2): 10–18. DOI: [10.13466/j.cnki.lyzygl.2022.02.002](https://doi.org/10.13466/j.cnki.lyzygl.2022.02.002).
- [33] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 北京市植被覆盖度时空变化特征及其对城市化的响应[J]. *环境科学*, 2024, **45**(9): 5318–5328. SHI Nana, HAN Yu, WANG Qi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage in Beijing and its response to urbanization[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 5318–5328. DOI: [10.13227/j.hjlx.202308265](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202308265).
- [34] 赵龙, 蒋小伟, 李玉梅, 等. 近 10 年北京平原区地下水水位变化及与地面沉降的关系研究[J]. *地质学报*, 2025, **99**(5): 1792–1806. ZHAO Long, JIANG Xiaowei, LI Yumei, et al. Study on the relationship between groundwater level change and land subsidence in Beijing Plain in recent 10 years[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, **99**(5): 1792–1806. DOI: [10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023065](https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023065).
- [35] 胡莹洁, 孔祥斌, 张宝东. 30 年来北京市土地利用时空变化特征[J]. *中国农业大学学报*, 2018, **23**(11): 1–14. HU Yingjie, KONG Xiangbin, ZHANG Baodong. Temporal and spatial changes of land use in Beijing in the past 30 years[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, **23**(11): 1–14. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2018.11.01](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2018.11.01).