

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.023

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.023

崔欣然,张春来,李庆,等.京津风沙源治理工程区土壤有机碳密度分布特征[J].水土保持学报,2025,39(6):281-289.

CUI Xinran, ZHANG Chunlai, LI Qing, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon density in Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):281-289.

京津风沙源治理工程区土壤有机碳密度分布特征

崔欣然¹, 张春来¹, 李庆², 王雪松¹, 王廷军³

(1.地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室,防沙治沙教育部工程研究中心,北京师范大学地理科学学部,北京 100875; 2.河北省科学院地理科学研究所,石家庄 050011; 3.山西省杨树林局梁家油坊中心林场,山西 朔州 037200)

摘要: [目的] 评估京津风沙源治理工程区不同土地利用方式对土壤有机碳密度的影响,揭示其空间分异特征及主要驱动因素。[方法] 通过野外采样与实验室测定获取土壤有机碳数据,结合土地利用类型、气候因子、植被生产力及土壤质地等多源数据,采用统计分析方法探究有机碳密度的分布规律及其与环境因子的关系。[结果] 1)京津风沙源治理工程区不同土地利用条件下的土壤有机碳测定结果表明,平均有机碳密度为 4.03 kg/m²; 2)各治理区土壤有机碳密度差异显著,坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区土壤有机碳密度最高(6.54 kg/m²),鄂尔多斯高原沙化土地治理区最低(1.81 kg/m²); 3)林地、草地平均土壤有机碳密度分别为 6.77、5.55 kg/m²,显著低于全国平均水平;耕地有机碳密度为 1.71 kg/m²,高于全国平均水平; 4)以治理区为单位,土壤有机碳密度与植被净初级生产力及粉砂和黏粒含量呈显著正相关,与干燥度指数呈显著负相关。[结论] 各治理区内部,土壤有机碳密度同样受土地利用、土壤质地、气候和植被覆盖、沙地固定程度等因素的综合影响而存在不同程度的空间差异。退耕还林和人工造林等风沙源治理工程措施显著提升土壤碳汇能力,但工程效应受气候条件与土壤本底碳储量的制约。

关键词: 京津风沙源治理工程区; 土壤有机碳密度; 土地利用; 植被恢复

中图分类号: X171; X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0281-09

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Density in Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area

CUI Xinran¹, ZHANG Chunlai¹, LI Qing², WANG Xuesong¹, WANG Tingjun³

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-Sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 3.Liangjiayoufang Central Forest Farm of Yangshu Forest Bureau of Shanxi Province, Shuozhou, Shanxi 037200, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the effects of different land use types on soil organic carbon density in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area, and to reveal its spatial differentiation characteristics and main driving factors. [Methods] Soil organic carbon data were obtained through field sampling and laboratory measurements. Multi-source data, including land use types, climatic factors, vegetation productivity, and soil texture, were integrated to analyze the distribution patterns of soil organic carbon density and its relationship with environmental factors using statistical methods. [Results] 1) The measured soil organic carbon density under different land use conditions in the project area averaged 4.03 kg/m². 2) Significant differences in soil organic carbon density were observed among various control zones, with the highest density observed in the water conservation zones of the Bashang Plateau and hilly mountainous areas in the northern part of North China (6.54 kg/m²), and the lowest in the desertification control zones of the Ordos Plateau (1.81 kg/m²).

收稿日期: 2025-05-17

修回日期: 2025-06-14

录用日期: 2025-06-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-16

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305304)

第一作者: 崔欣然(2000—),女,硕士研究生,主要从事土壤风蚀研究。E-mail: cuixinran1017@163.com

通信作者: 张春来(1972—),男,博士,教授,主要从事风沙地貌、土壤风蚀研究。E-mail: clzhang@bnu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

3) The average soil organic carbon density of forestland and grassland was 6.77 kg/m^2 and 5.55 kg/m^2 , respectively, both significantly lower than the national average, while that of cropland was 1.71 kg/m^2 , higher than the national average. 4) At the control zone scale, soil organic carbon density was significantly positively correlated with vegetation net primary productivity and silt and clay contents, and significantly negatively correlated with the aridity index. [Conclusion] Within each control zone, soil organic carbon density exhibits varying degrees of spatial heterogeneity due to the combined effects of land use, soil texture, climate, vegetation cover, and fixation degrees of sandy land. Sandstorm source control measures, such as the conversion of cropland to forest and afforestation, have significantly enhanced soil carbon sequestration capacity, though their effectiveness is constrained by climatic conditions and background soil carbon storage.

Keywords: Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project Area; soil organic carbon density; land use; vegetation restoration

Received: 2025-05-17

Revised: 2025-06-14

Accepted: 2025-06-20

Online(www.cnki.net): 2025-09-16

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,全球土壤有机碳库储量约为大气碳库的2~3倍^[1],因此土壤有机碳通过分解向大气释放的 CO_2 ,可对全球碳循环碳平衡和气候变化产生重要影响^[2]。同时,土壤有机碳作为衡量土壤质量和生态功能的重要指标,其储量和动态变化直接关系到土壤的肥力、保水能力及微生物活动等多个方面^[3]。土壤有机碳的增加通常与植被恢复、生物多样性增加和土壤质量改善相关,而其减少则可能与植被退化、土地退化和气候变化等不利因素相关^[4-5]。通过保护和恢复土壤碳库,可以提高生态系统的碳汇能力,减少温室气体排放,促进生态、经济和社会的可持续发展,因此土壤碳库的研究在土壤质量、作物产量、环境和气候变化领域具有重要作用,可以为农业、林业和草原等生态系统的可持续管理提供科学依据。

我国森林生态系统具有巨大的碳汇潜力。根据已有研究^[6],中国森林0~100 cm土层平均土壤有机碳密度为 $10.62\sim 14.49 \text{ kg/m}^2$ (以C计)。草原生态系统也是重要的碳库之一^[7],中国草地土壤碳密度平均值为 12.22 kg/m^2 (以C计),但不同草原类型间有机碳密度存在差异,高寒草甸草原土壤有机碳密度依次大于典型草原、森林草原和荒漠草原^[8]。植被恢复工程可以显著增加土壤有机碳储量^[9],如黄土高原的植被恢复工程^[10]。随着沙漠化防治和植被恢复工程的实施,沙漠土壤的碳库储量和碳密度也有所增加,MA等^[11]研究揭示干旱区绿洲农田土壤碳库在长期耕作措施下的变化模式。

京津风沙源治理工程区位于我国北方地区,气候类型多样,分布有森林、草原、湿地等生态系统,生物多样性丰富,是我国北方地区重要的生态屏障^[12],同时也是我国北方生态环境脆弱性的典型代表,其生态环境状况关系到京津等地区的生态安全和可持续发展。为遏制北京及周边地区土地沙化的趋势,

改善生态环境而实施的京津风沙源治理工程,是中国北方重要的生态修复项目,迄今已经取得显著的生态效益^[12-13],土壤有机碳水平也有不同程度的提升。植被恢复^[5]、土地利用变化^[14]和土壤管理措施^[15]是土壤有机碳密度提升的主要原因。

土壤有机碳是连接土壤健康、生态服务功能与全球气候变化的关键纽带。本文通过京津风沙源核心治理区域不同土地利用类型土壤样品的系统采集和有机碳测定,基于土壤有机碳密度的空间分布特征,探讨土地利用变化和风沙源治理工程对土壤有机碳库的影响,为客观认识京津风沙源治理工程生态环境效应提供更多数据支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与研究方法

京津风沙源治理工程区属于温带大陆性季风气候,跨半干旱区和半湿润区,年降水量由西北向东南趋于减少^[12]。区内地貌类型包括高原、平原、山地丘陵,土壤类型主要有黑钙土、栗钙土、风沙土等。植被类型多样,主要建群种包括落叶栎类及小 叶落叶树种^[16],人工林以油松林(*Pinus tabulaeformis* Carrière)和华北落叶松林(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilger)为主,灌木主要为柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和山杏(*Prunus sibirica* L.)等。

野外调查及样品采集于2023年7月完成。按照京津风沙源治理工程区域划分^[17],采样点分布于鄂尔多斯高原沙化土地治理区(32个样点)、乌兰察布高原退化荒漠草原治理区(21个样点)、坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区(14个样点)、浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区(16个样点)、锡林郭勒高原-乌珠穆沁盆地退化草原治理区(8个样点)(图1)。样点选择尽量照顾到各治理区不同土地利用类型,包

括耕地、草地、退耕还林地、人工林地和沙地,其中,沙地包含流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙

地。土壤样品分层采集,采集深度依次为 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~1.0 m。

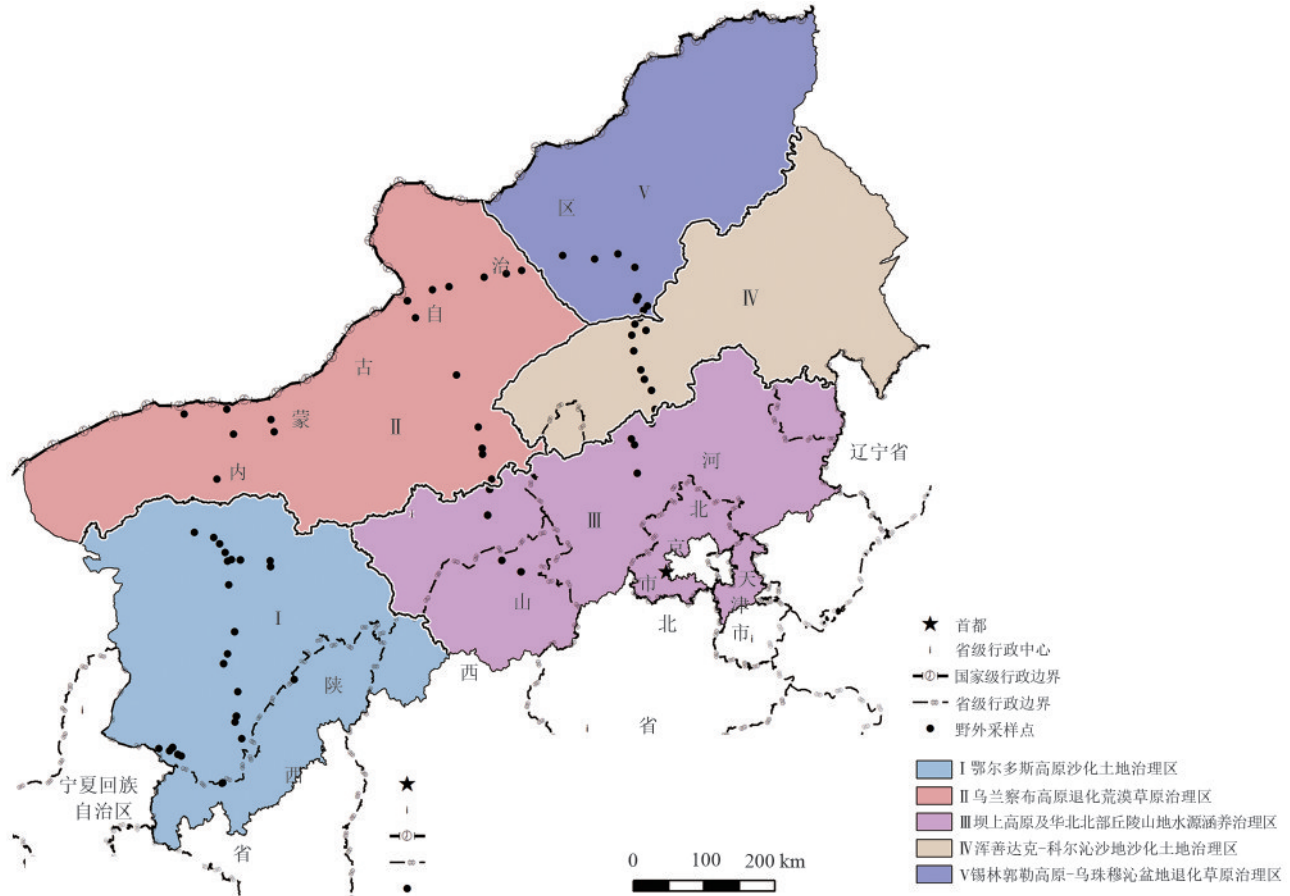


图 1 京津风沙源治理工程区范围、分区及样点分布

Fig. 1 Scope, zones, and sampling site distribution of Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

1.2 样品测试

土壤样品测试指标包括土壤体积质量、土壤全碳含量、碳酸钙含量和土壤粒度组成。样品自然风干,并去除草根、动物粪便等杂质,将同一采样点的平行样品混合均匀后分为 3 份,分别用于测试土壤全碳含量、碳酸钙含量和土壤粒度组成。样品测试在北京师范大学地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室的室内分析测试中心完成。

1) 土壤体积质量

土壤体积质量测试采用烘干法。将自然状态的土壤用环刀取回保持土壤原始结构,利用烘箱进行烘干,烘箱温度设置为 105 °C,时间为 24 h。烘干后计算其体积质量,计算方法为:

$$\rho_b = \frac{m}{V_t} \quad (1)$$

式中: ρ_b 为土壤体积质量, kg/m^3 ; m 为干燥土壤质量, kg ; V_t 为土壤总体积, m^3 。

2) 土壤全碳质量分数

土壤全碳质量分数(TC, %)测定采用碳氮分析仪,通过燃烧法在燃烧温度 1 030 °C 下 5~7 min 内完成测

定^[18]。对自然风干的样品进行植物残体去除后,使用研钵将其研磨至 $<0.15 \text{ mm}$,称取 250 mg 样品,用镊子将其包裹成圆球状依次编号待测。用 8 个质量不同的标准样 EDTA 建立标准曲线, $R^2 > 0.999$ 。每测试 10 个样品,测试 1 个标准样 EDTA 以确保测试结果的准确性。

3) 碳酸钙质量分数

利用气量法(LY/T 1250—1999)^[19]测定土壤碳酸钙质量分数。用 5 组不同质量的标准碳酸钙试剂与 10% 的盐酸反应后产生的二氧化碳体积绘制标准曲线,拟合回归方程。将用于测试碳酸钙质量分数的土壤样品进行研磨至 $<0.25 \text{ mm}$,称取适量土壤样品,根据其于稀盐酸反应产生的二氧化碳的体积,通过回归方程计算土壤中的碳酸钙质量分数,继而根据碳原子的相对质量(占碳酸钙的 12%)计算土壤无机碳质量分数(SIC, %)。计算公式为:

$$\text{CaCO}_3 = V_0 \times k \quad (2)$$

$$\text{SIC} = \text{CaCO}_3 \times 0.12 \quad (3)$$

式中: V_0 为样品产生二氧化碳体积, m^3 ; k 为由标准的碳酸钙系列拟合回归方程得到的系数,即产生单位体积二氧化碳的碳酸钙质量。

4) 粒度组成

利用筛分法和激光粒度分析法^[20]测定土壤粒度组成。样品自然风干、剔除杂质后首先使用孔径大小分别为 10、5、2 mm 的圆孔标准筛进行筛分称重,然后利用激光粒度仪对 <2 mm 的样品进行测定,每个样品重复测量 3 次取平均值。采用伍登-温特华斯(Udden-Wentworth)粒级划分方法^[21-22],分别计算黏粒(<0.004 mm)、粉砂(0.004~0.063 mm)、砂粒(0.063~2 mm)的占比。最后将筛分法和激光粒度分析法得到的结果进行合并,得到土壤样品完整的粒径分布结果。

1.3 数据分析

土壤有机碳质量分数(SOC,%)及有机碳密度(SOCD,kg/m²),计算公式为:

$$\text{SOC} = \text{TC} - \text{SIC} \quad (4)$$

$$\text{SOCD} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^5 \text{SOC}_i \times h_i \times \text{BD}_i \quad (5)$$

式中:TC为土壤全碳质量分数,%;SIC为无机碳质量分数,%;SOC_i为第*i*层土壤的有机碳质量分数,%;h_i为第*i*层的土层厚度,m;BD_i为第*i*层的土壤体积质量,kg/m³。

地表干燥度指数(AI)等于潜在蒸散量与降水量的比值。降水数据选用中国 1 km 分辨率逐年平均气温降水量数据集(1901—2023年),数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心^[23],潜在蒸散量来源于 MOD16A2GF 数据产品。

采用多因素方差分析(Multi-way ANOVA)检验

京津风沙源各治理区及不同土地利用、不同固定程度沙丘的土壤有机碳密度的差异。采用相关分析法检验京津风沙源各治理区土壤有机碳密度与气温、降水量、粉砂黏粒占比等影响因素的相关性大小。采用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行数据统计分析,采用 Origin 2021 及 ArcMap 10.8.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳质量分数的剖面分布特征

不同土地利用方式下 SOC 均随土层深度增加呈减小趋势(图 2)。其中,耕地 0~20 cm 耕作层内 SOC 基本均匀,耕作层以下逐渐减小。天然草地表层土壤 SOC 较高,0~40 cm 土层内显著下降,40~100 cm 土层内递减速率降低。乌兰察布高原退化荒漠草原治理区(II)草地土壤有机碳质量分数各层均处于低量水平,与沙地类似。林地中,退耕还林地在生态恢复初期表现出表层碳快速累积的特征,坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区(III)0~10 cm 土层内 SOC 高达 1.22%,深层 SOC 迅速降低,表明植被恢复对表层土壤有机碳库意义重大,对深层土壤有机碳库的影响尚未体现。浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区(IV)人工林地 SOC 随土层深度增大而降低的速度显著小于其他治理区的人工林地和退耕还林地。同处浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区和锡林郭勒高原-乌珠穆沁盆地(V)退化草原治理区的流动-半流动沙地 SOC 显著小于草地且随土层深度增大而降低的趋势不明显。

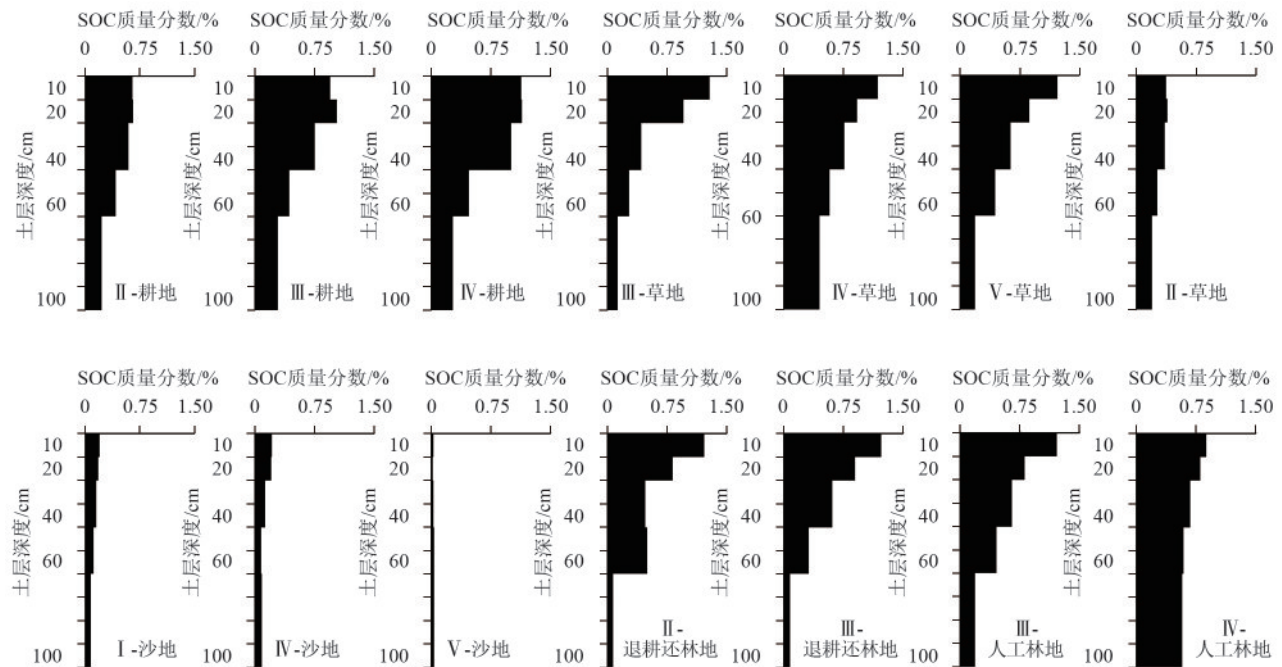


图 2 土壤有机碳质量分数的剖面分布

Fig. 2 Profile distribution of soil organic carbon mass fraction

2.2 土壤有机碳密度的空间差异

2.2.1 各治理区之间的差异 总体来看,京津风沙源治理工程区 SOCD 由西向东呈逐渐增大趋势,自南向北变化趋势不明显(图 3)。根据单因素方差分析,京津风沙源各治理区之间 SOCD 差异显著($p < 0.05$)。其中,坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区平均 SOCD 最高(6.54 kg/m^2),

主要受益于多样化且高碳汇的土地利用类型,如耕地和人工林地,平均 SOCD 分别为 7.46 、 6.70 kg/m^2 。其较高的 SOCD 主要得益于较高的有机质投入(如作物残茬、根系分泌物、有机肥施用)和相对精细的耕作管理(如秸秆还田),而人工林则通过大量的凋落物与根系增加土壤有机质含量。

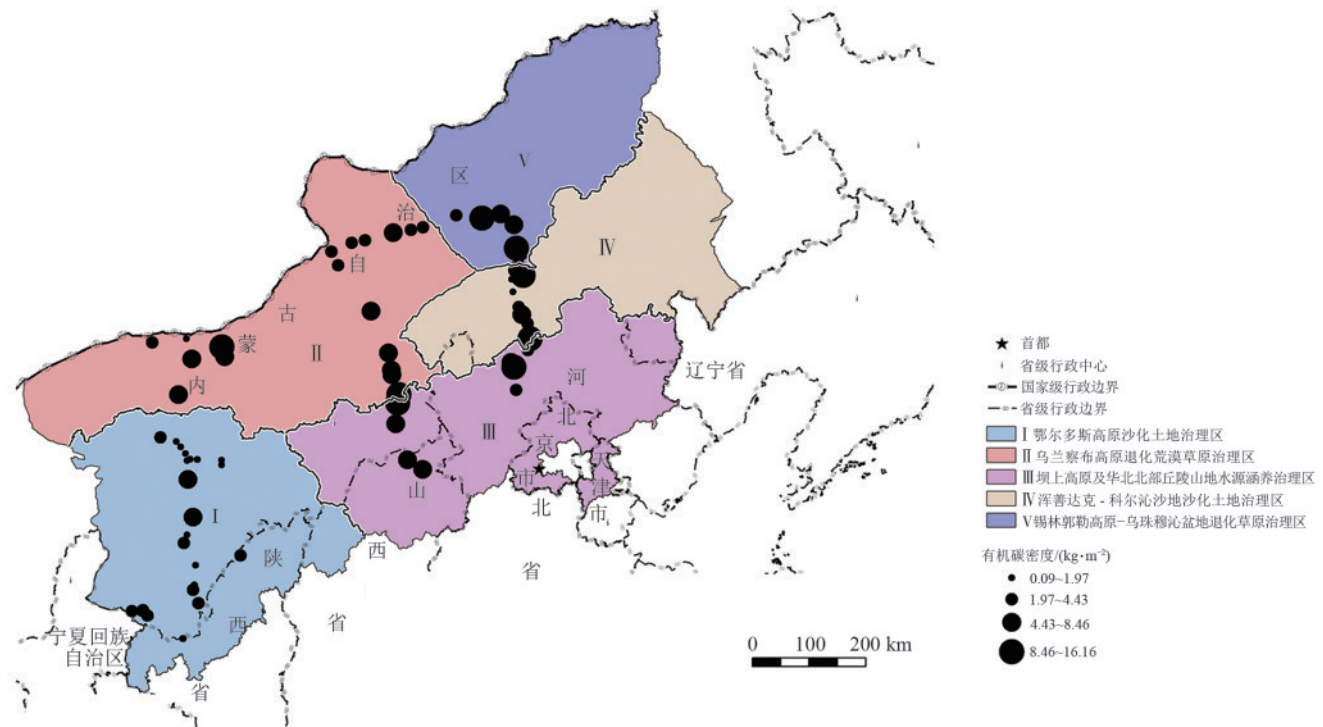


图 3 土壤有机碳密度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil organic carbon density

乌兰察布高原退化荒漠草原治理区平均 SOCD 为 5.03 kg/m^2 ,该治理区以草地为主(草地平均 SOCD 为 4.64 kg/m^2),未退化的草地 SOCD 主要依赖于密集且持续更新的地下根系网络(贡献大量有机质)和较低频率的土壤扰动。但部分退化/沙化区域 SOCD 急剧下降(仅为 0.33 kg/m^2),草地植被覆盖度极低,地上生物量和地下根系输入大幅减少,土壤物理结构破坏(如结皮丧失、风蚀加剧),导致原有有机碳暴露、分解加速或被风蚀带走。因荒漠化导致土壤碳流失,SOCD 仅为 0.33 kg/m^2 。浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区与锡林郭勒高原-乌珠穆沁盆地退化草原治理区平均 SOCD 水平相近,分别为 4.64 、 4.61 kg/m^2 ,其中流动-半流动沙地决定土壤碳密度的下限,但沙地植被修复工程提升土壤有机碳密度水平。鄂尔多斯高原沙化土地 SOCD 整体最低,平均仅为 1.81 kg/m^2 。尽管有治理措施,但该区沙化程度高、范围广,严酷环境基础上植被恢复难度大、速度慢,导致土壤有机碳的输

人和积累过程非常缓慢,SOCD 水平远低于其他治理区。稀疏植被下的草地也因水分胁迫和退化,其碳汇功能受到严重限制。

土壤有机碳密度的区域差异受多重因素影响。以治理区为单位,各治理区平均土壤有机碳密度和地表干燥度指数之间的相关分析(图 4)表明,除乌兰察布高原退化荒漠草原治理区外($\text{SOCD}=5.03$, $\text{AI}=7.6$),其余 4 个治理区平均土壤有机碳密度和地表干燥度指数呈显著负相关($r = -0.346$, $p < 0.05$)。乌兰察布高原退化荒漠草原治理区(年降水量 $145 \sim 329 \text{ mm}$)SOCD 变化幅度极大($0.33 \sim 8.82 \text{ kg/m}^2$),干旱及重度放牧导致原生植被(如针茅、柠条锦鸡儿)退化,地表覆盖度降低,凋落物输入减少,风蚀加剧,表层有机碳大量流失(图 2)。在重度退化后,土壤粗粒化、结皮发育,气候调节微生物的代谢活动,从而控制土壤有机碳存储模式^[24]。因此尽管系统生产力低下,但历史碳遗产可能部分保留,区域整体有机碳密度水平较高。

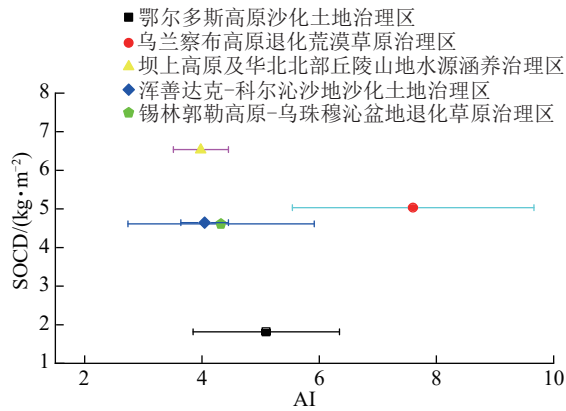


图 4 土壤有机碳密度与地表干燥度指数之间的关系
Fig. 4 Relationship between soil organic carbon density and aridity index

土壤有机碳密度与粉砂和黏粒含量之间存在显著的正相关($r=0.798, p<0.01$)(图 5)。粉砂和黏粒颗粒细小,比表面积大,能够吸附更多有机质;同时,细颗粒土壤透气性较低,利于减缓有机质分解,促进碳积累。以治理区为单位,各治理区平均 SOCD 与平均粉砂和黏粒占比之间同样呈显著正相关($r=0.456\sim 0.902, p<0.01$)。其中,区域 SOCD 最高的坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区,其粉砂和黏粒平均占比高达 47.5%;SOCD 最低的鄂尔多斯高原沙化土地治理区土壤粉砂和黏粒平均占比只有 10.8%。

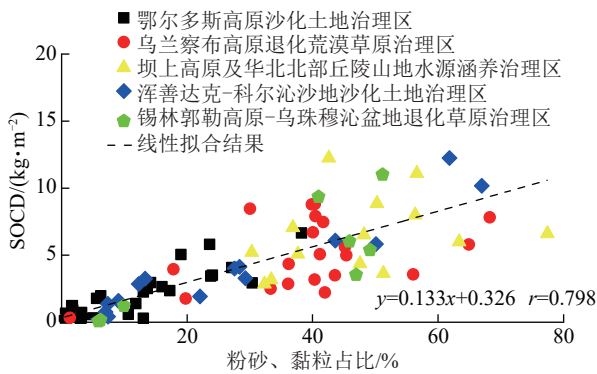


图 5 土壤有机碳密度与粉砂和黏粒含量的关系
Fig. 5 Relationship between soil organic carbon density and silt and clay contents

基于 2022 年平均植被净初级生产力(NPP)^[25],以治理区为单位,计算各治理区平均 NPP,并与 SOCD 进行相关分析。结果表明,二者皮尔逊相关性为 0.475,呈显著正相关($p<0.05$)(图 6)。在各治理区内部,鄂尔多斯高原沙化土地治理区($r=0.574, p<0.05$)、浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区($r=0.649, p<0.05$)SOCD 均与植被 NPP 呈显著正相关,其中浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区相关性最强。说明在这些生态脆弱区,植被生产力的提升与土壤有机碳积累呈现协同效应。而在乌兰察布

高原退化荒漠草原治理区($r=0.38, p=0.09$)、坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区($r=-0.21, p=0.47$)及锡林郭勒高原-乌珠穆沁盆地退化草原治理区($r=0.33, p=0.43$),NPP 与土壤有机碳之间的相关性不显著。

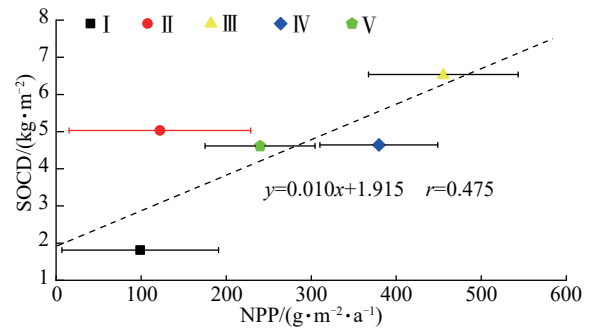
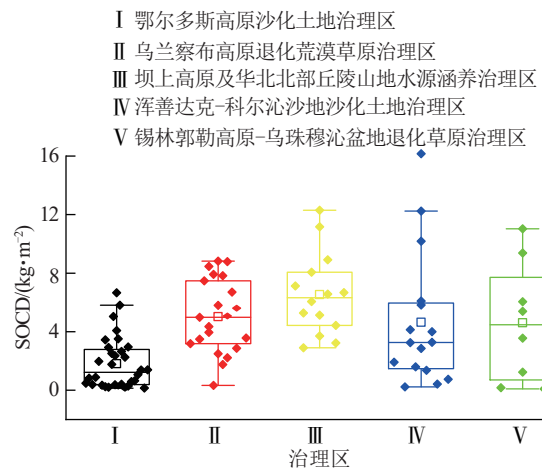


图 6 土壤有机碳密度与植被净初级生产力关系
Fig. 6 Relationship between soil organic carbon density and vegetation net primary productivity

2.2.2 各治理区土壤有机碳密度的不均匀性 各治理区内部土壤有机碳密度均有较大的不均匀性,标准差为 1.76~4.56 kg/m²(图 7)。其中,浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区内部 SOCD 变化幅度最大(标准差为 4.56 kg/m²);鄂尔多斯高原沙化土地治理区虽包含沙化农田、流动沙丘及固定沙地,但碳密度标准差较小(1.76 kg/m²)。



注:图中箱体上下底表示数据 25%~75%;框体内直线为中位数;空心正方形图例为平均值;上下边缘为最大值和最小值;实心图例为数据分布。

图 7 各治理区土壤有机碳密度箱线图
Fig. 7 Boxplot of soil organic carbon density in each control zone

治理区内 SOCD 的不均匀性,是土地利用格局、土壤质地、气候和植被覆盖等因素共同作用的结果。以采样点包含的土地利用类型相对丰富的乌兰察布高原退化荒漠草原治理区(II)、坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区(III)和浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区(IV)为例,耕地和林地 SOCD

相对较高,但两类土地之间的差异未达显著水平($p>0.05$);乌兰察布高原退化荒漠草原治理区和坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区草地SOCD明显低于耕地和林地,浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区草地SOCD略高于耕地和林地,沙地SOCD显著低于其他类型土地($p<0.01$)(图8)。数据变异性分析显示,林地和草地SOCD标准差较大(分别为 3.44 、 3.37 kg/m^2),反映环境异质性对碳积累的调控作用。沙地SOCD与固定程度有关,随沙丘固定程度变差而迅速减小,其中,固定沙地SOCD高达流动沙地SOCD的 12.9 倍(图9),表明植被恢复可显著提升沙化土地的固碳能力。沙地SOCD标准差随沙地固定程度增大而增大,说明对于有机碳背景含量极低的流动沙地而言,植被恢复和沙地固定过程中SOC积累受到植被以外其他因素的影响而增大SOCD的非均质性。

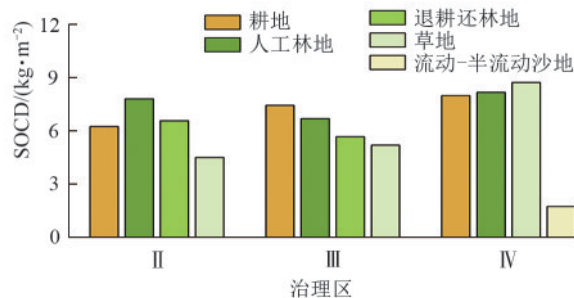


图8 不同土地利用方式下的土壤有机碳密度

Fig. 8 Soil organic carbon density under different land use types

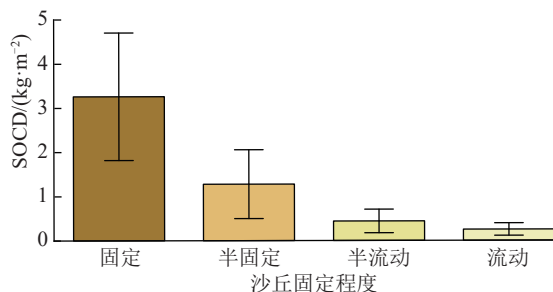


图9 不同固定程度沙丘的土壤有机碳密度

Fig. 9 Soil organic carbon density of sand dunes with different fixation degrees

3 讨论

京津风沙源治理区林地和草地的土壤有机碳密度显著低于全国平均水平。治理区林地平均SOCD (6.77 kg/m^2)仅为全国森林 $0\sim 100$ cm土层平均值($10.62\sim 14.49$ kg/m^2)的不到 60% ,草地SOCD(5.55 kg/m^2)不足全国草地平均值(12.22 kg/m^2)的 50% 。与我国农田SOCD普遍水平($0.83\sim 4.97$ kg/m^2)相比^[26],治理区耕地表现出较高的碳密度(7.31 kg/m^2)。沙地因粉砂黏粒占比极低(10.8%)、风蚀严重等本底劣势,SOC D

处于极低水平,闫蒙等^[27]研究发现,在科尔沁沙地沙漠化过程中,顶极植被群落的疏林草地SOC密度最高,为 2.15 kg/m^2 ,而发生极重度沙漠化的流动沙地SOC密度最低,仅为 0.34 kg/m^2 。

京津风沙源治理区土壤有机碳密度存在显著的空间异质性,坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区SOCD显著高于沙化治理区。其中,鄂尔多斯高原沙化土地治理区因历史时期强烈的风沙活动,土壤碳密度长期处于低水平,沙地土壤粉砂黏粒含量低(约为 10%)、结构松散,导致保水保肥能力差,有机碳易受风蚀与淋溶双重流失。流动沙丘碳密度仅为固定沙地的 7% ,尽管近年来治理工程减缓沙化进程,但本底碳贫瘠限制短期恢复效果。

风沙源治理工程通过植被恢复与土地利用优化提升区域碳汇能力。退耕还林与人工林地碳密度显著高于沙化土地,草本植被(如浑善达克沙地草地)因根系持续输入与低氧环境抑制分解,有机碳密度较高。然而,工程效应受气候条件与土壤性质的协同调控。HONG等^[28]研究指出,在碳贫瘠区(如毛乌素沙地),造林可通过凋落物输入促进表层碳积累;而在碳富集区,深层土壤有机质分解可能加速深层有机质分解抵消表层增益。SONG等^[29]通过干旱地区野外控制试验揭示,生态恢复既能够促进植物生长和生产力,提升区域碳封存,也可以通过降低裸露土壤比例和近地表风速来抑制土壤表面风蚀过程,从而减少沙尘排放及由此导致的土壤碳损失。

基于京津风沙源治理工程区土壤有机碳密度低、空间差异显著及工程效应受多重因素制约等特征,为持续提升区域生态系统服务功能、巩固扩大治理成果并实现土壤碳汇的长期稳定增长,应实施分区分类、精准施策的综合治理方案。具体而言,在沙化严重、SOC D极低区,优先采用灌草植被与工程固沙结合以强化风蚀控制与地表稳定;在中等SOC D退化区科学造林,注重乡土物种和混交模式,促进土壤碳积累;在较高SOC D区,保护现有碳库,优化森林经营和农田管理。同时,需加强土壤改良、水资源高效利用、风蚀防控及基于长期监测的适应性管理,促进区域生态恢复、风沙有效治理与土壤碳汇能力的协同提升。

4 结论

京津风沙源治理工程区内不同自然地理区域的土壤有机碳密度差异显著。坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区平均SOCD最高(6.54 kg/m^2),其次为乌兰察布高原退化荒漠草原治理区(5.03 kg/m^2),浑善达克-科尔沁沙地沙化土地治理区与锡林郭勒高

原-乌珠穆沁盆地退化草原治理区平均 SOCD 水平相近,分别为 4.64、4.61 kg/m²,鄂尔多斯高原沙化土地治理区 SOCD 整体最低(1.81 kg/m²)。土壤有机碳密度受气候和植被条件、土地利用方式和土壤性质等多种因素共同影响,与植被 NPP、粉砂和黏粒占比显著正相关,与干燥度呈显著负相关。京津风沙源治理工程通过植被恢复显著提升土壤碳汇能力。退耕还林与人工造林是治理区土壤碳库增加的主要途径。治理工程还通过抑制风蚀、增强凋落物与根系碳输入,实现区域碳库正向增益,但工程效应还受到气候条件和土壤性质的制约。

致谢:中国科学院西北生态环境资源研究院王洪涛副研究员,北京师范大学张晓宇、李文平、郑庆果,以及兰州大学白荔媛等同学参加了野外调查采样,特致谢忱。

参考文献:

- [1] LI J Q, PEI J M, PENDALL E, et al. Rising temperature may trigger deep soil carbon loss across forest ecosystems[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(19): e2001242.
- [2] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544.
- [3] 张维理, KOLBE H, 张认连.土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317-331.
ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317-331.
- [4] 高琳,张登山,龙怀玉,等.气候、植被及土壤因素交互作用对宁夏土壤有机碳的影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10081-10091.
GAO L, ZHANG D S, LONG H Y, et al. Interaction mechanism of climate, vegetation and soil factors on soil organic carbon at different soil depths in Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10081-10091.
- [5] 辜翔,张仕吉,刘兆丹,等.中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(5): 595-608.
GU X, ZHANG S J, LIU Z D, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon concentration and density in the mid-subtropical region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(5): 595-608.
- [6] 朱建华,田宇,李奇,等.中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3442-3457.
ZHU J H, TIAN Y, LI Q, et al. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3442-3457.
- [7] 查向浩,王玉洁,李有文,等.草地土壤碳密度研究进展[J]. *北方园艺*, 2019(9): 159-163.
ZHA X H, WANG Y J, LI Y W, et al. Research progress of grassland biomass[J]. *Northern Horticulture*, 2019(9): 159-163.
- [8] 辛晓平,丁蕾,程伟,等.北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2757-2768.
XIN X P, DING L, CHENG W, et al. Biomass carbon storage and its effect factors in steppe and agro-pastoral ecotones in northern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2757-2768.
- [9] 邓蕾,刘玉林,李继伟,等.植被恢复的土壤固碳效应:动态与驱动机制[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 1-10.
DENG L, LIU Y L, LI J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 1-10.
- [10] 杨阳,刘良旭,童永平,等.黄土高原植被恢复过程中土壤碳储量及影响因素研究进展[J]. *地球环境学报*, 2023, 14(6): 649-662.
YANG Y, LIU L X, TONG Y P, et al. Advances and driving factors in soil organic carbon storage during vegetation restoration in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2023, 14(6): 649-662.
- [11] MA D K, HE Z B, JU W L, et al. Long-term conventional cultivation after desert reclamation is not conducive to the improvement of soil carbon pool and nutrient stocks, a case study from northwest China[J]. *Geoderma*, 2024, 445: e116893.
- [12] 袁静芳,周海丽,张星烁,等.京津风沙源治理区植被固碳能力估算及归因分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(15): 6731-6743.
YUAN J F, ZHOU H L, ZHANG X S, et al. Estimation and attribution analysis of vegetation carbon sequestration capacity in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6731-6743.
- [13] 常璿予,武志涛,李琪,等.京津风沙源生态系统服务时空分布及冷热点分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 216-226.
CHANG J Y, WU Z T, LI Q, et al. Spatiotemporal distribution of ecosystem services and analysis of cold and hot spots in Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 216-226.
- [14] 陈朝,吕昌河,范兰,等.土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
CHEN Z, LÜ Changhe, FAN L, et al. Effects of land

- use change on soil organic carbon: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [15] 汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(3): 340-352.
- WANG Y, YANG D L, WANG L L, et al. Effects of farmland management measures on soil organic carbon turnover and microorganisms [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 340-352.
- [16] 赵晓萌, 程宏, 蒋宁, 等. 京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化[J]. *科学通报*, 2023, 68(增刊1): 238-253.
- ZHAO X M, CHENG H, JIANG N, et al. Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(S1): 238-253.
- [17] 京津风沙源治理工程二期规划思路研究项目组. 京津风沙源治理工程二期规划思路研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- Research Group on the Planning Approach for the Second Phase of the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project. Research on the planning concept for the second phase of the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.
- [18] 王亚婷. 元素分析仪同时测定土壤中的全氮和总碳[J]. *城市地质*, 2022, 17(2): 249-254.
- WANG Y T. Simultaneous Determination of total nitrogen and total carbon in soil by Elemental Analyzer [J]. *Urban Geology*, 2022, 17(2): 249-254.
- [19] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤碳酸钙的测定: LY/T 1250—1999[S]. 北京: 中国标准出版, 1999.
- Forestry Institute of the Chinese Academy of Forestry. Determination of calcium carbonate in forest soils: LY/T 1250—1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [20] 杨微, 陈丹丹. 马尔文MS3000激光衍射粒度仪测试结果稳定性影响因素分析[J]. *中华纸业*, 2023, 44(18): 26-28.
- YANG W, CHEN D D. Analysis of factors influencing the stability of test results from Malvern MS3000 Laser Diffraction Particle Size Analyzer [J]. *China Pulp and Paper*, 2023, 44(18): 26-28.
- [21] UDDEN J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1914, 25(1): 655-744.
- [22] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [23] 张凌, 胡英屹, 赵彦博, 等. 多源数据融合的中国高分辨多要素气象驱动产品[Z]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2025. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.NCDC.NIEER.DB6722.2025>.
- ZHANG L, HU Y Y, ZHAO Y B, et al. China high-resolution multi-element meteorological driving product based on multi-source data fusion [Z]. National Cryosphere Desert Data Center, 2025. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.NCDC.NIEER.DB6722.2025>.
- [24] BAI Y F, FRANCESCA COTRUFO M. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions [J]. *Science*, 2022, 377(6606): 603-608.
- [25] RUNNING S, ZHAO M. MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V061. 2021 [Z]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061>.
- [26] 李成, 王让会, 李兆哲, 等. 中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2432-2439.
- LI C, WANG R H, LI Z Z, et al. Spatial differentiation of soil organic carbon density and influencing factors in typical croplands of China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2432-2439.
- [27] 闫蒙, 王旭洋, 周立业, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳含量变化特征及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 221-231.
- YAN M, WANG X Y, ZHOU L Y, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the process of desertification in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5): 221-231.
- [28] HONG S B, YIN G D, PIAO S L, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 694-700.
- [29] SONG J, WAN S Q, ZHANG K S, et al. Ecological restoration enhances dryland carbon stock by reducing surface soil carbon loss due to wind erosion [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(46): e2416281121.