

# 咸海及周边区域风蚀模量数据集（1990–2020）研发

余瑶<sup>1</sup>, 姚峰<sup>2\*</sup>, 李昌俊<sup>1</sup>

- 中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生态与资源科学数据中心, 乌鲁木齐 830011;
- 中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生态安全与可持续发展国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 咸海萎缩导致的生态危机是“一带一路”沿线面临的重大环境挑战, 其中土壤风蚀是引发盐尘暴与土地退化的关键过程。为系统揭示中亚咸海及周边区域土壤风蚀的长期演变规律, 本研究基于修订版风蚀方程 (RWEQ), 在 Google Earth Engine (GEE) 平台中融合多源地理空间数据, 构建了 1990–2020 年中亚咸海及周边区域风蚀模量年际数据集。数据集整合了 MODIS 植被指数数据、ESA-CCI 土地覆盖数据、SRTM 高程资料以及 ERA5-Land 再分析气象数据, 经统一坐标系、分辨率重建与时空一致性处理后, 生成空间分辨率为 1 km、时间跨度为 31 年的风蚀模量序列。数据分析表明, 咸海干涸湖床为区域风蚀的主要源区, 且自 2012 年起风蚀核心区呈现由湖床内部向外围扩展的显著趋势, 反映出侵蚀格局的动态演变特征。为验证数据集可靠性, 将模拟结果与咸海沙尘监测站 (2000–2005 年) 记录的粉尘通量实测数据、气溶胶光学厚度 (AOD) 进行对比, 从多源证据层面共同验证了本数据集在刻画咸海地区风蚀动态方面的可信度。本数据集可作为咸海地区土地退化评估、生态修复工程成效分析以及“绿色丝绸之路”生态安全研究的关键数据基础, 同时也可为地理学、生态学与水土保持科学等领域的研究与教学提供数据支撑。

**关键词:** 多源遥感; RWEQ 模型; 咸海; 年际变化; 中亚

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.01.10>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.01.10>

## 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.01.V1>.

## 1 前言

咸海位于亚欧大陆腹地, 曾是世界第四大湖泊, 其生态系统的剧变是 20 世纪以来最严重的环境灾难之一。自 1960 年代以来, 在气候变化与高强度人类活动的共同驱动下, 咸海流域水资源平衡被彻底打破, 湖体持续萎缩, 至 21 世纪初已丧失超过 90% 的水域面积<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2025-10-19; 修订日期: 2026-01-16; 出版日期: 2026-02-25

基金项目: 新疆维吾尔自治区科学技术厅 (2024E02030, PT2406)

\*通讯作者: 姚峰, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 干旱区生态安全与可持续发展国家重点实验室, yaofeng@ms.xjb.ac.cn

数据引用方式: [1] 余瑶, 姚峰, 李昌俊. 咸海及周边区域风蚀模量数据集 (1990–2020) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2026, 10(1): 74–82. <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.01.10>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.01.10>.

[2] 余瑶, 姚峰. 中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集 (1990–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.01.V1>.

伴随湖床的大规模裸露，区域地表反照率、蒸散格局及局地气候条件发生显著改变，进一步加剧了土地退化进程<sup>[3,4]</sup>。干涸湖底沉积物在风力作用下成为盐尘暴与沙尘暴的重要源区，释放的大量含盐粉尘随西风环流长距离输送，对中国西北地区的整体生态环境构成潜在威胁<sup>[3]</sup>。咸海生态危机<sup>[5-7]</sup>不仅是中亚地区的区域性挑战，也是影响“绿色丝绸之路经济带”生态安全格局的重大环境问题，受到中国与中亚各国的高度关注。

在此背景下，咸海地区已成为研究干旱区土地利用-水文-气候耦合作用及其生态响应的典型区域<sup>[8]</sup>。由于土壤风蚀是引发咸海生态危机的关键驱动过程，系统开展该区域风蚀动态监测与风险评估研究，对落实中国—中亚峰会关于“推动解决咸海生态危机”的倡议、共建中国—中亚命运共同体具有重要现实意义。为支持相关研究与决策，高分辨率、长时序的土壤风蚀数据成为迫切需求。目前，遥感与风蚀模型的结合已被广泛应用于区域尺度风蚀评估<sup>[9-11]</sup>，其中修订版风蚀方程（Revised Wind Erosion Equation, RWEQ）因其参数可获取性强、物理机制明确，在干旱半干旱地区表现出良好适用性<sup>[12]</sup>。然而，现有数据产品在咸海周边，仍存在时空分辨率不足或验证薄弱的问题<sup>[13]</sup>。

本数据集基于多源遥感与再分析资料，在 Google Earth Engine 平台实现 RWEQ 模型的区域化应用与长时序模拟，可用于分析咸海萎缩过程中土壤风蚀的时空分异规律<sup>[14]</sup>，识别风蚀热点与演变趋势，并为区域土地退化评估、生态工程效益监测<sup>[15]</sup>及“一带一路”生态安全协同治理提供关键数据支撑。

## 2 数据集元数据简介

《中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集（1990–2020）》<sup>[16]</sup>名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

## 3 数据采集及研发方法

本数据集集成了多源遥感、再分析与观测数据（表2），用于研究区域风蚀模量的计算与验证。

### 3.1 数据预处理

本数据集采用欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）发布的 ERA5-Land 再分析数据集<sup>1</sup>作为主要气象数据源。该数据集提供了空间分辨率为  $0.1^\circ$ （约 10 km）的逐小时近地表风速、温度及降水估算值。为提升风速数据的可靠性，我们引入美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）地面站涉及本研究区的日观测数据<sup>2</sup>，采用分位数映射法对 ERA5-Land 风速进行了系统性偏差校正。经验证，校正后的数据与实测值吻合度较高，决定系数（ $R^2$ ）超过 0.87。

<sup>1</sup> ERA5-Land. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=documentation>.

<sup>2</sup> NOAA 日观测数据. <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>.

表 1 《中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集（1990–2020）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集（1990–2020）
数据集短名	ASSR_WEMD_1990-2020
作者信息	余瑶，中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生态与资源科学数据中心，yuyao@ms.xjb.ac.cn 姚峰，中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生态安全与可持续发展国家重点实验室，yaofeng@ms.xjb.ac.cn
地理区域	咸海盆地（北纬 44°–47°、东经 58°–62°）
数据年代	1990–2020 年
时间分辨率	年
空间分辨率	1 km
数据格式	.tif
数据量	260 MB
数据集组成	中亚咸海及周边区域风蚀模量数据
基金项目	新疆维吾尔自治区科学技术厅（2024E02030，PT2406）
数据计算环境	Google Earth Engine
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[17]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

表 2 数据来源汇总

序号	数据类型	数据来源	数据内容	空间分辨率	时间范围
1	地面观测	NOAA	气象站数据（风速等）	–	1990–2023 年
2	气象数据	ECMWF ERA5-Land	风速、温度、降水、积雪深度	1 km	1990–2023 年
3	遥感	MODIS	地表温度、植被覆盖度、气溶胶光学厚度	1 km	1990–2023 年
4	土地覆盖数据	ESA CCI	全球土地覆盖数据	300 m	1990–2023 年
5	地形数据	SRTM	高程数据	30 m	–
6	土壤数据	HWSD	土壤特性（质地、有机质等）	1 km	–
7	野外采样	哈萨克斯坦咸海干涸湖床	土壤采样数据（29 个点位）	–	2018 年 6 月
8	粉尘/盐粒监测	咸海沙尘监测站	沙尘/盐分沉积数据	–	2000–2005 年

遥感数据集构成了空间分析的核心。本数据集采用中分辨率成像光谱仪（Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）数据提取 1-km 空间分辨率的归

一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 与地表温度 (Land Surface Temperature, LST)。植被指数来源于美国地质调查局/美国国家航空航天局 MOD13A2 产品<sup>3</sup>, 并通过 Z-score 标准化处理以降低传感器特异性偏差。土地覆盖数据获取自欧洲航天局气候变化倡议项目 300-m 分辨率数据集<sup>4</sup>, 采用众数重采样方法聚合至 1-km 分辨率。地形数据<sup>5</sup>通过 30-m 分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务获取, 采用均值重采样方法升尺度至 1 km 以匹配其他数据源。核心的 MODIS 数据均经过严格质量控制, 包括基于 QA 波段 (置信度阈值>90%) 的云掩膜处理, 并对 NDVI 等参数开展了时序一致性检验 (剔除偏离五年移动平均值 $\pm 3\sigma$  的异常值)。

为保障时序一致性与年际可比性, 所有数据集均统一重投影至 WGS 1984 地理坐标系, 并采用双线性插值法 (连续变量) 与最近邻法 (分类数据) 重采样至统一的 1-km 空间分辨率。针对 NDVI、AOD 及降水数据, 采用五年移动平均法进行时序平滑处理, 以有效抑制短期异常波动与传感器噪声的影响。

土壤属性信息提取自空间分辨率为 1 km 的世界和谐土壤数据库<sup>6</sup>, 包含土壤质地、有机质及碳酸钙含量等关键参数, 这些是计算 RWEQ 模型中土壤可蚀性因子的核心输入项。通过对 29 个野外采样点数据进行验证, 土壤参数误差严格控制在容许范围内 (质地 $\pm 5\%$ , 有机质 $\pm 0.5\%$ )。

### 3.2 修正风蚀方程模型 (RWEQ)

修正风蚀方程 (RWEQ) 是一个基于经验发展而来的风蚀估算模型。其核心机理在于综合模拟气候 (如风速、降水)、土壤 (如可蚀性成分含量) 及地表覆盖 (如植被、糙度) 等多要素对风蚀过程的共同影响, 现已成为量化干旱与半干旱地区土壤风蚀强度的常用工具<sup>[18–20]</sup>。

在本研究中, RWEQ 模型的关键输入参数来自遥感和气象数据集; 单位面积的风蚀速率计算如下:

$$Q_R = \frac{2z}{S^2} Q_{\max} \left(\frac{z}{S}\right)^2 \quad (1)$$

$$S = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (2)$$

$$Q_{\max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (3)$$

式中,  $Q_R$  为土壤侵蚀速率 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ ),  $Q_{\max}$  为最大土壤传输速率 ( $kg/m$ ),  $z$  为最大侵蚀发生的下风距离 (m)。模型假设最大风蚀发生在田地中点 ( $z \approx S/2$ ),  $S$  为地块长 (m),  $K'$  为地表粗糙度因子,  $WF$  为气候因子,  $EF$  为土壤可蚀性因子,  $SCF$  为土壤结皮因子,  $C$  为植被覆盖因子。

气候因子 ( $WF$ ) 的计算公式为:

<sup>3</sup> MOD13A2. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>.

<sup>4</sup> ESA CCI. <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>.

<sup>5</sup> SRTM. <https://dwtkns.com/srtm30m/>.

<sup>6</sup> HWSD. <https://gaez.fao.org/pages/hwsd>.

$$WF = \frac{SW \times SD \times \sum_{i=1}^N u_2(u_2 - u_1)^2 \times \frac{\rho}{g} \times N_d}{500} \quad (4)$$

式中,  $SW$  表示土壤湿度 (%),  $SD$  为积雪覆盖因子,  $u_2$  代表 2-m 高度处实测风速 (m/s),  $u_1$  是 2-m 高度的阈值风速 (假设为 5 m/s) ( $u_2 > u_1$ ),  $N$  为风速观测时段数,  $N_d$  指天数 (d),  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  表示重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

土壤可蚀性因子 ( $EF$ ) 与土壤结皮因子 ( $SCF$ ) 由以下公式给出:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31 + SA + 0.17 \times SI + 0.33 \times \frac{SA}{CL} - 2.59 \times OM - 0.95 \times CaCO_3}{100} \quad (5)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066 \times CL^2 + 0.021 \times OM^2} \quad (6)$$

式中,  $SA$ 、 $CL$  和  $SI$  分别代表砂土、黏土和粉土含量 (%),  $OM$  表示土壤有机质含量 (%), 而  $CaCO_3$  代表碳酸钙含量 (%). 植被覆盖因子 ( $C$ ) 针对 5 类土地覆盖类型 (森林、灌木地、草地、耕地和裸地) 进行计算, 公式如下:

$$C = e^{a_i(SC)} \quad (7)$$

式中,  $a_i$  为植被特定系数,  $SC$  表示基于 NDVI 得出的植被覆盖度 (%). 这些植被特定系数  $a_i$  引自 Fryrear<sup>[21]</sup> 针对干旱地区的研究, 取值分别为 0.153,5 (森林)、0.092,1 (灌木地)、0.151,1 (草地)、0.043,8 (耕地) 和 0.076,8 (裸地), 与研究区土地覆盖类型相符。

### 3.3 Google Earth Engine (GEE) 平台计算

本数据集采用谷歌地球引擎 (GEE) 作为计算平台, 其独特的云端架构有效解决了大范围风蚀模拟中的 3 大关键问题: 首先, 平台内置的并行计算能力支持对咸海地区 1990–2020 年共 31 年时序数据的高效处理; 其次, GEE 直接集成了多源地理空间数据 (包括 MODIS 地表反射率产品、ERA5-Land 气象再分析数据和 SRTM 高程数据), 实现了数据的无缝调用与统一管理; 第三, 其优化的空间分析功能在保持 1-km 分辨率像元级计算精度的同时, 确保了区域尺度模拟的可行性。基于 GEE 的集成化框架展现出卓越的计算效率, 完整生成 31 年风蚀模量年际空间数据集仅需 1 天时间, 为长时序、大范围风蚀模拟研究提供了关键技术支持。

本研究的技术流程如图 1 所示, 该计算框架包含 3 个主要步骤: 首先, 在数据预处理阶段, 气象数据 (ERA5、NOAA) 和土地覆盖数据 (MODIS、ESACCI) 被重采样至 1 km 分辨率以确保空间一致性, 并通过偏差校正技术修正风速数据以提高精度; 其次, 应用 RWEQ 模型方程计算 1990 至 2020 年间风蚀速率的时空分布; 最后, 利用优化后的模型模拟 1990–2020 年咸海流域月尺度土壤风蚀潜力, 生成连续时空序列数据集, 并利用模拟的侵蚀速率与沙尘通量观测数据及卫星反演的气溶胶光学厚度 (AOD) 数据进行验证和校准。

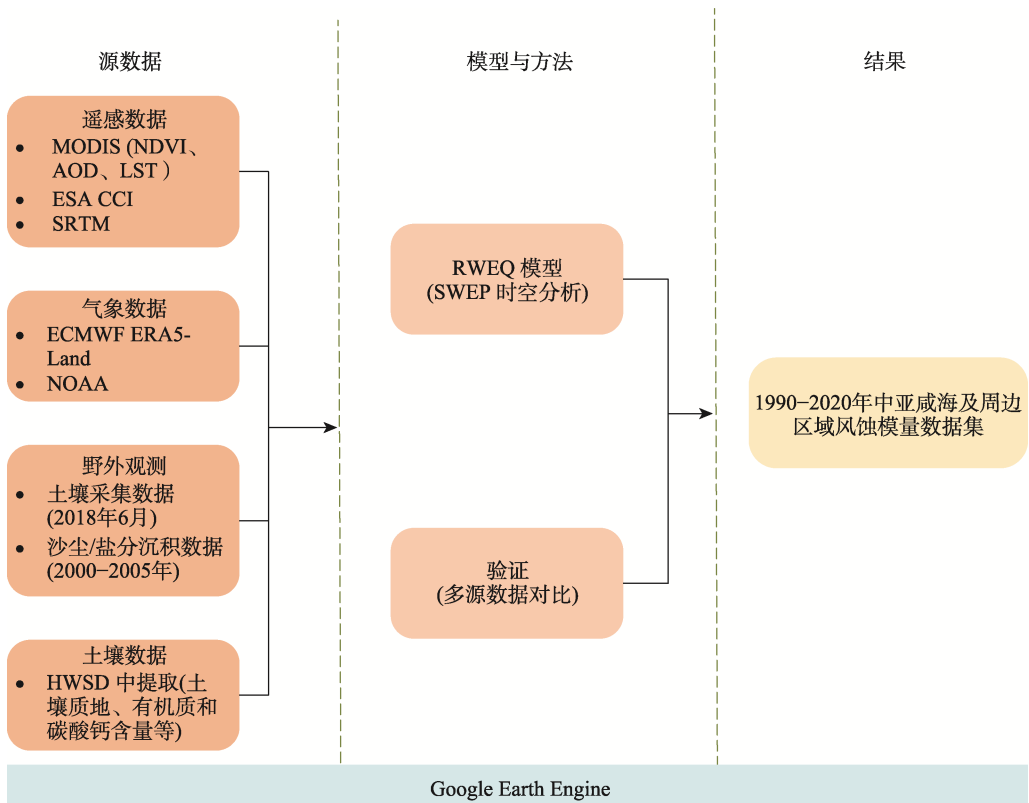


图 1 数据研发技术流程图

## 4 数据结果与验证

### 4.1 数据集组成

中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集包含 1990–2020 年共 31 期土壤风蚀模量空间数据，以.tif 格式存储，空间分辨率为 1 km，单位为  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{y}$ 。数据文件命名规则为：ASSR-WEMD-年份.tif，其中 ASSR 代表“中亚咸海及周边区域”，WEMD 为“土壤风蚀模量”，年份为四位数纪年。例如，ASSR-WEMD-2010.tif 表示 2010 年该区域的土壤风蚀模量栅格数据。

本数据集所有图层均采用统一的地理坐标系与像元大小，便于进行时序分析与空间建模。每个.tif 文件包含 1 个单波段浮点型栅格层，像元值即表示该位置的年均风蚀模量。为体现数据集的典型样本特征，选取以下 3 个代表性年份数据进行说明：（1）ASSR-WEMD-2005.tif，代表序列中风蚀模量最低的年份，反映早期至中期风蚀活动的减弱阶段；（2）ASSR-WEMD-2010.tif，反映风蚀模量发生显著跃升的关键转折年份；（3）ASSR-WEMD-2015.tif，对应整个时序中风蚀模量达到峰值的年份，标志侵蚀强度最高阶段。

### 4.2 数据结果

图 2 展示了 1990–2020 年共 31 个年度的风蚀模量空间分布。从整体年际变化来看，咸海盆地尤其是东部干涸湖床区域始终是侵蚀的核心区，且侵蚀强度总体呈加剧趋势。然

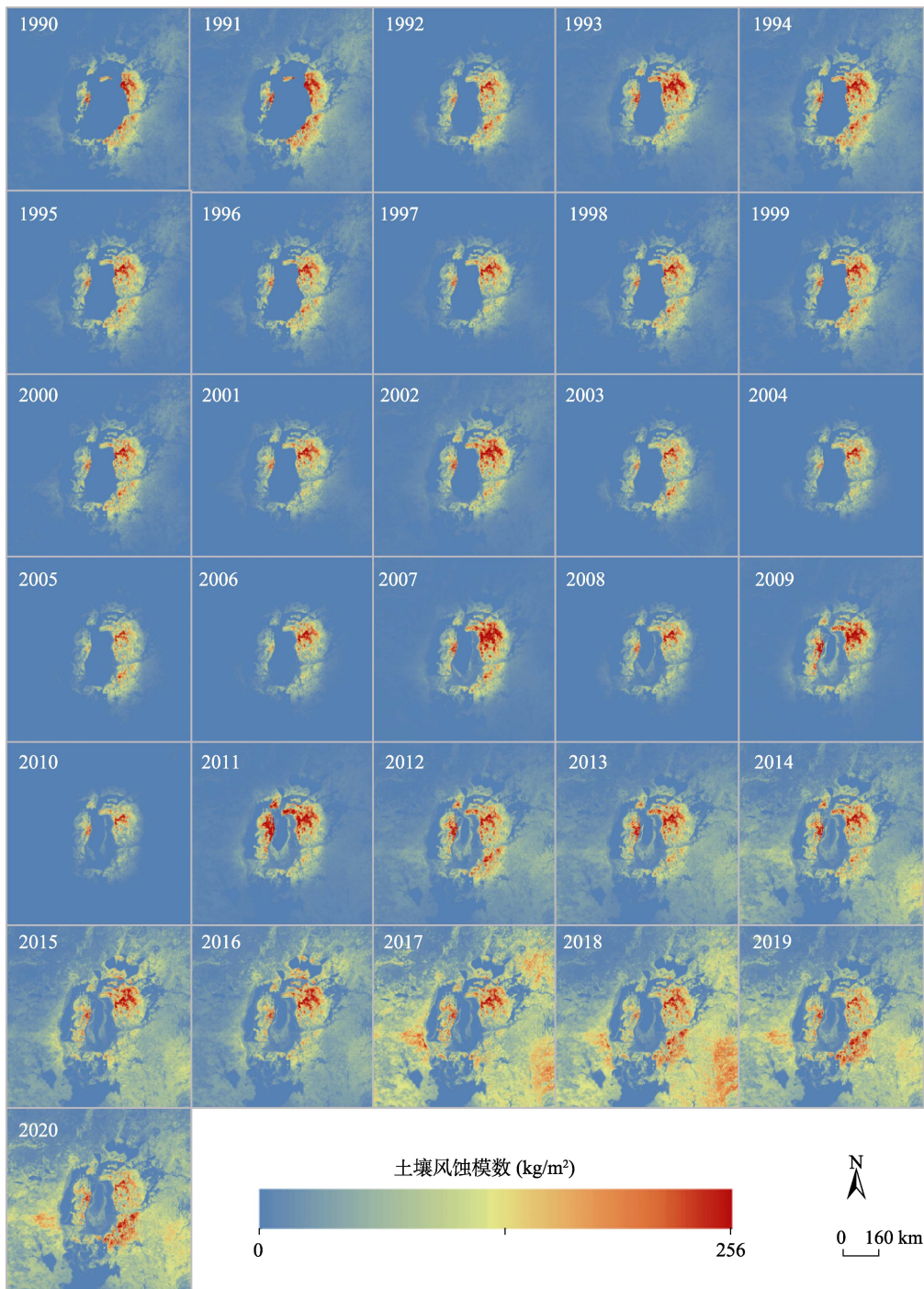


图 2 土壤风蚀模数年际空间分布图（1990–2020）

而，自 2012 年起出现了一个重要转变，即湖床内部的侵蚀有所减弱，而周边区域的侵蚀强度明显上升，这表明侵蚀范围正在扩大，且主导侵蚀源已从裸露的湖床中心逐渐迁移至植被退化、土壤脆化的湖岸带及毗邻区域。

在 1990–2020 年整个研究期间，全区土壤风蚀模数以年均  $0.33 \text{ kg/m}^2$  的速率显著递增，空间变异率介于  $-1.2$  至  $5.09 \text{ kg/m}^2$ 。其中，侵蚀剧烈加剧的区域（年增长率  $>1.8 \text{ kg/m}^2$ ）主要分布在以下 3 类地区：咸海中部新近干涸的湖床、克孜勒库姆沙漠的活跃沙区，以及西部高原的脆弱地表区。这些区域共同特征是地表物质松散、植被覆盖极低，因而对风力作用和环境变化响应最为敏感。与之形成鲜明对比的是，咸海北部残留水体周边及锡尔河、阿姆河下游三角洲的灌溉绿洲区，年变化率极低（ $<0.1 \text{ kg/m}^2$ ），这主要得益于水体或灌溉维持的较稳定植被覆盖，有效抑制了风蚀发展。

### 4.3 数据结果验证

为评估 1990–2020 年中亚咸海地区风蚀模量年际空间数据集的准确性与可靠性，本研究将模拟结果与咸海沙尘监测站（2000–2005 年）记录的粉尘通量实测数据进行对比验证，发现模拟风蚀强度空间格局与实地观测数据具有较高一致性。

首先，利用咸海地区监测站（2000–2005 年）记录的实测粉尘通量数据与对应位置的模拟风蚀模量进行对比分析，结果显示两者在空间格局上高度吻合，且具有强相关性（ $r=0.72, p<0.05$ ），表明模型能够可靠捕捉区域风蚀的时空变化特征。进一步，我们将模拟的年际风蚀模量与卫星反演的气溶胶光学厚度（AOD）数据进行区域关联分析，发现二者在年际尺度上亦呈高度显著相关（ $r=0.85, p<0.001$ ），这说明模拟结果不仅与地面观测一致，也与反映大气粉尘负载的遥感指标相吻合，从而从多源证据层面共同验证了本数据集在刻画咸海地区风蚀动态方面的准确性与可靠性。

## 5 讨论和总结

本数据集以.tif 格式存储，用户可在 ArcGIS、QGIS、ENVI、Google Earth Engine 等主流地理信息与遥感平台中直接读取，并进行可视化、空间查询、统计分析与制图输出。数据适用于咸海区域 1990–2020 年间土壤风蚀模数的年际变化趋势分析、空间格局演变识别及驱动机制研究，也可作为风蚀风险评估、土地退化监测和生态治理效果评价的基础数据。此外，本数据集支持作为模型输入数据用于未来风蚀情景模拟，为咸海生态修复与区域可持续发展决策提供科学依据。

本研究及未来工作存在以下可改进与深化之处：（1）模型与输入数据的优化，当前模型主要依赖卫星遥感与再分析数据驱动。未来可融合更高时空分辨率的遥感产品（如 Sentinel 系列数据）、增加实地观测的风速及土壤属性等关键参数，以进一步提升模型的模拟精度，尤其是在表征局部微地形与土壤异质性方面。（2）过程机理的精细化表征，现有框架主要基于修订版风蚀方程（RWEQ）进行年际尺度的模拟。未来可集成更复杂的风蚀过程模型，或耦合水文、植被动态模型，以更精细地刻画日/季节尺度风蚀事件、土壤湿度与冻融过程对风蚀的影响，以及植被动态与风蚀的反馈机制。（3）应用场景的拓展与决策支持，未来可将本数据集与区域气候模型、土地利用变化情景相结合，开展高分辨率的风蚀风险预测预警研究。同时，可探索将风蚀模量数据与生态系统服务评估模型、社会经济数据相集成，量化风蚀灾害的经济社会影响，从而为制定更具针对性的生态修复与适应性管理策略提供更强大的决策支持。

通过对上述方面的持续改进,有望进一步深化对咸海地区风蚀过程的理解,并为全球其他受风蚀威胁的干旱半干旱区提供更精准、更具前瞻性的评估工具与数据基础。

**作者分工:** 余瑶承担数据统计工作,并撰写了数据论文;姚峰对数据集的开发做了总体设计、数据质量控制和论文修改;李昌俊承担数据验证工作。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Micklin, P. The past, present, and future Aral Sea [J]. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2010, 15(3): 193–213.
- [2] Gaybullaev, B., Chen, S. C., Kuo, Y. M. Large-scale desiccation of the Aral Sea due to over-exploitation after 1960 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9: 538–546.
- [3] Indoitu, R., Orlovsky, N., Orlovsky, L. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea [J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 101–115.
- [4] Shibuo, Y., Jarsjö, J., Destouni, G. Hydrological responses to climate change and irrigation in the Aral Sea drainage basin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(21): L21406.
- [5] 何明珠, 高鑫, 赵振勇等. 咸海生态危机: 荒漠化趋势与生态恢复防控对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 130–140.
- [6] 邓铭江, 龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1363–1375.
- [7] Destouni, G., Jaramillo, F., Prieto, C. Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production [J]. *Nature Climate Change*, 2013(3): 213–217.
- [8] Kristopher, D. W. Nature-society linkages in the Aral Sea region [J]. *Journal of Eurasian Studies*, 2013, 4(1): 18–33.
- [9] 勒斯木初. 1980–2015年西北地区土壤风蚀评估与防风固沙服务流研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [10] Zhang, Q. Q., Gu, F., Zhang, S. C., et al. Spatiotemporal variation in wind erosion in Tarim River Basin from 2010 to 2018 [J]. *Land*, 2024, 13(3): 330.
- [11] Jiang, H. T., Gao, W. B., Liu, B. Y., et al. Quantifying soil wind erosion attribution in Inner Mongolia's desert grassland [J]. *Scientific Reports*, 2025(15): 14319.
- [12] Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21994–22001.
- [13] Jiang, L. L., Jiapaer, G., Bao, A. M., et al. Monitoring the long-term desertification process and assessing the relative roles of its drivers in Central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 195–208.
- [14] 林锦阔. 河西地区土壤侵蚀时空分异及其驱动因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [15] Li, J. Y., Yang, X. C., Jin, Y. X., et al. Monitoring and analysis of grassland desertification dynamics using Landsat images in Ningxia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 19–26.
- [16] 余瑶, 姚峰. 中亚咸海及周边区域风蚀模量数据集(1990–2020)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.01.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.01.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017年更新).
- [18] Evans, J., Geerken, R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535–554.
- [19] Chen, Z., Liu, J. Y., Hou, X. T., et al. Detection and attribution of greening and land degradation of dryland areas in China and America [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(10): 2688.
- [20] Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., et al. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 335–344.
- [21] Fryrear, D. W., Chen, W. N., Lester, C. Revised wind erosion equation [J]. *Annals of Arid Zone*, 2001, 40(3): 265–279.