蒋红军,王仁德,苑依笑,等.察汗淖尔干涸湖盆春季盐尘理化性质[J].中国沙漠,2026,46(5):20-30.

# 察汗淖尔干涸湖盆春季盐尘理化性质

蒋红军[1,2],王仁德[1,2],苑依笑[1,2],马艳梅[1,2,3],高士平[1,2],
李 庆[1,2],张 韬[1,2],刘瑞莹[1,2]

(1.河北省科学院 地理科学研究所/河北省地理信息开发应用技术创新中心,河北 石家庄 050011;2.生态环境部生态质量综合监测站 河北坝上农牧交错带站(草地),河北 承德 068462;3.河北师范大学 地理科学学院,河北 石家庄 050024)

**摘要**:察汗淖尔是坝上地区第二大内陆湖。近年来,该湖急剧萎缩,湖盆大面积干涸裸露,在冬春季强风作用下释放大量盐尘,由此引发的盐尘污染风险引发广泛关注。然而,目前对该湖淖释放盐尘的理化性质研究仍较为缺乏。为此,本研究通过3年的系统采样,采集了察汗淖尔干涸湖盆春季近地表风蚀物、风积物及原位表层土壤样品,分析其理化性质及空间变化规律,并探讨了盐尘与源区表层土壤之间的关系。结果表明:风蚀物与原位表层土壤在平均粒径、粒级组成、全盐含量及重金属(As、Cd、Cr、Pb)含量上高度一致,且空间变化趋势基本吻合,证实了盐尘的理化性质主要受原位土壤控制。相对于原位土壤,风蚀物与风积物的全盐含量略低,风积物的全盐含量在沿西北-东南方向(冬春季盛行风方向)的采集样线上表现出一定的"空间滞后性",反映了风蚀物在风力作用下的搬运过程。与普通沙尘相比,研究区的盐尘具有含盐量高、颗粒更细、重金属富集的特征,生态与健康风险较为突出,亟须加强源头的风险管控。

**关键词**:干涸湖泊;察汗淖尔;粒径;全盐含量;重金属

**文章编号**:1000-694X(2026)05-020-11 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00048

**中图分类号**:S15 **文献标志码**:A

## 0 引言

近几十年来,中国北方干旱半干旱区尾闾盐湖和积水洼地普遍呈现萎缩退化趋势,形成大面积干涸湖盆和盐碱滩地。地表松散的富盐沉积物在强风作用下释放大量含盐沙尘[1-3],这些盐尘富含可溶性盐、杀虫剂粉尘和多种重金属[4-5],不仅对局部环境和人类健康构成严重威胁[6-8],还对更广泛区域乃至全球生态环境和气候变化产生重要影响[9],引起了广泛关注。因此,深入解析盐尘理化性质,对科学评估其生态与健康风险,促进区域可持续发展具有重要意义。

围绕不同区域盐尘的理化性质,学界已开展了较多研究。当前普遍认为,相较于普通沙尘,盐尘具有以下三方面特征:一是盐分含量高,其中$Na^+$、$K^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$、$Cl^-$、$SO_4^{2-}$、$CO_3^{2-}$、$HCO_3^-$ 8种可溶性离子含量可达到10%~25%[2];二是化学成分复杂,除上述8种常见可溶性盐离子外,还包含As、Cd、Cr、Cu、Pb等有害重金属、类金属元素,以及杀虫剂等污染物[4,10-11];三是粉尘颗粒较细,其中小于10 μm的组分接近80%[12-13]。这些特征使盐尘与普通沙尘显著不同,并具有更大的危害性[13]。研究认为,盐尘的性质与其源头表层土壤特性密切相关[9,14-16]。但目前关于盐尘与原位土壤性质之间相互关系的研究相对较少,二者的定量关系仍不明确。此外,不同地区干涸湖盆表土性质差异显著,所产生盐尘的性质也各有不同,因而需要针对具体湖淖开展深入研究。

地处京津风沙源和北方农牧交错带核心区域

**收稿日期**:2026-02-04;**改回日期**:2026-03-20

**资助项目**:河北省科学院基本科研业务费制度试点项目(2026PF01);国家自然科学基金面上项目(42077069);承德国家可持续发展议程创新示范区建设科技项目(202302F006)

**作者简介**:蒋红军(1981—),男,河北易县人,博士,助理研究员,主要从事生物地理学与空间地理数据分析等研究。E-mail:jianghj@foxmail.com

**通信作者**:王仁德(E-mail:wangrende10@163.com)

的察汗淖尔，是坝上地区第二大内陆湖。其萎缩干涸后可能引发的盐碱尘暴风险备受关注[17-19]。因此，本文以察汗淖尔干涸湖盆为研究区，在前期对察汗淖尔表土性质[20]和风沙活动[21]进行研究的基础上，通过测定粒度特征、盐分含量和重金属含量等指标，综合分析盐尘理化性质及其时空变化规律。与已有研究相比，本文以近年来快速干涸的察汗淖尔为典型案例，综合分析风积物、风蚀物粒度特征、盐分含量与表层土壤之间的关系，探讨干涸盐湖盐尘的潜在释放特征，为科学认识坝上地区干涸盐湖盐尘形成机制及区域生态环境影响提供新的研究依据。

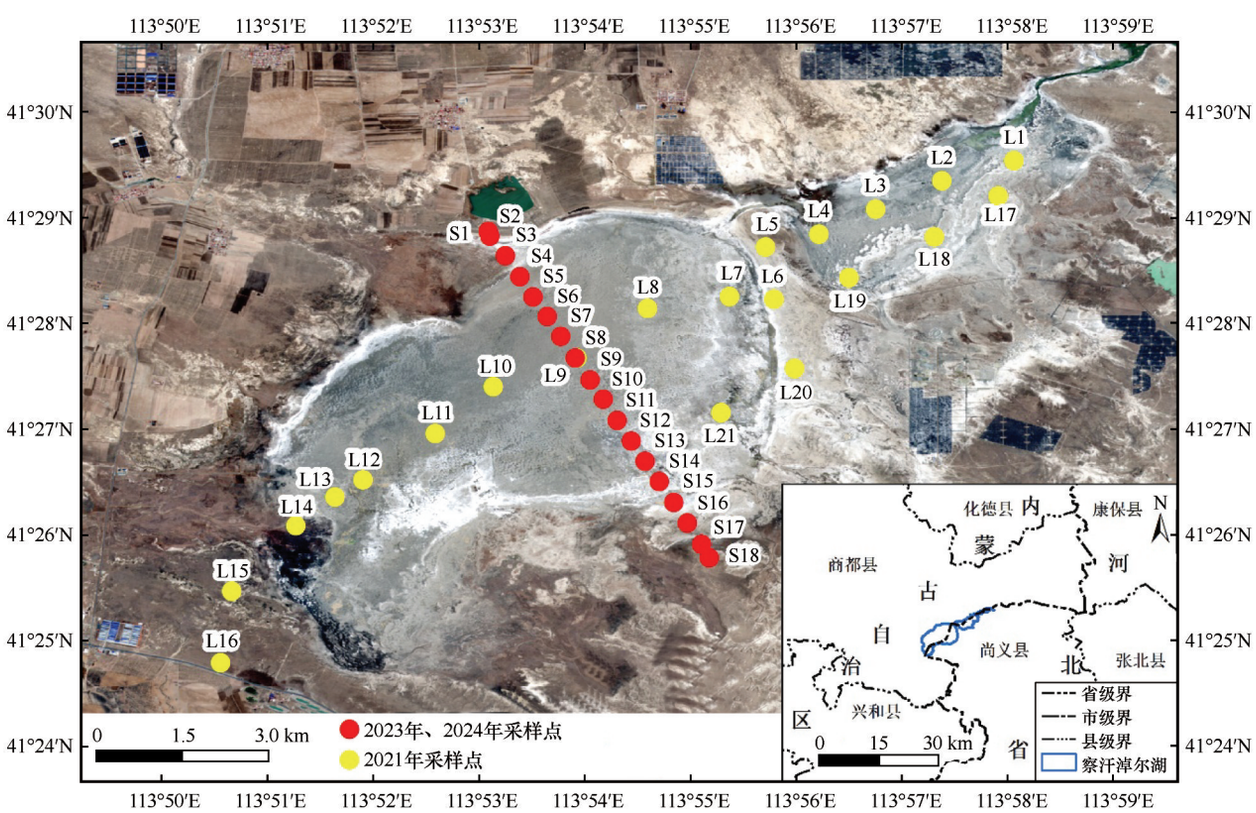
# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

察汗淖尔位于坝上高原西侧，地处河北省尚义县与内蒙古自治区商都县交界处，属典型的半干旱区内陆湖泊。湖区地势平坦，呈不规则浅碟状，东北到西南方向较长（图 1）。近 30 年来，丰水期水面面积最大可达 49.72 km$^2$[22]。自 2000 年以来，随着农灌面积扩大与地下水超采，地下水水位持续下降，湖面总体呈现萎缩态势。湖泊在枯水期大面积萎缩甚至完全干涸，干涸后的湖盆被松散富盐沉积物覆盖。每年冬春季节，盐尘随风而起，对下风向区域造成严重污染。

## 1.2　盐尘和土壤采集方法

2021—2024 年春季，本研究对察汗淖尔干涸湖盆的近地表盐尘和表层土壤进行了系统的调查与采样。鉴于察汗淖尔水面随流域降水量、蒸发量和用水量剧烈变化，岸线变化频繁。为便于样点布设和后期统计分析，根据历年遥感影像，将湖水很少到达的草地区域定义为岸区，将常年有水或季节性积水区域定义为湖区。其中，2021 年沿湖泊东北—西南方向（大致垂直于冬春季主导风向），布设采样点 21 个（图 1，L1~L13、L17~L19 位于湖区，L14~L16、L20 位于岸区），采样点间距约 1.5 km；2022 年未开展；2023 年与 2024 年，沿西北—东南方向（平行于冬春季主导风向）布设采样点 18 个（图 1，




注：Sentinel-2A 真彩色合成影像，拍摄日期：2024 年 4 月 24 日

图 1　察汗淖尔位置及采样点分布

Fig.1　Location of Chahannur lake and the sample sites（True-color composite image from Sentinel-2A，taken on April 24th，2024）

S1~S3、S16~S18位于岸区，S4~S14位于湖区），采样点间距约0.5 km。

各年份采用一致的观测方法，每个采样点布设3个集沙桶（JST），用于收集近地表风蚀沉积物（简称风积物）；1台Modified Wilson and Cooke集沙仪（MWAC）用于收集近地表风蚀物（简称风蚀物）。两种仪器设备沿与主导风向垂直的同一直线布设，间隔5.0 m（图2）。2021年，受仪器数量限制，MWAC仅布设于L1~L12和L14，其余点仅布设集沙桶。此外，在各观测点附近，采用十字采样法采集0~5 cm深度的表层土壤样品，每份样品质量约500 g。各年份仪器布设与样品采集的具体时间见表1。

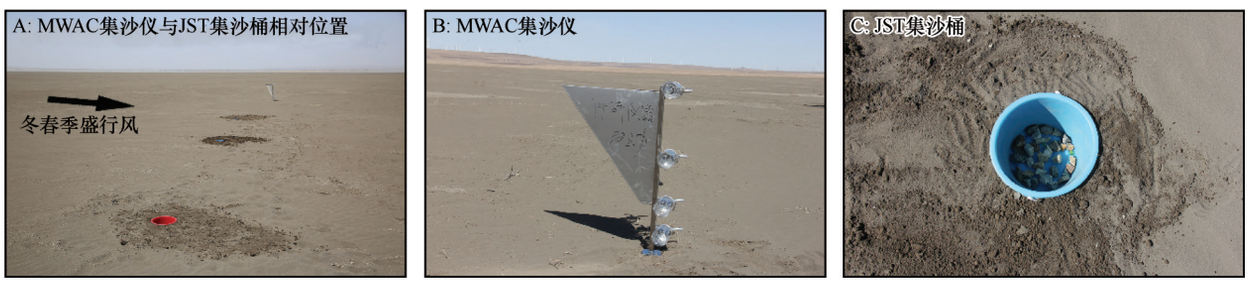



图2 盐尘收集仪器布设现场照片

Fig.2 Field setup of the salt dust sampling instruments

**表1 仪器布设及样品采集时间**

**Table 1 Schedule of instrument deployment and sample collection**

| 年份 | 仪器布设时间 | 采样日期 | 采样日期 | 采样日期 | 采样日期 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2021 | 4月24日 | 5月5日 | 5月21日 | | |
| 2023 | 3月31日 | 4月27日 | 5月15日 | | |
| 2024 | 3月22日 | 3月31日 | 4月13日 | 4月26日 | 5月13日 |

### 1.3 盐尘与土壤理化性质分析方法

为满足理化性质测试对样品数量、数据代表性及后续各年份、各采样点平均值计算等需求，本研究将同一年份、同一采样点采集的同类样品（风蚀物、风积物和土壤样品）进行归并处理。所有样品经自然晾干后，剔除石块、植物残体等杂质，过2.0 mm筛备用。采用激光-衍射湿法（马尔文3000激光粒度仪）测定样品粒级组成；使用Folk-Ward图解法计算粉尘平均粒径及相关粒度参数[23]；粒级含量按照Udden[24]和Wentworth[25]方法进行划分（<2 μm为黏粒；2~63 μm为粉砂；63~125 μm为极细砂；125~250 μm为细砂；250~500 μm为中砂；500~1 000 μm为粗砂；1 000~2 000 μm为极粗砂；≥2 000 μm为石砾）；采用质量法测定全盐含量；参照《LY/T 1251-1999森林土壤水溶性盐分分析》测定主要土壤水溶性盐离子$Na^+$、$K^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$、$Cl^-$、$SO_4^{2-}$、$HCO_3^-$、$CO_3^{2-}$；使用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）分析测定As、Cd、Cr、Cu、Pb等5种重金属含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐尘理化性质

#### 2.1.1 粒度组成特征

对3年采集的察汗淖尔风蚀物与风积物样品总体粒度组成特征分析表明，风蚀物的粒径8.31~21.44 μm，平均为13.13 μm；风积物的粒径9.81~80.61 μm，平均为25.45 μm（图3）。风蚀物各粒级组分中，粉砂的含量最高，平均为92.89%；其次为极细砂，平均为4.15%；再次为细砂，平均为1.64%；其他组分含量较少，均未超过1.00%。风积物各粒级组分中，依然是粉砂含量最高，平均为79.13%；极细砂次之，平均为11.30%；第三为细砂，平均为5.50%；第四为中砂，平均为2.88%；其他组分含量均未超过1.00%。与河西走廊东部青土湖的地表沙尘（粉砂占42.70%）相比，察汗淖尔近地表风蚀物和风积物的粉砂占比较高，与新疆艾比湖边缘监测点大气降尘（粉砂占63.91%~80.27%）相当[14,26]。

比较来看，风蚀物与风积物在平均粒径和粒级组成上具有明显差异（图3）。在平均粒径上，风蚀物更细，约为风积物的一半，二者在统计学上存在极显著差异（$P$<0.01）。各粒级组分间差异明显，风蚀物中黏粒、粉砂等小于63 μm的细颗粒组分体积分数高于风积物，其他较大颗粒的体积分数低于风积物。其中，黏粒、粉砂、极细砂、细砂和中砂存在极显著差异（$P$<0.01）。该结果表明，在风力筛选作

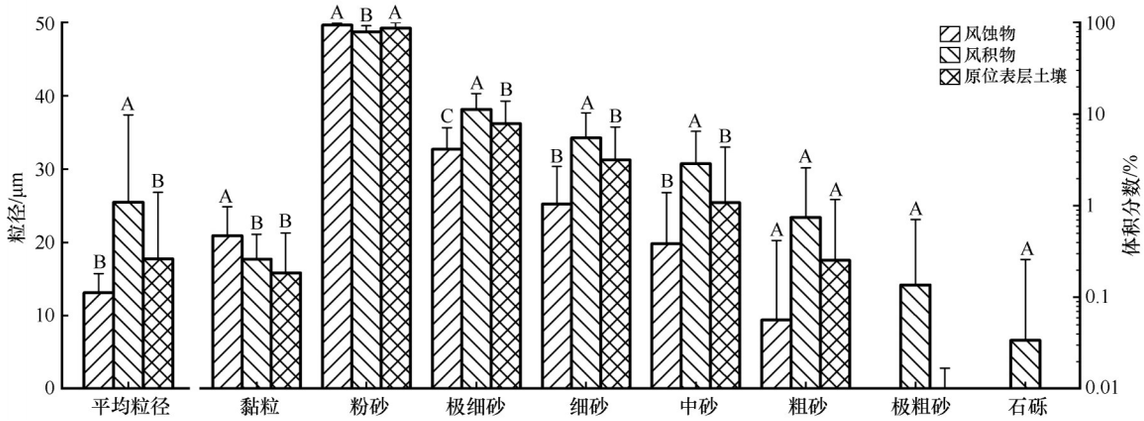



图3　察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘及原位表层土壤物理性质

Fig.3　Physical properties of near-surface salt dust and topsoil in the dry lakebed of Chahannur in spring

用下，粗颗粒沉积形成风积物，细颗粒则被扬起成为风蚀物，导致后者细颗粒含量明显更高。

与原位表层土壤（图3）相比，风蚀物的平均粒径略低，但在统计学上差异不显著（$P$>0.05）；在粒级组成上，风蚀物中黏粒的体积分数高于原位表层土壤（$P$<0.01），其余粒级大多无显著差异（$P$>0.05）。风积物的平均粒径高于原位表层土壤，达到极显著差异水平（$P$<0.01）；各粒级组分中，粉砂的体积分数低于原位表层土壤（$P$<0.01），极细砂、细砂和中砂的体积分数高于原位表层土壤（$P$<0.01），其余粒级无显著差异（$P$>0.05）。总体来看，三者的粒度组成均以粉砂为主。这表明，尽管风蚀物和风积物与原位表层土壤在具体组成上存在差异，但其粒度特征仍高度相似，证实了二者与原位物质的同源关系。

### 2.1.2　全盐含量特征

化学组分的分析结果显示，察汗淖尔干涸湖盆产生的风蚀物的全盐含量比风积物略低（图4），但在统计学上无显著差异（$P$>0.05）。其中，风蚀物的全盐含量 1.19~56.93 g·kg$^{-1}$，平均为 14.54 g·kg$^{-1}$；风积物的全盐含量在 5.36~64.10 g·kg$^{-1}$，平均为 17.68 g·kg$^{-1}$。风蚀物的全盐含量与邵梅等[27]在柴达木盆地和河西走廊的降尘观测结果（2.70~51.70 g·kg$^{-1}$）相当，风积物则略高，但二者远低于新疆艾比湖区域大气降尘的全盐含量（43.00~185.00 g·kg$^{-1}$）[14]。

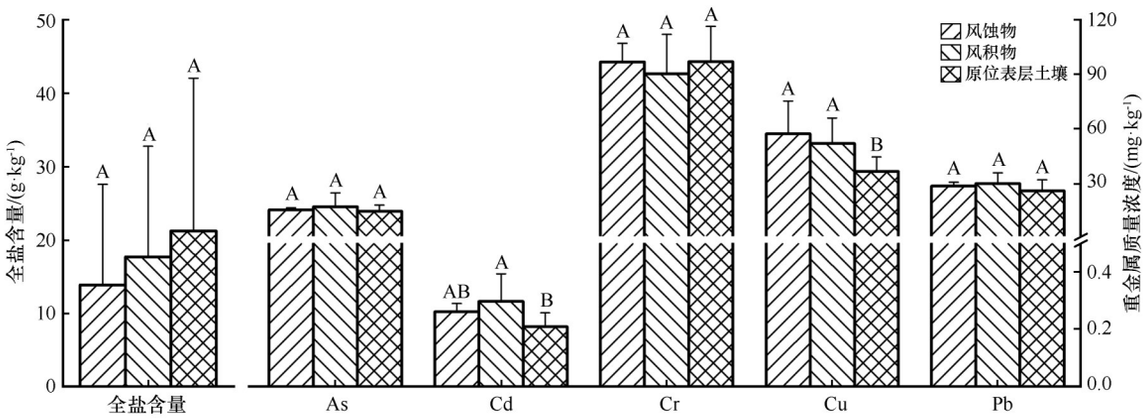



图4　察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘及原位表层土壤全盐含量和重金属含量

Fig.4　Total salt content and heavy metal content of near-surface salt dust and topsoil in the dry lakebed of Chahannur in spring

与原位表层土壤（全盐含量平均为21.18 g·kg$^{-1}$）相比，风蚀物和风积物的全盐含量均较低（图4），呈现原位表层土壤>风积物>风蚀物的递减趋势，但三者间在统计学上无显著差异（$P$>0.05）。该现象可能与风力对地表物质的选择性搬运有关。

### 2.1.3　重金属含量特征

对坝上地区污染风险较高的5种重金属含量的分析表明，风蚀物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb 的平均质量浓度分别为 15.62、0.26、96.58、57.26、28.68 mg·kg$^{-1}$；风积物中相应重金属的平均质量浓度分别为 17.29、

0.28、90.17、51.87、29.95 mg·kg$^{-1}$（图 4）。风蚀物与风积物 5 种重金属含量无显著差异（$P$>0.05）。参考河北省土壤化学元素的背景值与基准值[28]，察汗淖尔干涸湖盆近地表风蚀物和风积物的重金属含量已经超过张家口地区土壤背景值，富集程度略高。

与原位表层土壤相比，风蚀物和风积物中重金属含量的差异不尽相同（图 4）。其中，风蚀物与原位表层土壤中 As、Cd、Cr 和 Pb 的含量无显著性差异（$P$>0.05），Cu 的含量高于原位表层土壤（$P$<0.01）。风积物与原位表层土壤中 As、Cr、Pb 的含量无显著性差异（$P$>0.05），Cd、Cu 的含量高于原位表层土壤（$P$<0.01）。这表明在风蚀物和风积物形成过程中，Cu 和 Cd 可能存在一定程度的富集或其他来源。

## 2.2 盐尘理化性质空间变化特征

### 2.2.1 粒度组成的空间变化

在与察汗淖尔冬春季主导风向平行的西北–东南采集样线上，风蚀物、风积物平均粒径和粒级组成的变化表现相似（图 5）。主要表现：一是湖区风蚀物、风积物的平均粒径和粒级组成的变化均较平稳，经 Mann-Kendall 趋势检验，在极显著水平（$P$<0.01）无上升或下降趋势；二是岸区风蚀物和风积物的平均粒径相较于湖区更粗，细砂、中砂等粗颗粒的含量也相对更高。进一步分析发现（图 5），这与干湖盆岸区土壤粒度较粗，湖区土壤粒度较细且组成比较均一的背景特征有关。总之，察汗淖尔干湖盆风蚀物和风积物粒度组成的空间分异，主要受控于干湖盆表层土壤粒度组成的空间变化，再次印证

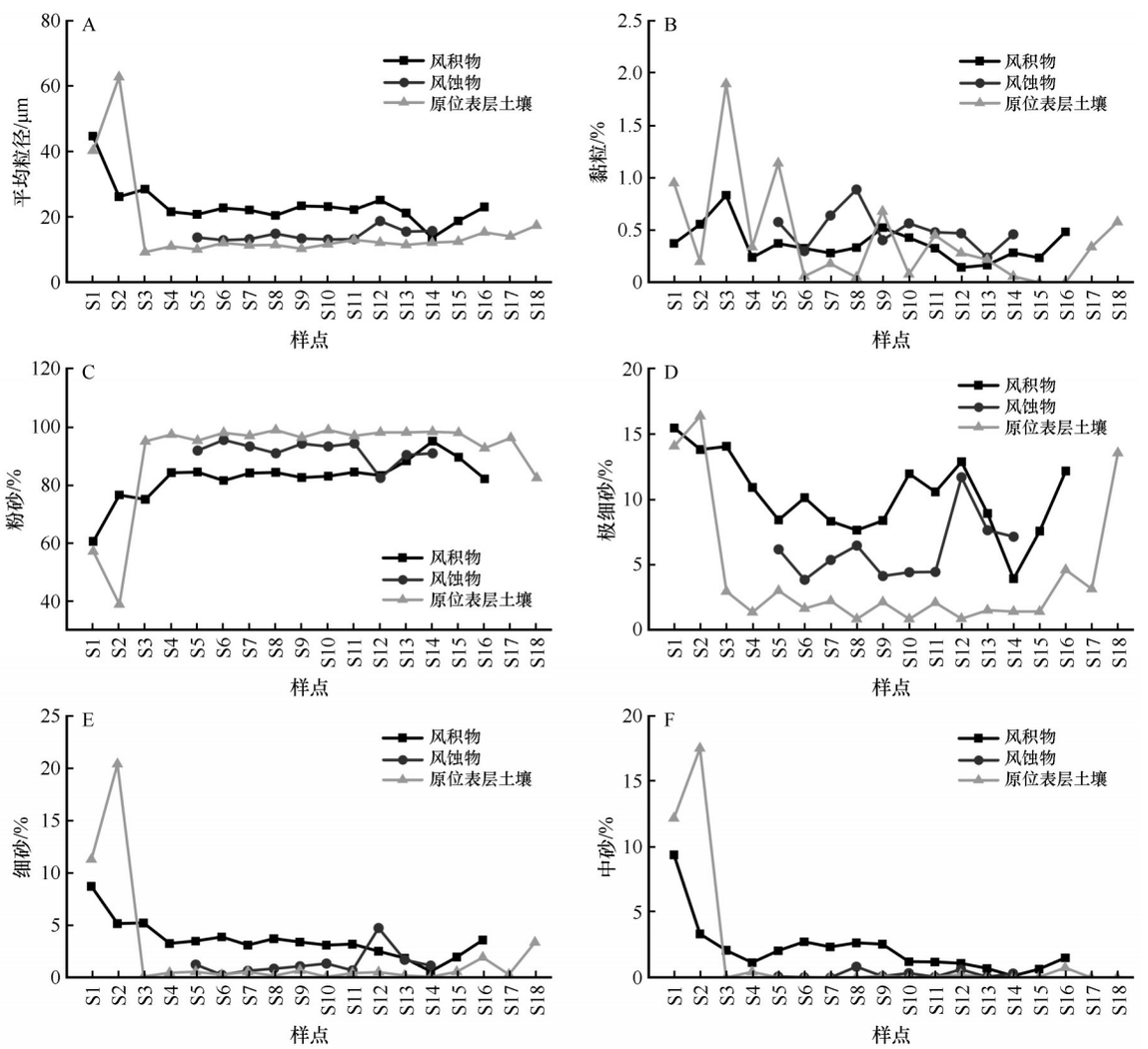



图 5 察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘及原位表层土壤各样点平均粒径及主要组分体积分数

Fig.5 Mean particle size and volume fractions of major components across sampling sites of near-surface salt dust and topsoil in the dry lakebed of Chahannur in spring

了盐尘与原位土壤理化性质的高度相关性。

### 2.2.2　全盐含量空间变化

在西北到东南的采集样线上，风蚀物与风积物的全盐含量变化趋势相似，均呈“W”形波动（先降后升，再降再升），与原位表层土壤的空间变化有所不同（图6A）。具体来看，土壤全盐含量的高值区位于S9，而风蚀物和风积物的全盐含量高值区则出现在S10；土壤全盐含量的低值区为S10-12，而风蚀物和风积物全盐含量的低值区后移至样点S11-13（图6A）。结果显示风蚀物和风积物的全盐含量相对于原位表层土壤存在一定的空间滞后性，即：土壤全盐含量的高值点，并未直接导致原位风蚀物和风积物全盐含量的增加，而是造成了下风向风蚀物和风积物全盐含量的增加。

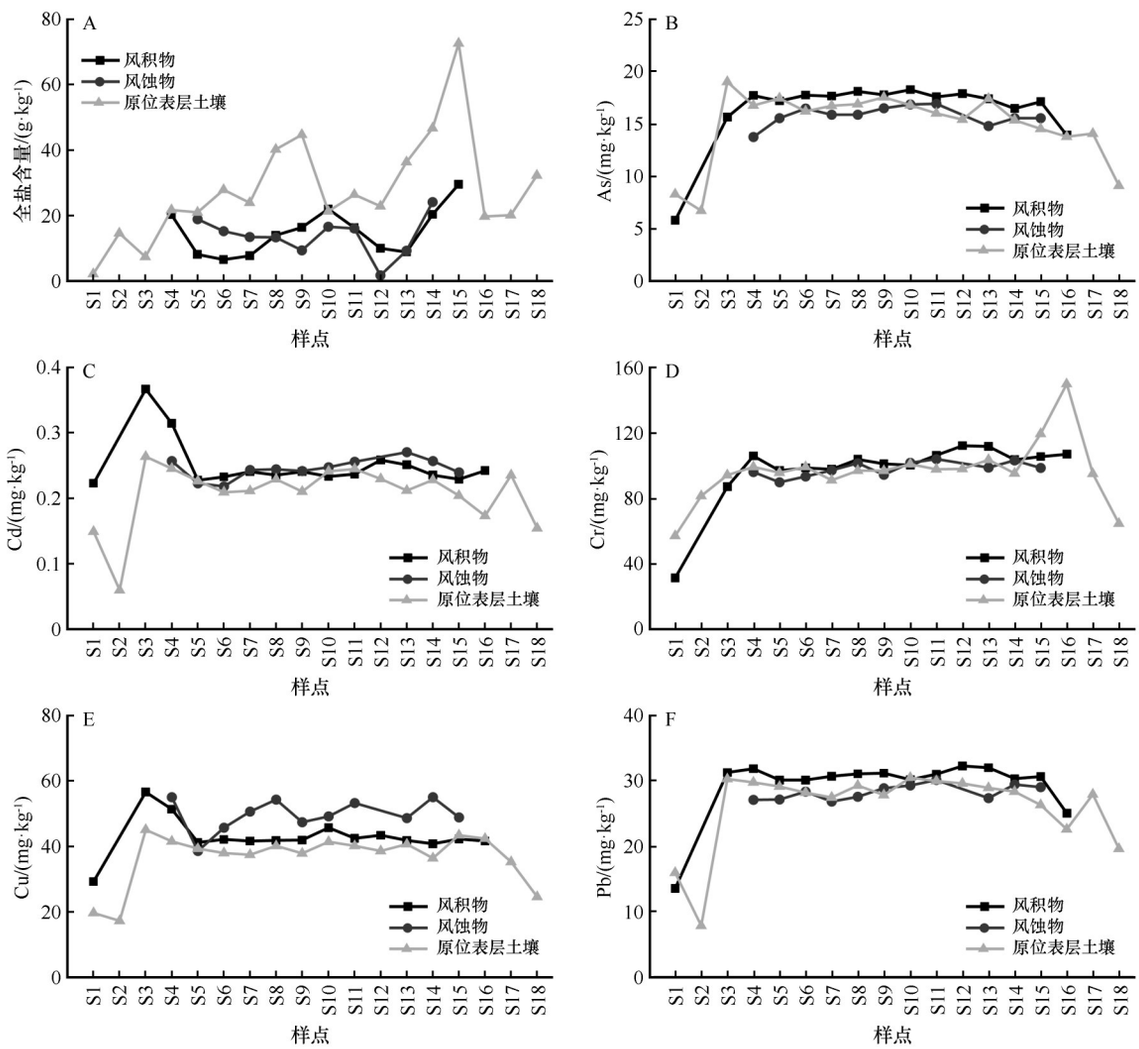
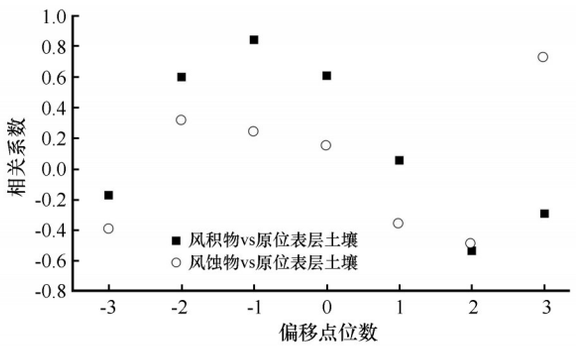



图6　察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘及原位表层土壤各样点全盐含量及重金属含量

Fig.6　Total salt content and heavy metal content across sampling sites of near-surface salt dust and topsoil in the dry lakebed of Chahannur in spring

分别对风蚀物和风积物全盐含量与土壤全盐含量进行的空间交叉相关分析表明（图7），各样点风蚀物与原位表层土壤全盐含量的相关性（$r$=0.149）未通过显著性检验（$P$>0.05），风积物与原位表层土壤的相关性较高（$r$=0.608），且通过显著性检验（$P$<0.05）。各样点风蚀物的全盐含量与上风向一个样点土壤全盐含量的相关性（$r$=0.242）高于原位表层土壤，但未通过显著性检验（$P$>0.05），风积物全盐含量与上风向一个样点的土壤全盐含量的相关性也高于原位表层土壤（$r$=0.842），且通过了极显著性检验（$P$<0.01）。该结果表明，在沿主导风向的观测样线上，风蚀物和风积物的全盐含量变化相对于原位表层土壤可能存在空间滞后性，受上风向一个样点土壤全盐含量的影响高于原位土壤，




注:数字表示与原位的点位偏移数,正值为上风向风蚀(积)物与土壤的相关性,负值为下风向风蚀(积)物与土壤的相关性

图7 察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘与原位表层土壤全盐含量空间交叉相关分析

Fig.7 Cross-Correlation analysis of total salt content in near-surface salt dust and topsoil of the dry lakebed of Chahannur in spring

且风积物受影响的程度高于风蚀物。

前人研究表明,干涸湖盆表层土壤的全盐含量普遍具有越靠近湖心越高的趋势[29-30]。其本质是这些湖泊最深处往往最后干涸,盐分在湖泊干涸过程中向该处集中。但本研究中,在湖区的S10~S12采样区域,出现了明显的土壤全盐含量的低值区(图6A)。从现场踏勘情况来看,该区域地势略高于周边,有稀疏植被覆盖(图8A),且盐结皮发育程度弱于周边区域(图8B)。推测该处地下水位相对更深,盐分表聚作用弱,同时降水还能使该处表层盐分淋溶或运移到地势更低处。

### 2.2.3 重金属含量空间变化

在察汗淖尔干涸湖盆西北岸到东南岸的采集样线上,风蚀物与风积物中重金属含量的空间变化具有两方面的特征(图6B~F):一是湖区风蚀物与风积物中5种重金属(As、Cd、Cr、Pb和Cu)含量的空间变化较小,经Mann-Kendall检验,在极显著水平($P$<0.01)无上升或下降趋势;二是岸区风积物中5种重金属的含量明显低于湖区。这与表层土壤中重金属含量的空间分布特征高度吻合。干涸湖盆表层土壤中重金属含量的空间分布是决定其释放的风蚀物与风积物中重金属含量空间变化的主要因素。

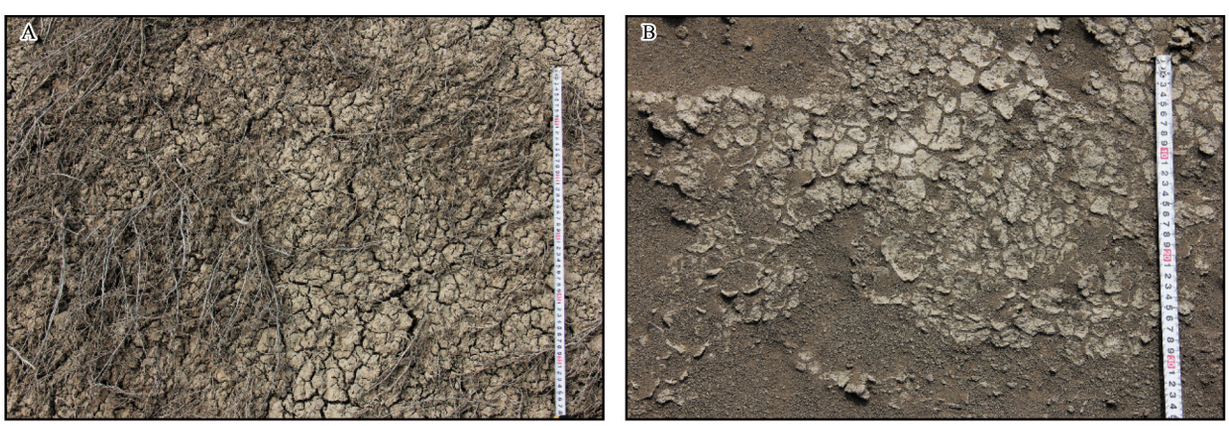



图8 察汗淖尔干涸湖盆春季近地表现场踏勘照片

Fig.8 Field survey photos of the near-surface environment in the dry lakebed of Chahannur in spring

## 2.3 盐尘理化性质时间变化特征

选取2021、2023、2024年均开展观测的S8/L9点,对其风蚀物和风积物理化性质的年际变化进行了对比分析。风蚀物的平均粒径在2024年较2021年和2023年下降了近40%;风积物的平均粒径则由2021年的14.76 μm提升到2024年的27.79 μm,升高了接近1倍(图9A)。盐分方面,风蚀物的全盐含量从2021年的6.69 g·kg$^{-1}$升至2023年的9.43 g·kg$^{-1}$,但在2024年降至1.19 g·kg$^{-1}$,变化明显。风积物的全盐含量由2021年的26.85 g·kg$^{-1}$减少到2023年的16.47 g·kg$^{-1}$,降低了近40%(图9B)。这些结果表明,不同年份之间风蚀物和风积物的理化性质存在显著差异。气象资料显示,察汗淖尔区域2021年4月降水仅0.6 mm,而2023年和2024年分别为30.3 mm和87.3 mm。降水较少时,风积物颗粒较细且含盐量较高,降水增多时,颗粒变粗含盐量降低。这表明降水通过影响土壤湿度与结皮发育,改变了可蚀颗粒的释放强度和盐分含量,进而影响风蚀物和风积物的理化特性。

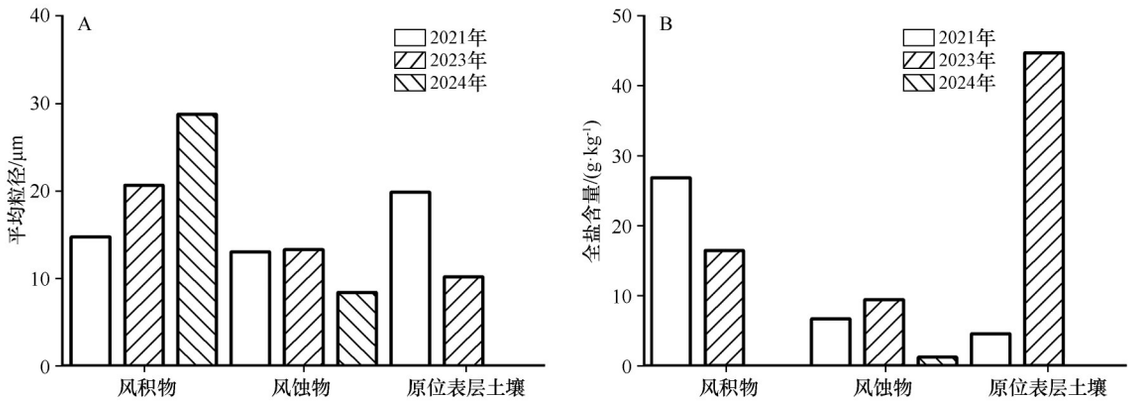



图9　察汗淖尔干涸湖盆S8/L9采样点春季风积物、风蚀物和原位表层土壤的平均粒径、全盐含量年际变化

Fig.9　Interannual variations in mean particle size and total salt content of aeolian deposits, wind-eroded materials, and topsoil at the S8/L9 sampling site in the dry lakebed of Chahannur in spring

## 3　讨论

### 3.1　盐尘与原位表层土壤性质的关系

对察汗淖尔干涸湖盆区域风蚀物、风积物与原位表层土壤的理化性质分析表明，在沿冬春季主导风向（西北—东南方向）的采集样线上，风蚀物与原位表层土壤在平均粒径、粒级组成、全盐含量以及As、Cd、Cr、Pb等重金属的富集程度上高度相似（图5，6）。这说明盐尘在物质组成上主要继承了原位表层土壤的理化特性，其产生过程本质上是大风对原位表层土壤中可蚀部分的剥离、扬起和搬运[31-32]。

风蚀物、风积物的含盐量略低于原位表层土壤。产生这一现象的可能原因是，强烈的盐分表聚作用，使研究区地表形成富含盐分的结皮层，导致表层土壤中的盐分含量较高。风蚀作用将盐结皮破碎后，部分较细的盐结晶和下覆的土壤颗粒被风吹起。由于盐结晶的密度大于普通土壤，盐分含量越低的细颗粒越容易被风吹起，从而出现了土壤全盐含量高于风积物，风积物又高于风蚀物的变化特征。

本研究发现，在西北—东南方向的采集样线上，风蚀物与风积物全盐含量的空间分布，相较于原位表层土壤存在约一个样点的空间滞后现象（图6，7）。具体表现为：表层土壤盐分的高值区往往对应着其下风向相邻样点风积物的盐分高值。据此推断，这种滞后性与干涸湖盆表层风蚀物的输移有关。基于此，提出一种初步作用机制假说：在风沙活动比较强烈的区域（通常也是干涸湖盆表层土壤盐尘含量的高值区），风蚀作用破坏了盐结皮，富含盐分的表层土壤颗粒被风沙流携带并沿主导风向进行搬运，最终在下风向样点被集沙桶或集沙仪捕获，从而形成空间上盐分含量的“滞后”。该现象初步揭示了研究区内风力搬运对盐分的空间再分配所具有的主导作用。需要指出的是，上述推断基于单一观测样线，尚缺乏对整个湖区盐分空间异质性的全面考量。目前更多的是揭示现象而非完全证实因果过程。后续需布设更为系统的采样点位，并结合地统计学分析进行深入论证。

总之，盐尘是退化干涸湖盆表层土壤风蚀活动的产物，其在粒度、盐分和重金属含量上继承了原位表层土壤的特性，印证了盐尘的本地尘源属性和风力侵蚀–搬运的本质。而风蚀物含盐量略低及风积物含盐量空间分布相对于原位表层土壤的空间滞后性，则揭示了风力对含盐颗粒的选择性搬运、输移过程中的沉降损失及明确的迁移路径。二者共同表明，盐尘的产生与分布受控于原位表层土壤及盛行风的共同作用[33]，也揭示盐尘治理的关键在于源头地表过程的管控和修复。

### 3.2　盐尘与普通沙尘性质的比较

项目组使用野外便携式移动风洞和集沙仪采集了察汗淖尔周边草地和农田中的风蚀物，与本研究中的风蚀物进行了比较。结果表明，干涸湖盆区域风蚀物的平均粒径远小于农田和草地风蚀物，全盐含量则是农田和草地风蚀物的10多倍，重金属的含量也略高于农田和草地风蚀物（表2）。这一结果证实了前人的研究结果，即相较于普通沙尘，盐尘普遍具有粒径较细，盐分和重金属含量高的特征[12]。

表 2 察汗淖尔干涸湖盆春季近地表盐尘、原位表层土壤及周边典型耕地、草地风蚀物的平均粒径、全盐含量及重金属含量

Table 2 Average particle size, total salt content, and heavy metal content of near-surface salt dust, topsoil and surrounding cropland and grassland aeolian erosion materials in Chahannur in spring

| 样品类型 | 平均粒径 /μm | 全盐含量 /(g·kg$^{-1}$) | 砷(As) /(mg·kg$^{-1}$) | 镉(Cd) /(mg·kg$^{-1}$) | 铬(Cr) /(mg·kg$^{-1}$) | 铜(Cu) /(mg·kg$^{-1}$) | 铅(Pb) /(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 风蚀物 | 13.13 | 14.54 | 15.62 | 0.26 | 96.58 | 57.26 | 28.68 |
| 风积物 | 25.45 | 17.68 | 17.29 | 0.28 | 90.17 | 51.87 | 29.95 |
| 原位表层土壤 | 17.79 | 21.18 | 14.90 | 0.22 | 96.80 | 36.62 | 26.07 |
| 典型耕地风蚀物 | 61.63 | 0.98 | 6.27 | 0.07 | 44.87 | 21.30 | 8.98 |
| 典型草地风蚀物 | 80.75 | 1.40 | 6.29 | 0.13 | 32.99 | 13.19 | 10.32 |

更细的粒径颗粒意味着更远的搬运距离，更高的盐尘含量意味着更大的毒害性。因此，盐尘是一种污染范围更广、生态破坏程度更深、对人体健康和环境长期风险更高的复合型污染物。结合野外观测确定的察汗淖尔干涸湖盆区域高强度风沙活动（平均输沙强度为 3 893.43 g·m$^{-1}$·d$^{-1}$，平均风沙沉积强度为 398.90 g·m$^{-1}$·d$^{-1}$）[21]，进一步凸显了对察汗淖尔干涸湖盆实施优先治理与风险管控的紧迫性。

## 4 结论

在西北—东南方向的采集样线上，察汗淖尔干涸湖盆春季释放的盐尘在粒度组成、全盐含量、主要重金属含量上与原位表层土壤高度相似，证实了盐尘的物质组成受控于原位尘源土壤，其本质是强风对湖盆表土中易蚀组分及其附着盐分、重金属的剥离与搬运过程。风蚀物与风积物的全盐含量略低于原位表层土壤，且其空间变化相对于表层土壤沿盛行风向（西北—东南）向下风向偏移约一个样点，呈现出清晰的“空间滞后性”。这反映了含盐细颗粒在风力作用下发生的选择性搬运。与普通沙尘相比，盐尘具有粒径更细、含盐量更高、重金属富集的特征，使其对生态环境与人体健康构成更为严重的复合型污染风险。因此，必须加强尘源区地表稳定化与生态修复，从源头抑制富盐细颗粒物质的释放。

**参考文献：**


[1] Borda L G, Cosentino N J, Iturri L A, et al. Is dust derived from shrinking saline lakes a risk to soil sodification in Southern South America? [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2022, 127(4): e2021JF006585

[2] Abuduwaili J, Gabchenko M V, Xu J. Eolian transport of salts: a case study in the area of Lake Ebinur (Xinjiang, Northwest China) [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(10): 1843-1852.

[3] Gill T E. Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system [J]. Geomorphology, 1996, 17(1/3): 207-228.

[4] Gill Thomas E, Gillette Dale A, Tezz N, et al. Elemental geochemistry of wind-erodible playa sediments, Owens Lake, California [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B, 2002, 189(1/4): 209-213.

[5] Erdinger L, Eckl P, Ingel F, et al. The Aral Sea disaster: human biomonitoring of Hg, As, HCB, DDE, and PCBs in children living in Aralsk and Akchi, Kazakhstan [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2004, 207(6): 541-547.

[6] Wiggs G F S, O'hara S L, Wegerdt J, et al. The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin [J]. The Geographical Journal, 2003, 169 (2): 142-157.

[7] Aali R, Asli Gharehbagh H, Gholampour A, et al. Children exposed to salt-dust emission from Urmia Lake have short telomere length: a case-control pilot study [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2025, 35(6): 1477-1484.

[8] Feizizadeh B, Lakes T, Omarzadeh D, et al. Health effects of shrinking hyper-saline lakes: spatiotemporal modeling of the Lake Urmia drought on the local population, case study of the Shabestar County [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 1622.

[9] Abbas M S, Yang Y, Zhang Q, et al. Salt lake aerosol overview: emissions, chemical composition and health impacts under the changing climate [J]. Atmosphere, 2024, 15(2): 212.

[10] Abuduwaili J, Mu G. Eolian factor in the process of modern salt accumulation in Western Dzungaria, China [J]. Eurasian Soil Science, 2006, 39(4): 367-376.

[11] Liu D, Abuduwaili J, Lei J, et al. Deposition rate and chemical composition of the aeolian dust from a bare saline playa, Ebinur Lake, Xinjiang, China [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 218(1): 175-184.

［12］ 刘东伟，吉力力·阿不都外力，雷加强，等.盐尘暴及其生态效应[J].中国沙漠，2011，31(1)：168-173.

［13］ Abuduwaili J，Liu D，Wu G.Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions[J].Journal of Arid Land，2010，2(2)：144-150.

［14］ 刘东伟，吉力力·阿不都外力，王立新.新疆艾比湖地区盐尘的沉积通量及其物质组成[J].冰川冻土，2014，36(2)：352-359.

［15］ Goldstein H L，Breit G N，Reynolds R L.Controls on the chemical composition of saline surface crusts and emitted dust from a wet playa in the Mojave Desert(USA)[J].Journal of Arid Environments，2017，140：50-66.

［16］ 鄢雪英，丁建丽，李鑫，等.艾比湖湿地退化对盐尘暴发生及运移路径的影响[J].生态学报，2015，35(17)：5856-5865.

［17］ 王昆，齐雷杰.察汗淖尔只剩最后一滴泪[J].半月谈，2020(13)：74-75.

［18］ 张兴赢，庄国顺，袁蕙.北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源：单颗粒物分析和XPS表面结构分析[J].中国环境科学，2004，24(5)：533-537.

［19］ 韩同林.京津地区沙尘暴与盐碱尘暴浅析[J].科学(上海)，2008，60(1)：46-49.

［20］ 蒋红军，王仁德，张茹春，等.坝上地区察汗淖尔流域盐尘暴形成风险研究[J].盐湖研究，2024，32(6)：48-55.

［21］ 刘颖，王仁德，蒋红军，等.察汗淖尔干涸湖床风沙活动特征及其影响因素[J].中国沙漠，2025，45(2)：129-141.

［22］ 王奕璇，邢世禄，丁宁.察汗淖尔湖泊面积变化及其对气候的响应分析[J].环境工程，2022，40(11)：47-53，68.

［23］ Blott S J，Pye K.GRADISTAT：a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J].Earth Surface Processes and Landforms，2001，26(11)：1237-1248.

［24］ Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J].Geological Society of America Bulletin，1914，25(1)：655-744.

［25］ Wentworth C K.A scale of grade and class terms for clastic sediments[J].The Journal of Geology，1922，30(5)：377-392.

［26］ 顿耀权，罗万银，邵梅，等.干旱区内陆湖盆沙尘水平通量及粒度特征：以青土湖地区为例[J].中国沙漠，2023，43(6)：166-175.

［27］ 邵梅，罗万银，顿耀权，等.干旱区退化湖盆表土及降尘的微观形貌特征和化学元素组成差异[J].中国沙漠，2023，43(6)：187-196.

［28］ 张丽婷，成杭新，谢伟明，等.河北省土壤化学元素的背景值与基准值[J].环境科学，2023，44(5)：2817-2828.

［29］ 蒋红军，王仁德，马辉涛，等.河北省坝上地区萎缩退化湖淖表土性质研究[J].地理科学，2025，45(10)：2285-2298.

［30］ 吉力力·阿不都外力，徐俊荣，穆桂金，等.艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J].冰川冻土，2007，29(6)：928-939.

［31］ Wang N，Zhang Y. Long-term variations of global dust emissions and climate control[J]. Environmental Pollution，2024，340(Pt 1)：122847.

［32］ Akter F，Bishop T F A，Vervoort R W.Space-time modelling of groundwater level and salinity[J]. Science of Total Environment，2021，776：145865.

［33］ 刘东伟，吉力力·阿不都外力，穆桂金，等.艾比湖干涸湖底化学组成及盐尘的风运堆积[J].中国环境科学，2009，29(2)：157-162.

# Characterization of salt dust released from the desiccated lake basin of Chahannur, Bashang Area in spring

Jiang Hongjun[1,2], Wang Rende[1,2], Yuan Yixiao[1,2], Ma Yanmei[1,2,3], Gao Shiping[1,2], Li Qing[1,2], Zhang Tao[1,2], Liu Ruiying[1,2]

(1. *Institute of Geographical Sciences / Hebei Technology Innovation Center for Geographic Information Application, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang* 050011, *China*; 2.*Station of Agro-pastoral Ecotone in Bashang Hebei (Grassland), Ecological Quality Comprehensive Monitoring Station, Ministry of Ecology and Environment, Chengde* 068462, *Hebei, China*; 3.*School of Geographical Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang* 050024, *China*)

**Abstract**: Chahannur, located at the border of Hebei and Inner Mongolia, was the second largest inland lake in Bashang region. In recent years, this lake has shrunk dramatically, exposing large areas of its dried-up lakebed. The salt-dust raised by strong winds each winter and spring arouses great concern over its pollution risk. However, research on the properties of such dust from this lake remains insufficient. To reveal the physicochemical characteristic of the salt dust, this study conducted systematic collection and analysis of near-surface wind-eroded materials, aeolian deposits, and in-situ topsoil samples in spring of three years. The physicochemical properties and spatial variation patterns of salt dust were examined, and the relationship between salt dust and its source topsoil was explored. The results indicate that wind-eroded materials closely resemble in-situ topsoil in terms of mean particle size, grain-size composition, total salt content, and heavy metal (As, Cd, Cr, Pb) content. Their spatial trends along the sampling transect were also largely consistent, confirming that salt dust inherits the material characteristics of its source soil. The total salt content of wind-eroded materials and aeolian deposits was slightly lower than that of in-situ soil. Moreover, relative to in-situ soils, the total salinity of deflated and aeolian sediments is slightly lower. Along the sampling transect in the northwest-southeast direction, corresponding to the prevailing winds in winter and spring, the total salinity of aeolian deposits exhibits a noticeable spatial lag, reflecting the wind-driven transport processes of deflated sediments. Compared with ordinary sand dust, the salt dust in the study area is characterized by higher salt content, finer particle size, and enrichment of heavy metals, posing more pronounced ecological and health risks. Given the longer transport distance, greater potential hazards, longer-term risks of salt dust, and intense wind erosion activity in the source area, the salt dust pollution situation in Chahannur is severe, necessitating strengthened risk management and prioritized control at the source.

**Key words**: desiccated lake; Chahannur; particle size; total salt content; heavy metals