

苑依笑,王仁德,蒋红军,等.河北坝上地区干涸湖盆盐尘性质[J].中国沙漠,2026,46(4):296-307.

河北坝上地区干涸湖盆盐尘性质

苑依笑,王仁德,蒋红军,高士平,李庆,张韬

(河北省科学院 地理科学研究所/河北省地理信息开发应用工程技术研究中心,河北 石家庄 050011)

摘要:受气候变化和不合理人类活动共同影响,坝上地区众多湖沼持续萎缩并趋于干涸。在风力搬运作用下,干涸湖盆地表松散富盐沉积物脱离地表进入气流、形成盐尘,严重情况下形成盐尘暴,对京津冀乃至华北地区大气环境与生态安全构成严重威胁。认识干涸湖盆盐尘理化性质是追溯盐尘物质来源、探究盐尘搬运机制及评估盐尘风险的关键。本研究于2023、2024年春季收集坝上地区5个典型干涸湖盆的盐尘风积物,测定了盐尘粒度与盐分组成,探究了坝上地区干涸湖盆盐尘的物质来源及搬运机制,揭示了盐尘污染的严重性。结果表明:坝上地区干涸湖盆盐尘与源区表土具有密切物源关系,盐尘中细颗粒物能够随风力进行长距离传输,而较粗颗粒就近沉降。风对盐尘颗粒的分选和搬运作用导致干涸湖盆间盐尘粒度组成差异不明显。受湖盆干涸状况影响,季节性干涸湖盆盐尘的盐分含量较常年干涸湖盆更高。与普通沙尘相比,盐尘中盐分及可溶性盐离子含量更高,对环境潜在危害性更大。

关键词:坝上地区;干涸湖盆;盐尘;粒度;盐分

文章编号: 1000-694X(2026)04-296-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00287

中图分类号: S15

文献标志码: A

0 引言

湖泊作为重要的淡水资源储存器和调节器,对干旱半干旱地区水资源供给和生态安全具有不可替代的作用^[1]。然而,随着全球气候变化与人类活动加剧,干旱半干旱区众多湖泊水面退缩并逐渐干涸。强烈的蒸发作用使高矿化度地下水中的盐分在湖底大量积聚,同时地表形成的盐结皮在反复冻融过程中破碎,进而产生大量松散富盐细颗粒物^[2-4]。这些物质含有较多的盐碱粉尘和有害化学物质,在风力作用下,极易释放进入气流中形成盐尘暴^[5],进而对生态环境及人类生产生活带来严重威胁。

盐尘物质的源区特征、起沙机制、物质组成、输运过程、生态环境效应等一直是十分受关注的问题^[6-10]。而盐尘暴的真正形成,始于这些地表物质在风力作用下被扬起并进入大气中。目前,干涸湖盆是盐尘暴形成的主要策源地,盐尘物质的研究离不开干涸湖盆源区表土的研究,这已成为学界的普

遍共识^[4]。因此,现有研究多关于干涸湖盆地表物质的理化性质与环境效应,积累了大量关于地表沉积物粒度分布^[11-12]、盐结皮发育特征^[13-14]、可溶性离子组成^[15]及潜在污染物含量^[16]等基础数据,对盐尘物质来源、输运过程等问题研究提供了重要数据支撑。然而风力作用下,源区表土在向大气粉尘输送过程中,常常伴随复杂的动力分选与物理化学分异作用^[17-18],最终导致进入气流的物质与源区表土可能存在显著差异。目前,对于盐尘本身的理化性质及其与源区表土之间的定量关系认识尚不清楚,这严重制约了盐尘暴精准物源识别与迁移过程研究。

坝上地区干涸湖盆作为区域盐尘暴的高风险区,严重威胁着京津冀乃至华北地区生态环境和人体健康^[19]。目前,针对坝上地区干涸湖盆盐尘物质组成的认识相对缺乏。为此,在已对该地区干涸湖盆表土性质^[20]、风沙活动^[2]及盐尘风险^[21]进行系统研究的基础上,选择其中典型干涸湖盆为研究对象,对盐尘风蚀沉积物进行收集与分析,探究盐尘

收稿日期:2025-10-21; 改回日期:2025-12-02

资助项目:河北省科学院科技计划项目(25B101);国家自然科学基金项目(42077069)。

作者简介:苑依笑(1994—),女,河北邢台人,博士,助理研究员,主要从事土壤风蚀与粉尘释放等研究。

E-mail: yuanyixiao1994@163.com。

通信作者:王仁德(E-mail: wangrende10@163.com)

物质理化性质及其与源区表土的关系,旨在追溯盐尘物质来源、揭示盐尘搬运机制,以期为盐尘污染的预测预警与风险评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北坝上地区地处中国北方农牧交错带中部、

内蒙古高原南缘(图 1)。属于温带大陆性季风气候,具有气温低(年均气温-0.3~3.5℃)、降水少(340~450 mm)、风力大(年大风日数 50~70 d)等特点。区内中部地势低洼,发育有一系列湖淖、沼泽等。河流主要为内流河,以大气降水为主要补给方式。近年来,由于气候变化和水资源过度开采利用,坝上地区湖淖逐渐萎缩退化,干涸湖盆面积增加明显,盐尘暴风险逐渐增大。

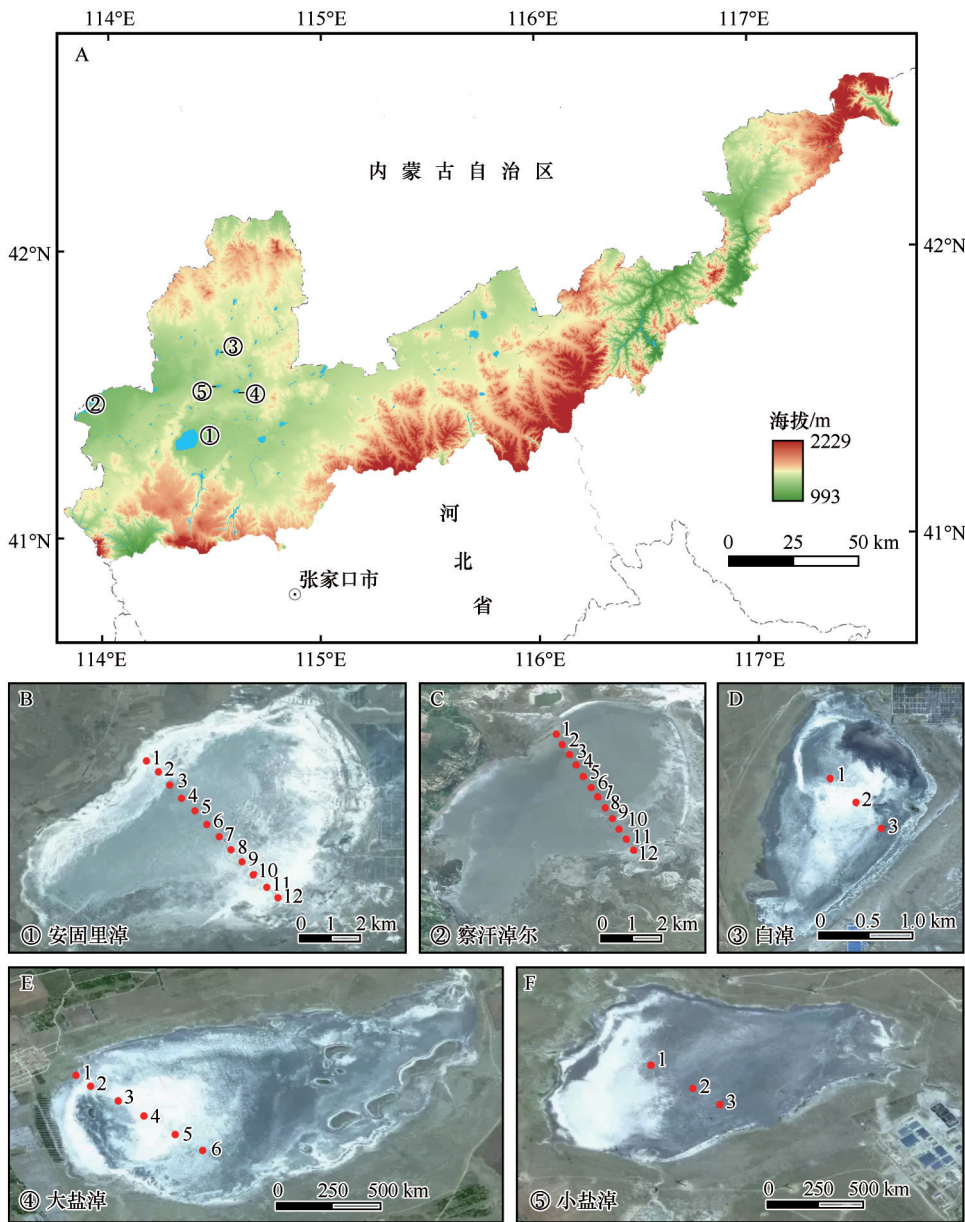


图 1 河北坝上地区干涸湖盆位置及盐尘风积物收集样点

Fig.1 Locations of dry lake-basins in Bashang region of Hebei Province and collecting sites of salt dust aeolian deposit

根据遥感影像和前期实地调查,在综合考虑湖盆规模与干涸特征的基础上,本研究选择了安固里淖、察汗淖尔、白淖、大盐淖和小盐淖 5 个典型干涸

湖盆作为盐尘样品采集地。其中,安固里淖与察汗淖尔历史最大湖面面积约为 50 km²,属中型湖泊,现常年干涸;白淖、大盐淖及小盐淖历史最大湖面面

积<10 km²,属小型湖泊,现为季节性干涸。前期研究表明^[2,21],干涸湖盆的湖心区域风沙活动最为强烈,土壤盐渍化严重,是盐尘暴发生的高风险区。因此,本研究选取干涸湖盆的湖心区域作为观测对象,以深入探究盐尘性质特征。

1.2 盐尘样品采集

在每个干涸湖盆湖心区域沿风蚀季盛行风向(西北—东南向)设置采样点。根据湖面大小,在安固里淖和察汗淖尔每隔 500 m 布设一个样点,在白淖、大盐淖和小盐淖,每隔 300 m 布设一个样点。安固里淖、察汗淖尔、白淖、大盐淖和小盐淖分别布设 12、12、3、6、3 个样点。

为收集到足够多的盐尘风积物,本研究采用地表埋设容器法,即在每个样点沿与盛行风向垂直的方向(东北—西南向)平行埋设 3 个集沙桶(内径为 0.3 m、深度为 0.4 m,图 2),两个桶之间间隔 10 m。桶内放入清洁后的石块,避免桶内收集的盐尘风积

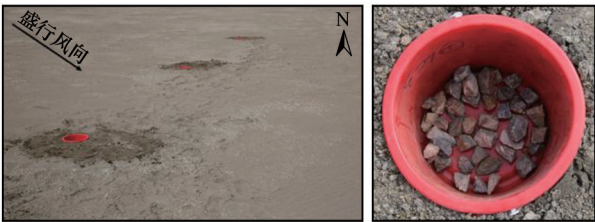


图2 集沙桶

Fig.2 Buckets used for collecting salt dust

物再次被吹蚀。桶身埋入地下,并保证桶口与地面平行。埋设集沙桶时,要求所有操作在集沙桶的下风向进行,以避免人为活动对上风向地表造成干扰。在每个样点附近采用十字取样法采集表层 0~5 cm 土壤样品,均匀混合后取 500 g 作为该样点原位土壤。

样品收集于 2023、2024 年的春季(3—5 月)。收集时间根据观测期间风沙活动强弱而定,本研究共取得 4 次收集数据(表 1)。收集过程中,降水导致部分时段集沙桶内有积水,而且个别集沙桶丢失,导致部分时段干涸湖盆没有收集到样品。

表 1 盐尘收集时间及沉积通量(单位:kg·m⁻²·d⁻¹)

Table 1 Salt dust collection time and sediment flux (unit: kg·m⁻²·d⁻¹)

次序	收集时段	安固里淖	察汗淖尔	白淖	大盐淖	小盐淖
1	2023.03.31–04.27	—	0.311	—	—	—
2	2023.04.28–05.15	1.211	0.003	0.200	0.472	0.010
3	2024.03.23–04.13	0.003	0.002	0.407	0.002	—
4	2024.04.14–05.15	—	—	—	0.006	—

1.3 普通沙尘样品采集

农田和草地是河北坝上地区沙尘释放的典型风蚀地表^[22]。为比较盐尘与普通沙尘的差异,我们按照干涸湖盆盐尘收集方法,在农田和草地地表分别埋设 3 个集沙桶(图 3),用于收集农田和草地沙

尘。所选农田为春季翻耕地,草地为天然草地。沙尘样品收集于 2025 年 4 月 12 日发生的一次风蚀事件。

1.4 室内实验分析

盐尘及表土粒度组成利用 Mastersizer 3000 激

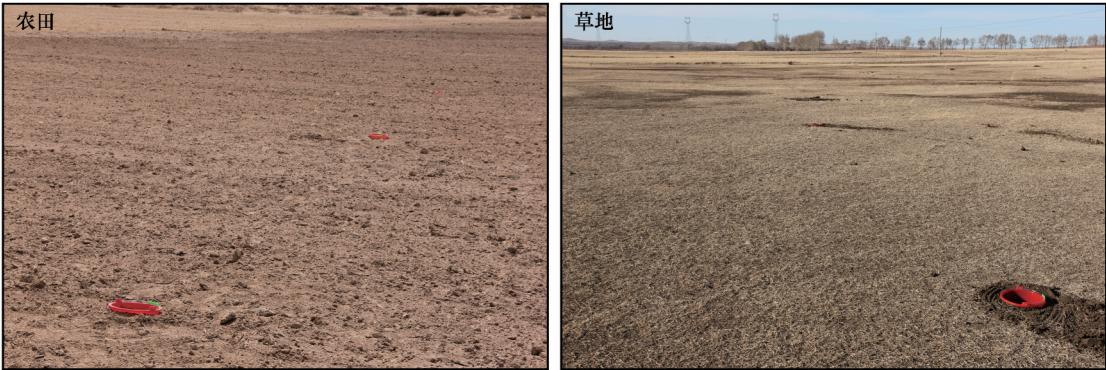


图3 农田和草地沙尘收集

Fig.3 Collecting dust from farmland and grassland

光衍射粒度分析仪测定,粒径分级根据 Udden-Wentworth 方法^[23]进行划分(表 2)。

表 2 Udden-Wentworth 粒度划分标准
Table 2 Udden-Wentworth grading standard

粒级	粒径范围/ μm	粒径范围/ Φ
粘粒	0~2	>8
粉沙	2~63	8~4
极细沙	63~125	4~3
细沙	125~250	3~2
中沙	250~500	2~1
粗沙	500~1 000	1~0
极粗沙	1 000~2 000	0~-1

平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(SK)和峰度(K_g)等粒度参数特征采用 Fork-Ward 图解法公式^[24]计算。

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \tag{2}$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{3}$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \tag{4}$$

式中: Φ_x 表示颗粒粒度累积到 $x\%$ 时对应的粒径。

干涸湖盆盐尘及表土全盐含量采用质量法测定; Na^+ 、 K^+ 采用火焰光度法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用

EDTA 络合滴定法和原子吸收分光光度法测定; Cl^- 采用硝酸银滴定法测定; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法、硫酸钡比浊法、硫酸钡质量法测定; HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用双指示剂-中和滴定法测定。农田和草地收集的普通沙尘样品量较少,只测试了 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 。所有理化性质分析工作在河北省科学院地理科学研究所理化分析实验室完成。

2 结果分析

2.1 干涸湖盆盐尘粒度特征

2.1.1 粒径分布

坝上地区 5 个干涸湖盆盐尘以粉沙为主要组分,平均含量为 83.35%;其次是极细沙、细沙和中沙含量分别为 9.17%、4.71% 和 2.27%;黏粒、粗沙和极粗沙含量低,平均含量均小于 1%(表 3)。

根据标准差分析,在湖盆内部,各样点间盐尘各粒级组分的百分含量差异较小,表明湖心内部区域粒度组成在空间上具有均一性。5 个湖盆盐尘中粉沙含量为 78.13%~88.99%,从高到低依次是白淖、安固里淖、大盐淖、察汗淖尔和小盐淖;极细沙、细沙和中沙含量大小顺序与粉沙含量基本相反;粗沙含量从高到低依次为察汗淖尔、白淖、安固里淖、小盐淖和大盐淖。中型湖盆(安固里淖、察汗淖尔)和小型湖盆(白淖、大盐淖、小盐淖)在粒度组成上没有明显性差异。

表 3 盐尘各粒级组分含量统计特征(单位:%)
Table 3 Statistical characteristics of each grain-size component content in salt dust (unit: %)

湖盆	参数	黏粒	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	极粗沙
安固里淖	平均值	0.10	86.32	8.50	3.18	1.51	0.30	0.06
	标准差	0.04	3.94	1.63	1.34	0.78	0.35	0.10
察汗淖尔	平均值	0.26	79.35	11.50	5.57	2.71	0.54	0.06
	标准差	0.07	3.17	1.73	1.02	0.68	0.36	0.08
白淖	平均值	0.02	88.99	6.13	2.93	1.57	0.36	0.00
	标准差	0.02	1.41	0.60	0.10	0.34	0.46	0.00
大盐淖	平均值	0.16	83.97	9.33	4.25	2.08	0.20	0.01
	标准差	0.05	1.94	0.63	0.66	0.55	0.14	0.01
小盐淖	平均值	0.10	78.13	10.41	7.61	3.49	0.27	0.00
	标准差	0.08	2.83	0.54	0.74	2.33	0.38	0.00
均值	平均值	0.13	83.35	9.17	4.71	2.27	0.34	0.03
	标准差	0.05	2.66	1.03	0.77	0.93	0.34	0.04

干涸湖盆区盐尘与表土的粒度分布曲线形态相似,均表现为单峰分布(图4),且原位表土主要组分与盐尘相同都是粉沙,这指示出盐尘与原位表土之间存在物源联系。然而,盐尘的粒度分布峰值整体向粗粒方向偏移,这说明了盐尘中粗颗粒组分的含量相对更高。

为深入探究源区表土与盐尘在粒度组成上的关联,本文进一步对比分析了二者在粉沙、极细沙、细沙及中沙4个主要粒级的百分含量(图5),结果显示盐尘与表土在各粒级上并未呈现出明显的趋势性关系,而盐尘中粉沙含量均低于表土,极细沙、细沙和中沙含量普遍高于表土。这也进一步体现了相较于干涸湖盆区表土,盐尘粗颗粒组分显著富集、平均粒径更大的特征,该特征与Mu等^[10]的研究结果一致。

2.1.2 粒度参数

5个干涸湖盆盐尘的平均粒径 $5.34\sim 5.80\Phi$,均值 5.57Φ (表4),显著大于表土的平均粒径,进一步证实盐尘物质整体上更偏粗粒化。根据Folk和Ward的粒度参数分级标准^[24],盐尘与表土的粒度分

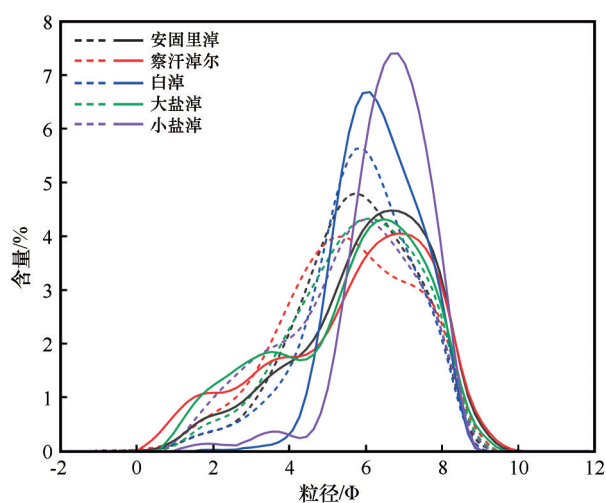


图4 盐尘与表土粒度分布(虚线表示盐尘,实线表示表土)
Fig.4 Grain-size distribution in salt dust (dotted line) and topsoil (solid line)

布峰度值 $0.90\sim 1.11$,都属于中等宽度峰态;分选系数 $1\sim 2\Phi$,都属于较差分选等级。偏度分析表明,除小盐淖外,其余4个湖盆的盐尘粒度曲线均呈近对称分布。对于表土,安固里淖和察汗淖尔的粒度曲线同样为近对称分布,而小型湖盆则表现为负偏态。

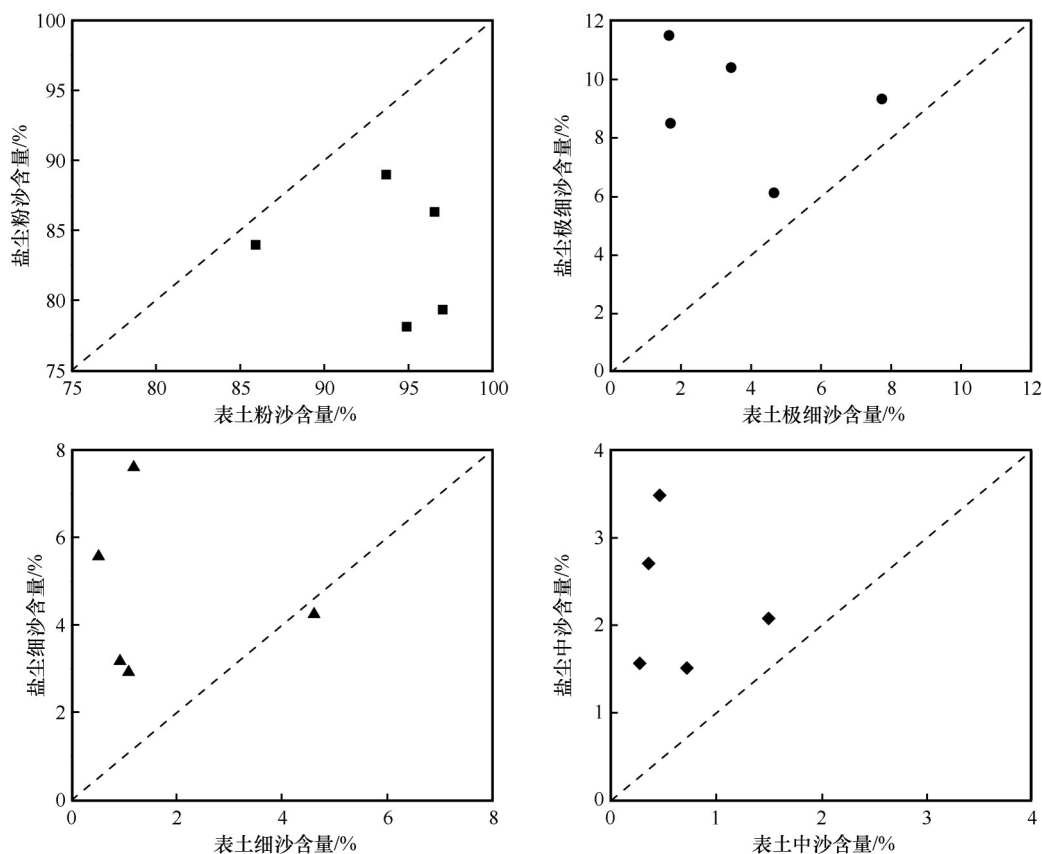


图5 盐尘与表土在粉沙、极细沙、细沙和中沙含量上的关系

Fig.5 Relationship between salt dust and topsoil in the contents of silt, very fine sand, fine sand and medium sand

表 4 盐尘与表土的粒度参数
Table 4 Grain-size parameters of salt dust and topsoil

湖盆	盐尘				表土			
	平均粒径/ Φ	峰度	偏度	分选系数/ Φ	平均粒径/ Φ	峰度	偏度	分选系数/ Φ
安固里淖	5.63	0.98	0.00	1.46	6.36	0.95	-0.03	1.11
察汗淖尔	5.34	0.92	-0.05	1.65	6.45	0.91	-0.01	1.14
白淖	5.80	1.01	0.08	1.46	6.27	1.03	-0.15	1.34
大盐淖	5.69	1.11	0.10	1.16	6.04	1.03	-0.28	1.61
小盐淖	5.43	0.92	0.15	1.81	6.29	1.11	-0.11	1.17
平均	5.57	0.99	0.06	1.59	6.28	1.00	-0.11	1.27

综上所述,盐尘与表土在峰度与分选性参数上的高度一致性,也指示了二者具有密切的物源联系。同时风力搬运过程对原始表土物质进行了一定的筛选和均一化,使得产生的盐尘在粒度特征上既保留了源区的部分粒度信息,又形成了自身更对称的分布特征。

2.2 干涸湖盆盐尘盐分特征

5 个干涸湖盆盐尘的全盐含量 14.38~797.10

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $239.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 5)。盐尘可溶性阳离子以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主,平均含量分别为 65.46 、 $6.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可溶性阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主,平均含量分别为 99.99 、 $6.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量较低,其中 CO_3^{2-} 在白淖和大盐淖盐尘中未检测出。除 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 两个阴离子外,中型干涸湖盆(安固里淖和察汗淖尔)盐尘的全盐含量、可溶性盐离子含量普遍小于小型干涸湖盆(白淖、大盐淖和小盐淖)。

表 5 盐尘全盐及可溶性盐离子含量(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 5 Content of total salt and soluble salt ions (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

湖盆	参数	全盐	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
安固里淖	平均值	54.66	27.54	0.12	0.20	0.13	28.71	3.63	0.33	1.03
	标准差	39.79	14.55	0.15	0.32	0.04	12.95	0.15	0.20	0.31
察汗淖尔	平均值	14.38	7.99	0.01	0.03	0.02	8.28	2.54	0.21	1.34
	标准差	7.05	3.03	0.00	0.01	0.01	4.12	0.72	0.12	0.30
白淖	平均值	120.19	38.91	3.12	2.77	0.53	40.14	3.27	0.00	0.53
	标准差	21.33	8.11	1.16	0.26	0.25	18.36	0.42	0.00	0.15
大盐淖	平均值	212.23	61.75	9.00	3.65	0.42	78.14	3.66	0.00	0.73
	标准差	36.44	12.53	1.18	1.69	0.03	12.99	1.33	0.00	0.21
小盐淖	平均值	797.10	191.11	20.64	5.76	2.22	344.66	21.82	0.25	0.44
	标准差	1.83	2.31	0.34	0.35	0.14	1.38	2.29	0.01	0.03
均值	平均值	239.71	65.46	6.58	2.48	0.66	99.99	6.98	0.27	0.82
	标准差	21.29	8.11	0.57	0.53	0.09	9.96	0.98	0.07	0.20

表土与盐尘的盐分组成特征相似(图 6),其主要可溶性阳离子为 Na^+ ($49.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 Mg^{2+} ($1.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 主要阴离子为 Cl^- ($36.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 SO_4^{2-} ($33.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。除 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 外,盐尘中其余 6 种盐离子含量均高于表土,而且盐尘的全盐含量达到表土 ($101.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 2.4 倍。这些分析可以表

明盐分在盐尘中发生了明显富集,全盐、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 的富集率分别为 2.36、1.33、1.32、2.29、1.47、2.72、1.68。
为进一步量化盐分富集的具体特征,本文对比分析了 5 个干涸湖盆盐尘与表土中可溶性盐离子的关系(图 7)。结果显示,盐尘中各离子含量均随表

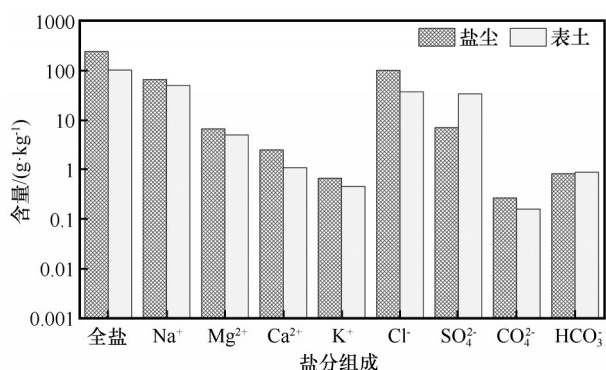


图6 盐尘与表土盐分组成对比

Fig.6 Comparison of salt composition between salt dust and topsoil

土中相应离子含量的增加而增加;其中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 的增长速率均高于1:1参考线,表明这5种盐离子在风蚀过程中具有更强的富集倾向。

2.3 干涸湖盆盐尘盐分与粒度组成的关系

对干涸湖盆盐分组成与粒度组成进行 Spearman 相关性分析(表6),结果显示全盐量、 K^+ 、 CO_3^{2-} 与粉沙显著正相关,并与其他粒级组分负相关,表明粉沙是盐分富集的主要载体; Na^+ 、 Cl^- 与黏粒、极细沙和粗沙显著负相关; Ca^{2+} 仅与黏粒显著负相关; HCO_3^- 与粉沙显著负相关,与其他粒级颗粒显著正相关; Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 与各粒级组分含量间没有显著性相关关系。

2.4 干涸湖盆盐尘与普通沙尘对比

比较干涸湖盆盐尘与农田、草地普通沙尘(表7),结果显示干涸湖盆盐尘中的盐分含量远高于农田与草地,其全盐含量分别约为农田沙尘的244倍和草地沙尘的171倍。在可溶性盐离子组成方面,湖盆盐尘中 Na^+ 含量分别约为农田沙尘的297倍和草地沙尘的112倍; K^+ 含量分别约为农田沙尘的13倍和草地沙尘的2倍; Cl^- 含量则约为农田沙尘的417倍。由此可见,盐尘中盐碱物质含量远远大于普通沙尘。这些物质随风输送后,往往对当地人类健康及生态环境的潜在危害更大^[5, 25-26]。

3 讨论

3.1 盐尘的搬运机制

风是地表颗粒物被进行选择性搬运的原动力^[27]。为深入了解盐尘颗粒在风力作用下的搬运

机制,我们利用 Bagnold^[28]推导的粒径与流体临界起动风速关系式计算了表土各粒级颗粒的临界起动摩阻风速(u_{*t}):

$$u_{*t} = A \sqrt{gd \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (5)$$

式中: A 是常数($=0.1$); d 为颗粒粒径; ρ_s 为土壤密度($=2650 \text{ kg m}^{-3}$); ρ 为空气密度($=1.225 \text{ kg m}^{-3}$); g 为重力加速度($=9.81 \text{ m s}^{-2}$)。结合中性大气层结下风速对数廓线公式,将 u_{*t} 转换为特定高度 z (文中取 $z=10 \text{ m}$)处的临界起动风速(u_t),

$$u_t = \frac{u_{*t}}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (6)$$

式中: k 为常数0.4;对于平坦沙床, z_0 值约等于粒径 d 的1/30,即 $z_0 \approx d/30$ 。依据式(5)和式(6),本文计算了各粒级颗粒起动对应的 u_{*t} 和10 m高度处 u_t ,结果如表8所示。此外,基于2023年和2024年春季(3—5月)张北县气象站(距离5个干涸湖盆最近站点)10 m高度逐小时风速观测数据,本文统计得到各级风速频率分布(图8)。结合表7中各粒径颗粒的临界起动风速分析可知,研究区春季风况足以起动中沙($<500 \mu\text{m}$)及以下各粒级颗粒。其中,能够满足粉沙($<63 \mu\text{m}$)起动的风速出现频率最高;随着粒径增大,相应临界起动风速的满足频率逐渐降低。这一风况-粒径的对应关系,是研究区盐尘物质中粉沙、极细沙、细沙及中沙百分含量依次递减的主要动力成因。此外,研究期间未出现能够起动粗沙($500 \sim 1000 \mu\text{m}$)和极粗沙($1000 \sim 2000 \mu\text{m}$)的临界风速,这也从动力学角度解释了盐尘中这两类粗颗粒含量最低的现象。

上述研究表明干涸湖盆盐尘中粗颗粒物含量相对表土较高。究其原因,这一粒度分异特征可能与盐尘物质搬运的动力学过程有关。本研究采用地表埋设容器法收集盐尘,实质上收集的是地表起尘后就近沉降的盐尘风积物,是表土沙粒进入气流后经过风力再分选搬运的结果,即源区表土起动后细颗粒组分能够被有效夹带进行长距离传输,而较粗颗粒物则就近沉降,这就导致近源盐尘风积物相对粗化。然而需要指出的是,干涸湖盆盐尘物质的一次性扩散范围是有限的^[29],这些较粗颗粒在初次沉降后并非完全稳定下来,而是在后续风蚀事件中经历多次搬运后最终实现远源输送。

为识别沙粒释放过程中细颗粒的损失特征,本文进一步比较了各干涸湖盆盐尘与表土的粒度分

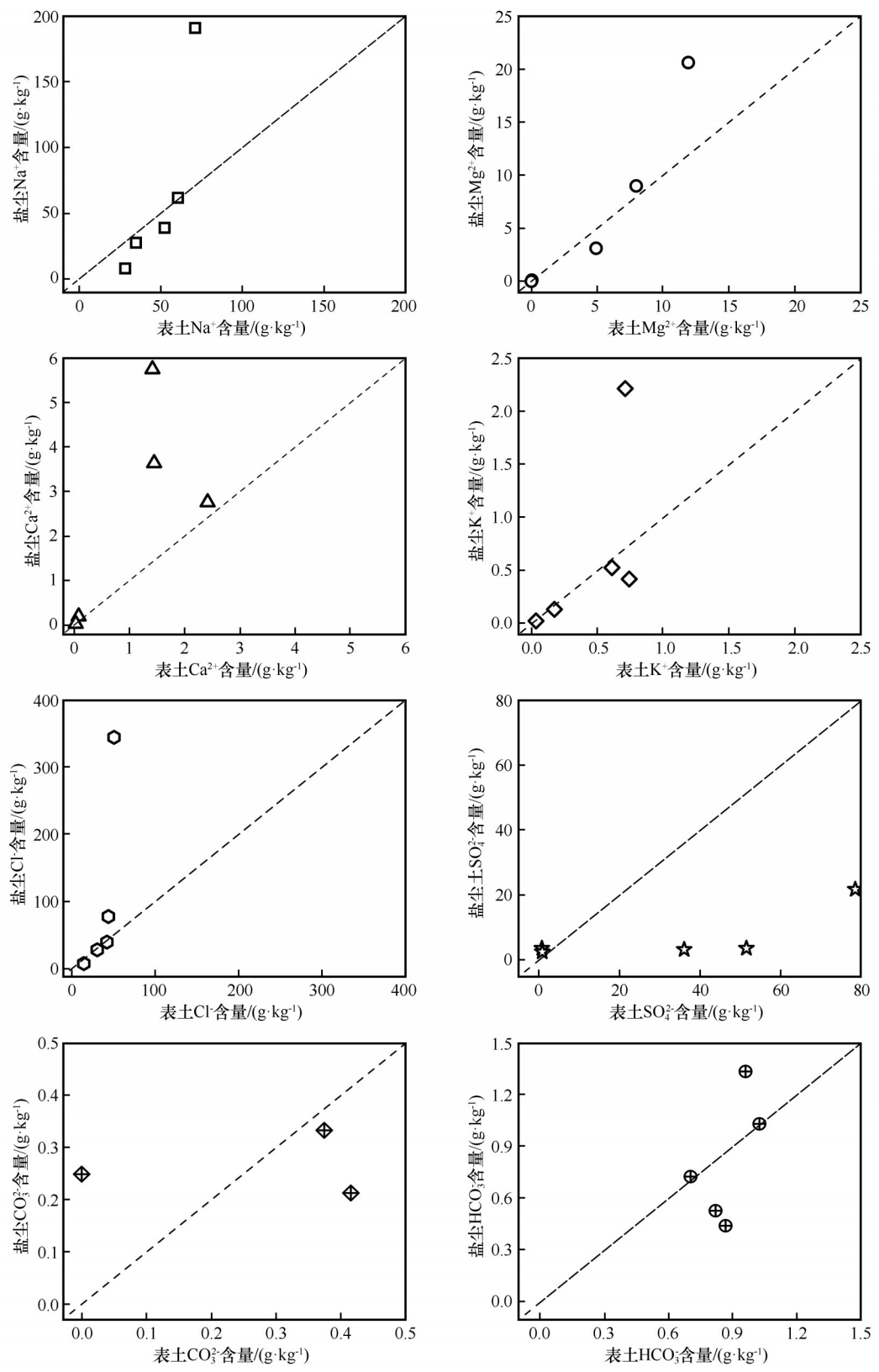


图 7 盐尘与表土盐组成的关系

Fig.7 Relationship between salt composition of salt dust and topsoil

布差异。通过计算各粒级含量差值,确定了从干涸湖盆中可被风力有效搬运的细颗粒物质的最大粒

径。分析结果表明(图 9),安固里淖、察汗淖尔、白淖、大盐淖和小盐淖的盐尘中,能够被长距离搬运

表 6 粒度组成与盐分相关性
Table 6 Correlation between grain-size composition and salinity

变量	黏粒	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	极粗沙
全盐	-0.49**	0.36*	-0.45**	-0.23	-0.28	-0.48**	-0.43*
Na ⁺	-0.53**	0.34	-0.43*	-0.22	-0.28	-0.44*	-0.40*
Mg ²⁺	-0.30	0.10	-0.21	0.00	-0.03	-0.29	-0.21
Ca ²⁺	-0.36*	0.13	-0.18	0.00	-0.09	-0.29	-0.31
K ⁺	-0.60**	0.40*	-0.48**	-0.26	-0.32	-0.47**	-0.41*
Cl ⁻	-0.48**	0.32	-0.40*	-0.20	-0.27	-0.50**	-0.34
SO ₄ ²⁻	-0.29	0.28	-0.32	-0.22	-0.28	-0.28	-0.15
CO ₃ ²⁻	-0.54*	0.52*	-0.63**	-0.31	-0.48*	-0.50*	-0.46*
HCO ₃ ⁻	0.43*	-0.41*	0.47**	0.23	0.36*	0.52**	0.36*

注:**在 0.01 级别,相关性极显著;*在 0.05 级别,相关性显著

表 7 盐尘与普通沙尘盐分含量(g·kg⁻¹)对比
Table 7 Comparison of salt composition between salt dust and ordinary dust (g·kg⁻¹)

	全盐	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
盐尘	239.71	65.46	0.66	99.99
沙尘(农田)	0.98	0.22	0.05	0.24
沙尘(草地)	1.4	0.58	0.28	—

表 8 各粒径对应的临界起动摩擦风速(u_{*t})及 10 m 高度处临界起动风速(U_t)

粒径/ μm	$u_{*t}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
2	0.02	0.86
63	0.11	4.85
125	0.16	6.83
250	0.23	9.66
500	0.32	13.67
1 000	0.46	19.33
2 000	0.64	27.33

的细颗粒最大粒径值分别为 14、17、30、14、23 μm 。由此可见,0~30 μm 粒径的细颗粒均具备被风长距离传输的潜力,其中<20 μm 的细颗粒损失最为严重。不同粒级颗粒在风蚀过程中呈现出不同运动方式:>500 μm 的颗粒以蠕移为主,70~500 μm 的颗粒以跃移为主,而<70 μm 的颗粒则以悬移方式运动。其中,20~70 μm 的颗粒多表现为短距离悬移,<20 μm 的颗粒则可长期悬移并实现远距离传

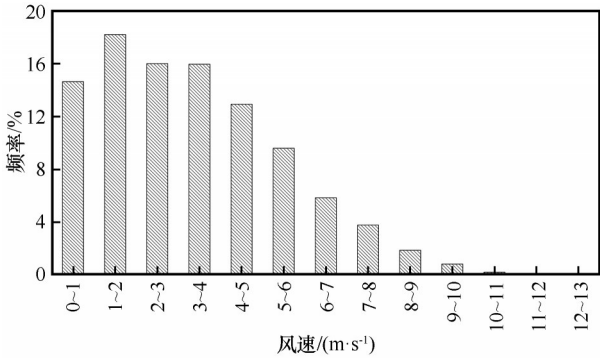


图 8 2023—2024 年春季(3—5 月)各级风速分布频率
Fig.8 Distribution frequency of wind speed during the spring (from March to May) of 2023-2024

输^[4,30]。本研究所得细颗粒可搬运粒径范围与上述颗粒运动方式高度吻合,尤其验证了<20 μm 颗粒是沙粒远距离传输的主要组分。

3.2 盐尘中盐分富集成因

本研究指出粉沙是盐分的主要载体,而在风蚀过程中粒径<30 μm 的细粒粉沙存在显著损失,这种情况下仍出现盐尘风积物盐分明显高于源区表土的现象。这主要归因于两方面:一方面是本研究干涸湖盆表土样品采集深度是 0~5 cm,而实际上盐分主要表聚于表层土壤(0~2 cm)^[4];另一方面,风蚀过程中被风力释放、搬运的恰恰是这层高盐分的表层颗粒,它们在就近沉降后,其携带的丰富盐分仍然汇聚于盐尘风积物中,这就导致出现盐尘中盐分富集的现象。本研究没有收集到被风力远距离搬运的细颗粒物质,这些颗粒物质粒径更细,可能富集了更多可溶性盐离子。

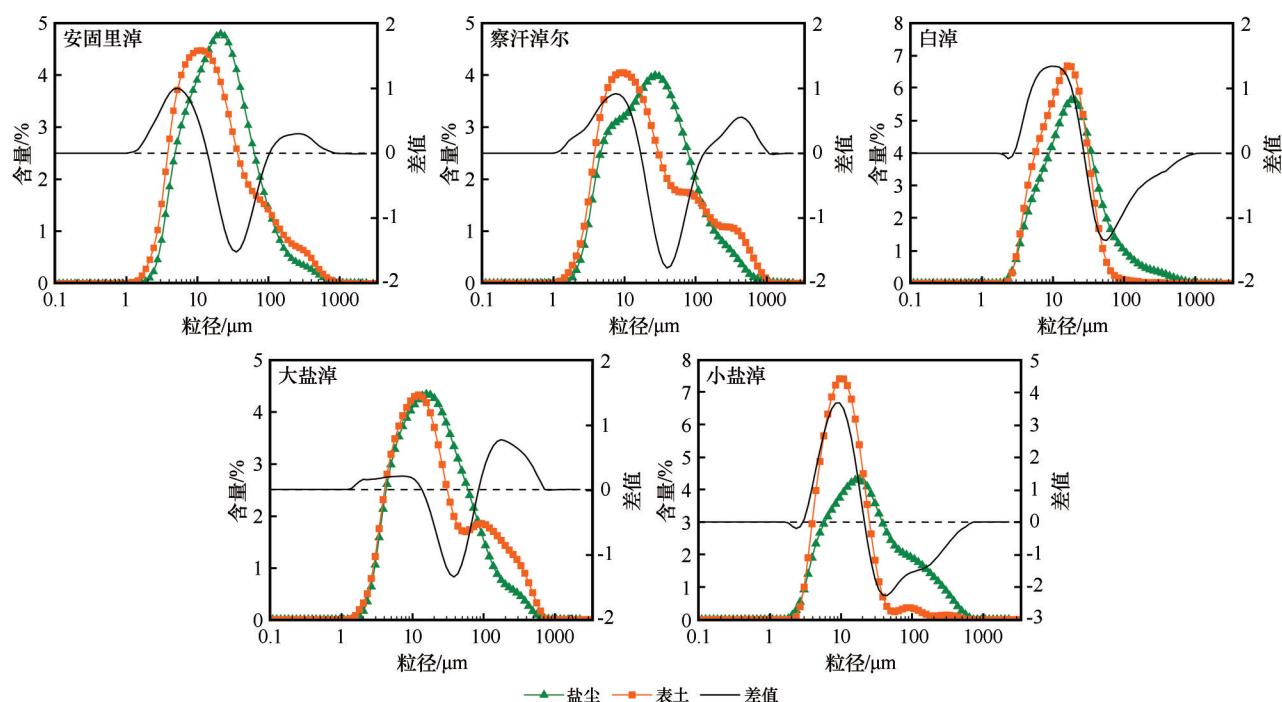


图9 盐尘与表土粒度分布对比

Fig.9 Comparison of grain-size distribution between salt dust and topsoil

3.3 湖盆间盐尘物质组成差异

中型湖盆和小型湖盆盐尘在粒度组成方面没有明显的差异,这应该与风对盐尘颗粒的分选作用有关,即细颗粒物随风力进行长距离输送,而较粗颗粒物就近沉降,从而导致不同规模干涸湖盆的盐尘在粒度组成上趋于一致。

然而,盐尘中盐分含量存在明显差异,这根本上源于主要物源区(即湖盆表土)盐分含量。湖盆的干涸状况是影响表土盐分含量的关键因素^[20]。对5个干涸湖盆的盐尘样品分析表明,中型湖盆(安固里淖和察汗淖尔)的盐分含量显著低于小型湖盆(白淖、大盐淖和小盐淖),这是因为白淖、大盐淖和小盐淖属于季节性干涸湖盆,在干湿交替条件下,强烈的蒸发作用驱动地下水盐分通过毛细管作用持续向表层运移并积聚^[31],导致表土盐化程度高,进而使得由此产生的盐尘含盐量也相应升高。相比之下,安固里淖和察汗淖尔为常年干涸湖盆,地表盐分表聚作用较弱。同时,长期的风力侵蚀和季节性降水淋洗在一定程度上移除了表层盐分,从而降低了湖盆表土的含盐量,致使所产生的盐尘盐化程度相对较轻。

4 结论

坝上地区干涸湖盆盐尘粒度分布、盐分组成与

源区表土具有高度一致性,表明盐尘与源区表土具有密切的物源联系。受风力分选搬运作用影响,盐尘中较粗颗粒物就近沉降,盐尘中0~30 μm粒径的细颗粒物能够被风进行远距离传输,尤其是<20 μm的细颗粒损失最为严重。

风对盐尘颗粒的分选搬运作用,导致干涸湖盆的盐尘粒度组成及粒度参数之间没有显著性差异。地表干涸状况是影响干涸湖盆间盐尘盐分含量的重要因素,季节性干涸湖盆盐尘中盐分及可溶性盐离子含量明显高于常年干涸湖盆。

与农田、草地普通沙尘相比,盐分及可溶性盐离子含量是普通沙尘的上百倍,这些高盐分含量物质对区域生态环境具有严重威胁。

参考文献:

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [2] 苑依笑,王仁德,蒋红军,等.河北坝上地区干涸湖盆表面风沙活动特征及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2025,39(8):116-128.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 岳乐平,杨利荣,李智佩,等.阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J].第四纪研究,2004,24(3):311-317.
- [7] 刘东伟,伊塔娜,王立新,等.干旱区盐碱尘暴的形成、输送及其环境效应[J].气象与环境学报,2015,31(3):104-108.
- [8] 韩旭娇,张国明,雷洁,等.干涸湖床不同类型盐土地表净风吹蚀实验研究[J].干旱区研究,2019,36(1):262-268.
- [9] Gillette D.A.A combined modeling and measurement technique for estimating windblown dust emissions at Owens (dry) Lake, California[J].Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2004, 109(F1): 105-116.
- [10] Mu G, Yan S, Jilil A, et al.Wind erosion at the dry-up bottom of Aiby lake: a case study on the source of air dust[J].Science in China(Series D:Earth Sciences), 2002(0S1): 157-164.
- [11] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J].干旱区研究,2014,31(4):636-642.
- [12] 李思瑶,蒙仲举,祁帅.草原干涸湖床地表粒度特征及其对沙尘释放的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):38-46.
- [13] Liu D, Han L, Kou Z, et al.Exploration of playa surface crusts in Qehan Lake, China through field investigation and wind tunnel experiments [J]. Journal of Arid Land, 2023, 15 (5) : 491-507.
- [14] Mees F, Singer A. Surface crusts on soils /sediments of the southern Aral Sea basin, Uzbekistan[J].Geoderma, 2006, 136 (1): 152-159.
- [15] 耿鋈,张西营,李雯霞,等.柴达木盆地中东部表土盐类矿物分布特征及其与盐尘暴物源联系[J].岩石矿物学杂志,2021, 40(1):121-130.
- [16] 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):22-26.
- [17] Tsoar H, Pyr K. Dust transport and questions of desert loess formation[J].Sedimentology, 1987,34: 139-154.
- [18] Gillette D A, Fryrear D W, Gill T E, et al.Relation of vertical flux of particles smaller than 10 μm to total aeolian horizontal mass flux at Owens Lake[J].Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, 102(D22): 321-329.
- [19] 高素改.河北坝上高原湖淖时空演化规律及其驱动力分析[D].石家庄:河北师范大学,2019.
- [20] 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.
- [21] 蒋红军,王仁德,张茹春,等.坝上地区察汗淖尔湖流域盐尘暴形成风险研究[J].盐湖研究,2024,32(6):48-55.
- [22] 张志栋,常春平,郭中领,等.河北坝上农田、退耕地和天然草地土壤的可风蚀性[J].中国沙漠,2018,38(1):85-91.
- [23] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. Geological Society of America Bulletin, 1914, 25(1): 655-744.
- [24] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters [J].Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [25] 吉力力·阿不都外力,刘东伟,徐俊荣.艾比湖干涸湖底不同地表类型风蚀强度及粉尘输移通量的风洞实验研究[J].中国沙漠,2009,29(1):65-69.
- [26] AKBAR G. Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2015, 13(1): 366-372.
- [27] 张春来,宋长青,王振亭,等.土壤风蚀过程研究回顾与展望[J].地球科学进展,2018,33(1):27-41.
- [28] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M].London,UK:Chapman and Hall, 1941: 104-106.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 赵明亮,李艳红,李发东.新疆艾比湖湿地土壤水盐空间变异性分析[J].湖泊科学,2016,28(6): 1328-1337.

Properties of salt dust in dry lake-basin in the Bashang region of Hebei Province

Yuan Yixiao, Wang Rende, Jiang Hongjun, Gao Shiping, Li Qing, Zhang Tao

*(Institute of Geographical Sciences / Engineering and Technology Research Center for Application and Development of
Geographic Information of Hebei Province, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China)*

Abstract: Under the combined effects of climate change and irrational human activities, many lakes in the Bashang region of Hebei Province have experienced continuous shrinkage and a tendency towards desiccation. The loose and salt-rich sediments on the dry lake-basin surface were entrained into the air under strong wind erosion, ultimately forming salt-dust storms. These storms pose a severe threat to the atmospheric environment and ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei region and even the North China area. Understanding the salt dust physicochemical properties is critical for studying its emission mechanisms, tracing its sources, and assessing salt dust risks. We collected salt-dust deposit samples from five typical dry lake-basins during the spring of 2023 and 2024. Laboratory analyses were conducted to determine grain-size distribution and salinity composition. Based on these results, we investigated the material sources and transport mechanisms of the salt dust, thereby revealing the severity of salt-dust pollution. Results indicated that the salt dust had a close material relationship with the local surface soils, and the fine-grained material within the salt dust can undergo long-distance transport via wind, while the coarser particles tend to settle locally. Wind-driven sorting and transport led to insignificant differences in the particle size composition of salt dust among the dry lake-basins. The salt content was notably higher in seasonally dry lake-basins than perennial dry ones. Compared to ordinary sand dust, salt dust with finer average particle size and higher content of salt and soluble ions posed a greater potential hazard to the environment.

Key words: Bashang region; dry lake-basin; salt dust; particle size; salinity