

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

耿 璠^{1,2,3}, 张西营^{1,2}, 李雯霞^{1,2,3}, 郭晓宁⁴, 张海潇⁴, 唐启亮^{1,2}, 陈 亮^{1,2}

(1. 中国科学院 青海盐湖研究所, 中国科学院 盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4 青海省气象台, 青海 西宁 810001)

摘 要: 柴达木盆地盐湖众多, 表土盐渍化和盐漠化极为发育, 含盐表土经风吹蚀后产生的大量盐尘将危害盆地生态环境和人类健康。笔者在柴达木盆地中东部系统采集 129 个不同类型的表土样品, 对其中盐类矿物成分及分布特征进行了分析。分析结果表明, 表土中的主要盐类矿物是石盐、石膏以及少量的无水芒硝; 盆地中东部含盐量高值区集中分布在尕斯库勒湖以东的一里坪盐湖、西台吉乃尔盐湖和东台吉乃尔盐湖周边以及中部格尔木—诺木洪一带绿洲前缘的区域; 盆地不同表土的含盐量从高到低依次为干盐滩(盐壳)、雅丹、盐化草原、戈壁滩和沙漠。研究结果显示, 雅丹和干盐滩很可能是盐尘暴的主要物源区, 其他类型表土贡献较小; 表土含盐特征及其分布规律可能受区域构造、盐湖演化、气候与水文等多种因素的影响。本文成果可以为柴达木盆地盐尘暴的形成机制和灾害防治等提供重要科学依据。

关键词: 柴达木盆地; 盐尘暴; 盐类矿物; 分布特征

中图分类号: P169.21⁺1; P425.5⁺5⁺

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0121-10

Distribution characteristics of salt minerals on the surface in the middle east of Qaidam Basin and their relationship with the source of salt dust storm

GENG Jun^{1,2,3}, ZHANG Xi-ying^{1,2}, LI Wen-xia^{1,2,3}, GUO Xiao-ning⁴, ZHANG Hai-xiao⁴,
TANG Qi-liang^{1,2} and CHEN-Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qinghai Meteorological Observatory, Xining 810001, China)

Abstract: There are many salt lakes in the Qaidam Basin, and topsoil salinization and salinization are well developed. A large amount of salt dust produced by wind erosion of these saline topsoil will harm the ecological environment and human health of the basin. Therefore, the authors systematically collected 129 different types of topsoil samples in the middle east of Qaidam Basin, and analyzed the composition and distribution characteristics of salt minerals. The result shows that the main salt minerals in the topsoil include halite, gypsum and a small amount

收稿日期: 2020-09-10; 接受日期: 2020-11-12; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0805); 青海省应用基础研究计划项目(2018-ZJ-723); 青海省创新平台项目(2018-ZJ-T10)

作者简介: 耿 璠(1995-), 女, 汉族, 硕士研究生, 盐湖资源与盐湖环境变化专业研究方向, E-mail: gengyun18@mails.ucas.ac.cn;
通讯作者: 张西营(1977-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 博士生导师, 盐湖资源与盐湖环境变化专业研究方向, E-mail: xyzhchina@isl.ac.cn。

of thenardite; In the middle east of the basin, the high-value area of salt content is concentrated in the vicinity of Yiliping Salt Lake, East-West Ginair Lake in the east of Gas Hure Lake and the area of the oasis front in central Golmud-Nuomuhong area; the salt content of different topsoil in the basin is in order of playa, Yardang, saline meadow, Gobi desert and desert. The comprehensive analysis shows that Yardang and playa are probably the main source areas of salt dust storm, and other types of topsoil contribute less; the characteristics and distribution of salt in topsoil may be influenced by many factors, such as structure, salt lake evolution, climate and hydrology. The results of this study can provide important scientific basis for the formation mechanism of salt dust storm and disaster prevention in Qaidam Basin.

Key words: Qaidam Basin; salt dust storm; salt minerals; distribution characteristics

Fund support: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), (2019QZKK0805); Applied Basic Research Program of Qinghai Province (2018-ZJ-723); Science and Technology Plan of Qinghai Province (2018-ZJ-T10)

在干旱和半干旱地区,干涸湖床释放的粉尘中含有大量危害人体健康的细颗粒物(可溶盐离子、杀虫剂、重金属等)(Jilili Abuduwaili, 2010; King *et al.*, 2011),因而受到人们越来越多的关注(Osamu *et al.*, 2003; Jill *et al.*, 2019)。这些有害的细颗粒物经长距离搬运,会对更广泛区域的生态环境造成负面影响(吐尔逊·吐尔洪等, 2009; 刘东伟等, 2011; Pan and Wang, 2015; Tang *et al.*, 2019)。因此,国内外许多学者针对此类粉尘污染开展了大量研究工作(Gill *et al.*, 2002; 胡克等, 2006; 吉力力·阿不都外力等, 2007; Baddock *et al.*, 2016; Klose *et al.*, 2019)。

一般认为,盐尘暴主要是由于干旱半干旱地区干涸湖底富盐沉积物和邻近强盐渍化土壤风蚀所致的一种特殊尘暴。位于干旱或半干旱地区的内陆湖泊,由于气候变暖和人类不合理的开发利用,使处在内陆河流尾间的湖泊水源补给大大减少,加上区域降水量少、蒸发量大的气候特征,使湖泊逐渐萎缩并积累大量盐分,一旦湖床裸露地表则成为释放盐尘的主要源地(吉力力·阿不都外力, 2012)。但含盐量具体多少能被称为盐尘暴,目前还没有明确的定义,但根据被称为盐尘暴的相关研究来看,北京降尘中的可溶盐含量为2.36%(韩同林等, 2007; 刘艳菊等, 2010),新疆艾比湖下风向不同监测点大气降尘的含盐量为4.3%~18.5%(吉力力·阿不都外力, 2012),吉林西部碱尘气溶胶含碳酸盐和氯盐分别为4.4%和2.7%(陈兵等, 2004),天津滨海新区盐尘含量为9.2%~13.7%(张民胜等, 2006),这些尘暴均被研究者称为盐尘暴且得到较为广泛的认同。格尔木市位于柴达木盆地中南部,是盆地内最重要的

居民聚集区和经济最发达的城市(田森等, 2017)。格尔木市沙尘暴频发,由于这些沙尘气溶胶中含有大量可溶盐组分,含量为19.8%(盛阳, 2015),其本质上就是盐尘暴(吉力力·阿不都外力等, 2007)。盆地内常年以西风为主(祁贵明等, 2010),在盛行风作用下,盆地地表各类含盐物质以盐尘暴的形式对格尔木市及周边地区居民的健康和生态环境造成严重损害。为了深入了解盐尘暴物源区含盐物质分布情况,本文以尘暴频发的柴达木盆地中东部地区(包括格尔木市)为研究区,对该区域表土进行了系统采样及矿物学分析,以期研究区盐尘暴物源及形成机制研究提供科学依据。

1 区域概况

柴达木盆地位于青藏高原东北部,四周被阿尔金山、昆仑山和祁连山所围限,是我国内陆大型山间断陷盆地之一。侏罗纪以来,盆地大体经历了山前拗陷、整体拗陷和隆起褶皱3个阶段,盆地内主要分布着新生代以来的沉积物,尤其以第四系分布最为广泛(王春男等, 2008)。随着青藏高原的不断隆升,柴达木盆地湖盆先后经历了发生、发展、衰退的演变过程,最终从统一的柴达木古湖逐渐演变为次级成盐凹陷普遍发育的现代分布格局(张彭熹, 1987; 朱筱敏等, 2003; 袁四化等, 2008)。

柴达木盆地内部平均海拔为3 000 m,气候极端干旱,西北部年平均降水量少于20 mm,而蒸发量超过2 000 mm,植被种类稀少且覆盖度很低,植被覆盖度较高的区域主要分布在盆地东南低山区和中部格尔木—诺木洪一带绿洲核心区前缘以及苏干湖东部

冲积平原区(张斯琦等, 2019)。柴达木盆地盐湖众多,表土盐渍化和盐漠化极为发育。随着气候的变迁,一些湖泊萎缩或干枯变为干盐滩,为地表风蚀和风积地貌的形成演化提供了大量物质基础(张西营等, 2020)。盆地年平均风速为 2.5 m/s,由于受海拔和地形的影响,各地的风速差异较大,其中茫崖地区风速最大,年平均风速在 5.0~6.5 m/s 之间,年平均大风日数高达 62 天;其次是冷湖、德令哈北部哈拉湖地区(年平均风速在 4.0~6.0 m/s)和处于中东部盆地底部的诺木洪地区(年平均风速在 4.5~6.5 m/s),风速最小的区域位于盆地东部的都兰和乌兰地区(李万志, 2017)。盆地西北部强劲的风力使得这些地区频繁出现沙尘暴。这些自然条件非常有利于盐尘暴的发生发展,柴达木盆地由此也成为我国重要的盐尘暴频发地区之一。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2019 年 11 月,笔者在柴达木盆地中东部对表土开展了大范围实地采样工作,以期深入了解不同表土类型分布及其含盐情况。样品采集主要集中于柴达木盆地昆仑山北缘、祁连山南缘和沿着 315 国道南侧的沉积区(图 1)。图 1 中柴达木盆地边界由 DEM 遥感影像提取获得,DEM 遥感影像下载网址为 <http://glovis.usgs.gov/>。采样点尽量远离人类活动范围,样品具有较好的代表性,采样面积为 15 cm×15 cm,采样深度为 5~10 cm,样品采集后放入自封袋编号,并对周围环境进行拍照和描述。共采集表土样品 129 个。

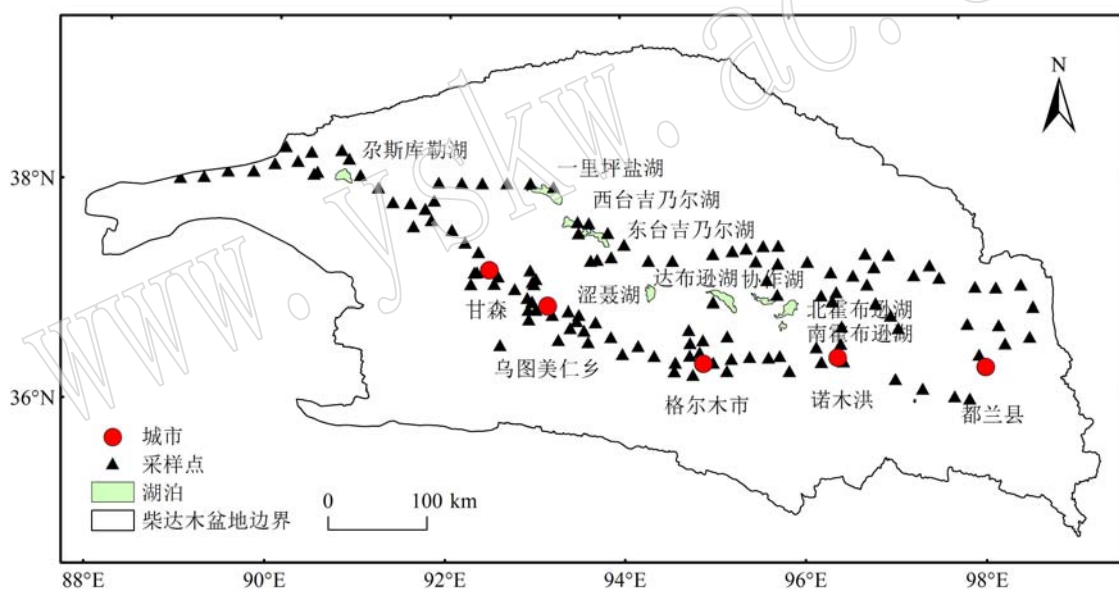


图 1 研究区表土采样点位置示意图

Fig. 1 The sampling location of surface soils in the study area

研究区域主要的地表覆盖类型为戈壁滩、盐化草原、沙漠、雅丹、干盐滩等(图 2),宏观上基本以盐湖为中心向四周呈环带状分布。戈壁滩广泛分布在昆仑山北麓的冲洪积平原上,植被稀疏,主要为砾石和粗砂。盐化草原主要是发育在地下水溢出地带的盐渍化土分布区,植被以耐盐碱的盐生植物为主,裸地则为白色盐碱所覆盖。沙漠主要集中分布在西起尕斯库勒湖、东至乌图美仁一带以及格尔木以南的昆仑山北麓和夏日哈—香日德一带,是柴达木盆地主要的沙漠分布区之一。在盆地中部平坦的一里

坪、台吉乃尔地区,分布着大面积的古湖相地层风蚀后形成的雅丹地貌,沉积物以细砂、粉砂和粘土组成,可见较多无色透明石膏碎片。盐湖主要分布在环带状中心部位,包括察尔汗、东台吉乃尔、西台吉乃尔、一里坪等盐湖(有湖表水的盐湖和大面积的干盐滩)。

2.2 样品处理

取样品 50 g 左右放置在蒸发皿中,在烘箱中进行低温烘干,风速调至最低,防止样品间相互污染,时间为 12 h。采集的样品中有砾石等粗颗粒物,而

布图(图3)。

图3a显示,盆地内石盐的分布特征表现为靠近山区的部分含盐量较少,越靠近中心盐湖区含盐量越高。石盐高含量分布区主要位于两个区域:靠近一里坪盐湖、西台吉乃尔湖和东台吉乃尔湖附近的区域,石盐含量9%~35%;格尔木—诺木洪—带绿洲

核心区前缘,石盐含量也普遍较高,介于5%~13%之间。石膏除了在盆地东南部含量极低之外,在盆地的中西部分布较为普遍(图3b)。与石盐的分布规律相反,石膏在远离盐湖区的山前戈壁带便已沉淀下来,石膏高含量分布区集中在油沙山—甘森—一里坪盐湖以西、尕斯库勒湖以东的范围内,在这一范

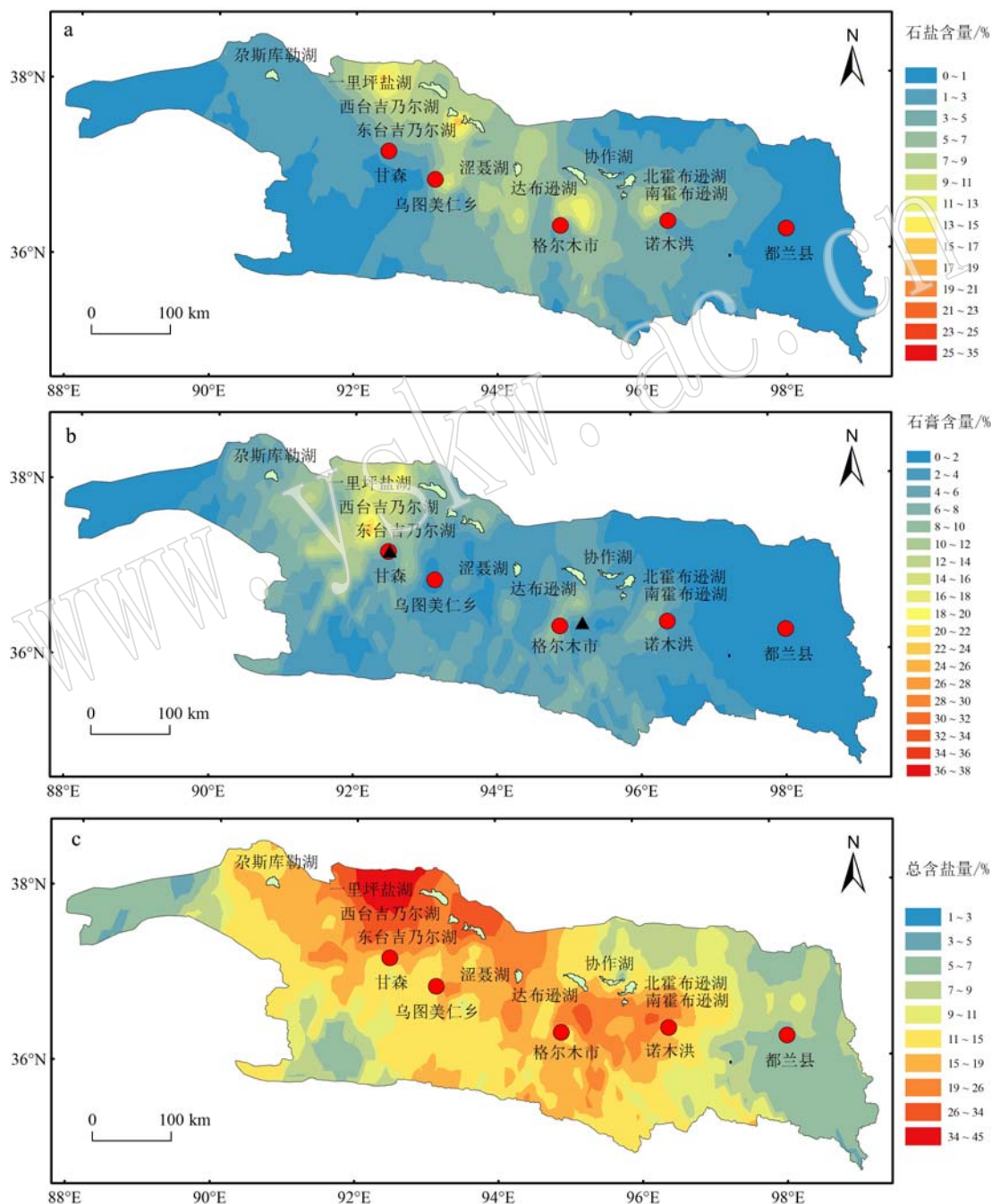


图3 研究区表土中各种盐类矿物含量的空间分布(黑色三角形代表无水芒硝采样位置)

Fig. 3 Spatial distribution of salt mineral content in different surface soils in the study area (black triangle representing the sampling location of the nardite)

围内,石膏的平均含量为8%左右。需要注意的是,由于在格尔木附近采集的1个样品中的石膏含量高达82%,异常高于其余表土中的含量,可能是植被与土壤共同作用所致,故剔除该样品以免影响插值结果。含有无水芒硝的两个表土样品,一个位于格尔木附近的盐化草原中,另一个位于甘森附近的盐化草原(用黑色三角形代表)。据盐类矿物总量分布图(图3c)分析发现,盆地中东部含盐量高值区域集中分布在盐湖及附近区域,总体上叠加了石盐和石膏的范围。

盆地内各种地表类型的表土含盐量存在明显差异(表2)。不同地表类型的平均含盐量从大到小依次为:盐壳、雅丹、盐化草原、戈壁滩、沙漠。盐壳和雅丹的含盐量明显高于其他地表类型,而沙漠的含盐量最低。干旱区干涸湖底盐分表聚一般有两种形式:一是随湖水矿化度的升高,盐类矿物自行沉降;二是湖面萎缩后,裸露的干涸湖底在蒸发作用下,地下盐水的溶解质随毛管移至地表聚集(刘东伟等,2009)。此次实地考察发现,在盐湖周边,采样位置的表面均已形成了坚硬的外壳,即盐壳。表面结壳的干盐滩,在所有地貌类型中含盐量最高,为32%,刘东伟等(2009)在分析艾比湖干涸湖底不同地表形态之间的盐分差异时,同样发现结晶盐壳的含盐量最高。雅丹地貌的含盐量为22.80%,这与鲍锋(2016)得到的察尔汗盐湖区雅丹沉积物中易溶盐含量最高的结果一致。雅丹地层软硬互层、疏松且多断层与节理,主要由细颗粒的粘土或细粉砂等组成(李玉辉等,2017;郜学敏等,2019),表土中的含盐量最高可达36%,平均含盐量比沙漠高7倍,比戈壁滩高4倍。盐化草原不同于其他地貌类型,土壤盐分与生长在该区域的植被之间存在一定的相互作用,有研究表明表层土壤20 cm深度所含的盐分类型对植被物种的分布影响最大(姜小妮,2019),同时这些植物通过强大的根系从底层吸取盐分,并以残落物的形式返回地面,随着植物遗体被分解,会使土壤重新聚集一定的盐分,因此盐化草原的积盐情况相对复杂,含盐量的范围变幅很大(0~88%)。研究区沙漠主要分布在西起苏库勒湖东至乌图美仁一带以及格尔木以南的昆仑山北麓,个别出现在盐湖区附近。沙丘多为流动性沙丘,表层沉积物以细砂为主,含盐量偏低,为2.92%。盆地内戈壁滩的分布面积最广,超过3/4的戈壁无植被覆盖,平均含盐量高于沙漠,为5.84%。图4表示各种地表中不同

类型盐类矿物的含量,从中可以看出戈壁滩和盐壳中石盐和石膏的含量有明显差异,其余类型表土中石盐和石膏的含量基本一致。戈壁滩主要以石膏为主,盐壳中石盐的含量明显大于石膏。总体上,研究区各种表土类型基本呈环带状分布,即从四周山区向盐湖区过渡依次出现戈壁滩、沙漠、盐化草原、干盐滩、雅丹,含盐量也随之逐渐增大。

表2 研究区不同类型表土含盐量 $w_B/\%$

Table 2 Salt content of different surface soils in the study area

表土类型	戈壁滩	盐化草原	沙漠	干盐滩(盐壳)	雅丹
样品数量/个	57	27	11	3	5
平均值	5.84	13.04	2.92	32.00	22.80
最大值	39.00	88.00	11.00	39.00	36.00
最小值	0.00	0.00	0.00	20.00	14.00

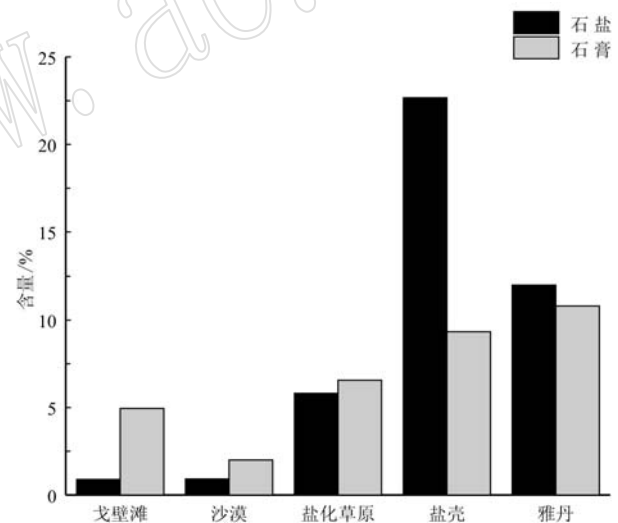


图4 研究区盐类矿物在不同表土中的含量

Fig. 4 Content of salt minerals in different surface soils in the study area

4.2 表土盐类矿物空间分布的影响因素

盆地内盐类矿物的空间分布格局与盆地自中生代以来发生的构造运动密不可分。受到区域构造作用的影响,从渐新世到上新世,盆地内先后出现了一里坪凹陷沉降区和三湖凹陷沉降区,直至第四纪末期形成了以盆地中南部为主要汇水区域的现代盐湖(杨津等,2009)。一里坪盐湖、西台吉乃尔盐湖和东台吉乃尔盐湖及其附近区域以及格尔木—诺木洪一带绿洲前缘区的表土依然呈现出高含盐量的特征,现代的高含盐量区域仍然受控于曾经因构造运

动所引起的盐湖沉积中心的变化造成的多个早期的沉积区域。尽管盆地西部相对于东部而言地势较高,但含盐量仍然比较高,原因在于盆地西部新近系、古近系含盐地层大面积出露,受新构造运动影响,构造裂隙发育,其含盐地层中的盐分大部分被地下水或地表水溶淋带入湖区,部分由于盆地内强烈的蒸发作用直接在地表析出(王春男等, 2008)。因此,盆地早期构造运动导致的古含盐地层的分布很大程度上影响了现代表土中含盐量的空间分布格局。

盆地内盐类矿物的空间分布格局与盆地内降水量、地表和地下径流量以及蒸发量的空间变化具有一定的相关性。盆地内年降水量各地差异极为显著,整体表现为由东向西逐渐减少,靠近山区附近的降水多,盐湖区降水少。同时,盆地东南部河网较发育,西北部河网稀疏,径流量的分布规律与降水量大致相同,表现为由四周山区向盆地中心汇集,最后补给到各个湖泊中。盆地内的年蒸发量在 1 200 ~ 3 500 mm 之间,其地区分布与降水量相反,在察尔汗最大为 3 501.6 mm,在盆地西部的茫崖和冷湖地区也相对较高,为 3 000 mm 左右,而越往东或靠近山区附近的蒸发量相对较低(杨贵林等, 1996)。整个盆地内的含盐量在盐湖区及其附近表土达到最高;相反,靠近山区的部分,含盐量情况基本一致,普遍较低。这可能是因为降水多、径流量大的区域,地势也相对较高,因此形成的地下水主要以溶滤作用为主,可溶性离子随水迁移,不易积聚地表。越向盐湖区靠近,蒸发量越大,地下水位埋藏变浅,盐化作用加强,可溶性离子逐渐富集,最终通过毛细作用在地表析出大量的盐类矿物。由于石盐和石膏的溶解度存在差异,所以在空间上表现出明显的沉积分异和分带性;在地下水位较浅的戈壁带常分布着石膏,而在湖积平原积聚大量的石盐。

在强风条件下,具有表面卤水或海水的地区会出现强风移送盐分的现象。在美国的索尔顿海附近及其他一些靠近海岸的区域的土壤中均发现高的盐分含量(张民胜等, 2006; King *et al.*, 2011),研究认为是因为当风吹过富含盐的卤水时,使湖水不断向岸边冲刷,或将富含盐的泡沫直接吹向空中,并落到附近表土中。就柴达木盆地而言,仅察尔汗盐湖盐田面积就多达 1 000 km²,并且湖区强风天气频发,很容易将卤水飞沫吹扬起来,这将有可能是盆地内盐湖区附近表土含盐量较高的另一个因素。总

之,由于受到构造、降水、地表和地下径流量以及蒸发量等多种因素之间的相互作用,盆地内盐类矿物易于在古含盐地层和盐湖区附近积聚,表土含盐量主要表现为由山区向中心凹陷区逐渐增加,最终在尕斯库勒湖以东的一里坪盐湖、西台吉乃尔湖和东台吉乃尔湖附近以及中部格尔木—诺木洪一带绿洲前缘形成了高含盐区。盆地内表土盐分空间分布特征是多种因素相互影响和叠加作用的结果。

4.3 柴达木盆地盐尘暴物质来源初步分析

高含盐表土是释放含盐粉尘的重要源区。粉尘释放一般需要 3 个条件:强劲的风力、丰富的尘源和不稳定的空气层结,丰富的尘源是盐尘暴形成的物质基础(王涛等, 2001)。不同的地表覆盖类型将影响表土的风蚀能力,进而影响粉尘的排放量。因此,需要通过分析不同地貌类型的地表粗糙度来进一步确定盆地内哪些区域可以成为产生盐尘暴的主要源区。

表面结壳是干盐湖的一个重要特征,尽管含盐量最高,但其固结的表面可以有效减少表面受风蚀的能力,直接影响细颗粒的供应。固结的盐壳被许多学者认为是供应能力有限的尘源(Macpherson *et al.*, 2008; Baddock *et al.*, 2016),但一些研究发现,经过盐壳表面的跃移颗粒通过不断的磨蚀和撞击作用成为其持续释放粉尘的主要驱动因素(Shao *et al.*, 1993; Macpherson *et al.*, 2008; Baddock *et al.*, 2011)。可见,尽管坚硬的盐壳可以防止风蚀,但是受到物理磨蚀后依然可以成为重要的粉尘源区。同时,干涸湖底富盐沉积物的结壳类型和结壳强度也会随着盐分含量、地下水深浅、季节变化、水文特征等因素的相互作用在时空上呈现出高度可变性,进而使得供应粉尘的能力有所差异(Reheis, 2006; Reynolds *et al.*, 2007; King *et al.*, 2011)。柴达木盆地盐湖面积分布广泛,干盐湖或干盐滩总面积约 10 000 km²(张彭熹, 1987),在盐湖区附近不同的地理位置,含盐沉积物表面形态与强度存在差异,蓬松或弱结壳的表面在低风速作用下便会被吹蚀,而已经形成的坚硬盐壳在受到跃移颗粒物撞击或强风吹蚀造成表层盐壳粉碎后也能提供一定量的盐尘,因此位于盆地内的干盐滩是重要的盐尘物源(吉力力·阿不都外力, 2012)。

一里坪、东西台吉乃尔盐湖周边地区广泛发育雅丹地貌,该类型表土具有含盐量高、突出地表、土质相对松软等特征,极易被风力侵蚀,很可能也是盐

尘的主要来源之一。而分布在盆地不同区域内的裸露沙地,因为含盐量低而难以成为盐尘释放的主要来源,但其可以为下风向提供大量的碎屑物质。盆地内戈壁滩的空间覆盖面积广阔,表土主要为难以被吹扬的砾石和粗砂,起到削弱风力的作用,虽然可以提供一定的粉尘,但很难提供大量的含盐细颗粒物。梅凡民等(2004)研究发现,相比其他地表覆盖类型,草原分布区下垫面粗糙度最大,虽然盐化草原表土的含盐量相对较高,但难以被风力吹扬至大气中,因而不会成为主要的粉尘源区。除了上述表土类型外,湖表卤水的飞沫也可能是释放盐分的来源。

总之,干盐滩和雅丹是盆地内含盐量最高的两种地表类型,并且集中分布在盐湖区附近,地表裸露,基本没有植被覆盖,虽然由于表面粗糙度的不同,提供粉尘的能力有所差异,但将会是最有可能为盐尘暴提供盐分的区域。

5 结论

(1) 柴达木盆地中东部表土物质中含有较多的盐类矿物,主要包括石盐、石膏和少量的无水芒硝,平均含量为 8.79%。空间上,表土含盐量以盐湖为中心,向四周逐渐减小;不同类型表土含盐量从大到小的顺序依次为:盐壳、雅丹、盐化草原、戈壁滩、沙漠。

(2) 各类表土中,雅丹和干盐滩分布区很可能是盆地内盐尘暴中可溶性盐分的主要源区;其他类型表土由于含盐量低或难以被风力扬起,贡献较小。

(3) 研究区含盐表土一旦经强风吹蚀后将产生大量的盐尘,经过本地沉降和一定距离的远程输送,将对柴达木盆地的生态环境和人类健康产生危害,有必要采取措施遏制其带来的不利影响。

致谢 中国科学院青海盐湖研究所的苗卫良副研究员、李永寿副研究员以及王二龙、李姜瑶参加了野外工作,王波、李园、薛园、朱广琴、马修臻老师在分析过程给予大量帮助,在此一并致谢。

References

Baddock M C, Ginoux P, Bullard J E, *et al.* 2016. Do modis-defined dust sources have a geomorphological signature?[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2 606~2 613.

Baddock M C, Zobeck T M, Scott Van Pelt R, *et al.* 2011. Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: Cattle trampling effects[J]. *Aeolian Research*, 3(1): 31~41.

Bao Feng. 2016. Development Environment and Process of Aeolian Landforms in the Chaerhan Salt Lake Area, Qaidam Basin[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University(in Chinese).

Gao Xuemin, Dong Zhibao, Duan Zhenghu, *et al.* 2019. Grain-size characteristics of long ridge Yardangs in the Northwestern Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Desert Research*, 39(2): 79~85(in Chinese).

Gill T E, Gillette D A, Niemeyer T, *et al.* 2002. Elemental geochemistry of wind-erodible playa sediments, Owens Lake, California[J]. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 189(1): 209~213.

Han Tonglin, Lin Jingxing, Wang Yong, *et al.* 2007. Nature and control of "dust storms" in the Beijing-Tianjin region, China—A case study of the dust storm in Beijing on April 16, 2006[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 117~127 (in Chinese).

Hu Ke, Chen Bing, Jie Dongmei, *et al.* 2006. Study on element compositions of alkaline dust aerosols in western Songnen plain, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 36(3): 417~423 (in Chinese).

Jiang Xiaoni. 2019. Influence of Water and Salinity in Soil-groundwater System on Vegetation Distribution in Southern Qaidam Basin[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese).

Jilili Abuduwaili. 2010. Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions[J]. *Journal of Arid Land*, (2): 144~150.

Jilili Abuduwaili, Hu Ruji, Wang Yajun, *et al.* 2012. Lakes of Aridland and Salt-dust Storms[M]. Beijing: China Environmental Press, 1~301(in Chinese).

Jilili Abuduwaili, Xu Junrong, Mu Guijin, *et al.* 2007. Impact of saline dust on soil salt and landscape change surrounding the Ebinur Lake Region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(6): 928~939(in Chinese).

Jill E J, Mitiasoa R, Humberto L, *et al.* 2019. The disappearing Salton Sea: A critical reflection on the emerging environmental threat of disappearing saline lakes and potential impacts on children's health[J]. *Science of the Total Environment*, 663: 804~817.

King J, Etyemezian V, Sweeney M, *et al.* 2011. Dust emission variability at the Salton Sea, California, USA[J]. *Aeolian Research*, 3(1): 67~79.

Klose M, Gill T E, Etyemezian V, *et al.* 2019. Dust emission from crusted surfaces: Insights from field measurements and modelling[J].

- Aeolian Research, 40: 1~14.
- Li Wanzhi. 2017. Research on wind speed characteristics of qaidam basin in recent 54 Years[J]. Journal of Qinghai Meteorology, (1): 40~44 (in Chinese).
- Li Yuhui, Zheng Mianping, Zhao Xiaoqing, *et al.* 2017. Sedimentary characteristics and environmental significance of Yadan profile in the Northern Dabsun Lake of Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39(6): 787~794(in Chinese).
- Liu Dongwei, Jilili Abuduwaili, Lei Jiaqiang, *et al.* 2011. Saline dust storm and its ecological effects[J]. Journal of Desert Research, 31(1): 168~173 (in Chinese).
- Liu Dongwei, Jilili Abuduwaili, Mu Guijin, *et al.* 2009. Chemical components and transport mechanics of wing-erodible playa sediments, Ebinur Lake, Xinjiang[J]. China Environmental Science, 29(2): 157~162 (in Chinese).
- Liu Lianyou, Wang Jianhua, Li Xiaoyan, *et al.* 1998. Wind tunnel simulation determination of erodible particles in cultivated soil[J]. Chinese Science Bulletin, 43(15): 1 663~1 666(in Chinese).
- Liu Yanju, Han Tonglin, Pang Jianfeng, *et al.* 2010. Origin of the salt dust storm, Beijing, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(5): 713~722(in Chinese).
- Macpherson T, Nickling W G, Gillies J A, *et al.* 2008. Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 113(F2): 1~16.
- Mei Fanmin, Zhang Xiaoye, Cao Junji, *et al.* 2004. Quantitatively assessing the influence of various surface land cover types on wind erosion intensity in dust sources in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 24(1): 119~124 (in Chinese).
- Osamu K, Masahiro H, Momoko C, *et al.* 2003. Respiratory symptoms and pulmonary function among school-age children in the Aral Sea region[J]. Archives of Environmental & Occupational Health, 58(11): 676~682.
- Pan Y P and Wang Y S. 2015. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(2): 951~972.
- Qi Guiming, Wang Fake, He Haicheng, *et al.* 2010. Surface and low altitude wind field characteristics in Golmud city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 24(6): 118~120 (in chinese).
- Reheis M C. 2006. A 16-year record of eolian dust in Southern Nevada and California, USA: Controls on dust generation and accumulation [J]. Journal of Arid Environments, 67(3): 487~520.
- Reynolds R L, Yount J C, Reheis M, *et al.* 2007. Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 32(12): 1 811~1 827.
- Shao Y, Raupach M R and Findlater P A. 1993. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 98(D7): 719~926.
- Sheng Yang. 2015. Physical and Chemical Characteristics of Dust Aerosol from Golmud and Its Source Analysis[D]. Nanjing Normal University (in Chinese).
- Tang Mingjin, Zhang Huanhuan, Gu Wenjun, *et al.* 2019. Hygroscopic properties of saline mineral dust from different regions in China: Geographical variations, compositional dependence, and atmospheric implications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(20): 1~14.
- Tian Sen and Zhang Jiefang. 2017. Study on the development of chemical industry cluster of salt lake in Golmud[J]. Chemical Enterprise Management, (11): 149(in Chinese).
- Tuerxun Tuerhong, Jilili Abuduwaili, Aikebaier Yilahong, *et al.* 2009. Impact of saline dust on the physiological properties of plants in the Ebinur Lake Region[J]. Arid Zone Research, 26(4): 533~542(in Chinese).
- Wang Chunnan, Guo Xinhua, Ma Mingzhu, *et al.* 2008. Ore-forming geological background of K-Mg salt in Qarhan Salt lake[J]. Northwestern Geology, 41(1): 97~106(in Chinese).
- Wang Tao, Chen Guangting, Qian Zheng'an, *et al.* 2001. Situation of sand-dust storms and countermeasures in north China[J]. Journal of Desert Research, 21(04): 7~12(in Chinese).
- Yang Guilin and Zhang Jingxian. 1996. The Hydrological Features of Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 13(1): 7~13(in Chinese).
- Yang Jin, Huang Zhongfan, Dai Fugui, *et al.* 2009. Quaternary: The time for Qaidam Basin fell into its final configuration[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 16(4): 51~53(in Chinese).
- Yuan Sihua, Liu Yongjiang, Ge Xiaohong, *et al.* 2008. Uplift period of the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Evidences from the Altyn Mountains and Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(5): 413~421(in Chinese with English abstract).
- Zhang Minsheng, Yuan Jianjun and Guo Yuwen. 2006. Cause, hazard and ecological control of salt dust storm in Tianjin coastal area[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 35(4): 29~32(in Chinese).
- Zhang Pengxi. 1987. Salt Lake in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhang Siqi, Chen Hui, Song Minghua, *et al.* 2019. Spatial and temporal variation of fractional vegetation cover and its relationship with environmental factors in the Qaidam basin during 2000~2015[J]. Arid Land Geography, 42(5): 1 124~1 132(in chinese).

- Zhang Xiyi, Li Wenxia, Geng Jun, *et al.* 2020. Salt dust storms and their impact on resources and ecological environment in Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 28(1): 11~17 (in Chinese).
- Zhang Xuefei and Zheng Mianping. 2017. Research progress of salt minerals in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(12): 72~76(in Chinese).
- Zhu Xiaomin, Kang An, Han Dexin, *et al.* 2003. Relation among quaternary environmental evolution, tectonic deformation in the Qaidam Basin and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geology*, (3): 367~376(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 鲍 锋. 2016. 柴达木盆地察尔汗盐湖地区风沙地貌发育环境与过程[D]. 西安: 陕西师范大学.
- 陈 兵, 胡 克, 介冬梅, 等. 2004. 吉林西部碱尘气溶胶矿物与元素组成和来源研究[A]. 中国颗粒学会 2004 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议文集[C]. 746~751.
- 部学敏, 董治宝, 段争虎, 等. 2019. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 39(2): 79~85.
- 韩同林, 林景星, 王 永, 等. 2007. 京津地区“沙尘暴”的性质和治理[J]. *地质通报*, 26(2): 117~127.
- 胡 克, 陈 兵, 介冬梅, 等. 2006. 松嫩平原西部碱尘气溶胶的元素特征分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(3): 417~423.
- 姜小妮. 2019. 柴达木盆地南部土壤-地下水水盐环境对植被分布的影响研究[D]. 西安: 长安大学.
- 吉力力·阿不都外力, 胡汝骥, 王亚俊, 等. 2012. 干旱区湖泊与盐尘暴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1~301.
- 吉力力·阿不都外力, 徐俊荣, 穆桂金, 等. 2007. 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*, 29(6): 928~939.
- 李万志. 2017. 近 54 年柴达木盆地风速特征研究[J]. *青海气象*, (1): 40~44.
- 李玉辉, 郑绵平, 赵小庆, 等. 2017. 柴达木盆地达布逊湖北雅丹剖面沉积特征及其环境意义[J]. *地球科学与环境学报*, 39(6): 787~794.
- 刘东伟, 吉力力·阿不都外力, 雷加强, 等. 2011. 盐尘暴及其生态效应[J]. *中国沙漠*, 31(1): 168~173.
- 刘东伟, 吉力力·阿不都外力, 穆桂金, 等. 2009. 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*, 29(2): 157~162.
- 刘连友, 王建华, 李小雁, 等. 1998. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J]. *科学通报*, 43(15): 1 663~1 666.
- 刘艳菊, 韩同林, 庞健峰, 等. 2010. 北京地区盐碱尘暴粉尘物质的主要来源[J]. *地质通报*, 29(5): 713~722.
- 梅凡民, 张小曳, 曹军骥, 等. 2004. 定量评价中国北方粉尘源区地表覆盖类型对表土风蚀强度的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 24(1): 119~124.
- 祁贵明, 王发科, 贺海成, 等. 2010. 格尔木地面、低空风场特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 24(6): 118~120.
- 盛 阳. 2015. 格尔木地区沙尘气溶胶理化特征及其来源分析[D]. 南京师范大学.
- 田 森, 张洁芳. 2017. 格尔木盐湖化工产业集群发展研究[J]. *化工管理*, (11): 149.
- 吐尔逊·吐尔洪, 吉力力·阿不都外力, 艾克拜尔·伊拉洪, 等. 2009. 艾比湖盐尘对植物生理性状的影响[J]. *干旱区研究*, 26(4): 533~542.
- 王春男, 郭新华, 马明珠, 等. 2008. 察尔汗盐湖钾镁盐矿成矿地质背景[J]. *西北地质*, 41(1): 97~106.
- 王 涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 2001. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. *中国沙漠*, 21(4): 7~12.
- 杨贵林, 张静娴. 1996. 柴达木盆地水文特征[J]. *干旱区研究*, 13(1): 7~13.
- 杨 津, 黄忠范, 戴福贵, 等. 2009. 柴达木盆地的最终定型期——第四纪[J]. *断块油气田*, 16(4): 51~53.
- 袁四化, 刘永江, 葛肖虹, 等. 2008. 青藏高原北缘的隆升时期——来自阿尔金山和柴达木盆地的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(5): 413~421.
- 张民胜, 袁建军, 郭育文. 2006. 天津滨海新区盐尘暴成因、危害及生态治理探讨[J]. *盐业与化工*, 35(4): 29~32.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社.
- 张斯琦, 陈 辉, 宋明华, 等. 2019. 2000~2015 年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J]. *干旱区地理*, 42(5): 1 124~1 132.
- 张西营, 李雯霞, 耿 望, 等. 2020. 柴达木盆地盐尘暴及其资源生态环境影响[J]. *盐湖研究*, 28(1): 11~17.
- 张雪飞, 郑绵平. 2017. 青藏高原盐类矿物研究进展[J]. *科技导报*, 35(12): 72~76.
- 朱筱敏, 康 安, 韩德馨, 等. 2003. 柴达木盆地第四纪环境演变、构造变形与青藏高原隆升的关系[J]. *地质科学*, (3): 367~376.