

doi:10.7515/JEE201403002

# 西北干旱区艾比湖典型区域蒸发盐动态变化特征及其对风蚀的响应初探

葛拥晓<sup>1,2</sup>, 吉力力·阿不都外力<sup>1</sup>, 马龙<sup>1</sup>, 刘东伟<sup>3</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 内蒙古大学 环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

**摘要:** 为了解干涸湖底不同区域风蚀作用下蒸发盐动态变化的分异特征, 选择西北干旱区艾比湖干涸湖底为研究区, 选取西北部间歇性干涸湖底(S1)、湖滨沙丘(S2)、东南部历史时期干涸湖底(S3) 3个典型区域, 对干涸湖底不同区域沉积物蒸发盐总盐含量的变化特征及其对风蚀的响应分异进行了研究。实验结果表明: ①不同区域蒸发盐含量差别较大。三个研究区中S1表层蒸发盐含量最高, 可达 $101.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; S3含量次之, 表层最高时为 $47.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 而S2表层含量最高仅为 $40.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。②S1、S2、S3三个研究区蒸发盐含量随时间变化表现出相同的特征。6月份含量最高, 随季节的变化趋势为从6—10月份逐渐降低。在不同的季节随着深度增加, 含量均呈现降低的趋势, 即不同地点不同时间0~50 cm各层含量均表现出降低趋势。③蒸发盐含量对风蚀的响应特征具有明显的区域差异和复杂性。在风蚀作用下, S1研究区未覆盖区域蒸发盐含量明显高于覆盖区域, S2研究区的含量对风蚀的响应特征比较复杂, 而S3未覆盖区域含量低于覆盖区域, 与S1研究区对风蚀的响应特征相反。不同区域不同的地下水埋深、沉积物质地、植被特征及迥异的风蚀机理是造成蒸发盐含量差别及不同风蚀响应特征的主要因素。

**关键词:** 干涸湖底; 蒸发盐; 风蚀; 艾比湖; 干旱区

**中图分类号:** S151.9    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-9901(2014)03-0186-08

## Dynamic variation of evaporated salt and its response to wind erosion in the playa of Ebinur Lake, arid northwest China

GE Yong-xiao<sup>1,2</sup>, Jilili ABUDUWAILI<sup>1</sup>, MA Long<sup>1</sup>, LIU Dong-wei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese academy of science, Beijing 100049, China;

3. College of Environment and Resources of Inner Mongolia University, Huhehot 010021, China)

**Abstract:** In order to understand the salinity variation characteristic in the process of wind erosion, lacustrine sediment were sampled from three typical positions of Ebinur Lake (S1, intermittently dry lake bed; S2, lakeside; S3, permanently dry lake bed) to reveal changes of salt content and response characteristics to wind erosion, which dominated by bare desert, *Phragmites australis*, *Haloxylon ammodendron* and *Halocnemum strobilaceum*, respectively. The results showed that evaporated salt content in different locations of Ebinur Lake dry lakebed were quite different. The highest content among the three study areas appeared in S1 at the northwest intermittent dry lakebed, up to  $101.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , followed by S3, which salt content was  $47.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , the S2 had the lowest  $40.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  at the surface. Evaporated salt

收稿日期: 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101190, 41201539); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(XBBS201106); 中国博士后基金第53批面上资助项目(2013M530439)

通讯作者: 吉力力·阿不都外力, E-mail: jilil@ms.xjb.ac.cn

content varied in time and space at different locations of dry lakebed, and the highest content occurred in June and gradually reduced with the seasonal changes from June to October; salt content showed a decreasing trend in different seasons with increasing depth, that is, evaporated salt content of five layers from 0 cm to 50 cm showed a downward trend at different times and different locations. Take wind erosion into consideration, the response characteristics of salt content to wind erosion showed significant regional differences. Salt content of sediment that was not covered in S1 was significantly higher than the covered area. The relationship between the covered and uncovered sediment in S2 was complex. However, response characteristic of S3 to wind erosion was just the reverse of that of S1. All above information indicated the regional difference and complexity of variation and response to wind erosion of evaporated salt content. Different groundwater table, sediment texture, vegetation characteristics and soil erosion mechanism are the main factors that result in different evaporation salt content and different wind response characteristic.

**Key words:** playa; evaporated salt; wind erosion; Ebinur Lake; arid land

干涸湖底盐漠景观是干旱区尾间湖地区重要的景观类型之一,在我国西北干旱区广泛分布。塔里木盆地的罗布泊干涸后,裸露的干涸湖底面积超过 5000 km<sup>2</sup> (袁国映和袁磊, 1998; 王富葆等, 2008); 准噶尔盆地的艾比湖 20 世纪 50 年代初期面积约 1200 km<sup>2</sup>, 现今已经大面积萎缩, 在湖泊西北部和东南部出现大面积湖床干涸 (沙依然等, 2006), 其湖水矿化度已达 86~112 g·L<sup>-1</sup> (吴敬禄, 1995), 若不调入水量则将在 2050 年完全干涸 (苏颖君等, 2002)。除此之外, 玛纳斯湖、柴窝堡湖、艾丁湖等尾间湖均出现大面积的萎缩, 裸露出大面积的干涸湖底。

封闭的尾间湖泊沉积物中盐分主要以碳酸盐、硫酸盐及氯化物等盐类为主, 它们分别是在湖泊演化不同阶段从湖水中蒸发沉淀的 (顾兆炎等, 1994)。湖泊干涸后, 在日照条件下, 因毛管效应高矿化度浅层地下水不断蒸发, 并携带大量的盐分在干涸湖底表聚 (Goudie et al, 1995), 形成干涸湖底特有的盐漠景观, 在干旱区频繁大风天气的驱动下引发灾难性的风沙盐尘暴灾害 (Gill, 1996)。与一般沙尘暴不同, 盐尘暴含有粒径极细密度很高的氯化物、硫酸盐等蒸发盐及有害重金属元素 (Liu et al, 2011a), 极大地污染空气、土壤、水质, 并腐蚀设备, 引发疾病, 导致受灾生态与自然环境的恶化, 成为治理的难点 (Abuduwaili, 2008; Liu et al, 2011b)。同时, 强风沙对沿线铁路和公路造成严重危害 (周长海和雷加强, 2005), 导致铁路、国道改线, 给人民生命财产带来极大损失。

大风对盐湖盆地或盐湖成盐元素的搬运和积累有重要的影响 (郑喜玉, 1996), 大风风蚀导致干涸湖底盐分的积累、释放和扩散, 形成危害较大的盐尘暴。艾比湖位于我国著名风口阿拉山口的下风向, 在大风的吹蚀下, 干涸湖底风蚀严重, 成为下风向盐尘的主要来源。在风蚀严重的艾比湖干涸湖底, 不同区域沉积物盐分含量的背景值并不一样。然而因不同的景观、覆盖度等特征, 不同区域对风速的阻截作用不同 (董治宝等, 1996; 张春来等, 2003; 葛拥晓等, 2013), 导致风蚀程度不同, 进一步造成沉积物盐分含量的分异。风蚀过程中, 艾比湖干涸湖底不同区域沉积物蒸发盐含量的动态变化如何, 以及氯化物、硫酸盐等蒸发盐含量对风蚀响应的特征如何, 这是本研究关注的重点。本文选择新疆艾比湖干涸湖底为研究区, 选取艾比湖干涸湖底 3 个典型的区域, 设置对照试验, 重点研究: (1) 艾比湖流域不同区域沉积物的蒸发盐含量的动态变化特征; (2) 不同区域沉积物蒸发盐含量对风蚀的响应特征。旨在了解干涸湖底风蚀过程中沉积物蒸发盐含量的分异特征; 明确干旱区干涸湖底蒸发盐含量变化及其对风蚀响应特征, 为深入研究干涸湖底风蚀过程和水盐运移规律提供依据和基础数据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

艾比湖是西北干旱区的最大的咸水湖, 位于风口阿拉山口的下风向, 处于 82°35'~83°10' E, 44°54'~45°09' N, 是博尔塔拉河和精河两条河流

的尾间湖，准噶尔盆地的最低汇水中心。南西北三面环山，东部与准格尔盆地相连，该湖与哈萨克斯坦境内的萨克斯湖、阿拉湖同为艾比湖—星星峡断裂带的断陷作用所形成的湖泊，湖面海拔 189 m。由于受西风环流以及蒙古高压和西伯利亚冷空气的影响，盆地表现为典型的中温带干旱气候特征（柏春广和穆桂金，1999），气候干燥，降水稀少，蒸发强烈，常年多风；年均气温 8.3℃，年均降水量 90.9 mm，最高瞬时风速可达 55 m·s<sup>-1</sup>，每年风速大于 8 m·s<sup>-1</sup> 的天数多达 165 d，多集中在 4—6 月份（王宏等，2011）。20 世纪以来，在区域气候波动和人类活动的双重影响下，湖面急剧萎缩，在湖西北正对阿拉山口的大风区和湖泊东南部形成了大面积的干涸湖底（刘东伟等，2009）。每逢春秋大风期，干涸湖底表层富含硫酸盐和氯化物的沉积物在强风驱动下剧烈风蚀，释放大量含盐粉尘，成为下风向广大地区盐尘（粉尘）灾害的源头，严重威胁着天山北坡绿洲生态安全。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集与处理

2011 年 3 月初在艾比湖干涸湖底选择 3 个典型区域作为实验区（图 1）。S1 位于间歇性

干涸湖底（面积约 500 km<sup>2</sup>），无植被覆盖；S2 位于湖滨沙丘，主要为低矮的芦苇（*Phragmites australis*）荒漠带；S3 位于历史时期干涸湖底，主要是梭梭（*Haloxylon ammodendron*）荒漠带，其中有少量的盐节木（*Halocnemum strobilaceum*）。在每个试验区设置 3 个试验点，每个小区的规格是 1 m×0.5 m，其中 2 个小区用孔径大小为 0.5 cm×0.5 cm 的铁丝网覆盖 3 层。覆盖区域的蒸发盐含量用来表征干涸湖底沉积物在无风蚀条件下的蒸发盐含量及其动态变化特征；没有覆盖的区域沉积物蒸发盐含量用来表征风蚀作用下盐分含量对风蚀的响应。

分别于 2011 年 6 月份、8 月份、10 月份进行 3 次采样。用土钻在每个小区中心采集 0~50 cm（0~10 cm，10~20 cm，20~30 cm，30~40 cm，40~50 cm）的沉积物样品，相邻 3 点相同深度的样品混合组成待测样品，总共采集 135 个。实验小区沉积物特征、植被生长状况等见表 1。

#### 1.2.2 数据测定与统计分析

土壤水溶性盐的测定：将土样自然风干，研磨并过 1 mm 孔径筛。在中国科学院新疆生态与地理研究所土壤理化实验室利用残渣烘干—质量法测定，误差不大于 1 mg·kg<sup>-1</sup>。

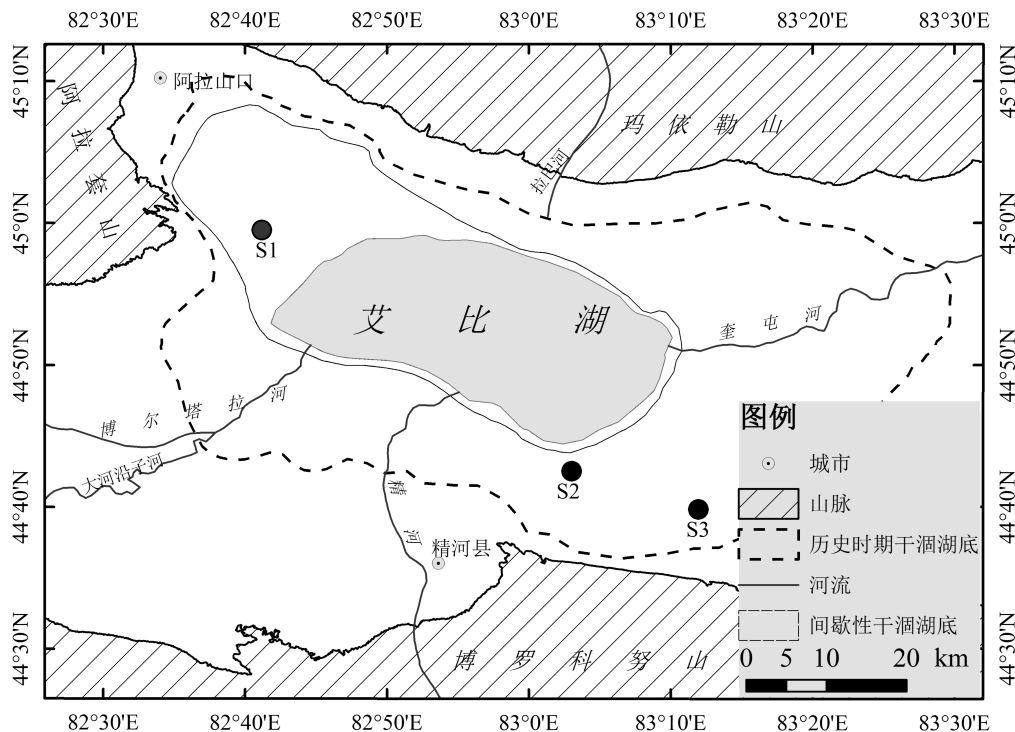


图 1 采样点位置示意图  
Fig.1 Location of sample sites

表 1 典型区域特征及采样数目  
Table 1 Characteristics of typical regions and number of samples

编号	景观	样品数目	主要植物	样地描述	盖度 (%)
S1	无植被覆盖	45	无	表层平整、质轻, 呈蓬松状的灰白色小颗粒物	0
S2	芦苇荒漠带	45	芦苇	表面平整, 较硬, 紧实	10
S3	梭梭荒漠带	45	梭梭、盐节木	表面质软, 呈不规则多边形碎块的结晶盐壳	7

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 17.0 分析软件进行数据处理与分析, 采用 Origin 8.5 作图。不同处理和不同深度之间使用 Origin 软件进行  $p < 0.05$  水平的  $t$  检验, 分析显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 干涸湖底不同区域蒸发盐含量及其动态变化特征

由图 2 可以看出, 干涸湖底不同区域蒸发盐含量差别较大。艾比湖西北部间歇性干涸湖底 S1 研究区的盐分含量最高, 其表层最高可达  $101.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 东南部历史时期干涸湖底 S3 的盐分含量次之, 表层含量最高时为  $47.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 最低的是 S2, 表层盐

分含量最高时仅为  $40.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。间歇性干涸湖底 S1 区含盐量较高原因是无任何植被覆盖、出露时间短、地下矿化度高、蒸发作用强烈, 随河流和地下水进入湖泊的盐分, 随水分向上运动积累在表层沉积物。随着不断的积累, 成为盐分很高的区域。S2 点位于湖滨沙丘, 表层只有浅浅的一层湖泊沉积物, 30 cm 以下是粒度较粗的砂粒, 且植被覆盖度最高 (表 1), 蒸发相对较弱, 不利于水分盐分的保持积累。S3 点位于历史时期干涸湖底, 沉积物较厚, 地下水位较浅, 植被覆盖度较低, 相比 S2 点有利于盐分随水分向上运动, 盐分含量稍高于 S2 研究区。

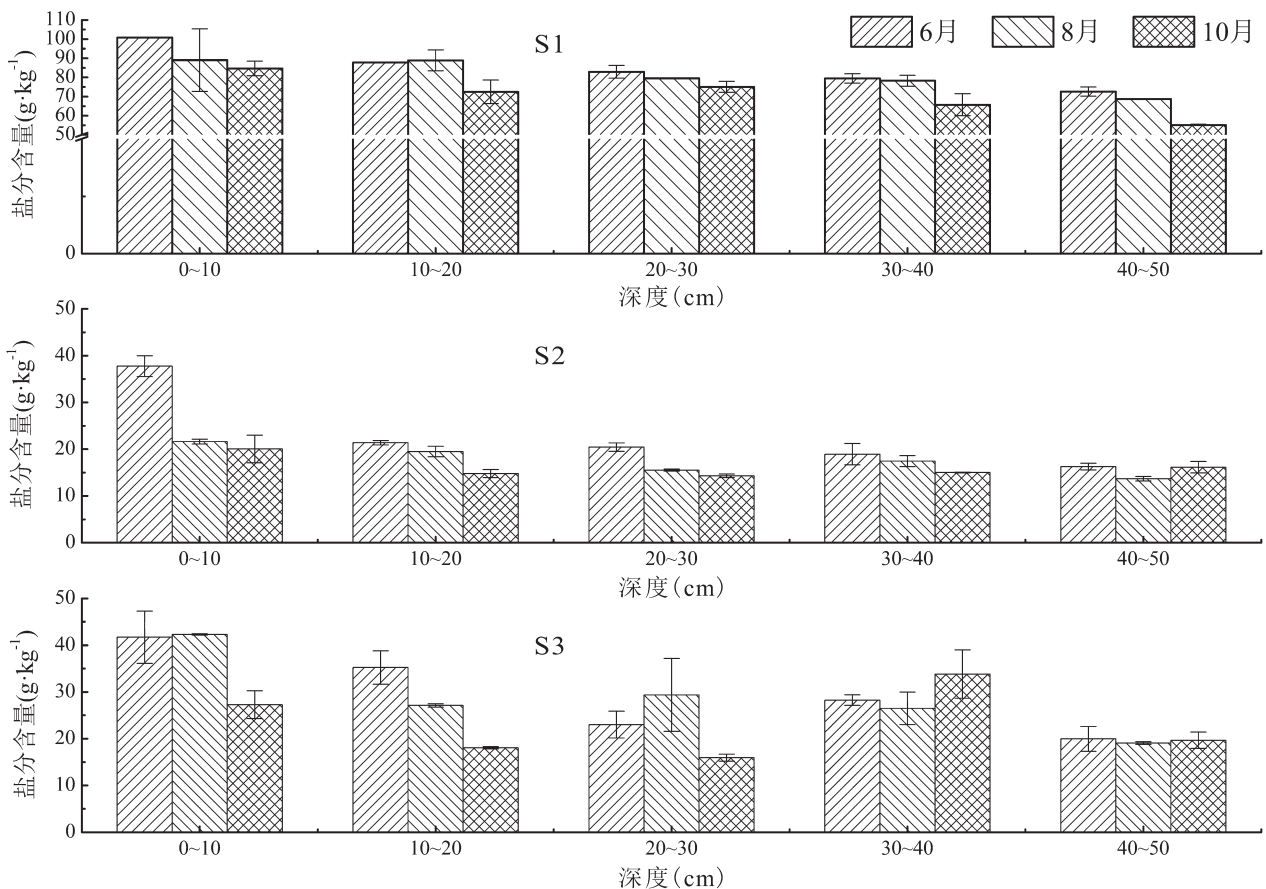


图 2 艾比湖干涸湖底不同区域蒸发盐的动态变化特征 (平均值 + 标准误差)  
Fig.2 Dynamic variation of evaporated salt in different parts of Ebinur Lake (mean + standard error)

干涸湖底不同位置蒸发盐含量随季节变化表现出相同的特征。如图2所示,不同位置蒸发盐随季节的变化趋势为从6月份到10月份逐渐降低。6月份蒸发盐含量最高,原因是干涸湖底在3月底4月初解冻以后,由于蒸发逐渐增强,盐分随水分不断向上运动,聚集在表层,在5月底6月初蒸发作用达到一年中的最高值,盐分表聚程度达到最高峰。8月到10月,随着蒸发作用逐渐减弱,盐分表聚减少,表现出下降的趋势。

不同季节三个研究区(S1、S2、S3)随着深度增加盐分含量均呈现降低的趋势,且各个深度之间存在显著的差异( $p < 0.05$ ),这表明干涸湖底垂直方向盐分有明显的表聚现象。随季节和蒸发作用的变化,表聚程度逐渐减弱,表现为各层盐分含量呈降低的趋势,且随深度降低的幅度也呈变小趋势。

三个研究区各个深度的盐分含量随着时间的变化趋势基本相同:随着季节的变化,各层盐分含量逐渐降低。而随着深度增加,盐分含量降低趋势表现复杂,S1点的降低趋势明显,S2点变化比较平缓,S3的变化比较复杂。这可能是由于6—10月份,由于工农业用水的增加,入湖流量减少明显,湖泊水位较快下降,导致S1地下水位也随之下降,加之蒸发随季节变化逐渐减弱,致使盐分向上运动受到限制,结果导致S1研究区10月份各层之间盐分含量差别较小。S2点由于底层物质粒度较粗,不利于盐分和水的保持,受季节和植被覆盖的影响蒸发减弱,导致8月到10月各层之间的盐分较低且差别不大。S3研究区6月到8月份各层均呈现降低的趋势,10月份的变化较为复杂,可能是因为地下水位下降,蒸发减弱,导致盐分无法随水分运动表聚到表面,只能运移到30~40 cm处。

## 2.2 干涸湖底不同区域蒸发盐含量对风蚀的动态响应特征

干涸湖底不同区域沉积物蒸发盐含量对风蚀过程表现出不同的响应特征,如图3所示。蒸发作用是造成干涸湖底蒸发盐含量明显表聚的主要原因之一。越接近地表,风蚀造成的蒸发差别越大。所以,蒸发盐含量对风蚀的响应在表层表现最为明显。

S1研究区0~10 cm处未覆盖区域含盐量明显高于覆盖区域,6月份、8月份、10月份分别高出

17.2%、25.9%、5.2%,8月份差别最大。随深度增加,覆盖和未覆盖区域盐分含量差别呈降低趋势,40~50 cm处盐分含量差别很小。未覆盖区域由于风蚀增强了蒸发作用,盐分在蒸发作用和毛管效应下沿毛管表聚,导致盐分随水分大量向上运动,越接近地表,蒸发作用越强烈,造成表层盐分不断增加,而随深度增加表现出梯度下降。覆盖区域由于受风蚀影响很小,蒸发作用相对较小,导致盐分含量明显低于未覆盖区域,这种差别在8月份达到极值,随时间推移不断下降。

S2研究区的表现特征比较复杂,在6月初第一次采样时0~10 cm处未覆盖区域低于覆盖区域44.9%,8月份和10月份未覆盖区域分别高于覆盖区域29.2%、51.8%;随深度增加,这种差别均不断缩小。

S3的响应特征与S1研究区的正好相反,0~10 cm处未覆盖区域盐分含量分别低于覆盖区域9.0%、15.2%、5.5%,其中8月份的差别也是最大的;随深度增加,覆盖和未覆盖区域的盐分含量差别呈现降低趋势。

从S1研究区到S3研究区盐分对风蚀的响应特征呈现出明显的渐变过程:S1盐分含量未覆盖区域高于覆盖区域,S2点随着时间的变化由未覆盖区域盐分含量小于覆盖区域渐变为未覆盖区域大于覆盖区域,而S3则表现出未覆盖区域低于覆盖区域。可以看出,从干涸湖底西北部到东南部呈现明显的过渡性渐变。6月份到8月份,3个试验区0~10 cm未覆盖区域和覆盖区域盐分含量差异显著( $p < 0.05$ )。10月份3个研究区中除S2之外,0~10 cm盐分含量没有显著差异。

3月底4月初开始,随着雪冰融水随河流进入湖泊,水位上升,导致S1研究区水位升高,在6月初到达最高。水分是影响土壤风蚀的重要因素,这时虽然大风日数较多,但由于水分含量高,风蚀量较小,带走盐分也很少。这一时段是蒸发最强烈的时段,在不考虑风蚀作用的情况下,未覆盖区域和覆盖区域蒸发基本相同。覆盖的区域不受风蚀的影响,但风蚀作用有助于未覆盖区域的蒸发,造成盐分含量高于前者。8、10月份也有同样的趋势。S2研究区由于特殊的位置和底层沉积物较粗,不利于水分盐分的保持,在蒸发强烈的6月份,土壤相对干燥,风蚀量很大,盐分吹蚀较多,造成未覆盖区域与覆盖区域盐分含量差别很大。从8月份到

10 月份, 沉积物水分含量并没有很大变化, 但是盐分表聚之后形成的坚硬的结晶盐壳能够很好地减少风蚀量, 表现为未覆盖区域盐分含量高于覆盖区域。S3 研究区位于历史时期干涸湖底, 表层干燥且均为细沙(表 1), 在风速较大时, 很容易发生风蚀, 风蚀在吹蚀颗粒物质的同时, 也带走大量盐分, 造成未覆盖区域盐分含量小于覆盖区域, 但

差别随季节变化而减小。

覆盖区域和未覆盖区域盐分含量均随着深度的增加呈现降低的趋势。同时, 随着深度的增加, 未覆盖区与覆盖区的蒸发盐含量差别也在缩小, 最深层 40~50 cm 处, 差别很小, 这与盐分含量动态变化分析的结果一致, 表明风蚀对蒸发盐含量的影响随深度的增加不断降低。

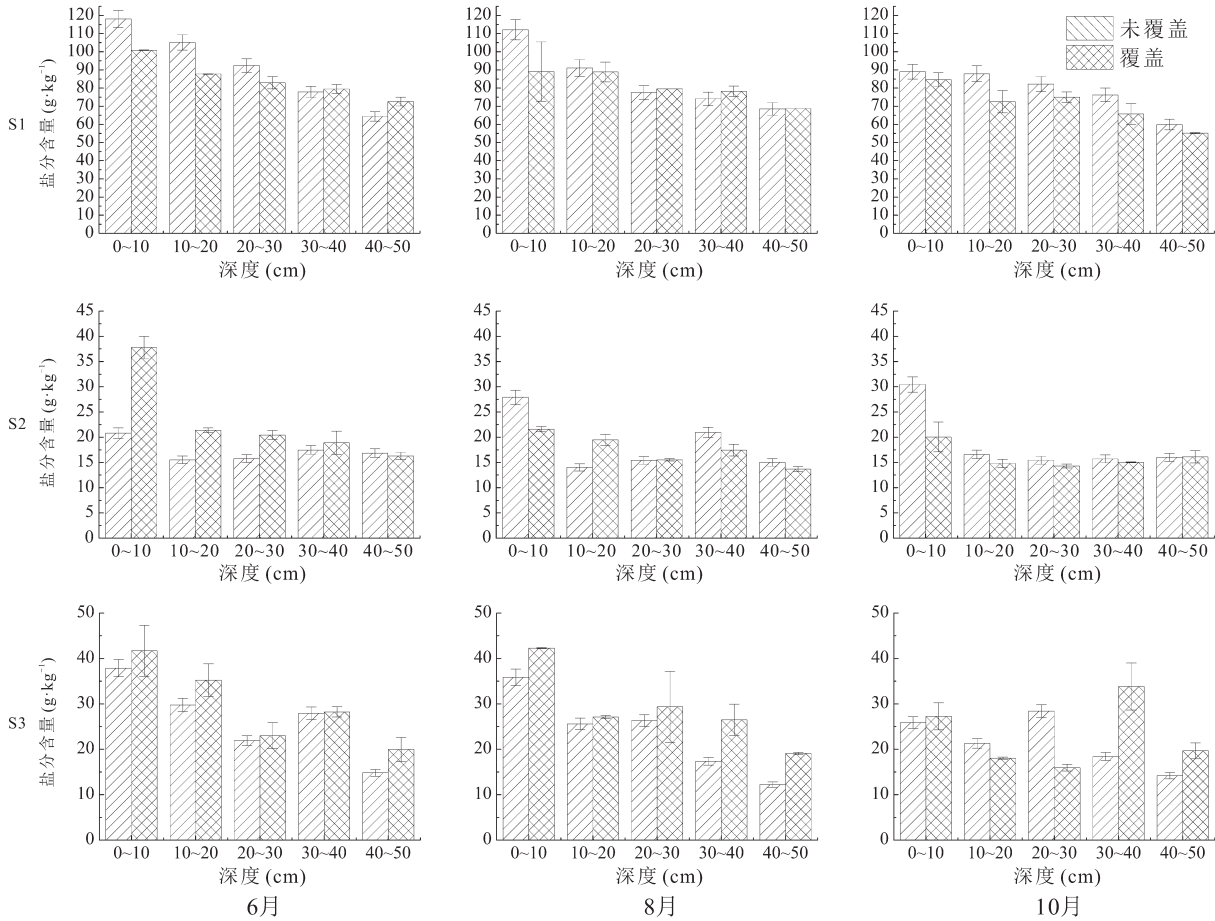


图 3 艾比湖干涸湖底不同区域蒸发盐对风蚀的响应特征 (平均值 + 标准误差)  
Fig.3 Response of salt content to wind erosion in different parts of Ebinur Lake (mean + standard error)

### 3 讨论与结论

干涸湖底表层含盐量由于受地貌、风蚀、蒸发、地下水位、降雨等多因子的影响, 随时随地而变, 3 个研究区的样品分析值只是某一区域某一时段的“快照”。但这些区域基本包含了艾比湖干涸湖底的地表类型, 能够反映出干涸湖底不同区域的蒸发盐含量的动态变化特征及其对风蚀的响应特征。

西北干旱区干涸湖底沉积物中的盐分主要是在蒸发作用和毛管效应下形成的, 而蒸发作用有

助于地下水中的盐分溶解质在毛管效应下沿毛管表聚 (Reynolds et al, 2007)。因此, 艾比湖干涸湖底表层沉积物的盐分积累主要受沉积物质地、地下水埋深及矿化度、蒸发强度、植被覆盖度等因素影响 (米热班·阿布里米提, 2012), 风力的吹蚀搬运扰动又改变了不同区域盐分分布格局, 使得干涸湖底不同区域沉积物盐分特征及其对风蚀响应变得更为复杂。研究选取的 3 个研究区分别位于间歇性湖底 (西北部)、湖滨沙丘 (南部)、历史时期湖底 (东南部), 因为所处的位置不同

影响了盐分的表聚和运移特征,从而造成盐分含量差别较大。而不同区域不同强度的风蚀,进一步加剧了不同区域盐分含量的分异,即不同区域蒸发盐含量对风蚀不同的响应特征。

风蚀作用有助于盐分随水分蒸发向上运移,造成盐分的表聚和随深度增加的梯度下降。这种表聚和差别现象因不同的地理位置和不同的地下水位条件、不同的时间和不同的深度而呈现出不同的特征。风蚀过程有利于盐分随水分的表聚,盐分在表层大量聚集,为盐尘暴提供源源不断的盐分。这个不断循环的过程正体现了干旱区相对封闭的尾间湖“盐随水来,盐随风走”的特点。

本文以艾比湖为研究对象,选取3个不同的区域,研究了蒸发盐含量的动态变化及风蚀对蒸发盐含量的影响,主要结论如下:

(1) 艾比湖干涸湖底不同部位蒸发盐含量差别较大。西北部间歇性干涸湖底研究区S1的盐分含量最高,最高可达 $101.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;东南部历史时期干涸湖底研究区S3的盐分含量次之,最高时为 $47.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;最低是研究区S2,盐分含量最高值为 $40.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2) 干涸湖底不同位置蒸发盐含量随季节变化表现出相同的特征。干涸湖底不同位置盐分含量变化特征是:6月份盐分含量最高,随季节的变化趋势为从6月份到10月份逐渐降低。6—10月,因蒸发作用逐渐减弱,盐分随水分表聚减少,0~50 cm各层盐分含量表现出下降的趋势;S1、S2、S3三个研究区在不同的季节随着深度盐分含量均呈现降低的趋势,且各个深度之间存在显著的差异( $p < 0.05$ )。

(3) 干涸湖底不同区域沉积物蒸发盐含量对风蚀过程具有不同的响应特征。S1研究区中未覆盖区域含盐量明显高于覆盖区域,6月份、8月份、10月份分别高出17.2%、25.9%、5.2%;S2研究区的特征比较复杂,在6月初第一次采样时未覆盖区域低于覆盖区域44.9%,8月份和10月份未覆盖区域分别高于覆盖区域29.2%、51.8%;S3研究区的响应特征与S1研究区的正好相反,未覆盖区域盐分含量分别低于覆盖区域9.0%、15.2%、5.5%。从S1研究区到S3研究区盐分对风蚀的响应特征呈现明显的渐变过程,表明不同区域不同的风蚀特征及其对风蚀响应的复杂性。

(4) 干涸湖底不同区域蒸发盐含量、变化特

征、对风蚀的响应特征与不同区域不同的地下水条件、沉积物特性、植被特征及风蚀机理有关。干涸湖底风蚀控制应结合不同区域的实际特征,因地制宜,采取有效的生物和工程防治方法,控制盐尘、粉尘释放,减少盐尘、沙尘暴的发生。

## 参考文献

- 柏春广,穆桂金. 1999. 艾比湖的湖岸地貌及其反映的湖面变化[J]. *干旱区地理*, 22(1): 34-40. [Bai C G, Mu G J. 1999. Lake surface change indicated by the shore landform of Aibi Lake, Western Jungar basin, China [J]. *Arid Land Geography*, 22(1): 34-40.]
- 董治宝,陈渭南,董光荣,等. 1996. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. *环境科学学报*, 16(4): 437-443. [Dong Z B, Chen W N, Dong G R, et al. 1996. Influence of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 16(4): 437-443.]
- 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,刘东伟,等. 2013. 艾比湖干涸湖底6种景观类型不同深度富盐沉积物粒径的分形特征[J]. *中国沙漠*, 33(3): 804-812. [Ge Y X, Abuduwaili J, Liu D W, et al. 2013. Fractal characteristics of particle size distribution in salt-rich sediments from different depths under six different types of landscapes in the playa of Ebinur Lake [J]. *Journal of Desert Research*, 33(3): 804-812.]
- 顾兆炎,刘嘉麒,袁宝印,等. 1994. 湖相自生沉积作用与环境——兼论西藏色林错沉积物记录[J]. *第四纪研究*, 14(2): 162-174. [Gu Z Y, Liu J Q, Yuan B Y, et al. 1994. Lacustrine authigenic deposition expressive of environment and the sediment record from Siling Co, Xizang (Tibet), China [J]. *Quaternary Sciences*, 14(2): 162-174.]
- 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. [Liu D W, Abuduwaili J, Mu G J, et al. 2009. Chemical components and transport mechanics of wind-erodible playa sediments, Ebinu Lake, Xinjiang [J]. *China Environmental Science*, 29(2): 157-162.]
- 米热班·阿布里米提. 2012. 艾比湖干涸湖底景观地球化学特征及其对风蚀的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学. [Abulimiti M. 2012. Landscape geochemical characteristics in the play of Ebinur Lake and its response to wind erosion [D]. Urumqi: Xinjiang University.]

- 沙依然,李 聪,陈爱京,等. 2006. 艾比湖近期出现大面积干涸[J]. *干旱区地理*, 29(4): 616–616. [Sha Y R, Li C, Chen A J, et al. 2006. Recently-dried-up lake bed of the Ebinur Lake in large area [J]. *Arid Land Geography*, 29(4): 616–616.]
- 苏颖君,张振海,包安明. 2002. 艾比湖生态环境恶化及防治对策[J]. *干旱区地理*, 25(2): 143–148. [Su Y J, Zhang Z H, Bao A M. 2002. Degeneration of the ecological environment in the Ebinur Lake region and the improvement measures [J]. *Arid Land Geography*, 25(2): 143–148.]
- 王富葆,马春梅,夏训诚,等. 2008. 罗布泊地区自然环境演变及其对全球变化的响应[J]. *第四纪研究*, 28(1): 150–153. [Wang F B, Ma C M, Xia X C, et al. 2008. Environmental evolution in Lop Nur since late pleistocene and its response to the global changes [J]. *Quaternary Sciences*, 28(1): 150–153.]
- 王 宏,谢 霞,樊亚辉,等. 2011. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型的土壤盐渍化敏感性评价[J]. *地理科学进展*, 30(5): 593–599. [Wang H, Xie X, Fan Y H, et al. 2011. Assessment of soil salinization sensitivity for different types of land use in the Ebinur Lake region in Xinjiang [J]. *Progress in Geography*, 30(5): 593–599.]
- 吴敬禄. 1995. 新疆艾比湖全新世沉积特征及古环境演化[J]. *地理科学*, 15(1): 39–46. [Wu J L. 1995. Characters of the evolution of climate and environment during the last 10 ka years in Aibi lake basin, Xinjiang [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 15(1): 39–46.]
- 袁国映,袁 磊. 1998. 罗布泊历史环境变化探讨[J]. *地理学报*, 53(S1): 83–89. [Yuan G Y, Yuan L. 1998. An approach to the environmental changes in Lop-nur history [J]. *Acta Geographica Sinica*, 53(S1): 83–89.]
- 张春来,邹学勇,董光荣,等. 2003. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. *水土保持学报*, 17(3): 31–33. [Zhang C L, Zou X Y, Dong G R, et al. 2003. Wind Tunnel Studies on Influences of Vegetation on Soil Wind Erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(3): 31–33.]
- 郑喜玉,刘建华. 1996. 新疆盐湖卤水成分及其成因[J]. *地理科学*, 16(2): 115–123. [Zheng X Y, Liu J H. 1996. The composition and origin of salt lake brines in Xinjiang [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 16(2): 115–123.]
- 周长海,雷加强. 2005. 艾比湖地区风沙危害趋势及对欧亚大陆桥的影响[J]. *干旱区地理*, 28(1): 98–102. [Zhou C H, Lei J Q. 2005. Trend of sand drift disasters in the Ebinur Lake area and their impacts on the Eurasian Continental bridge [J]. *Arid Land Geography*, 28(1): 98–102.]
- Abuduwaili J, Gabchenko M V, Xu J R. 2008. Eolian transport of salts—a case study in the area of Lake Ebinur (Xinjiang, Northwest China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 72(10): 1843–1852.
- Gill T E. 1996. Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: Human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system [J]. *Geomorphology*, 17(1–3): 207–228.
- Goudie A S, Wells G L. 1995. The nature, distribution and formation of pans in arid zones [J]. *Earth-Science Reviews*, 38(1): 1–69.
- Liu D W, Abuduwaili J, Lei J, et al. 2011a. Deposition Rate and Chemical Composition of the Aeolian Dust from a Bare Saline Playa, Ebinur Lake, Xinjiang, China [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1): 175–184.
- Liu D W, Abuduwaili J, Lei J, et al. 2011b. Wind erosion of saline playa sediments and its ecological effects in Ebinur Lake, Xinjiang, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 63(2): 241–250.
- 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): 1811–1827.