

艾比湖湿地不同厚度盐结皮与土壤物理性质的相互关系及其影响因素*

刘涛涛, 王勇辉, 阿迪拉·阿布力米提

新疆师范大学地理科学与旅游学院 / 干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要: 为探讨艾比湖湿地土壤盐结皮与其覆盖下土壤物理特性的相互关系, 采用野外调查与室内试验相结合的方法, 在湿地内选取具有代表性的30个样点, 对不同厚度盐结皮覆盖下的土壤物理特性进行分析, 并探讨其对盐结皮厚度的影响。结果表明: 1) 盐结皮衰退期和生长期覆盖下土壤粒度以1.00~0.05 mm为主, 盐结皮成熟期覆盖下土壤粒度以0.01~0.001 mm为主。土壤容重由高到低依次为盐结皮生长期(1.81 g/cm³)、成熟期(1.58 g/cm³)和衰退期(1.34 g/cm³)。土壤孔隙度由盐结皮衰退期(50.8%)、成熟期(40.7%)到生长期(32.6%)逐渐下降。土壤含水量由高到低依次为盐结皮生长期(32.5 g/kg)、成熟期(21.7 g/kg)和衰退期(16.2 g/kg)。土壤饱和含水量和土壤含水量由高到低依次为盐结皮衰退期、成熟期和生长期。2) 盐结皮厚度与土壤物理性质相关性分析表明, 盐结皮厚度与0~20 cm土壤的毛管孔隙度和土壤粒度(1.00~0.05 mm)显著正相关($P < 0.01$), 与土壤容重呈负相关($P < 0.05$); 而且随深度增加盐结皮厚度与土壤物理特性相关性逐渐降低。3) 主成分分析表明: 影响盐结皮厚度主要包括第一主成分(78.1%)土壤毛管孔隙度, 第二主成分(16.5%)土壤粒度(0.01~0.001 mm)。孔隙度增大能够促进盐结皮产生和积累, 使盐结皮越厚。土壤中粒度0.01~0.001 mm含量增多, 能抑制盐结皮产生和积累, 使盐结皮越薄。总之一方面不同厚度盐结皮的覆盖会使土壤物理特性(含水量、孔隙度、粒度)发生变化, 另一方面土壤物理特性会影响盐结皮厚度, 两者相互作用相互影响。

关键词: 艾比湖湿地; 土壤盐结皮; 物理性质; 影响因素

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)06-0091-11

The relationship between different salt crust thickness and soil physical properties in Ebinur Lake wetland and its influencing factors

LIU Taotao, WANG Yonghui, ADILA Abrimiti

School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University / Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Land, Urumqi 830054, China

Abstract: To investigate the Ebinur lake wetland soil physical properties under salt crusts and their interactions, we selected representative samples of 30 sites from different areas in wetland and with different salt crust thickness, on the depth of 0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm, analyzed the physical properties of soil, including porosity, particle size, and water content by combining field investigation and laboratory tests, and discussed the influences of properties on salt crust thickness. The results show that: 1) The grain size of soil covered by salt crust is mainly in the range of 1.00–0.05 mm during the declining and the growing periods, while at the mature stage it is mainly in the range of 0.01–

* 收稿日期: 2020-08-08 录用日期: 2020-10-15 网络首发日期: 2021-07-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01A35)

作者简介: 刘涛涛(1996年生), 男; 研究方向: 干旱区资源利用; E-mail: 841612213@qq.com

通信作者: 王勇辉(1983年生), 男; 研究方向: 干旱区资源利用; E-mail: wyhsd_3011@163.com

0.001 mm. The bulk density of soil is ranked from the highest one of the salt crust in the growing period (1.81 g/cm³), to that of the mature period (1.58 g/cm³) and to the lowest one of that in the declining period (1.34 g/cm³). The soil porosity decreases gradually from the declining period (50.8%), mature period (40.7%) to the growing period (32.6%). Soil moisture content from high to low is in the order of growing period (32.5 g/kg), mature period (21.7 g/kg), and the declining period (16.2 g/kg). Soil saturated water content and soil moisture content are in the order of the declining period, mature period, and the growing period from high to low. 2) Salt crust thickness is significantly positively correlated with both capillary porosity and soil particle size in the range of 0.05–1 mm for soil in the depth of 0–20cm soil ($P < 0.01$), while negatively correlated with soil bulk density ($P < 0.05$). The correlation between salt crust thickness and soil physical properties gradually decreases with the increase of depth. 3) The factors influencing salt crust thickness mainly include the capillary porosity as the first principal component (78.1%) and the soil particle size as the second principal component (16.5%). The increase of porosity can promote the formation and accumulation of salt crust, and make the salt crust thicker, while the increase of grains in the size of 0.001 to 0.01 mm can inhibit the formation and accumulation of salt crust, and make salt crust thinner. Overall, salt crust changes the physical characteristics of soil (water content, porosity, and grain size); on the other hand, the physical properties of soil affect the thickness of salt crust.

Key words: Ebinur Lake wetland; soil salt crust; physical properties; influencing factors

土壤盐结皮 (SSC, soil salt crust) 是土壤中水分蒸发使土壤盐分表聚的现象, 大量土壤盐分胶结于土壤表层, 一般呈壳状且硬度较大^[1-2], 广泛分布在我国中西部地区。由于自然盐结皮形态多样在成长期、成熟期和消亡期 3 个阶段相互转换^[3], 致使不同阶段盐结皮覆盖下的土壤孔隙度^[4]、容重、含水量和粒度^[5]组成有所差异, 土壤特性差异又会引起盐结皮厚度发生变化^[6], 因此两者之间相互作用相互影响。部分学者认为盐结皮会抑制土壤水分蒸发, 使土壤保水能力增强, 并得出盐结皮厚度与土壤养分呈反向的规律^[7-9]。而 Marsha 等^[10]的研究表明盐结皮会加快热量传输, 致使土壤水分蒸发速率提高, 保水性下降。Xu 等^[11]和 Fujimaki 等^[12]通过研究盐结皮覆盖下不同土壤特性得出, 盐结皮覆盖下的土壤含水量和饱和含水量相对高。夏倩柔等^[13]研究表明土壤盐结皮厚度增加会使土壤颗粒膨胀和分散, 土壤容重减少引起孔隙度增大, 从而导致土壤饱和含水率和土壤含水量的增加。余世鹏等^[14]研究表明土壤中水分主要以毛管水的形式向地表移动, 土壤中的盐分会随着水分的运移而不断在土壤表层积累, 形成盐渍土进一步发展形成结皮。季泉毅等^[15]研究表明黏阻碍土壤的水盐运移, 具有良好的保水和隔盐能力, 尤其对表土积盐的抑制效果显著, 抑盐效果随粘土层厚度增加而提升。邹桂

梅等^[16]研究表明土壤容重和粒度对盐结皮的影响主要通过土壤孔隙, 若土壤容重增大则会减少土壤中的孔隙, 降低土壤用于传导水分的大孔隙和毛管孔隙的数量, 影响土壤水盐的下渗及盐结皮的形成。李生字等^[17]的研究表明粒度、容重、海拔、成土母质及土壤其他特性会影响盐结皮厚度。牛宝茹^[18]通过对塔河地区的研究表明降水量、蒸发量均较大的区域, 土壤表层中的总盐含量较高, 致使盐结皮相对较厚。Zheng 等^[19]和 Finstad 等^[20]均认为土壤物理特性会影响盐结皮厚度变化。大部分学者对土壤盐结皮的研究主要集中在极端干旱的沙漠地区^[21-23], 而对干旱区湿地内盐结皮研究较少。艾比湖作为干旱区盐湖湿地的代表且区域内盐结皮广布, 因此深入探究该区域土壤物理特性与盐结皮之间的相互关系和影响显得尤为重要。

艾比湖湿地是国家级自然保护区, 也是干旱区湿地生态系统的典型代表, 由于受土壤盐化、沙化的影响, 致使土壤退化严重且盐结皮分布较广^[24-25]。目前, 关于艾比湖湿地的研究主要集中于土壤表层理化特性变化^[26-28], 以及植被对该区域内土壤水盐变化的影响^[29-30]。随着对艾比湖湿地研究的逐渐深入, 对该区域的研究逐渐向沿河^[31-33] (博尔塔拉河、精河) 区域扩展, 大多数研究主要以分析其土壤理化特性为主。因此本文以艾比湖湿地内盐结皮作用下土壤为研究对象, 探讨盐结皮

对其下土壤物理特性的影响和相关性分析。以期艾比湖湿地内盐结皮下土壤特性研究提供数据基础,也为其他地区土壤盐结皮研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

艾比湖湿地(44°30'~45°09'N, 82°33'~83°53'E)地处西北内陆区,是我国干旱区内最大的咸水湖,湖水含盐量较高导致周围土壤盐渍化严重,并逐渐形成壳状盐结皮^[24, 26, 31]。该区域属于温带大陆性气候降水稀少、蒸发量较大,多大风和沙尘天气,年平均气温6~8℃,多年降水量104.5 mm,蒸发量高达1300 mm,对盐结皮形成产生一定促进作用。西北部阿拉山口为大风口区,最高风速高达55 m/s,大风日数超过150 d,由阿拉山口从西北—东南吹过艾比湖面,导致阿拉山口区、艾比湖北部区和艾比湖南部区的气候、土壤特性和盐结皮厚度具有一定差异性。因此本文以艾比湖湿地为研究区,将其分为阿拉山口区(A区)、艾比湖北部区(B区)和艾比湖南部区(C区)(见图1)。A区盐结皮处于衰退期,该区长期受风蚀影响稀少,土壤以粒度较大的砂土为主;B区盐结皮处于生长期,该区靠近湖面,气团虽未通过湖面但随着距离风口逐渐增加,受其影响逐渐降低,靠近湖面有干涸湖床,区域内土壤灰棕漠土和黏土较多;C区盐结皮处于成熟期,气团经过艾比湖面将湿润气团带入该区,使区域内土壤大多以细砂、黏土为主。

1.2 研究方法

1) 土壤样品采集与测定,2019年6月对艾比湖湿地进行野外调查,依据盐结皮厚度、植被类

型、土壤类型等要素综合考察结果。采用分块采样法,在保护区内选取了30个具有代表性的盐结皮土壤样方,每个样方10 m×10 m,每个样方相距4 km,在样方内选取5个样点的3层土壤(0~20、20~40和40~60 cm),每层土壤取5样点平均值。记录盐结皮厚度和周围环境情况,并且在每个盐结皮样方附近100 m选取无盐结皮土壤为对比样。

2) 用环刀取样,选取样点后记录周围植被状况、海拔、经纬度和土壤质地等要素,用游标卡尺测量盐结皮厚度,挖取0~20、20~40和40~60 cm剖面,用体积为100 cm³的环刀装取土壤样品,在每个剖面选取3个平行样,为减少误差先称重,分不同深度装入塑封袋内。将每个剖面的剩余土壤用土钻取出后均匀混合,装入塑封袋带回实验室。衰退期盐结皮下土壤类型以砂土为主,梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为主要植被,生长期盐结皮下土壤类型以灰棕漠土和黏土为主,盐角草(*Salicornia europaea*)和盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)为主要植被,成熟期盐结皮下土壤类型以黏土和砂土为主,芦苇(*Phragmites australis*)和盐节木为主要植被。土样带回实验室后自然风干,将土壤样品过筛后采用马尔文激光仪进行粒度测定(为突出研究针对性,主要记录粒度区间为0.001~0.01、0.01~0.05和0.05~1.00 mm);容重采用环刀法进行计算;土壤含水量采用烘干法(105℃)测定;孔隙度和持水量采用吸水法进行测定;用Microsoft Excel 2019进行基础数据处理,利用Origin 2018软件分析各层土壤物理特,最后采用SPSS 22软件对不同厚度的盐结皮进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型盐结皮下土壤物理特性垂直变化

2.1.1 土壤粒度变化 不同类型盐结皮覆盖下的土壤粒度组成有所差异。由图2可知,不同类型盐结皮下土壤粒度占比不同,且不同深度土壤粒度占比也不相同。其中A区衰退期盐结皮的土壤粒度0.05~1.00 mm占比最大(50.1%),并随深度增加而占比不断下降。粒度为0.01~0.05 mm的土壤占比随深度变化基本保持不变(31.3%~34.9%),而粒度为0.001~0.01 mm的土壤占比随深度增加占比呈上升趋势,因此盐结皮衰退期内土壤粒度

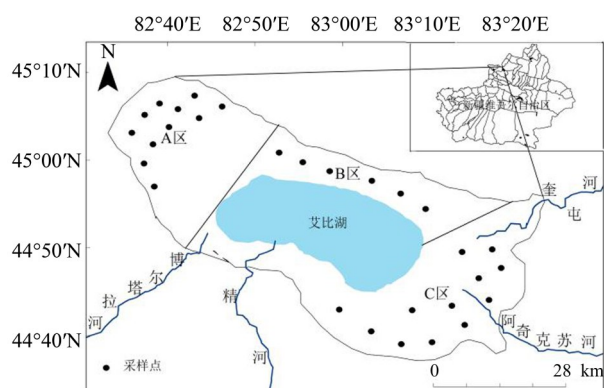


图1 研究区域概况图

Fig. 1 The sketch of the study region

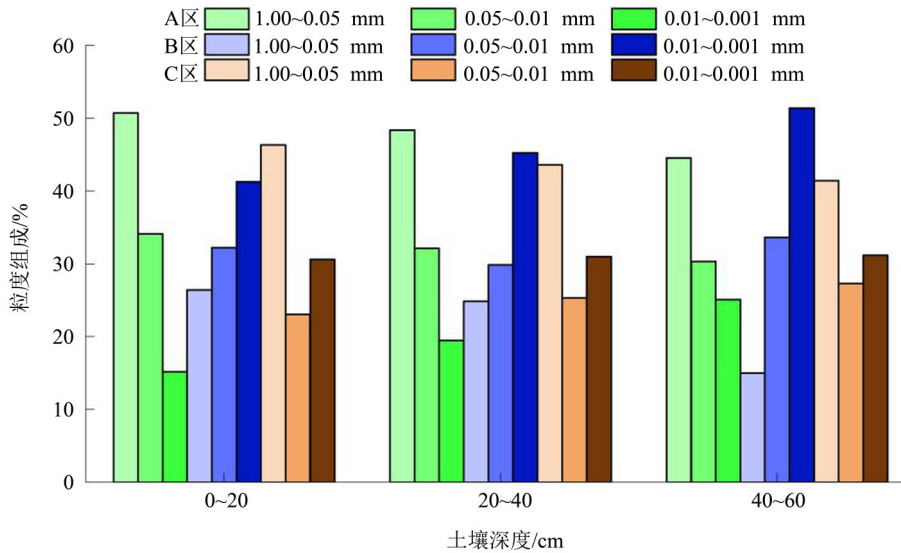


图2 盐结皮下不同深度土壤颗粒组成

Fig. 2 The soil particle compositions with depths under soil salt crust

主要为 1.00~0.05 mm。这可能由于盐结皮衰退期位于阿拉山口, 常年受大风侵蚀, 导致区域内盐结皮破损, 水盐运移速度快致使土壤粒度较大。B 区盐结皮生长期土壤粒度以 0.001~0.01 mm 为主, 0~20 cm 超过 40% 且随深度增加比例逐渐上升, 40~60 cm 超过 50%。粒度为 0.05~1.00 mm 的土壤占比最低, 在 40~60 cm 处仅占 14.7%。这可能由于盐结皮生长期距艾比湖面较近地下水位较高, 导致下层土壤黏粒较多。C 区盐结皮成熟期内土壤粒度大多在 0.05~1.00 mm (46.5%) 之间, 整体土壤粒度组成占比由大到小依次为 1.00~0.05、0.01~0.001 和 0.01~0.05 mm, 随深度增加 0.01~0.001 mm 基本不变。这可能由于区域内长期覆盖盐结皮, 土壤机械组成较为稳定, 受外界因素影响小而导致的结果。

2.1.2 土壤容重变化 土壤盐结皮的覆盖会导致土壤机械组成发生一定变化, 其容重也会发生相应的改变。由图 3 可得, 土壤容重随深度增加, 呈上升趋势变化, 从小到大依次为 0~20、20~40 和 40~60 cm。另一方面不同类型盐结皮下土壤容重有所不同, 其中盐结皮生长期土壤(B 区)其土壤容重超过 1.66 g/cm³, 在 40~60 cm 处达到最大值 (1.88 g/cm³)。盐结皮衰退期的土壤(A 区)其土壤容重为 1.38~1.41 g/cm³。盐结皮成熟期土壤(C 区)其土壤容重为 1.68~1.47 g/cm³。因此, 研究区内土壤容重由小到大依次表现为盐结皮生长期、盐结皮成熟期和盐结皮衰退期。

2.1.3 土壤孔隙度变化 不同类型盐结皮下土壤

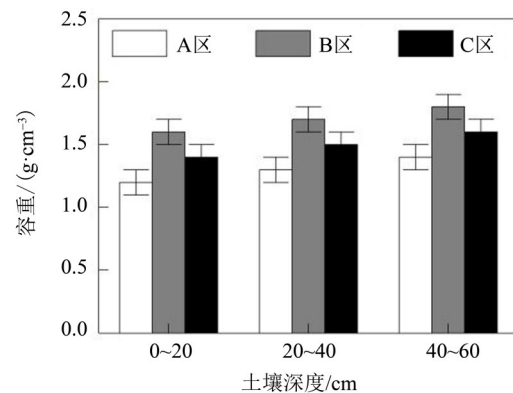


图3 盐结皮下不同深度土壤容重

Fig. 3 The soil bulk densities with depths under soil salt crust

孔隙度组成有所不同。由图 4 可得, 盐结皮衰退期(A 区) 0~20 cm 的表层土壤总孔隙度超过 50%, 其中毛管孔隙 45.1%, 非毛管孔隙度 4.9%。20~40 和 40~60 cm 土壤总孔隙均超过 45%。盐结皮成熟期(C 区) 0~20 cm 的土壤总孔隙度达 44.9%, 其中毛管孔隙度超过 40%, 非毛管孔隙度低于 5%。随深度增加土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度逐渐变小。盐结皮生长期(B 区)相对于衰退期和成熟期差异性较大, 整体总孔隙度低于 35%, 非毛管孔隙度低于 3%, 差异性显著。孔隙度由大到小依次为盐结皮衰退期、成熟期和生长期。

土壤含水量是盐结皮形成的关键因素, 并且盐结皮能够抑制土壤中水分蒸发, 因此不同盐结皮类型内的土壤含水量、饱和含水量和田间持水量有所不同。根据图 5 含水量变化可知, 饱和含水

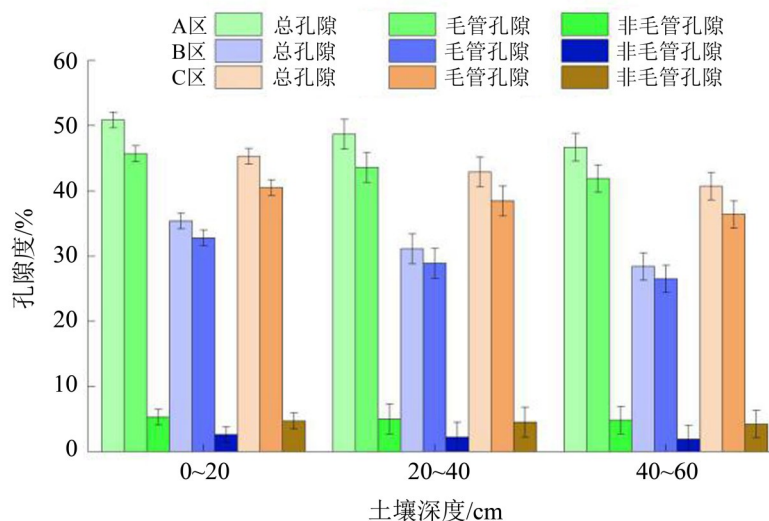


图4 盐结皮下不同深度土壤孔隙度

Fig. 4 The soil porosities with depths under soil salt crust

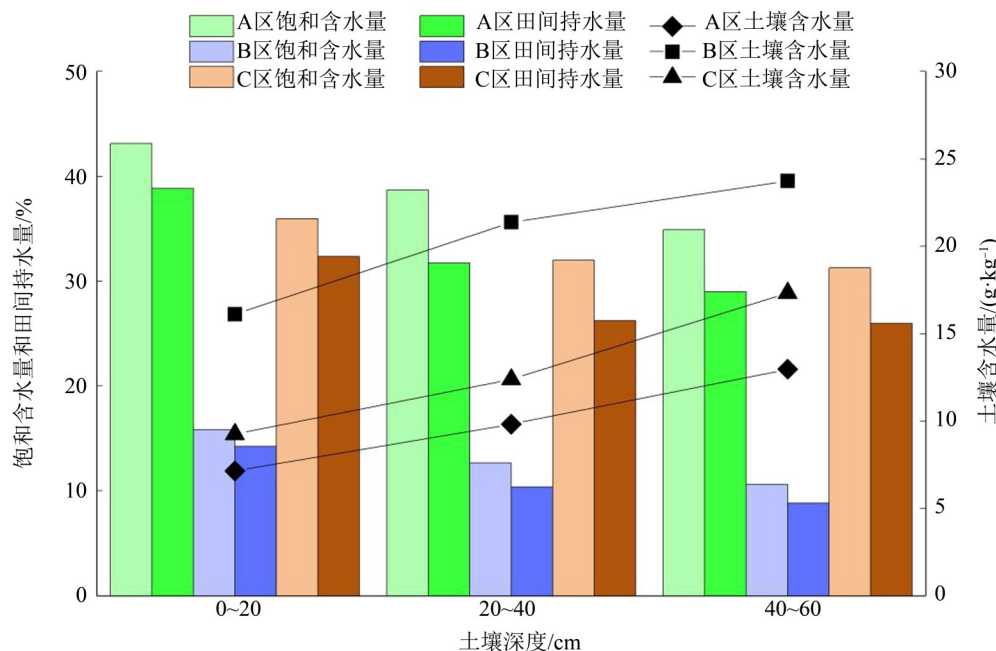


图5 盐结皮下不同深度土壤水分含量变化

Fig. 5 The soil moisture contents with depths under soil salt crust

量、田间持水量随深度增加呈下降趋势, 而土壤含水量随深度增加而增加。其中盐结皮衰退期内 (A区) 0~20 cm 的土壤饱和含水量超过 45%, 盐结皮生长期内 (B区) 0~20 cm 的土壤饱和含水量小于 20%, 两者差距显著。盐结皮生长期的土壤含水量明显高于盐结皮成熟期和衰退期。20~40 cm 的土壤含水量随深度增加有所上升, 饱和含水量和田间持水量随深度增加持续下降。盐结皮衰退期、生长期和成熟期的饱和含水量和田间持水量在 40~60 cm 处都达到最低值 (34.8% 和 27.4%、

11.3% 和 9.4%、31.3% 和 25.7%), 土壤含水量均达到最高值分别为 23.7%、35.3% 和 27.2%。饱和含水量和田间持水量由大到小依次表现为盐结皮衰退期、成熟期和生长期, 土壤含水量由大到小依次为生长期、成熟期和衰退期, 不同深度饱和含水量和田间持水量由大到小依次为 0~20、20~40 和 40~60 cm, 土壤含水量由大到小依次为 40~60、20~40 和 0~20 cm, 因此饱和含水量和田间持水量变化具有一致性。

2.2 盐结皮厚度与不同深度土壤物理性质相关性分析

由表 1 可得, 结皮厚度与 0~20 cm 的土壤总孔隙度、毛管孔隙、非毛管孔隙、饱和含水量和土壤含水量呈正相关, 与土壤容重呈负相关。土壤粒度为 1.00~0.05 mm 时与盐结皮厚度相关性极显著 ($P < 0.01$), 土壤粒度为 0.01~0.001 mm 时与盐结皮厚度相关性不显著 ($P > 0.05$)。土壤毛管孔隙度与盐结皮厚度极显著相关 ($P < 0.01$), 土壤总孔隙度、饱和含水量、容重和土壤含水量与盐结皮厚度相关性显著 ($P = 0.01 \sim 0.05$), 土壤非毛管孔隙

度和粒度为 0.01~0.001 mm 时与盐结皮厚度相关性不显著 ($P > 0.05$)。由表 2 可知, 土壤深度为 20~40 cm 时, 土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和含水量、土壤含水量及土壤不同粒度与盐结皮厚度成正相关; 土壤容重与盐结皮厚度呈负相关。粒度为 1.00~0.05 mm 时与盐结皮厚度相关性极显著 ($P < 0.01$), 非毛管孔隙度与盐结皮厚度相关性不显著 ($P > 0.05$)。土壤总孔隙度、毛管孔隙度饱和土壤含水量与盐结皮厚度相关性显著 ($P = 0.01 \sim 0.05$), 土壤容重、非毛管孔隙度和土壤粒度 0.01~0.001 mm 与盐结皮厚度相关性不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 盐结皮厚度与土壤物理特性相关性分析(0~20 cm)¹⁾

Table 1 Correlation analysis of salt crust thickness and soil physical properties(0~20 cm)

项目	盐结皮厚度	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	容重	饱和含水量	土壤含水量	土壤粒度 1	土壤粒度 2	土壤粒度 3
盐结皮厚度	1									
总孔隙度	0.558*	1								
毛管孔隙度	0.653**	0.997**	1							
非毛管孔隙度	0.242	0.776**	0.733**	1						
容重	-0.363*	-0.859**	-0.848**	-0.726**	1					
饱和含水量	0.534*	0.974**	0.970**	0.772**	-0.896**	1				
土壤含水量	0.526*	-0.531*	-0.523*	-0.451*	0.543*	-0.549**	1			
土壤粒度 1	0.905**	0.943**	0.938**	0.747**	-0.886**	0.933**	-0.686**	1		
土壤粒度 2	0.588*	-0.071	-0.066	-0.066	0.404*	-0.025	0.037	-0.122	1	
土壤粒度 3	0.327	-0.840**	-0.838**	-0.661**	0.621**	-0.854**	0.619**	-0.868**	-0.387*	1

1) **在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。土壤粒度 1~3 分别为 1.00~0.05, 0.05~0.01 和 0.01~0.001 mm。

表 2 盐结皮厚度与土壤物理特性相关性分析(20~40 cm)¹⁾

Table 2 Correlation analysis of salt crust thickness and soil physical properties(20~40 cm)

项目	盐结皮厚度	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	容重	饱和含水量	土壤含水量	土壤粒度 1	土壤粒度 2	土壤粒度 3
盐结皮厚度	1									
总孔隙度	0.476*	1								
毛管孔隙度	0.531*	0.998**	1							
非毛管孔隙度	0.246	0.849**	0.812**	1						
容重	-0.309	-0.869**	-0.865**	-0.791**	1					
饱和含水量	0.574*	0.984**	0.980**	0.850**	-0.891**	1				
土壤含水量	0.432*	-0.552*	-0.547*	-0.484*	0.429*	-0.544*	1			
土壤粒度 1	0.746**	0.964**	0.965**	0.804**	-0.878**	0.951**	-0.628**	1		
土壤粒度 2	0.525*	0.058	0.054	0.022	0.295	0.108	-0.212	0.052	1	
土壤粒度 3	0.292	-0.920**	-0.919**	-0.759**	0.731**	-0.923**	0.653**	-0.951**	-0.356	1

1) 土壤粒度 1~3 分别为 1.00~0.05, 0.05~0.01 和 0.01~0.001 mm, 其他同表 1。

由表3可得,土壤毛管孔隙度和土壤粒度在1.00~0.05 mm时与盐结皮厚度相关性极显著($P < 0.01$),而土壤粒度为0.05~0.01 mm时、土壤含水量、饱和含水量、总孔隙度和非毛管孔隙度与土壤盐结皮厚度相关性显著($P < 0.05$),土壤容重和粒度在0.01~0.001 mm之间时与盐结皮厚度相关性不显著($P > 0.05$),其中土壤容重与盐结皮厚度呈负相关。

综上所述,表层土壤(0~20 cm)物理特性与盐结皮厚度相关性最强,随着深度增加其相关性逐渐下降,其中毛管孔隙度和土壤粒度(1.00~0.05 mm)与盐结皮厚度呈显著正相关 $P < 0.01$,土壤容重与盐结皮厚度呈负相关,土壤容重越大盐结皮厚度薄,而非毛管孔隙度和土壤粒度

(0.01~0.001 mm)与盐结皮厚度相关性最差。

2.3 盐结皮厚度变化的影响因素分析

采用主成分分析方法对盐结皮影响因子进行分析,为增加分析的准确性,将盐结皮厚度从小到大分为8个区间,通过主成分分析对土壤物理性质的含水量(土壤含水量和田间持水量)、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)、粒度(1.00~0.05, 0.05~0.01和0.01~0.001 mm)和容重等9项物理指标进行综合评价,旨在评价湿地不同厚度盐结皮下的主要影响因素。通过分析方差贡献第一主成分的方差贡献为78.15%,第二主成分15.61%,说明第一主成分和第二主成分能大体反映所有指标情况(表4)。

表3 盐结皮厚度与土壤物理特性相关性分析(40~60 cm)¹⁾

Table 3 Correlation analysis of salt crust thickness and soil physical properties(40 - 60 cm)

项目	盐结皮厚度	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	容重	饱和含水量	土壤含水量	土壤粒度1	土壤粒度2	土壤粒度3
盐结皮厚度	1									
总孔隙度	0.469*	1								
毛管孔隙度	0.566**	0.998**	1							
非毛管孔隙度	0.319*	0.878**	0.848**	1						
容重	-0.298	-0.899**	-0.897**	-0.791**	1					
饱和含水量	0.493*	0.986**	0.983**	0.877**	-0.951**	1				
土壤含水量	0.534*	-0.578*	-0.558*	-0.630**	0.480*	-0.547*	1			
土壤粒度1	0.613**	0.965**	0.964**	0.819**	-0.920**	0.959**	-0.610**	1		
土壤粒度2	0.519*	-0.568*	-0.566*	-0.540*	0.637**	-0.716**	0.321	-0.774**	1	
土壤粒度3	0.015	-0.973**	-0.973**	-0.832**	0.879**	-0.955**	0.639**	-0.988**	-0.669**	1

1) 土壤粒度1~3分别为1.00~0.05, 0.05~0.01和0.01~0.001 mm,其他同表1。

表4 解释的总方差

Table 4 The total variance of the interpretation

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	7.034	78.154	78.154	7.034	78.154	78.154
2	1.405	15.615	93.769	1.405	15.615	93.769
3	0.364	4.043	97.812			
4	0.167	1.854	99.666			
5	0.022	0.247	99.914			
6	0.006	0.071	99.984			
7	0.001	0.016	100			
8	1.00×10^{-13}	1.02×10^{-13}	100			
9	-1.00×10^{-13}	-1.01×10^{-13}	100			

通过土壤物理特性指标的主成分载荷 (表 5) 和各指标的成分的分系数 (表 6) 可得相应主成分分析函数计算公式

$$F_1 = 0.149X_1 + 0.158X_2 + 0.055X_3 - 0.261X_4 + 0.173X_5 + 0.003X_6 + 0.174X_7 - 0.199X_8 - 0.101X_9,$$

$$F_2 = 0.01X_1 - 0.016X_2 + 0.205X_3 + 0.327X_4 - 0.054X_5 - 0.299X_6 - 0.053X_7 + 0.607X_8 - 0.113X_9.$$

通过此函数公式对不同厚度盐结皮下土壤物理性质进行综合评分, 结果见表 7。其中 F_1 得分随盐结皮厚度增加而逐渐增加, 第一主成分中毛管孔隙度 (0.991)、土壤粒度 1.00~0.05 mm (0.984) 和饱和含水量 (0.973) 成为盐结皮厚度的主要影响因子。 F_2 得分随盐结皮厚度增加而逐渐在降低, 第二主成分中土壤粒度 0.01~0.001 mm (0.984) 和容重 (0.566) 成为影响盐结皮厚度的主要影响因子。因此当盐结皮厚度越厚时, 毛管孔隙度、饱和含

水量和土壤粒度 1.00~0.05 mm 对其影响因素在越大, 而盐结皮越薄时, 土壤容重和土壤粒度 0.01~0.001 mm 对其影响最大。

3 讨论

土壤孔隙度的大小和分布在一定程度上会决定土壤水分供应以及通气性, 而通气性会使盐结皮的厚度和发展产生一定影响。本研究表明土壤总孔隙度, 尤其是毛管孔隙度越大盐结皮厚度越厚, 这与孙梅等^[34] 研究结果一致。对比分析艾比湖北部区与阿拉山口区和艾比湖南部区发现, 盐结皮越厚的区域表层土壤的孔隙度越大, 随深度增加孔隙度逐渐变小。这与 Joeckel & Clement^[35] 研究结果有所不同, 这可能由于干旱区内湿地土壤与滨海湿地土壤类型有所差异而导致的结果。土壤含水量主要影响土壤蒸发, “盐随水动” 干旱

表 5 因子载荷值¹⁾

Table 5 Factor loading matrix

土壤物理指标	第一主成分	第二主成分	代码
总孔隙度	0.969	-0.068	X_1
毛管孔隙度	0.991	-0.108	X_2
非毛管孔隙度	0.918	0.236	X_3
容重	-0.798	0.566	X_4
饱和含水量	0.973	-0.164	X_5
土壤含水量	-0.797	-0.389	X_6
土壤粒度 1	0.984	-0.163	X_7
土壤粒度 2	-0.963	-0.092	X_8
土壤粒度 3	0.369	0.894	X_9

1) 土壤粒度 1~3 分别为 1.00~0.05, 0.05~0.01 和 0.01~0.001 mm。

表 6 成分得分系数值¹⁾

Table 6 The matrix of component score coefficients

成分	得分系数 1	得分系数 2
总孔隙度	0.149	0.01
毛管孔隙度	0.158	-0.016
非毛管孔隙度	0.055	0.205
容重	-0.261	0.327
饱和含水量	0.173	-0.054
土壤含水量	0.003	-0.299
土壤粒度 1	0.174	-0.053
土壤粒度 2	-0.199	0.607
土壤粒度 3	-0.101	-0.113

1) 土壤粒度 1~3 分别为 1.00~0.05, 0.05~0.01 和 0.01~0.001 mm。

表7 盐结皮厚度区间主成分及排名

Table 7 The salt crust thickness of the interval principal component and ranking

盐结皮厚度/cm	F ₁	F ₁ 排名	F ₂	F ₂ 排名	F综合	F综合排名
0	0.351	5	2.148	1	0.649	2
0.1~0.5	0.697	3	0.207	3	0.613	3
0.6~1	0.421	4	0.249	2	0.697	1
1.1~1.5	-0.544	7	-0.208	5	-0.483	7
1.6~2.0	-2.138	8	-0.031	4	-1.788	8
2.1~2.5	-0.351	6	-0.236	6	-0.336	6
2.6~3	0.759	2	-0.653	7	0.234	5
>3	0.767	1	-1.302	8	0.418	4

区内土壤水分含量越大,其蒸发量就越大。由于艾比湖北部区域靠近湖面,土壤中水分中含盐量较大,因此导致该区域盐结皮最厚,这与Tedeschi等^[36]和许波等^[37]研究结果一致。通过对比3个区域发现,艾比湖北部区土壤含水量和饱和含水量高于艾比湖南部区和阿拉山口区。这可能由于盐结皮的产生会阻断土壤蒸发,从而使土壤保水性增强,且深度越大水分越不易蒸发,使下层土壤含水量和饱和含水量越大,与Tedeschi等^[36]和莫志新等^[38]研究结果一致。土壤粒度主要分为3个层次1.00~0.05,0.01~0.05和0.001~0.01 mm,盐结皮下土壤粒度以1.00~0.05 mm为主,随深度增加而略微降低这与Onofiok等^[39]研究结果相似。主要由于盐结皮本身不断腐蚀和胶结作用,使其粒度较大的土壤表浮在土壤表层,粒较小的土壤分布在下层,阿拉山口区受大风侵蚀导致土壤粒度偏大,但盐结皮具有一定抗风蚀性,因此其表土的粒度大多在1.00~0.05 mm之间,下层土壤受影响小,小粒度土壤逐渐增多。艾比湖北部区靠近湖面,土壤中水分含量较大,而盐结皮具有一定保水性,导致水分不易蒸发土壤黏土较多因此粒度主要以0.001~0.01 mm为主这与翟鹏辉等^[40]研究结果一致。艾比湖南部区盐结皮下土壤随深度增加土壤粒度逐渐减小,但以1.00~0.05 mm为主。不同粒度会对盐结皮厚度产生一定影响,本研究表明土壤粒度1.00~0.05 mm含量越多时盐结皮越厚,而0.001~0.01 mm含量越多,其盐结皮越薄。这与段争虎等^[41]研究结果不同,这可能由于海拔和坡度差异结果,本研究坡度较小且海拔较低,沙坡头研究区坡度较大且海拔较高,更容易对结皮造成破坏。

盐结皮厚度在不同环境和区域内有所不同,因此盐结皮厚度的影响要素很多,本文主要从土壤物理特性出发。主成分分析结果显示第一主成分(0.78)为毛管孔隙度,第二主成分(0.16)土壤粒度(0.01~0.001 mm)。对比分析表明孔隙度越大土壤结皮越厚,粒度越小盐结皮越薄,这可能由于土壤中孔隙会越大,土壤的水分和盐分越容易蒸发在地表,使盐结皮厚度逐渐增加,而孔隙度越小土壤越紧实,水分和盐分不易蒸散盐结皮较薄。土壤中0.01~0.001 mm的粒度含量越多时,盐结皮越薄,这与Ahmad等^[42]研究结果一致;黏土中不利于盐结皮胶结,并且黏土下的土壤几乎不受表层盐分影响,主要因为土壤本身不积盐,因此黏土含量越多盐结皮越薄。

4 结 论

1) 艾比湖湿地盐结皮下土壤粒度主要以0.05~1 mm为主(42.8%)。盐结皮衰退期和成熟期内的土壤粒度以0.05~1 mm为主(49.7%/40.8%),盐结皮生长期土壤粒度以0.01~0.001 mm为主(45.2%)。随深度增加0.05~1 mm含量逐渐减少,0.01~0.001 mm含量逐渐增多。土壤容重由大到小依次为盐结皮生长期(1.81 g/cm³)、成熟期(1.58 g/cm³)和衰退期(1.34 g/cm³),随深度增加土壤容重也有所增大。土壤孔隙度由大到小依次为盐结皮衰退期、成熟期和生长期。盐结皮生长期内土壤含水量最多,饱和含水量和田间持水量比盐结皮衰退期和成熟期小。

2) 盐结皮厚度与表层0~20 cm土壤粒度(0.05~1 mm)、毛管孔隙度呈极显著正相关($P < 0.01$),与总孔隙度、土壤容重、含水量(土壤含

水量、饱和含水量)和土壤粒度(0.05~0.01)相关性显著($P < 0.05$),与非毛管孔隙和土壤粒度(0.01~0.001)相关性不显著。随深度增加盐结皮厚度土壤物理性质的相关性逐渐下降。

3) 主成分分析表明盐结皮厚度主要影响因素为毛管孔隙度和土壤粒度(0.01~0.001 mm)。第一

主成分权重为78.1,第二主权重成分为16.5,盐结皮厚度越厚时毛管孔隙度对其影响越大,盐结皮厚度 > 3 cm时,毛管孔隙度、土壤粒度(0.05~1 mm)和饱和含水量对其影响最大。盐结皮厚度越薄时土壤粒度(0.01~0.001 mm)和土壤容重对其影响越大。

参考文献:

- [1] 季方. 塔里木盆地荒漠类型及其抗风蚀特征初探[J]. 水土保持学报, 2001(1): 16-18+53.
- [2] TIMOTHY M G, COLIN P N, KENNETH W G. Surface and subsurface sedimentary structures produced by salt crusts[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(1): 99-118.
- [3] 李诚志. 土壤风蚀环境下盐结皮研究及展望[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 402-408+415.
- [4] KAZMAN Z, SHAINBERG I M G. Effect of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils[J]. *Soil Science*, 1983, 135(3): 184-192.
- [5] ONOFIOK O, SINGER M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall[J]. *Soil Science*, 1984, 48(5): 1138-1143.
- [6] ZHANG J G, XU X W, LEI J Q, et al. Salt accumulation on surface mobile aeolian sandy soil under drip-irrigation with saline water in hinterland of the Taklimakan Desert[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2008, 53(S2): 63-70.
- [7] 莫治新. 盐结皮对土壤有机质和水分积累的影响[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3): 120-121+138.
- [8] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 极端干旱区咸水滴灌林地盐结皮对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 34-39.
- [9] 陈小红, 段争虎. 我国干旱沙漠地区不同类型土壤结皮的理化性质研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008(9): 134-138.
- [10] PRESLEY M A, CRADDOCK R A, ZOLOTOVA N. The effect of salt crust on the thermal conductivity of one sample of fluvial particulate materials under Martian atmospheric pressures[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2009, 114(E11). DOI: 10.1029/2009JE003355.
- [11] XU X, LI B, WANG X. Progress in study on irrigation practice with saline groundwater on sandlands of Taklimakan Desert Hinterland[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S1): 161-166.
- [12] FUJIMAKI H, SHIOZAWA S, INOUE M. Effect of salty crust on soil albedo[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118(1): 125-135.
- [13] 夏倩柔, 张波, 伍德彦. 绿洲荒漠交错带风沙土盐结皮抗风蚀特性分析[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(2): 28-34.
- [14] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 易盐渍区黏土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 495-501.
- [15] 季泉毅, 冯绍元, 袁成福, 等. 石羊河流域咸水灌溉对土壤物理性质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 802-807.
- [16] 邹桂梅, 黄明勇, 苏德荣, 等. 蒸发条件下不同地下水位夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 206-211.
- [17] 李生字, 雷加强, 徐新文, 等. 流动沙漠地区灌溉林地盐结皮层特征的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2007(2): 41-49.
- [18] 牛宝茹. 塔里木河上游表土积盐量遥感信息提取研究[J]. 土壤学报, 2005(4): 674-677.
- [19] 郑琦, 王海江, 李万涛, 等. 玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 214-220.
- [20] FINSTAD K, PFEIFFER M, MCNICOL G, et al. Rates and geochemical processes of soil and salt crust formation in salars of the Atacama Desert, Chile[J]. *Geoderma*, 2016, 284(6): 57-72.
- [21] 张建国, 孙树国, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮化学特征及其对土壤蒸发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 174-179.
- [22] 王大环, 李诚志, 李沼鹗. Na_2SO_4 对古尔班通古特沙漠细沙盐结皮特性的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1979-1986.
- [23] LANGSTON G, NEUMAN C M. An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind

- erosion: A comparison of the strength properties of biotic and salt crusts[J]. *Geomorphology*, 2005, 72(1): 40-53.
- [24] 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.
- [25] 白祥. 新疆艾比湖湖泊湿地生态脆弱性及其驱动机制研究[D]. 上海:华东师范大学,2010.
- [26] 方丽章,李艳红,李发东,等. 艾比湖湿地土壤水分总盐养分空间异质性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1):157-167.
- [27] 赵明亮,李艳红,朱海强. 艾比湖流域不同生态系统土壤水盐空间异质性分析[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6):1306-1313.
- [28] 杨军. 艾比湖湿地自然保护区典型植物群落土壤水文生态效应研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2011.
- [29] 阿尔达克·克里木,塔西甫拉提·特依拜,尼格拉·塔什甫拉提,等. 艾比湖自然保护区荒漠-盐生植被 VIS-NIR 光谱反射特征研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(2):453-458.
- [30] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等. 新疆艾比湖干涸湖底不同景观单元蒸发总盐分布与变化特征[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(4):616-624.
- [31] 毛吉旦木·地力夏提,王勇辉,海米提·依米提. 博、精河下游河岸带土壤速效养分空间异质性分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6):19-23+28.
- [32] 毋兆鹏. 博尔塔拉河、精河流域绿洲土壤异质性及其驱动力研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1):81-86.
- [33] 杨晓东,吕光辉,田幼华,等. 新疆艾比湖湿地自然保护区植物的生态分组[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12):2489-2494.
- [34] 孙梅,黄运湘,孙楠,等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2):233-238.
- [35] JOECKEL R M, CLEMENT B A. Surface features of the Salt Basin of Lancaster County, Nebraska[J]. *Catena*, 1999, 34(3):243-275.
- [36] TEDESCHI A, AQUILA R D. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 77(1):308-322.
- [37] 许波,张忠良,王永东,等. 高矿化度水灌溉条件下土壤盐结皮层与下层土壤总盐特征差异初探[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7):116-120.
- [38] 莫治新,韩飞,马萍,等. 不同盐结皮覆盖对土壤水分时空动态的影响[J]. *北方园艺*, 2017(6):175-178.
- [39] ONOFIOK O, SINGER M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall [J]. *Soil Science*, 1984, 48:(9)1138-1143.
- [40] 翟鹏辉,杨丽晶,李素艳,等. 蒸发条件下不同夹层土壤水盐动态特性研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(8):273-277.
- [41] 段争虎,刘新民,屈建军. 沙坡头地区土壤结皮形成机理的研究[J]. *干旱区研究*, 1996(6):31-36.
- [42] AHMAD N, ROBBINA J. Crusting of river estate soil, trinidad, and it is effect on gaseous diffusion, percolation, and seedling emergence [J]. *Soil Science*, 1971, 23(3): 23-31.

(责任编辑 秦社彩)