

王 彤,封超年,靳瑞萍,等. 苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):339-343.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.19.086

# 苏北滨海盐碱土壤盐碱化特征

王 彤<sup>1,2</sup>, 封超年<sup>1</sup>, 靳瑞萍<sup>1,2</sup>, 张焕朝<sup>1,2</sup>

(1. 南京林业大学林学院, 江苏南京 210037; 2. 南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037)

**摘要:**为了充分认识苏北滨海土壤盐碱化特征,采用相关性分析和主成分分析方法进行数据分析,对苏北滨海盐碱土壤全盐含量、pH 值、电导率、阴阳离子组成等特征进行系统研究。结果表明,研究区表层土壤全盐含量平均值为 1.68 g/kg(0.89~2.90 g/kg),属轻度到中度盐渍化,但变幅较大,且总体呈现东高西低和北高南低的水平分布特征。西面区域的变异系数比东面区域大。土壤含盐量和阳离子浓度整体随着土层深度的增加而降低,呈现表聚型特征。土壤 pH 值平均值为 8.80(8.21~9.48),属于强碱性土壤。电导率与土壤全盐含量呈极显著正相关关系。在各层土壤中,阳离子以  $\text{Na}^+$  为主,阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$  为主。全盐含量、 $\text{K}^+$  浓度、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度、 $\text{Na}^+$  浓度、 $\text{Cl}^-$  浓度是表征苏北滨海土壤盐化程度的主要特征因子。结果可为江苏滨海盐碱土改良与利用提供理论基础。

**关键词:**滨海盐碱土;主成分分析;盐分特征;全盐含量;盐渍化

**中图分类号:** S156.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)19-0339-05

江苏省位于我国大陆东部沿海中心,地处长江三角洲,长江以北有大面积淤积成陆的滨海冲积平原<sup>[1]</sup>。随着河流入海口的不断生长以及修筑海堤等活动的不断进行,每年可形成面积可观的海涂<sup>[2]</sup>。国民经济的快速发展导致土地资源日益紧缺,而江苏沿海地区有丰富的土地资源,但由于受海潮和海水型地下水的双重作用,滨海地区土壤具有盐分含量高、养分含量低、地下水矿化度高、土壤盐碱化严重等特点,致使这些土地资源未能得到有效的利用。土壤盐渍化是影响盐土荒地和滩涂资源开发利用的主要障碍因素<sup>[3]</sup>。目前,围绕沿海地区生态环境改良和盐碱土利用的研究进行得如火如荼,尤其是如何高效利用盐碱地成为研究热点<sup>[4]</sup>。改善生态环境和促进农林业生产的前提是对沿海土壤进行改良利用,近年来江苏北部沿海地区要求大面积植树造林,而如何提高造林成活率,保证树木健康生长,除了树种的选择外,弄清土壤盐碱化特征是盐碱地高效利用的前提。通过对大丰沿海林场土壤进行采样分析,研究该地区土壤全盐含量与各离子之间的相关关系,对研究区土壤盐化和碱化之间的关系进行定量分析,并对土壤盐分离子进行主成分分析,得到在滨海盐碱土壤盐渍化过程中具有主导性和限制性的关键指标,综合全面反映土壤盐碱化特征<sup>[5]</sup>。因此,本研究采用相关性分析和主成分分析方法对江苏省盐城市大丰沿海林场土壤盐碱化特征进行系统分析,以期为该地区的盐碱运移规律、盐碱土改良与利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省盐城市大丰沿海林场,该区域于 1991 年开始进行围垦,南部与麋鹿自然保护区一堤之隔,为江苏省沿海重点防护林,其淡水资源较为丰富,可为改良土壤提供比较充足的淡水水源,在 1995 年修建水利工程,引淡水洗盐。围垦区前期修建鱼池,后期平整为农田,截至 2016 年初已进行了 4~5 年的水稻—小麦轮作。研究区范围为 120°47'~120°48' E,33°03'~33°04' N,总面积为 100 hm<sup>2</sup>。

研究区地处北亚热带季风气候区,气候具有明显的过渡性、海洋性和季风性。年平均降水量为 1 058.4 mm,虽然降水丰沛,但季节性分布不均,调蓄空间小<sup>[5]</sup>,主要集中在 6—8 月的雨季。多年平均蒸发量为 825.5 mm,多年平均气温为 14.1℃,无霜期为 230 d 左右。土壤属于典型性的淤质冲积盐土,发育于海相沉积物,其沉积母质为近代泥沙沉积物,全剖面土质均匀,以粉沙为主,土壤容重在 1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup> 之间,孔隙度为 40%~50%。区域内地下水位普遍较高,多为 0.8~2.4 m,且矿化度较高<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样品采集和测试

**1.2.1 样品采集** 2016 年 3 月 22 日,根据大丰沿海林场土地利用现状,将研究区大致分为 4 个区域,即将处于西北方向的区域视为 1 号区,西南方向的区域视为 2 号区,东北方向的区域视为 3 号区,东南方向的区域视为 4 号区,每个区域按照“S”型布设 8 个点,共 32 个。每个样点采集 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 土层的土样,装入塑封袋中并将同一区域不同采样点相同层次的土样充分混合,共得到 128 个混合土样,取样的同时,用全球定位系统(global positioning system,简称 GPS)精确定位每个点,并记录采样点经纬度和高程数据。

**1.2.2 土壤样品处理与分析测定** 对采集后的样品在室内进行风干处理,挑去植物根茎残渣、瓦砾等,过 1 mm 筛,装入塑封袋备用。测试土壤溶液是土水质量比为 1:5 的浸提液,

收稿日期:2017-05-22

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(16)1005、CX(17)1004];江苏省高校优势学科建设工程。

作者简介:王 彤(1992—),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事盐碱土改良与利用研究。E-mail:790746916@qq.com。

通信作者:张焕朝,博士,教授,主要从事林木营养与施肥研究。E-mail:hezhang@njfu.edu.cn。

采用电位法测定土壤 pH 值;采用残渣烘干质量法测定土壤全盐含量;采用电导率测量仪测定土壤电导率;阳离子[钾离子( $K^+$ )、钠离子( $Na^+$ )、钙离子( $Ca^{2+}$ )、镁离子( $Mg^{2+}$ )]浓度的测定采用等离子发射光谱法;碳酸根离子( $CO_3^{2-}$ )、碳酸氢根离子( $HCO_3^-$ )浓度的测定采用中和滴定法;氯离子( $Cl^-$ )浓度的测定采用硝酸银滴定法;硫酸根离子( $SO_4^{2-}$ )浓度的测定采用硫酸钡比浊法。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 对土壤全盐含量、pH 值进行统计分析;采用 SPSS 22.0 对离子间以及各离子与全盐、土壤 pH 值之间进行相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 盐分特征

2.1.1 土壤盐分垂直分布特征 土壤的全盐含量是表征土壤含盐量大小及盐渍化程度高低的重要指标<sup>[6]</sup>。从表 1 可以看出,整个研究区土壤属于轻度盐渍化(1~2 g/kg)到中度盐渍化(2~4 g/kg)。研究区表层(0~10 cm 土层)土壤全盐含量平均值为 1.68 g/kg,且土壤全盐含量整体随着土层深度的

增加呈降低趋势,由此可见,研究区土壤全盐含量呈现表聚型特征,主要是由于本次样品采集时间为 3 月下旬,为该区的枯水期,春季强烈的蒸发环境加上植物的蒸腾作用,导致蒸发量大于降水量,含易溶性盐类的地下水不断向地表蒸发聚集,从而增加了表层土壤中可溶性盐分的含量<sup>[7]</sup>。0~10 cm 土层中的土壤全盐含量平均值在 2 号区最小,3 号区最大。土壤全盐含量平均值整体随着平均海拔的升高而降低。

变异系数是反映变量离散程度的重要指标,盐分在土壤剖面各土层中的变异系数在一定程度上揭示了盐分在空间上的分布特征<sup>[8]</sup>。由表 1 可知,在 4 个区域中,1 号、2 号区域整个垂直面的土壤全盐含量变异系数较大,其变异系数范围分别在 38%~48%、45%~63%之间,属于中强度变异性。从土壤剖面垂直分布来看,1 号、2 号区域土壤全盐含量变异系数随着土层深度的增加呈先增大后减小的变化趋势,主要是由于在采样期间 1 号、2 号区域已经进行了深耕,但随着土层深度的增加,土壤盐分受外界的干扰强度减小,盐分分布均匀,全盐含量的变异系数变小。3 号、4 号区域整个垂直面上表层的土壤全盐含量变异系数最大。

表 1 研究区土壤全盐含量统计特征

小区编号	样点数 (个)	平均海拔 (m)	土层 (cm)	土壤全盐含量(g/kg)				变异系数 (%)
				最小值	最大值	平均值	标准差	
1 号	8	8.67	0~10	1.01	2.83	1.70	0.65	38
			10~20	0.88	3.02	1.72	0.72	42
			20~40	0.69	2.46	1.28	0.61	48
			40~60	0.72	2.46	1.36	0.58	43
2 号	8	11.90	0~10	0.89	2.90	1.57	0.71	45
			10~20	0.59	2.89	1.48	0.82	55
			20~40	0.56	2.89	1.26	0.79	63
			40~60	0.58	2.23	1.13	0.56	50
3 号	8	9.04	0~10	1.23	2.83	1.78	0.57	32
			10~20	1.02	1.81	1.30	0.26	20
			20~40	0.62	1.47	1.03	0.24	23
			40~60	0.62	1.06	0.87	0.16	18
4 号	8	9.09	0~10	0.91	2.83	1.66	0.61	37
			10~20	0.92	1.97	1.35	0.32	24
			20~40	0.72	1.64	1.13	0.32	28
			40~60	0.73	0.73	1.12	0.32	28

2.1.2 土壤电导率和全盐含量关系 土壤含盐量可以反映盐渍化的程度,由于土壤含盐量不易测定,而电导率的测定具有可靠、经济、快速的特点,因此通常用电导率来指示土壤盐渍化程度。不同地区的盐碱土含盐类型存在差异,深入研究本地区土壤全盐含量与其 1:5 土水质量比浸提液电导率之间的关系对于确定区域盐分状况具有重要的理论及实用价值<sup>[9]</sup>。建立土壤全盐含量( $y$ )与电导率( $x$ )的回归方程,由图 1 可知,二者呈极显著正相关关系( $r^2=0.9429$ ),说明该地区可以通过电导率的快速测定来及时了解其土壤的盐分背景,提高野外调查、土地利用规划的效率,大量节省人力、物力和时间,且利于国内外的交流<sup>[10]</sup>;同时可以通过测定电导率来计算土壤含盐量,进而对土壤的盐渍化程度进行分级。

2.2 不同土层土壤盐分离子特征

由图 2 可知,土壤盐分中的阳离子主要为  $Na^+$ ,各土层

$Na^+$  含量占该土层土壤阳离子总量的 50% 以上,最多可达 82%; $Ca^{2+}$  次之,占阳离子总量的 10% 以上,最多可达 32%。在各层土壤中, $Mg^{2+}$  含量最少。随着土层深度的增加, $Na^+$ 、

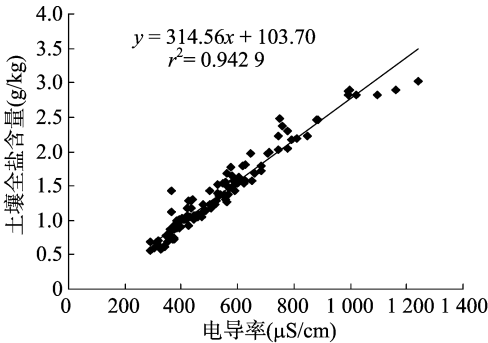


图1 土壤含盐量与电导率的关系

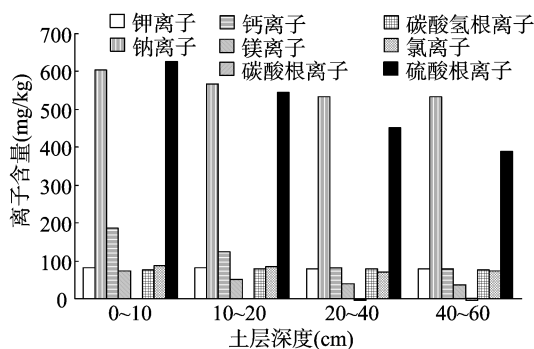


图2 土壤中主要离子的浓度及其垂直分布态势

$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量整体呈降低趋势,与土壤全盐含量的变化趋势一致。从阴离子组成来看,各层土壤中的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量明显高于  $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$ 。 $\text{SO}_4^{2-}$  在阴离子总量中的占比最大,为 71%~79%, $\text{Cl}^{-}$  次之,其次是  $\text{HCO}_3^{-}$ 。 $\text{SO}_4^{2-}$  含量随土层深度的增加而降低, $\text{HCO}_3^{-}$  含量随深度的增加变化幅度不大, $\text{CO}_3^{2-}$  浓度随深度的增加而增大。0~10、10~20、20~40、40~60 cm 土层  $\text{Cl}^{-}/\text{SO}_4^{2-}$  毫克当量比值分别为 0.14、0.16、0.16、0.19,随土层深度的增加, $\text{Cl}^{-}/\text{SO}_4^{2-}$  毫克当量比值整体呈增大趋势,根据当土壤  $\text{Cl}^{-}/\text{SO}_4^{2-}$  离子毫克当量比值小于 0.2 时为硫酸盐土的分类方法,该地区土壤的主要盐分类型为硫酸盐。0~60 cm 土层的盐分由硫酸盐过渡至氯化物-硫酸盐可能是地形因素以及盐分溶解度不同(硫酸盐的溶解度大于氯化物的溶解度)的综合作用结果。 $\text{CO}_3^{2-}$  在 0~20 cm 土层中的浓度非常小,在部分样点 20~40 cm 土层中的浓度也很小,一方面可能是因为研究区的土壤呈强碱性, $\text{CO}_3^{2-}$  容易与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  形成碳酸盐沉淀,另一方面可能是因为部分  $\text{CO}_3^{2-}$  水解形成了  $\text{HCO}_3^{-}$  [11]。

### 2.3 土壤盐分离子间的相关性

对各离子间的相关分析可揭示盐分在土体中的存在形态,在一定程度上反映出盐分的运动趋势 [12]。由表 2 可知,0~10 cm 土层全盐含量与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ );  $\text{Mg}^{2+}$  浓度与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),相关系数分别为 0.778、0.814;  $\text{Na}^{+}$  浓度与  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),其中  $\text{Na}^{+}$  浓度与  $\text{K}^{+}$  浓度相关性较高,相关系数为 0.900;  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  浓度与  $\text{Cl}^{-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤全盐含量与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),说明全盐含量随着  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Cl}^{-}$  等浓度的增大而增加。10~20 cm 土层全盐含量与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤 pH 值与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈显著或极显著负相关关系;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  浓度与  $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),相关系数分别为 0.820、0.836。20~40 cm 土层  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  浓度与  $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ );  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度与  $\text{Na}^{+}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤 pH 值与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土层全盐含量与  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ );  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度与  $\text{HCO}_3^{-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )。40~60 cm 土层土壤 pH 值同样与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度呈极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ )。说明在正常  $\text{CO}_3^{2-}$  分

压下, $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  的溶解度很小,它们在土壤溶液中的浓度很低 [12]; 40~60 cm 土层, pH 值与  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),且土壤 pH 值变化规律跟  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度一致,说明土壤的酸碱性主要由  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度决定。

对比不同土层各盐分离子之间的相关性可知,随着土壤深度的变化,各离子间的相关系数也随着改变,0~10 cm 土层全盐含量与  $\text{Cl}^{-}$  浓度呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),随着土层深度的增加,全盐含量与  $\text{Cl}^{-}$  相关性整体明显减弱,说明该地区土壤在经历脱盐和积盐过程中主要以硫酸盐的运移为主,而氯化盐在土壤中运移缓慢。0~60 cm 土层  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度与  $\text{HCO}_3^{-}$  浓度的相关系数随着深度增加而增大;  $\text{K}^{+}$  浓度与  $\text{Na}^{+}$  浓度的相关系数随着深度的增加减小;  $\text{Cl}^{-}$  浓度与  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的相关系数随着深度的增加而减小。

### 2.4 土壤盐碱化参数与特征分析

**2.4.1 土壤 pH 值垂直变化特征** 土壤 pH 值是评价土壤盐碱化程度的一个重要指标,对土壤的氧化还原、沉淀溶解、吸附、解吸和配合反应起到支配作用 [12]。由表 3 可知,研究区土壤 pH 值随土层深度的增加而增大,主要是由于土壤受到海水性地下水的的影响,矿化程度高的地下水源受到土壤胶体结合的  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子的吸引,使得碱性离子基团富集在下层土壤,表现为深层土壤 pH 值更为偏高且碱化程度更大、更稳定的特点。由于在盐分的淋失过程中,土壤中的  $\text{Na}^{+}$  大量置换土壤胶体所吸附的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  并附着在土壤胶体上,导致土壤 pH 值增大,土壤碱性增强。0~10 cm 土层 pH 值最大值为 9.02,最小值为 8.21,平均值为 8.54,40~60 cm 土层 pH 值最小值为 8.57,根据碱化级别划分标准,土壤 pH 值在 8.5~9.5 之间为强碱性土,说明研究区土壤为强碱性土壤。从研究区土壤 pH 值的变异系数来看,各土层的变异系数均较小,在 2.10%~2.16% 之间,说明土壤的 pH 值空间分布均匀,受外界干扰小。

**2.4.2 盐化和碱化的关系** 土壤中的碱性物质主要包括钙、镁、钠的碳酸盐和碳酸氢盐,以及胶体表面吸附的交换性钠。交换性  $\text{Na}^{+}$  水解呈强碱性反应,是碱化土的重要特征 [13],  $\text{H}^{+}$  取代了  $\text{Na}^{+}$  而失去活性,交换的结果是产生了  $\text{OH}^{-}$ ,使土壤的 pH 值升高。本研究结果显示,研究区的土壤 pH 值在 8.21~9.48 范围内,土壤 pH 值随着土壤含盐量的增加而降低(图 3),说明土壤溶液中较高的盐浓度可抑制碱性钠的水解,从而使土壤碱化程度降低 [12]。

### 2.5 土壤盐分离子主成分分析

通过对  $\text{Ca}^{2+}$  浓度、 $\text{K}^{+}$  浓度、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度、 $\text{Na}^{+}$  浓度、 $\text{Cl}^{-}$  浓度、pH 值、全盐含量等 10 个变量进行主成分分析,建立具有代表性和限制性的土壤盐渍化特征因子,用于合理评价研究区土壤盐渍化状况,以便为该区域土壤盐渍化改良和利用提供针对性的理论依据 [14]。对特征因子进行主成分分析,获得各主成分特征值及贡献率,结果(表 4)表明,前 3 个主成分的特征值大于 1,第 1、第 2、第 3 主成分的特征值分别为 3.88、1.72、1.26,所对应的贡献率分别为 38.84%、17.21%、12.64%,累计贡献率为 68.69%,表明前 3 个主成分可以反映原 10 个变量信息中的绝大部分。

主成分因子载荷是主成分因子与原始变量因子之间的相

表 2 整个剖面盐分离子间的相关性

土层 (cm)	指标	Ca <sup>2+</sup> 浓度	K <sup>+</sup> 浓度	Mg <sup>2+</sup> 浓度	Na <sup>+</sup> 浓度	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 浓度	Cl <sup>-</sup> 浓度	全盐 含量	pH 值
0~10	Ca <sup>2+</sup> 浓度	1.000									
	K <sup>+</sup> 浓度	0.428 *	1.000								
	Mg <sup>2+</sup> 浓度	0.788 **	0.814 **	1.000							
	Na <sup>+</sup> 浓度	0.434 *	0.900 **	0.809 **	1.000						
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度	-0.137	0.123	-0.023	-0.032	1.000					
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	0.584 **	0.103	0.402 *	0.195	0.257	1.000				
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 浓度	-0.045	0.081	0.066	-0.031	-0.087	-0.067	1.000			
	Cl <sup>-</sup> 浓度	0.210	0.651 **	0.568 **	0.661 **	0.389 *	0.304	-0.214	1.000		
	全盐含量	0.420 *	0.417 *	0.613 **	0.564 **	-0.057	0.349	-0.165	0.545 **	1.000	
	pH 值	-0.763 **	-0.236	-0.578 **	-0.186	0.016	-0.377 *	0.118	-0.254	-0.234	1.000
10~20	Ca <sup>2+</sup> 浓度	1.000									
	K <sup>+</sup> 浓度	0.553 **	1.000								
	Mg <sup>2+</sup> 浓度	0.820 **	0.655 **	1.000							
	Na <sup>+</sup> 浓度	0.520 **	0.691 **	0.836 **	1.000						
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度	-0.369 *	-0.217	-0.302	-0.234	1.000					
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	0.385 *	0.022	0.317	0.114	0.155	1.000				
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 浓度	-0.337	-0.030	-0.141	0.082	0.363 *	-0.042	1.000			
	Cl <sup>-</sup> 浓度	0.206	0.427 *	0.323	0.402 *	0.394 *	0.238	0.212	1.000		
	全盐含量	0.312	0.119	0.491 **	0.523 **	-0.211	0.367 *	-0.095	0.147	1.000	
	pH 值	-0.770 **	-0.442 *	-0.633 **	-0.327	0.292	-0.330	0.435 *	-0.167	-0.324	1.000
20~40	Ca <sup>2+</sup> 浓度	1.000									
	K <sup>+</sup> 浓度	0.346	1.000								
	Mg <sup>2+</sup> 浓度	0.725 **	0.653 **	1.000							
	Na <sup>+</sup> 浓度	0.253	0.683 **	0.606 **	1.000						
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度	0.036	-0.150	-0.178	-0.386 *	1.000					
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	0.090	0.226	0.115	0.025	0.312	1.000				
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 浓度	-0.368 *	-0.084	-0.323	-0.228	0.618 **	0.302	1.000			
	Cl <sup>-</sup> 浓度	-0.003	0.095	0.055	0.213	0.331	0.212	0.431 *	1.000		
	全盐含量	0.300	0.382 *	0.376 *	0.345	0.108	0.163	-0.152	0.107	1.000	
	pH 值	-0.584 **	-0.038	-0.470 **	-0.070	-0.161	0.063	0.304	0.053	-0.098	1.000
40~60	Ca <sup>2+</sup> 浓度	1.000									
	K <sup>+</sup> 浓度	0.308	1.000								
	Mg <sup>2+</sup> 浓度	0.765 **	0.499 **	1.000							
	Na <sup>+</sup> 浓度	-0.178	0.402 *	0.035	1.000						
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度	0.035	0.102	0.107	-0.241	1.000					
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	-0.024	0.591 **	0.136	0.340	0.074	1.000				
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 浓度	-0.261	0.025	-0.245	0.082	0.726 **	0.001	1.000			
	Cl <sup>-</sup> 浓度	-0.201	0.130	-0.087	0.410 *	0.439 *	0.156	0.637 **	1.000		
	全盐含量	0.118	0.472 **	0.310	0.427 *	-0.175	0.571 **	-0.20	0.241	1.000	
	pH 值	-0.540 **	-0.112	-0.614 **	0.181	0.106	0.074	0.523 **	0.188	-0.118	1.000

注：“\*”“\*\*”分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

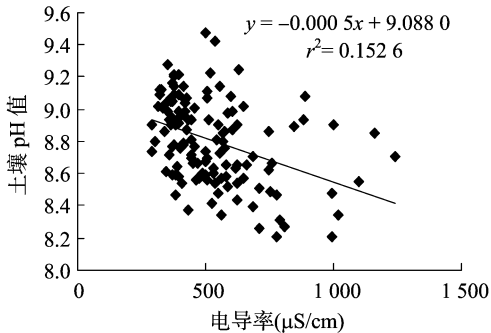


图3 电导率和 pH 值的关系

表 3 不同层次土壤 pH 值及其变异系数

土层 (cm)	pH 值				变异系数 (%)
	最小值	最大值	平均值	标准差	
0~10	8.21	9.02	8.54	0.18	2.10
10~20	8.27	9.07	8.71	0.19	2.12
20~40	8.47	9.42	8.94	0.19	2.09
40~60	8.57	9.48	9.01	0.19	2.16

关系数<sup>[15]</sup>。为了使找到的主因子更易于解释,往往须要对因子载荷矩阵进行旋转,使大的载荷更大,使小的载荷更小<sup>[16]</sup>。由表 5 可知,与第 1 主成分密切相关的是 K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 浓度及全盐含量,载荷值分别为 0.861、0.682、0.906、0.538、

表 4 土壤盐渍化主成分的特征根与方差贡献率

主成分	相关矩阵的特征值			提取因子载荷的平方和			旋转后提取因子载荷的平方和		
	特征值	各成分解释方差占总方差百分比(%)	累计方差百分比(%)	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	3.88	38.84	38.84	3.88	38.84	38.84	2.86	28.56	28.56
2	1.72	17.21	56.05	1.72	17.21	56.05	2.36	23.56	52.12
3	1.26	12.64	68.69	1.26	12.64	68.69	1.66	16.57	68.69
4	0.90	9.02	77.71						
5	0.61	6.06	83.77						
6	0.53	5.27	89.04						
7	0.43	4.26	93.30						
8	0.38	3.77	97.07						
9	0.23	2.25	99.32						
10	0.07	0.68	100.00						

0.553,说明第1主成分与  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  浓度及全盐含量相关性较高,因此在实际意义上可以代表土壤盐化程度。与第2主成分密切相关的是  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  浓度,载荷正向负荷值分别为0.784、0.626、0.672,即这3个指标与土壤盐渍化关系密切,进一步说明影响该地区土壤盐渍化的盐分主要是硫酸盐<sup>[14]</sup>。与第3主成分密切相关的是  $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 、 $CO_3^{2-}$  浓度,它们的载荷值相对较高,分别为0.605、0.883、0.586,其中  $HCO_3^-$ 、 $CO_3^{2-}$  2个离子不仅是盐分组成,而且总碱度 =  $CO_3^{2-}$  浓度 +  $HCO_3^-$  浓度,由此说明第3主成分可代表盐渍化土壤的盐碱状况特征。

表 5 旋转后主成分因子载荷

指标	各主成分因子的载荷		
	1	2	3
$Ca^{2+}$ 浓度	0.408	0.784	-0.029
$K^+$ 浓度	0.861	-0.017	0.016
$Mg^{2+}$ 浓度	0.682	0.626	-0.006
$Na^+$ 浓度	0.906	0.074	-0.066
$Cl^-$ 浓度	0.538	0.169	0.605
$HCO_3^-$ 浓度	-0.165	-0.019	0.883
$SO_4^{2-}$ 浓度	0.174	0.672	0.393
$CO_3^{2-}$ 浓度	-0.044	-0.582	0.586
pH 值	0.091	-0.545	0.087
全盐含量	0.553	0.478	-0.011

### 3 结论

研究区盐分组成总体以硫酸盐为主。土壤属于轻度盐渍化到中度盐渍化,土壤全盐含量随土层深度的增加而降低,呈现表聚的特征。土壤 pH 值介于 8.21~9.48 范围内,为强碱性土壤,且土壤 pH 值随土壤含盐量的增加而降低。电导率和土壤全盐含量呈极显著的正相关关系,用电导率来表示土壤含盐量具有可行性。

研究区土壤中占主要优势的阳离子、阴离子分别是  $Na^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 。对各离子之间的相关性分析结果表明,在各土层中  $Ca^{2+}$  浓度与  $Mg^{2+}$  浓度始终表现为极显著正相关关系,土壤 pH 值与  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  浓度呈极显著负相关关系;在 40~60 cm 土层, pH 值与  $CO_3^{2-}$  浓度呈极显著正相关关系,而土壤 pH 值变化规律与  $CO_3^{2-}$  浓度一致,说明土壤的酸碱性主要由

$CO_3^{2-}$  浓度决定。 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$  浓度以及全盐含量是表征苏北滨海土壤盐化程度的主要特征因子。影响土壤碱化特征的主要因子有  $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 。

### 参考文献:

- [1] 张文渊. 滨海地区盐碱土类型与形成条件分析[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 19-23.
- [2] 张晓光, 黄 标, 梁正伟, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 332-338.
- [3] 景宇鹏, 段 玉, 妥德宝, 等. 河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1410-1420.
- [4] 魏韬书, 牛 洁, 景宇鹏, 等. 内蒙古达拉特旗黄河沿岸土壤盐渍化特征研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 55-61.
- [5] 韩建均, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂区水盐调控措施对土壤盐渍化的影响研究[J]. 土壤, 2012, 44(3): 658-664.
- [6] 韩桂红, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提沙吾提, 等. 基于典范对应分析的干旱区春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 681-687.
- [7] Chang C, Sommerfeldt T G, Carefoot J M, et al. Relationships of electrical conductivity with total dissolved salts and cation concentration of sulfatedominant soil extracts[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63(1): 79-86.
- [8] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 422-428.
- [9] 刘广明, 杨劲松, 姜 艳. 江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究[J]. 土壤, 2005, 37(2): 163-168.
- [10] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北典型新围垦海涂农田盐碱障碍因子特征分析[J]. 土壤, 2013, 45(3): 548-553.
- [11] 涂锦娜, 王绍明, 杨 岩, 等. 玛纳斯河流域下游土壤的盐分特征分析[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(3): 565-571.
- [12] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 213-278.
- [13] 张 杰, 陈立新, 乔 璐, 等. 大庆市不同土壤类型盐碱化特征及评价[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 119-122.
- [14] 吕真真, 刘广明, 杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 289-295.
- [15] 郝黎仁, 樊 元, 郝哲欧, 等. SPSS 实用统计与分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [16] 黄润龙. 数据统计与分析技术——SPSS 软件实用教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.