

# 江苏沿海地区土体含盐特征及指示作用\*<sup>1</sup>

苟富刚<sup>1, 2</sup> 龚绪龙<sup>1, 2</sup> 杨磊<sup>1, 2</sup> 张岩<sup>1, 2</sup> 蔡露明<sup>1, 2</sup>

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018;

2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点试验室, 江苏南京 210049)

**【摘要】**:为了研究土体含易溶盐特征和其指示意义, 采集测试土样 3246 件和水样 78 件。研究表明:浅表部土体含盐量具有与海岸线平行的分布规律, 愈靠近海岸, 土体的含盐量愈高。土体盐分来源主要包括 4 个方面, 土体在沉积时的海水浸渍, 沉积物源本身的含盐特征, 浅表层土体的现代积盐, 人类活动的影响。其中海水浸渍是土体含盐量增高的最主要原因, 通过 Na-Cl 交换过程, 分析了水土盐分之间的转化机理。采用比例系数法分析沉积物源的含盐特征。建立了 TDS 和成井层位土体易溶盐含量的多个线性回归预测模型, 其中以土中 Cl<sup>-</sup>和 TDS 的回归效果最为显著, 这与 Cl<sup>-</sup>为稳定的常量元素和其不易被土体吸附有关。采用 HYRD1 井验证了回归预测模型, 准确度达到了 96%。以 HYRD1 为例, 结合滨海相沉积土层的特点, 阐述了土体含盐特征在多重地层划分中的作用。

**【关键词】**:易溶盐; 氯盐渍土; 回归分析; TDS

**【中图分类号】**:P641.3 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)06-1380-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806022

土体易溶盐含量大于等于 0.3%且小于 20%, 并具有腐蚀、盐胀和溶陷等工程特性, 可以定义为盐渍土(“含盐量”为“易溶盐含量”)<sup>[1, 2]</sup>。江苏沿海地区盐渍土出露面积约 4500km<sup>2</sup>, 约占江苏沿海三市陆域面积的 14%。滨海盐渍土是一种特殊土, 具有溶陷性和腐蚀性等工程性质<sup>[3]</sup>。其中以氯离子对混凝土中的钢筋腐蚀最为显著。但对于细粒土来说, 土体含盐量越高, 则土体塑性越低, 土体的压缩性越低, 抗剪强度越高<sup>[4, 5]</sup>。以连云港地区全新世海相软土为例, NaCl 晶体充填在土颗粒中间, 从图 1 中的 SEM 图(红色矩形区域所示)可以看出, 淤泥中有 NaCl 结晶析出, 土体密度提高, 土体力学性质得到了很大的改善。

海水浸渍是滨海相盐渍土形成的一个最主要的原因, 水体含盐量与相对应的层位土体含盐量成正比<sup>[6]</sup>。这种土体含盐量增高现象不仅体现在浅表部, 深部土体含盐量也在增加。据如东县光荣乡的水井水质测试结果, 潜水(成井层位深度在 0~24.5m)水质 TDS 达到了 22450mg/L, 二承压(成井层位深度在 181~216m)水质 TDS 达到了 13980mg/L。南通市水质动态总体呈咸化趋势, 咸化速率由小于 4mg(L. a)到大于 20mg(L. a)不等<sup>[7]</sup>。盐城地区深层地下水已经形成了区域性降落漏斗, 且出现水质咸化现象<sup>[8]</sup>。随着全球变暖, 黄海海平面上升, 江苏沿海地区水土体受海水入侵的可能性变大。随着水体的不断咸化, 相应层位土体含盐量也日益增高。

<sup>1</sup> 收稿日期:2017-07-18; 修回日期:2017-09-28

基金项目:中国地质调查局项目(1212011220005); 江苏沿海地区综合地质调查项目(20120223); 连云港城市地质调查项目

作者简介:苟富刚(1985~), 男, 硕士, 主要从事环境地质方面的研究工作. E-mail:gfgfg@foxmail.com

---

目前江苏沿海地区还没有较为系统的研究浅表层土体及深部土体含盐特征。一般工程勘察仅研究潜水位以上土体。本文在分析 3246 件土样易溶盐的基础上,结合已成的 20 口井水质分析结果、15 件海水样品、一个 275m 的综合研究孔和大量的搜集资料,进行水土体耦合研究,对江苏沿海地区土体含盐的分布及成因做了系统的研究。

## 1 区域地质背景

研究区地貌以堆积平原为主,低山、残丘为辅。仅连云港市郊的云台山为低山区,其玉女峰海拔 625m,也是江苏省内最高峰;此外在灌云县境内与南通市可见多处基岩残丘,总体而言基岩剥蚀地貌区约占 4%,其余大部分为地势低平的平原区,地面高程一般多在 3~5m 与 1~2m 之间,其中 3m 以下的地区约占一半。

第四纪以来江苏沿海地区至少发育 5 次大规模海侵。第 I 海侵层发生在早更新世中期,距今 1.8~1.0Ma;第 II 次海侵发生在中更新,位于布容正极性事件之上,距今 0.78Ma;第 III 次海侵层发生在晚更新世早期,距今 0.128Ma;第 IV 次海侵层发生在晚更新世中晚期,形成于 40000~20000a. B. P;第 V 次海侵层发生在全新世,研究区广泛分布,海侵强度仅次于第 IV 次海侵,受其影响沉积的地基土层与现代工程息息相关,也为本文的重点研究对象。

## 2 样品采集与测试

为了配合江苏沿海地区 21 个 1:5 万标准图幅地质填图工作,在面上均匀布置样品采集位置(图 1)<sup>[9]</sup>,采样深度基本上在 0~5m,主要为潜水位波动范围内的土体,在深度上每间隔 1~2m 采集一个样品。本文研究土体主要为第四纪全新统土体。研究土层含盐量的指示意义有涉及到更新统土体。



潜水位波动范围内的盐渍土。江苏沿海连云港地区(滨海平原)、大丰地区(滨海平原)、南通地区(长江三角洲)Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比最大值分别为50、47、27，最小值分别为2.0、2.8、2.4，平均值分别为14.1、7.9、7.7，为氯盐渍土，等级为弱—强盐渍土。南通和盐城地区以弱盐渍土为主，分布少量中盐渍土。连云港徐圩港区一带分布少量强盐渍土，连云港其它地区以弱盐渍土和中盐渍土为主(表1)。

表1 研究区浅部盐渍土含盐特征(mg/kg)

分布地区	统计指标	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	易溶盐
	平均值	2 165	3 255	6 533
长江三角 洲地区	最小值	915	1 105	3 000
	最大值	6 775	10 495	19 049
	平均值	1 660	2 663	5 320
滨 盐城地区	最小值	880	1 180	3 026
	最大值	3 820	6 600	12 223
	平均值	5 405	8 759	16 241
海 连云港	最小值	960	620	3 001
	最大值	22 355	39 940	71 483

### 3.2 土体含盐空间分布特征分析

在平面分布上，浅表部土体盐渍化程度分区具有与海岸线平行的分布规律，从海边向陆地依次分布着滨海潮滩盐土、滨海盐土、滨海潮化盐土和滨海盐化潮土<sup>[5]</sup>。一般愈靠近海岸，土体的含盐量愈高，盐分的表聚性愈强(图1，图2)。

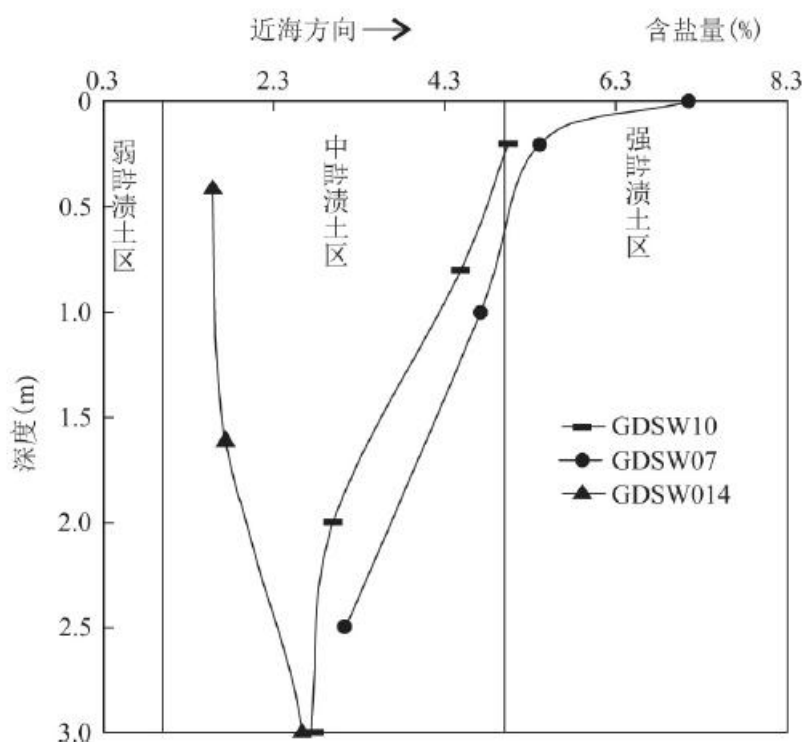


图2 土体易溶盐含量二维空间分布  
Fig. 2 Two-dimensional spatial distribution of soil soluble salt contents

深部土层(更新世地层)含盐特征大致反映了海侵的影响范围。以HYRD1孔位例,上更新世地层埋深范围40.3~132.0m,中更新世地层埋深范围132~188m,下更新世地层埋深范围188~275m。更新世地层(非盐渍土)Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比为2~40,平均值为10;其中Cl<sup>-</sup>含量占土体易溶盐的16%~51%,平均值为39%。

上更新世地层(盐渍土)Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比为6~32,平均值为13;其中Cl<sup>-</sup>含量占土体易溶盐的47%~56%,平均值为51%。中更新世地层(盐渍土)Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比为6~22,平均值为11;其中Cl<sup>-</sup>含量占土体易溶盐的49%~56%,平均值为51%。下更新世地层(盐渍土)Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比为5~14,平均值为9;其中Cl<sup>-</sup>含量占土体易溶盐的45%~52%,平均值为49%。

分析知,更新统地层Cl<sup>-</sup>离子和2倍的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子的摩尔浓度比均大于2,土体Cl<sup>-</sup>离子含量普遍较高,盐渍土类型为氯盐渍土;含盐量最高为0.59%,为弱盐渍土。

#### 4 土体含盐特征及成因分析

#### 4.1 土体在沉积时的海水浸渍

土层在形成时受海洋潮汐的顶托和絮凝作用，特别是处于低潮线以下的水下沉积，沉积环境被高矿化度海水浸渍，这时就形成了沉积土层中含有较高的易溶盐类<sup>[10~12]</sup>。海水在浸渍土体过程中，海水中 SAR 值(SAR 为钠吸附比)越高，土体中固体颗粒表面解吸出来的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>量就越大(式 1)，土中 Na<sup>+</sup>含量就高，2 个 Na<sup>+</sup>交换一个 Ca<sup>2+</sup>，但两个 Na<sup>+</sup>比一个 Ca<sup>2+</sup>大，从而引起土体透气性减小，浅部土壤产生板结及盐渍化。ESR(ESR 为交换性钠比)与 SAR 线性正相关。SAR 值越高，岩土体中 Na<sup>+</sup>就越高(式 2)<sup>[6]</sup>。在江苏沿海地区采集海水样 15 件(图 1，每个位置 3 件水样)，SAR 值介于 48.64~52.65，平均值为 51.24，SAR 值非常高，在土体沉积形成时，水土体中的 Na-Cl 交换作用非常强烈，土体中固体颗粒表面的 Ca<sup>2+</sup>被解吸出来，土中 Na<sup>+</sup>增高，是江苏盐渍土含盐特征的主要成因。

式中:CEC 为土体中的阳离子交换量(单位为 mmol/100g×原子价)，土体综合吸附能力的反应，土体颗粒越细，吸附能力越大，细粒土较粗粒土吸附能力强，一般粘性土较砂性土含盐量高；Na<sup>+</sup>为达到交换平衡时土壤中的交换性钠量(mmol/100g×原子价)。Na<sup>+</sup>为水中离子浓度(mmol/L×原子价)。

沿海地区土体易溶盐以氯化物盐类为主。以 HYRD1 号孔为例。由于 Cl<sup>-</sup>最不易被吸附，Cl<sup>-</sup>是海水中最主要的稳定常量元素，是反映土体是否被海水浸染最为敏感的因素，盐渍土中 Cl<sup>-</sup>占土体总易溶盐类的 21%~56%，平均值约 51%，HYRD1 号孔附近海水中 Cl<sup>-</sup>占总盐类的 55%。对比发现:土中易溶盐化学成份和典型海水易溶盐化学成份相关性好。说明海水浸渍是滨海相盐渍土形成的一个主要的原因，海水浸渍使土体含有大量的水溶性盐类，且以氯化物占绝对优势。

#### 4.2 沉积物源本身含有易溶盐

沉积泥砂母质含有一定量的易溶性盐类。采用盐城地区 7 口浅井微承压水井水样测试结果和成井层位土体易溶盐测试数据(平均值)进行分析，微承压水含水层组位于全新世泛滥沉积、海积或海陆交互相中相对粗粒的沉积层中，岩性以粉土、粉砂为主，并间夹粉质粘土薄层。微承压水样  $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$  比例系数范平均值 0.84，与附近海水基本一致，但略小于附近海水的比例系数(0.86)，说明地下水中的 Na<sup>+</sup>与地层中的交换性 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>产生了阳离子交换。成井层位土样易溶盐  $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$  比例系数平均值为 0.98，远大于微承压水的比例系数。说明沉积物源富含 Na<sup>+</sup>，且促使沉积物中的 Na<sup>+</sup>通过溶滤作用补给地下水。

表 2 HYRD1 号孔土体易溶盐特征统计表

土体类型	统计指标	P(Cl <sup>-</sup> )	p(Na <sup>+</sup> )	P(Mg <sup>2+</sup> )	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	易溶盐	$\frac{C(\text{Cl}^-)}{2 C(\text{SO}_4^{2-})}$	$\frac{\rho(\text{Na}^+) + \rho(\text{Mg}^{2+}) + \rho(\text{Cl}^-)}{\text{SSC}}$
		单位:mg/kg						
氯盐渍土	最大值	3 325	2 075	180	605	5 906	32	88
	最小值	1 485	965	15	136	3 014	5	79
	平均值	2 111	1 352	62	326	4 176	11	84
非盐渍土	最大值	1 620	990	63	505	2 968	22	86
	最小值	840	560	4	92	1 978	2	67
	平均值	1 195	808	32	213	2 496	8	81

取 HYRD1 成井层位土样各离子含量平均值与水样中各离子相对应的各离子含量进行对比, 发现土体中各离子成份和水样各离子成份呈很好的正相关性, 且土体中各离子百分含量均高于水样中离子含量(图 3), 说明土体在沉积过程中沉积泥砂母质含有易溶盐成份。

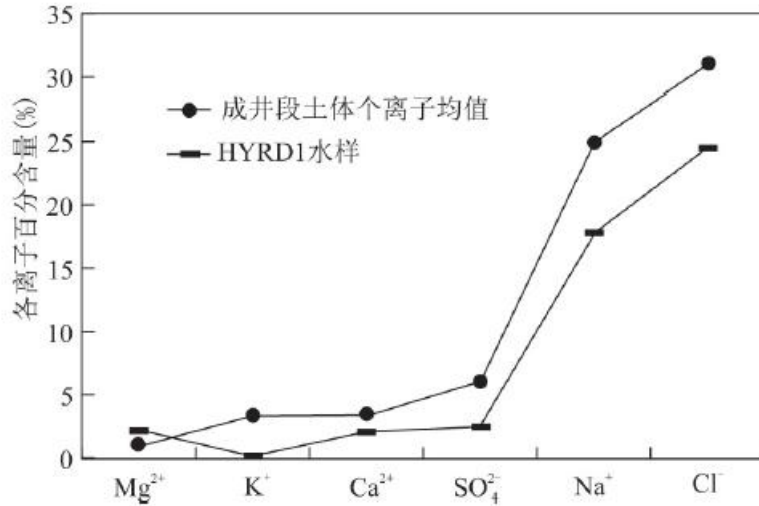


图 3 HYRD1 成井段水土体离子百分含量关系  
Fig. 3 Ion percentages of soil-water system in the well position HYRD1

#### 4.3 浅表层的现代积盐

现代积盐又称活性积盐, 当潜水位埋深小于临近深度时, 潜水中的盐分通过毛细作用向地表聚积, 是一种广泛的积盐方式<sup>[13~15]</sup>。分析数据样品采样时间为 6 月, 1m 以浅表层土体除了受现代积盐作用外, 特别是 10~40cm 还受比较明显的蒸发和淋滤等作用, 且以 40~100cm 的现代积盐作用最为明显。从图 2 可以看出, GDSW07 采样点地表土体含盐量为深度在 0.2、1.0、2.5m 的土体含盐量的 1.32、1.52、2.28 倍; GDSW10 采样点地表浅层土体含盐量为深度在 0.8、2.0、0m 的土体含盐量的 1.12、1.68、1.84 倍。

#### 4.4 人类活动的影响

伴随着人类大规模开采地下水层, 造成了海水入侵或高矿化度浅层地下水补给深层地下水, 盐分运移水动力弥散作用中的机械弥散作用较强, 纵向弥散(垂直于水流方向上的弥散作用)速度比横向弥散大 5 至 20 倍<sup>[16, 17]</sup>, 当水土体盐分趋于平衡后, 机械弥散作用减弱, 盐分迁移仅靠分子扩散<sup>[18]</sup>, 此时土壤盐分浓度和盐含量增加缓慢, 最终处于一个新的水土盐分动态平衡状态。

HYRD1 成井深度为 261.7~271.2m, 成井层位为 Q1 下段地层, 成井层位土体为砂层, 属含水层, 该层位 TDS 为 3046mg/L, 为半咸水。在 HYRD 西北方向约 15km 的 BG48 孔, 于 1966 年成井, 成井层位与 HYRD1 一致, 其 TDS 仅为 660mg/L。HYRD1 号井与 BG48 号井测试时间间隔约 50a, TDS 飙升 4.6 倍, 由淡水变为了半咸水。HYRD1 成井段土体含盐量较低(土体部分易溶盐溶解进入地下水中), 为非盐渍土, 最高含盐量为 0.07%, 易溶盐平均值为 577mg/kg。土体中各离子成份和水样各离子成份呈很好的正相关性(图 4), 可以推测, 土体中易溶盐含量在近 50a 内也飙升了近 5 倍之多。

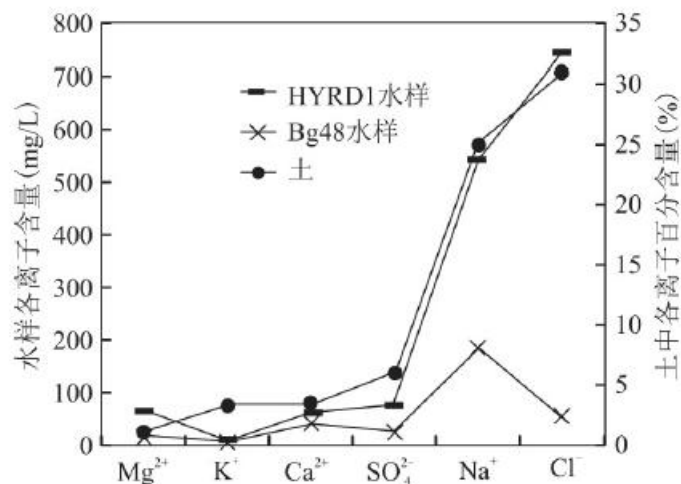


图 4 土体和水中各离子含量关系

Fig. 4 Ion contents in the soil and water

#### 4.5 土体盐分来源所占比重分析

江苏沿海地区第四纪厚层土体含盐特征主要受其沉积环境的控制。海水浸渍在土体沉积时对土体盐分的含量起控制作用。特别是更新统地层由于水动力条件差，不易受人类活动影响，土体盐度稳定。全新统地层含盐特征可以说是一种动态平衡状态。浅表层土体的含盐特征受温度梯度场、湿度梯度场和溶质浓度梯度场等多场影响，易受人类活动的影响，特别是潜水位波动范围，土体盐度随季节变化较大，表层土体含盐量可达到其下部土体含盐量的 2.28 倍。

### 5 土体含盐量研究的指示意义

#### 5.1 土体含盐特征在水体咸化中的指示作用

布置浅井 20 口(图 1)，采集水体样品 60 件，水样 TDS 最大值 25634mg/L，最小值 765mg/L，平均值 5374mg/L。水样中 Na<sup>+</sup> 含量占 TDS 的 28.90%，水样中 Cl<sup>-</sup> 含量占 TDS 的 57.93%，水样中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量占 TDS 的 9.77%，水样中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量占 TDS 的 3.24%，水样中 K<sup>+</sup> 含量占 TDS 的 0.85%。

土样数据采用成井层位土样的易溶盐各离子平均值，其中易溶盐最大值 5267mg/kg，最小值 324mg/kg，平均值 1056mg/kg；Cl<sup>-</sup> 最大值 2563mg/kg，最小值 53mg/kg，平均值 580mg/kg，占总含盐量的 55.56%；Na<sup>+</sup> 含量最大值 1693mg/kg，最小值 75mg/kg，平均值 355mg/kg，占总含盐量的 33.76%。成井段土体中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 平均含量占总易溶盐的 10.12%，成井段土体中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 平均含量占总易溶盐的 3.20%，成井段土体中 K<sup>+</sup> 平均含量占总易溶盐的 1.57%，成井段土体中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 平均含量占总易溶盐的 1.23%，成井段土体中 Mg<sup>2+</sup> 平均含量占总易溶盐的 1.33%，成井段土体中 Ca<sup>2+</sup> 平均含量占总易溶盐的 1.98%。

分析知:江苏沿海地区水土盐分最主要的离子为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ ，且水土体含盐量呈线性正相关。由表 3 知，TDS 和土中的含盐量、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  在 0.01 水平上显著正相关，相关系数分别为 0.634，0.632，0.630，0.619；TDS 和土中的  $\text{Mg}^{2+}$  在 0.05 水平上显著正相关。

依据水土体含盐量呈线性正相关这一认识，选取土体含盐量 SSC、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  (这 5 个指标与 TDS 线性显著正相关) 与 TDS 建立多元线性回归模型(表 4)。一共建立了 12 个 TDS 的多元线性回归预测模型。由表 4 值:这 12 个模型回归效果显著，相关系数平均值达到 0.927，最大值为 0.993；F 显著性统计量平均值为  $1.32 \times 10^{-4}$ ，最大值为  $2.43 \times 10^{-4}$ ，小于 0.05，回归效果显著。12 个模型预测准确度平均值达到了 80%，最高达到了 96%，预测效果较为理想。其中以土中  $\text{Cl}^-$  和 TDS 建立的回归预测模型相关性最高，预测准确度达到了 96%。这与  $\text{Cl}^-$  的特征有关， $\text{Cl}^-$  是一种非常稳定的常量元素，且不易被土体吸附。

表 3 土体易溶盐与地下水化学特征相关性分析

指标	地下水							土体						
	TDS	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	含盐量	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
TDS	1													
$\text{Na}^+$	0.996*	1												
$\text{Mg}^{2+}$	0.980*	0.963*	1											
$\text{K}^+$	0.806*	0.817*	0.724*	1										
$\text{Cl}^-$	0.996*	0.989*	0.982*	0.793*	1									
$\text{SO}_4^{2-}$	0.844*	0.839*	0.809*	0.777*	0.799*	1								
$\text{HCO}_3^-$	-0.241	-0.219	-0.219	-0.364	-0.248	-0.369	1							
含盐量	0.643*	0.688	0.543*	0.635*	0.649*	0.4	-0.19	1						
$\text{Na}^+$	0.632*	0.679*	0.527*	0.661*	0.639*	0.386	-0.192	0.990*	1					
$\text{Mg}^{2+}$	0.522*	0.540*	0.488*	0.354	0.533*	0.299	-0.173	0.781*	0.734*	1				
$\text{K}^+$	0.334	0.338	0.336	0.278	0.35	0.137	-0.037	0.540*	0.502*	0.804*	1			
$\text{Cl}^-$	0.630*	0.674*	0.536*	0.591*	0.639*	0.369	-0.186	0.993*	0.980*	0.782*	0.505*	1		
$\text{SO}_4^{2-}$	0.619*	0.663*	0.503*	0.708*	0.599*	0.563*	-0.272	0.886*	0.853*	0.729*	0.536*	0.851*	1	
$\text{HCO}_3^-$	0.055	0.048	0.086	0.001	0.06	-0.025	0.296	-0.021	-0.04	-0.138	0.17	-0.083	-0.027	1

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧) 上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧) 上显著相关。

根据预测模型，可以根据成井段土中含盐特征预测深井水体 TDS 值。以 HYRD1 号井为例，根据式 (13) 预测到三承压水 TDS 为 2713mg/L，与实测结果相 2832mg/L 相比，误差率为 4%，准确率高达 96%。应用本文建立的预测模型可依据土体中含盐特征来预测水体是否咸化，节约了成本；根据成井段土体含盐特征就可推断出成井层位水体特征。

表 4 TDS 预测回归模型汇总表

回归经验公式	公式编号	相关系数	Significance F (F 显著性统计量)	预测准确度 (%)	深井预测准确度 (%)
$TDS = 8527 - 21SSC + 21\rho^{(Na^+)} + 56\rho^{(Cl^-)} + 57\rho^{(SO_4^{2-})} - 71\rho^{(Mg^{2+})}$	(3)	0.903	4.52E-04	79	8
$TDS = 2SSC + \rho^{(Na^+)} + 3\rho^{(Cl^-)} + 26\rho^{(SO_4^{2-})} - 100\rho^{(Mg^{2+})}$	(4)	0.983	1.32E-08	82	71
$TDS = 5SSC + 6\rho^{(Na^+)} - \rho^{(Cl^-)} + 21\rho^{(SO_4^{2-})}$	(5)	0.981	2.18E-09	81	75
$TDS = 9020 - 23SSC - 26\rho^{(Na^+)} + 25\rho^{(Cl^-)} + 55\rho^{(SO_4^{2-})}$	(6)	0.896	1.59E-04	78	18
$TDS = 1849 - 5.586SSC - 1.295\rho^{(Na^+)} - 2.424\rho^{(Cl^-)}$	(7)	0.825	9.00E-04	77	46
$TDS = 8.567SSC - 6.036\rho^{(Na^+)} - 2.508\rho^{(Cl^-)}$	(8)	0.979	3.96E-10	80	87
$TDS = 2680 - 11.997\rho^{(Na^+)}$	(9)	0.812	4.13E-05	76	50
$TDS = 14.166\rho^{(Na^+)}$	(10)	0.977	2.50E-12	77	65
$TDS = 2241 - 4.106SSC$	(11)	0.84	2.57E-05	80	64
$TDS = 4.709SSC$	(12)	0.979	1.35E-12	80	86
$TDS = 116 + 1.765\rho^{(Cl^-)}$	(13)	0.993	2.43E-16	96	96
$TDS = 9.343\rho^{(Cl^-)}$	(14)	0.975	4.48E-12	76	54

## 5.2 盐渍土研究在地层划分中的作用

在已有地层单元划分手段(古地磁、14C、TL、OSL、孢粉)的基础上，补充易溶盐测试指标，进一步丰富区内多重地层划分，为细化各地层单位内岩相划分，深入研究第四系沉积成因和结构特征提供基础。一般滨海相地层岩性复杂多变，有软土，粘性土，粉质粘土与粉砂互层、粉土，砂土等。土体粘粒含量越高，颗粒越细，附盐性就能越好<sup>[19]</sup>。

据图 5 可以看出粘性土、互层土附着易溶盐的含量较砂层好，而沿海地区互层土多为滨海相，可以配合微体古生物、孢粉等来分析该套地层是否为海相地层。

《江苏 1/5 万三仓镇等 6 幅区调》项目的 ZKA03-sc 孔为综合研究孔，该孔与 bg48 和 HYRD1 孔都属于长江三角洲地层单元，据绘制的第四纪地质剖面和水文地质剖面，第四纪地层在空间分布很稳定，起伏非常微弱，可进行综合对比研究。据 ZKA03-sc 孔的古地磁、孢粉和绝对测年结果，0~188m 地层以正极性为主，为布容正极性世，在 65~83m 深度沉积地层单元出现了明显的负极性；188.0~260.6m 以负极性为主，应为松山负极性世，其间出现明显的正极性，应为 Jaramillo 正极性事件(0.99~

1.07MaB.P.)或Olduvai 正极性事件(1.77~1.95MaB.P.)。根据该测试结果,可以准确的划分大的地质时代界线。再根据盐渍土的空间分布,可以查明第四纪不同时期海侵特点和分布范围。

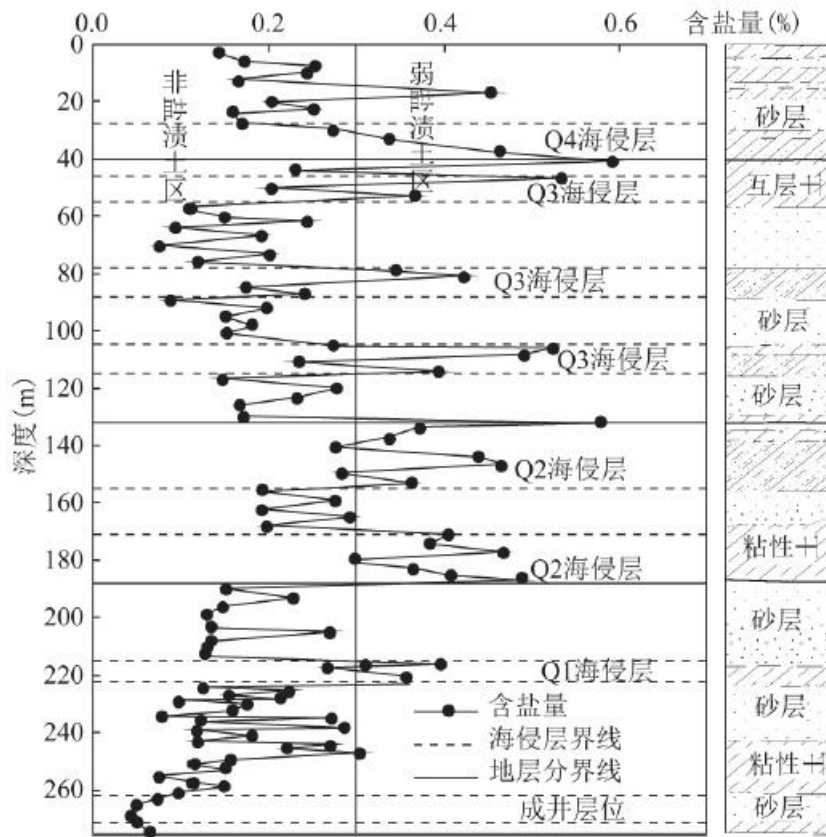


图5 HYRD1号孔土体易溶盐含量在地层划分中的指示作用

Fig. 5 Indicative functions of HYRD1 soil soluble salt content in stratigraphic classification

以HYRD1号孔为例,通过海侵地层对比显示,早更新世(Q1)中期经历海侵影响,深度215~223m以粘性土层为主,夹泥质粉细砂,含盐量大于0.3%,该层为可以确定为一个海相地层;中更新世经历了2个大的海侵影响,影响沉积厚度大;晚更新世地层经历了3个大的海侵影响,影响沉积厚度大;全新世以来的海侵在全区普遍发生,海侵地层的发育明显受海平面的控制,经历了2个大的海侵影响。

## 6 结论

(1)江苏沿海地区土体含盐特征以氯盐为主。绘制了研究区浅表部盐渍土分布图,描述了土体盐度的空间分布特征及水体盐分转化过程。

(2)土体盐分主要来自4个方面:①土层在沉积时被海水浸渍;②沉积泥砂母质含有一定的易溶性盐类;③浅表部土层受现代积盐过程影响;④受人类活动影响。

---

(3) 土体易溶盐化学成份和海水成份高度相似。分析水土体中各离子相关性, 选取与 TDS 高度相关的 5 个指标建立了 12 个多元线性回归模型, 最高准确率达到 96%。并通过深井 HYRD1 进行了验证, 效果理想。

(4) 根据土体含盐量特征及空间分布, 结合滨海相沉积土层的特点, 说明了第四纪不同时期海侵特点和分布范围。

#### 参考文献:

[1] GB50021-2001(2009 年版): 岩土工程勘察规范 [S]. 中国建筑工业出版社, 2009: 82-84.

[2] GB/T 50942-2014: 盐渍土地区建筑技术规范 [S]. 中国计划出版社, 2014: 2-7.

[3] LI M, CHAI S X, DU H P, et al. Effect of chlorine salt on the physical and mechanical properties of inshore saline soil treated with lime [J]. Soils and Foundations, 2016; 56 (3) : 327 -335.

[4] 葛云, 顾佳, 王曼, 等. 连云港徐圩新区盐渍土类型、分布特征及其对工程建设影响 [J]. 海岸工程, 2012, 31(1) : 36-45.

GE Y, GU J, WANG M, et al. Types and distributions of saline soil in Xuwei of Lianyungang and its Influence on the engineering constructions [J]. Coastal Engineering, 2012, 31(1) :36-45.

[5] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究 [D]. 兰州大学, 2006: 9-15.

CHAI S X. Study on the special properties of strength of solidified saline in inshore [D]. Lanzhou University, 2006: 9-15.

[6] 苟富刚, 龚绪龙, 李进, 等. 江苏滨海平原微承压水层位水土体含盐特征及其相关性分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3) : 72-76.

GOU F G, GONG X L, LI J, et al. Characteristics and correlation analysis of soil and water body saline of micro confined water layer in JIANGSU coastal plain [J]. Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 2017, 28 (3) : 72 -76.

[7] 徐玉琳. 江苏省南通市深层含水系统地下水水质咸化特征及成因分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2) : 45-49.

XU Y L. The salted properties and its origin for deep aquifer system in Nantong City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(2) : 45-49.

[8] 张岩, 付昌昌, 毛磊, 等. 江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(04) : 598-605.

ZHANG Y, FU CC, MAO L, et al. Hydro chemical characteristics and formation mechanism of the groundwater in Yancheng, Jiangsu province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(04) : 598-605.

---

[9] 李攻科, 王卫星, 曹淑萍, 等. 天津滨海土壤盐分离子相关性及其采样密度研究 [J]. 中国地质, 2016, 43 (2) : 662—670.

LI G K, WANG W X, CAO S P, et al. Correlation of soil salt ions and sampling densities in Tianjin coastal area [J]. Geology in China, 2016, 43(2) : 662— 670.

[10] 赵耕毛. 不同降雨强度下滨海盐渍土水盐运动规律模拟实验研究 [J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(2) : 51—54.

ZHAO G M. Simulation on water and salt movement in seashore saline soil under different rainfall intensities [J], Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(2) : 51—54.

[11] GUO H P, JIAO J J. Impact of coastal land reclamation on ground water level and the sea water interface [J]. Ground water, 2007, 45(3) : 362—367.

[12] ZIA N. Engineering properties of loess-fly ash mixtures for road base construction [J]. Transportation Research Record, 2000, 17(14) : 49—56.

[13] BAO S C, WANG Q, BAO X H, et al. Characters of salinealkali soil in Western Jilin and biological treatment [J]. Journal of Pure and Applied Microbiology, 2013.

[14] 王清, 刘宇峰, 刘守伟, 等. 吉林西部盐渍土多场作用下物质特性演化规律 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(3) : 807—817.

WANG Q, LIU Y F, LIU S W, et al. Evolution law of the properties of saline soil in western Jilin Province under multi field effect [J]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 2017, 47(3) : 807—817.

[15] 岳卫峰, 杨金忠, 童菊秀, 等. 干旱地区灌区水盐运移及平衡分析 [J]. 水利学报, 2008, 39(5) : 623—626.

YUE W F, YANG J Z, TONG J X, et al. Transfer and balance of water and salt in irrigation district of arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5) : 623—626.

[16] 赵天宇, 张虎元, 严耿升, 等. 河西寒旱区盐渍土地层温湿度变化模式 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(5) : 1466—1474.

ZHAO T Y, ZHANG H Y, YAN G S, et al. Variation pattern of temperature and humidity for saline soil in cold and arid regions of hexi corridor [J]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 2016, 46(5) : 1466—1474.

[17] 刘炳成, 李庆领. 土壤中水、热、盐耦合运移的数值模拟 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 36 (1) : 14—16.

---

LIU B C, LI Q L. Numerical simulation of salt, moisture and heat transport in porous soil [J]. Hua Zhong Univ of Sci&Tech( Natural Science Edition) , 2006, 36(1) : 14-16.

[18] 杨吉龙. 天津滨海新区围海造陆对沿海低地浅层地下水环境的影响 [J]. 地质通报, 2016, 35(10) : 1653-1660.

YANG J L. The influence of land reclamation in Tianjin Binhai new area on the environment of shallow groundwater in coastal low land [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35 (10) :1653-1660.

[19] 柴寿喜, 王沛, 魏丽. 含盐量对滨海盐渍土物理及水理性质的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34 (6) : 47-50.

CHAI S X, WANG P, WEI L. Effect of salt content on physical and hydrological properties of saline soil in inshore [J]. Coal Geology Exploration, 2006, 34 (6) : 47-50.