

# 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究<sup>①</sup>

郭新送<sup>1,2</sup>, 宋付朋<sup>1\*</sup>, 鞠正山<sup>2\*</sup>

(1 土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018;

2 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘要:** 针对饱和泥浆调制时饱和点的不确定性及其电导率测定的不稳定性等问题, 为了统一和准确地表征暗管改碱的盐碱土盐渍化程度, 采用室内化验与统计分析的方法, 系统比较研究了饱和泥浆所需水量与饱和土壤溶液所需水量及其电导率和全盐与土水比 1:5、1:2.5、1:1、1:0.5 系列的相关和换算关系。研究结果表明: 在黄河三角洲盐碱土(氯化物类型)区, 可采用通过计算土壤孔隙度得到的饱和土壤溶液含水量来定量确定原来定性判定饱和点的饱和泥浆含水量, 以饱和土壤溶液电导率可完全代替饱和泥浆电导率; 饱和泥浆电导率数值和全盐含量均不是土水比 1:5、1:2.5、1:1、1:0.5 系列中的最高值, 但均与其存在极显著的相关关系, 饱和泥浆电导率与土水比 1:5 土壤浸提液的电导率、饱和泥浆全盐含量与土水比 1:0.5 全盐含量相关性最高, 可分别用最佳拟合回归函数模型进行换算: 一元线性函数模型  $E_{ce} = 2.0428 \times EC_{1:5} + 0.0895$ 、一元二次函数模型  $T_{se} = 0.0641 \times (TS_{1:0.5})^2 - 0.059 \times TS_{1:0.5} + 0.3979$ 。

**关键词:** 土水比; 土壤浸提液; 饱和泥浆; 电导率测定; 全盐含量

**中图分类号:** S156.4

土壤含盐量和电导率是表征土壤盐分状况的主要指标, 不仅是用来确定土壤盐渍化程度的主要参数, 同时也是田间养分管理和环境监测的重要指标<sup>[1-3]</sup>。虽然通过测定土壤含盐量表示土壤盐渍化程度比较准确, 但其测定方法较为繁琐且需时过长。由于在一定范围内, 土壤溶液含盐量与电导率呈正相关, 同时测定土壤电导率具有简便快捷、工作量小等优点, 所以土壤浸提液的电导率常用作反映土壤盐分含量状况的重要指标<sup>[4-5]</sup>。

近年来, 国内外许多学者建议直接用电导率表示土壤含盐量<sup>[3]</sup>。目前国外普遍用饱和泥浆浸出液的电导率( $EC_e$ )来表示土壤盐分状况, 饱和泥浆法测定的盐分状况比较接近于田间实际, 因此倡导的学者较多, 但由于饱和泥浆的制备经验性强, 且饱和点的判定不确定性大, 电导率的测定重现性差, 因而无法推广普及<sup>[6]</sup>。多数学者提倡用 25℃ 不同土水比的电导率来表示, 但由于土水比、盐分组成类型、土壤质地等因素的影响, 土壤浸提液的电导率的数值有较大差别<sup>[7-9]</sup>。对于土壤电导率与土壤盐分含量、水分含量的相关关系以及相应的函数模型和校正系数等有较

多的研究, 但目前通用的土壤溶液电导率应用指标仍未能确定<sup>[10-11]</sup>, 并且土壤溶液电导率与含盐量的换算关系多集中于土水比 1:5。因此, 如何较为精确地通过电导率来表征土壤含盐量一直是土壤学研究的热点问题之一。

针对目前没有统一和固定的土水比电导率来替代饱和泥浆电导率表征土壤盐渍状况的现实问题, 本文通过系统研究不同土水比(1:0.5、1:1、1:2.5、1:5, 饱和土壤溶液)的土壤浸提液电导率、饱和泥浆电导率及其全盐, 以期探讨饱和泥浆电导率与不同土水比土壤浸提液电导率及全盐之间的相关关系, 为进一步统一和提高暗管改碱土壤调查中电导率表征土壤盐渍化程度的准确性与精确性提供科学理论与实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区基本概况

供试土壤样品采自山东东营黄河三角洲盐碱土区, 地处暖温带东部季风气候区并伴有大陆季风性气候, 年平均气温 12.3℃, 降雨量 543 ~ 842 mm, 其

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAC55B07, 2011BAD11B01, 2011BAD11B02)和国家“948”重点项目(2011-G30)资助。

\* 通讯作者(fpsong@126.com; jzs721@263.net)

作者简介: 郭新送(1987—), 男, 山东新泰人, 硕士研究生, 主要从事暗管改碱土壤调查研究。E-mail: guoxinsong1028@163.com

中约 64% 降雨集中于夏季；年蒸发量为 1 962 mm，约为降雨量的 3.6 倍，春季是水分蒸发量最大时期，高达蒸发总量的 52%，地下水位约为 1.5 m，矿化度高。虽经改良，土壤盐渍化程度仍相对较高，属氯化物盐土，质地偏砂，有效养分低。植被多以矮芦苇、罗布麻为主，经济作物主要是棉花。供试土壤基本物理性状如表 1。

表 1 供试土壤部分物理性状参数统计 ( $n = 54$ )  
Table 1 Statistics of physical properties of tested soil

参数	比重	体积质量( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	孔隙度(%)
平均值	2.58	1.45	43.96
标准差	0.05	0.16	6.45
标准误	0.01	0.04	1.52
最小值	2.45	1.19	32.71
中值	2.60	1.40	45.14
最大值	2.66	1.74	54.64

## 1.2 样品采集与测定方法

**1.2.1 固定土水比的土壤溶液制备及电导率测定** 土水比(重量比)的设置 为 1:0.5、1:1、1:2.5 和 1:5 系列，该系列土水比的土壤溶液电导率的测定采用 DDS-308A 电导率仪进行。该盐碱地土壤采样深度选择 0~40 cm，经自然风干、研磨并过 2 mm 筛后混匀待测。称取测试土样 10.0 g 置于 100 ml 广口塑料瓶中，分别加入无  $\text{CO}_2$  的蒸馏水 5、10、25、50 ml，以此制备不同土水比系列的土壤溶液。加盖后在恒温往复振荡机上振荡 3 min，将土水混悬液用离心机分离，取上层清液，用电导率仪(DDSJ-308A 型)测定电导率，即  $\text{EC}_{1:0.5}$ 、 $\text{EC}_{1:1}$ 、 $\text{EC}_{1:2.5}$ 、 $\text{EC}_{1:5}$ 。

**1.2.2 饱和土壤溶液的制备及电导率测定** 因传统制备饱和泥浆时其饱和点的判断存在较大误差，且难以掌握，因此通过计算田间土壤孔隙度作为饱和土壤溶液的含水量。理论上饱和土壤溶液含水量并不等同于饱和泥浆含水量，但两者数值很接近<sup>[12]</sup>。Wang 等<sup>[12]</sup>提出关系式  $\text{EC}_{1:x} = x^{-n} \text{EC}_{1:1}$ ， $n < 1$ ，当且仅当  $x = \varepsilon \rho_w / ((1-\varepsilon) \rho_s)$  时，其对应的电导率为饱和土壤溶液的电导率，式中  $\varepsilon$  为土壤孔隙度， $\rho_s$  为土壤颗粒密度， $\rho_w$  为水的密度。吴月茹等<sup>[13]</sup>对此关系式进行推导，并将此式计算出来的含水量作为饱和土壤溶液的含水量，在此含水量下测得的电导率为  $\text{EC}_s$ 。

为简便起见，本试验设定田间土壤孔隙度相当于土壤饱和含水量，因而直接用计算得到的饱和含水量(多少相当于田间土壤孔隙度)配置饱和土壤溶液，将其置于恒温往复振荡机上振荡 3 min，用离心机分离

土水混悬液，取上层清液，用电导率仪(DDSJ-308A 型)测定电导率记为  $\text{EC}_s$ 。

**1.2.3 饱和泥浆的制备及其电导率测定** 饱和泥浆的制备方法按理查德提出的手工调制法进行<sup>[1]</sup>。称取 20 g 待测土样放入塑料容器中一边缓缓加入去  $\text{CO}_2$  蒸馏水，一边用调土板将其调制成为饱和泥浆(土样处于一种半流动，表面反光，同时有自由水析出的状态)。将制备好的饱和泥浆静置 6 h 后，用离心机分离土水混悬液，取上层清液，用电导率仪(DDSJ-308A 型)测定电导率记为  $\text{EC}_e$ <sup>[2]</sup>。

**1.2.4 不同土水比土壤溶液全盐的测定** 土壤水溶性盐的测定主要分为两步：水溶性盐的提取。称取过 2 mm 筛的土壤样品 100.0 g 放入 1 000 ml 的振荡瓶中，然后按照不同的土水比要求，量取一定体积的无  $\text{CO}_2$  蒸馏水，用橡皮塞塞紧瓶口，然后放在振荡机上振荡 3 min，立即用漏斗过滤，清液存于 500 ml 三角瓶中，用橡皮塞塞紧，作为待测液待测；测定浸出液盐分的浓度。吸取不同土水比的土壤浸出待测液 50 ml 放在 100 ml 已知烘干质量的瓷蒸发皿内，在  $80^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$  水浴锅上蒸干，残渣和蒸发皿放在  $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$  烘箱中烘干，称重直至恒重。土壤水溶性盐总量( $\text{g}/\text{kg}$ ) = 烘干残渣质量/吸取待测液体积相当于土样质量  $\times 1\ 000$ 。不同土水比土壤溶液全盐含量记为  $\text{TS}_{1:0.5}$ 、 $\text{TS}_{1:1}$ 、 $\text{TS}_{1:2.5}$ 、 $\text{TS}_{1:5}$ ，饱和土壤溶液全盐为  $\text{TSe}$ 。

## 1.3 数据处理与分析

采用 Excel、SAS 软件进行数据计算、绘图与统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 饱和土壤溶液与饱和泥浆的含水量及电导率的比较分析

本研究采用通过计算的田间土壤孔隙度数值作为制备土壤饱和溶液的添加水量，并配置土壤饱和溶液；同时采用传统饱和泥浆的调制方法制备饱和泥浆，然后对同一土壤样品的饱和土壤溶液含水量、电导率与多次制备的饱和泥浆含水量、电导率进行相关分析。供试土壤样品的土壤孔隙度分布在 32.71%~54.64%，但大部分土壤样品的孔隙度集中在 45.14% 附近，为使不同土壤孔隙度的土壤样品均有涵盖且数量基本一致，故选取 18 个代表性的土壤样品对饱和土壤溶液与饱和泥浆的含水量及电导率进行比较分析。

通过对土壤样品饱和泥浆的传统制备所需水量和采用计算方法确定的饱和土壤溶液含水量二者的相关分析研究,结果显示两者相关性极显著,其关系方程式为  $y = 1.072 5x - 29.279$ ,  $R^2 = 0.981 7$ (图 1)。

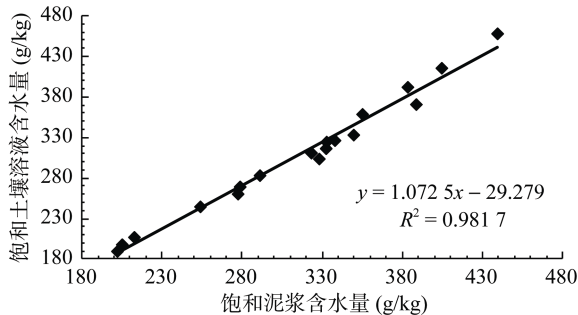


图 1 饱和土壤溶液含水量与饱和泥浆含水量线性关系 ( $n = 18$ )

Fig. 1 Linear relation between water contents of saturated soil paste and saturated soil solution

同样对饱和土壤溶液电导率(ECs)与饱和泥浆的电导率(ECe)进行相关分析,结果表明 ECe 与 ECs 间存在极显著的相关性( $R^2 = 0.999 9$ ,  $P < 0.01$ ),其关系方程式为  $y = 1.004 5x - 0.007 8$ (图 2)。

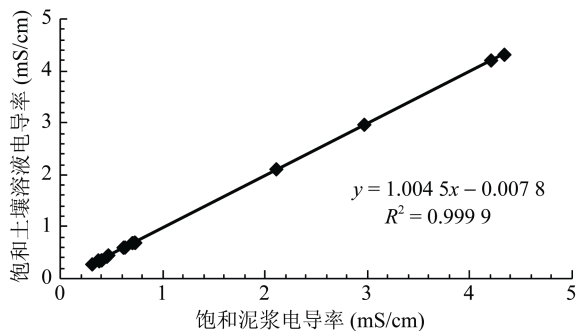


图 2 饱和土壤溶液电导率与饱和泥浆电导率线性关系 ( $n = 18$ )

Fig. 2 Linear relation between ECs of saturated soil paste and saturated soil solution

以上结果说明,由于饱和泥浆制备的强经验性,只能定性而无法定量判定其饱和点,因此在试验中采用通过计算土壤孔隙度得到的饱和土壤溶液含水量来代替通过制备得到饱和泥浆含水量,尤其在大批量样品测定的试验中使用会更加便捷与可靠。同样,在已知土壤样品的饱和含水量(SP)下,饱和泥浆电导率也可用饱和土壤溶液电导率来表示(也即 ECe ECs)。但这些关系式仅在本研究供试盐碱土类型(氯化物盐土)采集区得到了验证,其他不同盐分组成类型盐碱土区域还需要进一步研究。

## 2.2 不同土水比的土壤浸提液与饱和泥浆电导率及全盐的比较分析

### 2.2.1 不同土水比对土壤浸提液电导率与土壤全盐

含量的影响 对 1:5、1:2.5、1:1、1:0.5 土水比系列的土壤浸提液电导率与土壤全盐含量的测定结果进行分析,得到不同土水比对土壤电导率和全盐含量的影响不同(图 3、图 4)。

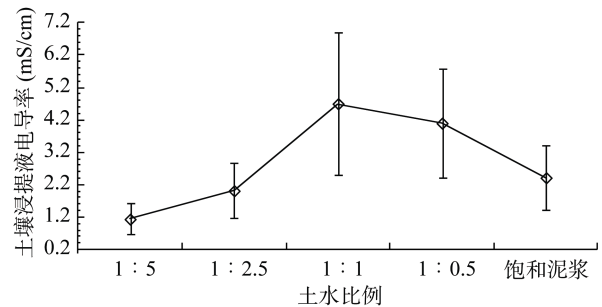


图 3 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率

Fig. 3 ECs of saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios

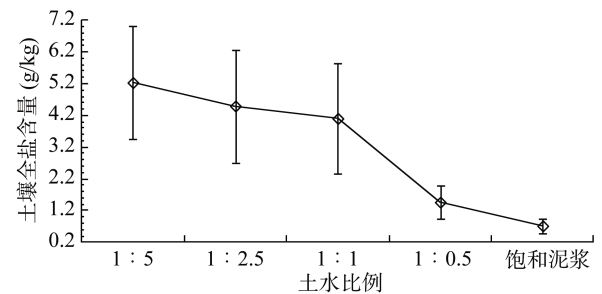


图 4 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆土壤全盐含量

Fig. 4 TS contents of saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios

从土水比 1:5 至土水比 1:0.5 可以看出其土壤电导率的变化趋势为:随着土水比升高,土壤浸提液的电导率先升高后降低。这说明随着土水比例的升高,土壤盐分离子的浓度增大,当土水比例增大到一定程度后,所加水分已经不能全部溶解土壤中的盐分离子,浸提水量添加的越少,土壤中的盐分离子溶解越少,而土壤溶液的浓度却不断升高,从而导致电导率数值升高。另外,浸提水量的减小倍数与土壤电导率升高倍数之间没有直接的线性关系。饱和泥浆的电导率从数值上看与土水比 1:5 和 1:2.5 的土壤浸提液电导率相近。

土壤全盐含量的变化趋势是随着土水比升高逐渐降低。这说明随着土水比的增大,也即浸提添加的水量越小,土壤中的盐分离子溶解越不完全,提取的盐分越少。土水比 1:5 测定的土壤浸提液的全盐含量最大,说明添加的浸提水量越大,土壤中总盐分溶解越多越完全,提取的盐分就越多,从而土壤全盐含量就越高。饱和泥浆的土壤全盐含量与土水比 1:0.5 的土壤浸提液相近,但饱和泥浆的土壤全盐含量均低

于土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的土壤浸提液的全盐含量, 这说明土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的土壤浸提液所溶解的全盐含量均大于饱和泥浆。另外, 在不同土水比的电导率测定中,  $EC_{1:5}$  与  $E_{Ce}$  测定值的标准误差明显小于其他土水比, 而全盐的测定为  $TS_{1:0.5}$  与  $T_{Se}$  测定值的标准误差明显小于其他土水比。

以上结果说明, 饱和泥浆电导率数值不是土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的最高值; 饱和泥浆全盐含量均低于所有试验土水比土壤浸提液的全盐含量, 但饱和泥浆测定的电导率与全盐是最稳定的, 饱和泥浆电导率和全盐含量分别接近于土水比 1 : 5、1 : 2.5、1 : 1、1 : 0.5

系列中土水比最小(也即土水比 1 : 5)的电导率和土水比最大(也即土水比 1 : 0.5)的土壤浸提液的全盐含量。

**2.2.2 不同土水比的土壤浸提液与饱和泥浆之间的电导率及全盐的相关性分析** 土壤全盐量是土壤浸提液中水分溶解的土壤全部可溶性盐的含量, 土壤中盐分含量各异, 其随土壤水分含量变化所溶解的盐分量也有所不同, 但不同土水比的土壤浸提液测得的电导率、全盐量与饱和泥浆测得的电导率、全盐量之间均具有一定的相关性, 同时由于盐分离子间组成、溶解度、离子迁移率等的差异性, 故其间相关性各异(表 2)。

表 2 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率及土壤全盐含量的相关性( $n = 54$ )  
Table 2 EC and TS correlation between saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios

指标	$EC_{1:5}$	$EC_{1:2.5}$	$EC_{1:1}$	$EC_{1:0.5}$	$E_{Ce}$	$T_{Se}$
$TS_{1:5}$	0.929 1**	0.917 1**	0.922 6**	0.867 5*	0.904 7**	0.814 8**
$TS_{1:2.5}$	0.974 8**	0.974 2**	0.972 8**	0.907 6**	0.949 7**	0.858 5**
$TS_{1:1}$	0.994 3**	0.993 2**	0.995 8**	0.900 6**	0.951 5**	0.891 4**
$TS_{1:0.5}$	0.859 4**	0.873 5**	0.858 5**	0.777 2**	0.763 1**	0.858 3**
$T_{Se}$	0.862 2**	0.870 9**	0.897 9**	0.678 7**	0.754 9**	1.000 0
$E_{Ce}$	0.974 0**	0.968 4**	0.952 3**	0.971 4**	1.000 0	9**

注: \*表示相关性达到  $P < 0.05$  显著水平, \*\*表示相关性达到  $P < 0.01$  显著水平。

饱和泥浆的电导率  $E_{Ce}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列土壤浸提液的电导率之间的相关性均达到极显著水平, 其中与  $EC_{1:5}$  的相关性最高, 相关系数达到 0.974 0\*\*; 饱和泥浆的电导率  $E_{Ce}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列土壤浸提液的全盐含量之间也均达到极显著相关, 其中与  $TS_{1:1}$  相关性最高, 相关系数为 0.951 5\*\*。

饱和泥浆的全盐含量  $T_{Se}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列土壤浸提液全盐含量之间的相关性均达极显著水平, 与  $TS_{1:1}$  相关性最高, 相关系数为 0.891 4\*\*; 饱和泥浆的全盐含量  $T_{Se}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列土壤浸提液的电导率之间的相关性均达极显著水平, 与  $EC_{1:1}$  相关性最高, 相关系数为 0.897 9\*\*。饱和泥浆的电导率  $E_{Ce}$  与饱和泥浆的全盐含量  $T_{Se}$  之间极显著相关, 相关系数为 0.754 9\*\*。

在土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的土壤浸提液电导率、全盐含量与饱和泥浆电导率、全盐含量之间均存在显著的相关关系; 饱和泥浆电导率与土水比 1 : 5 土壤浸提液的电导率、饱和泥浆全盐含量与土水比 1 : 1 全盐含量相关性最高。

**2.3 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率及全盐的拟合关系**

**2.3.1 不同土水比土壤浸提液电导率与饱和泥浆电导率的拟合关系**  $EC_{1:5}$ 、 $EC_{1:2.5}$ 、 $EC_{1:1}$ 、 $EC_{1:0.5}$

与  $E_{Ce}$  测定值之间的差异是由于土水比例的不同引起的, 但也受土壤中盐分的离子组成、盐分类型及盐分溶解度差异性的影响, 所以它们之间的电导率比值并非是简单的添加浸提水量的比值。通过  $E_{Ce}$  与  $EC_{1:5}$ 、 $EC_{1:2.5}$ 、 $EC_{1:1}$ 、 $EC_{1:0.5}$  测定值进行拟合, 并在函数模型中寻找其最优换算关系式。

本研究系统对饱和泥浆电导率与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的电导率进行换算拟合, 由  $E_{Ce}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的  $EC$  值间拟合函数关系模型可知(表 3),  $E_{Ce}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的土壤电导率  $EC$  的相关性均显著, 并且一元二次多项式函数模型的拟合效果均稍优于一元线性函数模型的拟合效果, 而一元二次多项式函数模型间的拟合效果。通过  $R^2$  值来判定, 在  $E_{Ce}$  与土水比 1 : 5 ~ 1 : 0.5 系列的  $EC$  值间的两种拟合函数关系模型中, 均为  $E_{Ce}$  与  $EC_{1:5}$  间的函数模型拟合效果最佳; 因的判定系数相近, 所以黄河三角洲区域  $E_{Ce}$  与  $EC_{1:5}$  之间的拟合回归函数模型可直接选择一元线性回归函数模型:  $E_{Ce} = 2.042 8 \times EC_{1:5} + 0.089 5$ 。由此可知, 通过测定土水比 1 : 5 的电导率, 可以通过回归函数模型来换算饱和泥浆电导率, 此换算在各函数模型中最为简便且可信度高。在得到其他土水比  $EC$  时也可通过相应的函数模型进行  $E_{Ce}$  的换算。

表 3 不同土水比的土壤浸提液与饱和泥浆电导率间拟合回归函数关系模型(mS/cm)  
Table 3 EC regression model of saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios

模型项目	一元线性函数模型		一元二次多项式函数模型	
	$y = a + bx$	$R^2$	$y = ax^2 + bx + c$	$R^2$
ECe 与 EC <sub>1:5</sub>	$y = 2.042 8x + 0.089 5$	0.948 6	$y = 0.056x^2 + 2.406 6x - 0.039$	0.950 0
ECe 与 EC <sub>1:2.5</sub>	$y = 1.135x + 0.131$	0.937 7	$y = -0.020 7x^2 + 1.374 7x - 0.015 6$	0.940 1
ECe 与 EC <sub>1:1</sub>	$y = 0.433 3x + 0.381 6$	0.906 9	$y = -0.012 5x^2 + 0.818 8x - 0.144$	0.947 3
ECe 与 EC <sub>1:0.5</sub>	$y = 0.570 6x + 0.077 9$	0.943 5	$y = -0.003 4x^2 + 0.491 1x + 0.178 4$	0.945 3

ECe 与 EC<sub>1:5</sub> 的一元一次函数关系与李冬顺等<sup>[4]</sup>建立黄淮海平原盐渍土 ECe 与 EC<sub>1:5</sub> 相互换算的经验公式 ( $ECe = 8.24 \times EC_{1:5} - 0.724$ ;  $ECe = 3.79 \times EC_{1:5}/SP - 0.501$  校正后实验式)相差较大;与迟春明等<sup>[18]</sup>在松内平原盐碱土建立的经验公式( $ECe = 10.82 \times EC_{1:5} - 0.59$ )也有较大差别。所以,在此建立的经验公式目前还只适用于供试土壤采集地区。

表 4 不同土水比的土壤浸提液与饱和泥浆全盐间拟合回归函数关系模型(g/kg)  
Table 4 TS regression model of saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios

模型项目	一元线性函数模型		一元二次多项式函数模型	
	$y = a + bx$	$R^2$	$y = ax^2 + bx + c$	$R^2$
TSe 与 TS <sub>1:5</sub>	$y = 0.096 9x + 0.172 3$	0.663 9	$y = -0.001 9x^2 + 0.046 8x - 0.294 4$	0.680 5
TSe 与 TS <sub>1:2.5</sub>	$y = 0.105 3x + 0.222 6$	0.736 7	$y = -0.003 9x^2 + 0.012 2x + 0.377 7$	0.776 6
TSe 与 TS <sub>1:1</sub>	$y = 0.110 2x + 0.278 7$	0.770 9	$y = -0.004 2x^2 + 0.013 4x + 0.399 1$	0.802 2
TSe 与 TS <sub>1:0.5</sub>	$y = 0.361 5x + 0.190 8$	0.736 1	$y = 0.064 1x^2 - 0.059x + 0.397 9$	0.813 5

本研究系统对饱和泥浆全盐与土水比 1:5~1:0.5 系列的全盐进行换算拟合,结果得到:在饱和泥浆全盐含量 TSe 与土水比 1:5~1:0.5 系列的 TS 间的拟合回归函数模型中,一元线性回归函数模型 TSe 与 TS<sub>1:1</sub> 的拟合最佳,二次多项式回归函数模型 TSe 与 TS<sub>1:0.5</sub> 拟合最佳;同时 TSe 与同一土水比的土壤浸提液全盐含量拟合回归函数模型中均为二次多项式拟合函数回归模型优于一元线性拟合回归函数模型,即 TSe 与 TS 间所模拟的曲线都近于抛物线状,也即土壤全盐含量随土水比的变化并非是严格意义上的土水比的倍数。

通过  $R^2$  值来判定,TSe 与土水比系列中最优拟合回归函数模型为 TSe 与 TS<sub>1:0.5</sub> 之间的一元二次多项式拟合回归函数模型。因而,通过测定土水比 1:0.5 的全盐含量,并由一元二次多项式回归函数模型  $TSe = 0.064 1 \times (TS_{1:0.5})^2 - 0.059 \times TS_{1:0.5} + 0.397 9$  可以换算得到饱和泥浆全盐含量。由于不同地区的盐土类型及离子组成具有很大差异性,无论何种土水比的何种函数关系式都具地区局限性,其他地区不能照搬套用。

2.3.2 不同土水比的土壤浸提液全盐与饱和泥浆全盐的拟合关系 土壤中盐分含量各异,离子组成差别较大,其随土壤水分的变化所溶解的盐分量也有所不同,但不同土水比 1:5~1:0.5 系列的土壤浸提液全盐量与饱和泥浆全盐量具有一定的相关性。将 TS<sub>1:5</sub>、TS<sub>1:2.5</sub>、TS<sub>1:1</sub>、TS<sub>1:0.5</sub> 与 TSe 的测定值进行拟合回归,得到拟合回归函数关系模型(表 4)。

### 3 结论

1) 在黄河三角洲盐碱土(氯化物类型)区,采用通过计算土壤孔隙度得到的饱和土壤溶液含水量来定量确定原来定性判定的饱和泥浆含水量,以饱和土壤溶液电导率代替饱和泥浆电导率是完全可行的。

2) 饱和泥浆电导率数值和全盐含量均不是所有土水比系列中的最高值,饱和泥浆电导率数值和全盐含量分别接近于土水比 1:5、1:2.5、1:1、1:0.5 系列中土水比较小者(土水比 1:2.5)的电导率和土水比最大者(土水比 1:0.5)的土壤浸提液全盐含量。饱和泥浆电导率、全盐含量与土水比 1:5~1:0.5 系列的土壤浸提液电导率、全盐含量之间均存在显著的相关关系;饱和泥浆电导率与土水比 1:5 土壤浸提液的电导率、饱和泥浆全盐含量与土水比 1:1 全盐含量相关性最高。

3) 在黄河三角洲区域,饱和泥浆电导率及全盐均可由土水比 1:5~1:0.5 系列的电导率及全盐进行相关换算,其中饱和泥浆电导率与土水比 1:5 土壤浸提液的电导率,饱和泥浆全盐含量与土水比 1:0.5 全盐含量相关性均最高,可分别用一元线性函

数模型  $E_{Ce} = 2.0428 \times EC_{1:5} + 0.0895$ 、一元二次函数模型  $TSe = 0.0641 \times (TS_{1:0.5})^2 - 0.059 \times TS_{1:0.5} + 0.3979$  进行拟合回归换算。

#### 参考文献：

- [1] Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ. Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 428-433
- [2] Heiniger RW, McBride RG, Clay DE. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 508-519
- [3] Adviento-Borbe MAA, Doran JW, Drijber RA, Dobermann A. Soil electrical conductivity and water content affect nitrous oxide and carbon dioxide emissions in intensively managed soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 1999-2010
- [4] 李冬顺, 杨劲松, 周静. 黄淮海平原盐渍土壤浸提液电导率的测定及换算[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 285-287
- [5] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(Z1): 85-87
- [6] Zhang H, Schroder JL, Pittman, JJ, Wang JJ, Payton ME. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extracts[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1146-1151
- [7] Liu GM, Yang JS, Yao RJ. Electrical conductivity in soil extracts: Chemical factors and their intensity[J]. Pedosphere, 2006, 16(1): 100-107
- [8] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39-41
- [9] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(5): 59-66
- [10] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 20-23
- [11] 李民赞, 王琦, 汪懋华. 一种土壤电导率实时分析仪的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 51-55
- [12] Wang WZH, Watanabe E, Kobayashi T. A method for measuring soil solution electrical conductivity in the field using TDR[J]. J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour., 2005, 18(1): 55-63
- [13] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 张智慧. 采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 869-873
- [14] Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 433-439
- [15] Rhoades JD, Waggoner BL, Shouse PJ, Alves WJ. Determining soil salinity from soil and soil-paste electrical conductivities: sensitivity analysis of models[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(5): 1368-1374
- [16] Yasser H, Magnus P, Ronny B. Soil solution electrical conductivity measurements using different dielectric techniques [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1071-1078
- [17] Slavich PG, Petterson GH. Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil: Water suspensions and texture[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31(1): 73-81
- [18] 迟春明, 王志春. 松嫩平原盐碱土饱和浸提液与土水比 1:5 浸提液间化学参数的换算关系[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 172-176
- [19] 何文寿, 刘阳春, 何进宇. 宁夏不同盐渍化土壤水溶性盐含量与其电导率关系[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 111-115
- [20] 王艳, 王正祥, 廉晓娟, 肖辉, 王立艳, 贺宏达. 天津滨海地区土壤电导率的测定及其与含盐量的关系[J]. 天津农业科学, 2011, 17(2): 18-21
- [21] Khorsandi F, Yazdi FA. Estimation of saturated paste extracts' electrical conductivity from 1:5 soil/water suspension and gypsum[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, 42(3): 315-321

## Comparative Study on Electrical Conductivity Between Saturated Soil Paste and Saturated Soil Solutions Under Different Soil/Water Ratios

GUO Xin-song<sup>1,2</sup>, SONG Fu-peng<sup>1\*</sup>, JU Zheng-shan<sup>2\*</sup>

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, National Engineering & Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, MLR, Beijing 100035, China)

**Abstract:** To overcome the uncertainty of the saturation point and the measurement instability of the electrical conductivity of saturated soil paste and to represent consistently and accurately the salinity degree of saline soil improved by subsurface drainage, this study systematically compared that the water demand between saturated soil paste and saturated soil solution, the correlation and conversion of electrical conductivity (EC) and soil total salt content (TS) between saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios (1 : 5, 1 : 2.5, 1 : 1 and 1 : 0.5) with chemical analysis and statistical analysis. The results showed that the water demand of saturated soil paste whose saturated point was qualitatively determined originally could be quantitatively determined by calculating soil porosity for the water demand of saturated soil solution of saline-alkali soils (chloride type soil) in the Yellow River delta. EC of saturated soil paste could be replaced completely with EC of saturated soil solution. Neither EC nor TS was the highest value in the series of different soil/water ratios, but there was significant correlation between them. EC correlation were highest between saturated soil paste and saturated soil solution under 1 : 5 soil/water ratio as well as TS correlation between saturated soil paste and saturated soil solution under 1 : 0.5 soil/water ratio, which could be respectively converted with the best-fit regression function models:  $EC_e = 2.0428 \times EC_{1:5} + 0.0895$  and  $TSe = 0.0641 \times (TS_{1:0.5})^2 - 0.059 \times TS_{1:0.5} + 0.3979$ .

**Key words:** Soil/water ratio; Soil solution; Saturated soil paste; Electrical conductivity; Soil total salt content