

## 宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究<sup>①</sup>

张体彬<sup>1,2</sup>, 康跃虎<sup>1\*</sup>, 胡伟<sup>1</sup>, 窦超银<sup>3</sup>, 刘淑慧<sup>1</sup>, 李占清<sup>4</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 辽宁省水利水电科学研究院, 沈阳 110003; 4 宁夏平罗县农业综合开发办公室, 宁夏平罗 753400)

**摘要:** 为探明龟裂碱土的基本盐分状况, 并建立在滴灌利用条件下基于电导率的土壤主要盐分性质的预测模型, 本文在野外调查、取样和化学分析的基础上, 利用经典统计分析方法, 对我国宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征进行了研究。结果表明, 龟裂碱土剖面内盐分含量总体呈现“表聚”现象, 主要盐离子含量随深度增加逐渐降低。Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>是该土壤中最主要的阴离子, 且在上层土壤中表现尤为突出, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量在100 cm以下的土层中逐渐增加。表层土壤钠吸附比(SAR)值较大, 均在15 (mmol/L)<sup>0.5</sup>以上, pH值在8.5~10之间。Na<sup>+</sup>与Cl<sup>-</sup>的相关性最强, 相关性系数为0.902 ( $P < 0.01$ ), Na<sup>+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的相关性次之。土壤饱和浸提液电导率(EC<sub>e</sub>)和Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、可溶性总盐(TSS)含量及SAR值显著正相关 ( $P < 0.01$ )。土壤Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、TSS含量及SAR可由自变量为EC<sub>e</sub>的数学回归方程来表达, 且预测精度可靠, 可快速、经济地模拟和预测该地区土壤Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、TSS含量及SAR值, 为本区域滴灌精准改良利用条件下龟裂碱土的盐渍化状况评价提供参考。

**关键词:** 龟裂碱土; 盐分特征; 电导率

**中图分类号:** S156.4

当前, 全球盐渍土面积约为10亿hm<sup>2</sup>, 遍及各个大陆及亚大陆地区, 其中碱土和碱化土壤约占60%<sup>[1]</sup>。与盐土改良相比, 碱土的改良更为困难<sup>[2]</sup>。龟裂碱土是一种具有不良理化性质的碱化土壤, 主要分布在新疆、宁夏银川平原和内蒙古河套平原的西部<sup>[3]</sup>。对土壤盐渍化特征、剖面类型及其发展方向的定量研究是实现盐渍土科学管理及合理利用的必要前提。近年来, 滴灌作为一种先进的节水灌溉技术, 以其独特的优势, 逐渐成为盐碱地开发利用的新途径, 得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。而土壤盐渍化强度随生物气候、土壤的发生过程以及利用方式不同差异很大<sup>[7]</sup>, 因此有必要开展在滴灌利用条件下的龟裂碱土的盐分特征研究。

土壤浸提液电导率是反映土壤盐分含量状况的重要指标, 是测定土壤盐分的首选方法<sup>[3]</sup>。目前, 国内已有多位学者在不同地区对土壤盐分离子、土壤含盐量和电导率之间的关系进行了研究, 但多是采用土水比1:5下的电导率<sup>[8-13]</sup>。现在国际上比较通用的是用土壤饱和泥浆浸提液电导率(EC<sub>e</sub>)来表示土壤盐分含量水平。饱和泥浆法的土水比例与田间实际状况非常接

近, 该法测定的浸提液电导率和pH值能较好地反映田间土壤的实际含盐和pH水平, 在盐渍土研究, 尤其是与作物相关联的一系列盐渍土特性的研究方面得到广泛应用<sup>[3, 14]</sup>。另外, 不同地区成土母质及盐渍化成因不同, 土壤总体盐分状况、盐分离子组成不同, 均可造成盐基离子含量及电导率与土壤含盐量的关系不同<sup>[10]</sup>。

本文针对龟裂碱土典型分布区不同来源土样的化学分析结果, 分析了研究区土壤总体盐分状况及相关性, 揭示本区土壤盐分组成, 并建立适用于本研究区滴灌条件下由土壤饱和浸提液电导率(EC<sub>e</sub>)预测Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、可溶性总盐(TSS)含量及SAR的数学模型, 以便快速、经济地模拟和预测该地区的土壤Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、TSS含量及SAR值, 用于评价本区域滴灌精准改良利用条件下龟裂碱土的盐渍化状况。

### 1 试验区概况

试验基地位于龟裂碱土的典型分布区宁夏平罗县西大滩(38°52' N, 106°27' E, 海拔约1095 m), 属于

<sup>①</sup>基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-16)、国家科技支撑计划课题项目(2013BAC02B02)和宁夏农业综合开发土地治理科技推广项目(NTKJ-2012-02)资助。

\* 通讯作者(kangyh@igsrr.ac.cn)

作者简介: 张体彬(1983—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail: zhangtibin@163.com

黄河中上游半干旱-半荒漠盐渍区<sup>[3]</sup>, 位于贺兰山东麓洪积平原与黄河冲积平原过渡地带, 银川平原引黄灌区的末梢, 地形较为平坦。典型的温带大陆性气候, 全年日照充足, 降水量集中, 蒸发强烈, 空气干燥, 温差较大, 无霜期短。年降水量为 180~220 mm 之间, 年蒸发量 2000 mm 以上, 蒸降比为 10 左右。年平均气温 9.4℃, 年最低平均气温 -21.3℃, 年最高平均气温 34.3℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温为 3 300℃。研究区内地下水埋深为 2.5 m 左右, 地下水矿化度一般小于 3 g/L, 主要含硫酸盐、氯化物, 且含有少量苏打 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )。

境内分布有一种具有不良理化性质的土壤: 龟裂碱土 (宁夏群众俗称白僵土), 属于盐碱土纲碱土类盐渍龟裂碱土亚类, 面积约 2 万  $\text{hm}^2$ <sup>[15-16]</sup>。龟裂碱土具有特殊的外部景观和剖面形态, 一般不长高等植物, 地面光秃。龟裂碱土表层为具有龟裂纹的结壳, 结壳下为短柱状结构的碱化层, 其下为棱块状结构的土层, 整个剖面非常坚硬, 土壤体积质量高达 1.40~1.67  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。土壤质地为粉质土, 0~40 cm 土壤中黏粒 (< 2  $\mu\text{m}$ )、粉粒 (2~50  $\mu\text{m}$ )、砂粒 (>50  $\mu\text{m}$ ) 分别占 1.08%、93.61% 和 5.31%。

实验基地于 2009 年开始进行开发利用研究。采用以“滴灌”为核心的利用方式, 结合其他如“高垄”、“覆膜”、“土壤水分二次分配”等配套技术措施, 进行栽植枸杞。肥料随灌水施入, 施肥量为同区域、同等生长期作物大田施肥量的 1/3。该技术攻克了龟裂碱土水分不渗透、不扩散的难题, 种植的枸杞生长状况良好, 栽植 2 年的枸杞产量、效益接近同区域良田水平。

## 2 材料与方 法

### 2.1 土样采集

在开发利用前, 选择研究区内未经破坏的典型剖面 3 个, 取样深度为 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 cm, 40 cm 以下每隔 20 cm 取样一次, 直至 200 cm, 研究剖面盐分垂直分布特征。

在滴灌开发利用小区, 于 2010 年枸杞生长季末 (10月下旬) 取土, 取土位置为距离滴头水平距离 0、10、20、30、40、60、80、100、120、150 cm 处, 深度为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm, 5 个重复, 共 300 个样品, 以期土壤样品尽可能覆盖研究区盐分变化的动态范围, 用于建立土壤主要化学性质之间的相互关系, 并进行预测精度检验。

将所有土样经自然风干后, 剔除杂质, 适当磨细,

过 1 mm 孔径筛, 充分混匀, 装入容器待用。

### 2.2 土样化学分析

所有土样盐分化学性质的测定均采用调制饱和泥浆的方法进行。测定土壤饱和泥浆 pH 值及饱和泥浆浸提液电导率 ( $\text{EC}_e$ ), 并根据温度补充系数换算至标准温度 25℃。然后测定饱和泥浆浸提液中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等盐基离子含量。 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  采用双指示剂-中和滴定法测定;  $\text{Cl}^-$  采用硝酸银滴定法测定;  $\text{SO}_4^{2-}$  采用 EDTA 间接络合滴定法测定;  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  用 EDTA 滴定法测定;  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  用火焰光度计法测定。具体分析方 法参见文献<sup>[17]</sup>。

根据以上方法得出的各离子含量, 计算钠吸附比 (SAR)、可溶性总盐 (TSS) 含量、可溶性钠百分率 (SSP) 以及  $\text{Cl}^-$  占阴离子总量的比值 (物质量之比)。

### 2.3 数据处理

采用 SPSS 软件进行统计分析和建模, 利用 SigmaPlot 软件进行制图。

数学模型的建立和检验的具体步骤为: 将 300 个用于建模的土壤样本分析结果按  $\text{EC}_e$  的大小排序, 并按奇偶编号分为两个样本集, 这样可使建模和检验样本都能覆盖研究区盐分变化的动态范围, 提高模型预测精度。其中单数用于建立关系, 双数作为检验样本集<sup>[10]</sup>。

表征土壤盐渍化状况的参数  $\text{EC}_e$  与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 分别以一次线性拟合, 通过方差分析及回归方程与回归系数显著性检验, 并用实测数据检验预测模型, 计算均方差 (root mean squared error, RMSE)、预测精度 (prediction accuracy, PA) 与相对误差 (relative error, RE) 来评价预测模型。计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{PA} = \left(1 - \frac{\text{RMSE}}{\text{mean}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{RE} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{\hat{x}_i} \right| \right) \quad (3)$$

其中,  $x_i$  为预测值,  $\hat{x}_i$  为实测值, mean 为预测项的均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 原状土剖面盐分分布特征

在研究区域开发利用前, 对龟裂碱土原状土壤化学性质分析结果见表 1。阴离子中,  $\text{Cl}^-$  在整个剖面的

含量为 0.24~2.30 g/kg 之间, 随深度增加,  $\text{Cl}^-$  含量逐渐降低;  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  含量相对较低, 特别是在表层 0~40 cm 土壤中,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  含量显著低于  $\text{Cl}^-$  含量。随深度增加, 二者含量表现出波动式变化。就整个 0~200 cm 剖面来说, 100 cm 深度以下土层中,  $\text{HCO}_3^-$  含量明显增多; 而  $\text{SO}_4^{2-}$  含量在土壤剖面内随深度变化趋势同  $\text{Cl}^-$ , 即随深度增加其含量逐渐降低。与阴离子相比, 阳离子含量在剖面的变化相对较小。 $\text{Na}^+$  是土壤整个剖面中最主要的阳离子, 含量在 0.06~0.88

g/kg 之间。随深度增加,  $\text{Na}^+$  含量逐渐降低。其他 3 个离子,  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  在整个剖面的含量较低, 随深度变化不大。TSS 含量通常是指土壤溶液中各盐分离子之和, 用以表示土壤含盐量的大小及盐渍化水平的高低<sup>[18]</sup>。龟裂碱土盐分含量并不高, TSS 含量在 1.15~5.31 g/kg 之间, 表层较高, 随深度增加逐渐降低。由此可见, 整个剖面内, 土壤主要盐分含量总体呈现“表聚”现象, TSS 及主要离子含量随深度增加逐渐降低。

表1 原状土主要化学性质

Table 1 Chemical characteristics in crude takyric solonetz

| 深度<br>(cm) | 盐分离子 (g/kg)                   |                               |                 |                               |                  |                  |                |                 | TSS<br>(g/kg) | SAR<br>(mmol/L) <sup>0.5</sup> | SSP<br>(%) | Cl/A<br>(%) | EC <sub>e</sub><br>(dS/m) | pH   |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------|--------------------------------|------------|-------------|---------------------------|------|
|            | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |               |                                |            |             |                           |      |
| 0~5        | 0.09                          | 0.29                          | 2.22            | 1.05                          | 0.06             | 0.08             | 0.01           | 0.74            | 4.55          | 20.58                          | 86.74      | 76.92       | 18.37                     | 8.50 |
| 5~10       | 0.17                          | 0.52                          | 2.30            | 1.46                          | 0.02             | 0.03             | 0.01           | 0.80            | 5.31          | 35.65                          | 94.86      | 68.86       | 18.70                     | 9.30 |
| 10~20      | 0.34                          | 0.39                          | 2.14            | 1.02                          | 0.02             | 0.03             | 0.01           | 0.88            | 4.84          | 38.20                          | 95.84      | 68.00       | 11.66                     | 9.58 |
| 20~30      | 0.55                          | 0.43                          | 1.57            | 0.34                          | 0.02             | 0.03             | 0.01           | 0.63            | 3.57          | 27.29                          | 94.50      | 60.98       | 6.69                      | 9.52 |
| 30~40      | 0.63                          | 0.50                          | 1.00            | 0.37                          | 0.02             | 0.03             | 0.01           | 0.40            | 2.95          | 16.37                          | 91.34      | 49.02       | 4.16                      | 9.51 |
| 40~60      | 0.55                          | 0.45                          | 0.54            | 0.10                          | 0.01             | 0.02             | 0.01           | 0.22            | 1.91          | 10.91                          | 87.30      | 37.31       | 2.45                      | 9.50 |
| 60~80      | 0.48                          | 0.28                          | 0.41            | 0.05                          | 0.01             | 0.02             | 0.00           | 0.07            | 1.33          | 5.46                           | 77.09      | 35.95       | 1.89                      | 9.43 |
| 80~100     | 0.29                          | 0.40                          | 0.35            | 0.06                          | 0.01             | 0.02             | 0.01           | 0.08            | 1.21          | 5.46                           | 77.09      | 37.82       | 1.67                      | 9.24 |
| 100~120    | 0.20                          | 0.54                          | 0.24            | 0.03                          | 0.01             | 0.02             | 0.01           | 0.10            | 1.15          | 5.46                           | 77.47      | 30.86       | 1.50                      | 9.18 |
| 120~140    | 0.44                          | 0.69                          | 0.26            | 0.06                          | 0.01             | 0.02             | 0.00           | 0.09            | 1.58          | 5.46                           | 77.85      | 39.47       | 1.48                      | 9.14 |
| 140~160    | 0.52                          | 0.96                          | 0.28            | 0.09                          | 0.02             | 0.03             | 0.01           | 0.14            | 2.04          | 5.46                           | 77.09      | 33.33       | 1.31                      | 9.15 |
| 160~180    | 0.42                          | 1.16                          | 0.37            | 0.13                          | 0.03             | 0.05             | 0.01           | 0.15            | 2.31          | 4.46                           | 70.09      | 35.21       | 1.32                      | 9.06 |
| 180~200    | 0.19                          | 0.59                          | 0.32            | 0.02                          | 0.02             | 0.04             | 0.00           | 0.06            | 1.25          | 2.67                           | 59.54      | 48.39       | 1.46                      | 9.01 |

注: Cl/A 指的是  $\text{Cl}^-$  占阴离子总量的比值 (%)。

除了土壤中过多的盐分对作物生长的盐危害外, 土壤中过多的可溶性钠也会对土壤和作物生长产生不利影响。SAR 是指土壤溶液中的  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的相对数量, 是描述盐渍土土壤碱化状况的重要参数, 常被用来预测  $\text{Na}^+$  危害的程度<sup>[2]</sup>。从表 1 中还可以看出, 龟裂碱土土壤剖面中表层 0~40 cm 土壤 SAR 值较大, 均在 15 (mmol/L)<sup>0.5</sup> 以上, 最大值在 10~20 cm 深度处, SAR 为 38.20 (mmol/L)<sup>0.5</sup>, 随深度增加, SAR 逐渐降低。在整个 0~200 cm 剖面, SSP 均处于较高水平, 特别是在上层土壤中, SSP 普遍在 90% 以上, 说明  $\text{Na}^+$  是该土壤中最主要的阳离子。 $\text{Cl}^-$  占阴离子总量的比值表现出和 SSP 一致的剖面变化趋势, 表层土壤中比值较高, 在 70% 左右, 然后随深度增加逐渐降低。

EC<sub>e</sub> 在剖面的变化趋势和 TSS 表现一致。在土壤剖面中 0~20 cm 深度土壤 EC<sub>e</sub> 在 10 dS/m 以上, 40 cm

深度以下逐渐降低为 <4 dS/m。作为典型的碱化土壤, 龟裂碱土整个剖面的饱和泥浆 pH 值一直较高, 除表层 0~5 cm 土壤的 pH 值为 8.5 之外, 其他层次土壤 pH 值均在 9 以上, 最高 pH 值位于 10~20 cm 深度处, 为 9.58, 随深度增加, pH 值有减小趋势, 但幅度不大。

以上分析表明, 在表层土壤中, SAR 值较大 (SAR >13 (mmol/L)<sup>0.5</sup>), pH 值在 8.5~10 之间, 且土壤 TSS 含量相对较低 (普遍低于 5 g/kg), 根据文献[2]和文献[3]对盐碱土的分类, 该试验区土壤属于碱土。

### 3.2 土壤盐分的统计特征与相关性分析

由于  $\text{CO}_3^{2-}$  的摩尔含量较低, 所以下文中, 用  $\text{HCO}_3^-$  含量代替总碱度 ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) 进行相关统计分析。首先对 300 个滴灌利用后的土壤样本进行描述统计 (表 2)。比较土壤离子之间的变异系数的大小, 可在一定程度上看出不同离子在土壤剖面内的分布特征和随水分迁移速率的差异<sup>[3]</sup>。在开发利用之初,

对原状土壤进行了深翻、混匀和起垄等作业,在一定程度上消除了土壤盐分的空间变异性,但由表 2 可以看出,随着土壤的滴灌开发利用,研究区内土壤盐分表现出较大的空间变异性。 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  在滴灌利用后变异系数较大,分别为 88.74% 和 109.40%,表现出相对较高的空间变异性,这是由于二者与土壤胶体的吸附力较弱,具有很强的随水分迁移的能力<sup>[19]</sup>。而  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  不易被灌溉水淋洗,受灌水影响较小,在土壤剖面分布相对均匀,空间变异性相对较小,这和前人研究结果类似<sup>[20]</sup>。 $\text{Na}^+$  的空间变异性大于  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ,结合 SAR 的计算公式,可以得出,相对

于  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  变异性主要影响 SAR 的变异,因此在此类土壤上控制土壤中的  $\text{Na}^+$  有利于控制土壤碱化程度。 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{K}^+$  含量表现出强变异性,可能是因为二者在一定土层中含量较少的缘故。 $\text{pH}$  值表现为弱变异性,说明龟裂碱土滴灌开发利用过程中,在区域尺度上  $\text{pH}$  值不会出现较大幅度变化。

通过分析土壤各盐离子含量之间的相关性,可以反映盐分在土壤中的存在形态及运移规律<sup>[21]</sup>。对 300 个土壤样本的主要离子含量及化学性质之间做相关性分析,相关系数列于表 3。从表中可以看出,龟裂碱土的主要化学性质之间存在着一定相关性。

表 2 土壤主要化学性质的描述统计

Table 2 Descriptive statistics of main chemical characteristics in soils

| 项目                 | 样本数 | 最小值   | 最大值    | 平均值   | 标准差   | 变异系数 (%) |
|--------------------|-----|-------|--------|-------|-------|----------|
| $\text{HCO}_3^-$   | 300 | 0.35  | 5.32   | 1.11  | 0.56  | 50.51    |
| $\text{Cl}^-$      | 300 | 0.23  | 7.15   | 1.04  | 1.14  | 109.40   |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 300 | 0.00  | 4.36   | 0.33  | 0.53  | 162.81   |
| $\text{Mg}^{2+}$   | 300 | 0.00  | 0.25   | 0.02  | 0.02  | 78.82    |
| $\text{Ca}^{2+}$   | 300 | 0.00  | 0.13   | 0.04  | 0.02  | 63.15    |
| $\text{K}^+$       | 300 | 0.00  | 0.08   | 0.01  | 0.01  | 136.42   |
| $\text{Na}^+$      | 300 | 0.07  | 3.24   | 0.46  | 0.40  | 88.74    |
| SAR                | 300 | 2.33  | 138.91 | 23.69 | 20.62 | 87.05    |
| TSS                | 300 | 1.10  | 18.18  | 2.99  | 2.38  | 79.39    |
| SSP                | 300 | 24.10 | 98.23  | 80.79 | 13.79 | 17.06    |
| $\text{EC}_e$      | 300 | 1.13  | 49.06  | 7.90  | 7.84  | 99.23    |
| $\text{pH}$        | 300 | 7.22  | 10.06  | 9.27  | 0.58  | 6.25     |

表 3 土壤主要化学性质相关性分析

Table 3 Pearson correlations of main chemical characteristics in soils

|                    | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ | SAR     | TSS     | SSP     | $\text{EC}_e$ |
|--------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|---------------|---------|---------|---------|---------------|
| $\text{Cl}^-$      | 0.688**          |               |                    |                  |                  |              |               |         |         |         |               |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 0.478**          | 0.788**       |                    |                  |                  |              |               |         |         |         |               |
| $\text{Mg}^{2+}$   | -0.036           | -0.031        | 0.065              |                  |                  |              |               |         |         |         |               |
| $\text{Ca}^{2+}$   | 0.178**          | 0.114*        | 0.136*             | 0.711**          |                  |              |               |         |         |         |               |
| $\text{K}^+$       | 0.078            | 0.132*        | 0.148*             | 0.405**          | 0.476**          |              |               |         |         |         |               |
| $\text{Na}^+$      | 0.595**          | 0.902**       | 0.846**            | -0.060           | 0.047            | 0.083        |               |         |         |         |               |
| SAR                | 0.525**          | 0.734**       | 0.633**            | -0.294**         | -0.235**         | -0.011       | 0.800**       |         |         |         |               |
| TSS                | 0.774**          | 0.972**       | 0.860**            | 0.000            | 0.153**          | 0.141*       | 0.932**       | 0.747** |         |         |               |
| SSP                | 0.190**          | 0.296**       | 0.245**            | -0.746**         | -0.701**         | -0.474**     | 0.436**       | 0.615** | 0.299** |         |               |
| $\text{EC}_e$      | 0.592**          | 0.952**       | 0.785**            | -0.042           | 0.048            | 0.097        | 0.931**       | 0.745** | 0.929** | 0.355** |               |
| $\text{PH}$        | 0.332**          | 0.247**       | 0.193**            | -0.595**         | -0.521**         | -0.578**     | 0.269**       | 0.370** | 0.272** | 0.704** | 0.240**       |

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

各离子之间的相关系数比较发现,  $\text{Na}^+$  作为此类土壤中最主要的阳离子,和  $\text{Cl}^-$  之间的相关性最大,

相关系数为 0.902 ( $P < 0.01$ ), 其次为  $\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的相关系数,二者分别为 0.846 和 0.595 ( $P <$

0.01), 说明  $\text{Na}^+$  主要与  $\text{Cl}^-$  携同运移, 其次为  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Na}^+$  的携同运移关系较小, 这与前人研究结果: 盐分上下运动中, 氯化物最为活跃, 其次是硫酸盐, 碳酸盐比较稳定的运移规律一致<sup>[22]</sup>。

土壤 SAR 值与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  4 种离子含量存在显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量存在显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 这与 SAR 的计算公式有关, 表明  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量的增加有利于降低土壤的 SAR, 改善土壤物理性质。因此可以利用二价阳离子 (例如  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ) 置换土壤交换相的  $\text{Na}^+$ , 进行碱土的改良<sup>[23]</sup>。TSS 和除  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  之外的离子均表现出显著的相关性 ( $P < 0.01$ ), 与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  的相关系数最大, 分别为 0.972 和 0.932 ( $P < 0.01$ ), 再次说明  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  是影响土壤中盐分状况的主要离子。 $\text{EC}_e$  和除  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  以外的离子含量和化学性质均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 其中和  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 和 SAR 的相关系数较大, 分别为 0.952、0.931、0.929 和 0.745 ( $P < 0.01$ )。各离子中, pH 值与  $\text{HCO}_3^-$  的正相关系数最大, 为 0.332 ( $P < 0.01$ ); 与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  极显著负相关, 相关系数分别为 -0.595 和 -0.521 ( $P < 0.01$ ); 此外, pH 值与 SSP 呈现出极显著正相关, 相关系数为 0.704 ( $P < 0.01$ ), 以上分析说明  $\text{HCO}_3^-$  含量的减少和  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量的增加, 均有利于减小土

壤 SAR 和 pH 值, 进而改善土壤酸碱环境, 改良碱土。但就该区域来说, 土壤中  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量较低, 外源施入成本又较高<sup>[24]</sup>, 因此改良碱土的方法并没有得到广泛利用。

### 3.3 $\text{EC}_e$ 与 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 及 SAR 的相互关系

由于  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  溶解度较大, 含量过高不仅提高了土壤溶液渗透压, 使土壤物理性状恶化, 且增强了对植物根系的毒害作用, 进而危害植物机能。因此,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  常被用来表示盐渍土的盐化程度、盐土分类和改良的主要参考指标<sup>[17]</sup>。且由以上龟裂碱土离子组成分析得知,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  分别为该土壤中最主要的阴阳离子, 特别是在表层 (0~40 cm 深度) 土壤中, SSP 可达 90% 以上,  $\text{Cl}^-$  也占阴离子总量的 70% 左右; SAR 是描述土壤碱化状况的重要参数, 可用来作为盐碱化土壤类型的划分指标<sup>[2]</sup>。而同时在该土壤下,  $\text{EC}_e$  与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 值有较好相关性。另外, 由于室内化学分析中, 土壤 TSS 含量及  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  等离子浓度的分析与  $\text{EC}_e$  的测定相比耗时、耗资大, 因而有必要确定  $\text{EC}_e$  与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 的关系, 用于快速评价该土壤在滴灌利用条件下的盐渍化状况。

$\text{EC}_e$  与土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 的关系及线性模拟见图 1。由此得出土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 相对于  $\text{EC}_e$  的回归方程:

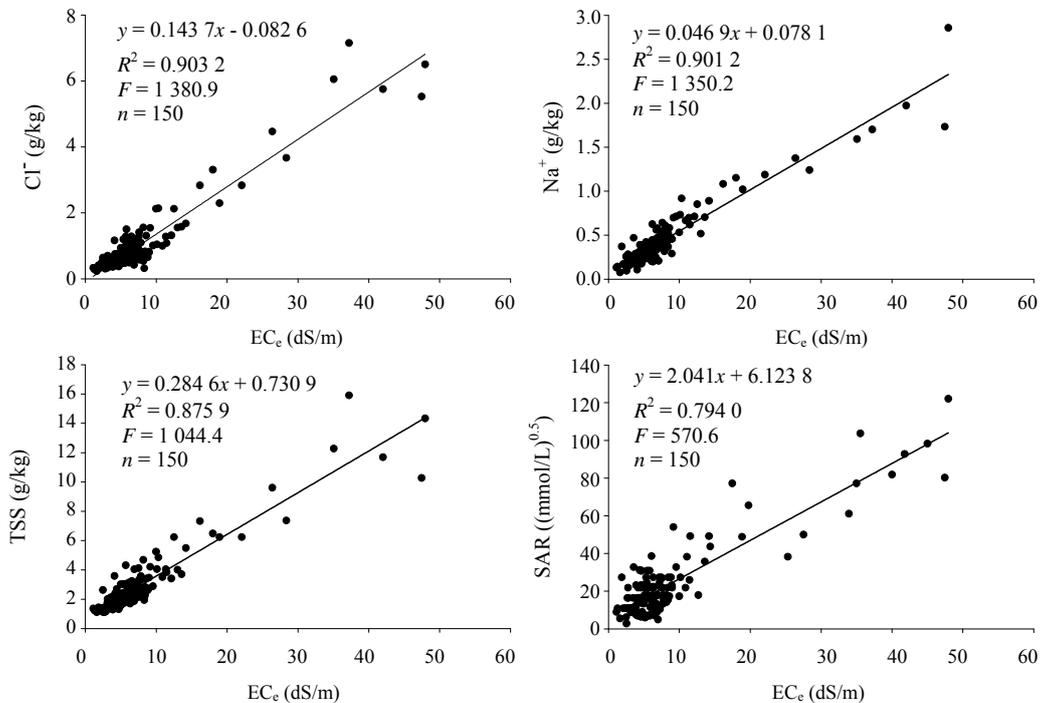


图 1  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 及 SAR 与  $\text{EC}_e$  的线性拟合

Fig. 1 Linear estimation regression of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , TSS, SAR and  $\text{EC}_e$ .

$$\text{Cl}^- = 0.1437 \times \text{EC}_e - 0.0826 \quad (R^2 = 0.9032, P < 0.0001) \quad (4)$$

$$\text{Na}^+ = 0.0469 \times \text{EC}_e + 0.0781 \quad (R^2 = 0.9012, P < 0.0001) \quad (5)$$

$$\text{TSS} = 0.2846 \times \text{EC}_e + 0.7309 \quad (R^2 = 0.8759, P < 0.0001) \quad (6)$$

$$\text{SAR} = 2.041 \times \text{EC}_e + 6.1238 \quad (R^2 = 0.7940, P < 0.0001) \quad (7)$$

其中,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  及 TSS 的单位均为  $\text{g/kg}$ , SAR 的单位为  $(\text{mmol/L})^{0.5}$ ,  $\text{EC}_e$  的单位为  $\text{dS/m}$ , 且以上公式的适用范围为  $1.13 \text{ dS/m} \leq \text{EC}_e \leq 49.06 \text{ dS/m}$ 。  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 及 SAR 的回归方程的显著性检验  $F$  值分别为 1380.9、1350.2、1044.4 和 570.6, 均达到极显著水平 ( $P < 0.0001$ )。

### 3.4 模型检验

分别由实测的 150 个检验样本的  $\text{EC}_e$  值, 利用回归方程 (4)、(5)、(6)、(7) 计算对应的土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 值, 然后与实测值进行回归比较, 见图 2。由图中可以看出, 土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量预测值与实测值的线性回归方程的斜率均在 0.95 以上, SAR 的斜率亦高达 0.822, 表明预测值与实测值比较吻合。  $\text{EC}_e$  对土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 含量及 SAR 的预测精度分别为 67.5%、74.1%、71.1% 和 67.6%, 四者的相对误差分别为 31.1%、21.3%、18.8% 和 46.5%。

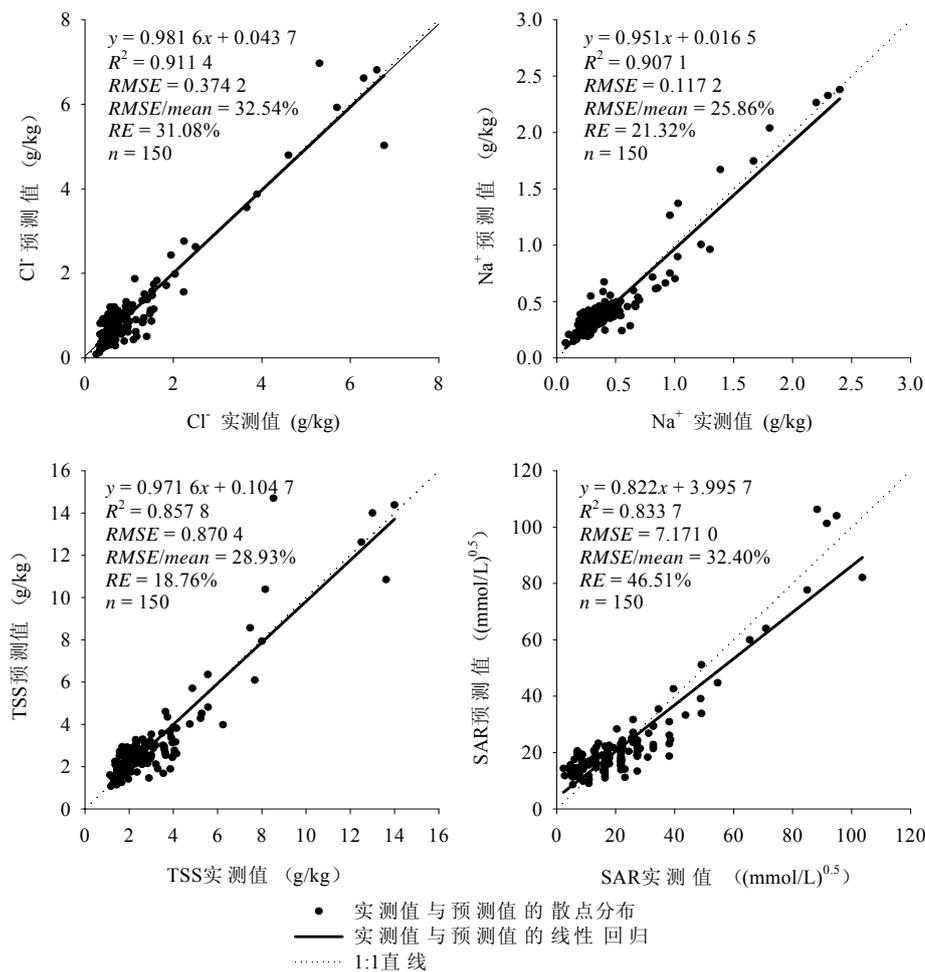


图 2  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TSS 及 SAR 实测值与预测值散点图

Fig. 2 Scatter plot comparison of actual and predicted values of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , TSS and SAR

另外, 由于各样本所含盐分及盐基离子的浓度不同, 我们对 150 个检验样本分别计算了预测值的相对误差 (图 3)。图 3 显示, 大部分样本预测值的相对误差较小, 表明模型对检验样本数据的预测精度达到了较高水平。  $\text{EC}_e$  对于 150 个样本  $\text{Na}^+$  和 TSS 含量的

预测中, 均有 121 个样本的相对误差在 30% 以下, 占到样本总数的 80% 以上。而对  $\text{Cl}^-$  含量和 SAR 的预测中, 也分别有 91 和 87 个样本的相对误差在 30% 以下, 占到样本总数的 60% 左右, 二者也分别有 4% 和 14% 的样本的相对误差超过了 90%。对相对误差大于 90%

的样本分析发现, 这些样本的  $EC_e$  值大多  $< 4 \text{ dS/m}$ , 属于非盐渍类型, 离子含量亦较小, 特别是用于计算 SAR 值的  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  含量极少, 化学分析中滴定试剂对极微量离子不够敏感, 分析人员主观判别造成的误差较大, 造成实测值和预测值之间相对误差较大。

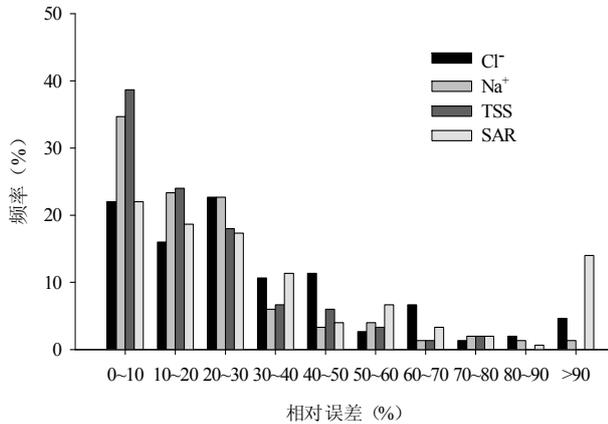


图3  $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、TSS及SAR预测值的相对误差

Fig. 3 Predicated relative errors of concentration of  $Cl^-$ ,  $Na^+$ , TSS and SAR

#### 4 结论

(1) 龟裂碱土剖面内盐分含量总体呈现“表聚”现象, 主要盐分离子含量随深度增加逐渐降低。 $Cl^-$ 和 $Na^+$ 是该土壤中最主要的阴阳离子, 且在上层土壤中表现得尤为突出,  $HCO_3^-$ 含量在100 cm以下的土层中逐渐增加。龟裂碱土表层0~40 cm土壤SAR值较大, 在 $15 \text{ (mmol/L)}^{0.5}$ 以上, pH值在8.5~10之间。

(2) 各离子之间的相关性系数比较发现,  $Na^+$ 作为此类土壤中最主要的阳离子, 和 $Cl^-$ 之间的相关性最大, 与 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 的相关性次之, 说明 $Na^+$ 主要与 $Cl^-$ 携同运移, 其次为 $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ 与 $Na^+$ 的携同运移关系较小。 $EC_e$ 和除 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 以外的离子含量和化学性质均呈极显著正相关, 其中和 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、TSS和SAR的相关系数较大。

(3) 本研究建立了适用于本研究区滴灌条件下由 $EC_e$ 预测土壤 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、TSS含量和SAR的数学回归模型, 得到的模型预测精度可靠, 可快速、经济地模拟和预测该区域土壤 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、TSS含量及SAR值, 为本区域滴灌精准改良利用条件下龟裂碱土的盐渍化状况评价提供参考。

#### 参考文献:

[1] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for sodic soils: A review. *Land Degrad. Develop.*, 2001,

12: 357-386

- [2] 李法虎. 土壤物理化学. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [3] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 黎立群, 单光宗, 尤文瑞, 曾宪修, 张粹雯, 张丽君, 宋文华. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993
- [4] 王全九, 王文焰, 汪志荣, 张建丰, 李毅. 盐碱地膜下滴灌技术参数确定. *农业工程学报*, 2001, 17(3): 47-50
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845
- [6] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 孙泽强, 刘伟, 董锋, 李克文. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 59-63
- [7] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 陈德明. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. *土壤学报*, 2008, 45(1): 56-65
- [8] 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实验研究. *土壤通报*, 2001, 32(6): 85-87
- [9] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究. *土壤学报*, 2005, 42(2): 247-252
- [10] 翁永玲, 宫鹏. 黄河三角洲盐渍土盐分特征研究. *南京大学学报*, 2006, 42(6): 602-610
- [11] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征. *生态学报*, 2007, 27(9): 3565-3571
- [12] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 李玉生, 赵春艳. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析. *自然科学进展*, 2007, 17(8): 1091-1097
- [13] 刘庆生, 刘高焕, 赵军. 土壤类型、质地和土地类型对土壤盐渍化水平的指示. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 297-300
- [14] 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其换算. *土壤通报*, 1996, 27(6): 285-287
- [15] 殷允相. 龟裂碱土的形成、性质及改良途径. *土壤通报*, 1985, 16(5): 206-208
- [16] 李宏广, 何文寿, 段晓红, 吕雯, 靳晓敏. 宁夏前进农场碱化土壤改良及水稻合理施肥技术研究. *西北农业学报*, 2009, 18(5): 217-222
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [18] 毛任钊, 田魁祥, 松本聪, 山崎素直. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系. *土壤*, 1997, 29(6): 326-330
- [19] 熊顺贵. 基础土壤学. 北京: 中国农业大学出版社, 2001
- [20] 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 孙泽强, 刘伟, 董锋. 干旱区盐碱地滴灌土壤基质势对土壤盐分分布的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 53-58
- [21] 艾合买提·那由甫, 李卫红, 徐海量. 塔里木河中游土壤分布规律及其特征研究. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(1): 149-153
- [22] 刘延峰, 靳孟贵, 金英春. 焉耆盆地土壤盐渍化状况的主成分分析. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(1): 165-171

- [23] 俞仁培, 杨道平, 石万普, 蔡阿兴. 土壤碱化及其防治. 北京: 农业出版社, 1984
- [24] 孙毅, 高玉山, 闫孝贡, 冯振生. 石膏改良苏打盐碱土研究. 土壤通报, 2001, 32(S1): 97-101

### Study on Salinity Characteristics of Takyric Solonetz in Ningxia Yinbei Region

ZHANG Ti-bin<sup>1,2</sup>, KANG Yue-hu<sup>1</sup>, HU Wei<sup>1</sup>, DOU Chao-yin<sup>3</sup>, LIU Shu-hui<sup>1</sup>, LI Zhan-qing<sup>4</sup>

(1 *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,*

*Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

*3 Water Conservancy and Hydropower Science Research Institute of Liaoning, Shenyang 110003, China;*

*4 Pingluo Office of Integrated Agricultural Development Project, Pingluo, Ningxia 753400, China)*

**Abstract:** On the basis of field investigation, soil sampling and chemical analysis, classical statistical analysis was applied in order to explore the salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei Region in our country for investigating the basic salinity conditions of takyric solonetz and establishing predictive models of main salinity characteristics from electrical conductivity under drip irrigation. Results showed that the main salt ions accumulated significantly towards the top layers in soil profile, salt contents decreased with the increase of soil depth.  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  were the dominant anions and cations respectively in soil, especially in the top layers, and  $\text{HCO}_3^-$  content increased gradually in the soils below 100 cm. SAR in the surface soil was above 15 ( $\text{mmol/L}$ )<sup>0.5</sup> and pH values between 8.5-10.  $\text{Na}^+$  content had the most significant correlation with  $\text{Cl}^-$ , with a correlation coefficient of 0.902 ( $P < 0.01$ ), and followed by  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$ . Significant correlations ( $P < 0.01$ ) between the electrical conductivity of saturation paste extracts ( $\text{EC}_e$ ) and  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , total soluble salt (TSS) content, SAR were found. Mathematic models were developed to calibrate  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , TSS content and SAR from  $\text{EC}_e$  by using linear regression respectively with 150 samples. Verified with other 150 samples, the prediction accuracy was reliable, so the models could be used to evaluate the contents of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and TSS, as well as SAR, economically and fast, and finally could be served as predictive methods for the salinity condition of takyric solonetz under precise amelioration with drip irrigation in this region.

**Key words:** Takyric solonetz, Salinity characteristics, Electrical conductivity