

# 绿洲盐化潮土有效锌含量与盐分离子的相关性及通径分析<sup>①</sup>

杨思存, 霍琳, 王成宝, 姜万礼

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 农业部甘肃耕地保育与农业环境科学观测实验站, 兰州 730070)

**摘要:**以张掖市甘州区和临泽县绿洲盐化潮土为研究对象,通过采集具有代表性、正常耕作种植、前茬为玉米的典型地块 0~20 cm 耕层土样分析化验,研究了区域土壤有效锌和盐分离子含量特征,运用通径分析方法研究了它们之间的相关性及其不同盐分离子对土壤有效锌含量的影响程度。结果表明,河西绿洲灌区盐化潮土有效锌含量介于 0.289~0.736 mg/kg 之间,平均为 0.473 mg/kg,变异系数为 18.68%,超过 70% 的土壤低于缺锌临界值(0.5 mg/kg),且土壤有效锌含量有随含盐量升高而降低的趋势。土壤有效锌含量与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  含量之间呈极显著负相关,与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  含量之间呈显著负相关,与  $\text{SO}_4^{2-}$  含量之间的相关性不显著。 $\text{Mg}^{2+}$  对土壤有效锌含量表现出强烈的直接和间接负效应, $\text{HCO}_3^-$  表现出很大的直接负效应和强烈的间接正效应, $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  均表现出较强的直接和间接负效应, $\text{SO}_4^{2-}$  表现出较弱的直接和间接正效应, $\text{Ca}^{2+}$  表现出较弱的直接和间接负效应。 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Na}^+$  是影响土壤有效锌含量变化的 3 个主导因素,对决定系数  $R^2$  的贡献超过了 68%。

**关键词:** 绿洲盐化潮土; 有效锌含量; 盐分离子; 相关分析; 通径分析

**中图分类号:** S156.4 **文献标识码:** A

锌是植物的必需营养元素,植物所需的锌主要来自土壤<sup>[1]</sup>。全世界有大范围的缺锌土壤,亚洲有 200 万  $\text{hm}^2$  缺锌稻田<sup>[2-5]</sup>,由此所引发的作物籽粒和人体缺锌问题日益引起全球的广泛关注<sup>[6-9]</sup>。我国有 40% 的缺锌土壤,主要分布在北方石灰性土壤中,河西走廊的绿洲盐化潮土也是典型缺锌区域之一<sup>[10-11]</sup>。芦满济等<sup>[12-13]</sup>对该地区非盐化土壤的调查结果表明,耕层土壤有效锌含量为 0.74 mg/kg,有 90.9% 的样本高于土壤缺锌临界值(0.5 mg/kg),在田间也很少发现有玉米缺锌植株。但在该地区盐化土壤上的研究结果表明,土壤有效锌平均含量只有 0.34 mg/kg,玉米缺锌症状非常普遍,而且不同类型、不同程度盐渍化土壤中有效锌含量和植株缺锌率的差异也较大。在中度氯化物-硫酸盐盐渍土上,土壤有效锌含量达到 0.57 mg/kg,高于土壤缺锌临界值,但仍然有 18.3% 的玉米植株表现出缺锌症状;而在重度镁质盐渍土上,土壤有效锌含量只有 0.22 mg/kg,玉米植株缺锌率达到了 37.4%,即便是施入 150  $\text{kg}/\text{hm}^2$  硫酸锌,仍不能完全解决苗期生长缓慢、全生育期花叶病普遍发生、后期果穗发育不良和产量低的问题<sup>[14]</sup>。同时还发现,在

施用了钙镁磷肥、磷酸镁铵、硫酸镁等含镁肥料的土壤上,玉米的“花白苗”现象越严重,干枯死亡率在 10%~20%,表现出典型缺锌症状。由此我们推测,河西绿洲灌区盐渍化环境(盐分浓度和盐分离子类型)及不合理的施肥措施可能是造成土壤有效锌含量降低和作物缺锌的重要因素。

目前关于盐分离子对土壤-作物系统锌营养影响的研究报道,主要考虑的是单盐或单一盐分离子的影响<sup>[15-20]</sup>,在研究方法上也大多局限于简单相关、多元回归分析等。然而,简单相关并不能全面考察变量间的相互关系,其结果往往带有一定的片面性;多元回归分析虽然在一定程度上能够消除变量之间的多重共线性,能够真实地表现出各个自变量和因变量的关系,但由于偏回归系数带有单位,使各自变量对因变量的效应不能直接进行比较,限制了人们对锌盐关系更深入和准确的认识。而通径分析是对多元回归分析的拓展,由美国数量遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年提出,它在多元回归的基础上将自变量与因变量的单相关系数加以分解,分解出自变量对因变量的直接影响力和间接影响力。因而,通径系数是介于相关系

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261072)、农业部公益性行业科研专项(200903001) 和甘肃省农业科学院科技创新专项(2015GAAS03)资助。

作者简介: 杨思存(1971—),男,甘肃靖远人,副研究员,主要从事土壤养分管理与盐碱地改良利用研究。E-mail: yangsicun@sina.com

数与回归系数之间的统计量,其经过标准化后去掉了单位,彼此间可以相互比较,从而可以反映各自变量对因变量的影响程度和相对重要性<sup>[21-24]</sup>。因此,将相关分析、回归分析与通径分析相结合,可以提供更多、更精确的因果信息,对多变量资料的统计分析更为合理<sup>[25]</sup>。本文以河西绿洲灌区盐化潮土为研究对象,在典型地区采样,在对土壤有效锌含量与盐分离子含量相关分析的基础上,进一步运用通径分析方法,探讨了各盐分离子对土壤有效锌含量的影响程度和作用机理,旨在找出影响土壤锌有效性含量的主要因素,为绿洲盐化潮土的改良利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市甘州区和临泽县(38°54′~39°18′N, 99°57′~100°42′E),河西走廊的中部,黑河流经其中,是典型的绿洲农业和大型灌溉农业区。该区处在温带气候区和暖温带偏干旱荒漠气候交汇地带,甘州区海拔1370~2200 m,年均降水量129.0 mm、蒸发量2047.9 mm,年均气温7.3℃,日照时数3085.1 h,无霜期153 d;临泽县海拔1380~2278 m,年均降水量113.4 mm,蒸发量2341.0 mm,年均气温7.6℃,日照时数2965 h,无霜期178 d。甘州区总灌溉面积约5.09×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,其中耕地盐渍化面积1.41×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,占27.74%;临泽县总灌溉面积约1.97×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,其中耕地盐渍化面积1.49×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,占75.47%。研究区大部分耕地土壤是由盐化草甸土经耕作熟化演变而来,在土壤潮化、耕作熟化及土壤盐渍化3种过程共同作用下形成的盐化潮土<sup>[26]</sup>。研究区的作物类型以小麦、玉米、葵花、马铃薯等为主,在河西绿洲灌区有典型代表性。

### 1.2 土样采集

土壤样品采集于2012年秋季作物收获后,冬灌开始前进行(10月28日—11月1日),此时的土壤盐分变化受灌水、冻融影响较小,相对比较稳定,基本上能反映河西绿洲灌区耕地土壤盐渍化状况。样点的布局涵盖了盐化潮土的主要类型(黑潮土、灰潮土、青潮土)和程度(轻度、中度、重度)的差异。在各采样区选择具有代表性、无污染、正常耕作种植、前茬为玉米的典型地块作为采样点,每个样点采用S形采样法采集5个耕层(0~20 cm)样品,以充分混合后的土壤代表该样点土样。共采集的样点有41个,带回实验室后自然风干、磨碎,过2 mm筛后备用。

### 1.3 测定项目与方法

土壤盐分离子包含Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、

Cl<sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>用EDTA滴定法测定;K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>用火焰光度法测定;Cl<sup>-</sup>用AgNO<sub>3</sub>滴定法测定;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>用EDTA间接滴定法测定;CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用双指示剂盐酸滴定法测定;DTPA-Zn以水土比为2:1浸提(pH 7.3),用原子吸收分光光度计(AA320 CRT)测定<sup>[27]</sup>。

### 1.4 数据处理及分析

数据处理和统计分析在Microsoft Office Excel 2003和SPSS 18.0软件中完成。先分别计算出土壤盐分离子和有效锌含量的平均数( $\bar{X}$ )、标准差( $S$ )、变异系数( $CV$ )及相关系数,再采用逐步回归分析方法建立土壤盐分离子对有效锌含量的多元回归方程,对显著性影响因子进行识别,然后根据回归分析结果对识别出的显著性影响因子进行通径分析,计算变量标准化后的偏回归系数(即通径系数),再将通径系数分解为直接作用和间接作用,比较各盐分离子对土壤有效锌含量的影响程度和相对重要性,最后确定影响土壤有效锌含量的主要因素。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有效锌含量特征

西绿洲灌区盐化潮土的有效锌含量总体比较低,介于0.289~0.736 mg/kg,平均为0.473 mg/kg,大部分样点在土壤缺锌临界值附近(0.5 mg/kg),占到了样本总量的83%(图1)。按照王遵亲等<sup>[28]</sup>的分级标准对41个土样的盐渍化程度进行分类(表1),可以看出土壤含盐量及其离子组成对土壤有效锌含量的影响较大,轻度盐渍化土壤介于0.477~0.736 mg/kg,平均为0.546 mg/kg;中度盐渍化土壤介于0.364~0.553 mg/kg,平均为0.463 mg/kg;重度盐渍化土壤介于0.289~0.454 mg/kg,平均为0.379 mg/kg,说明随着土壤盐渍化程度的逐步加重,土壤有效锌含量在逐渐降低。

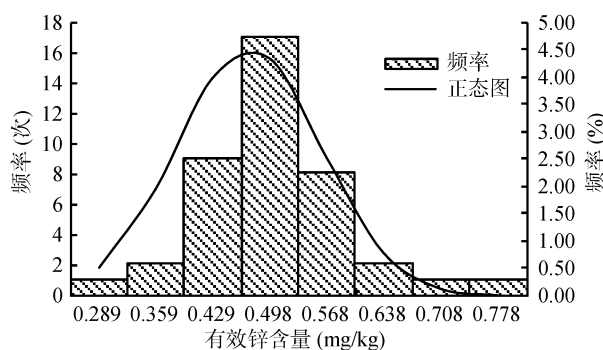


图1 土壤有效锌含量分布

Fig. 1 Content and distribution of available zinc throughout Hexi oasis irrigation district

表 1 耕层土壤盐分离子及有效锌含量特征

Table 1 Contents of salt ions and available zinc in topsoil

| 盐渍化程度 | 样本数(个) | 盐分离子含量 (g/kg)                 |                 |                               |                  |                  |                |                 | 全盐量(g/kg) | 有效锌(mg/kg) |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------|------------|
|       |        | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> |           |            |
| 轻度    | 16     | 0.339                         | 0.437           | 1.976                         | 1.314            | 0.226            | 0.167          | 0.209           | 4.668     | 0.546      |
| 中度    | 14     | 0.413                         | 0.767           | 2.996                         | 2.186            | 0.360            | 0.242          | 0.397           | 7.361     | 0.463      |
| 重度    | 11     | 0.521                         | 1.445           | 4.103                         | 2.787            | 0.617            | 0.280          | 1.013           | 10.766    | 0.379      |

2.2 土壤盐分离子分布特征

2.2.1 阳离子分布特征 从耕层土壤阳离子含量和组成比例来看(图 2A), 以 Ca<sup>2+</sup>含量最高, 在 0.152 ~ 4.588 g/kg 之间, 平均为 2.007 g/kg, 占阳离子总量的 64.8%; 其次是 Na<sup>+</sup>, 含量在 0.128 ~ 2.112 g/kg 之间, 平均为 0.489 g/kg, 占 15.8%; 再次是 Mg<sup>2+</sup>, 含量在 0.122 ~ 0.955 g/kg 之间, 平均为 0.376 g/kg, 占 12.2%; K<sup>+</sup> 含量最低, 在 0.122 ~ 0.375 g/kg 之间, 平均只有 0.223 g/kg, 只占 7.2%。

变异系数是反映变量离散程度的重要指标, 在一定程度上揭示了变量的空间分布特性。从耕层土壤阳离子含量的变异系数来看(图 2B), Na<sup>+</sup> 的变异系数最高, 达到了 108.6%, 表明土壤中 Na<sup>+</sup> 的变异性很强,

说明河西绿洲灌区盐化潮土的 Na<sup>+</sup> 含量分布不均匀, 空间异质性较强。其次是 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>, 变异系数分别为 76.8% 和 55.0%。K<sup>+</sup> 的变异系数最小, 只有 30.5%, 说明 K<sup>+</sup> 受环境因素的影响较小, 在土壤中的分布比较均匀。

2.2.2 阴离子分布特征 从耕层土壤阴离子含量和组成比例来看(图 3A), 河西绿洲灌区盐化潮土中没有 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量最低, 在 0.195 ~ 0.711 g/kg 之间, 平均为 0.413 g/kg, 约占阴离子总量的 10% 左右; Cl<sup>-</sup> 含量较高, 在 0.884 ~ 4.320 g/kg 之间, 平均为 0.820 g/kg, 约占阴离子总量的 20%; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量最高, 在 0.263 ~ 9.696 g/kg 之间, 平均为 2.894 g/kg, 占到了阴离子总量的 70%。

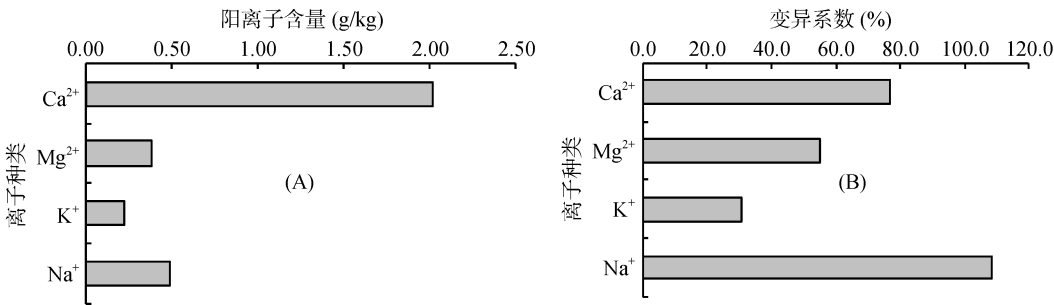


图 2 耕层土壤主要阳离子含量特征

Fig. 2 Contents and variation of major cations in topsoil

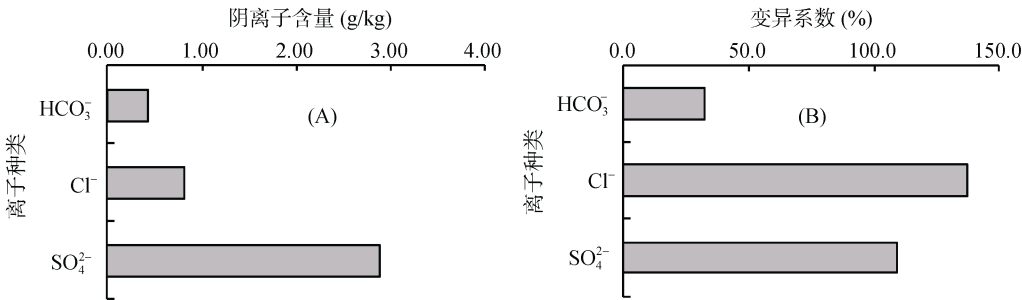


图 3 耕层土壤主要阴离子含量特征

Fig.3 Contents and variation of major anions in topsoil

从图 3B 可以看出, Cl<sup>-</sup> 的变异系数最高, 达到了 137.4%, 表明土壤中 Cl<sup>-</sup> 的变异性很强, 这主要是因为 Cl<sup>-</sup> 容易随水移动, 受土体构型和灌溉水平影响较大。其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 变异系数为 109.2%, 变异程

度也较大。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的变异系数最小, 只有 32.6%, 说明 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在土壤中的分布比较均匀。

2.3 土壤有效锌含量与盐分离子的通径分析

2.3.1 土壤有效锌含量与盐分离子之间的相关性 相

关分析结果表明(表 2), 土壤有效锌含量与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  含量呈极显著负相关, 与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  含量呈显著负相关, 与  $\text{SO}_4^{2-}$  含量呈正相关, 但达不到显著水平, 相关系数大小顺序为:  $\text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$ 。从盐分离子之间的相关性来看,  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  之间存在着极显著的负相关, 与  $\text{Cl}^-$  之间存在着显著的负相关;  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  之间,  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  之间,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  之间,  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  之间,  $\text{K}^+$  与  $\text{Na}^+$  之间都存在着极显著的正相关。这些相关性的信息与人们的普遍认识基本一致, 体现了盐渍化环境中盐分离子的分化关系, 以及不同盐分离子对土壤有效锌含量的直接和间接影响。

2.3.2 土壤有效锌含量与盐分离子之间的逐步多元

回归分析 以盐分离子  $\text{HCO}_3^- (x_1)$ ,  $\text{Cl}^- (x_2)$ ,  $\text{SO}_4^{2-} (x_3)$ ,  $\text{Ca}^{2+} (x_4)$ ,  $\text{Mg}^{2+} (x_5)$ ,  $\text{K}^+ (x_6)$ ,  $\text{Na}^+ (x_7)$  为自变量, 以土壤有效锌含量(A-Zn,  $y$ ) 为因变量, 进行多元逐步回归分析。偏回归系数显著性检验结果:  $r = 0.922\ 3$ ,  $F = 47.389$ ,  $P < 0.01$ , 表明土壤有效锌与盐分离子间的复相关关系和多元回归关系真实存在, 可以进行途径分析, 进而得到如下标准多元回归方程:

$$y = 0.720\ 6 - 0.309\ 4x_1 - 0.278\ 5x_2 + 0.086\ 6x_3 - 0.117\ 5x_4 - 0.432\ 7x_5 - 0.234\ 9x_6 - 0.215\ 6x_7$$

由方程可以看出, 所选的 7 种盐分离子共同解释了绿洲盐化潮土有效锌含量变异的 92.23%, 其中  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  含量的影响极显著( $P < 0.01$ ),  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  含量的影响显著( $P < 0.05$ ), 这与简单相关分析的结果是一致的。

表 2 土壤有效锌含量与各盐分离子间的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between contents of available zinc and salt ions

|                    | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ | A-Zn |
|--------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|---------------|------|
| $\text{HCO}_3^-$   | 1                |               |                    |                  |                  |              |               |      |
| $\text{Cl}^-$      | -0.354 7*        | 1             |                    |                  |                  |              |               |      |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | -0.699 2**       | 0.247 5       | 1                  |                  |                  |              |               |      |
| $\text{Ca}^{2+}$   | -0.739 6**       | 0.185 3       | 0.942 3**          | 1                |                  |              |               |      |
| $\text{Mg}^{2+}$   | -0.786 0**       | 0.654 0**     | 0.754 7**          | 0.683 6**        | 1                |              |               |      |
| $\text{K}^+$       | -0.538 5**       | 0.751 3**     | 0.282 5            | 0.187 5          | 0.613 5**        | 1            |               |      |
| $\text{Na}^+$      | -0.286 5         | 0.862 2**     | 0.493 6**          | 0.172 4          | 0.562 7**        | 0.697 3**    | 1             |      |
| A-Zn               | -0.701 6**       | -0.340 6*     | 0.266 9            | -0.315 7*        | -0.747 4**       | -0.368 3*    | -0.650 4**    | 1    |

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。

2.3.3 土壤有效锌含量与盐分离子之间的途径分析 由于盐分离子之间存在着较强的相关性(表 3), 在进行回归分析时可能出现共线性现象, 并且由于各盐分离子含量的变动范围不同, 因此采用逐步回归分析还不能直观地体现各盐分离子对有效锌含量的贡献大小, 而通过标准化回归系数的方法计算途径系数, 并将相关系

数分解为直接途径系数与间接途径系数的代数和, 就能较直观地反映各盐分离子对土壤有效锌含量的影响作用, 其结果见表 3。由表 3 可以看出,  $\text{Mg}^{2+}$  含量对土壤有效锌含量的直接效应最大, 表现为负效应, 直接途径系数为 -0.432 7;  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  等其他盐分离子对有效锌含量也产生了强烈的负效应的间

表 3 土壤盐分离子对有效锌含量影响的途径系数  
Table 3 Path coefficients of the effects caused by soil salt ions on available zinc content

| 盐分离子               | 直接途径系数   | 间接途径系数           |               |                    |                  |                  |              |               | 合计       | 剩余途径系数  |
|--------------------|----------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|---------------|----------|---------|
|                    |          | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ |          |         |
| $\text{HCO}_3^-$   | -0.309 4 | -                | 0.109 7       | 0.216 3            | 0.228 8          | 0.243 2          | 0.166 6      | 0.088 6       | 1.053 4  | 0.077 7 |
| $\text{Cl}^-$      | -0.278 5 | 0.098 8          | -             | -0.068 9           | -0.051 6         | -0.182 1         | -0.209 2     | -0.240 1      | -0.653 2 |         |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 0.086 6  | -0.060 6         | 0.021 4       | -                  | 0.081 6          | 0.065 4          | 0.024 5      | 0.042 7       | 0.175 1  |         |
| $\text{Ca}^{2+}$   | -0.117 5 | 0.086 9          | -0.021 8      | -0.110 7           | -                | -0.080 3         | -0.022 0     | -0.020 3      | -0.168 2 |         |
| $\text{Mg}^{2+}$   | -0.432 7 | 0.340 1          | -0.283 0      | -0.326 6           | -0.295 8         | -                | -0.265 5     | -0.243 5      | -1.074 2 |         |
| $\text{K}^+$       | -0.234 9 | 0.126 5          | -0.176 5      | -0.066 4           | -0.044 0         | -0.144 1         | -            | -0.163 8      | -0.468 3 |         |
| $\text{Na}^+$      | -0.215 6 | 0.061 8          | -0.185 9      | -0.106 4           | -0.037 2         | -0.121 3         | -0.150 3     | -             | -0.539 4 |         |

注: 间接作用表示盐分离子两两之间对土壤有效锌含量的作用, 最左边一列的盐分离子在间接作用中起主要作用。

接作用(-1.074 2),使得  $Mg^{2+}$  含量与有效锌含量表观上显示出一种显著的负相关关系;但通过  $HCO_3^-$  对有效锌含量产生的是正效应(0.340 1),这种正效应部分抵消了  $Mg^{2+}$  对土壤有效锌的强烈负效应。 $HCO_3^-$ 表现出很大的直接负效应(-0.309 4),但其通过  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等盐分离子所表现出的是强烈的间接正效应(1.053 4),而且这种正效应远远超出了直接负效应。因此,若由相关系数 -0.747 4、0.701 6(表 2)就简单地认为  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  含量与土壤有效锌含量仅具有显著的直接负影响是不恰当的,必须综合考虑其直接影响和间接影响。此外, $Cl^-$ 、 $K^+$ 和  $Na^+$ 含量对土壤有效锌含量均表现出较强的直接和间接负效应, $SO_4^{2-}$ 表现出较弱的直接和间接正效应, $Ca^{2+}$ 表现出较弱的直接和间接负效应。

2.3.4 盐分离子对土壤有效锌含量的决定程度分

析 从决定系数计算结果可以看出(表 4),按绝对值大小,在盐化潮土上对土壤有效锌含量的影响顺序为: $D_{yx5}(0.187\ 2) > D_{yx5x6}(0.140\ 9) > D_{yx5x7}(0.118\ 6) > D_{yx1x5}(0.118\ 3) > D_{yx2x7}(0.115\ 3) > D_{yx1x4}(0.104\ 7) > D_{yx1}(0.095\ 7) > D_{yx1x3}(0.093\ 6) > D_{yx2x6}(0.087\ 6) >$ 其他。表明  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 和  $Cl^-$ 是影响盐化潮土中有效锌含量变化的主导因素,由它们间的相互作用共同控制着有效锌转化的方向与程度。其他因子的决定程度相对较小,不再作进一步分析和讨论。

2.3.5 盐分离子对回归方程估测可靠程度的贡献分析 从盐分离子对有效锌含量的决定系数  $R^2$  的贡献来看(表 5), $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 和  $Na^+$ 通过直接作用和间接作用成为影响土壤有效锌含量变化的 3 个主导因素,对决定系数  $R^2$  的贡献超过了 68%;其次是  $Cl^-$ 和  $K^+$ , $Ca^{2+}$ 和  $SO_4^{2-}$ 对土壤有效锌含量的影响相对较弱。

表 4 各盐分离子通径分析的决定系数  
Table 4 Determinative coefficients between path analyses of salt ions

|             | $HCO_3^-$ | $Cl^-$  | $SO_4^{2-}$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^+$   | $Na^+$  |
|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|-----------|---------|---------|
| $HCO_3^-$   | 0.095 7   | 0.024 1 | 0.093 6     | 0.104 7   | 0.118 3   | 0.055 5 | 0.015 7 |
| $Cl^-$      |           | 0.077 6 | 0.009 5     | 0.005 3   | 0.066 3   | 0.087 6 | 0.115 3 |
| $SO_4^{2-}$ |           |         | 0.007 5     | 0.013 3   | 0.008 5   | 0.001 2 | 0.003 7 |
| $Ca^{2+}$   |           |         |             | 0.013 8   | 0.012 9   | 0.001 0 | 0.000 8 |
| $Mg^{2+}$   |           |         |             |           | 0.187 2   | 0.140 9 | 0.118 6 |
| $K^+$       |           |         |             |           |           | 0.055 2 | 0.053 7 |
| $Na^+$      |           |         |             |           |           |         | 0.046 5 |

注:表中对角线数值为单个盐分离子对有效锌含量的决定系数,对角线以上数值为两种盐分离子共同对有效锌含量的决定系数。

表 5 土壤盐分离子对有效锌含量的决定系数  $R^2$  的贡献  
Table 5 Contribution of salt ions to determinative coefficient  $R^2$  of soil available zinc content

| 盐分离子        | $HCO_3^-$ | $Cl^-$  | $SO_4^{2-}$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^+$   | $Na^+$  | 总和      |
|-------------|-----------|---------|-------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| 对 $R^2$ 的贡献 | 0.217 1   | 0.094 9 | 0.023 1     | 0.037 1   | 0.323 4   | 0.086 5 | 0.140 2 | 0.922 3 |

3 讨论

关于石灰性土壤锌的有效性,国内外学者开展了大量研究,普遍认为土壤 pH、有机质、黏粒含量、碳酸钙、养分元素、共存的金属离子等都会对土壤-作物系统锌营养产生影响<sup>[29-34]</sup>,但在盐渍化环境对土壤有效锌含量的影响方面,开展的相关研究并不多。Hajiboland 等<sup>[6]</sup>认为较高的 pH 和大量  $CaCO_3$  对锌的吸附固定是造成盐渍化土壤锌活性较低的主要原因;LU 等<sup>[11]</sup>却认为土壤中添加大量  $CaCO_3$  并不一定会产生大量的  $HCO_3^-$ ,进而未能对土壤中的有效锌含量产生明显影响;孙桂芳等<sup>[35]</sup>更是认为,在含钠较高的碱性土壤上,随着 pH 的升高,更容易形成溶解性较好的锌酸钠,从而增加土壤锌的有效性。本研

究表明,河西绿洲灌区盐化潮土的有效锌含量介于 0.289~0.736 mg/kg 之间,平均为 0.473 mg/kg,低于土壤缺锌临界值(0.5 mg/kg),随着含盐量的升高,土壤有效锌有降低的趋势,这是因为河西绿洲灌区的盐化潮土是典型的石灰性土壤,土壤 pH 大多在 8.5 以上,有时甚至高达 10.0,土壤有效锌含量较低也是必然。土壤有效锌含量与盐分离子间的相关性分析表明,与  $HCO_3^-$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  含量呈极显著负相关,与  $Cl^-$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$  含量呈显著负相关,这与芦满济等<sup>[14]</sup>、缙倩倩等<sup>[36]</sup>的研究结果也是一致的,但土壤有效锌含量与  $SO_4^{2-}$  含量之间呈不显著的正相关,这一研究结果与人们对盐碱地的普遍认识不同,还有待更进一步深入研究。

本论文通径分析结果表明,盐分离子通过直接和

间接作用共同影响着土壤有效锌含量,但不同盐分离子中的作用机理和影响强度不同。 $Mg^{2+}$ 在土壤中的含量虽然不高,但在盐化潮土中所起的作用却不小,不仅直接影响着土壤有效锌含量,而且通过 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Na^+$ 等其他盐分离子对土壤有效锌产生间接的负效应,这也进一步印证了 $Mg^{2+}$ 和 $Zn^{2+}$ 之间拮抗作用的存在<sup>[37-39]</sup>。 $HCO_3^-$ 在土壤中的含量也不高,对土壤有效锌含量产生了较大的直接负效应,这可以理解为—部分 $Zn^{2+}$ 通过化学沉淀或吸附的方式降低了土壤锌的有效性<sup>[6, 11, 18, 40-41]</sup>,但其通过 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等盐分离子所表现出的是强烈的间接正效应,而且这种正效应远远超出了直接负效应,说明 $HCO_3^-$ 在降低土壤有效锌的同时, $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等盐分离子却对 $HCO_3^-$ 产生了拮抗作用。 $SO_4^{2-}$ 和 $Ca^{2+}$ 是土壤中含量最多的盐分离子,但在对土壤有效锌含量的影响方面却不是最主要的, $SO_4^{2-}$ 表现出较弱的直接和间接正效应,这有可能是 $ZnSO_4$ 是土壤锌存在的较稳定的有效状态,但这种状态的锌含量太少; $Ca^{2+}$ 表现出较弱的直接和间接负效应,这有可能是因为 $Zn^{2+}$ 与 $Ca^{2+}$ 的离子半径比较接近,可以与土壤晶格中的 $Ca^{2+}$ 发生同晶置换作用,从而降低土壤有效Zn含量,但相比较而言,土壤晶格中 $Mg^{2+}$ 和 $OH^-$ 间的结合力更弱,因此 $Mg^{2+}$ 对有效锌含量的影响比 $Ca^{2+}$ 更显著<sup>[42]</sup>。虽然目前关于盐分离子影响有效锌含量的研究并不多,其影响机理还需要今后进一步深入研究,但总体而言,途径分析比简单相关和多元回归分析更能客观地反映各盐分离子与土壤有效锌含量之间的关系,能够为绿洲盐化潮土缺锌问题的解决提供决策依据。在改良利用措施方面,一方面要通过灌溉洗盐等措施来减少土壤盐分离子含量,特别是 $HCO_3^-$ 的含量;另一方面,要尽量避免施用钙镁磷肥、磷酸镁铵、硫酸镁等含镁的肥料,以减少土壤中锌的吸附固定。

## 4 结论

1) 河西绿洲灌区盐化潮土的有效锌含量介于0.289~0.736 mg/kg之间,平均为0.473 mg/kg,低于土壤缺锌临界值(0.5 mg/kg),随着含盐量的升高,土壤有效锌含量有降低的趋势。

2) 土壤有效锌含量与盐分离子间的简单相关性分析表明,与 $HCO_3^-$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 含量呈极显著负相关,与 $Cl^-$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 含量呈显著负相关,与 $SO_4^{2-}$ 含量之间的相关性不显著。

3) 途径分析结果表明, $Mg^{2+}$ 对土壤有效锌含量表现出强烈的直接和间接负效应, $HCO_3^-$ 表现出很大的

直接负效应和强烈的间接正效应, $Cl^-$ 、 $K^+$ 和 $Na^+$ 对土壤有效锌含量均表现出较强的直接和间接负效应, $SO_4^{2-}$ 表现出较弱的直接和间接正效应, $Ca^{2+}$ 表现出较弱的直接和间接负效应。

4)  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 和 $Na^+$ 通过直接作用和间接作用成为影响土壤有效锌含量变化的3个主导因素,对决定系数 $R^2$ 的贡献超过了68%。

## 参考文献:

- [1] Sommer A L, Lipman C B. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plant[J]. *Plant Physiology*, 1926, 1: 231-249
- [2] Takkar P N, Walker C D. The Distribution and Correction of Zinc Deficiency[M]. Netherlands: Springer, 1993: 151-165
- [3] Alloway B J. Zinc in Soils and Crop Nutrition[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2008
- [4] Shivay Y S, Kumar D, Prasad R, et al. Relative yield and zinc uptake by rice from zinc sulphate and zinc oxide coatings onto urea[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 80(2): 181-188
- [5] Muhanned A, Farah A N, Tayel E H, et al. Zinc adsorption-desorption isotherms: Possible effects on the calcareous vertisol soils from Jordan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(7): 2079-2085
- [6] Hajiboland R, Yang X E, Romheld V. Effects of bicarbonate and high pH on growth of Zn-efficient and Zn-inefficient genotypes of rice, wheat and rye[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250: 349-357
- [7] Zou C Q, Zhang Y Q, Rashid A, et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries[J]. *Plant Soil*, 2012, 361: 119-130
- [8] Ma G S, Jin Y, Li Y P, et al. Iron and zinc deficiencies in China: What is a feasible and cost-effective strategy?[J]. *Public Health Nutrition*, 2008, 11(6): 632-638
- [9] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1): 1-17
- [10] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30-37
- [11] Lu X C, Cui J, Tian X H, et al. Effects of zinc fertilization on zinc dynamics in potentially zinc-deficient calcareous soil[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104: 963-969
- [12] 芦满济, 祁国元, 杨思存, 等. 绿洲盐化潮土的锌肥效应及适宜用量[J]. *西北农业学报*, 1999, 8(1): 69-73
- [13] 芦满济, 吴惠兰, 胡梅. 河西绿洲潮土有效锌含量特征及施锌条件[J]. *甘肃农业科技*, 1999(2): 39-40
- [14] 芦满济, 祁国元, 杨思存. 土壤盐分对土壤植物锌营养和施锌效果的影响 // 李生秀. 土壤—植物营养研究文集[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 746-752
- [15] Yang X E, Romheld V, Marschner H. Effect of bicarbonate on root growth and accumulation of organic acids in Zn-inefficient and Zn-efficient rice cultivars(*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant and Soil*, 1994, 164: 1-7

- [16] Kipcak A S, Senberber F T, Derun E M, et al. Characterization and thermal dehydration kinetics of zinc borates synthesized from zinc sulfate and zinc chloride[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2015, 41: 9129–9143
- [17] Imran M, Rehim A, Sarwar N, et al. Zinc bioavailability in maize grains in response of phosphorous–zinc interaction[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(1): 60–66
- [18] 钱金红, 谢振翅. 碳酸盐对土壤锌解吸影响的研究[J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 105–108
- [19] 田霄鸿, 买文选, 陆欣春, 等. 重碳酸根对不同小麦基因型生长及锌营养的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 9–16
- [20] Shahab Q, Afzal M, Sarfaraz Q. Response of maize to different rates and methods of zinc application[J]. *Environment and Plant Systems*, 2015, 1: 43–47
- [21] Sarawgi A K, Rastogi N K, Soni D K. Correlation and path analysis in rice accessions from Madhya Pradesh[J]. *Field Crops Research*, 1997, 52: 161–167
- [22] Zhao H, Zhang Z B, Shao H B, et al. Genetic correlation and path analysis of transpiration efficiency for wheat flag leaves[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64: 128–134
- [23] Lenzen M. Structural path analysis of ecosystem networks[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 200: 334–342
- [24] 徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 基于通径分析的土壤性质与硒形态的关系——以黑龙江省主要类型土壤为例[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 992–999
- [25] 盖钧镒. 试验统计方法 [M]. 4 版. 北京: 中国农业出版社, 2013
- [26] 甘肃省土壤普查办公室编著. 甘肃土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [28] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [29] Gupta R K, Elshout S V D, Abbol I P. Effect of pH on zinc adsorption-precipitation reactions in an alkali soil[J]. *Soil Science*, 1987, 143(3): 198–204
- [30] Obrador A, Alvarez J M, Lopez V L M, et al. Relationships of soil properties with Mn and Zn distribution in acidic soils and their uptake by a barley crop[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3): 432–443
- [31] Zahedifar M, Karimian N, Yasrebi J. Influence of applied zinc and organic matter on zinc desorption kinetics in calcareous soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(2): 169–178
- [32] Kamali S, Ronaghi A, Karimian N. Soil zinc transformations as affected by applied zinc and organic materials[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(9): 1038–1049
- [33] Sun Q, Chen J, Ding S M, et al. Comparison of diffusive gradients in thin film technique with traditional methods for evaluation of zinc bioavailability in soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(10): 6553–6564
- [34] Hussain S, Maqsood M A, Aziz T, et al. Zinc bioavailability response curvature in wheat grains under incremental zinc applications[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 59(7): 1–16
- [35] 孙桂芳, 杨光穗. 土壤-植物系统中锌的研究进展[J]. *华南热带农业大学学报*, 2002, 8(2): 22–30
- [36] 缙倩倩, 韩致文, 屈建军, 等. 秦王川灌区农田土壤盐分离子特征分析[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 100–106
- [37] 杨思存, 霍琳, 王成宝, 等. 绿洲盐化潮土施镁对玉米幼苗生长、活性氧自由基代谢和锌营养的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 354–361
- [38] Shula L M, Rathana P K. Zinc magnesium interactions in soil and plants as measured by crop response[J]. *Journal of Tropical Agriculture*, 1983(1): 309–316
- [39] Jansen S, Blust R, van Leeuwen H P. Metal speciation dynamics and bioavailability: Zn (II) and Cd ( ) uptake by mussel (*Mytilus edulis*) and carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36: 2164–2170
- [40] Behera S K, Singh M V, Singh K N, et al. Distribution variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties[J]. *Geoderma*, 2011, 162(3–4): 242–250
- [41] Marschner H. Zinc uptake from soil // Robson, A D. Zinc in Soils and Plants[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993, 59–77
- [42] 刘铮, 朱其清. 微量元素的农业化学[M]. 北京: 农业出版社, 1991

## Correlation and Path Analyses of Available Zinc Contents and Salt Ions in Saline Fluvo-aquic Soil of Hexi Oasis Area

YANG Sicun, HUO Lin, WANG Chengbao, JIANG Wanli

*(Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu Scientific Observing and Experiment Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture, Lanzhou 730070, China)*

**Abstract:** Typical saline fluvo-aquic topsoil samples (0-20 cm) were collected under the conventional cultivation of maize in Ganzhou district and Linze county of Zhangye City in Hexi oasis irrigation area, the characteristics and correlation of the contents of available zinc and salt ions as well as the effects of various ions on the content of available zinc were studied with the method of path analysis. The results showed that available zinc content ranged from 0.289 to 0.736 mg/kg with an average of 0.473 mg/kg and a variation coefficient of 18.68%. Available zinc contents of more than 70% of the studied soil samples were lower than the deficient level (0.5 mg/kg). Available zinc content had negative correlation with salt content, it was extremely significantly correlated with the contents of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$ , and significantly correlated with the contents of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{K}^+$ , but not significantly correlated with the content of  $\text{SO}_4^{2-}$ .  $\text{Mg}^{2+}$  showed strong direct and indirect negative effects on available zinc content,  $\text{HCO}_3^-$  showed more strong direct negative effects and strong indirect positive effects;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  showed more strong direct and indirect negative effects,  $\text{SO}_4^{2-}$  showed mild direct and indirect positive effects,  $\text{Ca}^{2+}$  showed mild direct and indirect negative effects.  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Na}^+$  were the three dominant affecting factors on available zinc contents, and they in total decided 68% more of the determinative coefficient  $R^2$ .

**Key words:** Saline fluvo-aquic soil; Available zinc contents; Salt ions; Correlation analysis; Path analysis