

# 石膏-微咸水复合灌溉量对土壤水盐分布特征的影响<sup>①</sup>

赵秀芳<sup>1,2</sup>, 杨劲松<sup>1\*</sup>, 张清<sup>2</sup>, 王振宇<sup>2</sup>, 韩建均<sup>1,3</sup>, 姚荣江<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 泰达园林建设有限公司, 天津 300475; 3 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

**摘要:** 通过田间试验, 研究苏北滩涂区石膏-微咸水复合灌溉量对剖面土壤水盐分布特征的影响, 结果表明: 灌溉量是石膏-微咸水复合灌溉处理下制约土壤水盐分布特征的决定因素。灌溉量增加, 湿润峰垂直运移距离加大, 湿润峰内各土层的含水量逐渐增加。高于灌至 0~90 cm 土层田间最大持水量的灌溉量能够实现表土脱盐、脱钠, 0~20 cm 土层效果最为显著, 脱盐率、脱钠率高达 29.0%、26.9%; 低于灌至 0~60 cm 土层田间最大持水量的灌溉量, 会导致表土积盐、积钠, 但随着灌溉量的增加, 积累量有所减弱。

**关键词:** 石膏; 微咸水; 灌溉量; 含水量; 含盐量

**中图分类号:** S275

微咸水灌溉淋盐和石膏改碱研究一直是国内外盐碱土改良的研究热点, 到目前为止, 已开展了大量的研究工作<sup>[1-8]</sup>, 研究表明合理的微咸水灌溉技术可以确保在作物不减产或增产的同时抑制土壤盐渍化; 石膏改良技术能有效降低土壤 pH 和碱化度, 改碱效果明显。利用微咸水灌溉淋盐和石膏改碱技术优势形成石膏-微咸水复合灌溉技术, 从而实现淋盐改碱的双重效果, 目前已有学者展开研究<sup>[9-11]</sup>。试验发现石膏-微咸水复合灌溉对表土改碱效果显著, 但是会导致表土层土壤严重积盐。针对这一情况, 本研究以苏北滩涂盐碱土为研究对象, 将石膏改良技术与微咸水灌溉技术相结合, 研究不同量石膏-微咸水复合灌溉对土壤水盐运移特征的影响, 为寻求科学合理的石膏-微咸水复合利用模式, 实现苏北滩涂区盐碱土有效改良提供了一条新的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区设在江苏中部沿海东台与大丰两市交界处的金海农场 (120°50' N, 32°57' E), 该区地处北亚热带北缘, 具有明显的海洋性季风气候。气候温暖湿润, 日照充分, 雨量充沛, 四季分明。年平均气温 14.6℃,

全年无霜期 213 天, 常年降水量 1042 mm, 年平均蒸发量 1417 mm, 年平均相对湿度为 81%, 年平均风速为 3.3 m/s。土壤为冲积盐土类, 基本性质如表 1 所示, 土壤平均含盐量 2.9~16.0 g/kg, 有机质含量 4.0~8.0 g/kg, 全 N 含量 240~480 mg/kg, 速效 P 3~5 mg/kg, 速效 K 160~300 mg/kg。土壤沉积母质为近代泥沙沉积物。土壤体积质量(容重)在 1.3~1.6 g/cm<sup>3</sup> 之间, 孔隙度 40%~50%。全剖面土质均匀, 以粉砂占优势。区内地下水位普遍较高, 多介于 0.8~2.4 m 之间, 且矿化度高, 为 3.83~30.75 g/L<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验选取土壤本底盐分相似的 12 块小区进行试验, 共设 4 个处理, 3 次重复, 小区面积 4 m<sup>2</sup> (2 m × 2 m), 随机区组排列, 区间设 1 m 防护行, 小区四周埋膜下至 1 m 土深, 上达地表 0.15 m 高处, 以防互渗。4 个实验处理分别为: ①对照处理 (CK), 即不做任何处理; ②石膏+微咸水低量灌溉处理 (L1); ③石膏+微咸水中量灌溉处理 (L2); ④石膏+微咸水高量灌溉处理 (L3)。其中, 所有石膏处理均采用 3.5 t/hm<sup>2</sup> 的施用量, 微咸水采用河渠水, 矿化度为 3.38 g/L, pH 值为 7.83, 其低、中、高灌溉量分别为灌溉到表层 40、60、90 cm 土壤的田间最大持水量, 本试

①基金项目: 国家“863”计划重点项目 (2007AA091702), 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001), 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX1-YW-09) 和国家自然科学基金项目 (40771097) 资助。

\* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 赵秀芳 (1980—), 女, 吉林公主岭人, 博士研究生, 主要从事土壤盐渍化防控和盐渍土资源利用方面的研究。E-mail: xfzhao@issas.ac.cn

表1 研究区土壤基本性质

Table 1 Characteristics of tested soil

参数	土壤深度 (cm)						
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
砂粒 (g/kg)	204	204	64	166	18	6	106
粉粒 (g/kg)	601	601	755	714	792	809	703
黏粒 (g/kg)	195	195	181	120	190	185	191
体积质量 (g/cm <sup>3</sup> )	1.38	1.56	1.52	1.50	1.49	1.50	1.50
EC (dS/m)	1.198	0.616	0.628	0.531	0.508	0.496	0.493
pH	9.09	8.98	9.04	9.08	9.12	9.15	9.16
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /L)	2.65	1.61	1.89	1.57	1.45	1.39	1.41
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /L)	0.52	0.47	0.44	0.45	0.61	0.46	0.59
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (cmol <sub>c</sub> /L)	0.65	0.54	0.56	0.55	0.83	0.62	0.78
Cl <sup>-</sup> (cmol <sub>c</sub> /L)	2.43	1.37	1.29	1.12	1.00	1.03	1.08
RSC (cmol <sub>c</sub> /L)	0.13	0.07	0.12	0.10	0.22	0.16	0.19
ESP (%)	6.02	3.51	4.47	3.50	2.55	2.93	2.50

注: RSC = (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) - (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>); ESP = 100(-0.0126 + 0.01475 SAR) / [1 + (-0.0126 + 0.01475 SAR)].

验的灌溉量分别为 0.182、0.273、0.409 m<sup>3</sup>, 相当于小区灌溉深度分别为 45、68、102 mm, 灌溉方式为浇灌, 灌溉量的计算公式为:

$$W = 1000(1 + 50\%)V\varphi(\theta_m - \theta_0) \quad (1)$$

其中,  $W$ , 灌溉量 (L);  $V$ , 湿润土体积 (m<sup>3</sup>);  $\varphi$ , 土壤体积质量 (g/cm<sup>3</sup>);  $\theta_m$ , 田间最大持水量 (质量含水量) (%);  $\theta_0$ , 初始土壤质量含水量 (%);  $1 + 50\%$ , 表示在灌溉到田间最大持水量的基础上又增加了 50% 的淋洗灌溉量; 1000, 为单位换算系数。

### 1.3 样品的采集与测定

于 2009 年 3 月 25 日 (未种植作物) 进行灌溉处理, 分别于灌溉处理的前一天和后两天 (此期间均为晴天) 采集不同小区 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 和 100~120 cm 土壤样品, 每个小区采集 5 点, 然后将每个处理同一层次所采集的所有样品 (15 个) 混匀, 共计获得 28 个土壤样品。即取每个样品的部分土样, 103℃ 烘干, 测定样品的含水量。

剩余土样带回实验室内自然风干, 磨碎, 过 2 mm 筛后备用, 所有的土样均制备 1:5 土水比浸提液, 并测定其电导率 EC<sub>1:5</sub> 和离子组成含量, 其中, EC<sub>1:5</sub> 采用 EC215 Conductivity Meter 进行测定; 离子组成的具体测定方法为: Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 采用火焰光度计法测定, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 采用土

壤盐分常规测定法<sup>[13]</sup>。所有数据均采用 Excel2003 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水量分布特征

土壤水分是盐分运动的载体<sup>[14-15]</sup>, 土壤水分的运移状况必将制约着土壤盐分的运移, 因此开展土壤水分运移研究具有重要的意义。图 1 显示了各试验处理土壤剖面含水量的变化情况, 从图 1 中可以看出, 处理前各剖面初始土壤含水量分布态势相似, 均呈现斜“Z”字型, 且差异较小, 0~10 cm 土层含水量均介于 20%~21% 之间。而 2009 年 3 月 27 日即处理后, 微咸水灌溉小区剖面土壤含水量的变化与对照小区差异较大。对照小区土壤水分变化较为活跃, 表层土壤 (0~20 cm) 含水量呈现出大幅度降低, 亚层土壤 (20~60 cm) 略有升高, 60 cm 以下则又呈现出降低的降低趋势 (图 1A), 这说明此时表层土壤蒸发强烈, 深层土壤水通过毛细作用不断向上运输进行补充。与对照小区相比, 3 种不同量石膏-微咸水灌溉处理后均提高了剖面土壤含水量, 且随着灌溉量的增加提升幅度逐渐加大 (图 1B~D)。从灌溉前、后各处理土壤含水量的变化可以看出, 随着灌溉量的增加, 湿润峰的垂直运移距离加大且湿润峰内各土层的含水量也逐渐增加, 这表明不同量微咸水灌溉条件下土壤盐分的垂直运移规律和剖面土壤的盐分分布也将会有较大不同。

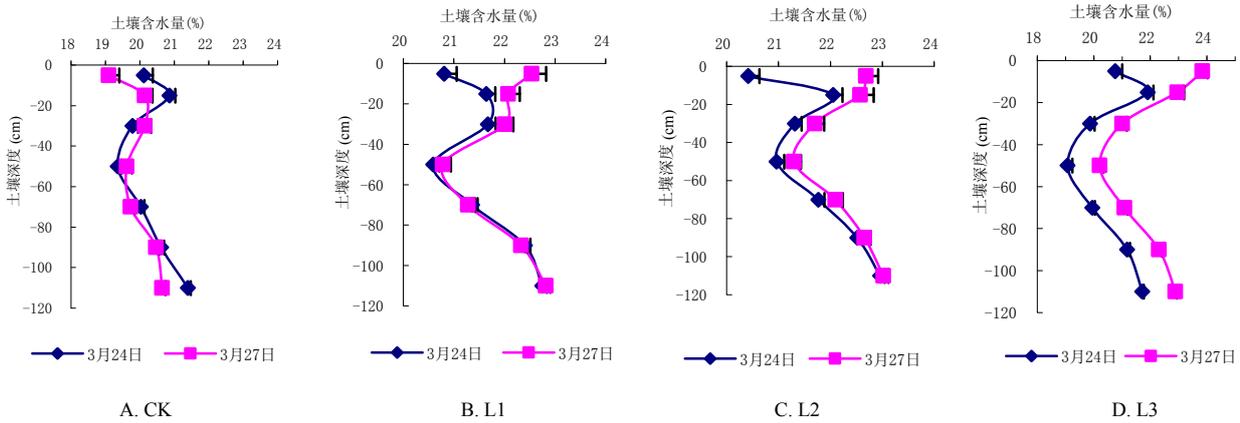


图 1 不同量微咸水灌溉的土壤含水量分布

Fig. 1 Distributions of soil water content under different irrigation volumes

2.2 土壤含盐量分布特征

图 2 给出了各小区处理前、后剖面土壤含盐量的变化情况, 由图 2 可知处理前各小区剖面土壤含盐量具有相同的分布态势, 且含盐量数据的统计分析结果表明处理前各小区、各层次含盐量无显著差异。处理后, 各小区剖面土壤盐分变化有显著的不同, 对照小区 0~10 和 10~20 cm 土层盐分有小幅升高, 积盐率分别达到 25.80% 和 6.41%, 向下至 60 cm 深处土壤盐分略有降低 (图 2 A), 表明盐分在表层积累, 这主要是由于此期间无降水, 光照强, 气温高, 表层土壤的强烈蒸发引起毛细水上升, 从而将深层土壤盐分带入表层, 致使表层土壤盐分增加。

经溶有石膏的微咸水灌溉后, 剖面土壤盐分发生了明显变化 (图 2B~D)。L1 处理后, 0~60 cm 土层土壤盐分均有所增加, 其中 0~10 cm 土层盐分积累最

为严重, 10~20 cm 土层也有大幅度的积累, 积盐率分别达到 202.9% 和 23.0%; L2 处理后, 0~100 cm 深度内土壤呈现出不同程度的盐分积累, 其中 0~10 cm 土层盐分积累最为显著, 20~40 和 40~60 cm 土层也有较为明显的积累, 积盐率分别为 110.2%、10.4% 和 8.2%; L3 处理后, 0~40 cm 土层内土壤盐分均得到不同程度的淋洗, 其中 10~20 cm 淋洗效果最佳, 0~10 cm 次之, 20~40 cm 最差, 脱盐率分别为 6.6%、51.3%、2.9%, 40 cm 以下土壤表现为盐分积累, 且积盐幅度随着深度的增加逐渐加大, 从 40~60 cm 到 100~120 cm 土层积盐率由 9.4% 增加到 24.8%。以上试验数据表明, 低于灌至 0~60 cm 土层田间最大持水量的石膏、微咸水复合灌溉处理, 会导致表土积盐, 但随着灌溉量的增加, 表层土壤盐分会降低, 但积盐深度会有所增加; 高于灌至 0~90 cm 土层田间

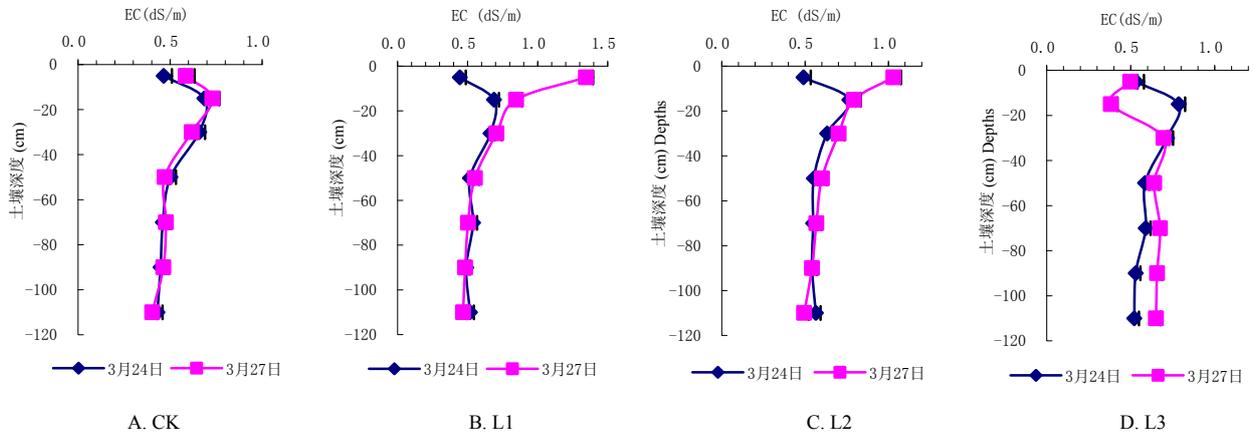


图 2 不同量微咸水灌溉的土壤电导率 (dS/m) 分布

Fig. 2 Distributions of soil electric conductivity under different irrigation volumes

最大持水量的石膏-微咸水复合灌溉处理对 0 ~ 20 cm 土层盐分具有较好的淋洗效果。以上说明,石膏-微咸水复合灌溉处理下,灌溉量是制约石膏-微咸水复合处理脱盐效果的决定因素,合适的灌溉量能起到较好的抑盐控盐效果,不适宜的灌溉量却能引起表层土壤积盐。

### 2.3 土壤钠离子分布特征

$\text{Na}^+$  是苏北滩涂区土壤中最为重要的阳离子<sup>[16]</sup>,对剖面土壤中 $\text{Na}^+$  分布特征的研究不仅能反映土壤盐分的分布状况,同时也能获知盐分对作物生长和土壤孔隙状况产生直接影响<sup>[17]</sup>。处理前后各小区剖面土壤 $\text{Na}^+$  分布情况如图 3 所示,由图 3 可知,处理前后对照小区 $\text{Na}^+$  含量(图 3A)与含盐量(图 2A)的变化情况具有高度的一致性,说明自然条件下土壤中 $\text{Na}^+$  的分布主要受气象条件的制约。经 L1、L2 处理后,表层 0 ~ 10 cm 土层 $\text{Na}^+$  含量均呈现大幅度增加,但提升幅度上 L2 (26.3%) 处理明显小于 L1 处理 (16.5%) (图 3B, C),这主要与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的盐基交换有关,微咸水中溶解的大量的  $\text{Ca}^{2+}$  在土

壤表层将  $\text{Na}^+$  从胶体表面上置换出来,进入土壤溶液,部分  $\text{Na}^+$  被微咸水淋洗进入深层土壤溶液,部分由于灌溉量不足,淋洗强度不够,残留于表层 (0 ~ 10 cm) 土壤溶液中;从 L1 处理到 L2 处理,随着灌溉量的增加,淋洗强度加大, $\text{Na}^+$  淋洗量增加,残留量逐渐减少。从图 3 B和C 中还可以看到经 L1、L2 处理后, $\text{Na}^+$  含量分别在 40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 土层出现突增,增长率分别为 11.4% 和 10.1%,这可能是由于随微咸水运移的淋洗  $\text{Na}^+$  在湿润峰末端积累沉积造成的。L3 处理后,0 ~ 60 cm 土层内  $\text{Na}^+$  含量均呈降低趋势,尤其 0 ~ 20 cm 土层最为明显,脱  $\text{Na}^+$  率高达 26.9%,而在 60 cm 以下形成  $\text{Na}^+$  累积且随着深度的增加积累量逐渐增大。以上说明,石膏-微咸水复合作用条件下,灌溉量是调配研究区土壤剖面中  $\text{Na}^+$  分布的重要因子,高于灌至 0 ~ 90 cm 土层田间最大持水量的灌溉量能够实现 0 ~ 60 cm 土层土壤脱  $\text{Na}^+$  作用,低于灌至 0 ~ 60 cm 土层田间最大持水量的灌溉量,对剖面土壤不具有脱  $\text{Na}^+$  作用。

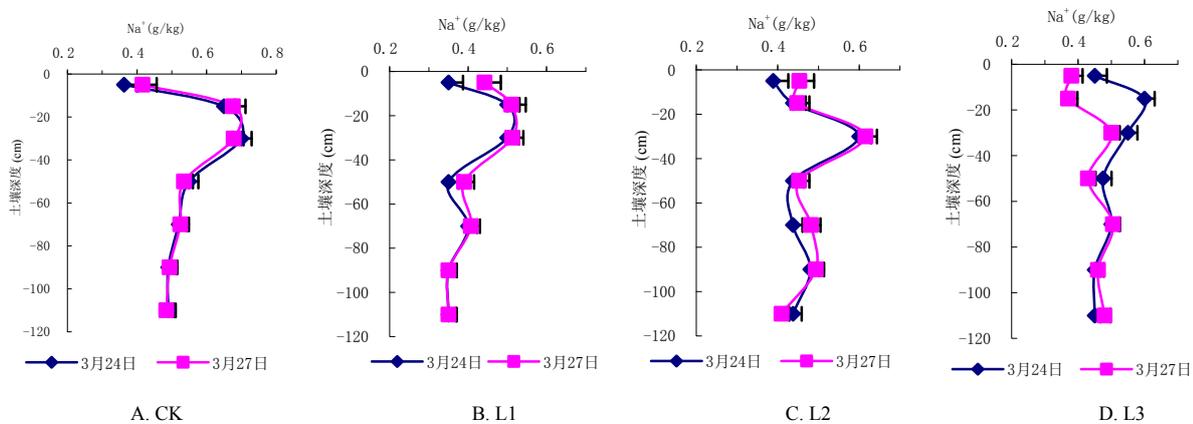


图 3 不同量微咸水灌溉的土壤含 $\text{Na}^+$ 量分布

Fig. 3 Distributions of soil sodium content under different irrigation volumes

## 3 结论

通过对石膏-微咸水复合灌溉不同灌溉量处理下土壤水盐运移规律的田间试验研究,获知研究区石膏-微咸水复合灌溉量对土壤水盐分布特征影响的主要研究成果如下:

(1) 石膏-微咸水复合灌溉处理较未经任何处理的措施相比,提高了剖面土壤含水量,且随着灌溉量的增加,湿润峰的垂直运移距离加大,湿润峰内各土层的含水量亦逐渐增加。

(2) 石膏-微咸水复合灌溉处理下,灌溉量是制约研究区土壤脱盐效果的决定因素。低于灌至 0 ~ 60 cm 土层田间最大持水量的灌溉量,对表层土壤不具有脱盐作用,但随着灌溉量的增加,表层土壤盐分会有所降低,但积盐深度会有所增加;高于灌至 0 ~ 90 cm 土层田间最大持水量的灌溉量对表层土壤具有较好的脱盐效果。

(3) 石膏-微咸水复合灌溉条件下,灌溉量是调配研究区土壤剖面中 $\text{Na}^+$  分布的重要因子,高于灌至 0 ~

90 cm 土层田间最大持水量的灌溉量能够实现 0 ~ 60 cm 土层土壤脱 Na<sup>+</sup>作用, 低于灌至 0 ~ 60 cm 土层田间最大持水量的灌溉量, 对剖面土壤不具有脱 Na<sup>+</sup>作用。

#### 参考文献:

- [1] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71-76
- [2] 李红, 李庆朝. 微咸水灌溉对小麦、玉米及土壤盐分的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 72-74
- [3] Tedeschi A, Dell AR. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. *Agricultural Water Management*, 2005, 77: 308-322
- [4] Abdel GG, Arslan A, Gaihbe A, Kadouri F. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria. *Agricultural Water Management*, 2005, 78: 39-53
- [5] 孙毅, 高玉山, 闫孝, 冯振生. 石膏改良苏打盐碱土研究. 土壤通报, 2001, 32(S0): 97-100
- [6] 王金满, 杨培岭, 张建国, 石懿. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究. 农业工程学报, 2005, 21(9): 33-37
- [7] Frenkel H. Improvement of sodium soils and gypsum dissolution due to interaction. *Journal of Soil Science*, 1989, 40(3): 599-611
- [8] Gupta RK. Comparison between the top soils and the inner soils using gypsum and CaCl<sub>2</sub> for alkali soils improvement. *Soil Science*, 1988, 146: 277-283
- [9] 王全九, 孙海燕, 姚新华. 滴灌条件下石膏配比对盐碱土水盐运移特征影响. 农业工程学报, 2008, 24(11): 36-40
- [10] Mitchell JP, Shennan C, Singer MJ, Peters DW, Miller RO, Prichard T, Grattan SR, Rhoades JD, May DM, Munk DS. Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water. *Agricultural Water Management*. 2000, 45: 55-71
- [11] Choudhary OP, Josan AS, Bajwa MS, Kapur ML. 2004. Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions. *Field Crops Research*, 87, 103-116
- [12] 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. 土壤, 2005, 37(2): 163-168
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [14] 巨龙, 王全九, 王琳芳, 史晓楠. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(1): 86-90
- [15] 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
- [16] 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. 土壤, 2005, 37(2): 163-168
- [17] 王全九, 孙海燕, 姚新华. 滴灌条件下石膏配比对盐碱土水盐运移特征影响. 农业工程学报, 2008, 24(11): 36-40

### Effects of Saline Water Irrigation Capacity Under Gypsum Applied on Distribution Characteristics of Soil Water-salt

ZHAO Xiu-fang<sup>1,2</sup>, YANG Jing-song<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>2</sup>, WANG Zhen-yu<sup>2</sup>, HAN Jian-jun<sup>1,3</sup>, YAO Rong-jiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

<sup>2</sup> Taida Garden Construction Ltd., Tianjin 300475, China;

<sup>3</sup> College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Based on field experiment, the effects of saline water irrigation capacity under gypsum applied on the distribution characteristics of soil water-salt were studied in the coastal area of north Jiangsu Province. The results showed that irrigation capacity was the crucial factor constraining the distribution of soil water-salt under saline water irrigation with gypsum. With the increase of irrigation capacity, the vertical migration space of humid apex deepened and water contents in humid region increased gradually. The subduction of salt and Na<sup>+</sup> on the topsoil occurred at 0-90 cm depth under the irrigation capacity of above the maximal field water capacity, especially significant at 0-20 cm depth which of 29.0% salt and 26.9% sodium ion subduction ratios respectively; While the accumulation of salt and Na<sup>+</sup> ion in the topsoil occurred at 0-60cm depth under the irrigation capacity of below the maximal field water capacity, but which weakened with the increase of irrigation amount.

**Key words:** Gypsum, Saline water, Irrigation amount, Water contents, Salt contents