

杨思存, 霍琳, 王成宝, 等. 兰州市日光温室土壤盐分积累及离子组成变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1541-1549.

YANG Si-cun, HUO Lin, WANG Cheng-bao, et al. Salt accumulation and ion composition changes in soil under solar greenhouses in Lanzhou Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1541-1549.

# 兰州市日光温室土壤盐分积累及离子组成变化特征

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, 兰州 730070)

**摘要:** 为探讨兰州市日光温室土壤盐分积累和离子组成变化特点, 通过对不同耕地利用方式和种植年限条件下土壤的取样调查, 分析了盐分积累特征及耕层土壤盐分离子组成变化特点, 结果表明: 耕地利用方式、种植年限、土壤通透性、农户经营管理水平等, 都会影响日光温室土壤盐分积累和离子组成变化, 普通粮田改为日光温室种植后, 0~100 cm 土层含盐量普遍增加, 增幅达到了 17.56%~29.77%, 盐分表聚现象明显, 耕层(0~20 cm) 土壤含盐量平均增加了 40% 以上; 随着种植年限的延长, 日光温室耕层土壤盐分含量持续增加, 累积量最大的离子是  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$ , 阴离子的累积量显著高于阳离子, 阴离子的组成从以  $\text{HCO}_3^-$  为主变为以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 阳离子的组成始终以  $\text{Ca}^{2+}$  为主, 同时  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  的含量大幅度增加。盐分的大量累积, 以及  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  等离子的相对富集, 不仅会对蔬菜生长造成生理毒害、养分供需失衡、品质下降, 还会引起土壤酸化、地下水污染等环境问题。

**关键词:** 日光温室; 盐分积累; 离子组成; 种植年限; 兰州市

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)08-1541-09 doi:10.11654/jaes.2016-0059

## Salt accumulation and ion composition changes in soil under solar greenhouses in Lanzhou Region

YANG Si-cun, HUO Lin, WANG Cheng-bao, JIANG Wan-li

(Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Soil salt accumulation is one of the most severe soil problems in greenhouse production. Here an investigation was conducted to evaluate the dynamic changes of salt accumulation and ion composition in soils under different land uses and planting years in solar greenhouse in Lanzhou region. Results showed that salt accumulation and ion composition in the soil were affected by regional soil parent materials, hydro-geological conditions, soil permeability, farmers' management practices, etc. When a conventional cropland was converted to solar greenhouse, soil salt content was increased by 17.56%~29.77% in 0~100 cm soil. Obvious salt accumulation occurred in topsoil (0~20 cm), with average salt content being increased by 40%. Salt content in the topsoil increased with increasing planting age. Ions  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  were the most accumulated ones in topsoil, with anion accumulation being significantly higher than that of cations. Moreover, the dominating anions in the topsoil shifted from  $\text{HCO}_3^-$  to  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . However, the major composition of cations remained to be  $\text{Ca}^{2+}$ , with significant increases in  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$ . Salt accumulation and  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Na}^+$  enrichment not only caused physiological toxicity to vegetables, but also influenced cropping system in solar greenhouses, such as disordered nutritional supply, declined vegetable quality, soil acidification and groundwater pollution, etc.

**Keywords:** solar greenhouse; salt accumulation; salt ion composition; planting age; Lanzhou

蔬菜产业是兰州市农产品中商品量最大、市场潜力最好、外销量最高、发展最为活跃的一个重要优势

产业, 在保障兰州市民冬春淡季新鲜蔬菜需求中的地位和作用越来越突出。从 1994 年开始, 兰州市政府就实施了以日光温室为主的科技战略, 经过 20 多年的生产和经营, 种植面积已超过了 2000  $\text{hm}^2$ , 并形成了自己的特色, 在稳定占有省内和国内市场的同时, 也带动了加工业、运销业和贮藏业的发展, 成为兰州市农业结构战略性调整的一个重要方向和农业增效、农

收稿日期: 2016-01-13

基金项目: 甘肃省农业科学院科技创新专项(2015GAAS03); 兰州市科技攻关计划项目(06-2-32, 07-1-01)

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及盐碱地改良利用研究。E-mail: yangsicun@sina.com

民增收的一项有效手段<sup>[1]</sup>。由于日光温室蔬菜栽培具有位置相对固定、生长期短、复种茬口多、土壤耕作频繁等特点,菜农为获得更高的产量及产值,不惜成本地大量施用化肥,不仅增加了生产成本,还导致盐分在表层土壤富集,造成土壤次生盐渍化,影响了蔬菜产量和品质,并对土壤环境造成潜在的威胁<sup>[2-4]</sup>。大量研究表明,土壤盐渍化已成为制约设施农业生产的一个重要障碍因子<sup>[5-7]</sup>,在深处内陆腹地的兰州市也是如此,很多温室经过连续几年的种植后土壤性质已明显变差,土壤表面甚至出现盐霜,有些温室已弃耕,严重制约了这一产业的可持续发展。因此,深入系统地研究温室土壤盐渍化形成机理及其调控技术研究,提高温室土壤管理水平,对于兰州市温室蔬菜产业的可持续发展都具有重要的理论和实践意义。兰州市日光温室生产区土壤母质类型、水文地质条件和区域农户经营管理水平等都存在着很大差异,关于本地温室栽培方式下蔬菜合理施肥及土壤盐分累积状况的研究尚鲜见报道。我们选择3个典型区域开展了耕地利用方式和连作年限对日光温室土壤盐分积累、离子组成变化影响的研究,旨在为兰州市日光温室蔬菜产业的发展提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土壤

#### 1.1.1 基本概况

选择榆中县来紫堡乡骆驼巷村、皋兰县西岔镇团庄村和红古区金沙台农业科技示范园具有代表性的日光温室及相邻普通粮田和露地蔬菜,通过现场访谈和发放调查问卷,了解采样区农户的建棚时间、种植面积、主栽品种、轮作制度、土壤条件、产量产值、肥料种类、施肥量、施肥时期、施肥方法及比例、土壤管理及施肥经验、肥料占投资的比例等。研究区采样点的基本概况见表1。

### 1.1.2 采样方法

在榆中县来紫堡乡骆驼巷村、皋兰县西岔镇团庄村和红古区金沙台农业科技示范园区日光温室相对集中的区域,选择棚龄分别为1年、3年、5年、8年、10年、12年、15年的3个具有典型代表性棚作为重复(红古区金沙台农业科技示范园区没有8年以上的棚,皋兰县西岔镇团庄村没有12年和15年的棚),并分别选择3~5块与日光温室相邻的普通粮田和露地蔬菜作为对照。根据每个棚或每块地的大小按“S”型布点,按照5点采样法采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土样,将相同层次的土样充分混合后代表该样点土样,采集的土样带回实验室后自然风干,研磨、过筛(2 mm)后装瓶备用。日光温室土壤样品的采集在6月下旬蔬菜收获后进行,普通粮田和露地蔬菜土壤样品的采集在10月上旬蔬菜和粮田作物收获后进行。

### 1.2 测定项目及方法

土壤样品室内分析选取的指标为0~100 cm各土层水溶性盐分总量和耕层土样(0~20 cm)盐分离子。土壤浸提液的制备采用去离子水,按水土比5:1混合,振荡5 min,离心,过0.45 μm滤纸所得。水溶性盐分总量采用干残渣法;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用双指示剂盐酸滴定法;Cl<sup>-</sup>用AgNO<sub>3</sub>滴定法;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>用EDTA间接滴定法;Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>用EDTA滴定法;K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>用火焰光度法<sup>[8]</sup>;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>用0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液浸提,连续流动注射分析仪测定(Skalar San<sup>+</sup>)。

### 1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2007软件处理数据及制图,用SAS8.0统计软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 日光温室土壤剖面盐分含量特征

#### 2.1.1 不同区域日光温室间的差异

从图1可以看出,普通粮田土壤剖面含盐量相对

表1 不同采样区域日光温室生产概况

Table 1 General information of greenhouse cultivation in different regions

区域 Region	采样地点 Sampling Site	蔬菜类型 Vegetable Type	肥料种类和施肥量 Fertilizer Applications			
			N/kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	K <sub>2</sub> O/kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	有机肥/t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>
榆中县 Yuzhong	来紫堡乡 骆驼巷村	黄瓜、辣椒、番茄	尿素、复合肥 408.4~1 342.8	普钙、磷二铵 714.3~963.5	硫酸钾 336.4~574.7	牛粪、鸡粪 65.8~93.5
皋兰县 Golan	西岔镇 团庄村	黄瓜、辣椒、番茄、 茄子、西葫芦、西瓜	尿素、复合肥 224.5~1 588.7	磷二铵 584.8~1 045.5	硫酸钾 262.8~647.5	猪粪、鸡粪 52.8~137.5
红古区 Honggu	金沙台农业 科技示范园	黄瓜、辣椒、番茄、 西葫芦、西瓜	尿素、复合肥 234.9~1 462.3	磷二铵 512.2~1 194.6	硫酸钾 364.8~547.8	鸡粪 38.4~82.5

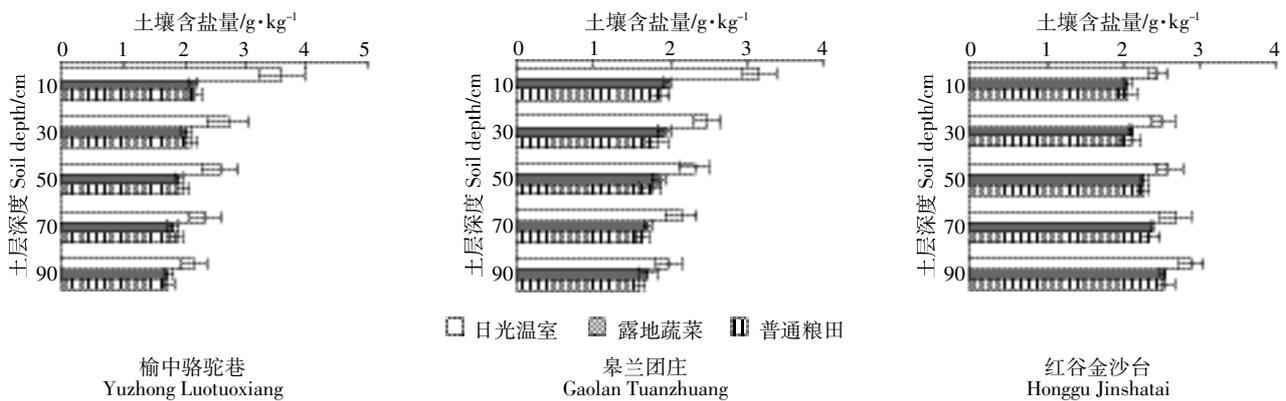


图1 不同地区日光温室土壤盐分的剖面变化

Figure 1 Variation of salt content in greenhouse soil profiles in different regions

较低,平均含量只有 1.91~2.04  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分布比较均一,各土层间的含量差异相对较小。普通粮田改为种植露地蔬菜后,虽然施肥量和灌溉量都加大,但 0~100 cm 土层含盐量变化并不大,增幅在 0.95%~1.86%,即便是耕层土壤(0~20 cm)也没有过多盐分积累,只增加了 1.52%。普通粮田改为日光温室种植后,耕作栽培措施发生了重大变化,施肥量和灌水量的大幅度增加,导致了盐分离子向下淋洗量的增加,造成 0~100 cm 土层含盐量普遍增加,增幅达到了 17.56%~29.77%。同时,由于日光温室是一个封闭的环境,内部温度相对较高,土壤蒸发量和作物蒸腾量很大,盐分离子又会随着土壤水分的向上运动而逐渐向表层迁移、聚积,出现明显的表聚现象,使得耕层土壤(0~20 cm)盐分含量比相邻普通粮田平均增加了 40%以上。这种增加会抑制蔬菜根系对水肥的吸收,造成明显的盐分胁迫现象<sup>[2-5]</sup>。

由于有机肥和化肥的投入水平不同,造成了不同区域土层的土壤含盐量差异,而且这种影响在耕层表现得更加突出。榆中县来紫堡乡骆驼巷村有机肥和化肥投入相对较高,盐分平均含量也最高,达到 3.58  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;皋兰县西岔镇团庄村有机肥和化肥投入略低,盐分平均含量也略低,为 3.15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;红古区金沙台农业科技示范园区几乎没有有机肥投入,化肥施用量也不高,因此盐分平均含量最低,只有 2.94  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。三个地区土壤剖面中盐分的分布,明显受到土壤类型、土体构型、土层深度和地下水位等的影响。榆中骆驼巷土层深度在 1.5 m 左右,下层为沙石层,皋兰团庄土层深厚,没有障碍层,土体通透性都很好,土壤剖面中的盐分随灌水淋出了 1 m 土层,虽然在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层有返盐情况发生,但总体而言,两地日光温室土壤剖面中的含盐量都随着深度的加深而呈

下降趋势。红古金沙台土层也比较深,但在 1 m 左右有一层红胶泥层,阻碍了土壤盐分和水分的下渗,导致盐分在下层聚集,越往下层土壤盐分含量越高。

### 2.1.2 不同种植年限日光温室间的差异

日光温室高出普通粮田 4~10 倍的肥料投入,这几乎是蔬菜实际需肥量的 6~8 倍,再加上棚室特殊的环境(密闭、高温、高湿、低淋溶),极易导致土壤发生次生盐渍化<sup>[7,9-10]</sup>。从表 2 可以看出,随着种植年限的延长,三个地区日光温室土壤剖面盐分含量都呈明显增加趋势,只是在盐分分布上榆中骆驼巷和皋兰团庄表现为表聚型,红古金沙台表现为底聚型。榆中骆驼巷日光温室耕层土壤含盐量在种植的第 1 年为 2.64  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,第 5 年时增加了 18.6%,第 10 年时增加了 46.6%,第 15 年时增加了 77.3%,含盐量已高达 4.68  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比较而言,皋兰团庄和红古金沙台的增幅略小,但在第 5 年时也分别增加了 21.0%和 23.7%。20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 土层也表现出了相同的趋势,土壤含盐量都是随着种植年限的延长而增加,同一种种植年限相同土层含盐量的增幅变化趋势与耕层是一致的,都是榆中骆驼巷>皋兰团庄>红古金沙台。这既与不同地区的土壤类型、土体构造等有关,也与当地农户的灌溉、施肥和所种植的蔬菜类型等生产管理情况有关。

## 2.2 日光温室耕层土壤盐分离子含量及其组成变化特点

### 2.2.1 不同区域日光温室间的差异

从表 3、表 4 可以看出,耕地利用方式对耕层土壤盐分离子含量影响很大。普通粮田和露地蔬菜的阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,占阴离子总量的 35.17%~38.83%,其次是  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,分别占 17.72%~24.11%和 22.82%~25.00%;阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,占阳离子总量的 32.72%~

表2 不同种植年限日光温室土壤盐分的剖面变化

Table 2 Variation of salt content in greenhouse soil profile under different planting ages

采样地点 Sampling site	种植年限/a Planting age	样本数 Sample No.	土壤含盐量 Soil salt content/g·kg <sup>-1</sup>				
			0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
榆中骆驼巷 Yuzhong Luotuoxiang	1	3	2.64	2.25	2.16	1.93	1.83
	3	3	2.90	2.50	2.37	2.21	2.05
	5	3	3.13	2.55	2.45	2.22	2.09
	8	3	3.55	2.82	2.71	2.46	2.31
	10	3	3.87	2.77	2.66	2.37	2.24
	12	3	4.26	3.04	2.81	2.54	2.23
	15	2	4.68	3.31	3.13	2.86	2.52
皋兰团庄 Gaolan Tuanzhuang	1	3	2.57	2.29	2.06	1.83	1.76
	3	3	2.92	2.37	2.19	2.04	1.84
	5	3	3.11	2.40	2.31	2.14	1.98
	8	3	3.35	2.58	2.46	2.29	2.13
	10	3	3.79	2.71	2.57	2.38	2.13
红古金沙台 Honggu Jinshatai	1	3	2.62	2.36	2.41	2.45	2.70
	3	3	2.97	2.50	2.60	2.75	2.92
	5	3	3.24	2.67	2.77	2.85	3.02

表3 不同地区日光温室土壤耕层(0~20 cm)阴离子含量及其组成变化

Table 3 Content and composition of anions in topsoil(0~20 cm) of greenhouse soil in different regions

采样地点 Sampling site	类型 Type	阴离子含量 Anions/g·kg <sup>-1</sup>				占阴离子总量的比例 Proportion/%			
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
榆中骆驼巷 Yuzhong Luotuoxiang	日光温室	0.409	0.743	0.237	0.647	20.09	36.49	11.64	31.78
	露地蔬菜	0.567	0.255	0.285	0.369	38.41	17.28	19.31	25.00
	普通粮田	0.545	0.183	0.339	0.348	38.52	12.93	23.96	24.59
皋兰团庄 Gaolan Tuanzhuang	日光温室	0.439	0.535	0.245	0.552	24.79	30.21	13.83	31.17
	露地蔬菜	0.524	0.362	0.264	0.340	35.17	24.30	17.72	22.82
	普通粮田	0.459	0.145	0.285	0.293	38.83	12.27	24.11	24.79
红古金沙台 Honggu Jinshatai	日光温室	0.482	0.478	0.276	0.487	27.97	27.74	16.02	28.26
	露地蔬菜	0.552	0.322	0.278	0.359	36.53	21.31	18.40	23.76
	普通粮田	0.509	0.174	0.317	0.325	38.42	13.13	23.92	24.53

表4 不同地区日光温室土壤耕层(0~20 cm)阳离子含量及其组成变化

Table 4 Content and composition of cations in topsoil(0~20 cm) of greenhouse soil in different regions

采样地点 Sampling site	类型 Type	阳离子含量 Cations/g·kg <sup>-1</sup>				占阳离子总量的比例 Proportion/%			
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
榆中骆驼巷 Yuzhong Luotuoxiang	日光温室	0.565	0.186	0.367	0.531	34.26	11.28	22.26	32.20
	露地蔬菜	0.366	0.137	0.225	0.317	35.02	13.11	21.53	30.33
	普通粮田	0.384	0.125	0.135	0.298	40.76	13.27	14.33	31.63
皋兰团庄 Gaolan Tuanzhuang	日光温室	0.525	0.194	0.312	0.465	35.09	12.97	20.86	31.08
	露地蔬菜	0.338	0.127	0.215	0.325	33.63	12.64	21.39	32.34
	普通粮田	0.324	0.131	0.114	0.251	39.51	15.98	13.90	30.61
红古金沙台 Honggu Jinshatai	日光温室	0.519	0.226	0.369	0.498	32.20	14.02	22.89	30.89
	露地蔬菜	0.356	0.213	0.212	0.307	32.72	19.58	19.49	28.22
	普通粮田	0.359	0.145	0.126	0.279	39.49	15.95	13.86	30.69

40.76%,其次是 $\text{Na}^+$ ,占28.22%~32.34%。改为日光温室种植后,由于施肥量大幅度增加,导致盐分总量也有了大幅度增加,阴离子中的 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 、阳离子中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+$ 成为累积量最大的离子,特别是 $\text{NO}_3^-$ 的含量分别高达对应普通粮田、露地蔬菜的4.1倍和2.9倍,成为决定盐分含量高低的主导因素。同时,随着各种离子的大量累积以及某些离子的相对富集,也导致土壤中盐分离子的组成发生了变化,阴离子中的 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 所占比例分别降低了10.4%~18.4%和7.9%~12.3%, $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 分别增加了14.6%~23.6%和3.7%~7.2%;阳离子中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量虽然都有所增加,但所占比例分别降低了4.4%~7.3%和1.9%~3.0%, $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ 分别增加了7.0%~9.0%和0.2%~0.6%。

从不同区域来看,由于耕地利用方式和区域农户经营管理水平(施肥水平、灌溉量、轮作模式等)等不同,三个地区日光温室耕层土壤盐分离子的含量均有差异(表3、表4)。 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 都是红古金沙台>皋兰团庄>榆中骆驼巷, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ 都是榆中骆驼巷>皋兰团庄>红古金沙台。从耕层土壤中的阴离子组成比例来看,三地都以 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,占到了阴离子总量的60%左右,其中榆中骆驼巷 $\text{NO}_3^-$ 最高(36.49%),超过了 $\text{SO}_4^{2-}$ (31.78%),可能与日光温室种植的年限更长有关;皋兰团庄 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 所占比例都在30%左右, $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 也相对较高,分别占24.8%和13.8%;红古金沙台阴离子中 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ ,都

在28%左右, $\text{Cl}^-$ 占16%,相对较高。从耕层土壤中的阳离子组成比例来看,三个地区都是 $\text{Ca}^{2+}$ 最高,所占比例在33%左右,皋兰团庄>榆中骆驼巷>红古金沙台;其次是 $\text{Na}^+$ ,所占比例在31%左右,地区间差异不大,榆中骆驼巷>皋兰团庄>红古金沙台;再次是 $\text{K}^+$ ,所占比例在22%左右,地区间差异也不大; $\text{Mg}^{2+}$ 在阳离子组成中所占的比例最小,在13%左右,红古金沙台>皋兰团庄>榆中骆驼巷。

### 2.2.2 不同种植年限日光温室间的差异

从不同种植年限的日光温室来看,随着种植年限的延长,耕层土壤盐分含量在不断增加(表5、表6)。累积量最大的阴离子是 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ ,且这两种离子的含量在很大程度上决定了不同种植年限日光温室耕层土壤盐分含量的高低。与第1年相比, $\text{NO}_3^-$ 含量在第5年、第10年和第15年分别达到了1.7、2.6、3.4倍左右, $\text{SO}_4^{2-}$ 含量分别达到了1.3、1.8、2.3倍左右; $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量均呈下降趋势,在第5年、第10年和第15年分别下降了4%、25%、45%和11%、29%、28%左右。随着种植年限的增加,4种阳离子在土壤中的累积量都在增加,但增幅明显低于阴离子。与第1年相比, $\text{K}^+$ 含量在第5年、第10年和第15年分别达到了0.9、2.2、3.4倍左右, $\text{Na}^+$ 含量分别达到了1.3、1.9、2.2倍左右; $\text{Ca}^{2+}$ 含量分别平均增加了35.7%、39.1%和65.7%, $\text{Mg}^{2+}$ 含量变化相对较小,分别平均增加了21.1%、29.0%和51.1%。

表5 不同种植年限日光温室土壤耕层(0~20 cm)阴离子含量及其组成变化

Table 5 Content and composition of anions in topsoil(0~20 cm) of greenhouse soil of different planting ages

采样地点 Sampling site	种植年限/a Planting age	阴离子含量 Anions/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				占阴离子总量的比例 Proportions/%			
		$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
榆中骆驼巷 Yuzhong Luotuoxiang	1	0.476	0.365	0.280	0.419	30.91	23.70	18.18	27.21
	3	0.490	0.442	0.286	0.483	28.81	25.98	16.81	28.40
	5	0.473	0.513	0.257	0.556	26.29	28.52	14.29	30.91
	8	0.452	0.675	0.230	0.661	22.40	33.45	11.40	32.76
	10	0.367	0.842	0.203	0.734	17.10	39.24	9.46	34.20
	12	0.295	1.125	0.190	0.830	12.09	46.11	7.79	34.02
皋兰团庄 Gaolan Tuanzhuang	15	0.262	1.238	0.200	0.944	9.91	46.82	7.56	35.70
	1	0.491	0.288	0.288	0.432	32.76	19.21	19.21	28.82
	3	0.480	0.453	0.280	0.473	28.47	26.87	16.61	28.05
	5	0.456	0.545	0.248	0.537	25.53	30.52	13.89	30.07
	8	0.409	0.614	0.208	0.599	22.35	33.55	11.37	32.73
红古金沙台 Honggu Jinshatai	10	0.360	0.775	0.199	0.719	17.54	37.75	9.69	35.02
	1	0.489	0.336	0.287	0.430	31.71	21.79	18.61	27.89
	3	0.489	0.485	0.286	0.481	28.09	27.86	16.43	27.63
	5	0.468	0.612	0.254	0.550	24.84	32.48	13.48	29.19

表6 不同种植年限日光温室土壤耕层(0~20 cm)阳离子含量及其组成变化

Table 6 Content and composition of cations in topsoil(0~20 cm) of greenhouse soil of different planting ages

采样地点 Sampling site	种植年限/a Planting age	阳离子含量 Cations/g·kg <sup>-1</sup>				占阳离子总量的比例 Proportions/%			
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
榆中骆驼巷 Yuzhong Luotuoxiang	1	0.481	0.143	0.140	0.332	43.89	13.05	12.77	30.29
	3	0.535	0.158	0.172	0.410	41.96	12.39	13.49	32.16
	5	0.622	0.165	0.192	0.447	43.62	11.57	13.46	31.35
	8	0.654	0.161	0.279	0.561	39.52	9.73	16.86	33.90
	10	0.715	0.172	0.315	0.655	38.50	9.26	16.96	35.27
	12	0.766	0.194	0.369	0.639	38.92	9.86	18.75	32.47
皋兰团庄 Gaolan Tuanzhuang	15	0.797	0.216	0.472	0.742	35.79	9.70	21.19	33.32
	1	0.438	0.162	0.145	0.343	40.26	14.89	13.33	31.53
	3	0.507	0.180	0.169	0.402	40.30	14.31	13.43	31.96
	5	0.532	0.187	0.186	0.431	39.82	14.00	13.92	32.26
红古金沙台 Honggu Jinshatai	8	0.522	0.205	0.253	0.508	35.08	13.78	17.00	34.14
	10	0.567	0.223	0.308	0.641	32.60	12.82	17.71	36.86
	1	0.413	0.185	0.144	0.341	38.13	17.08	13.30	31.49
	3	0.587	0.193	0.172	0.409	43.13	14.18	12.64	30.05
	5	0.646	0.245	0.190	0.442	42.42	16.09	12.48	29.02

随着种植年限的延长,盐分离子的组成也发生了变化(表5、表6)。第1年时,土壤中的阴离子以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,平均占到了阴离子总量的31.8%,其次是SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>占28.0%,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>平均只占21.6%;到第5年时,土壤中的阴离子以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,分别占到了30.1%和30.5%,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>所占比例下降到25.6%;从第8年开始,土壤中的阴离子已经是以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,占到了33.5%,第10、12、15年时分别占到了阴离子总量的38.5%、46.1%和46.8%,成为影响土壤含盐量的主要因素;Cl<sup>-</sup>所占比例在13.5%左右,一直呈下降趋势,阴离子组成的变化巨大。阳离子的组成变化不大,Ca<sup>2+</sup>所占比例虽然在不同种植年限间表现出了增减变化,但基本上维持在40%左右,始终是土壤中最主要的阳离子;其次是Na<sup>+</sup>,年际间变幅不大,维持在32%左右;K<sup>+</sup>所占比例在15%左右,始终呈增加趋势;Mg<sup>2+</sup>所占比例在13%左右,始终呈降低趋势。

### 3 讨论

土壤盐分大量积累是日光温室蔬菜生产最主要的特征和限制因子,也是国内外温室栽培中普遍存在的技术难题<sup>[11-13]</sup>。随着种植年限的延长,盐分在土壤中的积累过程和程度则不尽相同。余海英等<sup>[9]</sup>研究表明,设施土壤连续种植到4年左右为盐分累积的高峰期,平均含盐量达到1 861.28 mg·kg<sup>-1</sup>,已超过所种作物的生育障碍临界点;曾希柏等<sup>[14]</sup>研究表明,设施菜地

全盐含量变化的转折点出现在连续种植10年左右;吴凤芝等<sup>[15]</sup>研究表明,大棚土壤总盐量高于露地2.1~13.4倍,施肥技术直接影响盐类的积累。本研究表明,随着种植年限的延长,土壤盐分含量一直是增加的,即便是连续种植15年,含盐量也只达到普通粮田的2.3倍。这与吕福堂等、范亚娜等的研究结论是一致的<sup>[16-17]</sup>,原因主要在于:一是气候条件,兰州地处内陆,半干旱,气候干燥,日照充足,易导致土壤盐表聚;二是兰州的土壤通透性都较好,地下水并没有参与土壤返盐过程;三是蔬菜栽培的茬次频繁程度,施肥的次数和量较低,没有造成土壤盐大量输入;四是栽培习惯,每年6月中旬上茬蔬菜收获结束后至9月上旬下茬蔬菜种植前,有个揭棚晾晒过程,而这三个月正值该地区降雨集中,有一部分土壤盐分被降雨淋出了1 m土层;五是轮作制度,有些农户习惯在正茬蔬菜收获后种植一季甜(糯)玉米或速生型叶菜,吸收了一部分耕层土壤中积累的肥料养分和盐分离离子;六是土壤母质,兰州是石灰性土壤,普通粮田的盐分含量本身就高,致使盐分积累程度的差异并没有那么悬殊。

温室蔬菜施用含硝态氮水溶性肥料,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>大量积累,但由于受施肥种类及其用量的影响,各盐分离子的累积程度有较大差异。余海英等<sup>[18]</sup>研究表明,在温室土壤中除HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>外,其他盐分离子的累积都明显高于露地。李文庆等<sup>[19]</sup>在棕壤、褐土、潮土上的研究表明,设施栽培土壤的盐分离子的积累与土壤类型紧密

相关。沈灵凤等<sup>[20]</sup>的研究表明,随施氮量的增加,土壤剖面硝态氮累积量增加,且土壤硝态氮含量与pH值呈极显著负相关关系。本研究表明,普通粮田改为日光温室种植后,三个地区累积量最大的离子都是 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+$ ,阴离子的累积量显著高于阳离子,与余海英等的研究结论是一致的。曾希柏等、王辉等在不同地区的研究都表明,酸化和盐渍化是设施栽培土壤的共同特征,是一个同时发生的过程<sup>[14,21]</sup>。本研究虽然没有涉及酸化问题,但随着种植年限的延长,土壤中阴离子的组成从以 $\text{HCO}_3^-$ 为主变成了以 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,这两种离子都是致酸离子,肯定会破坏土壤酸碱平衡,导致土壤酸化。阳离子的组成变化不大,都是以 $\text{Ca}^{2+}$ 为主,因为该区是石灰性土壤, $\text{Ca}^{2+}$ 的容量本来就高。但 $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ 却在大幅度增加,主要原因是兰州市日光温室使用的农家肥主要是畜禽肥,在畜禽饲养过程中一般都要在饲料中添加0.3%~0.5%的食盐,导致畜禽粪便中的含盐量本身就高(达 $6.9\sim 41.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),从而造成 $\text{Na}^+$ 的大量积累。同时,农家肥中含有大量的钾,农民为提高蔬菜产量和品质,又大量施用钾肥(以硫酸钾为主),从而造成 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{K}^+$ 的大量积累, $\text{K}^+$ 对作物没有危害,但大量 $\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的存在,是导致日光温室发生次生盐渍化的重要原因<sup>[22-23]</sup>。

土壤盐分积累过多会造成作物根际土壤溶液渗透势下降,从而使作物发芽及根系对水、肥的吸收受到影响,作物会出现明显的生理性干旱和生长不良反应。杨月红等<sup>[24]</sup>认为:一般植物在土壤盐分含量达到 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其正常生长就会受到影响;达到 $2\sim 5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,根系吸水困难;高于 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,植物体内水分易外渗,生长速率显著下降,甚至导致植物死亡。而兰州市日光温室种植区耕层土壤的含盐量在 $2.57\sim 4.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,远远超出了蔬菜正常生长的耐盐极限,作者实地调查中也发现,榆中骆驼巷和皋兰团庄的日光温室种植到8年左右就会普遍出现蔬菜生长不良、土传病害加重等问题,从而导致蔬菜减产甚至绝收。这与土壤次生盐渍化的危害密切相关。 $\text{SO}_4^{2-}$ 是兰州市温室土壤中积累最多的盐分离子之一,平均含量在 $0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,占阴离子总量的30%以上。这种积累不仅会造成 $\text{SO}_4^{2-}$ 的单盐毒害,也可能打破土壤养分平衡,给蔬菜的养分均衡吸收带来影响,最终导致蔬菜产量与品质下降。有资料表明,当 $\text{Cl}^-$ 的含量达到 $0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,便会对蔬菜作物生长产生抑制作用<sup>[25]</sup>。兰州市温室土壤中 $\text{Cl}^-$ 所占比例不高且含量一直下降,但95%采样点的 $\text{Cl}^-$ 含量都超过了 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,虽然这与

土壤母质 $\text{Cl}^-$ 含量高有关,但这对蔬菜生长造成影响是必然的。魏国强等<sup>[26]</sup>、杨秀玲等<sup>[27]</sup>的研究表明, $\text{Na}^+$ 胁迫下黄瓜幼苗株高、地上和地下部鲜重及根冠比等都显著降低;王宝山等<sup>[28]</sup>认为大量 $\text{Na}^+$ 破坏了作物体内的离子平衡,特别是 $\text{Ca}^{2+}$ 的平衡,使得 $\text{Ca}^{2+}$ 介导的CaM调节系统和磷酸醇调节系统失调,细胞代谢紊乱甚至伤害死亡。而兰州市温室土壤中 $\text{Na}^+$ 含量一直呈增加趋势,第8年时已超过了 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占阳离子总量的比例也始终在30%以上,必然会对蔬菜的生长造成严重影响。

#### 4 结论

(1)兰州市日光温室含盐量与普通粮田、露地蔬菜相比明显增加,区域间盐分含量变异较大。

(2)普通粮田改为日光温室种植后,不同层次的土壤可溶性盐分都有大幅度增加,榆中骆驼巷和皋兰团庄土体通透性好,剖面含盐量随土层深度增加而下降,红古金沙台由于有红胶泥层的阻碍,导致盐分在上层和下层都有聚集。

(3)随着种植年限的延长,日光温室耕层土壤盐分含量持续增加,累积量最大的离子是 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+$ ,阴离子累积量显著高于阳离子,阴离子组成从以 $\text{HCO}_3^-$ 为主变成了以 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,阳离子组成始终以 $\text{Ca}^{2+}$ 为主,但 $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ 的含量在大幅度增加。

(4)兰州市日光温室的土壤 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 形成相对富集,已达到会造成单盐毒害、打破土壤养分平衡、影响蔬菜品质的程度,更会潜在污染地下水,故必须引起重视。

#### 参考文献:

- [1] 柴银军. 兰州市蔬菜产业化问题与对策研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2013: 13-27.  
CHAI Yin-jun. Vegetable industrialization problems and countermeasures of Lanzhou City[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013: 13-27.
- [2] 郭文忠, 刘声锋, 李丁仁, 等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤, 2004, 36(1): 25-29.  
GUO Wen-zhong, LIU Sheng-feng, LI Ding-ren, et al. Mechanism of soil salinization in protected cultivation[J]. *Soils*, 2004, 36(1): 25-29.
- [3] 张学军, 任发春, 赵营, 等. 引黄灌区设施菜田硝态氮淋失的季节性特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1964-1972.  
ZHANG Xue-jun, REN Fa-chun, ZHAO Ying, et al. Seasonal changes of nitrate leaching in greenhouse vegetable field in Yellow River irrigation region of Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1964-1972.

- [4] 李瑞琴, 于安芬, 白滨, 等. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 103-110.  
LI Rui-qin, YU An-fen, BAI Bin, et al. Analysis on current situation and potential ecological risk and the characteristic of heavy metals pollution of soil in the central plateau of Gansu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 103-110.
- [5] 冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 设施园艺土壤的盐化与治理对策[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 111-114.  
FENG Yong-jun, CHEN Wei-feng, ZHANG Lei-na, et al. Soil salinization and countermeasures in protected horticulture[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2001, 17(2): 111-114.
- [6] 李廷轩, 张锡洲, 王昌全, 等. 保护地土壤次生盐渍化研究进展[J]. 西南农业学报, 2001, 14(增刊): 103-105.  
LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, WANG Chang-quan, et al. Progress in the study on soil salinization of protected farmland[J]. *Southwest China Journal Agricultural Sciences*, 2001, 14(Suppl): 103-105.
- [7] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(2): 159-162.  
TONG You-wei, CHEN Dan-fei. Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouse[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1991, 18(2): 159-162.
- [8] 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.  
LU Ru-kong. Analytical method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [9] 余海英, 李廷轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571-576.  
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHOU Jian-min. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 571-576.
- [10] 董元华, 张桃林. 基于农产品质量安全的土壤资源管理与可持续利用[J]. 土壤, 2003, 35(3): 182-186.  
DONG Yuan-hua, ZHANG Tao-lin. Sustainable management of soil resources for food safety[J]. *Soils*, 2003, 35(3): 182-186.
- [11] 蒋卫杰, 邓杰, 余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3515-3523.  
JIANG Wei-jie, DENG Jie, YU Hong-jun. Development situation, problems and suggestions on industrial development of protected horticulture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3515-3523.
- [12] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 43-52.  
GUO Shi-rong, SUN Jin, SHU Sheng, et al. General situations, characteristics and trends of protected horticulture in foreign[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(5): 43-52.
- [13] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 1-14.  
GUO Shi-rong, SUN Jin, SHU Sheng, et al. Analysis of general situation, characteristics, existing problems and development trend of protected horticulture in China[J]. *China Vegetable*, 2012(18): 1-14.
- [14] 曾希柏, 白玲玉, 苏世鸣, 等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1853-1859.  
ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, SU Shi-ming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1853-1859.
- [15] 吴凤芝, 刘德, 王东凯, 等. 大棚蔬菜连作年限对土壤主要理化性状的影响[J]. 中国蔬菜, 1998(4): 5-8.  
WU Feng-zhi, LIU De, WANG Dong-kai, et al. Effect of continuous vegetable cropping in plastic greenhouse on the soil physicochemical properties[J]. *China Vegetable*, 1998(4): 5-8.
- [16] 吕福堂, 司东霞. 日光温室土壤盐分积累及离子组成变化的研究[J]. 土壤, 2004, 36(2): 208-210.  
LÜ Fu-tang, SI Dong-xia. Study on soil salinity accumulating and ion constitution changing of sunlight greenhouse[J]. *Soils*, 2004, 36(2): 208-210.
- [17] 范亚娜, 赵国栋. 陇东地区设施蔬菜连作土壤性质变化趋势[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 116-119.  
FAN Ya-na, ZHAO Guo-dong. Changing trend of soil physical and chemical properties under continuous vegetable cultivation in Longdong region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 116-119.
- [18] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642-650.  
YU Hai-ying, LI Ting-xuan, ZHOU Jian-min. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profile[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 642-650.
- [19] 李文庆, 李光德, 骆洪义. 大棚栽培对盐分状况影响的研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 1995, 26(2): 165-169.  
LI Wen-qing, LI Guang-de, LUO Hong-yi. Effect of greenhouse usage on soil salt[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Sci)*, 1995, 26(2): 165-169.
- [20] 沈灵凤, 白玲玉, 曾希柏, 等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1350-1356.  
SHEN Ling-feng, BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, et al. Effects of fertilization on  $\text{NO}_3^-$ -N accumulation in greenhouse soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1350-1356.
- [21] 王辉, 董元华, 安琼, 等. 高度集约化利用下蔬菜地土壤酸化及次生盐渍化研究: 以南京市南郊为例[J]. 土壤, 2005, 37(5): 530-533.  
WANG Hui, DONG Yuan-hua, AN Qiong, et al. Change in pH and salinity of vegetable soil under intensive cultivation: A case study of southern suburbs of Nanjing[J]. *Soils*, 2005, 37(5): 530-533.
- [22] 姚丽贤, 周修冲. 有机肥对环境的影响及预防研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 113-115.  
YAO Li-xian, ZHOU Xiu-chun. Effect of organic fertilizer on environment and prevention[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 113-115.
- [23] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 不同废弃物对设施菜地次生盐渍化土壤的修复效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 737-743.  
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, GUO Chun-xia, et al. Reclamation of secondary salinized soils in protected vegetable fields using different wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 737-743.

- [24] 杨月红,孙庆艳,沈浩.植物的盐害和抗盐性[J].生物学教学,2002,27(11):1-2.  
YANG Yue-hong, SUN Qing-yan, SHEN Hao. Salt injury and salt resistance of plant[J]. *Biology Teaching*, 2002, 27(11):1-2.
- [25] 谢建昌,陈际型.菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥[M].南京:河海大学出版社,1997:43-46.  
XIE Jian-chang, CHEN Ji-xing. Soil fertility and fertilization of vegetable soils[M]. Nanjing:Hehai University Press, 1997:43-46.
- [26] 魏国强,朱祝军,方学智,等. NaCl胁迫对不同品种黄瓜幼苗生长、叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响[J].中国农业科学,2004,37(11):1754-1759.  
WEI Guo-qiang, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi, et al. The Effects of NaCl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedlings of two cucumber cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11):1754-1759.
- [27] 杨秀玲,郁继华,李雅佳,等. NaCl胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J].甘肃农业大学学报,2004,39(1):6-9.  
YANG Xiu-ling, YU Ji-hua, LI Ya-jia, et al. Effects of NaCl stress seed germination and seedling growth of *Cucumis sativus*[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(1):6-9.
- [28] 王宝山,赵可夫. NaCl胁迫下玉米黄化苗质外体和共质体 Na<sup>+</sup>与 Ca<sup>2+</sup>浓度的变化[J].作物学报,1997,23(1):27-33.  
WANG Bao-shan, ZHAO Ke-fu. Changes in Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> concentrations in the apoplast and symplast of the etiolated corn seedlings under NaCl Stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(1):27-33.