

# 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成

黄绍文<sup>1</sup>, 高伟<sup>2</sup>, 唐继伟<sup>1\*</sup>, 李春花<sup>1</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081;

2 天津市农业资源与环境研究所, 天津 300380)

**摘要:**【目的】评价全国主要菜区温室、大棚和露地菜田土壤盐分及离子组成状况, 为土壤次生盐渍化防治、蔬菜合理施肥和土壤可持续利用提供一定的理论依据。【方法】在我国北方 3 个区域(东北、华北、西北地区)和南方 4 个区域(华中、西南、华东、华南地区)主要蔬菜种植区不同栽培方式典型菜田耕层土壤展开调查, 共采集 501 个土壤样品, 分析了盐分总量及其离子组成。【结果】1) 全国主要菜区设施(温室和大棚)菜田土壤盐分总量及其各离子含量( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )均显著高于露地菜田土壤, 盐分总量平均高 69.3%, 离子组成增加幅度在 36.2%~170.0%之间。2) 设施菜田土壤次生盐渍化的土样数比例显著高于露地菜田土壤, 但设施菜田土壤盐化程度总体上较轻, 居于轻度盐化水平的比例占 38.2%, 处于中度盐化以上水平的比例仅占 4.7%。3) 设施菜田土壤盐分总量及主要盐分离子( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ )含量积累总体上随种植年限的延长呈先增后降并趋于平缓的变化趋势, 在连续种植 5~6 年时达到高峰期, 之后因采取的各种管理措施而有所降低, 但仍显著高于露地菜田土壤。4) 设施菜田土壤盐分离子组成以 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主, 其次是 $\text{Ca}^{2+}$ , 分别占盐分总量的 27.9%、26.9%和 15.3%。露地菜田土壤主要盐分离子组成总体上是 $\text{SO}_4^{2-}$ > $\text{NO}_3^-$ > $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ , 分别平均占盐分总量的 29.0%、21.1%、16.1%和 14.1%, 但西北地区露地菜田土壤盐分离子组成以 $\text{HCO}_3^-$ 为主, 其次是 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 。【结论】设施菜田土壤次生盐渍化的土样数比例虽然显著高于露地菜田土壤, 但土壤盐化程度总体上较轻, 盐分离子主要是 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量大于 $\text{Ca}^{2+}$ 含量; 露地菜田主要盐分离子是 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ , 含量为 $\text{SO}_4^{2-}$ > $\text{NO}_3^-$ > $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 。

**关键词:** 主要菜区; 栽培方式; 土壤盐分; 盐分离子组成

中图分类号: S606<sup>+</sup>.1; S155.4<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)04-0965-13

## Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China

HUANG Shao-wen<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>2</sup>, TANG Ji-wei<sup>1\*</sup>, LI Chun-hua<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** 【Objectives】The investigation on the total salt content and the main ions will provide a scientific basis for prevention and remediation of secondary soil salinization caused by fertilization in vegetable production. 【Methods】In this study, 501 representative soil samples in plow layers were collected from the main vegetable production regions in the Northeastern, North, Northwestern, Southwestern, Central, East and South China. The total salt content and the ratio of main salt ions  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in the samples were analyzed. 【Results】1) The contents of total salt and individual salt ions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ ) in the vegetable soils of greenhouse (with back wall and without back wall) were 69.3%, 36.2% to 170% higher than those in open fields ( $P < 0.05$ ), respectively. 2) The percentage of soil samples with

收稿日期: 2015-01-07 接受日期: 2015-03-24 网络出版日期: 2015-12-08

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-11); 国家重点研发计划项目(2016YFD0201000); 公益性行业(农业)科研专项(201203095)资助。

作者简介: 黄绍文(1964—), 男, 湖南桃源人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事蔬菜营养与高效安全施肥研究。

Tel: 010-82108662, E-mail: huangshaowen@caas.cn. 高伟与第一作者同等贡献 E-mail: vivigao2002@163.com

\* 通信作者 Tel: 010-82108662, E-mail: tangjiwei@163.com

total salt contents beyond the critical value of secondary salinization (soil total salt content  $\geq 2$  g/kg) in the greenhouse vegetable fields was distinctly higher than in the open fields. The greenhouse vegetable fields were still in generally light degree of salinity, 38.2% of them belong to light salinity (2–5 g/kg), and 4.7% belong to medium and above medium salinity ( $\geq 5$  g/kg). 3) The total salt contents and main ion composition ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$ ) in greenhouse vegetable soils tended to accumulate fast at first, and reached peaks in the 5th to 6th year of vegetable production, then slowed down and kept stable. 4) In greenhouse vegetable fields,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  were the dominant ions, averagely accounting for 27.9% and 26.9% of the total salt content, respectively. The contribution of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  to the total salt content varied in different greenhouse vegetable production regions.  $\text{Ca}^{2+}$  was the second main contributor to the total salt contents, averagely accounting for 15.3%. In the open fields, the major salt ions were  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ , their contribution to the total salt contents was generally in order of:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ , the  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  contents accounted for 29.0%, 21.1%, 16.1% and 14.1% of the total salt content, respectively. In Northwestern China,  $\text{HCO}_3^-$  was the major salt ion in open vegetable soils, followed by  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ . **【Conclusions】** Although the percentage of soil samples with total salt contents beyond the critical value of secondary salinization was distinctly higher in greenhouse than in the open vegetable fields, the greenhouse vegetable fields were still in generally light degree of salinity. The major salt ions contribution to the total salt contents was generally in order of:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+}$  for the greenhouse vegetable fields, and  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  for the open vegetable fields.

**Key words:** main vegetable production regions; land use patterns; soil total salt; salt ion composition

蔬菜生产高度集约化,其特殊的生态环境与不合理的肥水管理措施常导致土壤的次生盐渍化、酸化、养分比例失调等问题<sup>[1-5]</sup>。设施菜田土壤盐分积累及障碍问题方面已有许多报道<sup>[6-7]</sup>。余海英等<sup>[8]</sup>对山东、辽宁、江苏和四川的调查发现,设施菜田表面均有大面积白色盐霜出现,40%~89%的土壤含盐量超过了蔬菜正常生长的临界浓度(EC值  $> 0.50$  mS/cm);土壤盐分阴离子以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主,阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  为主。杨业凤等<sup>[9]</sup>研究指出,上海浦东新区设施菜田已有 60% 轻度盐化,26% 中度盐化;土壤盐分离子组成以  $\text{NO}_3^-$  为主,其次是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。艾天成等<sup>[10]</sup> 研究报道,武汉市郊设施菜田土壤居于轻度和中度盐化水平的比例分别占 53% 和 21%,盐分离子以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的相对富集为主要特征。Shi 等<sup>[11]</sup> 对长江三角洲地区的抽样调查显示,设施菜田土壤有近 1/3 出现次生盐渍化,连续种植 4 年以上的土壤就有可能发生次生盐渍化。陈碧华等<sup>[12]</sup> 研究表明,大棚菜田土壤水溶性盐总量上升幅度与种植年限之间呈极显著相关( $r=0.92^{**}$ )。设施菜田土壤中阴离子一般以  $\text{NO}_3^-$  为主,设施内高温高湿为土壤硝化作用创造了条件,过量施用氮肥会导致土壤中  $\text{NO}_3^-$  的积累<sup>[13]</sup>,施钾肥时偏重硫酸钾导致  $\text{SO}_4^{2-}$  在土壤中残留严重<sup>[14]</sup>。土壤盐分的积累以及某些离子的相对富集在一定程

度上导致了土壤环境质量的恶化,引起蔬菜生理性干旱、代谢紊乱,土壤次生盐渍化已成为制约设施蔬菜生产的主要障碍因子。

虽然各地菜田土壤盐分及离子组成特征有许多相似之处,由于生态条件、栽培方式、栽培制度、施肥等方面的差异,其土壤盐分及离子组成状况并不一致。为此,2013 年国家大宗蔬菜产业技术体系开展了全国主要菜区土壤盐分及离子组成状况的普查工作,为全国主要菜区肥料资源合理配置和开展测土配方施肥提供了基础,对于我国蔬菜产业可持续发展具有至关重要的意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土壤样品采集

调查范围包括北方 3 个区域(东北、华北和西北地区)和南方 4 个区域(华中、西南、华东和华南地区)。调查对象为温室(有后墙)、大棚(无后墙)和露地菜田 3 种栽培方式。土壤样品由国家大宗蔬菜产业技术体系 34 个综合试验站负责采取,从每个示范基地县选择代表性栽培方式和栽培制度下 3~4 个典型菜田作为取样地块(每个综合试验站 3~5 个示范基地县,1 个地块 1 个混合样),每个试验站采取 15 个左右耕层土壤样品。取样时间是作物收获后或蔬菜施肥前或生长后期。取样方法是在地块

内按 S 形布点或梅花形布点(要避开路边、田埂、沟边、肥堆等特殊部位),用不锈钢或木质或塑料工具采取耕层 0—20 cm 土壤样品。从全国主要菜区共采取 501 个耕层土壤样品,其中温室、大棚和露

地菜田土壤样品数分别为 112、155 和 234 个;不同栽培方式下各区域土壤样品数目见表 1。土壤样品风干,磨碎,过筛(2 mm 用于土壤 pH 与盐分总量及离子组成测定,1 mm 用于土壤电导率测定),备用。

表 1 不同地区不同栽培方式菜田土壤样品数目  
Table 1 Number of soil samples collected under different land use patterns in the main vegetable production regions of China

栽培方式 Land use patterns	东北 Northeastern	华北 North	西北 Northwestern	华中 Central	西南 Southwestern	华东 East	华南 South
温室 GHW	23	64	14	0	3	8	0
大棚 GH	20	38	4	22	9	58	4
露地 Open field	20	37	22	43	25	40	47
合计 Sum	63	139	40	65	37	106	51

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall.

## 1.2 土壤样品分析

采用无 CO<sub>2</sub> 蒸馏水,按土水比 1:5,翻滚振荡 3 min,过滤,得到清亮滤液(如不清亮,需抽滤)。土壤电导率用电导仪法测定(直接用土壤浸出液的电导率来表示土壤水溶性盐总量)。土壤盐离子 K、Na 采用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 做掩蔽剂,原子吸收分光光度计法测定; Ca、Mg 采用 LaCl<sub>3</sub> 做掩蔽剂,原子吸收分光光度计法测定; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 用双波长紫外分光光度法

测定; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 采用 EDTA 间接络合滴定法测定; Cl<sup>-</sup> 采用硝酸银滴定法测定; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 采用双指示剂—中和滴定法测定<sup>[15]</sup>。土壤盐分总量采用离子加和法计算。

土壤 pH 用 2.5:1 水土比,酸度计法测定<sup>[15]</sup>。

## 1.3 土壤盐分分级指标

菜田土壤盐分总量、氯化物含量和硫酸盐含量分级参考标准见表 2<sup>[9-10, 16]</sup>。

表 2 菜田土壤盐化分级参考指标  
Table 2 Grade of salinity in vegetable soils

土壤盐化等级 Salinity grade	非盐化 No salinity	轻度 Light	中度 Medium	重度 Heavy	盐土 Saline
盐分总量 Total salt content (g/kg)	<2	2~5	5~7	7~10	≥10
氯化物含量 Cl <sup>-</sup> (%)	<0.02	0.02~0.04	0.04~0.1	0.1~0.2	≥0.2
硫酸盐含量 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	≥0.6

## 1.4 数据处理

本研究采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件进行数据分析。

1) 全国主要菜区温室土壤样本数大于 10 个的区域为北方 3 个地区(东北、华北和西北),大棚土壤样本数大于 10 个的区域为东北、华北、华中和华东 4 个地区,本研究 7 个区域露地土壤样本数均大于 10 个(表 1)。对不同栽培方式下区域的土壤样本数小于 10 个的各测试项目不做统计。

2) 土壤某一盐化水平的比例指某一盐化水平下土样数占总土样数的百分数。

3) 土壤某一盐离子比例 = 某一盐离子含量/盐分总量 × 100%<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培方式菜田土壤盐分及离子组成状况

2.1.1 不同栽培方式菜田土壤盐分总量和电导率状况 表 3 和表 4 表明,温室和大棚菜田土壤盐分总量显著高于露地菜田土壤,居于轻度盐化水平的比例较大,露地菜田土壤盐分总量普遍处于非盐化水平。温室和大棚土壤盐分总量分别平均为 2.18 和 2.12 g/kg,较露地土壤(平均 1.27 g/kg)分别平均高 71.7% 和 66.9%。温室和大棚土壤盐分总量处于非盐化水平(< 2 g/kg)的比例分别为 56.3% 和 58.1%,而露地土壤为 86.3%;温室和大棚土壤盐分总量处于轻度盐化水平(2~5 g/kg)的比例分

表 3 不同栽培方式菜田土壤盐分总量和电导率的统计特征值

Table 3 Total salt content and electric conductivity (EC) of soils under different land use patterns

栽培方式 Land use pattern	样本数 Sample No.	电导率 EC( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		盐分总量 Total salt content (g/kg)	
		范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
温室 GHW	112	83.6 ~ 1950.0	494.7 $\pm$ 364.9 a	0.60 ~ 6.72	2.18 $\pm$ 1.23 a
大棚 GH	155	58.9 ~ 2690.0	510.2 $\pm$ 441.3 a	0.36 ~ 7.39	2.12 $\pm$ 1.44 a
露地 Open field	234	30.3 ~ 1121.0	219.1 $\pm$ 165.6 b	0.33 ~ 8.60	1.27 $\pm$ 0.89 b
总平均 Mean		30.3 ~ 2690.0	370.8 $\pm$ 350.1	0.33 ~ 8.60	1.74 $\pm$ 1.24

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall. 同列数据后不同字母表示不同栽培方式间差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different among the land use patterns ( $P < 0.05$ ).

表 4 不同栽培方式菜田土壤盐化分级的频率分布 (%)

Table 4 Distribution of frequency in salinity grades of vegetable soil under different land use patterns

栽培方式 Land use pattern	样本数 Sample No.	土壤盐分总量 Soil total salt content(g/kg)				
		<2 (非盐化 No salinity)	2~5 (轻度 Light)	5~7 (中度 Medium)	7~10 (重度 Heavy)	$\geq 10$ (盐土 Saline)
温室 GHW	112	56.3	40.2	3.5	0.0	0.0
大棚 GH	155	58.1	36.1	5.2	0.6	0.0
露地 Open field	234	86.3	12.9	0.4	0.4	0.0
总平均 Mean		70.9	26.1	2.6	0.4	0.0

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall.

别为 40.2% 和 36.1%，较露地土壤分别高 27.3 和 23.2 个百分点；温室和大棚土壤盐分总量处于轻度盐化以上水平 ( $> 2 \text{ g/kg}$ ) 的比例分别为 43.7% 和 41.9%，较露地土壤分别高 30.0 和 28.3 个百分点。

土壤电导率与盐分总量的变化趋势相同，因此土壤含盐量高低可以通过土壤电导率来衡量。从表 3 可以看出，设施菜田土壤电导率均显著高于露地菜田土壤。温室和大棚土壤电导率分别平均为 494.7 和 510.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，较露地土壤（平均 219.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）均高 1.3 倍。为进一步明确菜田土壤电导

率与盐分总量的关系，通过回归分析建立了土壤 EC (x) 与盐分总量 (y) 关系模型，其函数表达式如下：

$$y = 0.6454 + 0.0029x$$

$$(n = 501, r = 0.83^{**})$$

r 值显示土壤电导率与盐分总量之间几近直线相关，可用 EC 来估算菜田土壤盐分状况。根据菜田土壤盐分总量分级标准，利用全国主要菜区土壤盐分总量与 EC 关系模型，可估算出菜田土壤 EC 分级参考指标 (表 5)。

表 5 基于全国主要菜区土壤 EC(x) 与盐分总量 (y) 关系模型计算的菜田土壤 EC 值

Table 5 Electric conductivity calculated with correlation formula between EC(x) and total salt contents(y) in main vegetable production regions of China

项目 Item	非盐化 No salinity	轻度盐化 Light	中度盐化 Medium	重度盐化 Heavy	盐土 Saline
土壤盐分总量 (g/kg) Soil total salt content	<2	2~5	5~7	7~10	$\geq 10$
估算的 EC (mS/cm) Estimated EC	<0.5	0.5~1.5	1.5~2.2	2.2~3.2	$\geq 3.2$

据报道,当电导率达到 0.5 mS/cm 时,茄果类蔬菜作物的正常生长就会受到抑制<sup>[8, 18]</sup>。而本研究已有 34.9% 的设施菜田土壤电导率达 0.5 mS/cm (露地菜田土壤为 6.0%),已有 8.9% 的设施菜田土壤电导率达 1.5 mS/cm 以上(中度盐化以上水平),如不加以控制,势必给设施蔬菜生产造成更为严重以及更大范围的危害。

### 2.1.2 不同栽培方式菜田土壤盐分离子组成状况

设施菜田土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量均显著高于露地菜田土壤,增加幅

度在 36.2%~1.7 倍之间,而不同栽培方式菜田间的土壤  $\text{HCO}_3^-$  含量差异不显著(表 6)。温室和大棚土壤  $\text{NO}_3^-$  含量较露地土壤平均分别高 1.6 和 1.4 倍,土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较露地土壤平均分别高 36.2% 和 39.7%,土壤  $\text{Cl}^-$  含量较露地土壤平均分别高 42.5% 和 73.5%,土壤  $\text{Na}^+$  含量较露地土壤平均分别高 1.7 和 1.1 倍,土壤  $\text{K}^+$  含量较露地土壤平均分别高 1.7 倍和 86.5%,土壤  $\text{Ca}^{2+}$  含量较露地土壤平均分别高 49.3% 和 63.9%,土壤  $\text{Mg}^{2+}$  含量较露地土壤平均分别高 1.4 和 1.1 倍。

表 6 不同栽培方式菜田土壤各盐分离子含量及比例

Table 6 Ion contents and proportions in total salt content in vegetable soils under different land use patterns

离子 Ion	离子含量 Ion content (g/kg)			比例 Proportion (%)		
	温室 GHW	大棚 GH	露地 Open field	温室 GHW	大棚 GH	露地 Open field
$\text{NO}_3^-$	0.677 ± 0.576 a	0.613 ± 0.676 a	0.256 ± 0.251 b	29.1 ± 13.4	26.6 ± 13.9	21.1 ± 13.1
$\text{HCO}_3^-$	0.158 ± 0.080 a	0.138 ± 0.061 a	0.142 ± 0.081 a	9.4 ± 6.8	9.8 ± 7.5	14.1 ± 9.7
$\text{SO}_4^{2-}$	0.594 ± 0.454 a	0.609 ± 0.627 a	0.436 ± 0.586 b	26.5 ± 13.5	27.2 ± 15.5	29.0 ± 16.6
$\text{Cl}^-$	0.161 ± 0.129 b	0.196 ± 0.168 a	0.113 ± 0.080 c	7.8 ± 3.8	10.1 ± 5.7	10.6 ± 5.9
$\text{Na}^+$	0.113 ± 0.110 a	0.089 ± 0.089 b	0.042 ± 0.053 c	5.4 ± 4.5	4.7 ± 4.9	3.9 ± 4.9
$\text{K}^+$	0.098 ± 0.105 a	0.069 ± 0.086 b	0.037 ± 0.042 c	4.7 ± 3.4	3.5 ± 3.1	3.3 ± 3.6
$\text{Ca}^{2+}$	0.327 ± 0.217 a	0.359 ± 0.289 a	0.219 ± 0.188 b	14.6 ± 4.3	15.9 ± 5.1	16.1 ± 5.2
$\text{Mg}^{2+}$	0.052 ± 0.028 a	0.046 ± 0.033 a	0.022 ± 0.017 b	2.5 ± 0.9	2.3 ± 0.9	1.8 ± 1.0

注 (Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall. 同行数值后不同字母表示不同栽培方式间差异显著 Values followed by different letters in a row are significantly different among the land use patterns ( $P < 0.05$ ).

设施菜田土壤盐分离子组成以  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,其次是  $\text{Ca}^{2+}$ ,而露地菜田土壤盐分离子组成主要是  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  (表 6)。温室和大棚土壤  $\text{NO}_3^-$  含量较  $\text{SO}_4^{2-}$  含量平均分别高 14.0% 和 0.7%,温室土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量占土壤盐分总量的比例平均分别为 29.1%、26.5% 和 14.6%,大棚土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量占土壤盐分总量的比例平均分别为 26.6%、27.2% 和 15.9%,而露地土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较  $\text{NO}_3^-$  含量平均高 70.3%,土壤  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量占土壤盐分总量的比例平均分别为 29.0%、21.1%、16.1% 和 14.1%。值得指出的是,温室和大棚菜田土壤  $\text{NO}_3^-$  含量所占比例高于露地菜田土壤,而  $\text{HCO}_3^-$  含量所占比例低于露地菜田土壤。

由表 7 和表 8 可见,设施菜田土壤  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  盐化的土样数比例均显著高于露地菜田土壤。温室和大棚土壤  $\text{Cl}^-$  含量处于轻度盐化水平(0.02%~

0.04%) 的比例分别为 12.5% 和 15.5%,较露地土壤分别高 6.9 和 9.9 个百分点;温室和大棚土壤  $\text{Cl}^-$  含量处于轻度盐化以上水平( $>0.02%$ ) 的比例分别为 17.9% 和 27.1%,较露地土壤分别高 10.2 和 19.4 个百分点。

温室和大棚土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量居于轻度盐化水平(0.1%~0.3%) 的比例分别为 17.9% 和 18.7%,较露地土壤分别高 9.3 和 10.1 个百分点;温室和大棚土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量居于轻度盐化以上水平( $>0.1%$ ) 的比例分别为 17.9% 和 20.6%,较露地土壤分别高 8.5 和 11.2 个百分点。

2.1.3 不同栽培方式菜田土壤各盐分离子与盐分总量间的关系 表 9 显示,温室和大棚土壤各盐分离子含量与盐分总量之间的相关系数分别在 0.54~0.89 和 0.41~0.94 之间, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量与盐分总量之间的相关程度较大,温室土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量与盐分总量之间的相关系

数分别为 0.85、0.71 和 0.89, 大棚土壤分别为 0.81、0.68 和 0.94。露地菜田土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量与盐分总量之间均呈极显著正相关, 相关系数在 0.48 ~ 0.95 之间, 以  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的相关程度较大, 相关系数分别为 0.90 和 0.95, 而

$\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  含量与盐分总量之间无相关性。根据所建立的模型(表 9), 在测定菜田土壤盐分总量后, 可对菜田土壤主要盐分离子含量进行预测; 在测定菜田土壤某一主要盐分离子含量后, 也可对菜田土壤盐分总量进行预测。

表 7 不同栽培方式菜田土壤氯化物含量分级的频率分布 ( $\text{Cl}^-$ , %)

Table 7 Distribution of frequency of  $\text{Cl}^-$  content in vegetable soils under different land use patterns

栽培方式 Land use pattern	非盐化 No salinity ( $\text{Cl}^- < 0.02\%$ )	轻度盐化 Light salinity ( $\text{Cl}^- 0.02\% \sim 0.04\%$ )	中度盐化 Medium salinity ( $\text{Cl}^- 0.04\% \sim 0.1\%$ )	重度盐化 Heavy salinity ( $\text{Cl}^- 0.1\% \sim 0.2\%$ )	盐土 Saline ( $\text{Cl}^- \geq 0.2\%$ )
温室 GHW	82.1	12.5	5.4	0.0	0.0
大棚 GH	72.9	15.5	11.6	0.0	0.0
露地 Open field	92.3	5.6	2.1	0.0	0.0
总平均 Mean	84.0	10.2	5.8	0.0	0.0

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall.

表 8 不同栽培方式菜田土壤硫酸盐含量分级的频率分布 ( $\text{SO}_4^{2-}$ , %)

Table 8 Distribution of frequency of  $\text{SO}_4^{2-}$  content in vegetable soils under different patterns of land use

栽培方式 Land use pattern	非盐化 No salinity ( $\text{SO}_4^{2-} < 0.1\%$ )	轻度盐化 Light salinity ( $\text{SO}_4^{2-} 0.1\% \sim 0.3\%$ )	中度盐化 Medium salinity ( $\text{SO}_4^{2-} 0.3\% \sim 0.4\%$ )	重度盐化 Heavy salinity ( $\text{SO}_4^{2-} 0.4\% \sim 0.6\%$ )	盐土 Saline ( $\text{SO}_4^{2-} \geq 0.6\%$ )
温室 GHW	82.1	17.9	0.0	0.0	0.0
大棚 GH	79.4	18.7	1.3	0.6	0.0
露地 Open field	90.6	8.6	0.0	0.4	0.4
总平均 Mean	85.2	13.8	0.4	0.4	0.2

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall.

表 9 不同栽培方式菜田土壤盐分离子含量(x)与盐分总量(y)间的关系模型

Table 9 Linear regression of individual ion content (x) with total salt contents (y) in vegetable soils under different land use patterns

离子 Ion	温室 GHW (n = 112)	大棚 GH (n = 155)	露地 Open field (n = 234)
$\text{NO}_3^-$	$y = 0.9503 + 1.8179x$ (0.85**)	$y = 1.0624 + 1.7241x$ (0.81**)	$y = 0.8318 + 1.7028x$ (0.48**)
$\text{SO}_4^{2-}$	$y = 1.0267 + 1.9433x$ (0.71**)	$y = 1.1729 + 1.5537x$ (0.68**)	$y = 0.6757 + 1.3564x$ (0.90**)
$\text{Cl}^-$	$y = 1.2128 + 6.0183x$ (0.63**)	$y = 1.0981 + 5.2045x$ (0.61**)	
$\text{Na}^+$	$y = 1.4017 + 6.8692x$ (0.62**)	$y = 1.5288 + 6.6562x$ (0.41**)	
$\text{K}^+$	$y = 1.5636 + 6.2701x$ (0.54**)	$y = 1.5403 + 8.3598x$ (0.50**)	
$\text{Ca}^{2+}$	$y = 0.5178 + 5.081x$ (0.89**)	$y = 0.4452 + 4.6687x$ (0.94**)	$y = 0.2811 + 4.5055x$ (0.95**)
$\text{Mg}^{2+}$	$y = 0.4821 + 32.55x$ (0.75**)	$y = 0.5001 + 35.184x$ (0.80**)	$y = 0.5422 + 32.523x$ (0.62**)

注(Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall; 括号内为相关系数 Inside brackets are the r values; \*\* —  $P < 0.01$ .

2.1.4 设施菜田土壤盐分及离子组成的年际变化特点 温室和大棚土壤盐分总量及主要盐分离子 ( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ ) 含量总体上在连续种植 5 ~ 6

年达到高峰期(表 10), 不同种植年限设施菜田土壤盐分总量在 1.61 ~ 2.52 g/kg 之间, 平均 2.03 g/kg; 连续种植 5 ~ 6 年的菜田土壤盐分总量平均为 2.52

g/kg,较连续种植3~4年和7~8年的分别平均高14.0%和21.2%。

不同种植年限设施菜田土壤主要盐离子 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量分别在0.38~0.72、0.41~0.74和0.22~0.43 g/kg之间,平均分别为0.56、0.57和0.34 g/kg;设施菜田连续种植5~6年的土壤 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量平均分别为0.72、0.74和0.43 g/kg,较连续种植3~4年的平均分别

高20.0%、4.2%和19.4%,较连续种植7~8年的平均分别高16.1%、42.3%和7.5%。而不同种植年限设施菜田土壤 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量变化无明显规律,分别在0.14~0.17、0.15~0.21、0.08~0.13、0.06~0.12和0.04~0.06 g/kg之间,平均分别为0.15、0.18、0.10、0.08和0.05 g/kg。

表10 不同栽培年限设施蔬菜土壤盐分总量及各盐离子含量(g/kg)

Table 10 Individual ion and total salt contents of greenhouse soils with different vegetable production years

项目 Item	设施蔬菜种植年限 Greenhouse vegetable production years							
	≤2 (n = 16)	3~4 (n = 44)	5~6 (n = 38)	7~8 (n = 29)	9~10 (n = 42)	11~12 (n = 15)	13~14 (n = 13)	≥15 (n = 70)
盐分总量 Total salt	2.10 ± 1.28	2.21 ± 1.25	2.52 ± 1.48	2.08 ± 1.47	1.90 ± 1.33	2.01 ± 1.25	1.61 ± 1.10	1.81 ± 1.40
$\text{NO}_3^-$	0.65 ± 0.90	0.60 ± 0.50	0.72 ± 0.60	0.62 ± 0.53	0.50 ± 0.46	0.59 ± 0.48	0.44 ± 0.33	0.38 ± 0.36
$\text{HCO}_3^-$	0.16 ± 0.08	0.15 ± 0.08	0.14 ± 0.05	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.07	0.17 ± 0.06	0.14 ± 0.09	0.14 ± 0.06
$\text{SO}_4^{2-}$	0.56 ± 0.39	0.71 ± 0.75	0.74 ± 0.54	0.52 ± 0.42	0.60 ± 0.72	0.57 ± 0.48	0.41 ± 0.34	0.42 ± 0.32
$\text{Cl}^-$	0.20 ± 0.15	0.17 ± 0.15	0.21 ± 0.19	0.17 ± 0.15	0.15 ± 0.12	0.15 ± 0.11	0.15 ± 0.14	0.20 ± 0.17
$\text{Na}^+$	0.09 ± 0.09	0.09 ± 0.09	0.11 ± 0.14	0.09 ± 0.08	0.10 ± 0.10	0.08 ± 0.09	0.13 ± 0.12	0.10 ± 0.09
$\text{K}^+$	0.06 ± 0.07	0.07 ± 0.06	0.12 ± 0.14	0.07 ± 0.07	0.08 ± 0.10	0.09 ± 0.13	0.10 ± 0.09	0.08 ± 0.09
$\text{Ca}^{2+}$	0.35 ± 0.24	0.36 ± 0.22	0.43 ± 0.26	0.40 ± 0.31	0.28 ± 0.21	0.31 ± 0.21	0.22 ± 0.18	0.34 ± 0.30
$\text{Mg}^{2+}$	0.04 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.03	0.05 ± 0.03

## 2.2 不同区域菜田土壤盐分及离子组成状况

### 2.2.1 温室菜田土壤盐分及离子组成的区域分异

从表11可以看到,温室菜田不同区域间土壤盐分总量(平均在2.179~2.294 g/kg之间)及 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量差异均不显著,而西北地区温室土壤 $\text{HCO}_3^-$ 含量(平均为0.271 g/kg)显著高于东北和华北地区温室土壤(分别平均为0.136和0.143 g/kg)。

温室菜田不同区域土壤盐分离子组成均以 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,其次是 $\text{Ca}^{2+}$ (表12)。温室土壤 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量占土壤盐分总量的比例分别在23.2%~29.7%、21.9%~30.8%和14.6%~16.0%之间,平均分别为26.7%、26.8%和15.1%。需要指出的是,西北地区温室菜田土壤 $\text{HCO}_3^-$ 含量所占比例也较大(平均15.9%),可能主要与西北地区栗钙土中 $\text{HCO}_3^-$ 含量高有关。

### 2.2.2 大棚菜田土壤盐分及离子组成的区域分异

由表11可见,大棚菜田土壤盐分总量及其离子组成区域分异较为明显。东北和华东大棚菜田土壤盐

分总量平均为2.80和2.36 g/kg,高于华北和华中的1.63和1.75 g/kg;东北和华东土壤 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量高于华北和华中土壤; $\text{HCO}_3^-$ 含量为东北和华北土壤高于华中和华东土壤; $\text{Cl}^-$ 含量为华东土壤高于东北和华中土壤,后者又高于华北土壤; $\text{Na}^+$ 含量以华东土壤最高,东北和华北土壤次之,华中土壤最低; $\text{K}^+$ 含量以东北土壤最高,其次是华北、华中和华东土壤; $\text{Ca}^{2+}$ 含量也是东北土壤最高,华东和华中土壤其次,华北土壤最低。

大棚菜田不同区域土壤盐分离子组成总体上以 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主(不同区域 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量所占比例先后顺序有所不同),其次是 $\text{Ca}^{2+}$ (表12)。大棚土壤 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量占土壤盐分总量的比例分别在22.7%~29.4%、24.9%~34.6%和13.8%~19.7%之间,平均分别为25.6%、29.0%和16.2%。其中东北和华北地区土壤 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量所占比例高于土壤 $\text{NO}_3^-$ 含量所占比例,而华中和华东地区土壤 $\text{NO}_3^-$ 含量所占比例高于土壤 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量所占比例。大棚菜田不同区域土壤 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量

表 11 菜田不同栽培方式下不同地区土壤盐分总量及各盐离子含量(g/kg)  
Table 11 Contents of total salt and salt ions in vegetable soils under different patterns  
of land use from different regions

项目 Item	栽培方式 Land use pattern	东北 Northeastern	华北 North	西北 Northwestern	华中 Central	西南 Southwestern	华东 East	华南 South
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	温室 GHW	0.661 a	0.700 a	0.628 a				
	大棚 GH	0.785 a	0.400 b		0.520 ab		0.691 a	
	露地 Open field	0.232 abc	0.215 bc	0.208 bc	0.335 a	0.334 ab	0.177 c	0.275 abc
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	温室 GHW	0.136 b	0.143 b	0.271 a				
	大棚 GH	0.154 a	0.158 a		0.135 ab		0.119 b	
	露地 Open field	0.121 cd	0.184 b	0.289 a	0.129 c	0.111 cd	0.114 cd	0.099 d
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	温室 GHW	0.663 a	0.633 a	0.525 a				
	大棚 GH	0.854 a	0.515 a		0.480 a		0.681 a	
	露地 Open field	0.709 ab	0.783 a	0.227 c	0.370 c	0.495 bc	0.314 c	0.279 c
Cl <sup>-</sup>	温室 GHW	0.142 a	0.155 a	0.194 a				
	大棚 GH	0.187 ab	0.141 b		0.188 ab		0.251 a	
	露地 Open field	0.087 b	0.108 ab	0.143 a	0.115 ab	0.129 ab	0.106 ab	0.111 ab
Na <sup>+</sup>	温室 GHW	0.106 a	0.103 a	0.165 a				
	大棚 GH	0.077 bc	0.086 b		0.030 c		0.122 a	
	露地 Open field	0.028 c	0.039 c	0.115 a	0.023 c	0.019 c	0.066 b	0.025 c
K <sup>+</sup>	温室 GHW	0.095 a	0.102 a	0.105 a				
	大棚 GH	0.124 a	0.050 b		0.055 b		0.063 b	
	露地 Open field	0.042 ab	0.034 ab	0.038 ab	0.033 ab	0.034 ab	0.028 b	0.049 a
Ca <sup>2+</sup>	温室 GHW	0.333 a	0.340 a	0.350 a				
	大棚 GH	0.567 a	0.244 c		0.308 bc		0.376 b	
	露地 Open field	0.270 ab	0.330 a	0.201 bcd	0.228 bc	0.237 bc	0.171 cd	0.142 d
Mg <sup>2+</sup>	温室 GHW	0.045 a	0.054 a	0.056 a				
	大棚 GH	0.048 ab	0.038 b		0.033 b		0.056 a	
	露地 Open field	0.018 b	0.030 a	0.030 a	0.021 b	0.017 b	0.022 ab	0.019 b
总量 Total	温室 GHW	2.179 a	2.230 a	2.294 a				
	大棚 GH	2.797 a	1.632 c		1.750 bc		2.359 ab	
	露地 Open field	1.506 ab	1.725 a	1.250 bc	1.252 bc	1.376 abc	0.999 c	1.000 c

注 (Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall. 同行数值后不同字母表示同一栽培方式下不同区域间差异显著 Values followed by different letters in a row are significantly different among different regions under the same land use pattern ( $P < 0.05$ ).

所占比例差异可能主要与氮肥施用量差异有关。

### 2.2.3 露地菜田土壤盐分及离子组成的区域分异

从表 11 可以看出,露地菜田土壤盐分总量及其离子组成区域分异明显。露地菜田所有区域土壤盐分总量均低于 2.0 g/kg,东北和华北土壤相对较高,西北、华中和西南土壤次之,华东和华南土壤较低。土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量以华中和西南土壤较高,东北、华

北、西北和华南土壤次之,华东土壤较低;土壤 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量以西北土壤较高,华北土壤次之,东北、华中、西南、华东和华南土壤较低;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量以东北和华北土壤较高,西南土壤次之,西北、华中、华东和华南土壤较低;Cl<sup>-</sup> 含量以西北和西南土壤较高,华北、华中、华东和华南土壤次之,东北土壤较低;Na<sup>+</sup> 含量以西北土壤较高,华东土壤次之,东



表 12 菜田不同栽培方式下不同区域土壤各盐分离子比例(%)

Table 12 Proportion of different salt ion in vegetable soils under different pattern of land use from different regions

离子 Ion	栽培方式 Land use pattern	东北 Northeastern	华北 North	西北 Northwestern	华中 Central	西南 Southwestern	华东 East	华南 South
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	温室 GHW	27.1	29.7	23.2				
	大棚 GH	22.7	23.1		29.4		27.2	
	露地 Open field	20.9	14.5	14.4	25.6	23.8	18.1	26.6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	温室 GHW	8.5	8.0	15.9				
	大棚 GH	6.8	11.8		10.1		8.9	
	露地 Open field	12.7	14.1	28.2	13.6	10.6	12.4	11.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	温室 GHW	30.8	27.7	21.9				
	大棚 GH	34.6	29.9		26.7		24.9	
	露地 Open field	33.9	36.9	15.8	25.9	33.3	28.8	27.5
Cl <sup>-</sup>	温室 GHW	7.2	7.5	8.4				
	大棚 GH	7.1	9.9		11.1		11.7	
	露地 Open field	9.4	8.7	10.8	10.8	10.2	11.4	12.0
Na <sup>+</sup>	温室 GHW	4.7	4.8	8.1				
	大棚 GH	3.1	5.5		2.0		6.0	
	露地 Open field	2.8	3.0	9.5	2.3	1.8	6.9	2.6
K <sup>+</sup>	温室 GHW	4.8	5.0	3.7				
	大棚 GH	4.1	3.4		3.1		3.4	
	露地 Open field	3.2	2.9	2.9	2.8	2.0	3.5	4.8
Ca <sup>2+</sup>	温室 GHW	14.6	14.7	16.0				
	大棚 GH	19.7	13.8		15.9		15.4	
	露地 Open field	15.4	17.8	16.0	17.4	17.0	16.6	13.1
Mg <sup>2+</sup>	温室 GHW	2.2	2.6	2.7				
	大棚 GH	1.8	2.5		1.8		2.5	
	露地 Open field	1.7	2.1	2.3	1.6	1.2	2.3	1.7

注( Note): GHW—温室 Greenhouse with back wall; GH—大棚 Greenhouse without back wall.

北、华北、华中、西南和华南土壤较低; K<sup>+</sup>含量以华南和东北土壤较高,华北、西北、华中和西南土壤次之,华东土壤较低; Ca<sup>2+</sup>含量以华北土壤较高,东北、西北、华中和西南土壤次之,华东和华南土壤较低; Mg<sup>2+</sup>含量以华北和西北土壤较高,东北、华中、西南、华东和华南土壤较低。

露地菜田不同区域土壤盐分离子组成总体上以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,其次是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,再次是 Ca<sup>2+</sup>,西北露地菜田以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主,其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>(表 12)。露地土壤 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量占土壤盐分总量的比例分别在 15.8%~36.9%、14.4%~26.6% 和 13.1%~17.8% 之间,平均为 28.9%、20.6% 和 16.2%。东北、华北、西南和华东土壤

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 所占比例显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 所占比例,西北、华中和华南土壤 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 所占比例基本相同;西北土壤 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 占土壤盐分总量的比例平均为 28.2%、15.8%、14.4% 和 16.0%。

### 3 讨论

#### 3.1 菜田土壤盐分总量变化特征

本研究表明,全国主要菜区设施(温室和大棚)菜田土壤盐分总量显著高于露地菜田土壤,盐分总量平均高 69.3%;设施菜田土壤次生盐渍化的土样数比例(42.8%)显著高于露地菜田土壤,较露地菜田土壤高 29.2 个百分点。过量施肥是造成设施菜田土壤次生盐渍化的主要原因<sup>[19-21]</sup>。设施栽培条

件下,种植户为了追求设施利用率及蔬菜高产,通常都在棚室内进行连续种植,蔬菜复种指数高且肥料投入量大,化肥和有机肥的投入量远高于露地栽培,并大大超过蔬菜养分需求量。山东省惠民设施蔬菜产区氮(N)、磷( $P_2O_5$ )和钾( $K_2O$ )年均施入量分别为4670、1409和1916  $kg/hm^2$ ,分别相当于对照农田的7.0、12.8和18.6倍,超过蔬菜需要量的数倍<sup>[22]</sup>。余海英等<sup>[23]</sup>对山东寿光温室蔬菜种植情况调查显示,有机肥以鸡粪和猪粪为主,56%的温室全部用高浓度复合肥(N: $P_2O_5$ : $K_2O$  = 15:15:15),温室栽培每年N、 $P_2O_5$ 和 $K_2O$ 的平均投入量分别达到4088、3656和3438  $kg/hm^2$ 。Huang和Jin<sup>[24]</sup>对北京市、天津市、河北省和山东省4个省市10个区县的肥料使用情况调查表明,设施蔬菜和露地蔬菜的总施肥量(养分)分别为粮食作物的5.2倍和2.5倍。设施蔬菜肥料的高量投入,使得一些未被蔬菜吸收利用的养分及肥料的副成分,在缺少降水淋洗的半封闭条件下,大量残留在土壤中,成为盐分离子的主要来源。另外,设施(温室和大棚)内气温、地温较高,对水分需要量很大,土壤表面蒸发强烈,水分上行是设施土壤盐分积聚的外在动力。值得指出的是,本研究设施(温室和大棚)菜田土壤次生盐渍化的土样数比例虽然显著高于露地菜田土壤,但设施菜田土壤盐化程度总体上较轻,居于轻度盐化水平(盐分总量2~5  $g/kg$ )的比例较大(平均38.2%),处于中度盐化以上水平(>5  $g/kg$ )的比例较小(平均4.7%)。本研究结论与已往一些报道有所不同,许多报道指出,设施菜田土壤次生盐渍化严重<sup>[8,12]</sup>。这可能是由于一些研究认为土壤次生盐渍化比例较大,土壤盐化就较重,其次可能是采用的土壤盐化评价标准和研究区域范围有所不同。

### 3.2 菜田土壤盐分离子组成变化特征

本研究中,全国主要菜区温室和大棚菜田土壤 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 含量均显著高于露地菜田,离子组成增加幅度在36.2%~170%之间,盐分离子组成以 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 为主,分别占盐分总量的27.9%和26.9%;其次是 $Ca^{2+}$ ,约为15.3%。露地菜田土壤盐分离子组成主要是 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $HCO_3^-$ ,所占比例分别平均为29.0%、21.1%、16.1%和14.1%。以往研究认为,土壤硝酸根的积累是引起设施菜田土壤次生盐化的重要原因之一<sup>[22]</sup>。本研究设施菜田土壤盐分离子也以 $NO_3^-$ -N含量增加最为明显,其含量较露地土壤平均高1.5倍,而 $SO_4^{2-}$ 含量仅高38.0%,这与温室和大

棚内空气和土壤温度适宜于土壤硝化作用,且淋洗较露地土壤少密切相关。余海英和李廷轩<sup>[18]</sup>研究也表明,辽宁设施菜田土壤以 $NO_3^-$ -N含量增加最多,在盐分积累的高峰期,土壤 $NO_3^-$ -N含量就可占阴离子总量的67%和盐分总量的63%。杨业凤等<sup>[9]</sup>研究也指出,上海浦东新区设施菜田土壤盐分离子组成以 $NO_3^-$ 为主,占盐分总量的比例平均为34.9%;其次是 $Ca^{2+}$ 和 $SO_4^{2-}$ ,占盐分总量的比例分别平均为14.4%和13.5%。刘兆辉等<sup>[25]</sup>对山东省寿光市设施菜田土壤样品的分析表明,土壤硝态氮的平均含量是粮田土壤的6.5倍。高伟等<sup>[26]</sup>对天津市设施菜田调查结果表明,土壤硝态氮含量是相邻农田的4~10倍。土壤硝酸盐的累积是造成设施菜田生理障碍的主要原因之一,这主要由于设施菜田土壤硝酸盐的大量累积会影响蔬菜对钙、镁的吸收,导致钙生理病害加重,且造成蔬菜中硝酸盐含量增高<sup>[27]</sup>。同时,盐分离子的积累会影响蔬菜对养分的均衡吸收,造成蔬菜营养失衡甚至单盐毒害<sup>[28]</sup>。

土壤盐分离子对作物生长的抑制作用强弱依次为 $Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ ,土壤阴离子浓度越高,抑制作用越明显<sup>[7]</sup>。本研究表明,设施菜田土壤 $Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 次生盐渍化的土样数比例均显著高于露地菜田土壤,设施菜田土壤 $Cl^-$ 含量处于轻度盐化水平(0.02%~0.04%)和轻度盐化以上水平(>0.02%)的比例分别为14.0%和22.5%, $SO_4^{2-}$ 含量居于轻度盐化水平(0.1%~0.3%)和轻度盐化以上水平(>0.1%)的比例分别为18.3%和19.3%。因此,设施菜田土壤次生盐渍化不能仅仅关注 $NO_3^-$ 对作物的危害,也应加强对 $Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 积累的控制。

值得指出的是,本研究不同栽培方式菜田间的土壤 $HCO_3^-$ 含量差异不显著,但温室和大棚菜田土壤 $HCO_3^-$ 含量所占比例(平均9.6%)低于露地菜田(平均14.1%)。其原因主要与设施菜田长期高量施肥所导致的土壤pH下降密切相关。土壤pH与降雨量、土壤的淋溶与风化程度、土壤类型等关系密切,我国总体上南方土壤偏酸北方土壤偏碱。因此,按北方和南方主要菜区分开统计不同栽培方式菜田土壤pH,有利于较正确评价不同栽培方式菜田土壤pH状况。我国北方地区是主要的典型设施蔬菜种植区,本研究显示,北方设施菜田土壤酸碱度中性化明显,主要菜区设施土壤pH值(平均7.2,  $n =$

163)显著低于露地菜田土壤(平均 7.7,  $n = 79$ )。本研究设施菜田土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等强酸性离子的含量显著高于露地菜田土壤,设施菜田土壤 pH 下降与这些强酸性离子的积累有关<sup>[12, 29-30]</sup>。其次,长期密闭的设施内, $\text{CO}_2$  供应不足和蔬菜大量消耗所造成的棚室内部  $\text{CO}_2$  浓度降低,也打破了土壤中  $\text{CO}_2$  与  $\text{HCO}_3^-$  的平衡,从而影响到设施土壤中  $\text{HCO}_3^-$  的含量变化。

设施和露地菜田大部分区域土壤盐分离子组成均以  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,其次是  $\text{Ca}^{2+}$ ,但在西北地区,土壤  $\text{HCO}_3^-$  含量所占比例也较大(平均 15.9%),这主要与西北地区栗钙土中  $\text{HCO}_3^-$  含量高有关。

### 3.3 设施菜田土壤盐分积累的年际变化特征

设施菜田不同种植年限土壤盐分有变化。杨业凤等<sup>[9]</sup>研究显示,上海浦东设施菜田土壤盐分总量及各盐分离子含量基本都在种植 3 年时增加到最大。周鑫鑫等<sup>[31]</sup>研究则表明,在连续种植 4~6 年左右土壤盐分达最高。余海英等<sup>[8]</sup>报道,设施菜田连续种植 4 年左右为土壤盐分积累的高峰期。而曾希柏等<sup>[32]</sup>研究表明,设施菜地连续种植 10 年左右土壤全盐含量达到最高值。本研究设施菜田土壤盐分总量及主要盐分离子  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量积累总体上呈先增后降并趋于平缓的趋势,一般在连续种植 5~6 年达到土壤盐分及主要盐分离子积累的高峰期,此时土壤盐分总量平均为 2.52 g/kg。依据本研究建立的菜田土壤盐分总量与 EC 值关系模型估算的 EC 值为 0.6 mS/cm,已超过蔬菜的生育障碍临界点(EC 值 > 0.5 mS/cm)。此后,由于设施菜田土壤环境质量恶化,蔬菜生长受阻,种植户便会相应地在生产上减少投入,并采取揭棚(土壤盐分接受自然雨水的充分淋洗)、翻耕、灌水洗盐等各种管理措施以减缓生产上的损失,从而使土壤的盐分含量有一定程度的降低,但仍显著高于露地菜田土壤,说明土壤的次生盐渍化一旦发生,则难以彻底修复。当土壤条件稍有改善时,种植户又会加大投入,如此则形成了对设施菜田土壤利用-破坏-再利用-再破坏的恶性循环,但最终导致的是设施栽培土壤环境质量的不断恶化<sup>[8]</sup>。

## 4 结论

1) 温室和大棚菜田与露地菜田相比,土壤盐分总量平均高 69.3%;设施菜田土壤盐分总量居于轻度盐化水平的比例为 38.2%,而露地菜田土壤普遍处于非盐化水平。

2) 温室和大棚菜田土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量均显著高于露地菜田土壤,增加幅度在 36.2%~170.0%之间。

3) 温室和大棚菜田土壤盐分总量及主要盐分离子( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ )含量积累总体上随种植年限的延长呈先增后降并趋于平缓的变化趋势,连续种植 5~6 年达到高峰期。

4) 温室和大棚菜田土壤盐分离子组成以  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,平均分别占土壤盐分总量的 27.9% 和 26.9%, $\text{Ca}^{2+}$  所占比例次之(平均为 15.3%),但西北地区温室菜田土壤  $\text{HCO}_3^-$  含量所占比例也较大(平均 15.9%)。露地菜田土壤主要盐分离子组成总体上是  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ,土壤  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量平均分别占土壤盐分总量的 29.0%、21.1%、16.1% 和 14.1%,但西北地区露地菜田土壤盐分离子组成以  $\text{HCO}_3^-$  为主(平均 28.2%),其次是  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  (14.4%~16.0%)。

**致谢:** 土壤样品采取由国家大宗蔬菜产业技术体系各综合试验站站长负责,其他岗位专家参与并给予了指导,在此一并感谢。

### 参考文献:

- [1] 陈竹君, 高佳佳, 赵文艳, 等. 磷钾肥施用对日光温室土壤溶液离子组成的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 261-266.  
Chen Z J, Gao J J, Zhao W Y, et al. Effects of application of phosphorus and potassium fertilizers on ion compositions of soil solution in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 261-266.
- [2] 史静, 张乃明, 包立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 787-794.  
Shi J, Zhang N M, Bao L. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(7): 787-794.
- [3] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contaminations in South-eastern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83: 73-84.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [5] Kitamura Y, Yano T, Honna T, et al. Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Sea basin: Research

- on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1/2): 1-14.
- [6] 吴忠红, 刘凤兰. 设施土壤养分和盐分积累状况研究[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(4): 237-240.  
Wu Z H, Liu F L. Accumulation of soluble salt and nutrients in greenhouse soils in Shanxi Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(4): 237-240.
- [7] 姚春霞, 陈振楼, 许世远. 上海市郊旱作农田土壤养分资源状况[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 131-134.  
Yao C X, Chen Z L, Xu S Y. Nutrient content of farmland soil in Shanghai suburb [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 131-134.
- [8] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的积累、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 H Y, Li T X, Zhou J M. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 642-650.
- [9] 杨业凤, 徐阳春, 姚政, 等. 上海市浦东新区设施菜地土壤盐分变化规律研究[J]. *土壤*, 2009, 41(6): 1009-1013.  
Yang Y F, Xu Y C, Yao Z, *et al.* Salinity characteristics of greenhouse vegetable soils in Shanghai Pudong new area [J]. *Soils*, 2009, 41(6): 1009-1013.
- [10] 艾天成, 武美燕, 胡学玉. 武汉市郊设施栽培土壤盐分积累特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1226-1230.  
Ai T C, Wu M Y, Hu X Y. Characteristic of salt accumulation in greenhouse soil of Wuhan suburb [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(10): 1226-1230.
- [11] Shi Y C, Hu Z Y, Haneklaus S, *et al.* Suitability of soil electrical conductivity as an indicator of soil nitrate status in relation to vegetable cultivation practices in the Yangtze River Delta of China [J]. *Landbauforschung-vTI Agriculture and Forestry Research*, 2009, 59: 151-158.
- [12] 陈碧华, 杨和连, 李亚灵, 等. 不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 241-245.  
Chen B H, Yang H L, Li Y L, *et al.* Variation characteristics of soil water-soluble salts of large plastic house vegetable field for different cultivating years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 241-245.
- [13] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性及肥力状况[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 906-918.  
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y, *et al.* Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 906-918.
- [14] 张金锦, 段增强. 设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 361-366.
- Zhang J J, Duan Z Q. Preliminary study on classification and grading standards and causes and hazards of secondary salinization of facility vegetable soils [J]. *Soils*, 2011, 43(3): 361-366.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 142-233.  
Institute of Soil Science, CAS. Analysis of soil physical and chemical characteristics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 142-233.
- [16] 土壤盐渍化分级标准[OL][2015-01-06]. <http://www.tdzyw.com/2010/0803/2607.html>.  
The classification standard of soil salinization [OL][2015-01-06]. <http://www.tdzyw.com/2010/0803/2607.html>.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 188.  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (The third edition) [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2002. 188.
- [18] 余海英, 李廷轩. 辽宁设施栽培土壤盐分积累变化规律研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 80-83.  
Yu H Y, Li T X. Evolution of salt accumulation in greenhouse soil in Liaoning province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 80-83.
- [19] 张乃明, 常晓冰, 秦太峰. 设施农业土壤特性与改良[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
Zhang N M, Chang X B, Qing T F. Soil properties and improvement of greenhouse soil [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [20] Chen Q, Zhang X S, Zhang H Y, *et al.* Evaluation of current fertilizer practice and soil fertilizer in vegetable production in the Beijing region [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69: 51-58.
- [21] Zhang Y G., Jiang Y, Liang W J. Accumulation of soil soluble salt in greenhouse vegetable under heavy application of fertilizers [J]. *Agricultural Journal*, 2006, 1(3): 123-127.
- [22] Ju X T, Kou C L, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 497-506.
- [23] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 514-522.  
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Budget and soil nutrient status in greenhouse system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 514-522.
- [24] Huang S W, Jin J Y. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 139: 317-327.
- [25] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮、磷、钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 537-542.  
Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J, *et al.* N, P, K distributions and movement in soils for greenhouse and outdoor field [J].

- Journal of Agro-Environmental Science, 2006, 25(Supl.): 537-542.
- [26] 高伟,朱静华,高宝岩,等.天津市设施蔬菜不同种植年限土壤及地下水养分特征[J].华北农学报,2010,25(2):206-211.
- Gao W, Zhu J H, Gao B Y, *et al.* Characteristic of soil and groundwater nutrient in different age greenhouse vegetable cultivation in Tianjin [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(2): 206-211.
- [27] 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 W Z, Liu S F, Li D R, *et al.* Mechanism of soil salinization in protected cultivation[J]. Soils, 2004, 36(1): 25-29.
- [28] Wang Z H, Li S X. Effects of N forms and rates on vegetable growth and nitrate accumulation[J]. Pedosphere, 2003, 13(4): 309-316.
- [29] Malhi S J, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer induced acidification and liming on micronutrients in soil and in brome grass hay[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48: 91-101.
- [30] Wang H Y, Zhou J M, Chen X Q, *et al.* Interaction of NPK fertilizers during their transformation in soils: 1. Dynamic change of soil pH[J]. Pedosphere, 2003, 13(3): 257-262.
- [31] 周鑫鑫,沈根祥,钱晓雍,等.不同种植模式下设施菜地土壤盐分的积累特征[J].江苏农业科学,2013,41(2):343-345.
- Zhou X X, Shen G X, Qian X Y, *et al.* Characteristic of salt accumulation in greenhouse soil under different planting patterns [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(2): 343-345.
- [32] 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 X B, Bai L Y, Su S M, *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.