

日光温室灌溉模式及土壤管理对盐分的影响

梁斌^{1,2}, 董静³, 王群艳^{1,2}, 李飞^{1,2}, 李俊良^{1,2}

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109;

2. 山东省水肥一体化工程技术研究中心, 山东 青岛 266109; 3. 寿光市农业局, 山东 寿光 262300)

摘要: 滴灌施肥和秸秆还田通过影响盐分投入量、灌溉水运移等影响盐分在土壤表层的累积, 灌水洗盐是降低土壤盐分累积的重要措施。通过测定长期滴灌和漫灌模式下不同秸秆处理中休闲期间土壤耕层盐分含量变化, 分析了日光温室灌溉模式及土壤管理对盐分的影响。结果表明: 在作物收获后, 滴灌模式和漫灌模式下全盐含量平均分别为 2 402, 1 713 mg/kg, 滴灌模式下全盐含量的增加主要来源于 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子的增加, 分别占全盐增加量的 12.9%, 63.4%, 23.6%。施用秸秆使滴灌模式下盐分含量显著增加 5.8%~23.4%, 但对漫灌模式下的盐分含量无显著影响。休闲期间的单次大水漫灌使滴灌模式下 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和 NO_3^- 的含量显著降低 58%~69%, 61%~63%, 37%~50%, 37%~45%, 使漫灌模式下 Mg^{2+} 和 NO_3^- 离子显著降低 38%~44%, 5%~12%, 对该模式下其他阳离子含量无显著影响。 HCO_3^- 在休闲期间变幅大, 变化趋势与 NO_3^- 趋势相反。休闲期间的土壤管理使滴灌模式土壤盐分显著降低 29%, 漫灌模式降幅仅为 8.7%。总体来说, 滴灌模式及在此模式下施用秸秆显著增加土壤盐分含量, 经休闲期间的大水漫灌和高温闷棚过程后盐分降低明显, 但仍稍高于漫灌模式, 应在生产中进一步降低氮、钾肥及硫酸水溶肥的施用量。

关键词: 滴灌; 秸秆; 土壤阳离子; 高温闷棚

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0157-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.026

Effects of Irrigation Mode and Soil Management on Soluble Salt in Solar Greenhouse

LIANG Bin^{1,2}, DONG Jing³, WANG Qunyan^{1,2}, LI Fei^{1,2}, LI Junliang^{1,2}

(1. School of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109;

2. Shandong Engineering Research Center for Integrated Management of Water and Fertilizer,

Qingdao, Shandong 266109; 3. Agricultural Bureau of Shouguang, Shouguang, Shandong 262300)

Abstract: Drip irrigation and straw returning affected the accumulation of salt in the surface soil by affecting the amount of salt input and the migration of irrigation water, and irrigation and salt washing are important measures to reduce the accumulation of salt in soil. The effect of long-term drip irrigation mode and soil management on salt content were analyzed by measuring the change of salt content in soil plough layer during summer fallow under the model of long-term drip irrigation and flooding irrigation and different straw treatments. The results showed that after the harvest, the total salt content of the drip irrigation mode and the flood irrigation mode was 2 402 and 1 713 mg/kg, respectively. The increase of the total salt content under the drip irrigation mode was mainly from the increasing of Ca^{2+} , SO_4^{2-} and NO_3^- ions, which accounted for 12.9%, 63.4% and 23.6% of the total salt increase, respectively. The addition of wheat or maize straw significantly increased the content of soil salt by 5.8%~23.4% under the drip irrigation, but it had no effect on the soil salt under flood irrigation mode. The single flood irrigation during summer fallow significantly decreased the content of Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and NO_3^- by 58%~69%, 61%~63%, 37%~50%, and 37%~45% under drip irrigation mode, respectively, and significantly decreased the content of Mg^{2+} and NO_3^- by 38%~44% and 5%~12% under flood irrigation mode, respectively, while it had no significant effect on the other cations under this mode. HCO_3^- changed greatly during the summer fallow, and the trend

收稿日期: 2018-04-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31401947); 山东省重点研发计划项目(2017CXGC205)

第一作者: 梁斌(1983—), 男, 山东昌乐人, 博士, 副教授, 主要从事设施蔬菜水肥资源高效利用研究。E-mail: liangbin306@163.com

通信作者: 李俊良(1962—), 男, 山东平度人, 博士, 教授, 主要从事水肥资源高效利用研究。E-mail: jlli1962@163.com

of change was opposite to that of NO_3^- . The soil salt content significantly decreased by 29% and 8.7% under drip and flood irrigation mode during the summer fallow, respectively. In general, the drip irrigation mode and straw addition under this mode significantly increased the soil salt content, and the soil management during summer fallow played an obvious role in declining the soil salt. After the flood irrigation and the high temperature shed during summer fallow, the salt content decreased obviously, but it was still slightly higher than that in the flood irrigation mode, the amount of nitrogen, potassium and sulphur based water soluble fertilizers should be further reduced in production.

Keywords: drip irrigation; straw; soil cations; closing plastic greenhouse with a high-temperature

我国日光温室发展迅速,截至 2016 年,日光温室蔬菜种植面积达 100 万 hm^2 ,占全球的 90% 以上^[1]。日光温室中过量施肥现象普遍,据调查,每年 N、 P_2O_5 和 K_2O 的平均投入量在 3 000 kg/hm^2 以上^[2],大量施肥导致土壤次生盐渍化^[3]、酸化^[4]等问题严重。据统计,全国有 28% 的日光温室土壤电导率超过临界电导率 (600 $\mu\text{S}/\text{cm}$)^[5],在典型种植区,约 40% 设施菜地出现不同程度的盐渍化现象^[6]。盐分离离子累积已成为设施农业生产的重要障碍因子。

除施肥过多导致设施土壤盐分累积之外,根据盐随水走的特性,灌溉也影响土壤次生盐渍化水平^[7]。滴灌施肥是控水减肥的重要手段,对土壤盐分累积具有双重影响,一方面降低肥料施用量,减少盐分离子的投入;另一方面降低灌溉量,减少盐分离子的淋溶损失。亓沛沛等^[8]研究表明,长期滴灌使土壤表层含盐量增加;王少丽等^[9]研究表明,滴灌对表土盐分含量无显著影响,受滴灌参数(滴头流量、滴头间距)、灌溉制度、土壤质地等因素的影响^[10]。上述研究结论不尽相同,但研究结果对解释或指导研究区域滴灌农田水盐调控和盐碱地改良有借鉴意义。随着国家对生态、资源的重视以及肥料减施的需要,滴灌施肥是降低日光温室水肥投入水平,提高利用率的主要手段,在日光温室中的应用日趋普遍。滴灌减少施肥量的同时,减少灌水淋溶,对日光温室土壤表层盐分累积的影响值得关注。秸秆还田是提高土壤有机质,增加土壤肥力的重要手段。秸秆还田一方面带入部分盐基离子;另一方面施用秸秆提高土壤持水能力,在定量灌水的情况下减少盐分离离子随水淋溶损失,可能会导致更多的盐分在土壤表层发生累积。

日光温室夏季休闲期间灌水洗盐与高温闷棚是降低盐分累积和土壤消毒的常用手段。在此过程中,单次灌水量达 120 mm,温室内气温达 60 $^{\circ}\text{C}$ 以上,0—10 cm 土层的土壤温度也达 45 $^{\circ}\text{C}$ 以上。杜磊等^[11]研究表明,漫灌使辣椒苗期 0—20 cm 土层脱盐率达 34% 以上,积盐量降幅达 47% 以上。李卫等^[12]研究表明,在灌水初期土壤表层 Ca^{2+} 、 NO_3^- 等向下迁移明显,但灌水后 20~25 天,由于蒸发作用, Ca^{2+}

和 NO_3^- 有向上迁移的趋势。可见,灌水与温度对盐分离离子含量影响大。休闲期间灌水洗盐的效果如何,对哪种盐分影响最大等问题值得关注。基于上述研究进展及所需关注的问题,通过裂区设计,研究了长期不同灌水施肥模式和秸秆还田处理在夏季休闲前后土壤表层盐分含量及组成特征,分析了不同水肥管理模式和休闲期间土壤管理对土壤表层盐分的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于山东省寿光市 (118°51'40" E, 36°51'40" N),属暖温带季风区大陆性气候,年均气温 13.2 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量 592.3 mm。供试温室修建于 2007 年,长 95 m,宽 12 m。试验从 2008 年 8 月开始处理,试验开始时 0—30 cm 土层土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 9.3 g/kg 和 173.9, 43.8, 181.0 mg/kg , pH 8.0。

1.2 供试作物与试验设计

供试温室内种植番茄,一年两季,每年 1 月定植到当年 6 月拉秧为冬春季,8 月至翌年 2 月拉秧为秋冬季,6—8 月为夏季休闲期。番茄品种由当地农户自行选择,冬春季为奇大利,秋冬季为中寿 11—3,冬春季每株番茄一般留 6 穗果,秋冬季每株番茄一般留 5 穗果,每穗留 4 个果实。

试验采用裂区设计,设 2 个主处理和 3 个副处理;主处理分别为滴灌和漫灌模式。滴灌模式中,基肥施用普钙 (P_2O_5 含量为 12%) 和硫酸钾 (K_2O 含量为 52%)。依据目标产量法估算作物整个生育期内的总需氮量,然后根据作物需肥规律,将肥配施到每次灌水当中,追肥追施 17-6-31 (N : P_2O_5 : K_2O) 的水溶肥。滴灌处理各小区内埋设张力计来指示土壤水分变化,确定施肥灌溉时间,当张力计读数 (10:00) 达到 -25 kPa 时开始灌溉,每季滴灌施肥 30~40 次,平均每次灌溉量 10 mm。2008—2014 年,平均单季灌溉量为 309 mm,平均单季氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 的施用量分别为 244, 229, 526 kg/hm^2 。漫灌模式凭农民经验灌水施肥,肥料随水冲施,每季基施 16—16—16 (N : P_2O_5 : K_2O) 的复合肥 2 165 kg/hm^2 ,追肥和灌溉量由农民根据番

茄长势及天气状况来确定。2008—2014 年,每季灌溉施肥 8~12 次,平均每次灌溉量为 55 mm,平均单季灌水量为 567 mm,施氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)量分别为 939,882,939 kg/hm²。

副处理包括 3 个施用不同有机物料处理:(1)有机肥处理,有机肥为风干鸡粪,施用量 8 t/hm²(约合 215 kg/hm²,以 N 计),鸡粪均匀撒施后翻耕;(2)有机肥配施小麦秸秆处理,在有机肥处理的基础上,增施经粉碎的小麦秸秆 9 t/hm²;(3)有机肥配施玉米秸秆处理,在施用有机肥基础上,增施经粉碎的玉米风干秸秆 9 t/hm²。鸡粪和秸秆于每季番茄移栽前撒施并旋耕,旋耕深度为 20~30 cm。

每个处理重复 3 次,共 18 个小区,小区面积 42 m²(4.2 m×10 m),每个小区种植 3 畦,每畦双行,传统漫灌处理株距为 0.45 m,滴灌处理株距为 0.35 m。

1.3 土壤样品采集与分析

于 2014 年作物收获后(S1,7 月 22 日)、漫灌后(S2,大水漫灌后的第 2 天,7 月 24 日,灌水量平均为 98 mm,不同处理持水量不同,处理之间有差异)和闷棚后(S3,闷棚结束当天,8 月 11 日)采集 0—30 cm 耕层土壤,每次每小区采集 3 钻的混合样。水溶性盐分含量和组成采用水土质量比为 5:1 浸提,测定

K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 等离子。土壤 EC 采用电导仪测定;K⁺、Na⁺ 用火焰光度法测定;Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 用 EDTA 络合滴定法测定;SO₄²⁻ 用 EDTA 间接滴定法测定;Cl⁻ 采用 Ag-NO₃ 滴定法测定;HCO₃⁻ 用双指示剂滴定法测定;NO₃⁻ 用连续流动分析仪(BRAN+LUEBBE)测定;全盐含量采用各盐分离离子加和计算^[13]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010、SPSS 16.0 软件进行数据处理和统计分析;不同处理差异显著性用 One-way ANOVA(单因素方差分析)检验,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 全盐分含量

由表 1 可知,漫灌和滴灌模式下土壤全盐含量分别为 1 549~1 935,1 539~2 515 mg/kg,平均分别为 1 729,2 123 mg/kg,作物收获后(休闲处理之前)滴灌模式较漫灌模式全盐分含量高 40.2%,休闲处理之后差异降低至 9.1%。长期施用小麦或玉米秸秆显著增加滴灌模式下的全盐含量,3 个采样时期增幅分别为 6.9%~14.9%,5.8%~21.0%,12.3%~23.4%。长期施用作物秸秆对漫灌模式下土壤全盐分含量无显著影响。

表 1 不同水肥管理对日光温室休闲期间土壤盐分累积量的影响 单位:mg/kg

处理	收获后		漫灌后		闷棚后	
	滴灌模式	漫灌模式	滴灌模式	漫灌模式	滴灌模式	漫灌模式
M	2274±78bA	1643±23aB	2056±87bA	1875±94aB	1539±4bA	1570±37aA
M+M	2515±70aA	1736±59aB	2350±63aA	1935±22aB	1793±26aA	1572±20aB
M+W	2491±66aA	1761±30aB	2301±47aA	1921±36aB	1786±103aA	1549±97aB
平均	2402A	1713B	2236A	1910B	1706A	1564B

注:表中数据为平均值±标准误差;不同大写字母代表同一行同一时期处理之间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一列间差异显著(P<0.05);M 为单施有机肥处理;M+M 为有机肥配施玉米秸秆处理;M+W 为有机肥配施小麦秸秆处理。下同。

由表 1 可知,作物收获后滴灌模式下 3 个有机物料处理平均盐分累积量为 2 402 mg/kg,大水漫灌使之降低到 2 236 mg/kg,降幅为 6.9%,其中阳离子降低 102.9 mg/kg,降幅达 28.2%,阴离子含量降低 86.1 mg/kg,占原来的 4.3%(图 1)。漫灌模式下,休闲期间的大水漫灌反而使全盐分含量增加 197.5 mg/kg,增幅达 11.5%,在此过程中阳离子含量变化不大,盐分含量的升高主要来源于阴离子含量的显著增加。大水漫灌之后的闷棚过程,滴灌模式下,全盐分含量继续降低 530 mg/kg,占漫灌后盐分含量的 23.7%,此过程中漫灌模式下土壤盐分累积显著降低 346 mg/kg,占漫灌后的 18.1%。闷棚过程盐分的降低主要来源于阴离子含量的下降,滴灌模式和漫灌模式下阴离子分别显著降低 499,374 mg/kg。

总体而言,日光温室休闲期间漫灌和闷棚使滴灌模式土壤盐分含量显著降低 29.0%,其中阴离子降

低 587 mg/kg,阳离子降低 133 mg/kg,使漫灌模式土壤盐分累积降低 8.7%,土壤盐分的降低主要来源于阴离子含量的降低。

2.2 盐分组成变化

由表 2 可知,与漫灌模式相比,滴灌模式显著提高土壤 Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 含量,在作物收获后、大水漫灌后和闷棚后 3 个采样时期,Ca²⁺ 含量提高 55%~133%,59%~99%,16%~31%,SO₄²⁻ 提高 134%~181%,72%~121%,18%~54%。滴灌模式下作物收获后土壤 Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 和 NO₃⁻ 含量较漫灌模式分别显著高 137%~210%,39%~106%,139%~159%和 44%~73%,但大水漫灌后和闷棚后,2 种灌溉施肥模式下 NO₃⁻、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 含量无显著差异。

添加玉米和小麦秸秆对漫灌模式下土壤各离子含量无显著影响,但显著提高滴灌模式下收获后土壤

Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 及 NO₃⁻ 含量,与单施有机肥相比,上述指标显著提高 11.4~80.6,28.0~28.6,5.2~8.0,95.6~138.5 mg/kg,增幅分别为 7%~47%,41%~42%,28%~43%,26%~37%,其中施用小麦秸秆处理

上述各指标增幅更大。经大水漫灌之后,上述 4 种盐分离子中 Mg²⁺ 和 K⁺ 降低到单施有机肥处理水平,Ca²⁺ 和 NO₃⁻ 仍然较单施有机肥处理高 12.2~42.3 (7%~23%),83.5~114.8(41%~56%) mg/kg。

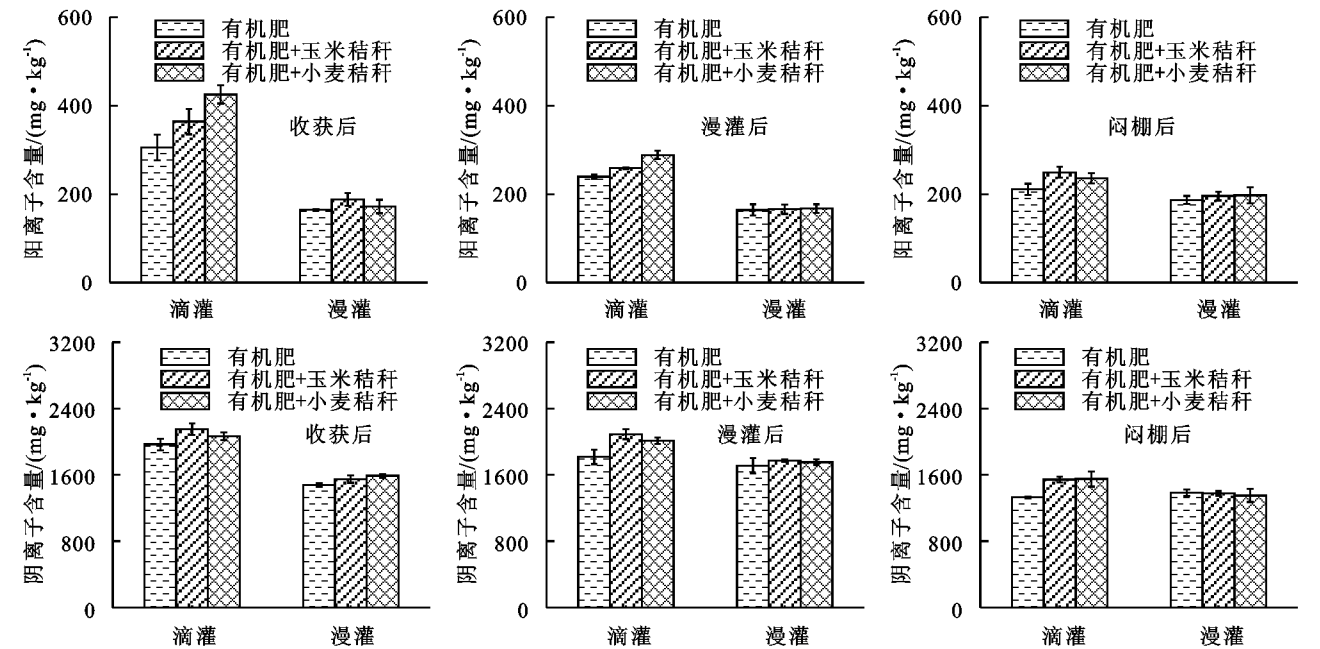


图 1 日光温室不同水肥管理模式下土壤阳离子和阴离子累积量的变化

休闲期间的大水漫灌对土壤 SO₄²⁻ 和 Ca²⁺ 的含量影响较小(表 2),但大水漫灌显著降低滴灌模式下的 Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 和 NO₃⁻ 的含量,降幅分别为 58%~69%,61%~63%,37%~50% 和 37%~45%,使漫灌模式下的 Mg²⁺ 和 NO₃⁻ 离子显著降低 38%~44% 和 5%~12%,对该模式下其他阳离子含量无显著影响。大水漫灌使土壤 HCO₃⁻ 含量

显著增加,滴灌和漫灌模式下增幅分别为 16%~34% 和 15%~24%,这也是导致大水漫灌后土壤全盐含量增加的主要原因。高温闷棚过程中大多数阳离子含量无显著变化,土壤 HCO₃⁻ 含量显著降低,滴灌和漫灌模式下降幅分别为 51%~56%,53%~58%,相反 NO₃⁻ 离子含量显著增加 46~76,78~105 mg/kg。

表 2 夏季休闲期间日光温室不同水肥管理模式下土壤各盐分离子变化情况

灌溉模式	处理	采样时间	盐分离子含量/(mg·kg ⁻¹)							
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
滴灌模式	M	S1	171.0±21.9	68.4±9.7	47.5±4.2	18.6±1.9	717.4±91.3	652.9±56.9	196.9±15.6	371.2±39.7
		S2	180.5±0.6	28.6±3.6	18.4±4.2	11.7±1.1	687.0±56.3	754.6±52.9	189.6±19.1	204.7±15.8
		S3	158.8±10.5	19.2±3.6	22.1±3.7	10.3±1.4	533.0±61.6	371.3±31.2	172.7±10.1	251.0±49.4
	M+M	S1	182.4±22.5	97.1±1.2	58.4±6.0	26.1±3.5	823.2±0.6	679.6±50.2	181.6±8.8	466.8±23.1
		S2	192.6±11.4	32.3±3.9	21.6±4.6	11.8±2.4	719.2±29.4	876.7±80.7	207.0±9.4	288.2±34.9
		S3	190.8±10.2	23.5±2.8	23.8±2.8	10.9±1.4	610.0±32.9	381.9±14.2	187.6±12.4	364.4±14.8
	M+W	S1	251.6±22.8	96.5±7.5	50.5±5.9	26.6±4.0	757.9±43.2	616.6±30.5	181.4±11.9	509.6±10.9
		S2	222.7±5.2	30.0±2.5	20.3±1.9	15.3±3.4	673.8±39.5	829.1±3.3	189.8±12.9	319.5±25.7
		S3	178.4±5.9	22.8±4.7	21.4±1.1	13.1±2.1	578.4±81.3	382.4±13.3	172.7±12.2	395.3±14.6
	M	S1	103.8±4.3	28.8±2.6	18.3±2.8	13.4±1.0	301.9±16.7	773.1±37.8	144.8±0.4	258.1±25.0
		S2	113.5±8.6	16.3±3.1	21.2±3.7	12.7±0.1	399.2±7.8	900.9±79.6	165.2±9.7	245.9±0.1
		S3	136.9±3.1	16.7±2.2	21.1±6.0	11.6±0.3	443.0±11.6	420.2±16.8	190.1±5.6	323.9±42.5
漫灌模式	M+M	S1	117.3±7.2	33.4±4.7	24.4±1.9	12.3±0.9	293.3±18.4	812.8±48.2	151.8±3.3	290.1±12.8
		S2	114.4±7.7	18.6±2.5	20.9±2.9	11.5±0.2	325.4±43.3	1008.8±41.9	180.9±14.4	254.6±39.8
		S3	143.2±10.1	18.6±1.3	22.1±1.6	11.5±0.8	397.3±24.3	421.1±15.4	197.9±14.2	360.1±27.4
	M+W	S1	108.0±14.8	31.1±2.2	19.6±1.2	12.9±0.2	323.7±34.4	819.4±15.0	150.5±1.9	294.9±31.9
		S2	111.7±8.9	19.3±0.4	23.9±0.4	12.1±1.4	359.0±28.6	940.5±30.5	187.6±8.1	266.1±15.2
		S3	142.7±18.3	19.0±1.4	21.7±0.2	13.6±0.8	376.2±27.1	423.3±32.2	194.2±12.5	357.7±17.0

注:S1、S2、S3 分别为番茄收获后、大水漫灌后、高温闷棚后。

2.3 土壤盐分离子电荷变化

由表 3 可知,在所测定的盐分离子中,阴离子所带负电荷总量显著高于阳离子所带正电荷总量。在滴灌模式下,阴、阳离子所带电荷总量分别为 28.7~38.7,11.8~20.2 mmol/kg,漫灌模式下,两者分别为 26.4~32.2,8.4~9.8 mmol/kg。在作物收获后,滴灌模式下土壤溶液中来源于阴、阳离子的电荷均显著高于漫灌模式,但到闷棚结束后,2 种灌溉模式总正、负电荷总量差距较小。土壤中的正电荷主要来源于钙离子,滴灌和漫灌模式下分别占所测定正电荷的 49.8%~74.0%,58.9%~71.8%,滴灌模式下土壤中的负电荷主要来源于 SO_4^{2-} ,占负电荷总量的 38%~42%,漫灌模式作物收获后和漫灌后 HCO_3^- 离子占主导,分别占 47%和 48%。

休闲期间的大水漫灌使滴灌模式下土壤溶液中阳离子电荷总量显著降低 6.6 mmol/kg,其中包括来源于镁离子的 4.8 mmol/kg 和钠离子的 1.4 mmol/kg,源于钙和钾的电荷变化小。灌水虽然降低了来源于 NO_3^- 负电荷的量,但是增加了来源于 HCO_3^- 负电荷的量,总体而言大水漫灌对滴灌模式下土壤溶液中阴离子电荷总量没有影响。大水漫灌对漫灌模式下土壤正电荷总量没有影响,显著增加土壤负电荷总量。

闷棚过程使滴灌和漫灌模式下 HCO_3^- 分别显著降低 7.2,8.7 mmol/kg,导致与灌水后相比,闷棚后负电荷数量显著降低。滴灌模式下 S1、S2、S3 时期正负电荷含量差值分别为 -18.3, -24.0, -16.6 mmol/kg,漫灌模式下 S1、S2、S3 时期的差值分别为 -18.9, -23.7, -16.6 mmol/kg。

表 3 源于不同盐分离子的电荷数动态变化 单位:mmol/kg

盐分离子	滴灌模式			漫灌模式		
	收获后	漫灌后	闷棚后	收获后	漫灌后	闷棚后
Ca^{2+}	10.0±2.1a	9.9±0.9ab	8.8±0.8b	5.4±0.5b	5.6±0.3b	7.0±0.5a
Mg^{2+}	7.6±1.1a	2.5±0.2b	1.8±0.3b	2.5±0.2a	1.5±0.2b	1.5±0.1b
Na^+	2.2±0.2a	0.8±0.1b	0.9±0.1b	0.9±0.1a	0.9±0.1a	0.9±0.1a
K^+	0.6±0.1a	0.3±0b	0.2±0b	0.3±0a	0.3±0a	0.3±0a
SO_4^{2-}	15.8±1.4a	14.4±0.8a	11.9±1.3a	6.3±0.5b	7.5±0.8b	8.3±0.7a
HCO_3^{2+}	10.6±0.8b	13.4±1.1a	6.2±0.3c	13.1±0.6b	15.5±1.0a	6.9±0.3c
Cl^-	5.2±0.3ab	5.5±0.3a	4.9±0.3b	4.1±0.1c	4.9±0.3b	5.3±0.2a
NO_3^-	7.2±1.0a	4.3±0.9c	5.6±1.0b	4.5±0.4b	4.1±0.3c	5.6±0.5a

3 讨论

3.1 日光温室土壤盐分累积特性

本研究中作物收获后漫灌模式和滴灌模式下土壤电导率范围分别为 197.9~204.9,343.8~536.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$,全盐含量分别为 1 642~1 760,2 274~2 515 mg/kg。2 种模式均未超过蔬菜正常生长的临界电导率 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$,低于我国 0—20 cm 土层的日光温室电导率平均水平 524 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ^[5]。土壤电导率/全盐含量与施肥数量、种植年限^[6,14]和取样深度有关。本研究中取样深度较深(0—30 cm)和种植年限较短(6 年)是其盐分累积低于其他研究的原因之一。供试土壤中阳离子以 Ca^{2+} 占主导,阴离子以 SO_4^{2-} 占主导,其他学者^[6,14-16]的研究也表明,在设施栽培中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是土壤盐分的主要组成部分。曾希相等^[15]研究表明,日光温室中 HCO_3^- 含量为 190 mg/kg,杨思存等^[14]报道兰州市日光温室 HCO_3^- 含量达 4 000 mg/kg 以上,陈竹君等^[17]报道日光温室 HCO_3^- 含量为 1 810~2 080 mg/kg。上述结果差异大一方面与土壤性状不同有关;另一方面可能与采样时土壤含水量不同有关。本研究中,休闲期间 HCO_3^- 离子含量变化剧烈,表现为先上升后下降。大量研究^[18-19]表明,土壤中 HCO_3^- 含量随土壤含水量的增加而增加。

土壤含水量越高,土壤溶液 pH 增加,有利于封闭环境下累积 CO_2 或微生物呼吸释放 CO_2 溶解后形成 HCO_3^- ,进而使 HCO_3^- 含量明显上升^[18]。随着闷棚的进行,土壤含水量降低,大部分 HCO_3^- 分解。在大水漫灌后,阴离子中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子含量下降,同时 HCO_3^- 离子含量上升,在闷棚过程中伴随着 NO_3^- 离子的增加, HCO_3^- 含量又逐渐下降,可见 HCO_3^- 可能在调节土壤电荷平衡中有重要作用。本研究中漫灌模式下 Na^+ 的含量 20.7~22.0 mg/kg,与陈竹君等^[17]、吕福堂等^[20]研究结果基本一致,但在滴灌模式下钠离子的最大累积量为 52 mg/kg,作物收获后土壤 Na^+ 累积可能是因为灌溉水中钠离子含量偏高,经滴灌后累积在土壤表层,累积的钠离子在大水漫灌后含量降低到一般水平。

3.2 日光温室滴灌施肥对土壤盐分累积的影响

滴灌施肥对土壤盐分累积的影响受施肥制度、灌水制度和影响土壤水分运移的诸如秸秆和覆膜等其他因素的影响。王丽英等^[3]和郭春霞等^[21]的研究表明滴灌施肥降低施肥量,有利于减缓土壤盐分的累积。但也有研究^[22]表明,滴灌灌水量少,水分深层渗漏少,进而减少土壤表层盐分向下运移,可能会导致

表层盐分的大量集聚。本研究中,滴灌模式使作物收获后土壤全盐含量显著高于漫灌模式,这主要是因为滴灌模式灌水量少,减少了盐分随水向下迁移,同时也说明在该模式下还有进一步降低施肥量的潜力。

3.3 夏季休闲期间的土壤管理对盐分累积的影响

在漫灌模式下,由于番茄生长期间大量灌溉使大部分易移动的盐分移出 0—30 cm 根层之外,导致休闲期间的大水漫灌对阳离子含量影响有限。经夏季休闲期间的大水漫灌和高温闷棚,较作物收获后,土壤全盐含量仅降低 4.4%~12.0%。但在滴灌模式下,作为唯一一次过量灌水过程,休闲期间的大水漫灌使累积在土壤根层的阳离子含量显著降低 28.2%,整个休闲期间降低达 28.3%~32.3%,休闲期间的土壤管理降低盐分累积效果明显。

滴灌模式下休闲期间的大水漫灌使 Mg^{2+} 淋溶损失的相对和绝对数量最多, Ca^{2+} 在漫灌前后变化不大,可见滴灌模式累积的阳离子中 Mg^{2+} 较 Ca^{2+} 移动性大,更容易发生淋溶损失。Huber 等^[23] 在林地的研究表明,长期(9 年)施用含镁石灰石(施入的镁和钙量分别为 44,40 kmol/hm²)后,大部分的镁淋溶出根层之外,而大部分钙仍保持在作物根层。Kreutzer 等^[24] 研究表明,在林地施用含镁石灰 6 年后,来源于含镁石灰的钙和镁的淋溶损失比例分别为 30% 和 70%。

3.4 长期施用秸秆对日光温室盐分累积的影响

长期施用秸秆增加滴灌模式下耕层土壤盐分含量,但对漫灌模式下盐分含量无显著影响。王伟等^[25] 研究表明,设施温室施用秸秆显著降低土壤硝态氮的淋溶量,同时使土壤钾、钠、钙、镁的淋溶损失量降低 30% 以上。同样是秸秆还田,漫灌模式下的盐分累积没有增加主要是由于漫灌条件下施用秸秆处理和不施用秸秆灌水量不同。在试验过程中发现,由于秸秆的吸水、改善土壤透水、持水特性等原因,漫灌模式下施用秸秆处理灌水量明显的高于不施秸秆处理,在还田之后的第 1,2 次灌水,增加幅度在 1 倍以上。增加灌水量的同时可能也增加了盐分离子的淋溶损失,从而导致漫灌模式和滴灌模式下秸秆还田对盐分累积影响规律不同。

4 结论

日光温室长期滴灌模式显著增加土壤盐分含量,该模式下休闲期间的大水漫灌洗盐效果明显。但为了减少水、肥资源的浪费,在滴灌模式下应进一步降低氮、钾肥及含硫基水溶肥的施用,尤其是在长期高碳氮比作物秸秆投入的情况下,盐分离子保持能力增强,减肥量应适度增加。漫灌模式休闲期间的大水洗盐对降低盐分含量效果有限,为了节约水资源,在采取漫灌的温室中可以在休闲期间减少灌水量或不灌水。

参考文献:

- [1] Chang J, Wu X, Wang Y, et al. Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply? [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2013, 11(1): 43-49.
- [2] Yu H, Li T, Zhang X. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2010, 9(6): 871-879.
- [3] 王丽英,武雪萍,张彦才,等. 适宜施氮量保证滴灌日光温室黄瓜番茄产量降低土壤盐分及氮残留[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 91-98.
- [4] 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 contamination in South-Eastern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73-84.
- [5] 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.
- [6] 李涛,于蕾,吴越,等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 100-110.
- [7] 解雪峰,濮励杰,朱明,等. 土壤水盐运移模型研究进展及展望[J]. *地理科学*, 2016(10): 1565-1572.
- [8] 亓沛沛,冉圣宏,张凯. 不同灌溉方式和作物类型对西北干旱区耕地土壤盐渍化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 780-785.
- [9] 王少丽,焦平金,许迪,等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素[J]. *排灌机械学报*, 2013, 31(7): 623-628.
- [10] 宁松瑞,左强,石建初. 新疆膜下滴灌棉田水盐运移特征研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(2): 121-125.
- [11] 杜磊,郑子成,李廷轩. 灌水频率对辣椒各生育期设施土壤盐分迁移规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 114-121.
- [12] 李卫,郑子成,李廷轩,等. 设施灌溉条件下不同次生盐渍化土壤盐分离子迁移特征[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 92-99.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [14] 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.
- [15] 曾希相,白玲王,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.
- [16] 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.
- [17] 陈竹君,赵文艳,张晓敏,等. 日光温室番茄缺镁与土壤盐分组成及离子活度的关系[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 388-395.

最大降水量所在月份相同,降水季节分配对土壤水分有影响。

(2)研究区土壤水分垂直变化土层分为剧烈变化层、弱变化层和相对稳定层3个土层,土壤水分随土层深度表现为先增加后减少最后趋于稳定的趋势。

(3)坡向和密度对研究区刺槐林的土壤水分具有显著性影响,阴坡的土壤水分显著高于阳坡($P < 0.01$),低密度的土壤水分显著高于高密度($P < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 田宁宁,张建军,茹豪,等. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分和养分特征[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):61-67.
- [2] 唐敏,赵西宁,高晓东,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报,2018,29(3):1-13.
- [3] 王延平,韩明玉,张林森,等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报,2012,23(3):731-738.
- [4] 王舒. 晋西黄土区不同尺度土壤水分分布及其对降雨的响应[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [5] 张建军,李慧敏,徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报,2011,31(23):7056-7066.
- [6] 茹豪,张建军,张琦,等. 晋西黄土区雨养果园土壤水分动态及对降雨的响应[J]. 水土保持学报,2014,28(1):36-42.
- [7] 王舒,马岚,张栋,等. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):253-258.
- [8] 杨磊,卫伟,莫保儒,等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [9] 王瑜,朱清科,赵维军,等. 陕北黄土区人工林地土壤水分的垂直变化规律[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):54-60.
- [10] 常译方,毕华兴,高路博,等. 晋西黄土区刺槐和油松林地土壤水分动态变化[J]. 中国水土保持科学,2014,12(4):21-27.
- [11] 张建军,张岩,张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学,2009,45(11):63-69.
- [12] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1853-1857.
- [13] 王洪英. 黄土高原人工刺槐林土壤水分动态及生物量的密度效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [14] 黄琳琳,陈云明,王耀凤,等. 黄土丘陵区不同密度人工油松林土壤水分状况研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(5):1-5.
- [15] 原焕英,许喜明. 黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(2):5-8.
- [16] 曹奇光. 晋西黄土区人工刺槐林地土壤水分特征及合理密度研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [17] 马文. 黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [18] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J]. 水土保持学报,2016,30(1):178-183.
- [19] 孙中峰,周玉喜,朱金兆,等. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):43-49.
- [20] 高艳鹏,王志明,骆汉,等. 晋西黄土丘陵沟壑区春季土壤水分动态研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):92-96.
- [21] 常译方,毕华兴,许华森,等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(6):227-232.
- [18] Misra, A, Tyler G. Influence of soil moisture on soil solution chemistry and concentrations of minerals in the calcicoles phleum phleoides and veronica spicata grown on a limestone soil [J]. Annals of Botany, 1999, 84(3): 401-410.
- [19] Zuo, Y, Ren L, Zhang F, et al. Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in a calcareous soil [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(5): 357-364.
- [20] 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.
- [21] 郭春霞,沈根祥,黄丽华,等. 精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(2):287-291.
- [22] Mmolawa K, Or D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review [J]. Plant and Soil, 2000, 222(1/2): 163-190.
- [23] Huber C, Baier R, Göttlein A, et al. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(1): 11-20.
- [24] Kreutzer K. Effects of forest liming on soil processes [J]. Plant and Soil, 1995, 169(1): 447-470.
- [25] 王伟. 不同施肥与秸秆还田对设施菜田土壤硝态氮和盐基离子淋溶的影响[D]. 山东 青岛:青岛农业大学,2015.

(上接第162页)