

改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分 分布与离子组成的影响

郑复乐^{1,2}, 姚荣江^{1,3*}, 杨劲松^{1,3}, 王相平^{1,3}, 陈强⁴, 李红强^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展重点实验室, 南京 210008;
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国科学院南京分院东台滩涂研究院,
江苏东台 224200; 4.杭锦后旗农牧业技术推广中心, 内蒙古 陕坝 015400)

摘要:【目的】探究微咸水滴灌及改良材料配施对节水灌溉农田土壤盐分的影响规律。【方法】以内蒙古河套灌区典型重度盐碱地为对象, 分别开展了常规黄灌、微咸水滴灌、微咸水滴灌配施生物炭和微咸水滴灌配施石膏 4 个处理的田间小区试验, 对比分析不同处理对于土壤盐分及其离子组成的效应。【结果】微咸水滴灌的平均脱盐率(13.46%)大于常规黄河水灌溉(7.14%), 不会造成显著的盐分积累, 但土壤盐分中 Na^+ 、 Cl^- 量分别增加了 91.12% 和 47.21%, 全盐占比也随之增加, 从而引起土壤钠质化, 并导致土壤盐分在 20~40 cm 土层积累; 微咸水滴灌配施生物炭或石膏可提高土壤脱盐率并消减土壤钠质化危害, 且以微咸水滴灌配施石膏处理脱盐率最高, 可达到 46.30%; 相比其他处理, 微咸水滴灌配施生物炭表现出更为强烈的生育期土壤返盐现象, 且土壤 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的全盐占比有所提高, 而微咸水滴灌配施石膏处理则会降低 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 的全盐占比, 提高 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的全盐占比。【结论】微咸水滴灌配施生物炭或石膏具有调控盐分运动与离子组成的双重效应, 这为河套灌区盐碱地节水改良利用提供了一定理论基础。

关键词: 微咸水滴灌、河套灌区、土壤盐分、离子组成、生物炭、石膏

中图分类号: S156.4⁺¹

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019200

郑复乐, 姚荣江, 杨劲松, 等. 改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与离子组成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 60-71.

ZHENG Fule, YAO Rongjiang, YANG Jingsong, et al. The Effects of Soil Amendment with Different Materials on Soil Salt Distribution and Its Ion Composition under Brackish-water Drip Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 60-71.

0 引言

【研究意义】河套灌区是我国重要的商品粮生产基地, 也是我国主要的向日葵生产基地。但依黄而立的河套灌区却面临黄河来水逐年减少的困境^[1], 据估计到 2030 年, 黄河流域缺水将达 110 亿 m^3 ^[2], 加之当地特定的自然地理环境和长期的农业生产活动, 多种因素作用下, 土壤盐渍化和水资源短缺日益成为制约灌区农业发展的关键问题^[3]。微咸水滴灌作为一种兼顾非常规水资源利用和土壤盐渍化防治的新型灌溉方法在河套灌区极具应用价值。【研究进展】微

咸水滴灌研究和实践表明^[4], 微咸水利用具有双重效应: 一方面存在造成盐分在土壤中不同程度累积, 影响作物生长的风险; 另一方面又能够增加土壤水分, 降低土壤溶液浓度, 有利于作物根系对水分的吸收。如何平衡微咸水利用过程中的利与弊成为制约微咸水安全利用的核心问题。施用土壤改良材料, 改变土壤理化性质, 改善土壤水盐环境是盐碱地改良利用的另一有效措施。因此, 结合土壤改良材料开展微咸水滴灌对盐碱地综合改良与利用的相关研究成为解决河套灌区土壤盐渍化问题的一个新思路。目前国内外在微咸水滴灌条件下, 滴灌水质、水量、模式等对土壤水盐运移、作物生长的影响已有大量研究^[5-10]。针对土壤改良材料对土壤盐碱障碍消减、作物产量及品质的影响效应也有大量研究^[11-12], 其中生物炭和石膏由于其价格低廉、容易获取, 改良效果显著^[13], 在河套地区被大量研究和应用。针对改良材料调控微咸水滴

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501300, 2016YFD0200303); 国家自然科学基金项目(U1806215, U1906221); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)课题(KFJ-STZ-ZDTP-049, KFJ-STZ-ZDTP-053)

作者简介: 郑复乐(1992-), 男, 硕士研究生。主要从事盐碱地改良与水肥高效利用研究。E-mail: zhengfl@issas.ac.cn

通信作者: 姚荣江(1980-), 男, 副研究员。研究方向为盐碱地治理修复及其生态环境效应。E-mail: rjyao@issas.ac.cn

灌水盐运动方面也有较多研究, 如马东豪等^[14]针对膜下滴灌条件下土壤盐分分布的研究得出了流量、水质因素对盐分分布的影响规律。韩剑宏等^[13]针对生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及作物生长的研究得出改良材料的添加可以降低土壤盐分, 提高土壤中养分, 促进作物生长。周铸等^[15]针对滴灌结合脱硫石膏改良盐碱土过程中水盐运移规律的研究得出施加石膏在改善土壤理化性质的同时也会引起底层土壤ESP上升的不良影响。这些研究大都是独立进行, 主要集中在土壤水盐运移、盐分分布、作物生长与产量变化, 关于微咸水滴灌与改良材料相结合的研究较少, 对盐分离子量、组成变化的关注不够。【切入点】本研究从土壤盐分分布与离子组成切入, 以河套灌区主要经济作物向日葵为试验作物, 探讨了微咸水灌溉条件下土壤盐分变化特征, 分析了施用生物炭、脱硫石膏 2 种改良材料对盐渍农田土壤盐分分布与离子组成变化规律的影响, 【拟解决的关键问题】旨在明确改良材料对微咸水滴灌土壤盐分运动的调控效应, 为河套灌区微咸水滴灌水盐调控与盐碱地节水治理提供一定理论基础。

表 1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in test site

深度/cm Depth	含盐量/(g kg ⁻¹) Salt content	阳离子交换量/(cmol kg ⁻¹) Cation exchange capacity	pH 值	体积质量/(g cm ⁻³) Bulk density	有机质量/(g kg ⁻¹) Organic matter	土壤质地 Soil texture	田间持水率/% Field capacity
0~20	8.28±2.41	15.82±0.23	7.8±0.2	1.45±0.27	9.89±2.67	黏壤	23.41±0.33
20~40	7.91±1.86	14.41±0.44	7.4±0.6	1.61±0.11	7.12±1.47	黏壤	26.14±0.12
40~60	7.44±1.02	15.23±0.21	7.5±0.3	1.67±0.08	6.97±2.31	黏壤	26.53±0.64

1.2 试验方法

试验于 2018 年 5—9 月开展, 采用田间小区试验方式, 并种植向日葵作为物试验作物, 设置 CK、HG、SWC 和 SG 共 4 个处理, 每个处理重复 3 次。小区面积 120 m², 各小区在同一地块内随机划分布设, 并且在开始之前对地块进行统一翻耕平整, 具体处理见表 2。基肥和改良材料在春灌覆膜之前随耙地施入, 施肥及其他种植方法采用当地常规方式, 所有处理保持一致, 具体细节参考《内蒙古河套灌区盐碱地食用向日葵抗盐高产栽培技术规程》^[16]。试验所用生物炭和脱硫石膏基本理化性质见表 3 和表 4, 其用量水平参考有关文献资料^[11-12]推荐的最佳用量设置。灌溉采用常规黄河水灌溉和微咸水滴灌 2 种方式, 即在非生育期的秋浇和春灌均采用黄河水灌溉压盐, 不同之处在于作物生育期内, 前者依然为黄河水漫灌, 后者为地下微咸水膜下滴灌, 滴灌所用微咸水来自试验地附近地下水水井, 其成分见表 5。每垄种植 2 行向日葵, 滴灌带布设在中间, 滴灌带间距 1.6 m, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 2.7 L/h。灌溉制度依据《内蒙古自治

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古巴彦淖市杭锦后旗三道桥镇磴泥村 (40°48' N, 106°55' E), 地处河套平原西部的干旱地带, 属温带大陆性季风气候, 其多年平均气温 7.9 °C, 年均降水量 136.5 mm, 年蒸发量 1 953.9 mm, 平均风速 2.2 m/s, 年均大风时间 20.3 d, 日照时间 3 200 h, 无霜期 152 d。试验地属于河套平原典型重度盐碱地, 试验区土壤基本理化性质如表 1 所示。试验区土壤质地属黏壤土, 由于地势低洼加上长期的不当灌溉和强蒸发的气候环境, 土壤盐渍化问题日益严重, 部分地块出现撂荒。当地农民常规种植方式主要依靠秋浇和春灌 2 次大水漫灌进行洗盐压盐, 在向日葵生育期内灌溉 2~3 次。随着灌区水资源日益紧张, 大水压盐的种植模式越来越不可持续, 因此考虑在当地向日葵生育期内以浅层地下微咸水滴灌代替黄河水灌溉, 节约淡水资源的同时降低地下水位, 进而抑制土壤盐渍化进一步发展。

区中西部地区向日葵膜下滴灌技术规程》^[17]制定, 详见表 6。试验地地下水埋深及电导率由田间观测井布设的 CTD-Diver 采集获得, 具体数据见图 1, 图 1 中首次春灌、二次春灌、葵花一水和葵花二水的灌溉量和时间见表 6 所示, 而玉米二水是试验小区周边农民所种的玉米 (拔节期) 地进行的灌溉, 灌溉量为 120~150 mm。

表 2 试验处理

Table 2 Test treatment table

处理 Treatments	灌溉方式 Irrigation method	改良材料 Amendment material	改良材料用量/(t hm ⁻²) Application rate
HG	常规黄河水灌溉	-	-
CK	微咸水滴灌	-	-
SWC	微咸水滴灌	生物炭	15
SG	微咸水滴灌	脱硫石膏	10

表 3 生物炭基本理化性质

Table 3 Basic physical and chemical properties of biochar

C/%	H/%	O/%	N/%	灰分/% Ash content	比表面积/(m ² g ⁻¹) Specific surface area	pH 值
67.13	3.84	39.66	1.28	41.72	220.25	7.96

表 4 脱硫石膏基本理化性质

Table 4 Basic physical and chemical properties of desulfurized gypsum

pH 值	密度/(g cm ⁻³)Density	游离水量 Free water content/%	CaSO ₄ ·2H ₂ O/%	CaCO ₃ /%	Mg(OH) ₂ /%	灰分及杂质/% Ash & impurity content
5.3	1.07	6.05	88.4	3.73	0.43	2.21

表 5 滴灌所用微咸水盐分及离子组成情况

Table 5 Salt composition of brackish water used in drip irrigation

水质 Water quality	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	全盐量 Total salt content
地下微咸水 Brackish water	0.00±0.0	508.5±155.7	395.9±161.4	820.5±361.8	203.7±54.4	120.5±45.1	412.5±192.1	2461.7±728.6
黄河水 Yellow River water	0.00±0.0	205.2±17.6	70.7±0.7	90.2±5.1	68.6±3.6	10.9±1.1	74.1±3.1	519.7±18.2

表 6 试验地灌溉方案

Table 6 Irrigation scheme of test land

处理 Treatments	非生育期灌溉 Off-season irrigation		生育期灌溉 The growth irrigation			
	秋浇 (20171005)	春灌 (20180507)	播种—现蕾 (20180704)	现蕾—花期 (20180720)	花期—灌浆 (20180802)	灌浆—成熟 (20180821)
CK	180	120	22.5	30	30	22.5
SWC	180	120	22.5	30	30	22.5
SG	180	120	22.5	30	30	22.5
HG	180	120	-	105	105	/

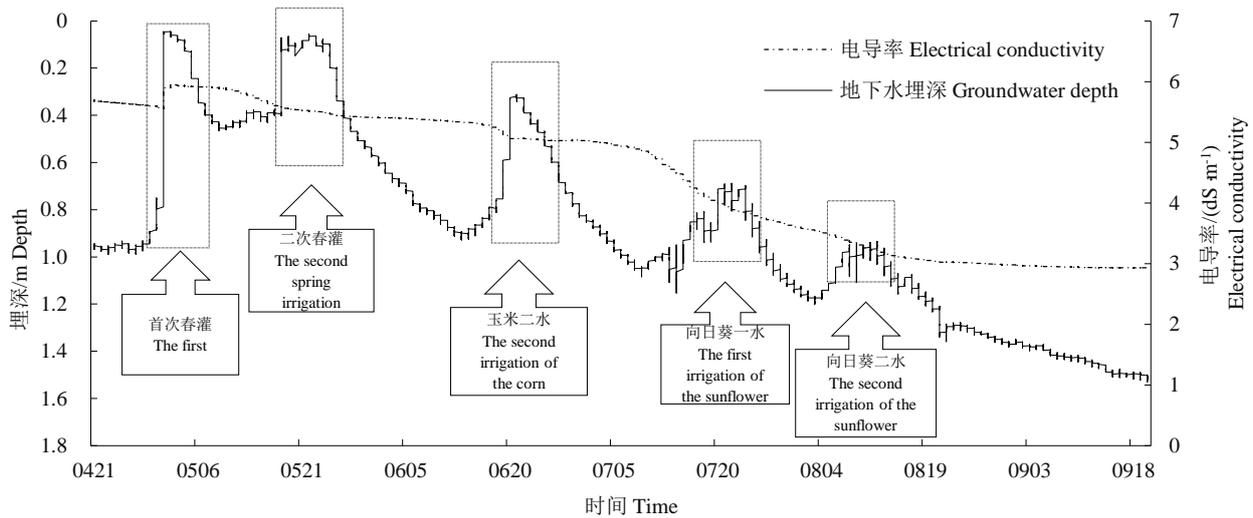


图 1 试验期间地下水埋深及电导率变化情况

Fig.1 Depth and conductivity of groundwater during the experiment

1.3 样品采集及数据分析

分别在春灌覆膜前(4月21日)、播种期(5月31日)、现蕾期(7月10日)、灌浆期(8月24日)和收获期(9月20日),用土钻在膜下正中位置采集各小区土壤样品,测定其土壤含盐量,并且加测春灌覆膜前、播种期和收获期3个时点的土壤盐分八大离子量,以此获得土壤盐分及其离子组成在春灌前后(4月21日—5月31日)、生育期前后(5月31日—9月20日)和种植全过程前后(4月21日—9月20日)3个过程的变化情况。考虑到滴灌的湿润深度通常在30 cm左右,故取样分为0~20、20~40和40~60 cm深度3个层次,依次反映湿润体内部、湿润体边缘、湿润体外部3个直接或间受滴灌影响的土壤盐分情况。

将土样自然风干后碾压过2 mm孔径标准筛,按

1:5土水比制取浸提液。春灌覆膜前(4月21日)、播种期(5月31日)和收获期(9月20日)3个时段的土样分别测定CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺8种离子,其中CO₃²⁻和HCO₃⁻采用双指示剂中和法测定;SO₄²⁻采用EDTA间接络合滴定法测定;Cl⁻采用硝酸银滴定法测定;Mg²⁺和Ca²⁺采用EDTA络合滴定法测定;K⁺和Na⁺采用火焰光度法测定。现蕾期(7月10日)和灌浆期(8月24日)仅测其全盐量即可。上述测定方法具体可参见文献[18]。对试验数据分析后采用Excel进行作图和统计分析。盐分总量以上述八大离子的总和计算。盐分及各离子量的变化率均为时段末的量减去时段初的量,再除以时段初的量计算,变化率为负值表明该过程盐分或离子量降低,正值则表明其量增加。

2 结果与分析

2.1 微咸水滴灌对土壤盐分总量及其分布的影响

图 2 为不同灌溉方式下，土壤各层盐分随时间的变化情况。微咸水滴灌 (CK) 和常规黄河水灌溉 (HG) 2 种灌溉方式下，土壤各层平均含盐量均表现出相同的季节性变化规律，即各层土壤都经历了一个先减小和后增加的过程。结合图 1 所示试验区地下水位及电导率的变化情况，春灌期间 (4 月 21 日春灌覆膜前—5 月 31 日播种)，由于 2 次春灌灌水量大且时间间隔短，地下水位迅速抬升并持续保持高位，甚至短期内接近地表，土壤中的盐分也随灌水被大量淋洗进地下

水中，导致地下水电导率升高。而在生育期内 (5 月 31 日播种—9 月 20 日收获)，由于试验区周边农田的灌溉活动，地下水位会出现波动，但在横向排泄和强蒸发作用下，地下水位整体缓慢降低，进入地下水中的盐分一部分向下随水排走，一部分则会随潜水蒸发向上返回到土壤上层。因此，在整个向日葵种植过程中 (4 月 21 日春灌覆膜前—9 月 20 日收获期)，土壤盐分都经历了一个由春灌主导的快速脱盐过程和由环境因素主导的缓慢积盐过程。并且 CK 处理下，20~40 cm 土层的盐分在生育期返盐过程中比 0~20 cm 和 40~60 cm 土层都高，而 HG 处理下各层土壤在各个时期都表现为 0~20 cm 含盐量高于其他各层。

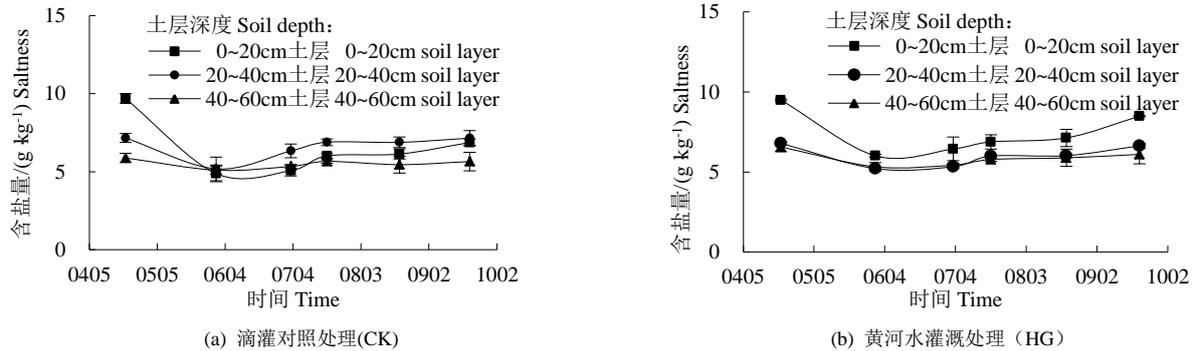


图 2 不同灌溉方式下土壤各层盐分变化情况

Fig.2 The change of the salty soil layers under different irrigation methods

表 7 给出了各层土壤 3 个节点时期土壤含盐量及其变化率。经过 1 个种植季后，土壤各层盐分都得到不同程度的降低，并且 CK 的盐分总量整体低于 HG 处理。进一步分析不同时期土壤盐分的剖面分布特征可以发现：春灌之前，CK 和 HG 处理的盐分割面都呈现为“上高下低”型，经过春灌之后，各层盐分都得到了淋洗，盐分割面表现为各层相近的特征，而经过 1 个生育期的返盐过程之后，HG 处理依然为“上高下低”型，CK 的含盐量则表现为“中间高两边低”

型，也就是 20~40 cm 发生了比 0~20 cm 和 40~60 cm 更强烈的积盐现象。

进一步分析不同处理各层盐分的变化率，CK 下 20~40 cm 土层在生育期前后盐分的增加率明显高于 HG 处理，而 0~20 cm 土层则与 HG 处理相近，40~60 cm 土层比 HG 处理低。从全种植过程前后盐分的变化率来看，CK 下 0~20 cm 土层盐分的降低率显著高于其他土层，也高于 HG 处理，而 20~40 cm 土层盐分的降低率远低于其他土层，接近于 0。

表 7 不同灌溉方式下土壤含盐量及其变化率

Table 7 The soil salt content under different irrigation methods and its rate of change

处理 Treatments	深度/cm Depth	含盐量/(g kg ⁻¹) Salt content			变化率/% Rate of change	
		0421	0531	0920	生育期前后	全种植过程
CK	0~20	9.69±0.32	4.88±0.53	6.87±0.22	40.78	-29.10
	20~40	7.16±0.29	5.18±0.75	7.15±0.08	38.03	-0.14
	40~60	5.88±0.30	5.09±0.26	5.65±0.09	10.89	-3.91
HG	0~20	9.49±0.05	6.01±0.08	8.48±0.03	41.10	-10.64
	20~40	6.79±0.07	5.21±0.05	6.63±0.16	27.26	-2.36
	40~60	6.56±0.21	5.32±0.07	6.10±0.10	14.60	-7.01

2.2 微咸水滴灌对土壤盐分离子组成及其分布的影响

图 3 给出了不同时期不同灌溉方式下各层土壤盐分离子的量。对比 5 月 31 日 (播前) 和 9 月 20 日 (收获时) 2 个时间点的离子剖面分布类型。播种前，2 种处理的各离子剖面类型差别不大，Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻都呈“中间高两边低”型，Na⁺都呈“上低

下高”型。经过一个生育期后，微咸水滴灌 (CK) 处理下，Ca²⁺变为了“上高下低”型，Na⁺和 Cl⁻变为了“中间低两边高”型，且绝对量整体增加，其他离子不变；常规黄河水灌溉 (HG) 处理下，除 Ca²⁺剖面类型不变外，其他离子都变为了“上高下低”型。

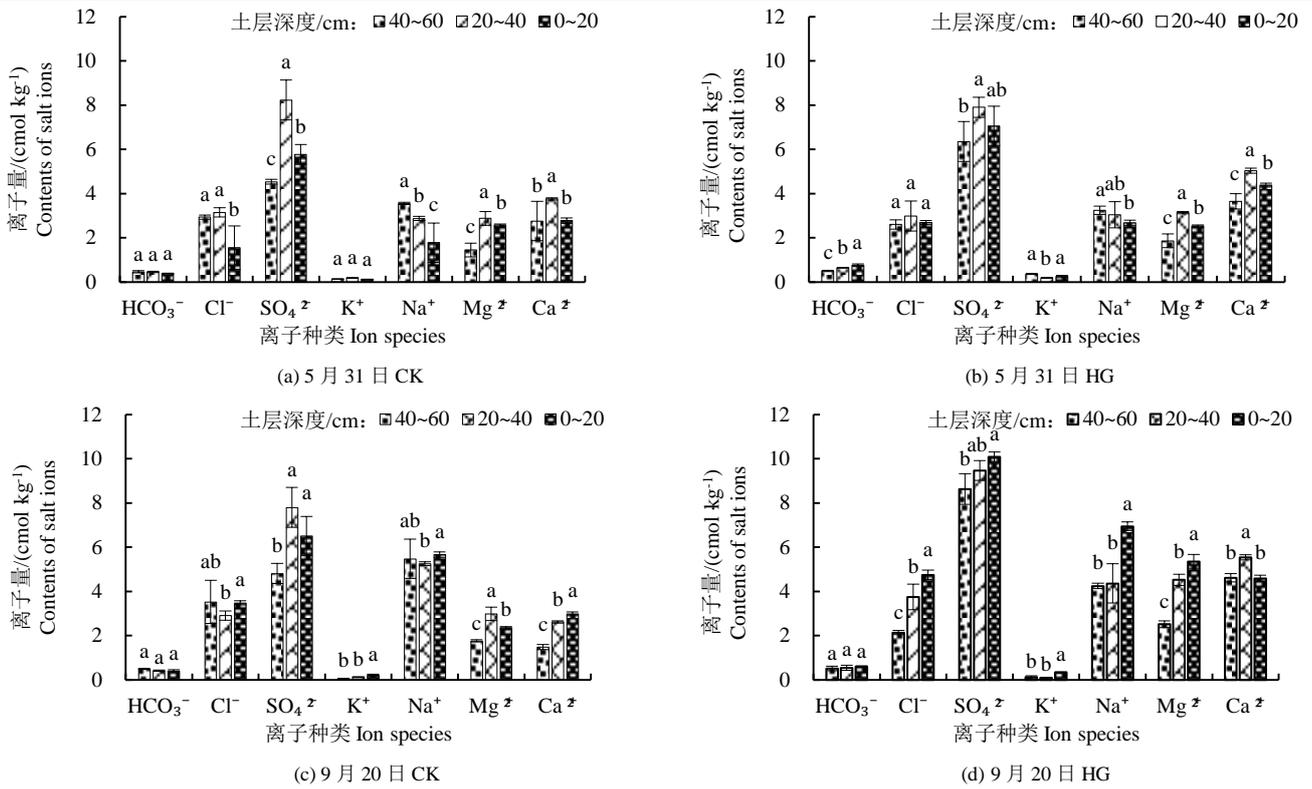


图3 不同时期不同灌溉方式下各层土壤盐分离子量

Fig.3 Contents of soil salt ions in different layers under different irrigation methods

结合表 8 具体给出的不同离子在生育期前后的平均变化率可以发现：2 种处理下，离子量变化的相同之处是 K⁺量都有所降低，而 Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺和 Na⁺都有不同程度的增加，且 SO₄²⁻、Mg²⁺的增幅相近。所不同的是 CK 下，Cl⁻和 Na⁺量的增幅远高于 HG 处理，同时 HCO₃⁻的量有所增加而 HG 处理却有所降低，Ca²⁺量又变为 CK 处理下有所降低而 HG 处理下其量大幅增加。

图 4 为 2 种灌溉方式下土壤盐分离子的组成情况。首先，不同处理和时期下，土壤 CO₃²⁻量均为 0；其

次，从离子组成上来看，2 种灌溉方式下土壤主要离子的种类相同，即阴离子都以 SO₄²⁻和 Cl⁻为主，并绝对占优，阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺和 Na⁺为主，且生育期前后主要离子的种类没有发生变化；第三，对比生育期前后不同离子的全盐占比，结合表 8 各离子绝对量的变化情况进行分析可以发现：不同处理不同离子绝对量和相对占比的变化并不同步，CK 下，Na⁺和 Cl⁻随绝对量增加的同时相对占比大幅提升，Ca²⁺随绝对量减小的同时相比占比也在减小，但 Mg²⁺和 SO₄²⁻在绝对量增加的同时相对占比却在减小。

表 8 不同灌溉方式下生育期前后土壤各盐分离子量的变化率

Table 8 Changes of soil salt ions under different irrigation methods during the growth period %

处理 Treatments	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
CK	6.48	47.21	40.27	-16.74	91.12	45.91	-14.70
HG	-2.81	26.79	50.58	-6.76	48.37	52.85	53.21

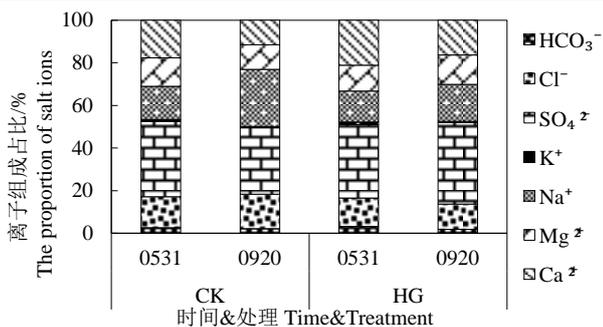


图 4 不同灌溉方式下土壤盐分离子组成情况

Fig. 4 Composition of soil salt ions under different methods

综上，2 种灌溉方式盐分总量的积累幅度上差别不大，但是常规黄河水灌溉下，各离子的绝对量虽有增有减，各离子的全盐占比却变化不大，而微咸水滴灌下，土壤的盐分变化不仅表现在绝对量上的变化，还表现在各个离子相对占比上的变化。微咸水滴灌下盐分离子变化相对于常规黄河水灌溉的特异性在于：①Na⁺的增幅显著高于常规黄河水灌溉，Na⁺在全盐中的占比也显著增加，而常规黄河水灌溉 Na⁺绝对量有所增加，但相对占比变化不大；②Ca²⁺量明显降低，占比降低，而常规黄河水灌溉 Ca²⁺绝对量有所增加，

占比变化不大; ③ HCO_3^- 量有所升高, 而常规黄河水灌溉下却略有降低。

2.3 改良材料施用对滴灌土壤盐分分布的影响

表 9 为不同处理土壤含盐量及其变化情况, 对比不同类型的改良材料施加下土壤各层含盐量可以发现: 改良材料可以显著影响土壤的盐分变化。春灌之前 (4 月 21 日), 3 种处理下土壤的盐分割面分布都表现为“上高下低”型, 经过春灌洗盐之后, CK 和 SWC 处理的盐分割面分布都表现为“中间高两边低”型, 而 SG (施加石膏) 处理处理则依然表现为“上高下低”型。经过一个全种植过程到收获季节时 (9 月 20 日), CK 的盐分割面分布为“中间高两边低”型, SWC 处理恢复为“上高下低”型, SG 处理处理则变为“中间低两边高”型。进一步分析不同处理下土壤含盐量的变化情况, 春灌脱盐过程中 (4 月 21 日—5 月 31 日), 3 种处理下各层盐分都大幅降低, 相比 CK, SWC 和 SG 处理的各层土壤盐分降低率整体高于 CK。在向日葵生长周期内 (5 月 31 日—9 月 20 日) 的积盐过程前后, SWC 处理的积盐率高于 SG 处理和 CK。

对比全种植过程 (4 月 21 日—9 月 20 日) 前后, 除 SWC 处理 20~40 cm 土层盐分有所增加外, 所有处理各层土壤上都不同程度地表现出脱盐效果 (盐分变化率为负), 其中 SG 处理的脱盐率大于 SWC 处理和 CK, 尤其是 SG 处理下 20~40 cm 土层盐分的降低率远高于其他处理。

综上, 2 种材料在不同的盐分运移过程中表现出不同的特征。首先, 在春灌引起的脱盐过程中, 生物炭和石膏处理的脱盐率相近, 都显著高于未施加改良材料的处理。其次, 作物生育期缓慢积盐的过程中, 生物炭处理表现出更强烈的返盐现象, 未施加改良材料的处理次之, 石膏处理返盐最弱。从对盐分割面的影响差异方面, 经过一个全种植过程到收获季节时 (9 月 20 日), CK 的盐分割面分布为“中间高两边低”型, SWC 处理恢复为“上高下低”型, SG 处理处理则变为“中间低两边高”型, 并且经过一个全种植过程后, CK 和 SG 处理的各层土壤盐分都表现出不同程度的降低, 但 SWC 处理下在其他土层盐分降低的同时, 20~40 cm 土层盐分却有所增加。

表 9 不同处理下土壤各层含盐量及其变化率

Table 9 Soil salt contents and their rates of change under different treatments

处理 Treatments	深度/cm Depth	含盐量/(g kg ⁻¹) Salt content			变化率/% Rate of change		
		0421	0531	0920	春灌前后 Spring irrigation	生育期前后 Growth period	全种植过程 Overall process
CK	0~20	9.69±0.32	4.88±0.53	6.87±0.22	-49.64	40.78	-29.10
	20~40	7.16±0.29	5.18±0.75	7.15±0.08	-27.65	38.03	-0.14
	40~60	5.88±0.30	5.09±0.26	5.65±0.09	-13.35	10.89	-3.91
SWC	0~20	16.5±0.76	8.33±0.09	13.98±0.23	-49.50	67.79	-15.27
	20~40	12.16±0.19	8.84±0.08	13.09±0.34	-27.26	47.99	7.65
	40~60	11.10±0.34	5.93±0.19	9.36±0.31	-46.53	57.71	-15.68
SG	0~20	19.03±0.42	7.49±0.39	10.22±0.56	-60.64	36.45	-46.30
	20~40	15.13±0.46	6.83±0.39	8.61±0.64	-54.84	26.07	-43.07
	40~60	9.91±0.50	6.57±0.30	8.99±0.53	-33.68	36.91	-9.20

2.4 改良材料对微咸水滴灌土壤盐分离子组成的影响

表 10 和表 11 给出了不同处理不同过程下土壤各盐离子量及其变化率。春灌前后, 土壤各个离子的变化率都表现出施加改良材料的处理比不施加改良材料的处理明显高的现象, 亦即改良材料不仅会引起盐分总量的变化, 还会引起盐分离子组成的强烈变化。对于 HCO_3^- , 所有处理都表现为其量增加, 各处理增幅由大到小依次为 SG 处理>SWC 处理>CK。对于 Cl^- 、 SO_4^{2-} , 不同处理下都表现为量减少, 且 SWC 和 SG 处理下, 此 2 种离子量的降幅显著高于 CK, 各处理 Cl⁻降幅依次为 SG 处理>SWC 处理>CK, SO_4^{2-} 降幅依次为 SWC 处理>SG 处理>CK。对于 K^+ , SWC

处理下 K^+ 量大幅增加, 而 SG 处理含 K^+ 量大幅降低, CK 则略有增加。对于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , 不同处理下都表现为各离子量显著降低, 且 SWC 处理都远高于 CK。

在生育期前后中, 不同处理下不同离子的变化情况表现出巨大差异。对于 HCO_3^- , SWC 和 SG 处理大幅降低, 而 CK 略微增加。对于 Cl^- , 所有处理下其含量都表现为增加, 但是 SWC 处理的增幅远大于 SG 和 CK。对于 SO_4^{2-} , SWC 和 SG 处理大幅增加, 且增幅明显高于 CK。对于 K^+ , SG 和 SWC 处理有所增加, 而 CK 有所减少。对于 Na^+ , CK 的增幅远高于 SG 和 SWC 处理。对于 Mg^{2+} 所有处理都有所增加,

SWC 处理的增幅远高于 SG 处理和 CK。对于 Ca^{2+} ，SG 处理大幅增加，而 CK 有所减少，SWC 处理则略有增加。

就种植全过程的前后对比而言，主要离子随盐分总量降低而降低，而个别处理的个别离子却有所增加。具体地，对于 HCO_3^- ，SG 处理和 CK 的量均略有增加，而 SWC 处理略有降低。对 Cl^- ，CK 和 SWC 处理略有增加，而 SG 处理却大幅降低。对于 SO_4^{2-} ，

所有处理都表现为降低，各处理降幅依次为 SWC 处理>CK>SG 处理。对于 K^+ ，CK 略有减少，SG 处理则大幅减少，而 SWC 处理却大幅增加。对于 Na^+ ，CK 大幅增加，而 SWC 和 SG 处理则分别略有增加和降低。对于 Mg^{2+} ，所有处理表现为大幅降低，各处理降幅依次为 CK>SG 处理>SWC 处理。对于 Ca^{2+} ，SWC 处理和 CK 大幅降低，且降幅相近，而 SG 处理则大幅增加。

表 10 不同处理下土壤盐分离子量

Table 10 Soil salt ion contents under different treatments cmol/kg

时间 Time	处理 Treatments	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
0421	CK	0.41±0.03	3.11±0.53	8.49±1.13	0.14±0.06	3.58±0.31	4.26±1.29	3.71±0.8
	SWC	0.36±0.02	3.99±0.66	20.58±3.77	0.2±0.06	5.79±0.83	7.47±1.44	10.22±2.31
	SG	0.38±0.01	3.77±0.51	11.58±4.26	0.28±0.08	4.83±0.84	5.08±1.11	4.87±2.82
0531	CK	0.43±0.03	2.54±0.65	6.17±1.26	0.14±0.02	2.73±0.52	2.3±0.76	3.1±0.37
	SWC	0.44±0.01	2.40±0.32	8.72±0.72	0.37±0.06	3.89±0.40	2.5±0.32	4.77±0.66
	SG	0.57±0.04	1.53±0.29	5.94±0.88	0.15±0.03	3.11±0.52	1.62±0.27	2.2±0.88
0920	CK	0.43±0.01	3.30±0.34	6.37±0.62	0.13±0.03	5.46±0.44	2.37±0.29	2.36±0.36
	SWC	0.38±0.01	2.62±0.64	11.9±1.37	0.29±0.04	4.51±0.75	5.51±0.56	3.33±1.19
	SG	0.42±0.01	2.31±0.19	5.24±2.09	0.12±0.03	3.55±0.46	2.24±0.52	1.53±1.63

表 11 不同处理下土壤盐分离子量的变化率

Table 11 Change rate of soil salt ion contents under different treatments %

时间 Time	处理 Treatments	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
春灌前后	CK	4.60	-18.35	-27.23	2.80	-23.70	-46.03	-16.51
	SWC	14.99	-38.20	-57.31	12.56	-31.38	-72.67	-45.89
	SG	19.38	-47.28	-29.92	-53.71	-17.61	-57.15	-12.52
生育期前后	CK	1.39	29.86	3.11	-11.56	99.60	2.91	-23.77
	SWC	-16.82	70.40	65.17	18.03	60.01	178.84	9.60
	SG	-15.80	32.93	40.85	16.03	18.11	67.43	41.22
种植全过程	CK	6.05	6.03	-24.97	-9.09	52.30	-44.46	-36.36
	SWC	-4.36	5.31	-29.49	32.85	9.79	-23.81	-40.69
	SG	0.52	-29.92	-1.30	-46.29	-2.69	-28.25	23.54

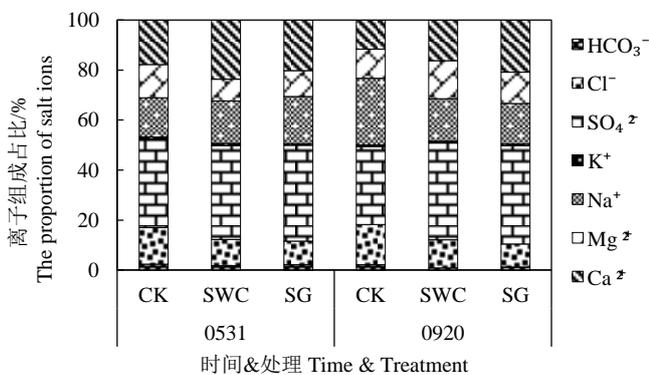


图 5 不同处理不同时期土壤盐分离子组成情况
Fig.5 Composition of soil salt ions in different treatments and periods

对比不同改良材料施加下，田间经历春灌脱盐和生育期积盐 2 个过程后，土壤盐分离子的组成情况如图 5 所示。首先，不论是春灌脱盐过程之后（5 月 31 日）还是生育期积盐过程之后（9 月 20 日），SWC 和 SG 处理的土壤相比 CK 表现出一定的共性，即阴离子中 Cl^- 的占比更低， SO_4^{2-} 占比更高，而阳离子中 Ca^{2+} 占比更高， Na^+ 占比更低。其次，在经历春灌脱盐过程后，相比 CK，SWC 和 SG 处理土壤 Cl^- 和 Mg^{2+} 占比明显更低， SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 占比明显更高，而 SWC 和 SG 处理之间各离子占比之间的差异不明显。第三，在经历生育期返盐过程后，CK 土壤 Cl^- 和 Na^+ 占比明显高于 SWC 和 SG 处理，而 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+}

占比明显低于 SWC 和 SG 处理。在 SWC 和 SG 处理之间对比, 土壤离子占比差异主要表现为 SG 处理下土壤 Ca^{2+} 占比更高, Mg^{2+} 占比更低, 其他各离子占比差异相近。

3 讨论

3.1 微咸水滴灌对土壤盐分及其离子组成的影响

从土壤盐分的时空变化规律来看, 在整个向日葵种植过程中 (4 月 21 日春灌覆膜前—9 月 20 日收获期), 当地土壤盐分变化的一般规律是: 土壤盐分会经历一个由春灌引起的快速脱盐过程 (4 月 21 日春灌覆膜前—5 月 31 日播种) 和一个生育期内 (5 月 31 日播种—9 月 20 日收获) 强蒸发引起的缓慢积盐过程, 这种变化受当地农业种植模式和地区环境因素如地下水埋深、土壤质地及结构性质和当地气候条件等共同影响^[13], 土壤各层含盐量的变化是脱盐和返盐两个过程叠加影响的结果。地下水位及其矿化度的变化过程虽然直接影响土壤盐分的分布和动态, 但是考虑到试验小区面积很小 ($8\text{ m} \times 15\text{ m}$), 并且是所有小区是在同一大地块内随机划分布设, 不同小区在该尺度内, 地下水埋深、土壤质地及结构性质和当地气候条件等因素没有显著差异, 周边农田对试验区地下水的影 响也是基本均等的。因此, 尽管地下水等因素对土壤盐分具有直接的、不可忽视的影响, 但是这种影响对于不同试验小区是基本一致的, 不同小区之间的盐分特征是由处理差异造成的。

在盐分总量上, 使用矿化度低于 3.0 g/L 的微咸水滴灌不会造成比常规黄河水灌溉更严重的盐渍化结果。但是在生育期积盐过程中, $0\sim 20\text{ cm}$ 和 $40\sim 60\text{ cm}$ 土壤盐分的变化率, CK 与 HG 处理相近, 而 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层的盐分变化率, CK 比 HG 处理高 10%。滴灌作为非充分灌溉, 会在湿润体内部形成脱盐淡化区, 在湿润体边缘区域形成盐分积累区, $20\sim 40\text{ cm}$ 土层正是湿润体的边缘区域。故而相比常规黄河水灌溉, 使用矿化度低于 3.0 g/L 的微咸水进行滴灌, 虽不会造成盐分总量的增加, 但是会造成 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层发生比 $0\sim 20$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 更强烈的积盐现象, 这也与周铸等^[15]的室内研究结果一致。对比 4 月 21 日 (春灌覆膜前) 和 9 月 20 日 (收获期) 2 个时间节点的土壤含盐量变化, 相比 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层, $20\sim 60\text{ cm}$ 土层由于春灌脱盐和地下返盐过程造成的含盐量变化之间的差异较小, 导致不论 CK 还是 HG, 2 个处理 $20\sim 60\text{ cm}$ 土层的含盐量变化都很微弱, 脱盐效果都不明显。从盐分组成上讲, 微咸水滴灌与常规黄河水灌溉虽然在离子组成上都表现为阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主, 且绝对占优, 阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主的特点, 而这种

特点属于试验地的地区性土壤属性, 在短期内即使灌溉方式不同, 也不会发生大的变化。上述结果结合叶志刚^[19]、王雅琴等^[20]、李金刚等^[21]在河套地区开展的田间微咸水滴灌试验, 杨树青等^[22]利用 MODFLOW 模型和 MT3DMS 模型所进行的微咸水灌溉条件下, 地下水位、水量、水质和含盐量的模拟分析研究, 可以说明合理的灌溉制度下, 在河套灌区利用微咸水进行滴灌种植并不会造成比常规黄河水灌溉更严重的盐渍化问题。

与黄河水灌溉不同的是, 微咸水滴灌各离子的剖面类型并不完全与盐分总量保持一致。造成这种差异的原因是黄河水灌溉单次灌水量大而灌溉次数少, 且以漫灌的方式进行。灌后由于土壤水分增加而使得蒸发返盐作用增强^[23], 因此黄河水灌溉土壤盐分离子的剖面分布与盐分总量剖面一致, 呈“上高下低”型。滴灌由于频繁淋洗, 只有迁移性较强的 Na^+ 和 Cl^- 能够随再次上移到表面, 其他离子则被抑制在湿润体边缘附近。周铸等^[15]通过室内土柱试验的研究得出微咸水滴灌下 Ca^{2+} 主要集聚在 $15\sim 20\text{ cm}$ 土层, Na^+ 由于土壤胶体的弱吸附能力和在土壤溶液中容易迁移的特性, 大部分都被淋洗到了土壤的下层, 集中在 40 cm 处。造成这种差异的原因可能在于田间试验与室内土柱实验的环境差异。进一步对比生育期返盐过程前后各个离子量的变化, 微咸水滴灌虽然在对盐分总量的影响上与常规黄河水灌溉差别不大, 但是对于离子的量及组成的影响上表现出明显差异。造成这种差异的原因可能在于, 相比常规黄河水灌溉所用的黄河淡水, 滴灌所用微咸水中还有大量的 Na^+ 和 HCO_3^- , 灌溉过程中, 一方面微咸水本身会大量引入这 2 种离子造成其含量增加, 另一方面微咸水中大量的 Na^+ 在置换出土壤胶体上的 Ca^{2+} 后, Ca^{2+} 随灌溉水下行而被淋洗到下层, 在返盐过程中又由于 Ca^{2+} 迁移性比 Na^+ 弱, 所以 Ca^{2+} 很难再随上行水返回土壤上层。综合上述讨论, 使用矿化度低于 3.0 g/L 的微咸水进行滴灌, 与常规黄河水灌溉相比, 虽不会造成盐分总量上的明显积累, 但是会使盐分在 $20\sim 40\text{ cm}$ 处积聚, 同时会降低土壤 Ca^{2+} 量和占比, 增加 Na^+ 、 Cl^- 的量和占比, 促使土壤盐分向钠质化发展。钠离子量增多会造成土壤颗粒收缩、胶体颗粒分散和膨胀, 进而导致土壤孔隙度减少, 影响土壤的渗透性和作物根系的生长发育^[21]。这种离子组成的变化一方面会增加土壤碱化的可能性, 同时也会使得土壤理化性质逐渐恶化, 另一方面也会增加土壤盐分对作物生长的毒害作用。因此, 如何消解微咸水滴灌可能引发的上述风险是微咸水安全利用一个重要问题。

3.2 改良材料对微咸水滴灌土壤盐分及其离子组成的影响

盐碱化土壤中,盐胁迫通过离子毒害、营养失衡和渗透胁迫等引起植物体生理生化代谢失调,进而影响其生长发育、产量和品质^[24]。盐分对作物生长的影响不仅表现出盐分总量上的差异,还表现出离子组成上的差异,因此改良材料对土壤盐分的影响效应应从盐分总量和离子组成2个角度去分析讨论。

就盐分总量的降低效果而言,施加生物炭和石膏可以显著提高土壤脱盐率,这与刘易等^[25]的研究结果一致,但是2种改良材料的影响机理和效果存在差异。生物炭对于土壤的影响主要在于它可以降低土壤的体积质量,增加土壤的总孔隙度^[26],增大质地较黏的土壤的通透性,促进土壤水分入渗^[27]。石膏对于土壤的影响在于引入大量 Ca^{2+} 置换掉 Na^+ ,由于含 Ca^{2+} 胶体微粒的外层不吸附水分子,使 Na 质亲水胶体变为 Ca 质疏水胶体,胶体微粒自己能互相靠近而聚团,促进土壤形成水稳性团粒结构,从而改善土壤结构,促进土壤盐分淋洗^[28-29]。尽管生物炭和石膏对土壤理化性质的影响有差异,但是脱盐过程主要是由春灌时下行水的强烈淋洗造成的,这一过程通常迅速而强烈,从而导致它们对土壤盐分的影响差异没有明显地表现出来。而在生育期内缓慢返盐过程中,生物炭对于土壤结构的影响主要来自自身疏松多孔的结构特性,因此对土壤通透性的影响上是双向的,在增强土壤水分入渗能力的同时,也有增强了土壤水分上行的能力,同时由于其多孔特性,增强了土壤的持水性能,使得土壤水分能够保持在一个较高水平,土壤水分蒸发作用增强^[30],所以生物炭处理下表现出比其他处理更强烈的返盐现象,这也与李文雪^[31]的研究结果一致。

进一步讨论改良材料对于土壤盐分离子的影响。首先,就试验全过程而言,土壤盐分总量降低的同时,未施加改良材料的土壤含 Na^+ 量大幅增加, Na^+ 、 Cl^- 的全盐占比也增大,这种结果与王丹等^[32]的研究结果相印证。而生物炭和石膏处理的 Na^+ 、 Cl^- 的量和占比则明显降低,这说明改良材料可以抑制微咸水滴灌引起的钠质化问题,避免因 Na^+ 量的增多而导致土壤黏粒和团聚体分散,土壤对水和空气的渗透性降低的问题,以及因 Cl^- 量的增加对作物根系产生毒害的问题。其次,就盐分运移的具体过程而言,在脱盐过程中,虽然生物炭和石膏处理的总脱盐率相近,但是生物炭处理下土壤含 K^+ 量大幅增加,造成这种差异的原因在于生物炭本身具有较高量的水溶性钾,释放到土壤中提高土壤含 K^+ 量^[33]。在积盐过程中,未施加改良材料的处理,土壤盐分积累的类型主要是 NaCl ,而生物炭处理积累的盐分以 MgSO_4 、 Na_2SO_4 、 MgCl_2

为主,石膏处理积累的盐分类型主要是 MgCl_2 ,这种差异是土壤通透性、离子迁移性差异、土壤胶体与土壤溶液间的离子交换等多方面因素共同作用的结果。未施加改良材料的土壤通透性最差,因此盐分积累以迁移性最强的 Na^+ 、 Cl^- 为主,而生物炭可以显著增加土壤通透性,因此 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 这种迁移性相对较弱的也可以随水向上迁移,石膏对于离子的影响应该是介于生物炭和不施加改良材料处理之间。这种差异也反映出不同的改良材料虽然都可以影响到盐分总量的变化,但是在总量变化的同时,土壤盐分的类型和离子组成也会向不同的方向发展,在以后的相关研究和实践中应该给予重视和关注。

4 结论

1) 使用矿化度小于 3.0 g/L 的微咸水进行滴灌不会引起更严重的盐分积累问题,但是会造成盐分在 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层的强烈积累,以及土壤 Na^+ 、 Cl^- 量和全盐量增加,促使土壤盐分向钠质化方向发展。

2) 微咸水滴灌配施加石膏或生物炭虽然都可以显著提高土壤脱盐率,抑制土壤 Na^+ 、 Cl^- 量和占比的增加,但在作物生育期缓慢积盐过程中,生物炭也表现出更强烈的返盐现象。2种改良材料在降低 Na^+ 、 Cl^- 量和全盐占比的同时,生物炭会显著增加土壤 K^+ 的量及 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的全盐占比,石膏处理则在其他离子的量都降低的同时,提高了 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的全盐占比。

3) 灌溉方式、改良材料在对土壤盐分总量造成影响的同时,也会促使土壤盐分类型向不同的方向发展,而在微咸水滴灌利用过程中,配施生物炭和石膏等改良材料不仅可以提高土壤脱盐率,还可以消除由于微咸水滴灌引起的土壤钠质化问题所造成的不良影响,这为盐碱地改良利用提供一个更加科学有效的技术方案。

参考文献:

- [1] 叶志勇,郭克贞,赵淑银,等.河套灌区节水农业发展现状及其近期重点[J].中国农村水利水电,2010(6):81-84.
YE Zhiyong, GUO Kezhen, ZHAO Shuyin, et al. The current development and focal points in short-term water-saving agriculture in Hetao Irrigation District[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(6): 81-84.
- [2] 步文瑜,孙慧,刘繁星.河套灌区水资源短缺状况及其对策[J].内蒙古水利,2002(4):65-66.
BU Wenyu, SUN Hui, LIU Fanxing. Water shortage and countermeasures in Hetao Irrigation District[J]. Inner Mongolia Water

- Resources, 2002(4): 65-66.
- [3] 雷廷武, SHAINBERG I, 袁普金, 等. 内蒙古河套灌区有效灌溉及盐碱控制的战略思考(英文)[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1):48-52.
LEI Tingwu, SHAINBERG I, YUAN Pujin, et al. Strategic considerations of efficient irrigation and salinity control on Hetao plain in inner mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(1): 48-52.
- [4] 朱珠. 微咸水膜下滴灌研究综述[J]. 科技视界, 2017(6):75-105.
ZHU Zhu. Review of research on drip irrigation under brackish water film [J]. Science & Technology Vision, 2017(6): 75-75.
- [5] 李金刚, 屈忠义, 黄永平, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 217-223.
LI Jingang, QU Zhongyi, HUANG Yongping, et al. Effects of control lower limit of saline water mulched drip irrigation on water salt movement and corn yield in saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 217-223.
- [6] 王泽鹏, 郭向红. 微咸水矿化度与滴头流量对土壤湿润体的影响与模拟[J]. 节水灌溉, 2018(12): 49-53.
WANG Zepeng, GUO Xianghong. Influence and simulation of brackish water salinity and emitter discharge on soil wetting volume[J]. Water Saving Irrigation, 2018(12): 49-53.
- [7] 何雨江, 蔺文静, 王贵玲. 膜下微咸水滴灌棉田盐分聚集特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 51-54, 62.
HE Yujiang, LIN Wenjing, WANG Guiling. Accumulation characteristic of soil salinity in cotton field under mulched drip irrigation with brackish water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(5): 51-54, 62.
- [8] ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, REA E, et al. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1/2): 99-117.
- [9] KANG Y H, CHEN M, WAN S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina* Kulesh) in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1 303-1 309.
- [10] ZHANG T B, ZHAN X Y, KANG Y H, et al. Improvements of soil salt characteristics and nutrient status in an impermeable saline—sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation while ridge planting *Lycium barbarum* L[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(4): 1 126-1 139.
- [11] 边荣荣, 黄永飞, 李惠军, 等. 不同改良剂对干旱区盐碱地改良效果研究进展[J]. 农业科学研究, 2017, 38(3): 69-75.
BIAN Rongrong, HUANG Yongfei, LI Huijun, et al. Research advances in the improvement of saline-alkali soil in arid area by application of modifier[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2017, 38(3): 69-75.
- [12] 李凯, 王晓梅, 谭雪梅, 等. 改良剂配施对盐碱土碱性特征的影响[J]. 科学技术创新, 2017(2): 131.
LI Kai, WANG Xiaomei, TAN Xuemei, et al. Effect of modifier application on alkaline characteristics of saline-alkali soil[J]. Science and Technology Innovation, 2017(2): 131.
- [13] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5 291-5 297.
HAN Jianhong, LI Yanwei, ZHANG Lianke, et al. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5 291-5 297.
- [14] 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 42-46.
MA Donghao, WANG Quanjiu, LAI Jianbin. Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 42-46.
- [15] 周铸, 杨培岭, 任树梅. 滴灌结合脱硫石膏改良盐碱土过程中水盐运移规律[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 14-20.
ZHOU Zhu, YANG Peiling, REN Shumei. Transport of soil salt and water in the process of improving alkaline soil with drip irrigation and desulfurized gypsum[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(6): 14-20.
- [16] 内蒙古自治区质量技术监督局. 内蒙古河套灌区盐碱地食用向日葵抗盐高产栽培技术规程: DB15/T 651—2013[S].
Technical Regulations for Salt-tolerant High-yield Cultivation of Edible Sunflower in Saline-Alkali Land in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia: DB15/T 651—2013[S]
- [17] 内蒙古自治区质量技术监督局. 中西部地区向日葵膜下滴灌技术规程: DB15/T 908—2015[S].
Technical Regulations for Sunflower Drip Irrigation under Film in the Midwest of Inner Mongolia Autonomous Region: DB15/T 908—2015[S].
- [18] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
LAO Jiacheng. Soil agrochemical analysis manual [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1988.
- [19] 叶志刚. 河套灌区区域微咸水灌溉模式的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
YE Zhigang. Research on regional brackish water irrigation mode in Hetao irrigation area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [20] 王雅琴, 刘洪光, 朱拥军. 重盐碱地膜下滴灌土壤盐分运移规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 58-60.
WANG Yaqin, LIU Hongguang, ZHU Yongjun. Salinity migration rule under mulching plastic drip irrigation in heavy salty soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 58-60.
- [21] 李金刚, 屈忠义, 孙贵芳, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分离子分布

- 和番茄产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017(3): 31-35, 39.
- LI Jingang, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effect of saline water mulched drip irrigation on soil salt ions distribution and yield of tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2017(3): 31-35, 39.
- [22] 杨树青, 史海滨, 杨金忠, 等. 干旱区微咸水灌溉对地下水环境影响的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 565-574.
- YANG Shuqing, SHI Haibin, YANG Jinzhong, et al. Study on effect of brackish water irrigation on groundwater environment in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 565-574.
- [23] 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 1-4.
- LI Yi, WANG Wenyan, WANG Qianjiu, et al. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(1): 1-4.
- [24] 聂惠, 于海峰, 刘浩明. 向日葵对盐胁迫的反应及其抗盐机理的研究进展[J]. 内蒙古农业科技, 2008, 36(6): 17-19.
- NIE Hui, YU Haifeng, LIU Haoming. Response of sunflower to salt stress and its salt resistance mechanism[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2008, 36(6): 17-19.
- [25] 刘易, 冯耀祖, 黄建, 等. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 146-152.
- LIU Yi, FENG Yaozu, HUANG Jian, et al. Effects of modifiers on saline soil salt distribution under brackish water irrigation conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 146-152.
- [26] 潘洁, 肖辉, 程文娟, 等. 生物黑炭对设施土壤理化性质及蔬菜产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 174-178.
- PAN Jie, XIAO Hui, CHENG Wenjuan, et al. Effect of biochar on vegetable yields and the soil physical and chemical properties in greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31): 174-178.
- [27] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- GAO Haiying, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effects of Biochar and Biochar-based Nitrogen Fertilizer on Soil Water-holding Capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 207-213.
- [28] 赵锦慧, 乌力更, 红梅, 等. 石膏改良碱化土壤中所发生的化学反应的初步研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 484-488.
- ZHAO Jinhui, WU Ligeng, HONG Mei, et al. A preliminary study on chemical reaction in the process of improvement of alkali-affected soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 484-488.
- [29] 王旭, 何俊, 孙兆军, 等. 脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子影响研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1 210-1 217.
- WANG Xu, HE Jun, SUN Zhaojun, et al. Effects of desulfurized gypsum combined with furfural residue on permeability and salt ions in alkalinized solonchak[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1 210-1 217.
- [30] 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- XU Jian. Study on the influence of biochar experimental on the migration of soil water and salt[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [31] 李文雪. 生物炭添加对盐碱土水气传导的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.
- LI Wenxue. Effect of biochar addition into saline soil on hydraulic conductivity and air permeability[D]. Yantai: Ludong University, 2018.
- [32] 王丹, 康跃虎, 万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 83-87.
- WANG Dan, KANG Yuehu, WAN Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 83-87.
- [33] LEHMANN Johannes, JOSE Pereira da Silva, STEINER Christoph, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant & Soil, 2003, 249(2):343-357.

The Effects of Soil Amendment with different Materials on Soil Salt Distribution and Its Ion Composition under Brackish-water Drip Irrigation

ZHENG Fule^{1,2}, YAO Rongjiang^{1,3*}, YANG Jingsong^{1,3}, WANG Xiangping^{1,3}, CHENG Qiang⁴, LI Hongqiang^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture/Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dongtai Institute of Tidal Flat Research, Nanjing Branch of Chinese Academy of Sciences, Dongtai 224200, China; 4. Centre of Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension of Hanggin Rear Banner of Inner Mongolia, Shaanba 015400, China)

Abstract: **【Background】** Inferior irrigation and drainage management has resulted in soil salinization undermining agricultural production and water resources use efficiency in Hetao Irrigation District. Combining soil amendment and brackish groundwater irrigation could control soil salinity and has been widely studied. However, most existing research has focused on its impact on total soil salt and crop yield, while the associated change in ion composition has been overlooked. **【Objective】** The purpose of this paper is to study the influence of drip irrigation with brackish groundwater, along with different soil amendments, on salt dynamics and its ion composition in soil. **【Method】** The experiment was conducted in a moderate-heavy saline field in Hetao Irrigation District with sunflower as the model plant. It consisted of four treatments: ①Conventional flooding irrigation without soil amendment. ②Brackish water drip irrigation without soil amendment. ③Brackish water drip irrigation with soil amended by biochar. ④Brackish water drip irrigation with soil amended by gypsum. In each treatment, we measured salt content and its ion composition. **【Result】** The average soil desalination under brackish water drip irrigation was 13.46%, up 7.14% against the conventional irrigation. Drip irrigation did not lead to a noticeable salt accumulation, but compared with conventional irrigation, it increased Na^+ and Cl^- content by 91.13% and 47.21% respectively, giving rise to sodication and salt accumulation in the 20~40 cm soil. Brackish water drip irrigation coupled with soil amendment by biochar or gypsum enhanced soil desalination and reduced soil sodication, especially the gypsum amendment which increased soil desalination by 46.30%. Compared with other treatments, brackish water drip irrigation coupled with biochar amendment increased salt content and proportion of K^+ , Mg^{2+} and SO_4^{2-} in the topsoil during the growth season of the sunflower. On the contrary, brackish water drip irrigation with gypsum amendment reduced the proportion of Na^+ , Cl^- and Mg^{2+} at the expense of Ca^{2+} and SO_4^{2-} in the topsoil. **【Conclusion】** Brackish water irrigation coupled with soil amendment not only affected soil salinity but also alerted its ion composition. Combining brackish water drip irrigation with soil amendment with biochar and gypsum improved soil desalination and ameliorate sodium accumulation – a typical phenomenon accompanied with brackish water irrigation. Our results have important implications for improving saline-alkali soil management and water use efficiency in irrigated cropping systems in arid areas like Hetao Irrigation District.

Key words: brackish water drip irrigation; Hetao Irrigation District; soil salinity; ionic composition; biochar; gypsum

责任编辑：赵宇龙