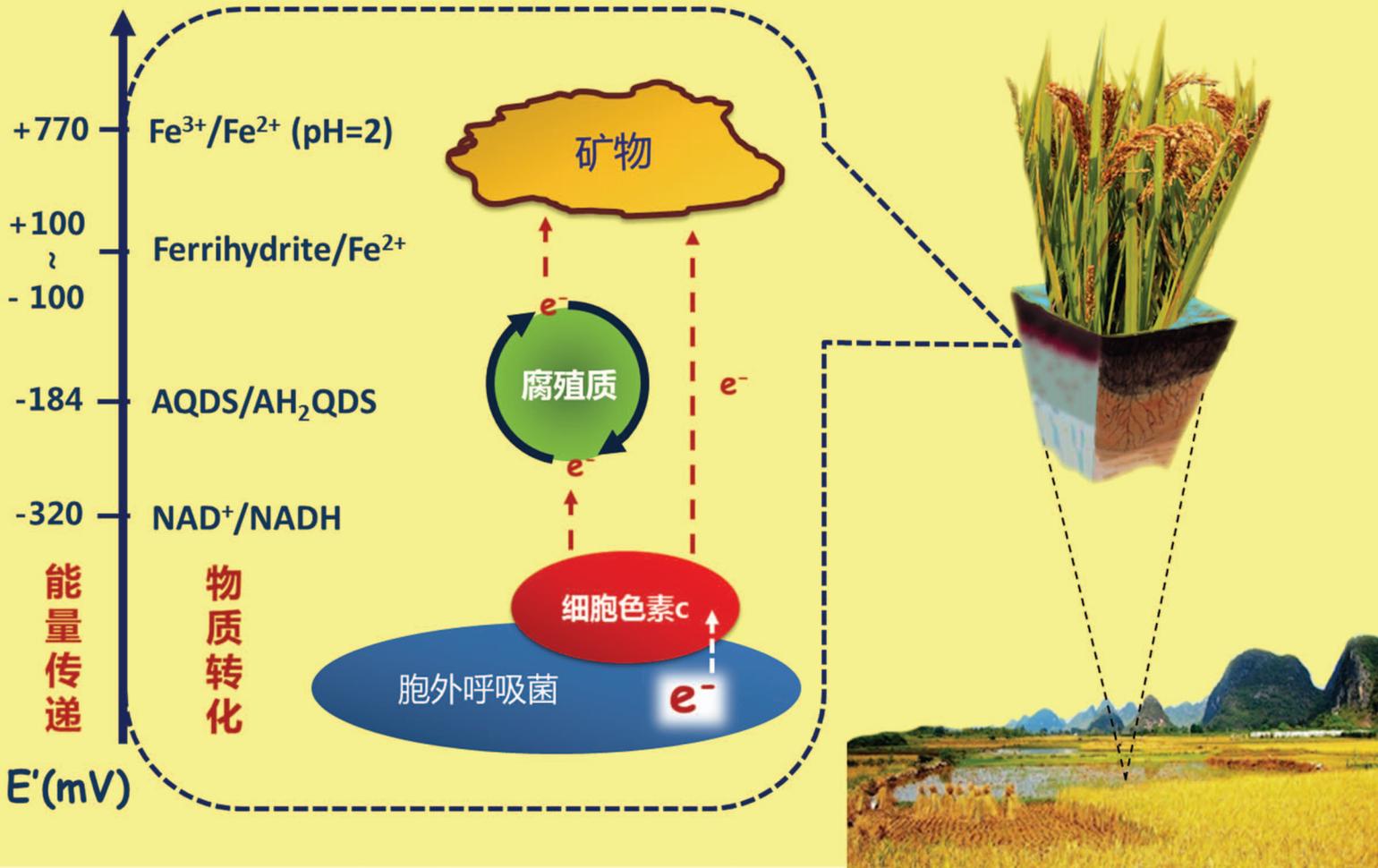


Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

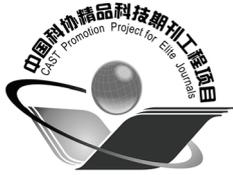


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

目 次

综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
- 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列S₃剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
- 基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
- 基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
- 基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
- 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
- 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
- 汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
- 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
- 基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
- 拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)
- 砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
- AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
- 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
- 臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
- 黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
- 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
- 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
- 基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
- 适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
- 旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
- 西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
- 加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
- 不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201506240156

咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响*

张越^{1, 2} 杨劲松^{1, 2†} 姚荣江^{1, 2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 室内咸水冰融化试验设置2个处理: 7.5 g L⁻¹咸水冰(SIW(7.5))、15 g L⁻¹咸水冰(SIW(15)), 探究了咸水冰融化过程中的水量、水质以及离子组成的变化; 土柱模拟试验设置同一灌水量(150mm), 4个处理: 淡水直接灌溉(FW)、7.5 g L⁻¹咸水直接灌溉(SW)、7.5 g L⁻¹咸水冻融灌溉(SIW(7.5))、15 g L⁻¹咸水冻融灌溉(SIW(15)), 对比分析两种灌溉水质(淡水、咸水)和两种灌水方式(直接灌溉、结冰灌溉)对土壤(粉砂壤土)水盐动态的影响。结果表明: 咸水冰融化过程中, 初期融出水量较大, 但含盐量和钠吸附比(SAR)较高, 后期融出水量较小, 含盐量和SAR很低; 融出水的离子含量变化与电导率(EC)变化表现相同的趋势; 小于3 g L⁻¹的水的融出率分别是SIW(7.5) = 25.46%和SIW(15) = 32.78%。FW处理下, 土壤中水盐运动持续时间较其他3个处理长, 土壤导水率降低最快, 灌溉水入渗完成时表层土壤含水量达到33.88%, 显著高于其他处理。四种处理下, 0~15 cm土层土壤的含盐量平均值分别为FW=2.32 g kg⁻¹、SIW(7.5)=2.80 g kg⁻¹、SIW(15)=3.87 g kg⁻¹、SW=4.31 g kg⁻¹。同等灌水量下, SIW(15)处理下土壤脱盐深度最浅。离子分析表明: FW和SIW(7.5)处理下, 0~25 cm土壤的钠吸附比(SAR)下降明显, 显著小于SW、SIW(15); 然而FW处理下, 土壤碱化特征最为明显。综合而言, 在淡水资源缺乏而咸水资源相对丰富的地区, 中度矿化度咸水结冰融水灌溉可以有效降低根层土壤盐分, 满足农业生产的要求。

关键词 滨海盐渍土; 咸水冰; 钠吸附比; 电导率; 入渗; 总碱度

中图分类号 S156.4 **文献标识码** A

我国盐渍土总面积约 3.60×10^7 hm², 分布广泛, 从热带到寒温带、沿海到内陆、湿润地区到极端干旱的荒漠地区, 均有大量盐渍土的分布^[1]。环渤海地区一直是我国传统经济核心区域和粮食产区之一, 该区地下水位一般为1.0~2.0 m, 矿化度一般在5 g L⁻¹以上, 高者可达20~30 g L⁻¹^[2-3]。该地区降雨比较集中, 春季气温上升, 降雨量小而蒸发强烈, 土壤返盐严重, 影响作物出苗; 夏季降雨充沛, 盐分淋洗至土壤深层; 秋冬季节, 降雨稀少, 蒸发量大, 盐分随之向土壤表层移动, 加上土壤表层形成冻层, 形成隐蔽性积盐过程^[4-5]。该地

区土壤盐渍化严重, 形成了大量的中低产田和盐碱荒地, 仅河北省就有滨海盐碱地200 km²左右, 其合理开发对保障我国耕地安全具有重要的意义^[6]。

目前, 以淡水洗盐为基础的水利工程措施是治理盐碱地最有效的方法, 但渤海湾沿岸地区淡水资源匮乏, 该地区埋藏着丰富的地下咸水。据初步统计, 河北省东部沿海地区咸水总量达到7.17亿m³^[2]。在枯水年份, 咸水直接利用存在次生盐渍化和作物减产的风险^[7-9], 如果能以简单的方法对这些地下咸水进行脱盐处理, 使之成为能被农业生产所利用的新水源, 不仅可以解决当地农业用水

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02)、国家自然科学基金项目(41171181)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1005-1)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2013BAD05B02), the National Natural Science Foundation of China (No. 41171181), and the Jiangsu Provincial Agricultural Science and Technology Innovation Program of China (No. CX(15)1005-1)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

作者简介: 张越(1990—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事咸水资源高效利用研究。E-mail: yuezhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2015-06-24; 收到修改稿日期: 2015-09-30

严重短缺的问题，还可用于改造盐碱荒地，缓解由于滨海新区建设所带来的耕地减少的矛盾^[2-3]。张国明和张峰^[10]分析了环渤海地区盐碱土其特殊的形成过程和原因，并提出与海冰淡水农业灌溉密切结合的改良利用对策和相关措施；史培军等^[11]根据实地观测和室内不同盐度海水的实验分析，阐述了渤海海冰脱盐机理。但由于利用海冰存在生产、运输和保存等一些关键问题尚未突破，实际应用还需论证^[10]。咸水冻融灌溉是一种新型咸水利用方式，即将冬季自然冷资源与滨海盐碱地区丰富的咸水资源相结合，通过冬季灌水自然结冰，使咸淡分离，再利用结冰融化时咸水先流出，淡水后流出的原理，对土壤起到一定的洗盐作用^[12]。在自然条件下，咸水的含盐量和结冰温度存在变异性，室内利用咸水进行结冰融化试验表明：矿化度较低的咸水冰在较低的温度条件下融化，淡化效果较好^[13]。潘洁等^[14]通过收集同体积的咸水冰融出水来研究咸水冰融化过程中离子的迁移规律，发现融出水的离子组成存在差异；郭凯等^[15]通过室内土柱试验得出低钠吸附比的咸水结冰处理下的脱盐效果显著优于淡水处理和咸水直接入渗处理的结论；Li等^[12]在室内利用不同矿化度的咸水进行咸水结冰融水入渗模拟试验，得出咸水结冰处理下的脱盐深度要大于淡水结冰处理。这些研究初步揭示了咸水冻融灌溉的理论基础，对于咸水冻融灌溉在

滨海地区的实际应用具有重要意义。

咸水冻融灌溉经历了咸水冰融化和融水入渗两个过程，这两个过程共同决定了灌溉的淋洗效果。然而，目前对于咸水冰融化过程中的离子迁移的研究相对较少^[13-14, 16]，而咸水冻融灌溉后土壤剖面水盐分布随时间变化过程的研究还需补充，土壤中主要离子迁移规律的研究还较缺乏^[14, 16-17]。基于以上分析，本研究通过室内模拟试验，探索以下问题：（1）咸水冰融化过程水量、电导率（EC）和离子的变化规律；（2）咸水冻融灌溉下不同时期土壤剖面的水盐分布；（3）咸水冻融灌溉下土壤脱盐层钠吸附比（SAR）与总碱度的变化规律。

1 材料与方 法

1.1 咸水冰融化水量与水质测定试验

试验开始之前通过野外调查获取当地可利用咸水的水质状况，列于表1。室内试验采用河北省海兴县产的海盐为主原料，用去离子水溶解配制2个矿化度水平（7.5、15 g L⁻¹）的咸水（表2），每个处理重复3次。将配制好的不同水质的咸水1 L盛入制冰容器中，然后置于冷冻柜中在-18 ℃温度下结冰24 h。咸水冰在恒温（24 ℃，空调控温）试验条件下进行融化，每隔1 h用小白瓶收集融出水1次，测定其体积、EC、离子组成。

表1 咸水的基本化学性质

Table 1 Chemical properties of the saline water in the experiment

样品 Sample	EC (dS m ⁻¹)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
			(g L ⁻¹)						
咸水 Saline water	17.02	8.16	0.011	3.59	0.15	0.45	7.92	0.33	0.46

表2 试验水样的理化性质

Table 2 Physico-chemical properties of the water samples in the experiment

处理 Treatment	电导率 EC (dS m ⁻¹)	钠吸附比 SAR	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
			(g L ⁻¹)					
融冰 Melting water	22.98	51.20	0.006 4	6.60	0.24	0.61	9.64	0.73
土柱 Soil column	11.86	38.63	0.003 8	3.60	0.14	0.31	5.14	0.36
	22.24	53.60	0.006 8	6.60	0.23	0.55	9.64	0.75
	11.59	40.75	0.003 8	3.60	0.14	0.27	5.14	0.27

注：未检出碳酸根和重碳酸根 Note: No carbonate or bicarbonate detected

1.2 咸水冻融灌溉室内土柱模拟试验

为分析不同矿化度咸水结冰融水入渗对滨海盐土水盐分布状况的影响,室内设置了土柱试验系统。试验有机玻璃管内径20 cm、高135 cm。为记录水分入渗迁移湿润锋变化,在土柱侧面标明刻度;在距顶部40 cm以下,每隔10 cm在土柱四周开取样孔,入渗过程中用橡胶塞堵住,取样时打开。柱子底部铺5 cm石英砂,留一通水小口,直径1 cm。

试验土壤采自河北省海兴县小山乡东村山西洼中国科学院滨海盐碱地水土资源高效利用示范区,北纬37°56'10"至38°17'31",东经117°18'33"至117°50'57",地势平坦,地下水埋深在1 m左右。土壤取0~20 cm土层,风干后混合均匀,过2 mm筛,保存备用。表3列出了供试土壤的部分理化性质。

土柱模拟试验过程:将风干土样按 1.35 g cm^{-3}

的容重均匀地装入有机玻璃管中,土柱高100 cm。试验用咸水矿化度设为2个水平(7.5、15 g L^{-1}),入渗水量均为150 mm。咸水在-18 °C温度下冻结成冰(设计冰的形状,均匀覆盖土柱表层),置于土柱上方,在室温(24 °C)条件下,使其自然融化入渗,在入渗过程中,每隔0.5 h记录1次入渗湿润锋的位置。为了解一定时期土壤剖面的水盐动态,将土样采集分4个时期,按先密后疏进行:

(1)灌溉水完全入渗时;(2)试验第7天;(3)试验第14天;(4)试验第30天。土样从取样孔中分层取土,测定土壤EC、含水量;选取最后一期的土壤测定pH和离子组成。同时设置7.5 g L^{-1} 咸水、淡水(去离子水,EC为0.001 dS m^{-1})直接入渗试验,以比较四种处理下土壤中水盐运移规律的差异性。表4列出了具体的试验处理,每个处理重复3次。

表3 试验土样基本性质

Table 3 Physico-chemical properties of the soil in the experiment

土壤 Soil	机械组成Mechanical composition (mm, %)			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density (g cm^{-3})	pH	EC (dS m^{-1})
	> 0.05	0.05 ~ 0.002	< 0.002				
滨海盐土 ^①	8.62	75.93	15.45	粉砂壤土 ^②	1.35	8.66	15.31

①Coastal saline soil, ②Silty loam

表4 试验处理

Table 4 Designing of the experiment

因素 Factor	水质 Water quality (g L^{-1})	处理 Treatment	代号 Symbol
咸水结冰入渗 Infiltration of water from saline ice	7.5	7.5 g L^{-1} 咸水冻融灌溉 Irrigation with saline ice-melted water (7.5 g L^{-1} in salinity)	SIW (7.5)
	15	15 g L^{-1} 咸水冻融灌溉 Irrigation with saline ice water (15 g L^{-1} in salinity)	SIW (15)
咸水直接入渗 Infiltration of saline water	7.5	7.5 g L^{-1} 咸水直接灌溉 Irrigation with saline water (7.5 g L^{-1} in salinity)	SW (7.5)
淡水直接入渗 Infiltration of fresh water	0	淡水直接灌溉 Irrigation with fresh water	FW

1.3 样品分析

融冰水量用量筒测定；质量含水量用105℃烘干法；EC、pH：水样直接测定，土样采用1:5土水质量比浸提，均采用电极法测定。K⁺、Na⁺：火焰光度法；Ca²⁺、Mg²⁺：EDTA络合滴定法；CO₃²⁻、HCO₃⁻：双指示剂中和滴定法。土样中盐分离子采用1:5土水质量比提取。土壤颗粒组成：吸管法。

1.4 数据处理

数据整理用Excel 2010；数据方差分析用SPSS 18.0；作图工具为SigmaPlot 12.5。

2 结果与讨论

2.1 不同矿化度咸水冰融化过程中水量与水质的变化

由图1可知，咸水冰的融化进程大致可以分为两个阶段：第一阶段（0~6 h）：融化速率一直处于波动状态，7.5 g L⁻¹咸水冰的融化速率小于15 g L⁻¹咸水冰的融化速率，融水量较大；第二阶段（6~15 h）：由于冰量减少，咸水冰的融化速率快速下降，7.5 g L⁻¹的咸水冰和15 g L⁻¹的咸水冰分别从90.67 ml h⁻¹、101.3 ml h⁻¹降至26.50 ml h⁻¹、13.00 ml h⁻¹，7.5 g L⁻¹咸水冰的融化速率大于15 g L⁻¹咸水冰的融化速率。融化进程两个阶段的分界点均是在6 h，融化进程结束的时间均在15 h左右，所以可以认为在相同温度下不同矿化度的咸水冰的融化进程具有一定的相似性。

在咸水冰融化过程中，电导率与融化速率的变化不同。总体上看（图1），7.5 g L⁻¹咸水冰融出水的电导率小于15 g L⁻¹咸水冰融出水的电导率。15 g L⁻¹咸水冰融出水的电导率在0~6 h之间急剧下降，6~15 h时下降缓慢，7.5 g L⁻¹咸水冰融出水电导率的变化情况与之相似，只是在2 h处有一个上升点。7.5 g L⁻¹、15 g L⁻¹咸水的融出水的电导率分别从开始时的25.61 dS m⁻¹、55.18 dS m⁻¹降至结束时的0.29 dS m⁻¹、0.21 dS m⁻¹。整个过程中，融出矿化度小于3 g L⁻¹的微咸水的体积分别占总体积的25.46%、32.78%。郭凯等^[13]利用10 g L⁻¹咸水在15℃条件下进行融冰试验，得到矿化度小于3 g L⁻¹的微咸水大约占总水量的50%；许映军等^[18]利用5 g L⁻¹左右的海冰在2~6℃融化，得到大约60%的小于1 g L⁻¹的微咸水。本试验获得小于3 g L⁻¹微咸水的水量相对较低，这可能是由于本试验融化温度较高。根据Cole和Shapiro^[19]研究，咸水冰中的盐分以“卤水胞”的形式存在，冰体中呈现固液两相共存的状态，在重力作用下密度较大的“卤水胞”会向下移动，先排出冰体，便可得到淡水冰。咸水冰融化时周围温度较高时，冰体融化与“卤水胞”移动同时进行，卤水胞与淡水的分离效果便会降低，得到的淡水较少。

SAR是表征咸水中钠离子与钙镁离子相对含量的重要指标，SAR较高的咸水灌溉会引起土壤颗粒上的交换性钙、镁离子被交换性钠离子所取代，从而导致土壤物理性质恶化^[20-21]。通过对不同时间段咸水冰融出水的K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺分析（图2），

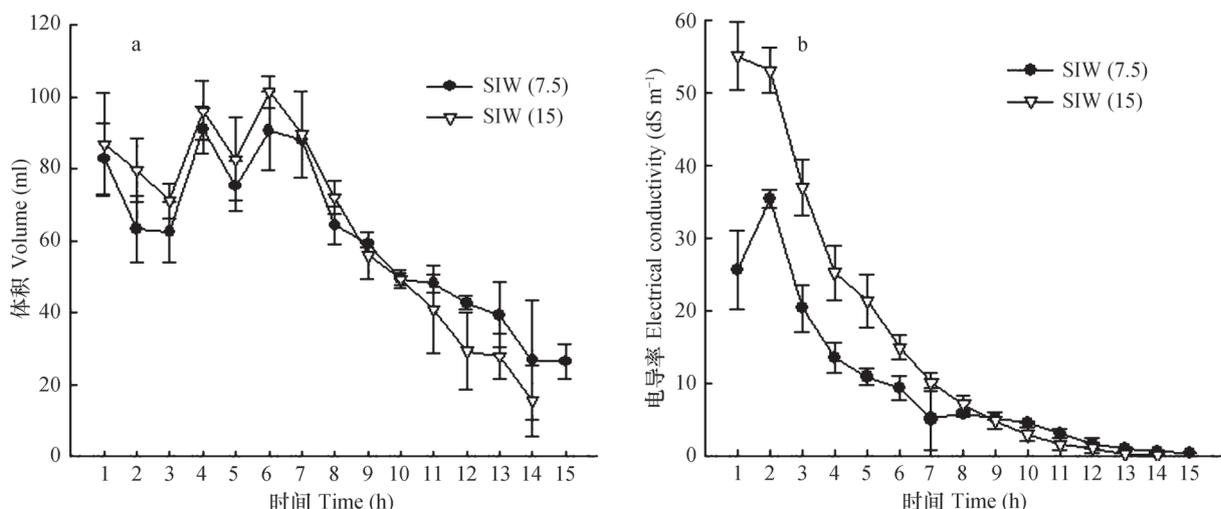


图1 咸水冰融化过程中水量与水质的动态变化

Fig. 1 Changes in the volume and salinity of melt-water during saline ice melting process

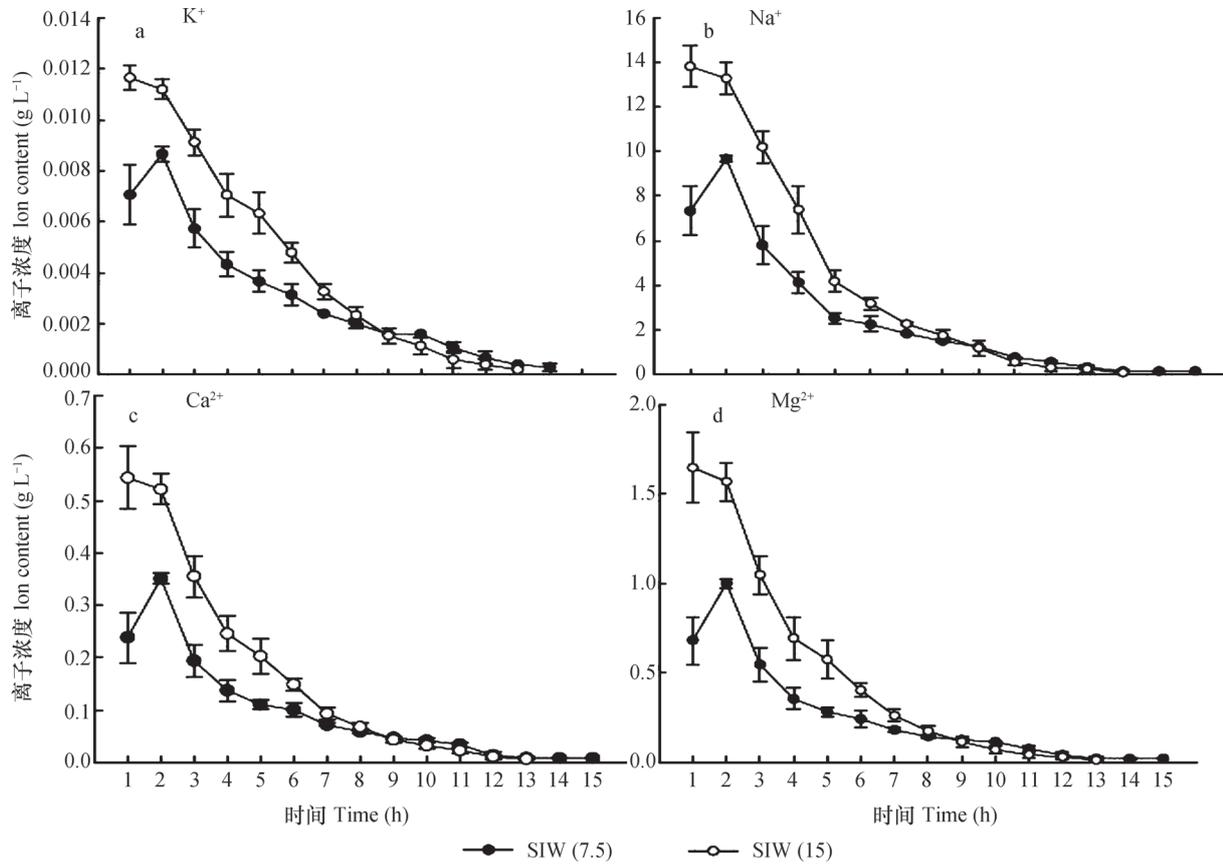


图2 咸水冰融化过程中离子的动态变化

Fig. 2 Dynamics of ions in melt-water during saline ice melting process

可以发现离子融出速率与融出水电导率的变化趋势一致；Na⁺的含量始终大于Ca²⁺、Mg²⁺之和，但是融出水的SAR在不断降低（图3），与电导率的变化趋势一致。说明在咸水冰融化后期，融出水中Na⁺比例不断降低，Ca²⁺、Mg²⁺比例不断上升。由此，可以认为咸水冰融化过程中，Na⁺的融出速率大于Ca²⁺、Mg²⁺。

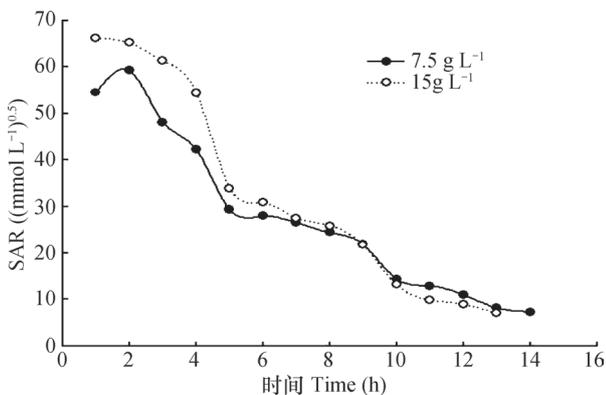


图3 咸水冰融化过程中SAR的动态变化

Fig. 3 Dynamics of sodium adsorption ratio (SAR) in melt-water during saline ice melting process

2.2 不同处理下土壤中的水分动态

湿润锋运移特征：两种灌水方式下，湿润锋的运移特征存在明显差异（图4）。直接灌溉方式下，水分初始入渗很快，FW和SW处理下第1小时内湿润锋的深度分别达到了28.13 cm、31.40 cm，随后FW处理下湿润锋的运移速度变缓，而SW处理下依然较快。SIW（7.5）与SIW（15）处理下，试验初期湿润锋的运移很慢，这主要是因为咸水冰融化初期融出水量较小（图1）和融出水SAR较高（图3）。随着咸水冰融出水量的积累和融出水SAR的降低，SIW（7.5）和SIW（15）处理下水分入渗速率开始增大。将四个处理下的湿润锋的运移特征做曲线拟合可以得到以下四个拟合方程：

$$FW: L=28.48x^{0.4028} \quad R^2=0.9965 \quad n=28 \quad (1)$$

$$SW: L=31.21x^{0.5204} \quad R^2=0.9997 \quad n=17 \quad (2)$$

$$SIW(7.5): L=4.100x \quad R^2=0.9969 \quad n=23 \quad (3)$$

$$SIW(15): L=3.298x \quad R^2=0.9667 \quad n=23 \quad (4)$$

式中，L：湿润锋深度（cm）；x：时间（h）；R²：决定系数；n：样本数。

FW和SW处理下,湿润锋的运移深度与时间成幂函数关系,而SIW(7.5)与SIW(15)处理下,湿润锋的运移深度与时间成线性相关。通过图4可以看出,SW处理下湿润锋最先到达土柱底部;SIW(7.5)与SIW(15)处理下湿润锋的运移速度逐渐大于FW处理。将式(1)分别与式(3)、式(4)联立,可以解出SIW(7.5)与SIW(15)处理下的湿润锋分别在26.44 h、38.21 h与FW处理达到相同的深度,随后SIW(7.5)与SIW(15)处理下的湿润锋的深度一直大于FW。

由于土壤导水率与湿润锋的运移深度存在正相关性^[23],通过图4和四个拟合方程,可以得出FW处理下湿润锋运移速度降低最快,说明淡水灌溉后土壤的导水率降低较为明显。Mace和Amrhein^[23]通过实验指出,由于淡水淋洗后,土壤颗粒表面电解质的流失,土壤团聚体消散,黏粒迁移并阻塞土壤孔隙,导致土壤导水性降低。结冰灌溉方式下,由于水分入渗受到咸水冰融化速率的影响,开始阶段土壤表层的水较少,所以入渗水量有限,入渗深度较浅。此外,根据融冰试验的结论,开始阶段融出水的SAR较高,高SAR的水饱和土壤会使土壤颗粒带上更多的Na⁺,颗粒间的排斥力增大,导致了团聚体的膨胀。团聚体内部空间增大,而孔隙变小,水分大多数是通过团聚体间的孔隙运动^[24],所以试验初期(<3 h)SIW(7.5)和SIW(15)处理下水分入渗速率很低。

不同处理下土壤剖面的水分分布:室内土柱试验从2014年6月23日开始。灌溉水入渗完成后,土壤中的水分分布与土壤的非饱和导水率紧密相关。从6月23日采样数据中,可以发现FW下土壤

水分分布与其他处理下土壤水分分布差异显著。FW在5 cm处土壤质量含水量最大(图5),达到了33.88%,显著高于SW=28.64%、SIW(7.5)=29.40%、SIW(15)=30.16%。咸水灌溉(SW、SIW(7.5)、SIW(15))下土壤质量含水量的最大值出现在15 cm处,说明入渗完成时,咸水灌溉下水分整体入渗深度要大于FW。依据上面的分析,FW处理下土壤的膨胀、团聚体的消散和黏粒的分散最为显著,土壤的导水率下降最迅速^[22-23],因而有更多的水分保留在土壤表层。在自然条件下,土壤表层蓄含大量的水在蒸发强烈的环境中很容易损失掉,而在暴雨情况下则容易发生地表径流^[25]。

从整个试验周期来分析,FW与SW、SIW(7.5)、SIW(15)的水分运动形式差异显著。SW、SIW(7.5)、SIW(15)处理下,可以发现第一次土壤剖面水分分布曲线图与后三次差别较大,而后三次曲线则相对接近,其中以SIW(7.5)最为明显。这说明在灌溉初期,土壤中的水分运动剧烈,当土壤表层水分入渗完成时,土壤中水分以溶液的形式继续运动,在一周之后,水分运动相对稳定。而在FW下,水分运动始终比较剧烈,0~25 cm土层含水量不断降低,损失的水分一部分是由于蒸发,一部分下移至深层,75~95 cm土层含水量则相应增加。试验末期,FW与SW、SIW(7.5)、SIW(15)在整个土壤剖面上水分分布趋于相似。因此,不同的灌溉方式下,土壤中水分分布不仅在空间上差异,而且在时间尺度上的变化也不相同。

2.3 不同处理下土壤剖面的盐分动态

盐随水来,盐随水去,土壤中的盐分会随着水分入渗而迁移。FW和SW处理下,不同时期土壤表层(<15 cm)、中层(35~45 cm)和深层(>65 cm)的盐分含量差异显著;SIW(7.5)和SIW(15)处理下,各个时期表层土壤盐分含量差异并不显著,其他层次土壤含盐量出现显著差异主要在6月23日数据与其他三次数据之间,这与土壤剖面的水分动态变化相一致。

在整个实验过程中,FW处理下0~15 cm土层土壤的含盐量平均值为2.32 g kg⁻¹,显著低于SW的4.31 g kg⁻¹,同样低于SIW(7.5)、SIW(15)的2.80 g kg⁻¹、3.87 g kg⁻¹(图6)。为了进一步比较四种处理的淋洗效果,用7月23日的数据计算出四种处理下土壤各层次的脱盐率(表5)。从表层

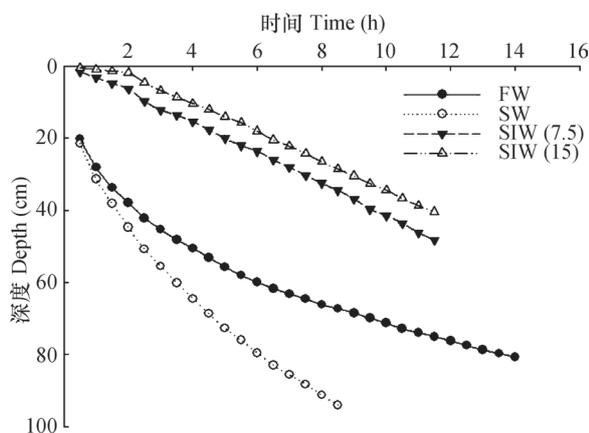


图4 不同处理下湿润锋的推进深度

Fig. 4 Movement of wetting front relative to treatment

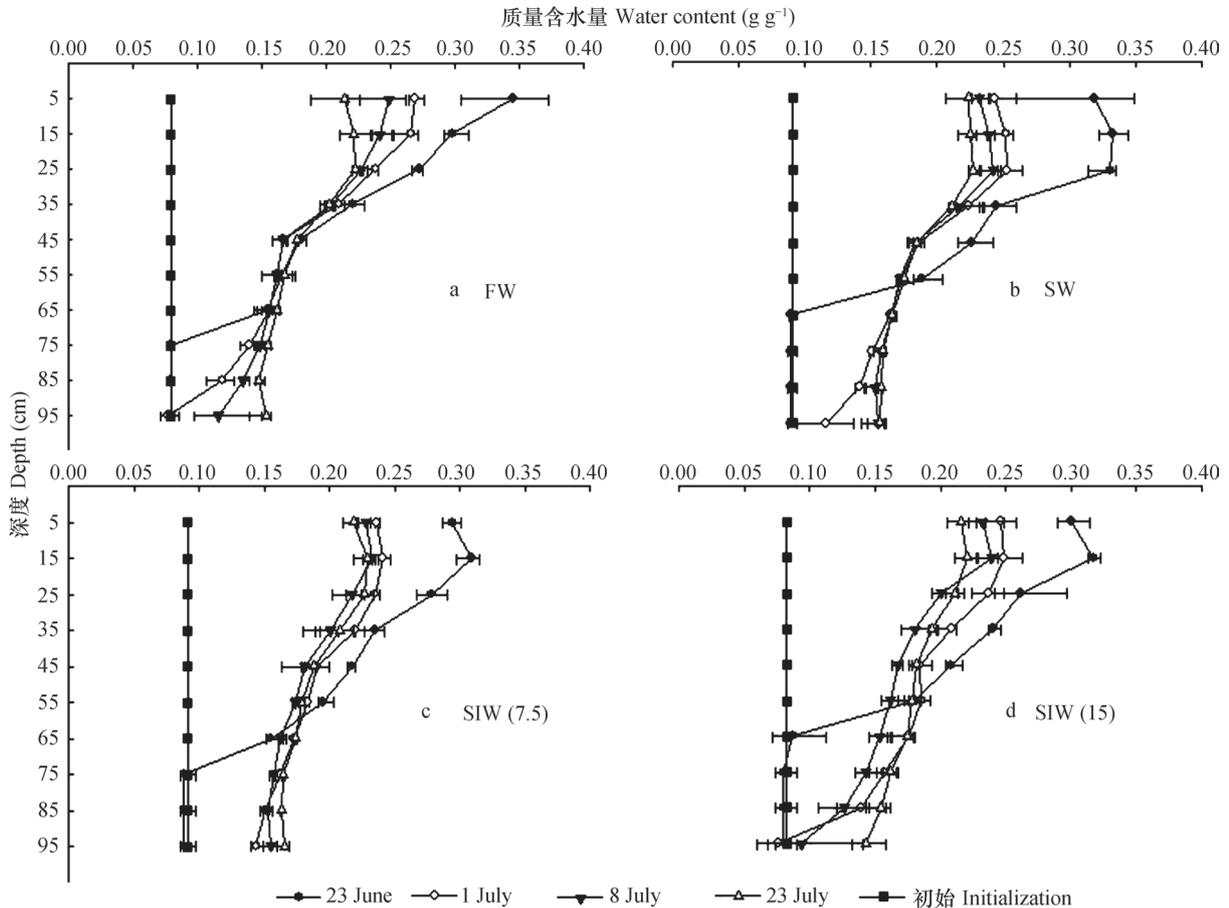


图5 不同处理下土壤剖面的水分分布

Fig. 5 Soil moisture distribution in soil profile relative to treatment

(0~5 cm) 土壤脱盐率来看, FW > SIW (7.5) > SIW (15) > SW; 比较根层 (0~25 cm) 脱盐率, 则 FW > SIW (7.5) > SW > SIW (15); 比较脱盐深度, 则是 35 cm = FW = SIW (7.5) = SW > SIW (15) = 25 cm。这些结论说明高矿化度的咸水灌溉会给土体带来更多的盐分, 所以与其他处理相比, SIW (15) 处理下积盐效应大于淋盐效果。不同处理下盐分最大累积深度也有差异, FW = SIW (7.5) = SIW (15) = 65 cm > SW = 55 cm。Li 等^[12] 在室内利用 0、5、10、15 g L⁻¹ 的“咸水冰”进行入渗试验, 发现高矿化度的咸水冰在灌水定额较高时对 0~20 cm 土层的脱盐效果优于淡水冰处理。车升国等^[26] 在室外利用 4.88 g L⁻¹ 的咸水冰入渗、咸水入渗与淡水入渗作对比, 得出淡水的脱盐效果最好, 咸水结冰入渗则显著优于咸水入渗。这说明符合灌溉水质的水源更适合直接灌溉利用, 结冰冻融灌溉有利于提高咸水的洗盐效果。此外, 在咸水矿化度较高时, 根据预定目标制定合适的灌水定额,

将大大提高咸水冻融灌溉的淋洗效率。

在淡水匮乏的地区, 对于咸水资源利用方式的研究尤为重要。在相同的灌水量下, 咸水结冰冻融灌溉对于土壤的淋洗效果要优于咸水直接灌溉。两种灌溉模式最主要的差异在于咸水结冰冻融过程存在咸淡分离的作用, 先融出含盐量很高的咸水, 对土壤进行浸润, 随后融出的微咸水对土壤进行充分的淋洗, 即相当于同等矿化度的水, 咸水结冰冻融灌溉相当于先将咸水淡化得到高浓度咸水与微咸水, 再将两者按先咸后淡的顺序灌入, 而咸水直接灌溉则是保持水质不变。此外, 相对于咸水直接灌溉, 咸水结冰冻融灌溉的水分供应强度较低。

2.4 不同处理下土壤剖面 SAR 变化规律

通过测定 0~45 cm 土壤剖面 (7月8日) 中可溶性 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的含量, 计算出四种处理下土壤 SAR 的变化情况 (表 6)。与原土相比, 各处理下 0~25 cm 土壤的 SAR 显著降低, 但是 35~45 cm 土壤的 SAR 则显著升高。这表明在灌溉条件下, 土壤

表5 不同处理下土壤脱盐率

Table 5 Soil desalinization rate in soil profiles under different treatments

处理 Treatment	深度 Depth (cm)									
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
FW	-96.86a	-96.63a	-94.54a	-65.09a	16.52a	49.64a	56.92a	49.92a	44.49a	36.39b
SW	-91.12c	-93.4ab	-85.77ab	-34.63ab	29.03a	54.12a	52.22a	50.92a	49.69a	47.95ab
SIW (7.5)	-95.55ab	-95.16ab	-85.81ab	-21.88b	15.86a	44.06a	55.82a	54.39a	41.11a	50.90a
SIW (15)	-94.57b	-86.95b	-46.62b	3.45c	19.60a	22.85a	55.69a	50.87a	45.11a	40.54b

注：同一列中不同字母表示差异显著性 ($p < 0.05$)；正值表示积盐，负值表示脱盐 Note: Different letters in the same column represent significant difference ($p < 0.05$). Positive/negative values represent salinization/desalinization

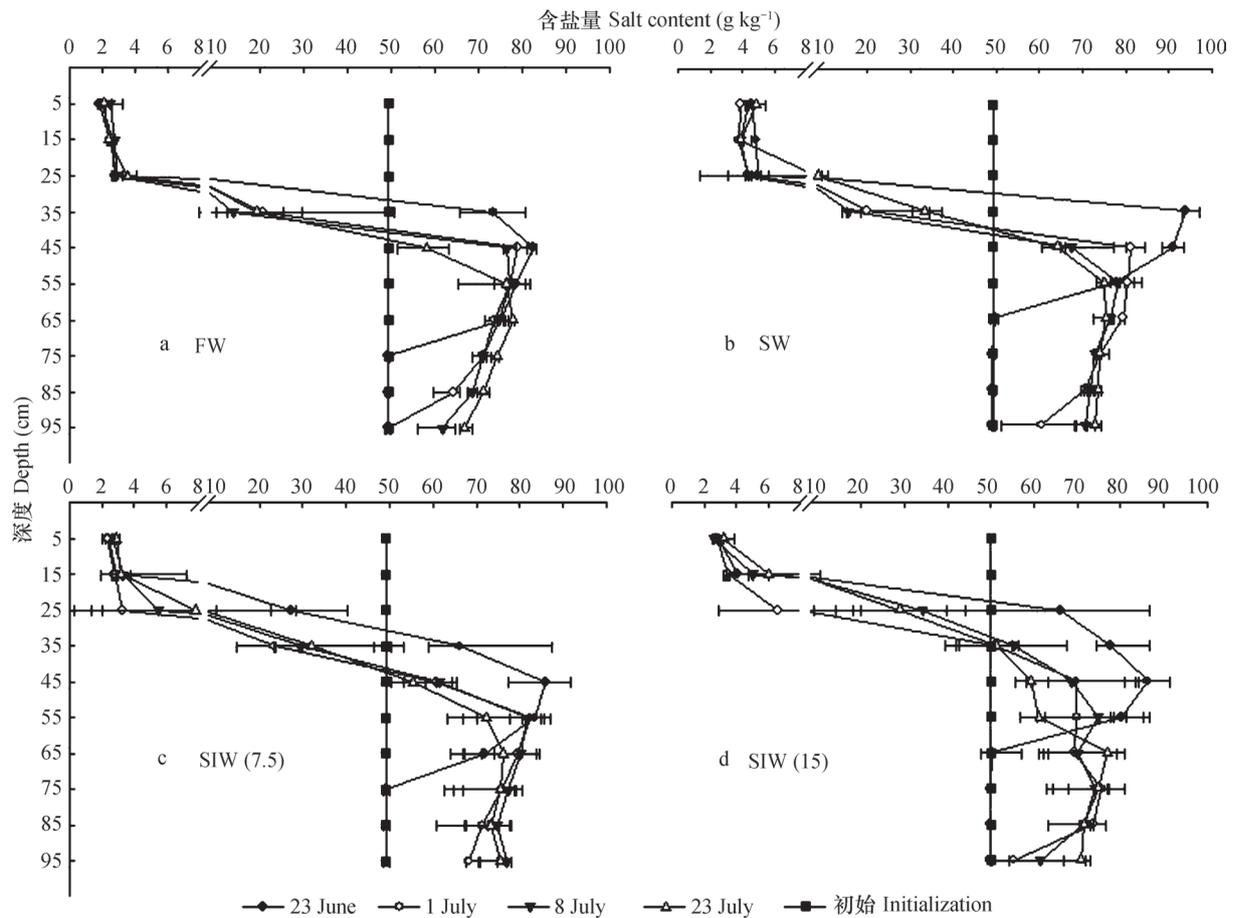


图6 不同处理下土壤剖面的盐分分布

Fig. 6 Salt distribution in soil profile relative to treatment

中 Na^+ 迁移速率要高于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，因而造成0~25 cm土壤中 Na^+ 的相对含量显著降低。SIW (7.5) 处理下，虽然0~25 cm土壤的SAR显著高于FW处理，但是35~45 cm土壤的SAR显著小于FW。SIW (15) 处理下，表层土壤的SAR迅速较低，然而在15~25 cm处则显著高于其他处理，这主要是因为SIW (15) 处理下使用的咸水SAR很高。在0~25

cm处，FW下SAR值最小 (10.03~16.38)，显著小于其他三个处理，而Guo和Liu^[16]研究得出淡水结冰灌溉对0~30 cm土层SAR的降低效果较咸水冻融灌溉差。这说明淡水直接灌溉在降低土壤含盐量和SAR上均优于淡水结冰灌溉。

SW与SIW (7.5) 原始水样的EC、SAR没有差异，但可以看出SIW (7.5) 处理下，0~25 cm土壤

表6 不同处理下0~45 cm土壤剖面的SAR状况

Table 6 SAR in the 0~45 cm soil layers of soil profiles under different treatments

处理 Treatment	深度 Depth (cm)				
	5	15	25	35	45
FW	10.03c	16.38c	14.10e	61.38a	61.28a
SW	13.43b	22.75b	26.31c	55.67b	59.66a
SIW (7.5)	12.76b	18.50c	18.44d	45.68c	45.17b
SIW (15)	12.13b	25.11b	41.75a	39.60d	39.02c
原土 Initial soil	35.48a	35.48a	35.48b	35.48d	35.48c

注：同一列中不同字母表示差异显著性 ($p < 0.05$) Note: Different letters in the same column represent significant difference ($p < 0.05$)

的SAR显著低于SW。这是由于咸水结冰融化过程中融出水的SAR逐渐降低，所以咸水冻融灌溉在降低土壤SAR上要优于咸水直接灌溉。

本试验中，土壤剖面的含盐量在35~45 cm土层明显增加，土壤剖面的SAR在35 cm处明显增大（SIW (15) 除外）。陈巍等^[27]通过土柱淋洗试验，分析得出土壤的SAR与含盐量存在极显著的正相关关系。这说明以 Na^+ 为主要阳离子的滨海盐渍土壤，SAR与含盐量之间存在相似的演变趋势。

2.5 不同处理下土壤总碱度的变化

滨海盐渍土在脱盐过程中会伴随着土壤碱化的发生，总碱度是土壤中碳酸根和重碳酸根之和，能够大致反映土壤的碱化程度^[27]。土壤剖面的总碱度和pH变化如图7所示。0~35 cm土层是土壤脱盐区，各处理下0~35 cm土层的总碱度均有不同程度

的升高，在45 cm处总碱度与原土没有显著差异。这是因为试验土壤碳酸钙含量较高，在脱盐过程中，土壤中可溶性 Ca^{2+} 不断流失，导致碳酸钙的溶解，增加了土壤溶液中 HCO_3^- 的含量^[28]。土壤pH的变化情况与总碱度具有一致性，将土壤pH与土壤总碱度进行回归分析，发现pH与总碱度存在极显著的正相关关系：

$$Y = 0.687 \ln(X) + 9.634 \quad R^2 = 0.9326 \quad n = 20$$

式中，Y：pH；X：总碱度 (cmol kg^{-1})；n：样本数。

FW处理下，土壤总碱度升高最明显，在15 cm土层总碱度为 $2.96 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，显著高于其他处理。车升国等^[17]利用地下咸水（ HCO_3^- 约占阴离子13%）与盐土配置的咸水研究发现结冰灌溉处理下0~20 cm土层的 HCO_3^- 上升最显著。这是因为试验

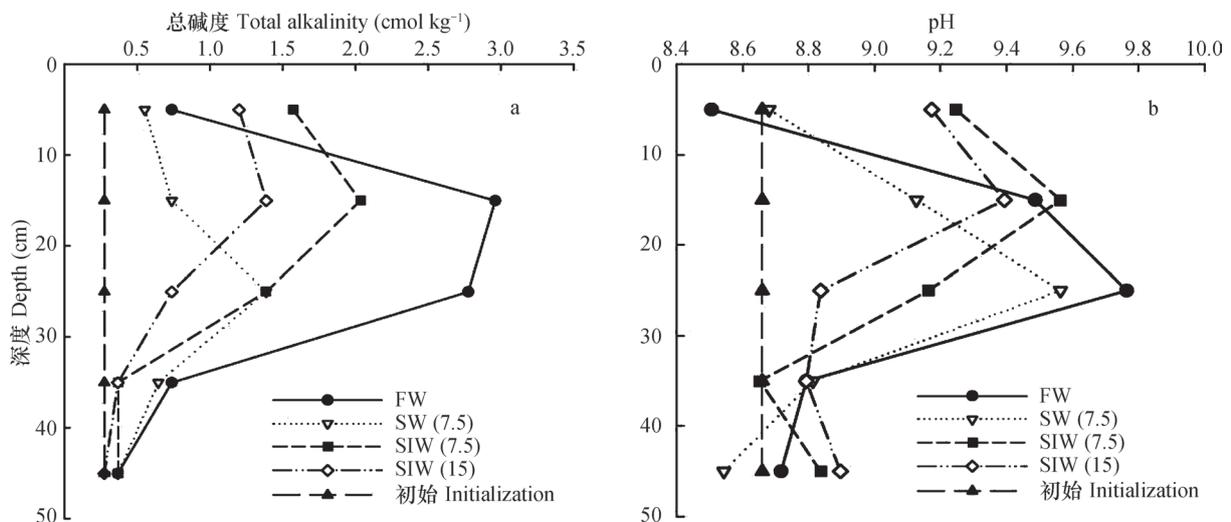


图7 0~45 cm土壤剖面总碱度与pH变化

Fig. 7 Dynamics of total alkalinity and soil pH in the 0~45 cm soil layer relative to treatment

灌溉水含有较多的 HCO_3^- , 会影响土壤脱盐层 HCO_3^- 的含量。与SW(7.5)相比, SIW(7.5)处理下土壤总碱度增加更为明显, 应考虑咸水冻融灌溉后的土壤碱化问题。在土表撒施石膏再配施有机肥, 可以有效降低土壤pH, 消除土壤碱化问题^[29]。

3 结 论

咸水冰融化初期, 融出水含盐量和SAR较高; 融化过程中, 融出水的含盐量和SAR均一直在降低。在相同温度下, 不同矿化度的咸水冰融化进程具有相似性; 离子的迁出曲线与融水电导率的变化曲线相似。土柱淋洗试验的结果说明: 不同水分利用方式下湿润锋的推进深度遵循不同类型的方程; 淡水直接灌溉方式下, 水分运动持续时间较长, 水分的入渗速率下降最为显著, 灌溉水入渗完成所需的时间最长, 且水分总体保留在土体上层。不同灌水方式下, 耕层土壤的盐分和SAR均有显著的降低; 在相同的水质条件下, 由于咸水结冰冻融灌溉具有咸淡分离的效果, 因而对降低土壤盐分和SAR的作用要显著优于咸水直接灌溉。然而, 当咸水的矿化度过高时, 在使用咸水结冰冻融灌溉应当适当增加灌水量才能达到预期的淋洗效果。在重度盐渍土壤脱盐过程, 土壤脱盐层pH和总碱度有不同程度的升高。在滨海地区, 淡水资源相对匮乏, 咸水资源成为主要的农业灌溉水源, 将咸水结冰冻融灌溉与土壤改良剂结合使用, 将成为滨海盐渍土改良利用的重要途径。

参 考 文 献

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45 (5) : 837—845
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 837—845
- [2] 林叶彬, 顾卫, 许映军, 等. 冬季咸水冰覆盖对滨海盐渍土的改良效果研究. 土壤学报, 2012, 49 (1) : 18—25
Lin Y B, Gu W, Xu Y J, et al. Effect of mulching brackish ice in winter ameliorating coastal saline soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (1) : 18—25
- [3] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究. 资源科学, 2010, 32 (3) : 431—435
Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil (In Chinese). Resources Science, 2010, 32 (3) : 431—435
- [4] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究. 地理科学进展, 2005, 24 (4) : 46—55
Zhang D F, Zheng Q H. Simulation of water - salt movement law under the freeze-thawing condition (In Chinese). Progress in Geography, 2005, 24 (4) : 46—55
- [5] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨. 水土保持通报, 2005, 25 (6) : 14—18
Zhang D F, Zheng Q H, Dong Z Y. Mechanism of soil salt moisture transfer under freeze-thawing condition (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25 (6) : 14—18
- [6] 李作云, 齐树亭. 河北省盐渍土分类问题刍议. 河北水利专科学校学报, 1990 (1) : 54—58
Li Z Y, Qi S T. Discussion on classification of saline soil in Hebei Province (In Chinese). Journal of Hebei Hydraulic Engineering College, 1990 (1) : 54—58
- [7] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26 (1) : 73—80
Ma W J, Cheng Q J, Li L T, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26 (1) : 73—80
- [8] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (6) : 599—603
Pang H C, Yang J S, Yan H J. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10 (6) : 599—603
- [9] 乔冬梅, 齐学斌, 庞鸿滨, 等. 地下水作用下微咸水灌溉对土壤及作物的影响. 农业工程学报, 2009, 25 (11) : 55—61
Qiao D M, Qi X B, Pang H B, et al. Effects of brackish water irrigation on soil and crop under different groundwater depths (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2009, 25 (11) : 55—61
- [10] 张国明, 张峰. 开发海冰水资源及改良滨海盐碱土的研究. 安徽农业科学, 2009, 37 (23) : 11139—11141
Zhang G M, Zhang F. Research on the development of sea ice-water resources and improvement of seashore saline soil (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural

- Sciences, 2009, 37 (23): 11139—11141
- [11] 史培军, 哈斯, 袁艺. 渤海海冰作为淡水资源: 脱盐机理与可利用价值. 自然资源学报, 2002, 17 (3): 353—360
Shi P J, Ha S, Yuan Y. The desalination of Bohai sea ice and its use value as fresh water resource (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2002, 17 (3): 353—360
- [12] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content. Agricultural Water Management, 2008, 95 (4): 498—502
- [13] 郭凯, 刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究. 灌溉排水学报, 2013, 32 (1): 56—60
Guo K, Liu X J. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32 (1): 56—60
- [14] 潘洁, 肖辉, 王立艳, 等. 咸水冰融化与土壤入渗过程不同盐分离子迁移规律研究. 华北农学报, 2012, 27 (1): 210—214
Pan J, Xiao H, Wang L Y, et al. Study on migration of different salt ions in melting and infiltration processes of saline water ice (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27 (1): 210—214
- [15] 郭凯, 张秀梅, 刘小京, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布. 中国生态农业学报, 2011, 19 (3): 506—510
Guo K, Zhang X M, Liu X J, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of melt-water of saline water ice with different sodium adsorption ratio (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19 (3): 506—510
- [16] Guo K, Liu X J. Dynamics of meltwater quality and quantity during saline ice melting and its effects on the infiltration and desalination of coastal saline soils. Agricultural Water Management, 2014, 139 (9): 1—6
- [17] 车升国, 林治安, 赵秉强, 等. 咸水结冰灌溉对盐化潮土盐基离子剖面迁移规律的影响. 水土保持学报, 2011, 25 (4): 88—93
Che S G, Lin Z A, Zhao B Q, et al. Effects of agricultural irrigation by melting saline water ice on soil salt and ion movement under fluvo-aquic soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (4): 88—93
- [18] 许映军, 李宁, 顾卫, 等. 控温法海冰冻融固态脱盐技术研究. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14 (4): 470—478
Xu Y J, Li N, Gu W, et al. A study on the technology of sea ice desalination in solid state by freezing and melting through temperature control (In Chinese). Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14 (4): 470—478
- [19] Cole D M, Shapiro L H. Observations of brine drainage networks and microstructure of first-year sea ice. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (C10): 21739—21750
- [20] 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响. 土壤学报, 1998, 35 (3): 359—366
Xiao Z H, Wan H F. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35 (3): 359—366
- [21] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26 (1): 231—236
Wu Z D, Wang Q J. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26 (1): 231—236
- [22] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中Green-Ampt入渗模型的改进与验证. 水利学报, 2003, 34 (5): 30—34
Wang W Y, Wang Z R, Wang Q J, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil (In Chinese). Shuili Xuebao, 2003, 34 (5): 30—34
- [23] Mace J E, Amrhein C. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 199—204
- [24] Chaudhari S K, Somawanshi R B. Unsaturated flow of different quality irrigation waters through clay, clay loam and silt loam soils and its dependence on soil and solution parameters. Agricultural Water Management, 2004, 64 (1): 69—90
- [25] Bagarello V, Iovino M, Palazzolo E, et al. Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. Geoderma, 2006, 130 (1/2): 1—13
- [26] 车升国, 林治安, 左余宝, 等. 咸水结冰融水入渗对土壤水盐运移和玉米苗期生长的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20 (9): 1210—1215
Che S G, Lin Z A, Zuo Y B, et al. Effects of saline ice-melt water irrigation on soil water, salt movement and corn growth in agricultural fields (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20 (9): 1210—1215

- [27] 陈巍, 陈邦本, 方明. 辽东半岛滨海盐土脱盐过程中 pH 上升及碱化问题探讨. 南京农业大学学报, 1998, 21 (2): 59—64
Chen W, Chen B B, Fang M. Studies on the increasing of pH value and alkalization of Seashore saline soil during its desalting in Liaodong Peninsula (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 1998, 21 (2): 59—64
- [28] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究. 土壤学报, 2000, 37 (4): 521—528
Chen W, Chen B B, Shen Q R. Studies on the changes of pH value and alkalization of heavily saline soil in seabeach during its desalting process (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (4): 521—528
- [29] Jalali M, Ranjbar F. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. Geoderma, 2009, 153: 194—204

Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil

ZHANG Yue^{1, 2} YANG Jingsong^{1, 2†} YAO Rongjiang^{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)

Abstract Saline ice water irrigation must go through two processes: saline ice melting and melt-water infiltration, which determine the effect of irrigation together. An in-lab saline ice melting experiment was conducted using saline water, two in salinity (7.5 g L^{-1} and 15 g L^{-1}) to investigate changes in quantity, quality and ion composition of the saline water during the ice melting process, and a simulated soil column irrigation experiment designed to have four treatments in irrigation water: Treatment FW (irrigation with fresh water), Treatment SW (irrigation with saline water 7.5 g L^{-1} in salinity), Treatment SIW (7.5) (irrigation with saline ice melted water 7.5 g L^{-1} in salinity), and Treatment SIW (15) (irrigation with saline ice-melted water 15 g L^{-1} in salinity), and two treatments in irrigation mode (irrigation with water directly and irrigation with ice), was also conducted to explore effects of irrigation with saline melt water on water and salt movements in the coastal saline soil (silt loam in texture). Results show that saline ice, regardless of salinity level, melted similarly in melting process with melt water higher in volume, salinity and sodium adsorption ration (SAR) at the initial melting stage and lower in the late stage, and ion content and electrical conductivity (EC) of the melt water displayed a similar pattern. Only about 25.46% and 32.78% of the melt water flowing out from saline ice, 7.5 g L^{-1} and 15 g L^{-1} in salinity, respectively, during its thawing process was less than 3 g L^{-1} , which was critical in soil salt elution. In Treatment FW of the soil column experiment, soil water and salt movement lasted the longest, soil hydraulic conductivity dropped the fastest and soil water content in the surface soil layer after the irrigation water completely infiltrated into the soil was the highest, reach 33.88%, followed by 30.16% in Treatment SIW (15), 29.40% in Treatment SIW (7.5) and 28.64 in Treatment SW. In the four treatments, mean soil salt content reached 2.32 g kg^{-1} in Treatment FW, 2.80 g kg^{-1} in Treatment SIW (7.5), 3.87 g kg^{-1} in Treatment SIW (15) and 4.31 g kg^{-1} in Treatment SW. Among the four treatments, the same in irrigation volume, Treatment SIW (15) was the lowest in salt leaching effect. Soil ion analysis indicates that SAR in the 1 ~ 25cm soil layer in Treatments FW and SIW (7.5) dropped significantly far below that in Treatments SW and SIW (15). In Treatment FW, the feature of soil alkalization was the most outstanding. All the findings indicate that the relationship between wetting front depth and time follows a power function in Treatments FW and SW, however, the wetting front

depth is associated with time linearly in Treatments SIW (7.5) and SIW (15) ; the fast dropping hydraulic conductivity in Treatment FW is attributed to swelling and dispersion of soil particles; the lower SAR in the top soil layer in Treatments FW and SIW (7.5) is due to the water with lower SAR leaching. SAR is positively related to salt in the soil profile, and soil alkalization is positively correlated with pH. To sum up, in areas deficient in fresh water source, but sufficient in saline water source, moderately saline water subjected to freezing and thawing process can be used in irrigation to effectively lower salt content in the topsoil and to meet the demand of the agricultural production for water.

Key words Coastal saline soil; Saline ice; Sodium adsorption ration; Electrical conductivity; Infiltration; Total alkalinity

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu (290)
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. (303)

Insights and Perspectives

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science CAI Zucong, HUANG Xinqi (310)

Research Articles

- Element Migration in S₃ Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication CHU Chunjie, ZHAO Jingbo (320)
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. (330)
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared (VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. (340)
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. (353)
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. (363)
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. (373)
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. (386)
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang (399)
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong (409)
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. (419)
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. (426)
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. (436)
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao (448)
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. (455)
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. (466)
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. (475)
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. (488)
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ZHENG Yan, JIA Zhongjun (500)
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. (508)
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. (521)
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. (531)
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. (542)

Research Notes

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. (550)
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. (559)

Cover Picture: Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation (by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 卢 萍 檀满枝 陈荣府

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

