

微咸水膜下滴灌对盐碱化农田土壤斥水特征的影响

周立峰^{1,2} 杨 荣^{1,2} 冯 浩³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000;
2. 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在内蒙古河套灌区布置了2年大田试验,研究了不同覆膜方式下微咸水滴灌对盐碱化农田土壤水、盐分布及其土壤斥水性的影响。采用滴水穿透时间(Water drop penetration time, WDPT)法测定土壤斥水性,得到了不同土壤斥水性随含水率变化的规律。结果表明,膜下滴灌盐碱化农田土壤的斥水性在表层土壤与电导率呈正相关,与土壤pH值无显著相关性。弱碱性微咸水滴灌条件下,单次滴灌降低了滴头附近土壤的WDPT,但增加了远离滴头土体的WDPT;高频滴灌(灌溉频率为3 d)可显著降低土壤剖面整体的WDPT。膜下滴灌盐碱化农田土壤的斥水特征曲线均可用Gaussian和Lorentzian模型进行描述。滴灌对土壤斥水性最大时对应的土壤含水率(θ_m)影响不大($P>0.05$),而对斥水性消失时对应的土壤含水率(θ_c)影响显著($P<0.05$)。Lorentzian模型对盐碱化农田土壤的斥水特征曲线的拟合效果更优,通过该曲线可准确得到特定土壤的 θ_m 和 θ_c 。本研究可为微咸水滴灌及斥水性土壤的合理利用提供理论依据。

关键词: 盐碱化土壤; 土壤斥水性; 膜下滴灌; 滴水穿透时间

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0322-11

Effect of Mulched Drip Irrigation with Brackish Saline Water on Soil Water Repellency Characteristics of Saline – Alkali Field

ZHOU Lifeng^{1,2} YANG Rong^{1,2} FENG Hao³

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2. Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two-year field experiment was conducted to investigate soil electric conductivity ($EC_{1:5}$), soil pH value, and soil water repellency (SWR) in response to mulching method (M1: fully mulched, M2: partially mulched) and dripped irrigation frequency with brackish saline water in the Hetao Irrigation District under arid growing conditions. SWR was assessed by using the water drop penetration time (WDPT) method, and soil-water repellency characteristic curves (SWRCC) were built. Results demonstrated that SWR and $EC_{1:5}$ showed a significant positive correlation in mulched drip irrigated saline – alkali field; while it was not so obvious between SWR and soil pH value. Under the experiment condition with weak alkaline and brackish irrigation water, WDPTs of the soil near drip emitters were decreased on the 7th day after each drip irrigation at low irrigation frequency; whereas, WDPTs of the soil away from drip emitters were increased on the 7th day after a single irrigation. WDPTs were overall decreased after high frequency irrigation (once every three days). SWRCC in mulched drip irrigated saline – alkali soil can be well fitted by Gaussian and Lorentzian equations. The SWRCC curves showed that drip irrigation showed no effect ($P<0.05$) on θ_m (the volumetric soil moisture when WDPT was maximum), whereas significantly changed θ_c (the volumetric soil moisture when WDPT was less than 5 s). Lorentzian equations showed better performance for SWRCC regression than Gaussian equations, and θ_m and θ_c can be obtained from Lorentzian curve. The research result can provide assistance for utilization of drip irrigation with brackish saline water and water repellent soil.

Key words: saline – alkali soil; soil water repellency; mulched drip irrigation; water drop penetration time

收稿日期: 2018-12-05 修回日期: 2019-02-07

基金项目: 美丽中国生态文明建设专项(XDA23060302)和国家自然科学基金项目(41630861)

作者简介: 周立峰(1986—),男,助理研究员,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: lee86208@126.com

通信作者: 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@vip.sina.com

0 引言

土壤斥水性 (Soil water repellency, SWR) 是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1]。土壤斥水性在不同土壤质地、土地利用方式和气候条件下广泛存在^[2-5]。土壤斥水性降低了土壤入渗能力,易造成土壤表面径流与水土流失^[6-7];此外,土壤斥水性还会诱发土壤优先流,降低土壤水分在土体分布的均匀性^[6,8],从而导致土壤水分的深层渗漏^[9-10],并降低土面蒸发^[11]。以往研究认为,土壤斥水性多见于林地^[8]、沙地^[12]以及火干扰后的土壤^[13],而近年来的研究发现,草地和农田土壤也会出现一定的斥水性^[7,14-15]。

影响土壤斥水性的内因包括土壤有机质、质地、粘土类型、pH 值、盐分以及含水率等,外因包括植被覆盖类型、火干扰、土壤结皮、污水灌溉、保护性耕作等^[1-6,9-10]。外因通过对内因的影响改变土壤斥水性。有机质及其斥水性吸附物对土体颗粒的包裹是引发 SWR 的原因已形成共识^[16]。然而,部分研究表明,土壤有机质对 SWR 的影响并不显著^[17-18]。土壤有机质组成非常复杂,其中诱发斥水性的组分含量与有机质总含量不一定成比例。因此需要针对不同土壤环境识别影响 SWR 的关键土壤有机质组分^[6]。

河套灌区是中国重要的粮油作物生产基地,灌区光热资源丰富但降水稀少,属于典型的没有灌溉就没有农业的地区。河套灌区农田土壤的盐碱化较为普遍^[19],膜下滴灌技术在提高灌水利用效率的同

时还能淋洗根区土壤盐分,近年来已在灌区不断推广使用^[20-21]。高频的滴灌使灌区农田的土壤水、盐以及 pH 值呈现剧烈的动态变化特征^[22-24],上述土壤因子的改变会对土壤斥水性产生显著影响^[14,25-27]。目前,膜下滴灌条件下盐碱化农田土壤斥水性的变化特征尚不明确,影响因素尚不清楚。为此,作者在内蒙古河套灌区永济灌域布置 2 年大田试验,研究不同覆膜方式下滴灌对盐碱化农田土壤水、盐、pH 值分布及其土壤斥水性的影响,以完善膜下滴灌条件下盐碱化土壤水分溶质运移理论体系,也为膜下滴灌技术在盐碱化农田的推广提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2016 年在内蒙古河套灌区曙光试验站 (107°13'E,40°43'N,海拔 1 042 m) 进行。该地区属典型的温带大陆性气候,多年平均降水量 142.1 mm,且集中在 6—9 月,年均蒸发量超过 2 300.0 mm,年均气温 9.1℃。2 年试验期间 (春玉米生育期) 平均气温分别为 20.2℃ 和 22.1℃;总降水量分别为 19.8 mm 和 122.9 mm。试验地地下水埋深 2.5 m 左右,灌溉用水为地下水,水质为弱碱性微咸水,电导率 (EC) 为 1.32 dS/m, pH 值为 7.7。试验地土壤属于黄河灌淤土,动物粪肥在该区域广泛施用,故表层土壤有机质含量较高。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤 (0~60 cm) 基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil (0~60 cm) in experimental site

土层深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持水 率/%	EC _{1:5} / (dS·m ⁻¹)	pH 值	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	各粒径土壤质量分数/%		
						0~0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
0~20	1.40	29.4	0.64	8.16	10.30	20.0	47.8	32.2
20~40	1.40	31.9	0.41	8.45	4.80	23.0	53.8	23.2
40~60	1.40	30.8	0.28	8.68	2.70	23.1	47.2	29.7

注:EC_{1:5} 为土、水质量比为 1:5 的土壤提取液电导率。

1.2 试验设计方法及

试验设置全膜 (M1) 与半膜 (M2) 2 种覆膜方式,每个处理设 3 个重复,共计 6 个小区。小区尺寸 4 m×8 m,种植 8 行春玉米,各小区随机排列。滴灌带间距 1 m,采取宽窄行种植 (宽行 70 cm,窄行 30 cm),滴灌带位于窄行中间,控制灌溉 2 行作物,为典型的“一管双行”控制。半膜处理的地膜宽度为 60 cm,地膜铺设在种植行之上。各小区装有水表、压力计以控制灌水量及滴头流量,试验所用贴片式滴灌带 (直径 16 mm) 滴头间距为 30 cm,设计滴头流量 1.4 L/h。

本研究在春玉米拔节期前仅进行 2 次灌水;拔节期后进行 3 d 一次的高频灌溉,高频灌溉的单次灌水量通过蒸发皿 (直径 20 cm) 的水面蒸发量确定^[28]。2 年播后累积灌水量分别为 346.1、223.9 mm,具体见图 1。两年的施肥量均为 N 300.0 kg/hm² 和 P₂O₅ 180.0 kg/hm²。各小区均于 4 月 26 日覆膜,覆膜 2 d 后播种。

1.3 取样及测定方法

1.3.1 土壤含水率、电导率与 pH 值

用土钻 (直径 4 cm,长 20 cm) 沿垂直种植行方向取土,取土点分别设置在滴头处、相邻滴头间 1/4

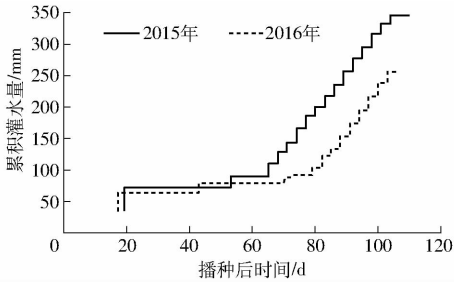


图 1 2015 年和 2016 年各处理累积灌水量
Fig. 1 Cumulative irrigation amount for each plot
in 2015 and 2016

处及 1/2 处。垂直取样深度为 0 ~ 5 cm、30 ~ 35 cm、50 ~ 55 cm。土钻取得的土壤样品用于土壤含水率、电导率以及 pH 值的测定。为研究低频与高频膜下滴灌条件下土壤各指标的变化特征,在整个春玉米生育期共取样 5 次:分别在单次灌水前(拔节期前)和后各 7 d、高频灌溉前 7 d、高频灌溉中期(第 14 天)以及高频灌溉后 7 d。

采用干燥法测量土壤质量含水率,再乘以土壤容重即为土壤体积含水率。采用土、水质量比为 1:5 的土壤制备液测定土壤 $EC_{1:5}$ 和 pH 值:土样经自然风干、研磨并过 2 mm 筛后混匀,称取土样 10.0 g 于 100 mL 广口瓶中,加入去离子水 50 mL,以制备土、水质量比为 1:5 的土壤溶液;广口瓶加盖恒温振荡 3 min 后将土水混悬液用离心机分离并取上层清液;用电导率仪(DDSJ-318 型)测定上清液电导率,即为 $EC_{1:5}$;用玻璃电极(PHS-3C 型)测定 pH 值。

1.3.2 土壤斥水性

采用滴水穿透时间(Water drop penetration time, WDPT)法测定土壤斥水性^[29]。首先,将采集的土样在室内风干 3 d。由于容重的变化会对土壤斥水性产生影响^[27],为了避免土壤容重对斥水性的影响,将处理好的土壤过 2 mm 筛后按照 1.4 g/cm³ 的容重填入直径与高均为 5 cm 的环刀中并保持土面平整^[30]。最后,用滴管吸取蒸馏水 10 滴(每滴为 0.05 mL)滴于土表,控制滴管口与土表的高度为 1 cm,取其完全渗入时间作为该样品的 WDPT 值。每个样品重复测定 6 次,取其算术平均值作为每个样品的最终结果。土壤斥水性按 WDPT 值划分为 6 个等级: $t_{WDPT} < 5$ s(不斥水); $5\text{ s} \leq t_{WDPT} < 60$ s(轻微斥水); $60\text{ s} \leq t_{WDPT} < 600$ s(强烈斥水); $600\text{ s} \leq t_{WDPT} < 3\,600$ s(严重斥水); $t_{WDPT} > 3\,600$ s(极端斥水)^[27]。

1.3.3 土壤斥水特征曲线的拟合

土壤斥水性受土壤水分的影响很大^[31-32]。之前的研究大多利用风干土或干燥土测定土壤斥水

性^[27,29],无法准确反映实际农田水分变化过程中(如降雨或灌溉后)土壤斥水性的变化。为此,本研究测定了各土样脱湿过程(饱和至风干含水率范围)的土壤斥水特征曲线(Soil-water repellency characteristic curves, SWRCC),并得到土壤斥水性峰值及消失时对应的土壤含水率(θ_m 和 θ_c)。测定方法如下:首先将测定土壤斥水性时所用的各环刀置入水中使土壤达到饱和土壤含水率。其次进行土壤离心脱湿操作,每次离心操作后记录土壤含水率以及对应的 WDPT,直到土壤含水率达到 5% 左右为止^[31]。

分别采用一维 Gaussian 和 Lorentzian 模型描述 WDPT 和土壤含水率的关系,Gaussian 模型表达式为

$$t_{WDPT} = ae^{-0.5\left(\frac{\theta}{b}\right)^2} \tag{1}$$

Lorentzian 模型表达式为

$$t_{WDPT} = \frac{a}{1 + \left(\frac{\theta}{b}\right)^2} \tag{2}$$

式中 a 、 b ——系数

θ ——土壤体积含水率

利用 LSD 法进行处理间多重比较, $P < 0.05$ 视为存在明显差异。采用 SPSS 15.0 进行数据分析及曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 不同膜下滴灌方式对春玉米农田土壤电导率的影响

分别对单次与高频滴灌条件下 0 ~ 50 cm 土壤剖面的 $EC_{1:5}$ 进行了研究,借此分析不同膜下滴灌模式下土壤盐分的分布,并为下文土壤斥水性的分析提供依据。

单次滴灌(36 mm)前、后全膜及半膜覆盖处理土壤 $EC_{1:5}$ 在剖面中的分布见图 2。由图 2 可知,单次滴灌对土壤剖面盐分的淋洗效果并不显著。与灌溉前相比,全膜覆盖与半膜覆盖土壤剖面的 $EC_{1:5}$ 在滴灌 7 d 后并未降低(图 2, $P > 0.05$),并且还出现了积盐区(图 2b、2d)。全膜覆盖与半膜覆盖土壤剖面的积盐区域有所不同:全膜覆盖的积盐区域主要出现在与滴头水平距离 15 ~ 35 cm 处,该区域土体的 $EC_{1:5}$ 上升了 30% 以上(图 2a、2b, $P < 0.05$),土壤剖面内盐分呈现中间(25 cm 处)高、两边低的分布(图 2b);而半膜覆盖的盐分主要向远离滴头方向的上层土壤集聚,该区域土体的 $EC_{1:5}$ 上升了 35% 以上(图 2c、2d, $P < 0.05$)。

高频滴灌(灌溉频率为 3 d)前、后全膜及半膜

覆盖处理土壤 $EC_{1:5}$ 在剖面中的分布见图 3。由图 3 可以看出,高频滴灌可以显著改变土壤剖面的盐分分布。高频滴灌过程中,全膜覆盖与半膜覆盖 40 cm 以上土体的 $EC_{1:5}$ 均下降了 40% 以上 (图 3b、3e, $P < 0.01$), 而盐分主要集中在远离滴头方向的

50 cm 深度处 (图 3b、3e, $P < 0.01$)。由此可见,高频滴灌可以持续而显著地将盐分淋洗至下层土壤。高频滴灌结束后 7 d, 半膜覆盖处理未覆膜区域表层土体的 $EC_{1:5}$ 出现了返升, 但并不显著 (图 3f, $P > 0.05$)。

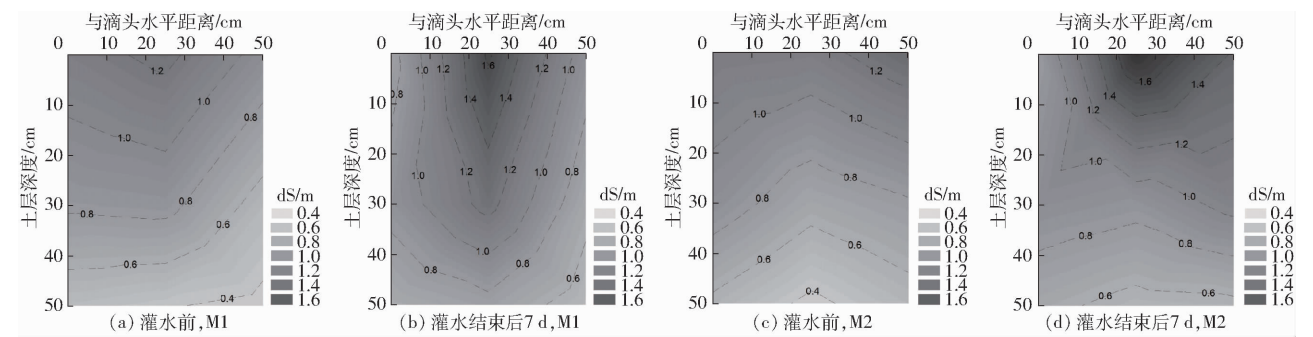


图2 单次滴灌前、后全膜及半膜覆盖处理土壤 $EC_{1:5}$ 的分布

Fig.2 Distributions of $EC_{1:5}$ in full and partially mulched soil profiles before and after each drip irrigation

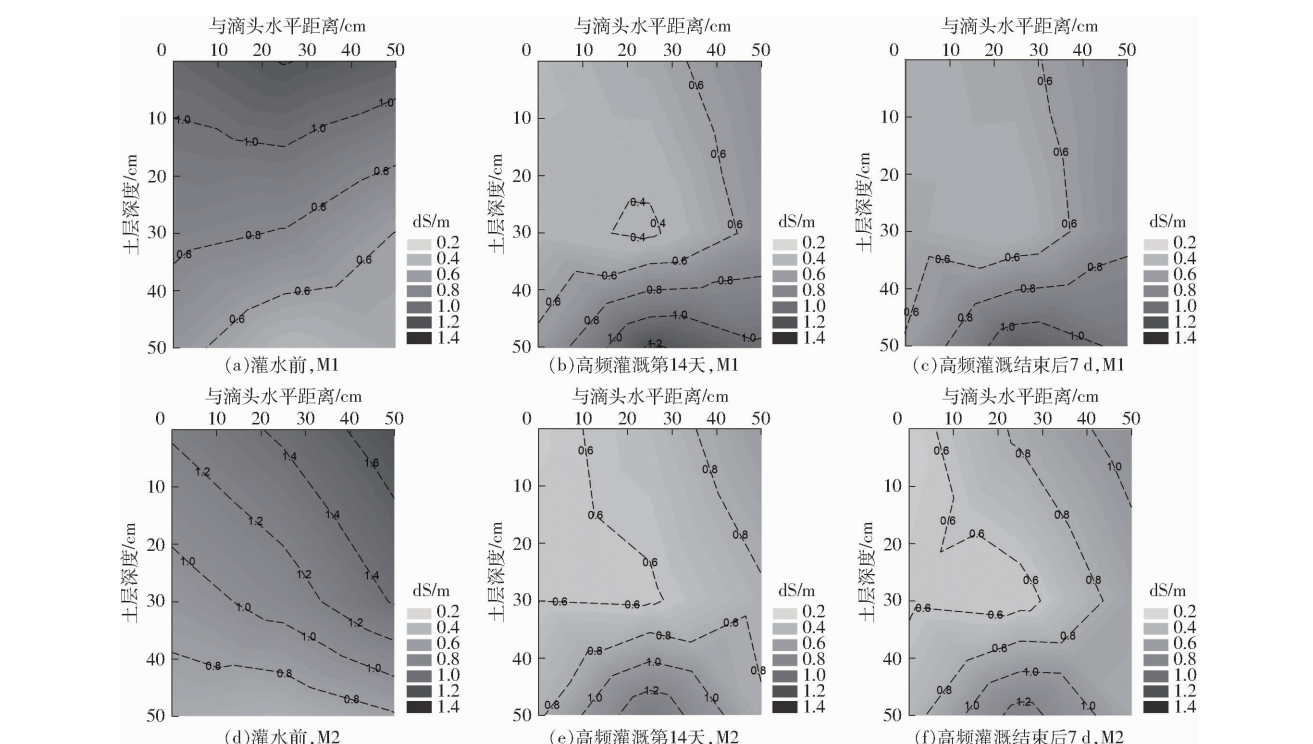


图3 高频滴灌前、后和过程中全膜及半膜覆盖处理土壤中 $EC_{1:5}$ 的分布

Fig.3 Distributions of $EC_{1:5}$ in full and partially mulched soil profiles before, during and after frequent drip irrigation

2.2 不同膜下滴灌方式对春玉米农田土壤 pH 值的影响

土壤 pH 值也会影响土壤斥水性,故本研究对单次与高频滴灌条件下 0 ~ 50 cm 土壤剖面的 pH 值进行了研究,具体结果见图 4、5。

单次滴灌前、后全膜及半膜覆盖处理土壤剖面的 pH 值见图 4。由图 4 可知,单次灌溉显著降低了滴头周围土体的 pH 值 (图 4, $P < 0.05$), 但对整个土体剖面 pH 值的降低并不显著 (图 4, $P > 0.05$)。与 $EC_{1:5}$ 的结果不同:单次滴灌结束后 7 d, 全膜覆盖并未在局部形成 pH 值的显著增高 (图 4b, $P >$

0.05), 而半膜覆盖膜间表层土体虽然出现了 pH 值的升高, 但并不显著 (图 4c、4d, $P > 0.05$)。高频滴灌 (灌溉频率为 3 d) 前、后全膜及半膜覆盖处理土壤 pH 值在剖面的分布见图 5。由图 5 可以看出,高频滴灌显著降低了土壤剖面的 pH 值, 且在灌溉结束后 7 d 未出现返升的现象 (图 5c、5f)。

2.3 不同膜下滴灌方式对盐碱化农田土壤斥水性的影响

单次与高频滴灌条件下 0 ~ 50 cm 土壤剖面的土壤斥水性分布特征见图 6、7。单次滴灌前、后全膜及半膜覆盖处理土壤剖面的 WDPT 见图 7。由

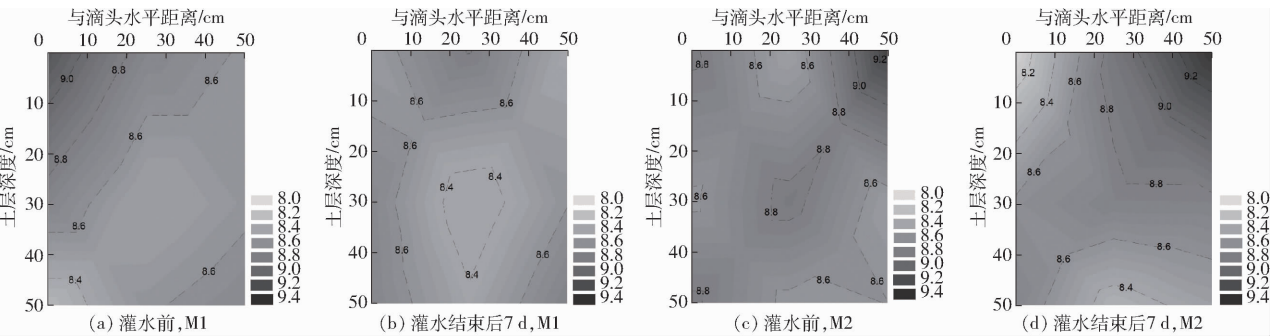


图 4 单次滴灌前、后全膜及半膜覆盖处理土壤 pH 值在剖面中的分布

Fig. 4 Distributions of pH value in full and partially mulched soil profiles before and after each drip irrigation

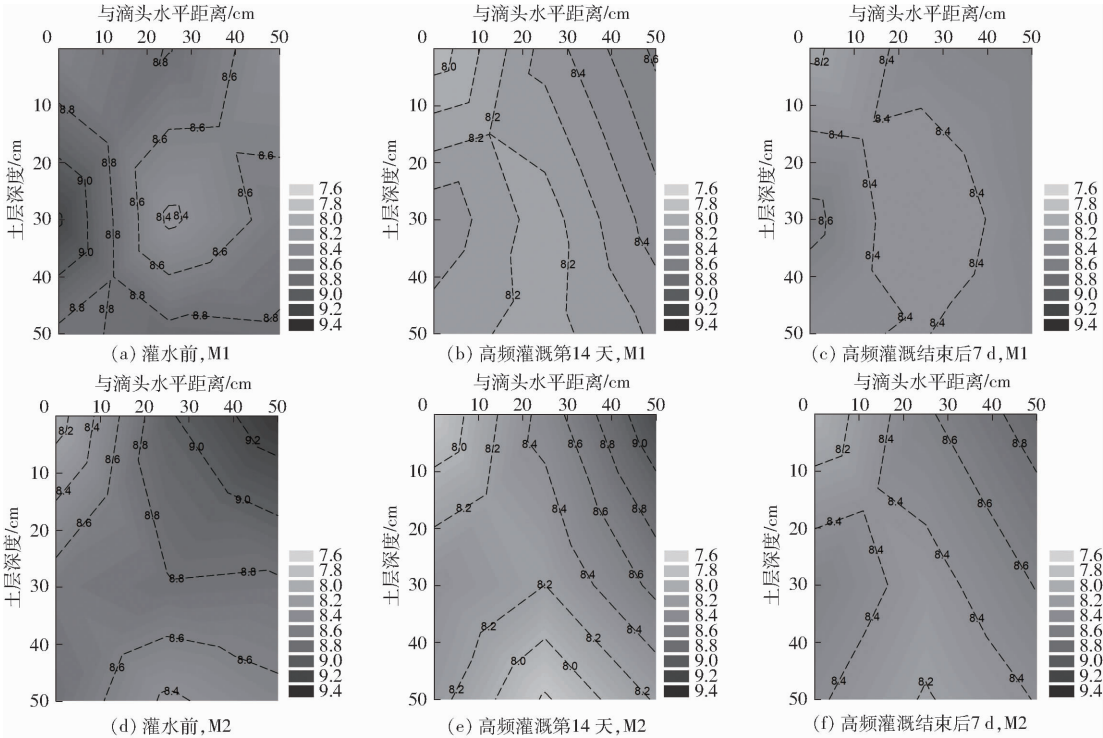


图 5 高频滴灌前、后和过程中全膜及半膜覆盖处理土壤 pH 值的分布

Fig. 5 Distributions of pH value in full and partially mulched soil profiles before, during and after frequent drip irrigation

图 7 可知,试验地农田土壤呈现弱斥水性(WDPT 为 5~60 s)或非斥水性(WDPT 小于 5 s)。单次滴灌增加了远离滴头(与滴头水平距离大于 30 cm)土体的 WDPT,全膜覆盖与半膜覆盖该区域的 WDPT 分别增加了 22.2% ($P<0.05$) 与 33.3% ($P<0.01$)。值得注意的是,单次滴灌后垂直方向上的斥水性土壤

面积有所增大(图 6)。高频滴灌(灌溉频率为 3 d)可以显著降低土壤剖面整体的 WDPT。高频灌溉中期及结束 7 d 后,全膜覆盖土壤剖面的 WDPT 较灌溉前分别降低了 25.9% ($P<0.05$) 与 17.3% ($P<0.05$);半膜覆盖土壤剖面的 WDPT 较灌溉前分别降低了 24.8% ($P<0.05$) 与 16.5% ($P<0.05$)。

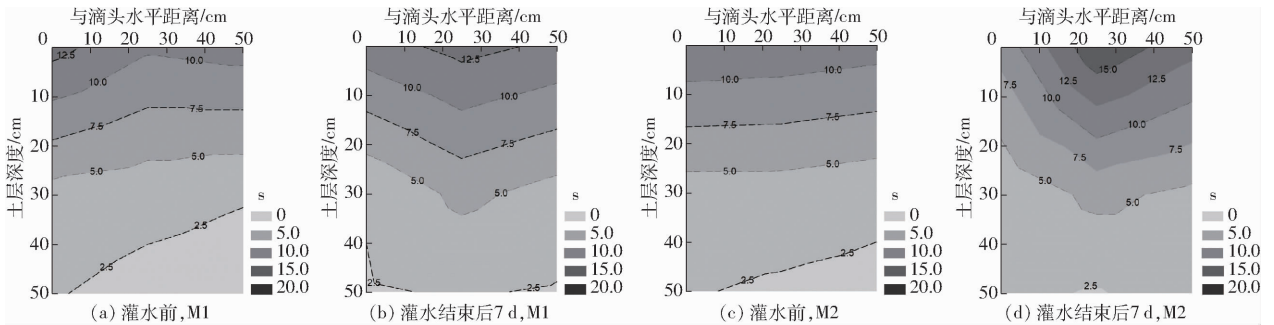


图 6 单次滴灌前、后全膜及半膜覆盖处理土壤 WDPT 的分布

Fig. 6 Distributions of WDPTs in full and partially mulched soil profiles before and after each drip irrigation

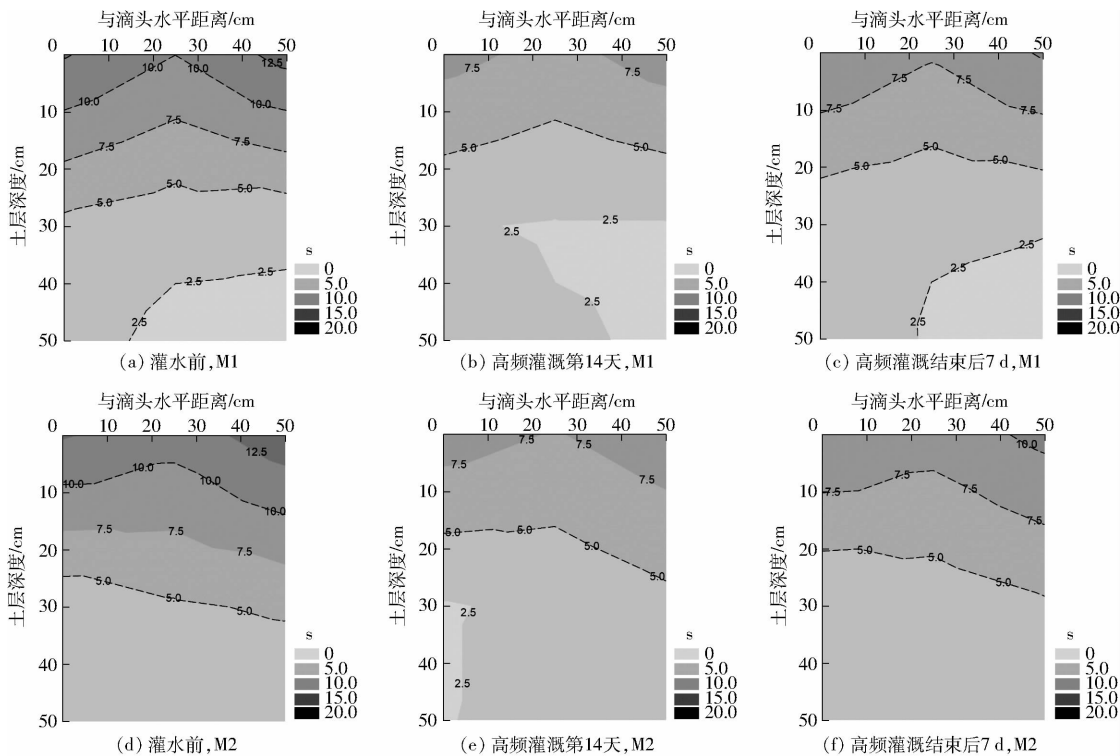


图 7 高频滴灌前、后和过程中全膜及半膜覆盖处理土壤 WDPT 的分布

Fig. 7 Distributions of WDPTs in full and partially mulched soil profiles before, during and after frequent drip irrigation

2.4 膜下滴灌条件下盐碱化土壤斥水性与盐分及 pH 值的相关性

高频滴灌使灌区农田的土壤水、盐以及 pH 值呈剧烈的动态变化特征,从而可能会对土壤斥水性产生显著影响。表层土壤(0~5 cm)及研究区域土壤剖面深度(0~50 cm)WDPT 与 $EC_{1:5}$ 和 pH 值的关系见图 8(图中*表示显著相关)。

由图 8 可知,膜下滴灌条件下土壤 $EC_{1:5}$ 与

WDPT 呈显著的线性关系(图 8a),而土壤 pH 值与 WDPT 无显著关系。此外,WDPT 仅在表层土壤与 $EC_{1:5}$ 呈显著线性关系,而整个研究剖面土体 WDPT 与 $EC_{1:5}$ 的线性关系未达到显著水平(图 8b)。整个研究剖面土体 WDPT 与 $EC_{1:5}$ 和 pH 值的散点图呈现较明显的分区现象,这主要是因为表层土壤有机质含量高于下层土壤所致^[17](表 1)。

2.5 膜下滴灌条件下盐碱化农田土壤斥水特征曲线

土壤斥水性受土壤水分的影响很大。单一土壤

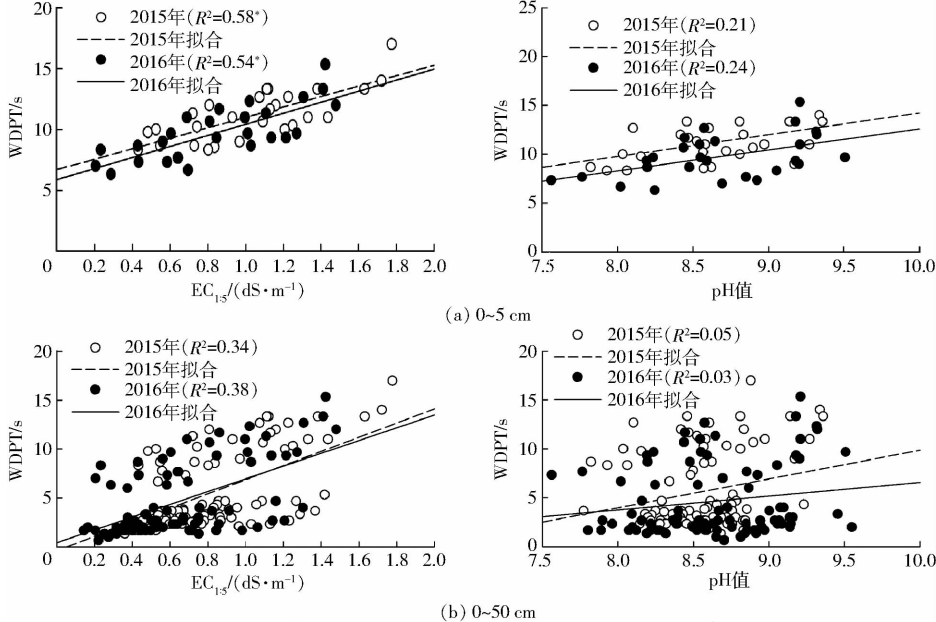


图 8 膜下滴灌盐碱化农田土壤 WDPT 与 $EC_{1:5}$ 和 pH 值的关系

Fig. 8 Relationship between WDPTs, $EC_{1:5}$, and pH value in mulched drip irrigated saline-alkali field

含水率下测定的 WDPT 无法反映农田水分变化过程中土壤斥水性的变化。为此,本部分测定了单次及高频滴灌前、后半膜覆盖处理表层土壤脱湿过程的土壤斥水特征曲线(SWRCC),并分别用 Gaussian 和 Lorentzian 模型对 WDPT 与 θ 进行了拟合与对比。

各土样脱湿过程的土壤斥水特征曲线见图 9 (图中横虚线代表土壤斥水性判别的临界值,WDPT 为 5 s)。由图 9 可看出,滴灌前(图 9a)及灌溉后,半膜覆盖处理滴头下(图 9b、9d)及地膜间(图 9c、9e)的 WDPT- θ 均呈单峰曲线关系,其变化可用 Gaussian 和 Lorentzian 模型进行描述(表 2),且 Lorentzian 模型能更好地拟合 WDPT- θ 的关系

(图 9)。滴灌前后 WDPT 最高时对应的 $\theta(\theta_m)$ 未发生变化,均为 10% 左右。但值得注意的是,滴灌前后 WDPT 小于 5 s 所对应的 $\theta(\theta_c)$ 发生了变化。滴灌前,各土样的 θ_c 均在 22% ~ 24% 之间(图 9a),而滴灌后 θ_c 发生了变化。高频灌溉后,滴头下与地膜间的 θ_c 均下降,分别为 18% ~ 20% ($P < 0.05$) 与 22% 左右($P > 0.05$)(图 9d、9e)。单次灌溉结束后 7 d,滴头下的 θ_c 较滴灌前有所下降(20% 左右, $P > 0.05$,图 9b),而地膜间的 θ_c 较滴灌前却有所提高(28% ~ 30%, $P < 0.05$,图 9c)。以上结果表明滴灌前后土壤 θ_m 未受到显著影响,而土壤 θ_c 的变化在不同的滴灌模式下是不同的。

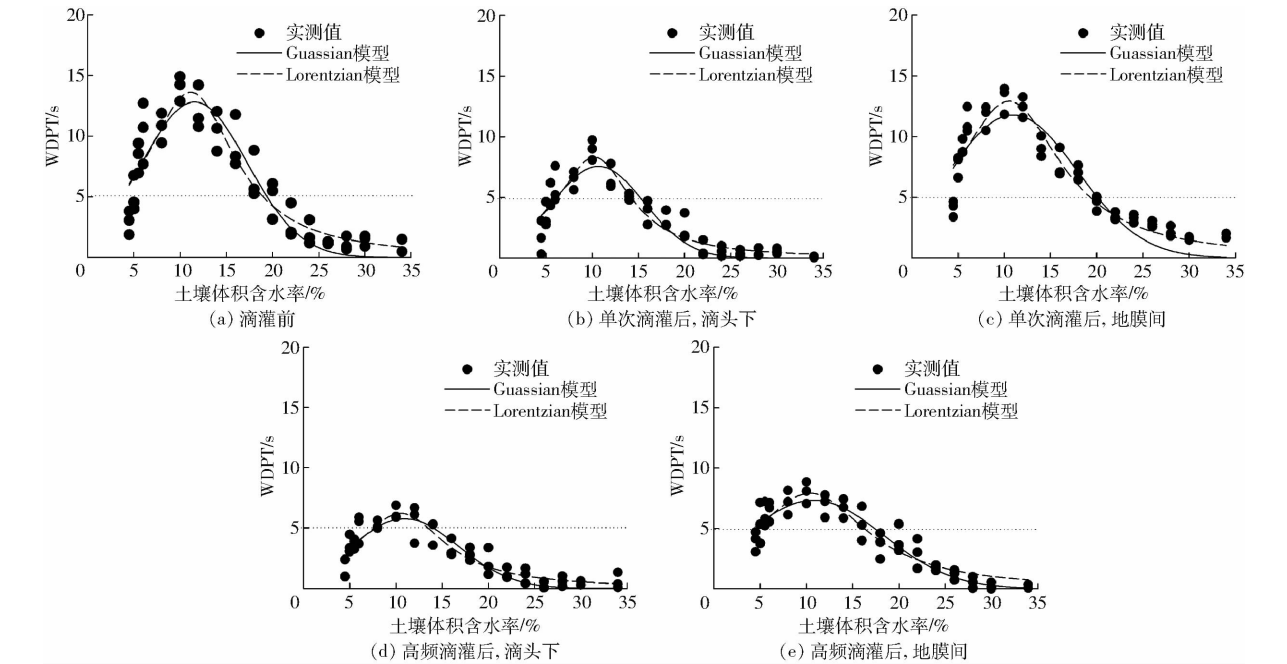


图 9 WDPT 与体积含水率的非线性关系

Fig.9 Non-linear relationship between WDPT and volumetric soil water content

表 2 Gaussian 和 Lorentzian 模型对不同土壤回归参数的相关性及其显著性分析

Tab.2 Regression parameters and test values of Gaussian and Lorentzian models for soils						
采样时间及采样点	模型	<i>a</i>	<i>b</i>	μ	<i>R</i> ²	<i>P</i>
滴灌前	Gaussian	12. 817	5. 718	11. 568	0. 841	<0. 000 1
	Lorentzian	13. 624	5. 974	11. 136	0. 849	<0. 000 1
单次滴灌后(滴头下)	Gaussian	7. 575	4. 964	10. 664	0. 840	<0. 000 1
	Lorentzian	8. 330	4. 870	10. 230	0. 863	<0. 000 1
单次滴灌后(地膜间)	Gaussian	11. 785	6. 975	10. 963	0. 824	<0. 000 1
	Lorentzian	12. 925	6. 975	10. 514	0. 893	<0. 000 1
高频滴灌后(滴头下)	Gaussian	5. 774	5. 799	10. 940	0. 795	<0. 000 1
	Lorentzian	6. 217	5. 956	10. 516	0. 834	<0. 001
高频滴灌后(地膜间)	Gaussian	7. 340	7. 561	10. 779	0. 875	<0. 000 1
	Lorentzian	7. 917	7. 658	10. 403	0. 870	<0. 000 1

由拟合结果可知,Gaussian 模型拟合的 R^2 在 0. 795 ~ 0. 875 之间,Lorentzian 模型拟合的 R^2 在 0. 834 ~ 0. 893 之间(图 9、表 2)。相比 Gaussian 模型,Lorentzian 模型能更好地拟合 WDPT- θ 的关系。

Lorentzian 模型对高含水率段 WDPT 的拟合效果更优,而 Gaussian 模型对高含水率(大于 20%)段 WDPT 的拟合效果偏低(图 9),这是 Gaussian 模型拟合效果较差的原因。

3 讨论

本研究中,灌溉水质为弱碱性咸水(pH 值为 7.73,电导率为 1.32 dS/m)。土壤为碱性土(pH 值为 8.16~8.68)。单次滴灌对盐分的淋洗与 pH 值的改变并不显著,盐分在部分区域还出现了积聚;相反,高频滴灌对盐分及 pH 值的影响显著。灌溉前土壤初始含水率较低,且滴灌的单次灌水定额(36 mm)通常较低。因此,单次滴灌所形成的湿润体较小(湿润体半径与深度均小于 30 cm)^[33],盐分无法淋洗至该区域之外,并积聚在湿润锋周边。本研究灌溉水的 pH 值与土壤初始 pH 值的差异并不大,因此滴灌对 pH 值的影响主要是水分对滴头附近碱性物质的不断淋洗所致。这使得滴灌条件下土壤 pH 值的变化与土壤盐分相似^[34]。然而,高频滴灌模式下,土壤含水率不断升高,湿润体不断扩大以至于相互连通并垂直向下推进,最终将盐分及碱性离子不断向远离滴头处淋洗。此外,半膜覆盖处理下,EC_{1:5}在表层未覆膜区域出现了积聚,这一方面是由于灌溉水矿化度较高,另一方面是因为该研究区降雨少且蒸发力强,上述两方面原因共同造成盐分随水分不断向膜间运移和再分布。

影响斥水性的内因包括土壤有机质、质地、粘土类型、pH 值、盐分以及含水率等^[2]。本研究表层土壤呈现弱斥水性及亲水性,这主要是表层土壤较高的有机质含量与轻微的盐渍化共同导致的。灌溉过程中,农田的土壤含水率、电导率以及 pH 值呈显著的动态变化特征,因此本研究选取上述 3 个指标研究其对土壤斥水性的影响。土壤有机质组成非常复杂,其中诱发斥水性的组分含量与有机质总含量不一定成比例^[35-36]。例如在林地,脂类物质很可能是引起土壤斥水性的主要因素,而在草地或农田土壤斥水性则主要受土壤腐殖质影响^[37-38]。本研究有机质的来源主要为动物粪肥,其次为作物残留物的腐解。张雪辰^[39]研究表明,作物粪便在腐解过程中会产生大量的有机 C=O 组分(红外光谱吸收谱带为 1 740~1 600 cm⁻¹),而有机 C=O 组分易引发土壤斥水性。盐碱化会引发或加剧土壤斥水性^[14,27],斥水性土壤一般具有较低的 pH 值^[30]。本研究中,土壤斥水性仅仅在表层土壤与 EC_{1:5}呈正相关。这一方面是因为相比土壤 pH 值,表层土壤 EC_{1:5}对灌溉水分淋洗的响应更为显著(图 2,3);另一方面,表层土壤腐殖酸在碱性条件下溶解度较大,pH 值对有机质组分(特别是胡敏酸)的调控是其影响 SWR 的途径之一^[40],而这个过程需要长时间的积累才能表现出来。此外,本研究土壤盐分组成中,

阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺ 为主,阴离子以 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 为主^[41],而 Ca²⁺ 离子与 Cl⁻ 均会对土壤斥水性产生显著影响^[42]。

土壤斥水性受土壤水分的影响很大^[31-32],当土壤干燥至临界体积含水率(θ_c)时,几乎所有土壤都会表现出一定的斥水性^[1],而随着土壤湿度的增加,土壤斥水性会逐渐消失^[26],这个过程可以用土壤斥水特征曲线来描述^[25]。因此,单一土壤含水率下测定的 WDPT 无法反映农田水分变化过程中土壤斥水性的变化。之前对 SWRCC 也开展了不少研究^[15,25,31,43],大部分研究都发现 SWRCC 呈单峰曲线,且 WDPT- θ 关系可用 Guassian 模型、Lorentzian 模型和 Lognormal 模型描述。陈俊英等^[17]、GAO 等^[15]用上述模型拟合的 R^2 在 0.230~0.815 之间,本研究拟合的 R^2 高于上述研究(0.834~0.893)。这主要是因为本试验的农田土壤斥水性较弱且取样点较为集中,这使得土壤斥水性的差异性与土样间的空间变异性均较低。本研究结果表明,灌溉对 SWRCC 的 θ_m 影响不大($P>0.05$),而对 θ_c 的影响显著($P<0.05$)。VERHEIJEN 等^[44]认为微生物活性的激发(会产生斥水性物质)与大团聚体崩解造成毛管作用力的增强(通常是土样处理操作不当造成)是 SWRCC 峰值产生的原因。本研究每年的试验历时约 4 个月,不足以对土壤微生物数量及结构造成显著改变,因此,土壤 θ_m 未受影响。不同土壤 θ_c 的范围差异很大:如粘质泥炭为 34%~38%^[6],粉壤土约为 15%^[15],而沙土仅为 2%~4%^[45]。本研究 θ_c 的范围在 18%~30%,介于粉壤土与粘土之间。本研究发现滴灌降低了滴头附近的 θ_c ,而提高了土壤积盐区的 θ_c ,这表明滴灌对土壤盐分的再分布会对其 θ_c 产生影响。需要强调的是,干燥法测定的 WDPT 只是土壤的潜在斥水性,而一般情况下农田土壤含水率不会低到 θ_m (如本研究中为 10%)。然而,在膜下滴灌过程中,毛管间一般会存在土壤干燥区域^[46],该区域表层含水率往往极低,易导致土壤斥水性的发生,从而影响该区域的土壤表面水分入渗。

4 结论

(1)弱碱性微咸水灌溉水质条件下,单次滴灌对盐分的淋洗与 pH 值的改变不显著,盐分在剖面部分区域还出现了积聚,而高频滴灌对盐分及 pH 值的影响显著。膜下滴灌盐碱化农田土壤的斥水性仅仅在表层土壤与 EC_{1:5}呈正相关,而与 pH 值无显著相关性。单次滴灌降低了滴头附近土壤的 WDPT,但增加了远离滴头土体的 WDPT;高频滴灌

(灌溉频率为 3 d)可显著降低土壤剖面整体的 WDPT。

(2)膜下滴灌盐碱化农田土壤的斥水特征曲线均可用 Gaussian 和 Lorentzian 模型进行描述。滴灌对 SWRCC 的 θ_m 影响不大 ($P > 0.05$), 而对 θ_c 的影

响显著 ($P < 0.05$)。相比而言, Lorentzian 模型对 WDPT 与 θ 关系的拟合效果更优, 通过该曲线可准确得到特定土壤的峰值斥水性及其对应的土壤含水率(θ_m)以及土壤斥水性消失时的土壤含水率(θ_c)等, 从而为斥水性土壤的改良与利用提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] BACHMANN J, HORTON R, PLOEG R R. Modified sessiledrop method of assessing initial soil-water contactangle of sandy soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 564 – 567.
- [2] 李毅, 商艳玲, 李振华, 等. 土壤斥水性研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 68 – 75.
LI Yi, SHANG Yanling, LI Zhenhua, et al. Advance of study on soil water repellency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 68 – 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.014. (in Chinese)
- [3] ALANIS N, HERNANDEZ-MADRIGAL V M, CERDA A, et al. Spatial gradients of intensity and persistence of soil water repellency under different forest types in central Mexico[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(1): 317 – 327.
- [4] KEESSTRA S, WITTENBERG L, MAROULIS J, et al. The influence of fire history, plant species and post-fire management on soil water repellency in a Mediterranean catchment: the Mount Carmel Range, Israel[J]. Catena, 2017, 149: 857 – 866.
- [5] KECK H, FELDE V, DRAHORAD S, et al. Biological soil crustscause subcritical water repellency in a sand dune ecosystem located along a rainfall gradient in the NW Negev desert, Israel[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(2): 133 – 140.
- [6] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51: 33 – 65.
- [7] MÜLLER K, MASON K, STROZZI A G, et al. Runoff and nutrient loss from a water-repellent soil[J]. Geoderma, 2018, 322: 28 – 37.
- [8] BUGHICI T, WALLACH R. Formation of soil-water repellency inolive orchards and its influence on infiltration pattern[J]. Geoderma, 2016, 262: 1 – 11.
- [9] HALLETT P D, LICHNER L, KODESOVA R, et al. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency—a review[J]. Soil and Water Research, 2008, 3: 21 – 29.
- [10] 陈俊英, 张智韬, 汪志农. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 84 – 89.
CHEN Junying, ZHANG Zhitao, WANG Zhinong. Influencing factors and amelioration of soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 84 – 89. (in Chinese)
- [11] RYEC F, SMETTEM K R J. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation[J]. Geoderma, 2017, 289: 142 – 149.
- [12] GRABERE R, BEN-ARIE O, WALLACH R. Effect of sample disturbance on soil water repellency determination in sandy soils [J]. Geoderma, 2006, 136: 11 – 19.
- [13] SAVAGE S M. Mechanism of fire-induced water repellency in soil[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1974, 38: 652 – 657.
- [14] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 37 – 45.
GUO Lijun, LI Yi, LI Min, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in asalinized-alkaline field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 37 – 45. (in Chinese)
- [15] GAO Y F, LIU H G, WU H X, et al. Seasonal changes in soil water repellency of different land use types in Inner Mongolia grassland[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 177: 37 – 44.
- [16] DEBANO L F. Water repellency in soils: a historical overview[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231 – 232: 4 – 32.
- [17] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性与有机质质量分数的变化关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 96 – 98, 118.
CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. The relationship between WDPT and soil organic matter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 96 – 98, 118. (in Chinese)
- [18] URBANEK E, HALLETT P, FEENEY D, et al. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems[J]. Geoderma, 2007, 140: 147 – 155.
- [19] 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 202 – 211.
BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and its correlation analysis with groundwater in large irrigation area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 202 – 211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029. (in Chinese)

- [20] 杜斌,屈忠义,于健,等. 河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(4):16-20.
DU Bin, QU Zhongyi, YU Jian, et al. Experimental study on crop coefficient under mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4): 16-20. (in Chinese)
- [21] LIU Haijun, WANG Xuming, ZHANG Xian, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao Irrigation District of China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179(1): 144-157.
- [22] 孙贯芳,屈忠义,杜斌,等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报,2017,33(12): 144-152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 144-152. (in Chinese)
- [23] 黄权中,徐旭,吕玲娇,等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报,2018, 34(1):102-109.
HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 102-109. (in Chinese)
- [24] 李爽,张玉龙,范庆锋,等. 不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响[J]. 土壤学报,2012,49(5): 909-915.
LI Shuang, ZHANG Yulong, FAN Qingfeng, et al. Effect of irrigation mode on soil acidification in protected field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 909-915. (in Chinese)
- [25] KARUNARATHNA A K, MOLDRUP P, KAWAMOTO K, et al. Two-region model for soil water repellency as a function of matric potential and water content[J]. Vadose Zone Journal,2010(9): 719-730.
- [26] VOGELMANN E S, REICHERT J M, PREVEDELLO J, et al. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: the role of soil texture and organic matter content[J]. Geoderma, 2013, 209-210(11): 177-187.
- [27] 王亦尘,李毅,肖珍珍. 玛纳斯河流域土壤斥水性及其影响因素[J]. 应用生态学报,2016,27(12): 3769-3776.
WANG Yichen, LI Yi, XIAO Zhenzhen. Water repellency and its influencing factors in Manas River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3769-3776. (in Chinese)
- [28] 周立峰,吴淑芳,齐智娟,等. 基于作物耗水特性的夹砂地膜下滴灌模式优选[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 183-190.
ZHOU Lifeng, WU Shufang, QI Zhijuan, et al. Optimal mode selection of mulched drip irrigation in sand layered field based on water consumption characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 183-190. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170923&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.023. (in Chinese)
- [29] 吴延磊,李子忠,龚元石. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究[J]. 农业工程学报,2007,23(7): 8-13.
WU Yanlei, LI Zizhong, GONG Yuanshi. Correction of soil water repellency measurements from two typical methods[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 8-13. (in Chinese)
- [30] 任长江,赵勇,龚家国,等. 奶水河流域土壤斥水性分布与影响因素研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10): 237-244.
REN Changjiang, ZHAO Yong, GONG Jiaguo, et al. Spatial distribution and effect factors of soil water repellency in Guishui River Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 237-244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.029. (in Chinese)
- [31] 陈俊英,吴普特,张智韬,等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(1): 63-67,82.
CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 63-67, 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.013. (in Chinese)
- [32] 杨松,黄剑峰,罗茂泉,等. 斥水性砂土水-气形态及其对斥水-亲水转化的影响分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):247-252.
YANG Song, HUANG Jianfeng, LUO Maoquan, et al. Pore water-air configurations in water repellent sandy soil and its effects on transformation of hydrophilicity to hydrophobicity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 247-252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171130&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.030. (in Chinese)
- [33] ZHOU LiFeng, FENG Hao, ZHAO Yin, et al. Drip irrigation lateral spacing and mulching affects the wetting pattern, shoot-root regulation, and yield of maize in a sand-layered soil[J]. Agricultural Water Management,2017, 184: 114-123.
- [34] 谭军利,康跃虎,焦艳平,等. 滴灌条件下种植年限对大田土壤盐分及 pH 值的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(9): 43-50.
TAN Junli, KANG Yuehu, JIAO Yanping, et al. Effects of cropping years on soil salinity and pH value in fields under drip irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 43-50. (in Chinese)
- [35] HURRA J, SCHAUMANN G E. Properties of soil organic matter of actually water repellent and wettable soil samples[J].

Geoderma, 2006, 132(1–2): 222–239.

- [36] ATANASSOVA I, DOERR S. Organic compounds of different extractability in total solvent extracts from soils of contrasting water repellency[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(2): 298–313.
- [37] GONZÁLEZ-PENÁLOZA F, CERDÀ A, ZAVALA L M. Do conservative agriculture practices increase soilwater repellency? A case study in citrus-cropped soils[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 233–239.
- [38] MAO Jiefei, NIEROP K G J, DAMSTÉ J S S, et al. Roots induce stronger soil water repellency than leaf waxes[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 232–234: 328–340.
- [39] 张雪辰. 禽畜粪便堆肥化过程碳氮转化规律及其受调控措施的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHANG Xuechen. The transformation of organic carbon and nitrogen with different regulation technology during the livestock manure composting process[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [40] 李自刚, 岳晓禹, 李长滨, 等. 基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 300–304.
LI Zigang, YUE Xiaoyu, LI Changbin, et al. Near infrared spectral modeling analysis based on variable selection of compost hemic acid content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 300–304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170240&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.040. (in Chinese)
- [41] 齐智娟. 河套灌区盐碱地玉米膜下滴灌土壤水盐热运移规律及模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
QI Zhijuan. Soil water, heat and salt transport and simulation under mulched drip irrigation for corn of saline soil in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [42] 巨娟丽, 李毅, 宋红阳, 等. CaCl_2 溶液灌溉对土壤水盐与斥水性分布的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 159–166.
JU Juanli, LI Yi, SONG Hongyang, et al. Effects of CaCl_2 solution irrigation on distributions of soil water, salt and water repellency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 159–166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.025. (in Chinese)
- [43] WIJEWARDANA N S, MÜLLER K, MOLDRUP P, et al. Soil-water repellency characteristic curves for soil profiles with organic carbon gradients[J]. Geoderma, 2016, 264: 222–239.
- [44] VERHEIJEN F G A, CAMMERAAT L H. The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain[J]. Hydrological Process, 2007, 21(17): 2310–2316.
- [45] 刘立超, 杨昊天, 李新荣, 等. 土壤斥水性及其生态水文效应研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 926–932.
LIU Lichao, YANG Haotian, LI Xinrong, et al. The advances in soil water repellency and its eco-hydrological effects[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 926–932. (in Chinese)
- [46] 陈帅, 毛晓敏. 地表滴灌条件下土壤湿润体运移量化表征[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 285–292.
CHEN Shuai, MAO Xiaomin. Quantification of soil wetted volume development under surface drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 285–292. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180833&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.033. (in Chinese)