

三条毛管淋洗棉花根区盐分的方法改为智慧滴水对盐分的影响

古丽巴哈·吾斯曼^{1,2*}, 董文明^{1,3}, 努尔模达·达拉拜^{1,3}, 赵经花^{1,3}, 穆哈西^{1,3#}

¹新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区水利调度中心, 新疆 乌鲁木齐

³新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年4月28日

摘要

目的: 农田的标准化建设及智能化, 对节水灌溉带来蓬勃的发展机遇。但新疆的干旱缺水、降雨稀少、蒸发量大和土壤盐碱化等不确定性因素影响灌区的智能化、数字化及信息化, 从而加大了智慧灌溉的难度。根据棉花根区盐分随地下水位、土壤性质、水质及施肥量等因素的变化而变化的原理, 为节约大水漫灌冲洗盐分的用水量, 在有限范围内预防盐碱化的继续蔓延, 文章提出随棉花根区盐分的变化而智慧调节滴水量的新技术。方法: 以滴灌条件下湿润体盐分积累在湿润体边缘的原理作为依据, 根据盐分随水运移规律, 采用滞后滴水的三条毛管, 确定三条毛管间距、滴头距、毛管的铺设长度及滴水规则, 然后对通过无线模块和传感器收集到的不同深度土壤水分、盐分等环境数据进行分析, 以棉花根区盐分的变化作为决策采用智慧滴水的方法。结果: 智慧滴水逐步冲洗棉花根区的盐分, 从而节约冲洗盐分用水量。试验结果表明: 栽种棉花的目标土盐分智慧滴水冲洗6次之后, 棉花根系垂向0~20 cm之间盐分的降低量很明显, 20 cm以下的盐分随灌水次数的增多而呈继续下降的趋势。结论: 滞后滴水的三条毛管改为根区土壤盐分的变化而智慧调节滴水方法, 为棉花根区盐分的精准冲洗, 并有效控制盐碱化面积的蔓延, 为灌区的数字化及信息化管理提供依据。

关键词

滞后滴水的三条毛管, 冲洗棉花根区盐分, 智慧滴水

The Method of Leaching Salt in Cotton Root Zone with Three Capillaries was Changed to the Effect of Wisdom Dripping on Salt

Gulibaha·Wusiman^{1,2*}, Wenming Dong^{1,3}, Nuermoda·Dalabai^{1,3}, Jinghua Zhao^{1,3}, Haxi Mu^{1,3#}

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 古丽巴哈·吾斯曼, 董文明, 努尔模达·达拉拜, 赵经花, 穆哈西. 三条毛管淋洗棉花根区盐分的方法改为智慧滴水对盐分的影响[J]. 土壤科学, 2026, 14(2): 89-101. DOI: 10.12677/hjss.2026.142010

¹College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Dispatching Center, Urumqi Xinjiang

³Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi Xinjiang

Received: March 24, 2026; accepted: April 20, 2026; published: April 28, 2026

Abstract

Objective: The standardization and intelligentization of farmland bring vigorous development opportunities for water-saving irrigation. However, the uncertainty factors such as drought and water shortage, scarce rainfall, large evaporation and soil Salinization in Xinjiang affect the intelligence, digitalization and informatization of irrigation areas, thus increasing the difficulty of intelligent irrigation. According to the principle that the salinity in cotton root zone changes with the changes of groundwater level, soil properties, water quality and fertilizer application amount, in order to save the water consumption for flushing the salinity by flood irrigation and prevent the continued spread of Salinization in a limited range, this paper puts forward a new technology of intelligently adjusting the drip water amount with the changes of salinity in cotton root zone. **Method:** Based on the principle of salt accumulation on the edge of wetted body under drip irrigation, according to the law of salt migration with water, three capillary tubes with delayed dripping were used to determine the distance between the three capillary tubes, the distance between drippers, the laying length of capillary tubes and the dripping rules. Then, the environmental data of soil moisture and salt at different depths collected by wireless modules and sensors were analyzed, and the change of salt in cotton root area was taken as the decision-making method to adopt intelligent dripping. **Result:** Wisdom dripping gradually washes the salt in the cotton root area, thus saving the water consumption for washing the salt. The experimental results showed that after the target soil salt of cotton planting was washed by intelligent dripping water for 6 times, the salt content of cotton roots decreased obviously between 0 and 20 cm vertically, and the salt content below 20 cm continued to decrease with the increase of irrigation times. **Conclusion:** The three capillary tubes that lag in dripping water are changed into the method of intelligently adjusting dripping water according to the change of soil salinity in root zone, which provides a basis for the accurate flushing of salt in cotton root zone, effectively controlling the spread of Salinization area and providing a basis for the digital and information management of irrigation areas.

Keywords

Three Capillary Tubes with Delayed Dripping, Leaching Salt in Cotton Root Area, Wisdom Dripping

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

研究意义: 智慧灌溉是采用物联网、大数据、云计算与传感器技术相结合的方法, 根据灌溉设备运行的控制条件, 系统的模型通过模块分析处理所收集的信息, 实现智慧灌溉。其研究意义如下: 1) 研究的必要性。使用 ZigBee 无线模块结合传感器来采集空气温湿度、土壤湿度、土壤温度、光照度等信息, 经灌溉系统中心站数据分析处理透过网络、ZigBee 无线模块控制电磁给水阀进行有效的定量滴灌; 2) 发展趋势。当今 GPS 技术、RS 遥感技术及 3S 集成技术等先进技术的发展, 对灌区的精准灌溉, 高效利用

有限的水资源,灌溉系统的自动化、数字化、信息化管理及实现农业的跨越式发展提供有利的条件[1][2];

3) 目前存在的严重问题是在滴灌条件下根区土壤盐分积累在湿润体边缘,导致土壤盐碱化(如图 1 所示)。至今为解决土壤盐碱化问题:新疆常采用每年用 3 次(播种前、秋季和冬季)冲洗盐分的方法来控制返盐问题(如图 2 所示),秋季 1 次冲洗用水定额为 3,000~4,500 m³/hm²,甚至更多[3],目前新疆兵团休闲棉花地的盐碱化情况(如图 3 所示)[4][5]。在新疆的干旱缺水、降雨稀少、蒸发量大、冲洗用水定额随盐碱化面积的增大而增多的背景下,节水控制盐碱化是缓解水资源短缺问题的出路之一[6][7]。通过自动智慧调节滴水的形式精准冲洗盐分,节约冲洗盐分的用水量,重新分配水资源不仅是灌区的数字化及信息化的基础,而且是提高单位水量的生产率、高效利用水资源,实现农业的跨越式发展出发点[8][9]。

前人研究进展:国内外许多研究者对土壤盐碱化采用:农业改良措施、生物改良措施、化学改良措施及暗管排盐措施等。一般改良盐碱地的改良时间长、淋洗盐分的用水量多、部分氮磷养分易流失的大水冲洗改良盐碱地的方法[10][11]。如及时不采取节水的条件下有效控制土壤盐碱化的措施,将会农田出现大面积盐碱化,使土壤质量降低,保持稳产难度会变大[12][13]。切入点:以滴灌条件下根区盐分随灌水次数的增多而运移积累在湿润体边缘的规律为切入点,研究随根系土壤盐分的变化而调节冲洗盐分的用水量[14][15],根据棉花根系盐分的变化而智慧滴水,节约冲洗盐分用水量[16][17]。拟解决的问题:该文以采用室内外试验相结合方法滞后滴水的三条毛管为基础,以标准土盐分为对照,根据当地土壤性质及栽种模式来确定目标土的盐分,确定目标土的冲洗盐分定额等参数,随灌水次数的增多而棉花根系盐分的变化而调节智慧滴水的方法。以该参数为依据与归一化处理的气象和田间信息相结合,把滞后滴水的三条毛管改成为根系盐分的降低而智慧滴水的系统,从而棉花根系盐分的变化控制智慧滴水,以智慧滴水所节约的冲洗盐分用水量参与灌区用水量的重新分配,防止有限水资源的浪费、有效控制盐碱化面积,改良盐碱地用水量的标准化以及节约淋洗根区盐分的用水量,为灌区的数字化及信息化管理提供依据[18]。



Figure 1. Salinization of drip irrigation farmland

图 1. 滴灌农田的盐碱化



Figure 2. Salt in wheat field washed by flood

图 2. 大水冲洗麦田盐分



Figure 3. Salinization of leisure cotton fields
图 3. 休闲棉田的盐碱化

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

1) 试验材料。室内试验在新疆农业大学农水实验室进行，野外试验在新疆呼图壁二十里店棉花基地进行，最高气温 25℃，最低气温 20℃。首先采用环刀、土钻、尺子、烘干箱、铝盒、电子秤来确定棉田初始盐分、毛管间距和滴头位置，然后铺设滴灌设备，滴灌设备包括干管、支管、毛管、自动化设备。

2) 标准土盐分(S)。备注：为节约不同深度盐分的检测费用等问题，在一个箱子标准土的试验结果为主做不同目标土进行试验，因此每个试验的标准土盐分相同，但目标土不同)为了解释冲洗棉花根区土壤盐分用水量、冲洗盐分的效果及冲洗盐分定额多少等问题，必须有个对照标准，因此以正常生长棉花根区土的盐分作为标准土，以标准土的盐分为依据研究此问题。本试验标准土垂线平均盐分为 7.756 g/kg，取土深度为 50 cm，pH = 7.15，初始含水率 6% (体积含水率)，土壤容重为 1.25 g/cm³ 的中性土壤。水样盐分为 0.567 g/kg，pH = 6.05。标准土的初始盐分检测值如表 1 所示。

Table 1. Salt content of standard soil at different depths (g/kg)

表 1. 标准土壤不同深度的盐分(g/kg)

盐离子名称	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	总盐含量	平均值	
水样含盐量	0.001	0.128	0.054	0.249	0.068	0.046	0.001	0.019	0.567	0.071	
标准土样盐分	0~10 cm	0	0.185	1.566	10.26	2.397	0.658	0.028	1.75	16.843	3.743
	10~20 cm	0	0.178	0.261	4.603	1.318	0.244	0.024	0.37	6.997	1.555
	20~30 cm	0	0.185	0.313	3.883	1.179	0.183	0.024	0.293	6.059	1.347
	30~40 cm	0	0.152	0.278	3.308	0.919	0.28	0.024	0.208	5.17	1.149
	40~50 cm	0	0.174	0.313	2.253	0.44	0.268	0.029	0.233	3.709	0.824
垂直方向的平均盐分	0	0.175	0.546	4.861	1.251	0.327	0.026	0.571	7.756	1.724	

3) 目标土盐分(S₀)。以将栽种棉花的土壤盐分作为目标土，该目标土是盐碱化土，目标土垂直方向平均盐分为 28.258 g/kg，取土深度为 50 cm，pH = 8.72，初始含水率为 6% (体积含水率)，土壤容重为 1.25 g/cm³ 的碱性土壤，目标土盐分如表 2 所示。

Table 2. Salt content of target soil at different depths (g/kg)
表 2. 目标土壤不同深度的盐分(g/kg)

盐离子名称	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	总盐含量	平均值	
水样盐分	0.001	0.128	0.054	0.249	0.068	0.046	0.001	0.019	0.567	0.071	
目标土壤灌水前的盐分	0~10 cm	0	0.542	5.28	11.25 6	2.432	1.423	0.246	6.358	27.537	3.442
	10~20 cm	0	0.534	6.145	6.875	3.63	1.381	0.328	6.897	25.79	3.224
	20~30 cm	0	0.672	5.985	6.987	4.56	1.367	0.412	7.125	27.108	3.389
	30~40 cm	0	0.723	6.398	7.268	4.85	1.728	0.626	7.356	28.949	3.619
	40~50 cm	0	0.748	7.286	8.356	4.91	1.926	0.783	7.896	31.905	3.988
盐分的垂向平均值	0	0.644	6.219	8.148	4.076	1.565	0.479	7.126	28.258	3.532	

2.2. 试验设备的限制条件

在实际生活中做野外试验受到试验设备的性能、实地土壤性质、土壤盐分、水质、作物类型等很多因素的影响，在此详细地说明本试验限制的条件及适用范围。

1) 采集棉田土壤信息的限制范围。由于棉田每年耕地深度 0.4 cm 土壤水盐及温度最活跃范围，0.5 cm 以下的土壤保持原状。棉花 85% 的毛细根分布在土深 0.5 cm、水平 0.3 cm 的范围之内，因此，检测土壤水盐的 TriSCAN (土壤水分、盐分、温度) 传感器检测深度 0.6 cm，水平检测半径为 0.4 cm (如图 4 所示)。

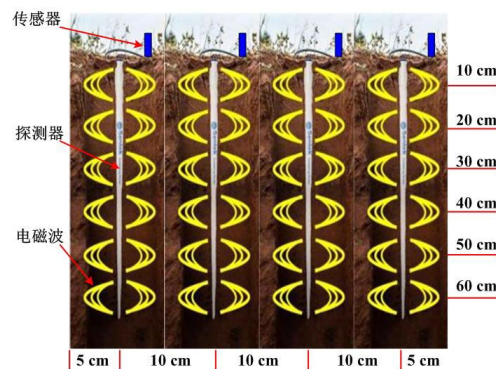


Figure 4. Schematic diagram of TriSCAN sensor
图 4. TriSCAN 传感器示意图

2) 采集土壤酸碱性信息的限制范围。田间安装的传感器通过电导率(各层平均酸碱度)的形式提供不同深度的数据，系统通过拟合电导率与检测盐分值计算盐分与电导率间的曲线，根据曲线采用网格法确定土壤不同深度盐分离子总量。在此基础上，土壤溶液中游离的(H⁺)与(OH⁻)的浓度的比例，如表 3 所示的 pH 值判断土壤反应是否属于酸性(或酸性、中性和碱性)状况。

Table 3. pH value and acid-base range of soil
表 3. 土壤的 pH 值及酸碱性范围

pH	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
级别	强酸性	酸性	弱酸性	中性	碱性	强碱性

3) 采集地下水埋深检测的限制范围。由于灌区地理位置的不同,地下水埋藏深度也不相同。当地地下水埋深 2.0 m,为了清楚地了解地下水在原始土壤中的运移,观测井传感器提供地下水的 0.6~2.0 m 之间的波动状况。

4) 采集气象数据的限制范围。由于灌区的地理位置不同,如南疆、北疆、山区的气候条件、降水量、土壤性质等很多因素也有差异。农业生产中一般考虑 2 m 以下的风的影响,一般作物受到 5 级风速(4.5~9.8 米/秒)以上的影响。在农业作物蒸腾量(作物蒸发量加田间蒸发量即蒸散量) ET 的计算中,气象因素是核心驱动因子,直接影响水分从土壤表面蒸发和作物叶片蒸腾的总量,计算作物每天需水量的依据。需要重点考虑的因素有:降水量、气压、风速、太阳辐射、大气的温度及湿度、土壤不同深度湿度、温度及盐分等信息。这些因素和作物各生育期灌水量也不相同,随时间的变化而变化的变量,因此用归一化处理找到规律(如图 5 所示)。

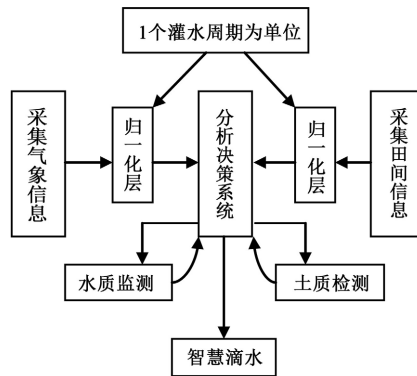


Figure 5. Schematic diagram of parameter acquisition system
图 5. 采集参数系统示意图

5) 棉花栽种模式的选择。由于栽种植物的类型、土壤性质及气候条件的不同,栽种模式也不同。目前栽种棉花的模式比较多,以当地土壤性质及棉花栽种模式 10 + 20 + 10 + 60 cm 为依据,1 号毛管淋洗相邻两个滴头湿润体交汇处盐分,滞后滴水的 2 号和 3 号毛管逐步淋洗中心 1 号毛管湿润体交汇处累积的盐分,扩大脱盐范围(如图 6 所示)。在此条件下,三条毛管的自动化系统由 1 号支管及电磁阀来控制所有中心 1 号毛管的流量,由 2 号支管及电磁阀来控制所有 2 号和 3 号毛管的流量(如图 7 所示)。

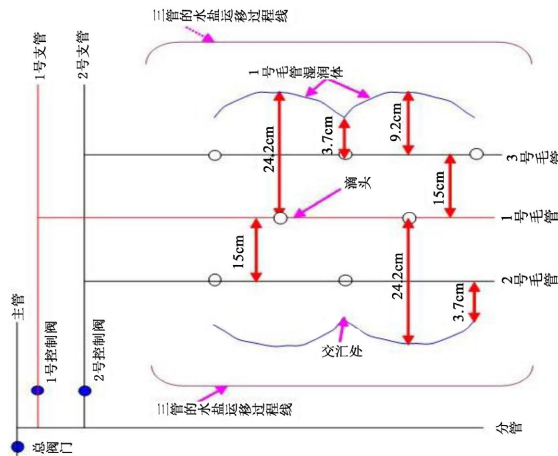
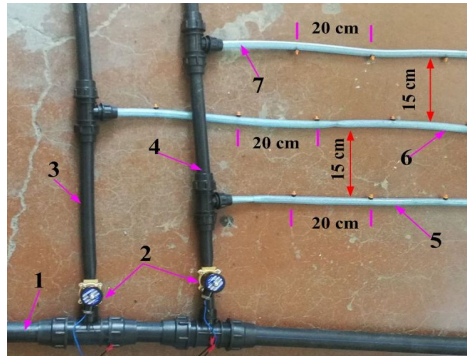


Figure 6. Installation drawing of three capillary tubes
图 6. 三条毛管安装图



1. 是分管; 2. 是电磁阀; 3. 是 1 号支管; 4. 是 2 号支管;
5. 是 2 号毛管; 6. 是中心 1 号毛管; 7. 是 3 号毛管。

Figure 7. Automated schematic diagram of three capillary tubes
图 7. 三条毛管的自动化示意图

6) 智慧滴水规则：是指中心 1 号毛管提前滴水 2 h 之后湿润体边缘积累的盐分，由滞后滴水的 2 号和 3 号毛管来往外追压，扩大洗脱盐分的范围大于根系发育范围为止。中心的 1 号毛管提前滴水 2 h (时间可调)之后 2 号和 3 号毛管就开始滴水，滞后滴水时间差为 2 h。如中心 1 号毛管从 8:00 开始滴水 12:00 停水，2 号和 3 号毛管 10:00 开始滴水 12:00 停水，这 3 条毛管的起始滴水时间不同，停水时间相同(如图 8 所示)。智慧滴水系统的模型分析模块通过采集的土壤信息(土壤的物理和化学性质)、灌水周期以及一次灌水连续时间，以土壤的下渗能力为依据，根据棉花根区土壤盐分随水纵向和横向运移及根系盐分的降低而提供滴水决策。

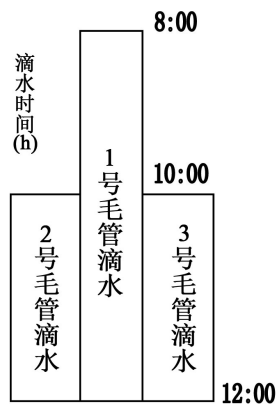


Figure 8. Dripping rules of three capillaries
图 8. 三条毛管的滴水规则

7) 三条毛管智慧滴水设备：(1) 首部设备。首部设备由水泵、变频器(调节灌区的用水量与供水量)、太阳能板(给系统供电)，网关(收集和传送田间信息)、过滤器、1 号阀门、2 号阀门、气象站组成(如图 9 所示)；(2) 自动控制部分。自动控制部分由机电箱和继电器组成；继电器和时间继电器安装在机电箱内，继电器的一边与电源相连，另一边与电磁阀相连；(3) 控制水量设备。继电器检测电源开关和电磁阀的正常状况，然后水通过主管流入→分管→水通过分管上的 4 通向支管上的电磁阀(根据轮灌组的面积可调节)方法流动；(4) 田间设备。1 号电磁阀安装在 1 号支管，1 号支管控制 1 号支管上的所有 1 号毛管的滴水量；2 号电磁阀安装在 2 号支管上，2 号支管控制 2 号支管上的所有 2 和 3 号毛管的滴水量(如图 9 所示)。

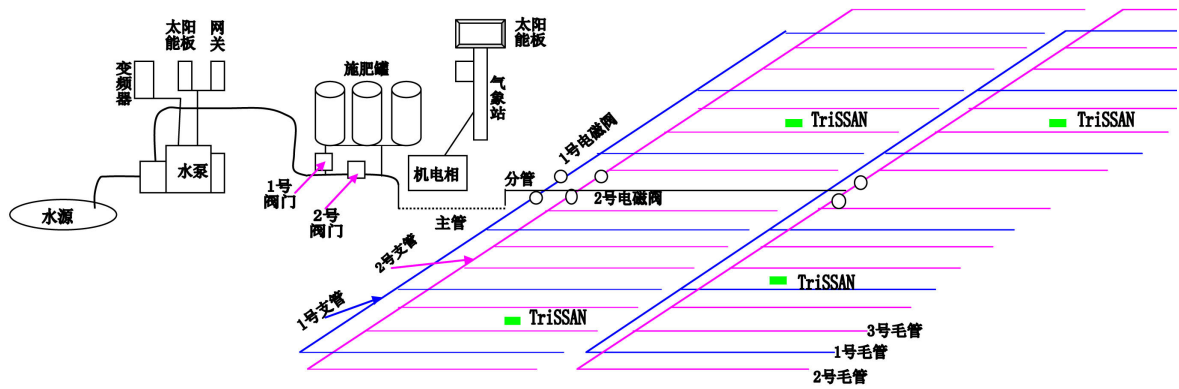


Figure 9. Salt flushing system in cotton root zone
图 9. 棉花根区盐分冲洗系统

2.3. 灌水参数的确定及限制条件

1) 确定灌水定额参数的方法。作物根系受到土壤水分及盐分等因素的影响, 这些因素超过作物承受的极限时作物减产, 甚至死亡。因此, 作物正常生长所需的水量可分为灌水定额(m_{\max})及冲洗盐分定额(M)。

(1) 灌水定额的确定。灌水定额是指在无雨条件下作物耗水量旺盛时, 满足作物蒸腾量的最大一次灌水的水量[19]。灌水定额是最大净灌水深度, 也是补充土壤缺水所需要的水深, 可按下式计算[20][21]:

$$m_{\max} = 0.1 \times \gamma \times H \times p \times (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (1)$$

边界条件为:

$$m_{\min} < m_{\text{净}} \leq m_{\max}$$

$$\theta_{\text{凋萎}} < \theta_{\min} \leq \theta_{\max}$$

式中: m_{\max} 灌水定额或最大灌水深度(mm); γ 为土壤容重(g/cm^3); H 为计划湿润层深度(m); p 为土壤湿润比(%); θ_{\max} 为土壤田间持水率(%), 即允许土壤含水率上限(占干土质量百分数); θ_{\min} 为计划湿润层内允许土壤含水率下限(%), (占干土质量百分数); 两者差值($\theta_{\max} - \theta_{\min}$)为土壤有效持水率(占干土质量百分数); $m_{\text{净}}$ 为净灌水深度(mm); $\theta_{\text{凋萎}}$ 为土壤的凋萎系数。计算灌水周期 T 和一次灌水延续时间 t 等参数[22][23]。

(2) 冲洗盐分定额的确定。由于灌区的地理位置的不同, 土壤性质及气候条件也不同, 因此以棉花正常生长土壤作为对照, 即标准土盐分(S_0), 冲洗盐分定额不仅与土壤的化学性质、物理性质及生物性质有关系, 而且与水源的盐分及冲洗盐分定额的多少也有关系, 在土壤下渗能力 \geq 滴水量的条件下, 必须满足: 冲洗定额(M) \geq 灌水定额(m_{\max})的要求[24][25]。

$$M = m_1 + m_2 + e - p \quad (2)$$

式中: M 为洗盐分定额(m^3/hm^2); m_1 为计划冲洗层内冲洗以前的含水率(W)与最大持水率(W_0)的差(m^3/hm^2); m_2 冲走计划冲洗层中的过多盐分所需要的水量(或冲洗定额中起输送作用的部分水量), 单位(m^3/hm^2); e 为冲洗时期内的蒸发损失量(m^3/hm^2), 试验在室内实验室进行, 所以该项可忽略不计; p 为冲洗时期可利用的降水量(m^3/hm^2), 该项也可忽略不计, 所以式(2)可简化写成式(3)的形式:

$$M = m_1 + m_2 \quad (3)$$

$$m_1 = W - W_0 \quad (4)$$

m_2 的计算公式很多, 以土壤盐分为基础计算时, 在 S_0 为冲洗前土壤中的盐分, 该试验用盐渍土的盐

分(g/kg); S 为冲洗后所允许的土盐分, 该试验用标准土盐分(g/kg), W 为计划冲洗层的最大持水量 27.5%, 则冲洗后的含盐浓度为 S/W , 使含盐量为 S_0 的土壤达到含盐浓度为 S/W 时[25][26], 所需要的水量 $S_0 \cdot (S/W)$, 若计划层原有含水量为 $W_0 = 6\%$, 则冲洗定额 M 应为:

$$M = W(S_0/S) - W_0 \quad (5)$$

将式(4)改写为 $W_0 = W - m_1$ 形式之后式(5)后, 得 m_2 的计算公式为:

$$m_2 = W((S_0/S) - 1) \quad (6)$$

2) 智慧滴水工作的优点。网关通过收集和传送田间信息用表格形式传送到电脑, 对随时间而变化的变量通过归一化方法寻找规律[27][28], 在电脑上的模型分析模块及程序, 根据信息提供最优的方案(图 9 所示)。

3. 结果与分析

3.1. 灌水对目标土湿润体盐分的影响

1) 理论冲洗盐分总定额。在滴头距离为 20 cm, 滴头流量为 3 L/h, 灌水定额 $m_{\max} = 225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 经公式(4)计算可得: $m_1 = (27.5 - 6) \times 15 = 322.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, $W = 27.5 \times 15 = 412.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 查表 1 和表 2 得: $S_0 = 28.258 \text{ g/kg}$, $S = 7.756 \text{ g/kg}$, 按公式(6)计算 $m_2 = 1,090.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 代入公式(2)可得理论冲洗盐分总定额: $M = 1,412.9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 当冲洗盐分定额 $M \geq$ 灌水定额 m_{\max} 满足要求, 因此, 根据灌水定额 $m_{\max} = 15 (\text{m}^3/\text{亩}) \times 15 = 225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 进行灌溉时, 灌水次数为 $M \div m_{\max} = 6$ 次, 这表明: 按灌水定额把目标土灌水 6 次时, 目标土棉花根区盐分接近于标准土的盐分。该方法的缺点在于把目标土用 $225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的定额灌溉 6 次, 总冲洗盐分灌水量为 $M = 1,412.9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。由于滴灌属于局部灌溉, 在局部灌溉条件下, 应该湿润体盐分的减少而冲洗盐分定额也减少时, 才符合实际情况。

2) 智慧滴水冲洗盐分定额的确定。在滴灌湿润体作为有限湿润面积的条件下, 在目标土的灌水次数 6 次不变, 智慧滴水量根据棉花根区盐分的降低而减少, 才能总灌水量也可减少, 根据试验确定的灌水定额为(如表 4 所示)。

Table 4. Irrigation quota of target soil irrigation for 6 times (m^3/hm^2)

表 4. 目标土灌水 6 次的灌水定额(m^3/hm^2)

灌水次数	1	2	3	4	5	6	总灌水量
灌水定额	225	203	180	158	135	113	1014

根据表 4 进行分析可知: 理论冲洗盐分总定额 $M = 1,412.9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 智慧滴灌水后由于棉花根区盐分的降低每次灌水定额也减少, 节约 $1,412.9 - 1,014 = 398.9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 水量。在水平离滴头 30 cm 处取土检测垂直向下不同深度的盐分, 计算盐分的降低量及滞后智慧滴水的三条毛管对根区盐分的影响。

3) 智慧滴水对湿润体盐分的影响。目标土智慧滴水 6 次后, 检测湿润体水平离滴头为 30 cm 处的垂直方向的盐分(如表 5 所示)。结果表明: 湿润体内的盐分随灌水次数的增多而减少, 湿润体内盐分逐渐向湿润体边缘累积的盐分。

4) 湿润体盐分离子的运移。灌水 6 次之后湿润体水平距 30 cm 处垂直方向盐分(8 大离子)的降低量也有差异, 降低盐分的平均值按大小排位: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{K}^+$, 总的趋势来看深度 50 cm 以上的盐分继续降低的趋势, 脱盐效果很明显(如表 5 所示)。

Table 5. Salt content at the horizontal distance of 30 cm after the target soil is intelligently dripped for 6 times (g/kg)
表 5. 目标土智慧滴水 6 次后水平距 30 cm 处的盐分(g/kg)

盐离子名称	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	总盐含量	平均值	
目标土智慧滴水 6 次后的盐分	0~10 cm	0	0.191	0.425	3.767	1.864	0.813	0.235	1.491	8.786	1.098
	10~20 cm	0	0.281	0.364	4.824	1.459	0.582	0.221	1.564	9.295	1.162
	20~30 cm	0	0.382	1.345	4.645	1.655	0.706	0.116	2.132	10.981	1.373
	30~40 cm	0	0.713	2.127	5.252	2.141	1.755	0.826	4.248	17.062	2.133
	40~50 cm	0	0.986	5.062	6.268	5.429	3.324	0.941	6.124	28.134	3.517
含盐量的平均值	0	0.511	1.865	4.951	2.510	1.436	0.468	3.112	14.851	1.856	

5) 目标土智慧滴灌水后湿润体盐分的降低量。目标土的初始盐分(来自表 2)减去智慧灌水 6 次之后的表 5 的相应数据, 可得水平距为 30 cm 处目标土智慧滴水 6 次后盐分的降低量(如表 6 所示)。

Table 6. Decrease of salt content at 30 cm level after 6 intelligent drops of target soil (g/kg)
表 6. 目标土智慧滴水 6 次后水平 30 cm 处盐分的降低量(g/kg)

盐离子名称	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	总盐含量	平均值	
目标土智慧滴水前后的盐分差值	0~10 cm	0	0.351	4.855	7.489	0.568	0.610	0.011	4.867	18.751	2.344
	10~20 cm	0	0.253	5.781	2.051	2.171	0.799	0.107	5.333	16.495	2.062
	20~30 cm	0	0.290	4.640	2.342	2.905	0.661	0.296	4.993	16.127	2.016
	30~40 cm	0	0.010	4.271	2.016	2.709	-0.027	-0.200	3.108	11.887	1.486
	40~50 cm	0	-0.238	2.224	2.088	-0.519	-1.398	-0.158	1.772	3.771	0.471
含盐量的平均值	0	0.133	4.354	3.197	1.566	0.129	0.011	4.014	13.406	1.676	

对表 6 中垂直方向为 0~50 cm 处的盐分进行分析可知: 棉花根区土壤湿润体内的盐分随灌水次数的增多而逐步减少, 盐分运移累积在湿润体边缘。在滞后滴水的三条毛管智慧滴水条件下, 灌水 6 次后垂直向下 0~40 cm 之间的盐分逐渐降低, 累积在 50 cm 以下。这进一步说明: 湿润体内的盐分随灌水次数的增多而向湿润体边缘运移, 逐步堆积在湿润体边缘。

3.2. 标准土与灌水前后目标土盐分的运移过程

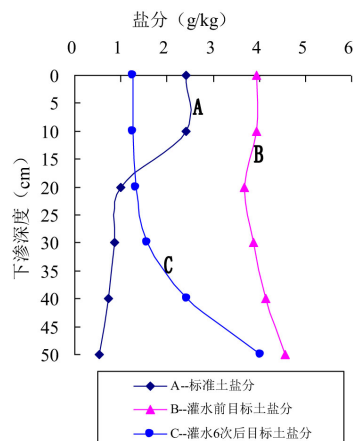


Figure 10. The transport process of salt in each layer before and after irrigation
图 10. 灌水前后各层盐分的运移过程

1) 灌水前后土层盐分的运移。采用标准土盐分、目标土盐分、目标土智慧滴水 6 次之后的盐分绘制湿润体盐分的各层的分布图(如图 10 所示)。结果表明: 标准土盐分曲线 A(来自表 1 的最后一列土层平均盐分), 目标土盐分 B 曲线(来自表 2 的最后一列土层平均盐分), 目标土智慧滴水 6 次之后的盐分 C 曲线(来自表 5 的最后一列土层平均盐分), B 和 C 曲线的差值是表明目标土智慧灌水 6 次后盐分的降低效果(如图 10 所示)。

2) 灌水前后目标土垂直方向盐分离子的运移。目标土灌水前盐分与智慧灌水 6 次后湿润体水平距为 30 cm 处垂直方向盐分的区别(如图 11 和图 12 所示)。灌水 6 次后积累在垂直方向深度 50 cm 以下, 盐分随水运移的效果很明显, 降低也很明显(如图 11 和图 12 所示)。

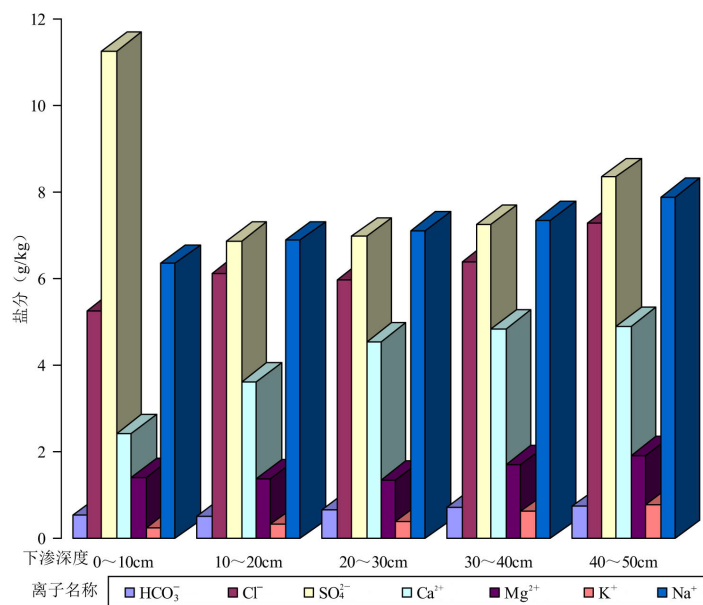


Figure 11. Initial salt ion of target soil
图 11. 目标土初始盐分离子

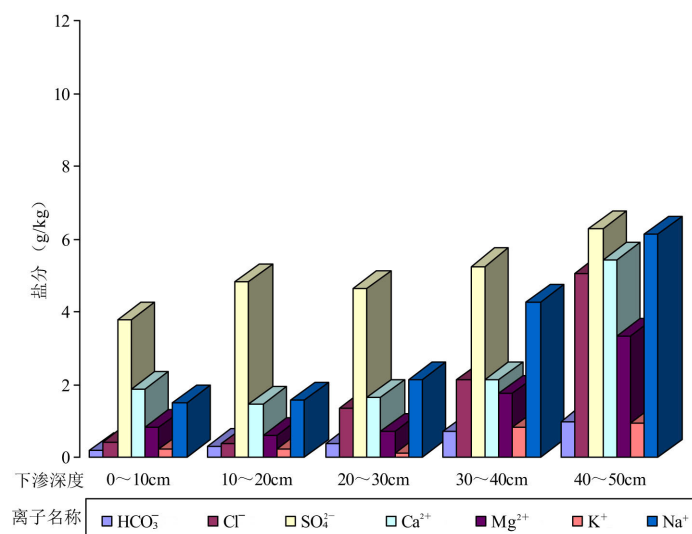


Figure 12. Salt ions in target soil after 6 rounds of irrigation
图 12. 目标土灌水 6 次之后的盐分离子

3.3. 节水效果

1) 节水效果。本试验采用滞后滴水三条毛管改为智慧滴水的方法, 局部压盐, 节约冲洗根区盐分用水量[29]。在滴灌条件下, 由于根区盐分累积在湿润体边缘的原因, 对密植作物每年大水压盐 3 次, 秋季一次的冲洗水定额为 $3,000\sim 4,500\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 冲洗盐分需要水量为 $9,000\sim 13,500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。本试验冲洗盐分定额为 $225\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 不需要大水压盐, 采用智慧滴水 6 次的条件下, 可节省 $7,986\sim 12,486\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 水量。

2) 滞后滴水三条毛管改为智慧滴水是精准冲洗盐分、节约水量, 并有效控制盐碱化面积的蔓延, 所节约的水量再重新分配可缓解用水紧张局面, 为灌区的数字化及信息化管理提供依据。一般滴灌工程的灌水定额为 $450\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 根据本试验棉田灌水定额为 $225(\text{m}^3/\text{hm}^2)$, 年灌水次数不变 6 次, 冲洗盐用水量 $1,014\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

4. 讨论

1) 作物根系的特征。由于种植植物根系的发育范围与植物类型有关[30], 本试验以棉花作为研究作物, 棉花垂直根系主要分布在 $0\sim 40\text{ cm}$ 的深度, 棉花的 85% 的根系主要水平分布在 $25\sim 30\text{ cm}$ 的范围之内。该试验结果表明: 在滞后滴水三条毛管改为智慧滴水的条件下, 使湿润体内的盐分各向运移, 积累在湿润体边缘, 该结论与土壤盐分随水运移的规律一致[31][32]。

2) 智慧滴水的优点。对滞后滴水的三条毛管与智慧滴水相比, 滞后滴水三条毛管按 $225\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水 6 次, 总冲洗灌水量为 $M = 1,412.9\text{ m}^3/\text{hm}^2$; 滞后滴水三条毛管改为智慧滴水之后, 灌水次数不变 6 次, 滴水量根据棉花根区盐分的降低而灌水量减少, 总冲洗灌水量为 $M = 1,014.9\text{ m}^3/\text{hm}^2$ [33]。

5. 结论

1) 在滞后滴水三条毛管改为智慧滴水的条件下, 冲洗盐分定额随根区湿润体盐分减少而智慧滴水, 降低根区盐分对作物的影响。

2) 采用智慧滴水条件下, 把目标土智慧滴水冲洗 6 次之后, 土壤盐分平均值 28.258 g/kg 降到 14.851 g/kg , 节约冲洗盐分用水量。

3) 该方法与漫灌相比节约大量的冲洗用水量, 与滴灌相比, 每年节约 3 次的压盐水量。滞后滴水的三条毛管与智慧滴水相比, 智慧滴水节约 $398\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 水量, 可缓解需水部门间水资源紧张的局面。

基金项目

地区基金项目“多环追压非等灌技术对盐碱地药用植物生理指标的影响机理及冲洗盐分定额研究”(3256130348); 地区基金项目“调度降水量应急补充灌溉对黑枸杞生理指标的影响机理及修复农牧过渡带的机制研究”(3256130459)。

参考文献

- [1] 齐晓旭, 王国永. GPS 技术在大块水稻田土壤养分检测中的应用[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 225-229.
- [2] 马满福, 何春玲, 张正锋, 等. 多养分群落选址算法下的种子投放[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(1): 240-245+263.
- [3] 董文明, 穆哈西, 吾买尔·吐尔逊, 等. 一种追压湿润锋边积累盐分的自动化三管装置[P]. 中国专利, CN202022490300.6. 2021-06-25.
- [4] 于波. 格库铁路生态防护林区咸水滴灌风沙土盐分运移特征研究[J]. 节水灌溉, 2023(12): 81-86.
- [5] 莫治新, 王超, 王浩, 等. 叶尔羌河流域胡杨叶片生理特性和对土壤水盐及 pH 值的响应[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 733-738.
- [6] 张作为, 李宏宇, 付强, 等. 化肥有机肥配施对河套灌区土壤盐分及玉米水肥利用的影响[J]. 应用基础与工程科

- 学学报, 2023, 31(5): 1170-1182.
- [7] 赵茜宇, 于会彬, 杨芳, 等. 半干旱区湖泊湿地土壤养分与盐碱化特征研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 188-196.
- [8] 穆哈西, 赛尔江·乌尔曼别克. 滴灌条件下积盐范围内混种耐盐草及盐分变化趋势的研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 108-110.
- [9] 赵志鹏, 方磊. 青铜峡灌区春灌前土壤盐分与盐渍化特征及空间分布[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(3): 105-112.
- [10] 李志强, 陈昱东, 吕光辉, 等. 荒漠草本植物功能性状的土壤水盐响应特征及生态策略[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(8): 2038-2045.
- [11] 穆哈西, 吾买尔·吐尔逊, 赛力汗. 改良盐碱地的多环追压非等灌装置及其自动化装置[P]. 中国专利, CN201510146732.6. 2015-08-05.
- [12] 乔若楠, 程煜, 闫思慧, 等. 不同离子微咸水对土壤水力特性和生菜生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(3): 288-295.
- [13] 穆哈西, 董文明. 控制果树根系盐分的装置及其使用方法[P]. 中国专利, CN201910824496.7. 2020-05-19.
- [14] 于超, 孙池涛, 张倩, 等. 黄河三角洲盐渍土蒸发对土壤盐分变化的响应特征[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(1): 89-95.
- [15] 马凯, 饶良懿. 我国土壤盐碱化问题研究脉络和热点分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 90-102.
- [16] 董文明, 孟丽君, 韩思敏, 等. 错位滴头的 3 条毛管高频灌溉对棉田盐分的影响及节水效果[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 140-148.
- [17] 张琼, 李光永, 柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J]. 水利学报, 2004(9): 123-126.
- [18] 董文明, 穆哈西, 艾依布拉·吐尔逊别克, 等. 抽排碱渠内咸水、盐水的移动式装置[P]. 中国专利, CN202021124010.3. 2021-04-13.
- [19] 郭元裕. 农田水利学[M]. 第 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [20] 陈伟业, 杨海昌, 张风华, 等. 北疆十户滩灌区棉田土壤盐分时空变异特征[J]. 棉花学报, 2022, 34(6): 546-556.
- [21] 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 石自堂. 农业水利工程专业实践教学指导书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [23] 夏华美, 曹志坚, 于铭玥, 等. 30 份草地早熟禾苗期耐盐性综合评价[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 3124-3137.
- [24] 穆哈西, 董文明, 阿卜杜苦都斯·努尔买买提, 等. 排碱渠盐水、咸水进行磁化、电解及过滤装置、进行磁化、电解及过滤装置[P]. 中国专利, CN202021125387.0. 2021-02-19.
- [25] 魏新平, 舒仲英, 贾恢先. 用对流弥散方程确定脱盐系数[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(4): 463-466.
- [26] 孙燕, 吴建鑫, 曲植, 等. 生化黄腐酸对不同质地苏打盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 75-84.
- [27] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [28] 王晨晨, 孙向阳, 李素艳, 等. 不同利用方式土地的土壤盐碱化特征差异[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1167-1175.
- [29] 李永山, 冯利平, 郭美丽, 等. 棉花根系的生长特性及其与栽培措施和产量关系的研究 II 栽培措施对棉花根系生长的影响及其与地上部和产量的关系[J]. 棉花学报, 1992(2): 59-66.
- [30] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004(2): 1-5.
- [31] 韩金旭, 谷晓伟, 程春晓, 等. 不同土质灌区土壤盐分与物理特性空间变异规律及协同关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 148-152+158.
- [32] 依文莲, 邵光成, 吴世清, 等. 咸水灌溉下施加生物炭对土壤盐分分布及团粒结构的影响[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 154-161+168.
- [33] 艾木都力·吾守尔, 邓丽娟, 董文明, 等. 错位滴头的 3 管滴水对枸杞根系盐分的影响及节水效果[J]. 节水灌溉, 2022(12): 42-47+57.