

冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田休闲期 适宜冬灌定额研究

李勇¹, 李林¹, 王峰^{2*}, 刘亮¹, 骆希娟¹, 王兴鹏¹

(1.塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆阿拉尔 843300; 2.中国农业科学院农田灌溉研究所/
农业农村部作物需水与调控重点开放实验室, 河南新乡 453002)

摘要:【目的】探究冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田休闲期土壤水盐运移规律, 确定冬灌结合春灌条件下的适宜冬灌定额。【方法】基于田间试验, 监测不同时期0~100 cm土层水、盐指标, 探讨不同冬灌(0、600、1 200、1 800、2 400、3 000、3 600 m³/hm²)结合少量春灌(300 m³/hm²)对南疆棉田休闲期土壤水盐运移及盐分淋洗效率的影响。【结果】①冬灌具有一定的储水效应, 冬灌初期各处理土壤含水率均大幅度增加, 0~30 cm土层含水率的整体增幅最大; 春灌前, 各处理土壤含水率均大幅度下降, 其中冬灌600 m³/hm²及未冬灌处理0~100 cm土层含水率低于冬灌前; 补充春灌后, 对于冬灌定额达1 800 m³/hm²及以上的处理, 0~30 cm土层平均质量含水率均在15.66%以上。②水是盐分运移的载体, 冬灌初期土壤盐分有效淋洗深度随冬灌定额的升高而逐渐增大, 当冬灌水量达到2 400 m³/hm²时, 盐分有效淋洗深度可达100 cm; 春灌前, 经过长期的休闲期土壤蒸发, 各处理均出现不同程度的返盐现象, 其中未冬灌处理土壤表层返盐最为剧烈; 补充春灌300 m³/hm²后, 各处理土壤剖面盐分得到再次淋洗, 0~30 cm土层含盐量整体降幅较大。③经历整个休闲期后, 0~30 cm和0~100 cm土层平均脱盐率均以冬灌2 400 m³/hm²结合春灌300 m³/hm²处理为最高。④春灌后, 冬灌2 400 m³/hm²结合春灌300 m³/hm²处理0~30 cm土层平均电导率为1.40 mS/cm, 0~10 cm土层电导率为1.30 mS/cm, 对应全盐量分别为3.65、3.32 g/kg, 低于棉花出苗盐分适宜值(3.7 g/kg)。【结论】综合考虑节水、脱盐效应以及春灌后0~30 cm土层土壤含水率和含盐量, 灌水定额2 400 m³/hm²是本地区冬灌结合少量春灌(300 m³/hm²)条件下的最优冬灌定额。

关键词: 冬灌; 春灌; 水盐运移; 盐分淋洗; 冬灌定额

中图分类号: S152.72

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022198

OSID:



李勇, 李林, 王峰, 等. 冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田休闲期适宜冬灌定额研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 10-17.
LI Yong, LI Lin, WANG Feng, et al. Suitable Irrigation Scheduling in Winter-spring Fallow Period for Leaching Salt Out of Root Zone of Cotton in Southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 10-17.

0 引言

【研究意义】南疆是我国重要的棉花生产基地, 但水资源短缺与土壤盐渍化问题严重制约着南疆棉花可持续生产。为了给棉花生长创造良好的土壤水盐环境, 生产中常用的做法是在棉田冬、春季节进行大水漫灌以储水压盐, 尤以冬灌为主^[1-3]。但在实际生产中, 冬春灌用水量普遍很大。据统计, 南疆棉田冬春灌定额一般为3 000~4 500 m³/hm², 占棉田全年灌溉定额的50%左右。大定额冬春灌在淋洗盐分的同时, 浪费了大量水资源, 加剧了南疆用水矛

盾, 且易引起地下水位上升, 造成土壤次生盐渍化等问题。因此, 有必要针对南疆棉田开展休闲期盐分淋洗灌溉制度优化研究, 探寻高效的冬春灌盐分淋洗模式, 降低南疆棉田冬春灌盐分淋洗定额, 进而实现南疆盐渍化农田高效利用, 促进南疆棉花产业健康发展。

【研究进展】冬春灌水量是影响土壤盐分淋洗效果的主要因素^[4-6]。许多学者针对南疆棉田冬春灌条件下土壤水盐运移规律以及适宜冬春灌定额开展了大量的研究。张瀚等^[7]研究表明, 冬灌定额3 600 m³/hm²具有显著的保墒压盐的作用, 可为新疆巴州地区返春后的棉田播种及出苗提供较好的水盐环境。Yang等^[8]研究则表明, 冬灌定额越高, 盐分淋洗效果越好, 但冬灌水利用效率随之降低, 巴州地区冬季盐分淋洗适宜灌水定额为1 800~3 000 m³/hm²。孙三民等^[9]通过综合考虑不同冬灌定额对土壤水分、盐分、棉花生长以及产量的影响, 确定了南疆阿拉

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 棉花产业技术体系建设专项资金项目(CARS-15-13); 塔里木大学校长基金青年项目(TDZKQN201814); 塔里木大学校长基金人才项目(TDZKSS201906); 塔里木大学水利工程校级重点学科建设项目(030000304)

作者简介: 李勇(1989-), 男, 讲师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: huayongly@163.com

通信作者: 王峰(1978-), 男, 副研究员, 主要从农业灌溉理论与技术研究。E-mail: wfguy@126.com

尔灌区适宜冬灌定额为 $3\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。孙珍珍等^[10]研究了仅春灌条件下灌水量对南疆巴州滴灌棉田土壤盐分变化的影响,结果表明,春灌水量 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 处理对土壤盐分淋洗效果较好,灌水量过低达不到洗盐压盐效果,灌水量过高则容易造成地下水位快速上升,加快土壤返盐。李宁等^[11]基于不同春灌定额条件下棉花生长和产量表现确定了南疆灌区免冬灌条件下适宜春灌定额为 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。胡宏昌等^[1]通过田间试验和 SHAW 模型模拟比较了灌水定额 $3\ 750\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 条件下冬灌和春灌的盐分淋洗效果,结果表明冬灌的盐分淋洗效果优于春灌,冬灌条件下盐分淋洗深度可达 $60\ \text{cm}$,而春灌条件下盐分淋洗主要发生在 $20\ \text{cm}$ 以上的表层土壤。土壤盐渍化程度是影响冬春灌定额的主要因素。Li 等^[5]研究表明,冬灌对重度盐渍化棉田的土壤水分和盐分淋洗影响较大。李文娟等^[12]针对不同盐度棉田开展了适宜春灌定额研究,结果表明在排水条件相同时,对不同盐度棉田而言,并非春灌水量越高土壤脱盐效果越好,对于低盐度棉田选取较小春灌定额即可满足盐分淋洗及棉花出苗的要求;中盐度棉田应选取中等春灌灌水定额;高盐度棉田适宜选取较大春灌灌水定额。可以看出,以往研究主要关注冬灌或春灌单独进行条件下的土壤水盐运移规律以及相应的适宜灌水定额,针对冬春灌结合条件下适宜冬春灌灌溉制度的研究较少。

【切入点】目前,南疆地区棉田盐分淋洗仍以冬灌为主,但冬灌棉田在经过灌水初期短暂的盐分淋洗后长期处于返盐状态,到春播时节,土壤表层水分流失严重,返盐剧烈,此时适量补充春灌应该可以大幅度提高表层土壤水分,同时降低表层土壤盐分。但冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田水盐运移规律还不清楚,冬灌结合春灌条件下冬灌定额是否还有下降空间也有待进一步的研究。【拟解决的关键问题】本研究拟针对南疆棉田开展不同冬灌定额结合少量春灌田间试验,探究冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田休闲期土壤水盐运移规律,确定冬灌结合少量春灌条件下的适宜冬灌定额,以期为优化南疆棉田休闲期盐分淋洗灌溉制度提供理论支撑与技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2020 年 11 月—2021 年 4 月在新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市水利局灌溉试验站 ($81^{\circ}12'\text{E}$, $40^{\circ}37'\text{N}$, 海拔 $1\ 017\ \text{m}$) 进行。该站位于塔里木河三大源流交汇点附近的平原荒漠绿洲区

内,距阿拉尔市区 $10\ \text{km}$ 。试验区属典型暖温带荒漠半荒漠干旱气候,常年干旱少雨,年平均气温 $11.5\ ^{\circ}\text{C}$,日照时间 $2\ 950\ \text{h}$,无霜期 $220\ \text{d}$,年平均降水量 $45.7\ \text{mm}$,蒸发量 $1\ 876.6\sim 2\ 558.9\ \text{mm}$ 。研究区年际间气象条件稳定,大气蒸发力在年际间差异较小,试验期间逐月参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 与 2015—2019 年逐月参考作物蒸发蒸腾量平均值见表 1。

表1 2015—2021年棉田休闲期逐月参考作物蒸发蒸腾量

时间尺度/月	1	2	3	4	11	12
2015—2019 年逐月 ET_0 平均值/mm	16.44	28.73	64.04	104.72	26.71	15.66
2020 年逐月 ET_0 /mm	/	/	/	/	23.34	13.55
2021 年逐月 ET_0 /mm	17.06	30.49	57.98	105.12	/	/

1.2 试验设计

试验采用冬灌结合少量春灌的冬春灌模式,设计 7 个冬灌定额 (0 、 600 、 $1\ 200$ 、 $1\ 800$ 、 $2\ 400$ 、 $3\ 000$ 、 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$), 1 个补充春灌定额 ($300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$), 共 7 个处理,分别记为 W_0S_{300} 、 $W_{600}S_{300}$ 、 $W_{1200}S_{300}$ 、 $W_{1800}S_{300}$ 、 $W_{2400}S_{300}$ 、 $W_{3000}S_{300}$ 、 $W_{3600}S_{300}$ 。试验在测坑内进行,每个处理重复 3 次,共 21 个测坑。测坑长 $3.0\ \text{m}$,宽 $2.22\ \text{m}$,深 $2.5\ \text{m}$,为有底测坑,测坑底部不能排水。测坑土壤质地为砂壤土, $0\sim 100\ \text{cm}$ 土层平均土壤体积质量和田间持水率分别为 $1.49\ \text{g}/\text{cm}^3$ 和 23.9% (土壤质量含水率),土壤孔隙率为 43.77% 。测坑内常年种植棉花。冬灌时间为 2020 年 11 月 27 日,春灌时间为 2021 年 4 月 4 日。

1.3 测定项目与方法

1) 土壤含水率

土壤含水率采用取土烘干法进行测定,分别于冬灌前 (11 月 22 日)、冬灌后 (12 月 3 日)、春灌前 (3 月 28 日)、春灌后 (4 月 20 日) 取土样,取样深度分别为 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$ 、 $40\sim 60$ 、 $60\sim 80$ 、 $80\sim 100\ \text{cm}$,共 7 个土层。

2) 土壤盐分

结合每次土壤含水率观测进行土壤盐分测定。将烘干土样粉碎过 $1\ \text{mm}$ 筛,称取土样 $20\ \text{g}$ 置于三角瓶中,加入 $100\ \text{mL}$ 蒸馏水,将三角瓶放在振荡机上振荡 $10\ \text{min}$,静置 $15\ \text{min}$ 后过滤,制成土水比为 $1:5$ 的清液。用 DDB-303A 型 (上海精科) 便携式电导率仪测定清液电导率 EC 。采用残渣烘干法测定土壤全盐量,并拟合土壤全盐量与电导率的关系。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 和 DPS v13.5 软件进行统计和分析,采用 Duncan 新复极差法进行方差分析和差异显著性检验 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤全盐量与电导率的关系

土壤全盐量与土壤溶液电导率之间存在显著的相关性(图1)。为了便于基于电导率计算土壤全盐量,利用试验地实测土壤盐分数据对土壤全盐量与相应土水比为1:5的土壤浸提液电导率关系进行了拟合,得到试验地土壤全盐量与1:5土水比土壤浸提液电导率之间的线性关系: $y=3.35x-1.0352$,其中 y 表示土壤全盐量(g/kg), x 代表土壤电导率值(mS/cm)。方程决定系数 R^2 为0.9883,可见方程的拟合程度较高,可靠性强。

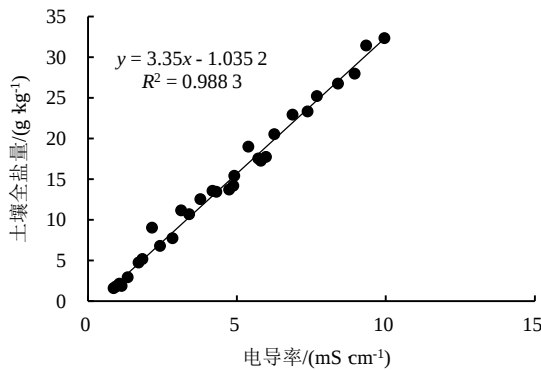


图1 土壤全盐量与电导率的关系

Fig.1 Relationship between soil total salt content and electrical conductivity

2.2 不同处理对南疆棉田休闲期土壤水分动态的影响

不同冬灌定额结合少量春灌条件下土壤剖面含

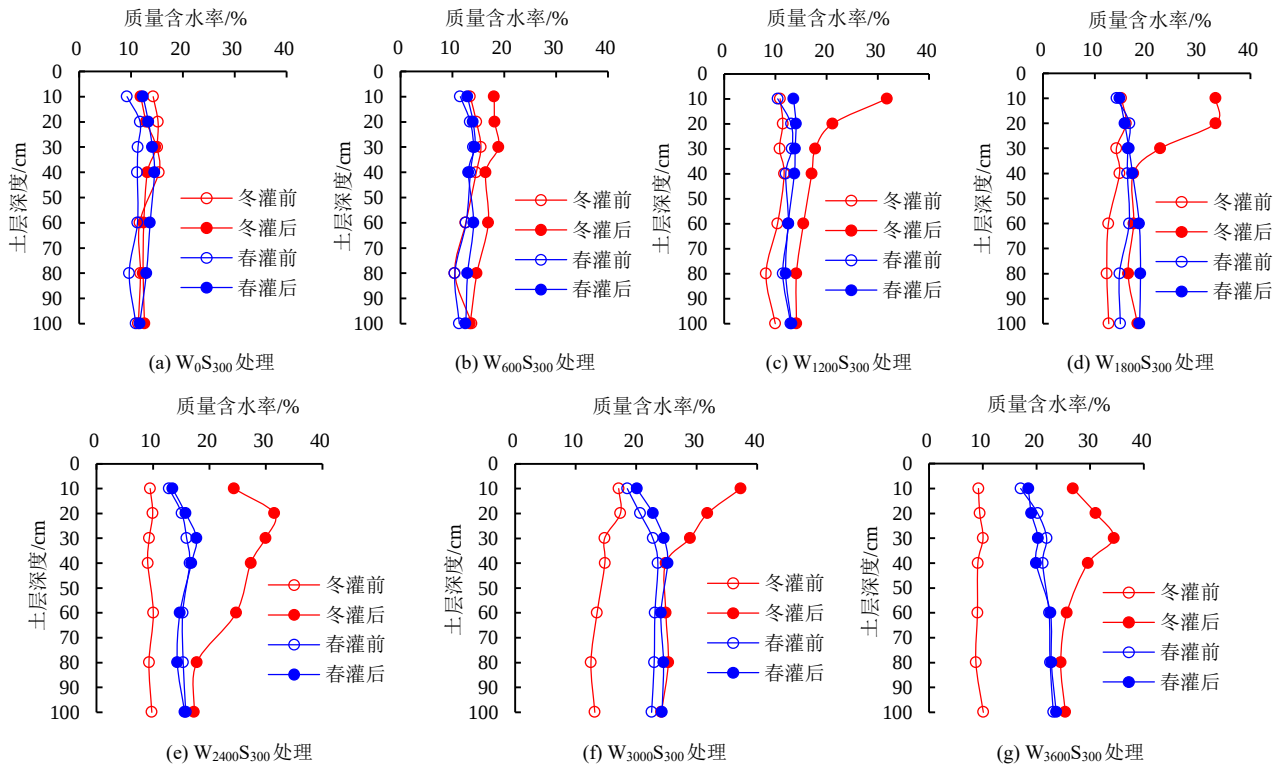


图2 不同处理冬春灌前后土壤剖面含水率变化特征

Fig.2 Variation characteristics of soil profile water content before and after winter and spring irrigation under different treatments

水率动态变化如图2所示。冬灌前,各土层土壤含水率较低。冬灌后,各处理0~100 cm土层土壤含水率均出现不同程度的增加,其中0~30 cm土层含水率及含水率增幅整体较大,表层土壤含水率及含水率增幅均高于深层土壤。从各处理土壤含水率分布来看,未冬灌处理各土层含水率在整个休闲期波动较小,冬灌定额600 m³/hm²处理各土层含水率均在20%以下,冬灌定额1200 m³/hm²处理仅0~20 cm土层含水率达20%以上,冬灌定额1800 m³/hm²和2400 m³/hm²处理含水率达20%以上的土层深度分别增大到30 cm和60 cm,而冬灌定额3000 m³/hm²和3600 m³/hm²处理的100 cm土层深度土壤含水率均在20%以上,并达到或超过田间持水率。低冬灌定额处理水分主要分布在土壤表层,深层土壤含水率增幅有限,只能在表层形成可以快速淋洗盐分的重力水。但冬灌定额并非越高越好,高冬灌定额处理深层土壤含水率过高,易产生过量深层渗漏。

春灌前,经过一个冬季的蒸发和渗漏损失,各处理各土层土壤含水率均大幅度下降,其中0~20 cm土层含水率整体最低。冬灌600 m³/hm²及未冬灌处理0~100 cm土层含水率均低于冬灌前,其余处理春灌前各土层含水率介于冬灌前和冬灌后之间。说明当冬灌水量过低时,水分蒸发及渗漏损失量大于冬灌补给量。

补充春灌 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 后, 各处理土壤含水率均有所提高。0~30 cm 土层含水率对棉花出苗及成苗影响最显著, 且易受蒸发、灌溉的影响, 波动很大。补充春灌后, 对于冬灌定额达 $1800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 及以上处理, 0~30 cm 土层平均质量含水率均在 15.66% 以上, 占田间持水率的 65.52%, 可以满足棉花出苗对土壤水分的需求。

2.3 不同处理对南疆棉田休闲期土壤盐分动态的影响

不同冬灌定额结合少量春灌处理土壤剖面盐分动态变化如图 3 所示。在免冬灌或冬灌水量为 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的条件下, 棉田整个休闲期土壤剖面盐

分量波动较小。随着冬灌水量增加, 土壤剖面盐分量波动加大, 且冬灌水量越高, 盐分淋洗越深。当冬灌定额达 $1200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时, 盐分有效淋洗深度可达 60 cm。当冬灌水量达 $2400 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 及以上时, 盐分有效淋洗深度可达到 100 cm。在上层土壤盐分得到淋洗的同时, 下层土壤出现积盐现象。冬灌 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 处理积盐层出现在 60~100 cm 土层, 冬灌 $1200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 处理积盐层出现在 80~100 cm 土层, 当冬灌水量达 $1800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 及以上时, 0~100 cm 土层未出现明显的积盐层, 说明盐分被淋洗到 100 cm 土层以下。

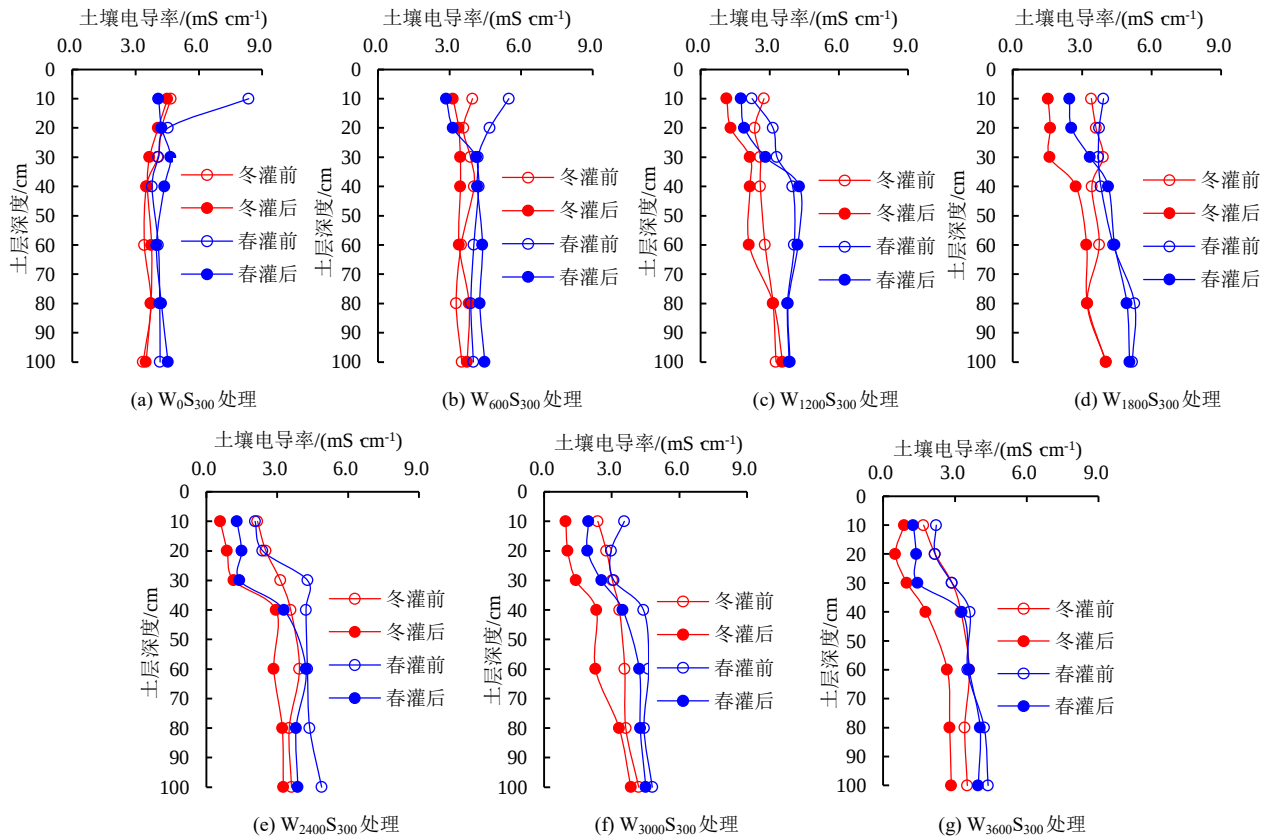


图3 不同处理冬春灌前后土壤剖面含盐量变化特征

Fig.3 Variation characteristics of soil salt content before and after winter and spring irrigation under different treatments

经过冬春季的淋洗、冻融以及蒸发的耦合作用, 春灌前各处理均出现不同程度返盐现象, 各土层含盐量基本上均超过了冬灌前水平, 其中未冬灌处理土壤表层返盐最剧烈, 0~10 cm 土层土壤电导率达到 8.36 mS/cm。南疆棉田冬季返盐剧烈, 冬灌具有一定的抑制冬季棉田表层土壤返盐的作用, 但仅进行冬灌时, 土壤返盐仍较为严重。

补充春灌 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 后, 各处理土壤剖面盐分得到再次淋洗, 盐分淋洗深度随冬灌水量增加而增大, 淋洗深度在 10~60 cm 之间。0~30 cm 土层含盐量整体降幅较大, 其中, $W_{3600}S_{300}$ 处理 0~30 cm 土壤电导率最低, 为 1.37 mS/cm, $W_{2400}S_{300}$ 处理次之, 为 1.40 mS/cm, 对应全盐量分别为 3.55 g/kg 和 3.65

g/kg。 $W_{3600}S_{300}$ 处理和 $W_{2400}S_{300}$ 处理下的 0~10 cm 土层土壤电导率更低, 分别为 1.26 mS/cm 和 1.30 mS/cm, 对应全盐量分别为 3.19 g/kg 和 3.32 g/kg, 均低于棉花出苗盐分量的适宜值 (3.7 g/kg) [13], 可以满足棉花出苗对土壤盐分的要求。

2.4 不同处理对南疆棉田脱盐效率的影响

冬春灌后不同时期土壤剖面脱盐率变化特征见表 2。冬春灌的主要作用是为棉花出苗、成苗创造良好的低盐环境, 因此 0~30 cm 土壤脱盐率对于确定适宜冬灌定额至关重要。冬灌后各冬灌处理脱盐率均为正值, 且 0~30 cm 土层脱盐率明显高于 0~100 cm 土层, 说明表层土壤脱盐率整体较高。随着灌水定额升高, 0~30、0~100 cm 土层脱盐率基本

呈逐渐上升的趋势, 其中 0~30 cm 脱盐率以 $W_{2400}S_{300}$ 处理最高, 0~100 cm 土层脱盐率以 $W_{3600}S_{300}$ 处理最高, 但与 $W_{2400}S_{300}$ 处理的差异不显

著。冬灌定额越高, 冬灌脱盐率整体越高, 但当冬灌定额达到一定水平, 继续增加冬灌定额对于提高冬灌初期脱盐率效果不大。

表2 冬春灌后不同时期土壤剖面脱盐率变化特征

Table 2 Variation characteristics of soil profile desalting rate in different periods after winter and spring irrigation

处理	冬灌后		越冬期前后		春灌前后		休闲期前后	
	0~30 cm	0~100 cm	0~30 cm	0~100 cm	0~30 cm	0~100 cm	0~30 cm	0~100 cm
W_0S_{300}	5.61 $\pm$ 5.00e	-1.25 $\pm$ 4.39e	-47.89 $\pm$ 32.38d	-28.09 $\pm$ 10.43e	14.21 $\pm$ 7.48c	1.91 $\pm$ 4.90c	-3.69 $\pm$ 12.32d	-17.37 $\pm$ 2.89c
$W_{600}S_{300}$	13.14 $\pm$ 6.87e	3.46 $\pm$ 8.90de	-51.47 $\pm$ 14.24d	-29.96 $\pm$ 7.33e	28.57 $\pm$ 1.64c	7.78 $\pm$ 2.01bc	11.94 $\pm$ 7.03cd	-9.48 $\pm$ 15.50bc
$W_{1200}S_{300}$	43.54 $\pm$ 13.94d	16.75 $\pm$ 4.19cd	-142.52 $\pm$ 24.07c	-89.96 $\pm$ 30.32d	25.86 $\pm$ 12.10c	18.01 $\pm$ 5.11ab	16.12 $\pm$ 6.34cd	-12.23 $\pm$ 19.40c
$W_{1800}S_{300}$	61.23 $\pm$ 2.50bc	30.07 $\pm$ 6.10bc	-188.00 $\pm$ 35.79bc	-107.87 $\pm$ 15.31cd	26.28 $\pm$ 14.56c	11.15 $\pm$ 9.90bc	25.33 $\pm$ 12.60bc	-9.36 $\pm$ 11.23bc
$W_{2400}S_{300}$	75.49 $\pm$ 3.63a	41.85 $\pm$ 4.75ab	-388.59 $\pm$ 27.04a	-195.93 $\pm$ 12.55b	52.41 $\pm$ 4.29a	31.15 $\pm$ 1.73a	50.19 $\pm$ 5.65a	18.90 $\pm$ 1.22a
$W_{3000}S_{300}$	53.63 $\pm$ 3.94cd	33.61 $\pm$ 5.95b	-246.11 $\pm$ 33.62b	-142.58 $\pm$ 18.44c	32.55 $\pm$ 1.98bc	19.78 $\pm$ 2.55ab	22.99 $\pm$ 5.75bc	1.75 $\pm$ 2.94abc
$W_{3600}S_{300}$	72.80 $\pm$ 3.96ab	47.8 $\pm$ 5.52a	-456.53 $\pm$ 44.07a	-239.00 $\pm$ 6.74a	49.94 $\pm$ 14.39ab	24.77 $\pm$ 8.70a	43.48 $\pm$ 13.56ab	13.78 $\pm$ 9.97ab

注 脱盐率=(灌前土壤含盐量-灌后土壤含盐量)/灌前土壤含盐量 $\times$ 100%, 同列不同小写字母表示处理间在 5%水平差异显著。

越冬前后土壤脱盐率为冬灌初期至春灌前这段时期土壤脱盐量与冬灌初期土壤含盐量的比值, 是反映冬灌长期脱盐效果的重要指标之一。由表 2 可知, 各处理脱盐率均为负值, 说明这段时期土壤以返盐为主。与冬灌初期表层土壤脱盐率较高相反, 越冬后 0~30 cm 土层土壤返盐率整体较高, 0~100 cm 土层土壤返盐率总体相对较低。随着灌水量增加, 各处理返盐率基本呈增大趋势, 0~30、0~100 cm 土层返盐率均以 $W_{3600}S_{300}$ 处理最高。

春灌前后的脱盐率分析主要为表征补充春灌 300 m^3/hm^2 对土壤盐分淋洗效果的影响。春灌后各处理 0~30、0~100 cm 土层脱盐率均为正值, 且各处理 0~30、0~100 cm 土层脱盐率平均值分别达 32.83%和 16.36%, 说明适当补充春灌可显著提高冬灌棉田盐分淋洗效率。

休闲期前后脱盐率是表征冬春灌盐分淋洗效果的重要指标, 提高休闲期前后脱盐率是冬春灌的根本目标。休闲期前后 0~30 cm 土层除未冬灌处理外脱盐率均为正值, 0~100 cm 土层平均脱盐率以 $W_{2400}S_{300}$ 处理为分界线, 当冬灌定额低于 2 400 m^3/hm^2 时, 各处理 0~100 cm 土层平均脱盐率均为负, 当冬灌定额达到 2 400 m^3/hm^2 时, 各处理 0~100 cm 土层平均脱盐率均为正。在冬灌结合少量春灌条件下, 冬灌定额 2 400 m^3/hm^2 是实现 0~100 cm 土层整体脱盐的最低冬灌水量。历经整个休闲期的盐分淋洗、返盐作用, 0~30 cm 和 0~100 cm 土层平均脱盐率均以 $W_{2400}S_{300}$ 处理最高, 分别达到 50.19%和 18.90%。

3 讨论

3.1 冬灌结合少量春灌对土壤水分运移的影响

水盐运移具有强烈的耦合效应, 明确冬春灌条件

下水分运移规律对于理解盐分运移过程至关重要^[13]。本研究中, 冬灌后各处理土壤含水率均出现不同程度的增加, 其中表层土壤含水率高于深层, 0~30 cm 土层含水率整体较高。当冬灌定额达 1 800 m^3/hm^2 及以上时, 各处理 0~30 cm 土层含水率均在田间持水率以上。表层的高土壤含水率有利于表层土壤盐分的淋洗, 这与张瀚^[7]、陈小芹^[14]、Yang 等^[8]的研究结果一致。随着冬灌定额升高, 深层土壤含水率也达到较高水平, 冬灌定额 3 000 m^3/hm^2 和 3 600 m^3/hm^2 处理下的 0~100 cm 土层深度土壤含水率均在 20%以上, 达到或超过田间持水率。但冬灌定额并非越高越好, 大定额冬灌不仅会造成过量深层渗漏、水资源浪费, 还会导致土壤中养分流失、土壤结构破坏、地下水位抬升, 土壤次生盐渍化以及地下水污染等一系列问题^[7,15-17]。经过休闲期长时间的蒸发、渗漏损失, 返春后冬灌棉田土壤含水率大幅度下降, 且以 0~20 cm 土层含水率整体最低^[8,18]。这与本试验结果一致。本研究还发现, 当冬灌定额较低时 (600 m^3/hm^2), 返春后 0~100 cm 土层含水率均低于冬灌前, 说明休闲期仍存在一定的土壤蒸发作用, 低冬灌水量对棉田冬季储水无益, 一定的冬灌定额是实现冬灌储水的前提。

3.2 冬灌结合少量春灌对土壤盐分运移的影响

盐随水来, 盐随水走, 水分是盐分迁移的主要载体。胡宏昌等^[1]研究表明, 当冬灌定额为 3 750 m^3/hm^2 时, 冬灌初期棉田盐分淋洗主要发生在 0~60 cm 土层, 随着土层深度增加, 盐分淋洗效果减弱, 80 cm 以下深度土层出现轻微盐分聚集。本研究得到类似结论, 但当冬灌定额为 1 200 m^3/hm^2 和 1 800 m^3/hm^2 时, 盐分有效淋洗深度即可达 60 cm; 而且随着冬灌定额升高, 盐分有效淋洗深度逐渐加大,

当冬灌水量达到 $2\ 400\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 及以上时, 盐分有效淋洗深度可达 $100\ \text{cm}$ 。这可能与冬灌时间不同有关, 本研究中冬灌时间在 11 月底, 冬灌后土壤表层很快封冻, 土壤盐分在冬灌水的作用下主要以向下运移为主, 蒸发返盐量较低。Yang 等^[8]研究也指出, 表层土壤开始封冻时冬灌有助于提高冬灌盐分淋洗效率。春季是土壤返盐的高峰期^[19-20]。随着春季气温回升, 不同冬灌定额处理棉田土壤表层呈现不同程度的返盐现象, 小定额处理棉田春季土壤返盐尤为严重^[7-8,18]。这是因为低冬灌定额处理土壤盐分有效淋洗深度有限, 在土壤蒸发作用下, 被淋洗的盐分重新在地表聚集, 从而导致低冬灌定额处理在历经整个休闲期后土壤脱盐效果有限。而高冬灌定额处理盐分则被淋洗到深层土壤, 虽然蒸发返盐作用也存在, 但返盐量低于低冬灌定额处理。适当补充春灌可有效提高冬灌棉田盐分淋洗效率。在本研究中, 补充春灌 $300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 后, 各冬灌处理 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层休闲期前后脱盐率均为正值; 当冬灌定额达 $2\ 400\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 及以上时, 各处理 $0\sim 100\ \text{cm}$ 土层休闲期前后脱盐率也为正值。

3.3 冬灌结合少量春灌条件下适宜盐分淋洗定额

适宜的冬春灌定额是保证盐分淋洗效果的主要因素, 也是近年来冬春灌研究的重点和热点。在本研究中, $W_{2400}S_{300}$ 处理脱盐效应和储水效应显著, 冬灌初期和休闲期前后 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层脱盐率均以 $W_{2400}S_{300}$ 处理最高, 分别为 75.49% 和 50.19% , 春灌后 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层土壤全盐量为 $3.65\ \text{g/kg}$, $0\sim 10\ \text{cm}$ 土层全盐量为 $3.32\ \text{g/kg}$, 均低于棉花出苗盐分量适宜值 ($3.7\ \text{g/kg}$)^[13]; 土壤含水率达到 15.66% , 占田间持水率的 65.52% , 可以满足棉花出苗对土壤水分的要求。可以认为 $W_{2400}S_{300}$ 处理是本研究条件下最优冬春灌, 补充春灌 $300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 条件下, 灌水定额 $2\ 400\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 是本地区最优冬灌定额。本研究冬灌定额处于 Yang 等^[8]推荐的南疆塔里木地区适宜冬灌定额 $1\ 800\sim 3\ 000\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 之间, 低于孙三民等^[9]研究确定的阿拉尔灌区合理冬灌定额 $3\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和张瀚等^[7]针对开孔河流域研究确定的适宜冬灌定额 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 以及胡宏昌等^[1]针对库尔勒地区棉田研究确定的保障作物的生长需求并有效控制土壤盐分水平的冬灌定额 $3\ 750\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。这主要是因为本研究中适当推迟冬灌时间与补充春灌提高了冬灌棉田盐分淋洗效率与播前表层土壤含水率。气候条件、地下水埋深、排水条件、土壤初始水盐量以及土壤结构和质地等的不同也是各地适宜冬灌定额存在差异的原因^[8,21-22]。

4 结论

1) 冬灌具有一定的储水效应, 冬灌初期各处理土壤含水率均大幅度增加, 且以 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层含水率整体增幅最大, 但冬灌水量过低对棉田冬季储水无益, 冬灌 $600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 及未冬灌处理春灌前 $0\sim 100\ \text{cm}$ 土层含水率均低于冬灌前。

2) 冬灌结合少量春灌条件下, 南疆棉田土壤在整个休闲期主要经历脱盐、积盐和再脱盐 3 个过程, 补充春灌显著提高了冬灌棉田表层土壤盐分淋洗效率。历经整个休闲期, $0\sim 30\ \text{cm}$ 和 $0\sim 100\ \text{cm}$ 土层平均脱盐率均以 $W_{2400}S_{300}$ 处理最高, 分别达 50.19% 和 18.90% 。补充春灌后, $W_{2400}S_{300}$ 处理 $0\sim 10\ \text{cm}$ 和 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层全盐量分别为 $3.32\ \text{g/kg}$ 和 $3.65\ \text{g/kg}$, 均低于棉花出苗盐分量适宜值 ($3.7\ \text{g/kg}$), 可以满足棉花出苗对土壤盐分的要求。

3) 补充春灌后, 各处理土壤含水率均有所提高。当冬灌定额达 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 及以上时, 春灌后 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层平均土壤含水率均在 15.66% 以上, 占田间持水率的 65.52% , 可以满足棉花出苗对土壤水分的要求。

4) 综合考虑节水、脱盐效应以及春灌后 $0\sim 30\ \text{cm}$ 土层土壤水盐量, 灌水定额 $2\ 400\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 是本地区冬灌结合少量春灌 ($300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$) 条件下最优冬灌定额。

参考文献:

- [1] 胡宏昌, 田富强, 张治, 等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1 037-1 046.
HU Hongchang, TIAN Fuqiang, ZHANG Zhi, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1 037-1 046.
- [2] 冯进平, 刘洪光, 曹明海, 等. 定期冬灌对北疆不同土质棉田水盐分布及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 48-54.
FENG Jinping, LIU Hongguang, CAO Minghai, et al. Effects of regular winter irrigation on water and salt distribution and yield in cotton fields of different soil quality in northern Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2022, 40(1): 48-54.
- [3] 赵波, 王振华, 李文昊. 滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分布及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 139-148.
ZHAO Bo, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effects of winter drip irrigation mode and quota on water and salt distribution in cotton field soil and cotton growth next year in northern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 139-148.
- [4] 薛静, 李旭强, 陈军锋, 等. 不同降水年型下春玉米适宜秋浇模式的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 80-87.
XUE Jing, LI Xuqiang, CHEN Junfeng, et al. Suitable irrigation scheduling for spring maize under different annual precipitation patterns in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 80-87.
- [5] LI Ling, LIU Hongguang, HE Xinlin, et al. Winter irrigation effects on soil moisture, temperature and salinity, and on cotton growth in salinized fields in Northern Xinjiang, China[J]. Sustainability. 2020, 12(18): 7 573.

- [6] 曹明海, 刘洪光, 王刚, 等. 不同粉垄深度和春灌灌水量对土壤水盐运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2022(2): 13-20.
CAO Minghai, LIU Hongguang, WANG Gang, et al. Effects of different powder ridge depth and spring irrigation amount on soil water and salt transport[J]. Water Saving Irrigation, 2022(2): 13-20.
- [7] 张瀚, 杨鹏年, 汪昌树, 等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 42-46.
ZHANG Han, YANG Pengnian, WANG Changshu, et al. Effect of winter irrigation amount on Soil moisture and salt distribution in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 42-46.
- [8] YANG Pengnian, ZIA-KHAN Shamaila, WEI Guanghui, et al. Winter Irrigation Effects in Cotton Fields in Arid Inland Irrigated Areas in the North of the Tarim Basin, China[J]. Water, 2016, 8(2): 47-47.
- [9] 孙三民, 蔡焕杰, 陈新明. 阿拉尔灌区合理秋浇定额的试验研究[J]. 节水灌溉, 2008(6): 36-39.
SUN Sanmin, CAI Huanjie, CHEN Xinming. Experimental research on the rational autumn irrigation norm in Alar irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2008(6): 36-39.
- [10] 孙珍珍, 岳春芳. 非生育期春灌灌水量对土壤盐分变化的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 237-240.
SUN Zhenzhen, YUE Chunfang. Effect of spring irrigation in non growth period on variation of soil salinity[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(3): 237-240.
- [11] 李宁, 张永玲, 王兴鹏, 等. 南疆灌区春灌对棉花生长及产量的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(9): 41-43.
LI Ning, ZHANG Yongling, WANG Xingpeng, et al. A study of the effect of spring irrigation on the growth and yield of cotton in south Xinjiang irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(9): 41-43.
- [12] 李文娟, 虎胆·吐马尔白, 杨鹏年, 等. 不同春灌水量对不同盐度棉田盐分运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2014(4): 7-10.
LI Wenjuan, HUDAN·Tumarba, YANG Pengnian, et al. Influence of different spring irrigation scheduling on moisture and salinity change rules in cotton field with different salinity[J]. Water Saving Irrigation, 2014(4): 7-10.
- [13] 王春霞, 王全九, 刘建军, 等. 灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 28-33.
WANG Chunxia, WANG Quanjiu, LIU Jianjun, et al. Effects of mineralization of irrigation water and soil salinity on cotton emergence rate in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 28-33.
- [14] 陈小芹, 王振华, 何新林, 等. 北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 132-137.
CHEN Xiaoqin, WANG Zhenhua, HE Xinlin, et al. Effects of winter irrigation method on soil moisture, salt and temperature distribution in cotton fields of North Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 132-137.
- [15] 孟春红, 杨金忠. 河套灌区秋浇定额合理优选的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(5): 23-25.
MENG Chunhong, YANG Jinzhong. Experimental research on the rational selection of autumn irrigation norm in Hetao irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(5): 23-25.
- [16] 杨鹏年, 孙珍珍, 汪昌树, 等. 绿洲灌区春灌效应及定额研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 29-33, 61.
YANG Pengnian, SUN Zhenzhen, WANG Changshu, et al. A study of the effect and quota of spring irrigation on Oasis irrigation areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 29-33, 61.
- [17] FENG Zhaozhong, WANG Xiaoke, FENG Zongwei. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao irrigation district, China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(2): 131-143.
- [18] 倪东宁, 李瑞平, 史海滨, 等. 秋灌对冻融期土壤水盐热时空变化规律影响及灌水效果评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 141-145.
NI Dongning, LI Ruiping, SHI Haibin, et al. Temporal and spatial variation of soil water-salt-heat during freezing and thawing period and the irrigation effect under the autumn irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 141-145.
- [19] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77-81.
PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Salt movement of seasonal freezing-thawing soil under autumn irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 77-81.
- [20] 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114-120.
YAO Baolin, LI Guangyong, WANG Feng. Effects of winter irrigation and soil surface mulching during freezing-thawing period on soil water-heat-salt for cotton fields in south Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 114-120.
- [21] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于SHAW模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31-36.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akao, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 31-36.
- [22] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. 地理科学进展, 2005(4): 46-55.
ZHANG Dianfa, ZHENG Qihong. Simulation of water-salt movement under the freeze-thawing condition[J]. Progress in Geography, 2005(4): 46-55.

Suitable Irrigation Scheduling in Winter-spring Fallow Period for Leaching Salt Out of Root Zone of Cotton in Southern Xinjiang

LI Yong¹, LI Lin¹, WANG Feng^{2*}, LIU Liang¹, LUO Xijuan¹, WANG Xingpeng¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China;

2. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China)

Abstract: 【Objective】 Soil salinity is an abiotic challenge facing agricultural production in Xinjiang. One solution to ameliorate the impact of soil salinity is to leach the salt out of the root zone in winter-spring period after harvest but before planting. The purpose of this paper is to experimentally study the suitable irrigation scheduling to achieve

that goal. 【Method】 The experiment was conducted in a field where irrigation amount in the winter varied from 0 to 3 600 m³/hm², combined with a spring irrigation with the amount 300 m³/hm². In each treatment, we measured the change in water and salt contents at different soil depths. 【Result】 ①The winter irrigation affected water storage in the soil, especially in the early stage and in the top 0~30 cm soil layer where the irrigation significantly increased the soil moisture content, regardless of the irrigation amount. The increase was followed by a decline until commencement of the spring irrigation. The soil moisture content in 0~100 cm soil layer irrigated by 600 m³/hm² of water in the winter was lower than that before the irrigation; a supplementary spring irrigation boosted soil moisture content in the 0~30 cm soil layer by more than 15.66% compared to that with only one winter irrigation at 1 800 m³/hm². ②In the early stage after the winter irrigation, salt leaching depth increased with the increase in irrigation amount; when the irrigation amount was 2 400 m³/hm² or above, the leaching depth was as deep as 100 cm. However, the prolonged drying season prior to the spring irrigation drove salt ascending, regardless of winter irrigation amount. The supplementary spring irrigation leached salt, especially from the 0~30 cm soil layer where the desalinization was most significant. ③Combining a 2 400 m³/hm² winter irrigation and a 300 m³/hm² spring irrigation desalinated the 0~30 cm and 0~100 cm soil layers most efficiently. ④After the spring irrigation, the average electric conductivity of the 0~30 cm and 0~10 cm soil layer was 1.40 mS/cm and 1.30 mS/cm, respectively, and the associated total salt content were 3.65 and 3.32 g/kg, respectively, lower than the critical salt content for cotton emergence (3.7 g/kg). 【Conclusion】 Considering water saving, desalination and soil water in the 0~30 cm soil layer after the spring irrigation, irrigating 2 400 m³/hm² in winter combined with a 300 m³/hm² irrigation in spring is optimal for cotton growth in the studied region.

Key words: winter irrigation; spring irrigation; water salt transport; salt leaching; winter irrigation quota

责任编辑：韩 洋

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部