

棉秆炭对黏土冬灌水分运移的影响

王涛¹, 蒲胜海^{2,3,4}, 杨广^{1*}, 李磐^{2,3}, 马兴旺^{2,3},
马红红^{2,3,4}, 王则玉^{2,3}, 牛新湘^{2,3}, 刘小利^{2,3}

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2.新疆农业科学院 土壤肥料与
农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091; 3.农业农村部 西北绿洲农业环境重点实验室,
乌鲁木齐 830091; 4.新疆慧尔农业集团股份有限公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要:【目的】探讨施用棉秆炭对黏土冬灌水分入渗能力、入渗特征和冬灌水量分配的影响。【方法】通过土柱模拟试验, 分析3个冬灌定额(4 200、5 100和6 000 m³/hm², 记为W1、W2、W3)和4个棉秆炭施用量(0%、1%、2%、4%, 记为C0、C1、C2、C4)协同作用下对黏土湿润锋、累积入渗量、入渗速率和水量分配的影响。【结果】棉秆炭促进湿润锋运移, 炭土层历时呈单峰趋势, 棉秆炭施用量越大, 湿润锋到土柱底部所用时间越短; C1、C2、C4处理土壤初始入渗率分别比C0处理增加6.5%、22.8%、32.0%, 平均入渗率增加6.9%、16.8%、21.4%, 稳定入渗率增加11.4%、38.6%、40.9%; 入渗过程进行到炭土层底部(20 cm)时, C1、C2、C4处理累积入渗量分别比C0处理增加5.0%、6.0%、9.8%, 在土柱底部增加1.2%、4.5%、6.3%, 累积入渗量随棉秆炭施用量呈上升趋势; W1、W2、W3处理下土壤持水量占灌溉定额比例为63.6%、53.3%、46.6%, 炭土层持水量与棉秆炭增加施用量正相关, 渗漏量占灌溉定额比例27.3%、38.2%、45.6%, 蒸发量占灌溉定额比例为8.5%左右。【结论】施用棉秆炭促进黏土水分入渗, 增大土壤入渗能力, 炭土层持水量与棉秆炭施用量正相关, 渗漏量受灌溉定额影响较大。

关键词: 棉秆炭; 湿润锋; 土壤水分; 冬灌; 入渗

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022375

OSID:



王涛, 蒲胜海, 杨广, 等. 棉秆炭对黏土冬灌水分运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 24-31.

WANG Tao, PU Shenghai, YANG Guang, et al. Change in Water Flow in Clay Soils Amended by Cotton Biochar[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 24-31.

0 引言

【研究意义】新疆盐渍化土壤面积较大, 膜下滴灌技术、过量施肥、棉花连作等原因^[1-4]导致土壤次生盐渍化严重, 使新疆盐渍化耕地占比已达到耕地总面积的37.72%^[5]。2021年棉花播种面积、产量占全国第一, 拥有丰富的棉花秸秆资源, 但利用率仅有54.6%^[6-7]。当地普遍采用大额冬灌洗盐和棉花秸秆直接还田的管理方式, 导致水资源渗漏、蒸发损失严重, 秸秆利用效率低下。因此, 如何实现冬灌水高效管理, 提高棉花秸秆还田效应, 是当前迫切需要解决的问题。基于此探讨棉秆炭对黏土冬灌水分入渗能力和冬灌水量分配的影响, 可合理降低冬灌无效水占比、提高冬灌水利用率、丰富秸秆资源应用前景, 对于干旱绿

洲区冬灌管理、秸秆全域全量利用和维持绿洲生态具有积极意义。【研究进展】众多学者在新疆不同区域对冬灌方式、冬灌定额和生物炭如何影响冬灌水分展开深入研究。研究^[8-9]发现, 相对漫灌方式而言, 滴灌冬灌方式土壤水分入渗更加均匀且规律明显; 冯进平等^[10]认为砂质壤土应减少灌溉水量和缩短淋洗间隔, 壤质黏土应加大水量和增加淋洗间隔; 何平如等^[11]研究发现, 冬灌定额3 000 m³/hm²可将水分利用效率提高到1.40 kg/m³; 邹瑞晗等^[12]研究表明, 冬灌期间施加生物炭可以增加土壤总孔隙度, 增强土壤保墒保温能力, 新疆滴灌棉田冬灌期间生物炭最佳施用量为30~45 t/hm²; 姚宝林等^[13]研究认为, 冬灌时不同地表覆盖模式能影响土壤温度和土壤水分, 降低土壤初始入渗速率、稳定入渗率和累计入渗量。基于新疆丰富的棉花秸秆资源, 众多学者对于干旱绿洲区不同区域秸秆还田方式、秸秆施入量等展开深入研究, 探讨生物炭对改良土壤理化性质、减少土壤养分流失和水分入渗等影响。霍启煜等^[14]、唐光木等^[15]研究表明, 秸秆直接还田和炭化还田多年后可提升土壤全氮量、有机碳量; 邹瑞晗等^[12]研究认为, 非灌溉季节生物炭

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900803); 国家自然科学基金项目(52269006); 新疆农业科学院自主培育项目(nkyzzkj-009); 第三次新疆综合科学考察项目(SQ2021xjkk02704); 兵团科技攻关计划项目(2021AB021); 兵团科技合作计划项目(2022BC001); 农业科技创新稳定支持项目(xjnkyywdzc-2022005)

作者简介: 王涛(1997-), 男, 新疆昌吉人。硕士研究生, 研究方向为干旱区水资源高效利用技术。E-mail: wtstary@163.com

通信作者: 杨广(1983-), 男, 河北新乐人。教授, 博士, 主要从事干旱区水资源高效利用技术研究。E-mail: mikeyork@163.com

施加增强土壤保墒能力，融后含水率平均提高 1.07%~2.65%；杜思垚等^[16]研究表明，生物炭和秸秆能有效改善土壤结构，明显提高土壤养分量；闫辰啸等^[17]研究表明，生物炭的加入导致风沙土的持水能力增加了 2.96%~4.79%，入渗能力显著降低。张红美等^[18]发现，在南疆沙化土壤施入生物炭降低了土壤体积质量和水分蒸发速率，增大了总孔隙度、毛管孔隙度和吸水率，提高了土壤的保水性能。【切入点】目前涉及生物炭对黏土冬灌水分入渗过程、水分分布及渗漏量的研究相对较少，研究结果也不尽相同，为明确冬灌水分分布和提高冬灌水利用率，更好管理干旱绿洲区冬灌，需进一步研究棉秆炭对黏土冬灌水分运移的影响。【拟解决的关键问题】为此，基于新疆绿洲灌溉农业区水资源短缺与冬灌压盐措施现状，通过土柱模拟试验，探讨棉秆炭对黏土冬灌水分入渗能力、入渗特征和冬灌水量分配的影响，为黏土改良、提高冬灌水利用率和冬灌管理提供理论依据和科学支撑，同时丰富新疆棉花秸秆应用前景，对棉花秸秆全域全量利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021 年 6 月—2022 年 6 月在新疆巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市新疆农业科学院试验站（E85.856°，N41.676°）进行，试验区属于典型干旱气候，年平均降水量为 56.2 mm，年平均蒸发量 2 497.4 mm，年均日照时间 2 878 h，无霜期 205 d。主要种植作物为棉花。

1.2 试验材料

采集土壤剖面不同土层土壤（0~90 cm），自然风干，过 5 mm 筛后备用。供试土壤属于黏土，土壤体积质量为 1.42 g/cm³，0~20、20~40、40~60、60~80、80~90 cm 田间持水率分别为 27.45%、28.53%、27.85%、28.51%、26.82%。供试生物炭原材料为棉花秸秆，棉花秸秆的炭产量约为 30%^[19]，洗净烘干后将切段（5~10 cm）的棉花秸秆按照逐步升温法（400 °C）进行高温热解，厌氧烧制，冷却至室温，碾压后过 2 mm 筛备用。

1.3 试验设计与装置

1.3.1 试验设计

试验模拟自然条件下休耕期土壤（0~90 cm）冬季灌水时水分入渗和渗漏过程，采用双因素完全试验。冬灌定额设 4 200、5 100、6 000 m³/hm²，分别记为 W1、W2、W3，棉秆炭施用量（生物炭占耕作层干土的质量）设 0%、1%、2%和 4%，记为 C0、C1、C2、C4，共计 12 个处理，每个处理 3 次重复。

1.3.2 试验过程

试验装置由土柱和马氏瓶二部分组成。土柱采用 5 mm 厚透明有机玻璃材料制作，内径为 19 cm，高度为 110 cm，底部中心开孔并安装铜阀开关。装土前在土柱底部放置 2 层 200 目的尼龙网和滤纸，铺设 10 cm 石英砂作为反滤层，在土柱内壁均匀涂抹 1 层凡士林，以便减少管壁效应。装土高度 90 cm，0~20 cm（耕作层）按加权体积质量回填棉秆炭混合土壤，20~90 cm 层按实际体积质量 1.42 g/cm³ 回填，初始含水率 7%（棉花收获土壤平均含水率）。按 5 cm 厚度分层回填，分层界面处打毛。土柱装填完成后，静放 3 d，试验装置详见图 1。

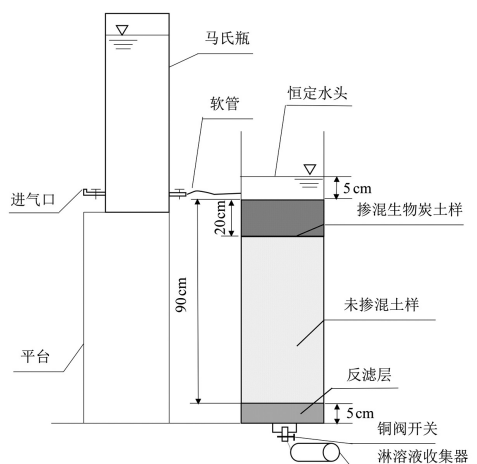


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental device

水源为纯净水，采用马氏瓶持续供水，恒定水头为 5 cm。土壤水分入渗过程，记录不同时段内的湿润锋位置及马氏瓶下降水位，湿润锋运移到土柱底部（90 cm）时，打开土柱底部铜阀开关，接取渗漏水，量取渗漏水体积，按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~90 cm 分层，分别测得土壤含水率，全程监测蒸发量。

1.4 观测指标与方法

湿润锋按照先密后疏的原则，记录入渗过程中 4 个方向的湿润锋位置，取平均值作为湿润锋运移距离；入渗水量为湿润锋记录时刻对应马氏瓶减少水量；土壤含水率采用烘干法；渗漏水采用量筒计量，蒸发量用蒸发皿（直径 20 cm）监测。采用幂函数对湿润锋距离与时间变化曲线进行拟合。计算式为：

$$F = bt^k, \quad (1)$$

式中： F 为湿润锋深度（cm）； b 为入渗系数，可表征土壤水分入渗初期能力，其值越大，初期入渗速率越大； k 为经验系数； t 为入渗时间（min）。

1.5 数据处理

利用 IBM SPSS Statistics 25 统计软件，采用方差

分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 检验不同处理的显著性, 当 $p \leq 0.05$ 时, 认为差异性具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 棉秆炭施用量对湿润锋运移的影响

土壤水分入渗过程中, 湿润锋是土壤湿润层与干土层的分界线, 可表征水分垂向运动特征^[20]。棉秆炭施用量对湿润锋运移产生明显影响。由图 2 可知, 湿润锋到达炭土层底部 (20 cm 处) 所用时间呈单峰趋势, C1、C2、C4 处理炭土层入渗历时分别比 C0 处理缩短了 20.5%、10.7%、6.3%, 表明棉秆炭添加一定程度上促进水分入渗, 随着棉秆炭施用量的增加, 促进水分入渗效果减弱, 各棉秆炭添加处理间无显著差异。C1 处理在湿润锋运移到炭土层底部所用时间最短, 明显促进湿润锋运移。不同棉秆炭施用量对湿润锋运移到土柱底部 (90 cm) 所用时间差异显著, 均缩短湿润锋到土柱底部入渗历时, C4 处理用时最短为 1 795 min, 比 C0 处理缩短了 12.4%。湿润锋运移距离与入渗历时符合幂函数关系 (表 1), 各处理 R^2 均大于 0.998; 施用棉秆炭各处理入渗系数 b 值均大于 C0 处理, 其中 C1 处理 b 值最大为 2.26。

2.2 棉秆炭和冬灌定额对水分入渗特性的影响

土壤水分入渗速率是衡量土壤入渗能力的指标之一。入渗初始阶段累积入渗量曲线斜率较大, 到达稳定入渗阶段后斜率减小, 入渗速率降低, 表明随着入渗过程的不断进行土壤入渗速率逐渐减小并趋于稳定。添加不同比例的棉秆炭造成土壤入渗速率出现差异 (表 2)。本研究将入渗开始 5 min 内的平均入渗率作为初始入渗率, 由表 2 可以得出, C1、C2、C4 处理土壤初始入渗率分别比 C0 处理增加 6.5%、22.8%、32.0%, 平均入渗率分别比 C0 处理增加 6.9%、

16.8%、21.4%, C0 处理与 C2、C4 处理差异显著, 但 C2 处理与 C4 处理差异不显著。稳定入渗率与棉秆炭施用量正相关, C1、C2、C4 处理稳定入渗率分别比 C0 处理增加 11.4%、38.6%、40.9%, C2、C4 处理与 C0 处理差异显著。C1 处理炭土层入渗历时比 C0 处理缩短 20.5%, C1 处理较其他施用棉秆炭处理所用时间短是由于高棉秆炭施用量处理生物炭较大的比表面积和较多的亲水官能团发挥巨大作用, 吸持更多水分, 使其入渗速度小于低棉秆炭施用量处理。

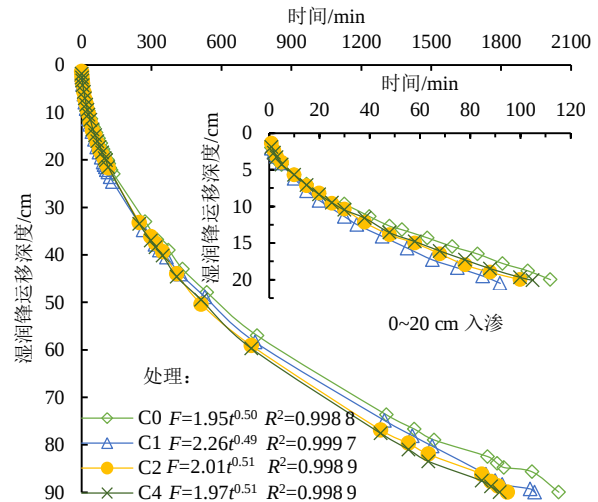


图 2 棉秆炭施用量对湿润锋运移深度的影响

Fig.2 Effect of application amount of cotton stalk and charcoal on wet front migration

表 1 湿润锋运移深度与入渗历时拟合结果

Table 1 Fitting results of wetting front migration depth and infiltration duration

参数	C0	C1	C2	C4
b	1.949 ± 0.058	2.258 ± 0.034	2.010 ± 0.063	1.974 ± 0.061
k	0.504 ± 0.004	0.488 ± 0.002	0.507 ± 0.004	0.512 ± 0.004
R^2	0.998 8	0.999 7	0.998 9	0.998 9

表 2 不同棉秆炭施用量下土壤入渗特性

Table 2 Soil infiltration characteristics under different cotton stalk charcoal application rates

处理	初始入渗率/(mm min ⁻¹)	平均入渗率/(mm min ⁻¹)	稳定入渗率/(mm min ⁻¹)	炭土层入渗历时/min	总入渗历时/min
C0	2.834 ± 0.241 c	0.131 ± 0.008 c	0.044 ± 0.003 b	112 ± 6 a	$2\,048 \pm 63$ a
C1	3.018 ± 0.282 bc	0.140 ± 0.005 bc	0.049 ± 0.009 b	89 ± 7 b	$1\,944 \pm 36$ b
C2	3.480 ± 0.440 ab	0.153 ± 0.010 ab	0.061 ± 0.002 a	100 ± 10 ab	$1\,827 \pm 28$ c
C4	3.740 ± 0.164 a	0.159 ± 0.013 a	0.062 ± 0.002 a	105 ± 9 ab	$1\,795 \pm 39$ c

注 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 棉秆炭施用量对土壤水分分布特征的影响

图 3 表明 20~90 cm 土层土壤含水率维持在各个土层田间持水率附近, 表层 0~20 cm 施用棉秆炭, 未影响到 20~90 cm 土层土壤含水率, 不同冬灌定额下土壤含水率差异不显著。图 4 为土壤持水量分布图, 图柱上方不同小写字母表示不同棉秆炭施用量间差

异显著 ($P < 0.05$)。由图 4 可知, 炭土层 (0~20 cm) 添加棉秆炭后土壤持水量均比 C0 处理高, C0 处理与 C2、C4 处理具有显著差异, 但 C2 处理与 C4 处理之间差异不显著, 随着棉秆炭施用量的增加, 土壤持水量呈上升趋势, 高棉秆炭施用量明显提升炭土层土壤持水量。非炭土层部分, C1、C2、C4 处理持水量无

显著变化。施用棉秆炭改变了炭土层水分分布，随着 对非炭土层土壤含水率影响较小。
棉秆炭施用量的增加，炭土层土壤含水率不断增大，

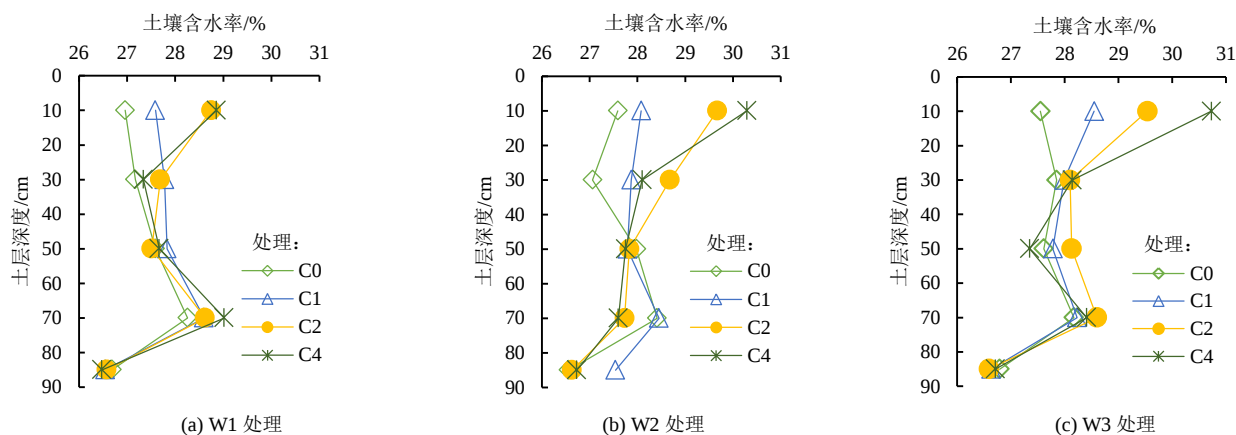


图3 棉秆炭施用量对土壤含水率的影响

Fig.3 Effect of cotton stalk charcoal application on soil moisture content

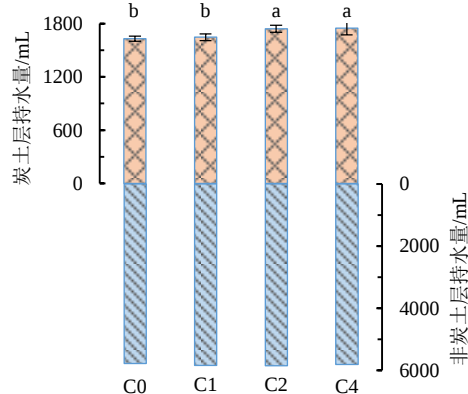


图4 土壤持水量分布

Fig.4 Distribution of soil water holding capacity

2.4 棉秆炭对土壤累积入渗量的影响

从图5可以看出，棉秆炭施用量对累积入渗量有显著影响，在水分入渗的初始阶段（0~5 min），不同棉秆炭处理下累积入渗量差异不明显。随入渗时间不断增加，各处理间累积入渗量差异逐渐显现。入渗过程进行到炭土层底部（20 cm）时，C0、C1、C2、C4处理累积入渗量分别为61.4、64.5、65.1、67.4 mm，C1、C2、C4处理累积入渗量比分别比C0处理增加了5.0%、6.0%、9.8%，C1、C2、C4处理入渗历时分别比C0处理缩短了20.5%、10.7%、6.3%。可见施用棉秆炭增加了累积入渗量。非炭土层入渗过程中C1、C2、C4处理累积入渗量分别比C0处理增加0.1%、4.1%、5.3%，累积入渗量随棉秆炭施用量增加而小幅提升，这是由于在非炭土层入渗过程中，棉秆炭混合土壤完全达到饱和状态会吸持一定水分，而高棉秆炭施用量处理吸持水分更多。综上，施用棉秆炭会增加土壤累积入渗量，在炭土层与非炭土层入渗过程中对累积入渗量影响不同。

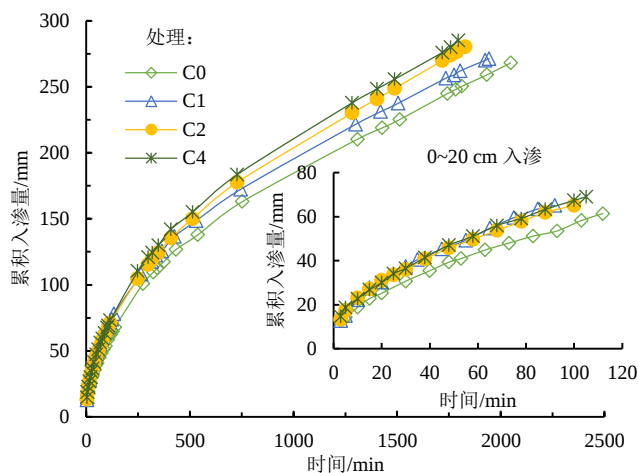


图5 棉秆炭施用量对累积入渗量的影响

Fig.5 Effect of cotton stalk carbon application rate on cumulative infiltration rate

2.5 棉秆炭和冬灌定额协同作用下水量平衡分析

总冬灌量由土壤持水量、渗漏量和蒸发量3部分组成。图6表明渗漏量受灌溉定额的影响较大，冬灌定额越大，渗漏量越大，在W1、W2、W3处理中，渗漏量占各灌溉定额比例范围分别在26.1%~28.6%、37.2%~38.9%、45.0%~46.7%。不同灌溉量下渗漏量具有显著差异，施用棉秆炭对渗漏量无显著影响，这是由于施入棉秆炭所增持的水分与冬灌定额、渗漏量相对较小所致。如图7所示，3种不同灌溉定额下土壤持水量比例分别为63.6%、53.3%、46.6%，随着灌溉定额增大，土壤持水量占灌溉定额比例逐渐减小。土壤持水量又可分为炭土层和非炭土层持水量2个部分，其中炭土层持水量C0处理与C2、C4处理差异显著，随着棉秆炭施用量不断增加，炭土层持水量逐渐增大，非炭土层部分持水量无显著差异。各处理间蒸发量占灌溉定额比例非常接近，在8.5%左右。

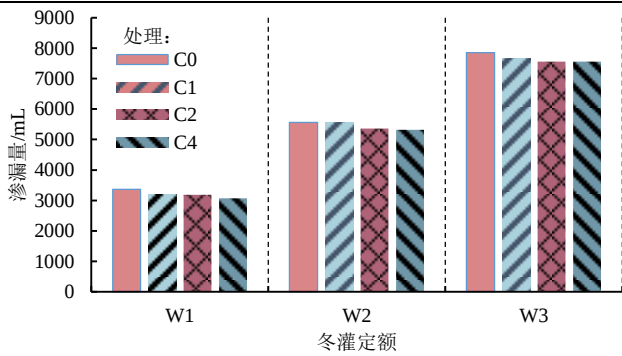


图 6 冬灌定额对渗漏量的影响

Fig.6 Influence of winter irrigation quota on leakage

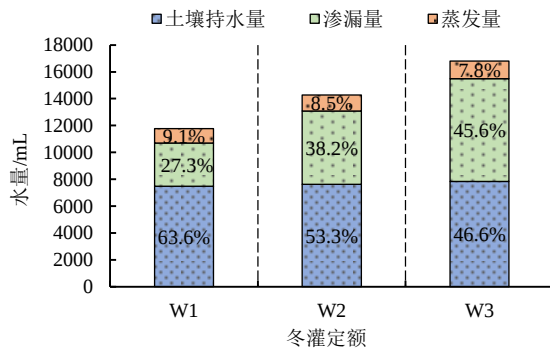


图 7 不同灌水定额下水量平衡分析

Fig.7 Analysis of water balance under different irrigation quotas

3 讨论

土壤入渗过程及入渗能力主要受土壤质地、体积质量、初始含水率等内部因素的综合影响,同时也会受生物炭用量、种类等外部因素影响^[21-23]。本试验供试土壤为黏土,具有土体结构密实,孔隙结构较小,通透性差,水分不容易从中通过等特点。众多学者^[24-26]研究表明,不同质地土壤中施入生物炭会产生不同效果。本研究表明,添加棉秆炭可加快湿润锋运移进程,缩短入渗历时,其中 C4 处理效果最佳,到达土柱底部入渗历时较 C0 处理缩短 12.4%。这主要是由于棉秆炭添加后优化了黏土颗粒组成,增大孔隙率,改变黏土孔隙结构分布特征,使得土壤中水分流通通道增加,减小阻力,从而缩短入渗时间,促进湿润锋运移。李帅霖等^[27]研究认为,在土壤表层添加 4% 的生物炭能提高黏壤土的入渗能力,这与本研究结果相似。棉秆炭添加可增大土壤初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和土壤累积入渗量,这是由于黏土质地较细,黏粒较多,通透性差,在施入棉秆炭后,大孔隙数量不断增加,水分流通通道增大,提高土壤连通性,从而增加了水分入渗速率和累积入渗量。齐瑞鹏等^[28]、岑睿等^[29]研究表明,在黏质土中施入生物炭可增强水分入渗能力,秸秆生物炭输入对黏壤土的改良效果与本试验采用棉花秸秆类似。魏永霞等^[30]研究也表明,生物炭添加可加快土壤初始入渗率,这与本研究相似。

与黏土相比,生物炭对于砂壤土的改良具有不同效果,肖茜等^[31]、Pu 等^[19]研究表明,生物炭的添加可以改善沙质土壤的物理和水力特性,生物炭施用量越大,土壤含水率越高,土壤入渗速度减缓,增强土壤持水能力。综上,施用棉秆炭增加黏土水分入渗速率,增大水分入渗能力,促进水分入渗过程,低棉秆炭施用量影响较弱,高棉秆炭施用量影响较强。

棉秆炭与冬灌定额协同作用对土壤水分分布具有不同程度影响。生物炭具有高度发达的孔隙特征和巨大的比表面积,具有多种有机官能团和较强的离子吸附交换能力,生物炭掺进土壤后,增大土壤孔隙度、改变土壤团聚体特性,增加土壤持水能力^[32-35]。本研究表明,炭土层部分土壤含水率不断增加,土壤持水量随棉秆炭施用量呈上升趋势,这与上述研究结果类似。棉秆炭施入后改变土壤原有性状,随着棉秆炭施用量增加,土壤累积入渗量不断增加,土壤持水能力提升。王艳阳等^[36]、Rasa 等^[32]研究也表明,生物炭的输入可以增加土壤饱和含水率、土壤田间持水率、土壤有效含水率。依据水量平衡原理,渗漏量受冬灌定额影响较大,冬灌定额越大,渗漏量占灌溉定额比例不断增大,炭土层持水量与棉秆炭施用量正相关,蒸发量占比在 8.5% 左右。施用棉秆炭对渗漏量差异不显著,这是由于添加棉秆炭所增持的水分,与冬灌定额、渗漏量相对较小所致,量化冬灌水量分配,对于减小冬灌定额和改变冬灌方式具有积极意义。综上,棉秆炭添加可增加炭土层含水率,增强土壤持水能力,渗漏量受冬灌定额影响较大。

本研究表明,漫灌冬灌方式下蒸发量占灌溉定额比例 8.5% 左右,同时冬闲期较长,蒸发较大,水资源利用效率降低。近年来众多学者关注于滴灌冬灌方式、秸秆覆盖措施,以期减少蒸发量,提升储水能力,从而提升水资源利用率,这为下一步研究提供方向。姚宝林等^[37]、魏一钊等^[38]研究表明,秸秆覆盖对冻融期土壤蒸发的抑制作用达 24.0%~56.7%,秸秆覆盖使土壤水分日蒸发量减小 2.02~2.48 mm,秸秆覆盖对土壤储水能力、减控蒸发量具有显著影响。

施用棉秆炭能够促进黏土水分入渗,增强土壤持水能力,为黏土改良及秸秆全域全量利用和降低冬灌无效水占比、提高冬灌水利用率和干旱绿洲区冬灌管理提供理论依据和科学支撑。然而漫灌冬灌方式存在水资源渗漏、蒸发损失严重等现象,因此需要进一步开展滴灌冬灌方式、秸秆覆盖措施研究,确定在黏壤土中添加生物炭的改良效果和冬灌过程土壤水分分布特征,量化冬灌无效水占比,并开展数值模拟研究,综合确定适宜冬灌方式,为干旱绿洲区冬灌技术提供支撑。

4 结 论

1) 施用棉秆炭可促进湿润锋运移, 湿润锋与炭土层入渗历时呈单峰趋势, 且符合幂函数关系, C1、C2、C4 处理炭土层入渗历时分别比 C0 处理缩短 20.5%、10.7%、6.3%。

2) 施用棉秆炭明显提升黏土入渗能力, 增加土壤入渗率和累积入渗量, 且低棉秆炭施用量影响较弱, 高棉秆炭施用量影响较强。C1、C2、C4 处理初始入渗率分别比 C0 处理增加 6.5%、22.8%、32.0%, 平均入渗率增加 6.9%、16.8%、21.4%, 稳定入渗率增加 11.4%、38.6%、40.9%, 入渗到土柱底部累积入渗量增加 1.2%、4.5%、6.3%。

3) 施用棉秆炭有效提升土壤含水率, 提升炭土层持水能力, 且与棉秆炭施用量正相关。C1、C2、C4 处理炭土层持水量分别比 C0 处理增加 1.1%、6.8%、7.4%, W1、W2、W3 处理下渗漏量占灌溉定额比例 27.3%、38.2%、45.6%, 蒸发量占 8.5% 左右。

参考文献:

- [1] 谭明东, 王振华, 王越, 等. 长期滴灌棉田非灌溉季节土壤盐分累积特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 485-492.
TAN Mingdong, WANG Zhenhua, WANG Yue, et al. Soil salt accumulation characteristics of long-term drip irrigation in cotton fields during non-irrigation seasons[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 485-492.
- [2] 冯玥, 衡通, 何新林, 等. 利用 ^{15}N 揭示滴灌区盐胁迫对土壤氮素分布与棉花生长的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 327-335.
FENG Yue, HENG Tong, HE Xinlin, et al. Using ^{15}N to reveal the effects of salt and drought stress on soil nitrogen distribution and cotton growth in drip irrigation areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 327-335.
- [3] 陈虹, 杨磊, 张凤华. 新疆长期棉花连作对土壤理化性状与线虫群落的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4 263-4 271.
CHEN Hong, YANG Lei, ZHANG Fenghua. Effects of continuous cotton monocropping on soil physicochemical properties and nematode community in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4 263-4 271.
- [4] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.
YANG Guang, LI Wanjing, REN Futian, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 73-83.
- [5] 郭家鑫, 鲁晓宇, 陶一凡, 等. 盐碱胁迫对棉花生长和养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 23-32, 59.
GUO Jiaxin, LU Xiaoyu, TAO Yifan, et al. Effects of saline and alkaline stresses on growth and nutrient uptake of cotton[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4): 23-32, 59.
- [6] 买买提·莫明, 艾先涛, 艾海提·阿木提, 等. 对我国棉花主要产区产业兴旺的思考[J]. 棉花科学, 2022, 44(3): 3-8.
MOMING Maimaiti, AI Xiantao, AMUTI Aihaiti, et al. Considerations on the prosperity of the industry in the main cotton producing areas in China[J]. Cotton Sciences, 2022, 44(3): 3-8.
- [7] 王学成, 刘冉, 杨莹攀, 等. 棉花秸秆不同埋深对土壤水盐分布及棉

花根系构型的影响[J]. 节水灌溉, 2021(9): 77-82.

WANG Xuecheng, LIU Ran, YANG Yingpan, et al. Effects of different burial depth of cotton straw on soil water and salt distribution and cotton root architecture[J]. Water Saving Irrigation, 2021(9): 77-82.

- [8] 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.

陈小平, 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.

- [9] CHEN Xiaopin, 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.
- [10] 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.

何平如, 张富仓, 范军亮, 等. 土壤水分调控对新疆滴灌棉花生长、品质及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 39-46.

- [11] HE Pingru, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of soil moisture regulation on growth, quality and water use of cotton under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 39-46.
- [12] 邹瑞晗, 吕德生, 王振华, 等. 非灌溉季节施加生物炭对滴灌棉田土壤结构及水热特性的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 220-227.
ZOU Ruihan, LYU Desheng, WANG Zhenhua, et al. Effects of biochar application during the non-irrigation season on soil structure and hydrothermal characteristics in drip irrigated cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 220-227.

姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对新疆棉田水热盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114-120.

- [13] 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.
- [14] 霍启煜, 马丽娟, 徐悦轩, 等. 秸秆还田方式及施氮量对滴灌棉田土壤有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 207-212.
HUO Qiyu, MA Lijuan, XU Yuexuan, et al. Effects of straw returning mode and nitrogen application rate on soil organic carbon and nitrogen in drip irrigated cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 207-212.

唐光木, 徐万里, 顾美英, 等. 棉秆炭特性及其对灰漠土土壤有机碳矿化的效应[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1 795-1 803.

- [15] TANG Guangmu, XU Wanli, GU Meiyong, et al. Characteristics of cotton stalk-char and its effect on organic carbon mineralization in grey desert soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1 795-1 803.
- [16] 杜思彦, 郭晓雯, 王芳霞, 等. 施用生物炭对咸水滴灌棉田土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(3): 571-580.
DU Siyao, GUO Xiaowen, WANG Fangxia, et al. Effects of biochar application on soil physicochemical properties and enzyme activities in saline drip irrigation cotton field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(3): 571-580.

闫辰啸, 洪明, 秦佳豪, 等. 生物炭对和田风沙土水力特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 21-28.

- [17] YAN Chenxiao, HONG Ming, QIN Jiahao, et al. Effects of biochar on hydraulic characteristics of aeolian sandy soil in Hetian[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 21-28.

- [18] 张红美, 李珂, 朱琴, 等. 炭化时间对南疆沙化土壤物理性质和水分特征的影响[J]. 节水灌溉, 2019(8): 59-63.
ZHANG Hongmei, LI Ke, ZHU Qin, et al. Effect of carbonization time on physical property and water characteristics of sandy soil in southern Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2019(8): 59-63.
- [19] PU Shenghai, LI Guangyong, TANG Guangmu, et al. Effects of biochar on water movement characteristics in sandy soil under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(5): 740-753.
- [20] 王幼奇, 包维斌, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 60-65.
WANG Youqi, BAO Weibin, ZHAO Yunpeng, et al. Amending soil by biochar reduces the ability of the soil to infiltrate water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 60-65.
- [21] WANG Xiaofang, LI Yi, WANG Haoran, et al. Targeted biochar application alters physical, chemical, hydrological and thermal properties of salt-affected soils under cotton-sugarbeet intercropping[J]. Catena, 2022, 216: 106 414.
- [22] WANG T T, STEWART C E, MA J B, et al. Applicability of five models to simulate water infiltration into soil with added biochar[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(5): 701-711.
- [23] SUN Junna, YANG Runya, ZHU Jinin, et al. Contrasting effects of corn straw biochar on soil water infiltration and retention at tilled and compacted bulk densities in the Yellow River Delta[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2019, 99(4): 357-366.
- [24] WANG D Y, LI C Y, PARIKH S J, et al. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils - A multi-scale analysis[J]. Geoderma, 2019, 340: 185-191.
- [25] SULIMAN W, HARSH J B, ABU-LAIL N I, et al. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 139-147.
- [26] ZUO Yutia, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Characteristics of snowmelt transport in farmland soil in cold regions: The regulatory mechanism of biochar[J]. Hydrological Processes, 2022, 36(2): e14499.
- [27] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 135-144.
LI Shuailin, WANG Xia, WANG Shuo, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 135-144.
- [28] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2 281-2 288.
QI Ruipeng, ZHANG Lei, YAN Yonghao, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2 281-2 288.
- [29] 岑睿, 屈忠义, 孙贯芳, 等. 秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 284-289.
CEN Rui, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effects of biochar on the physical properties and infiltration of clay loam[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 284-289.
- [30] 魏永霞, 王鹤, 刘慧, 等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 290-299.
WEI Yongxia, WANG He, LIU Hui, et al. Effect of biochar on soil moisture and its infiltration performance in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 290-299.
- [31] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128-134.
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 128-134.
- [32] RASA Kimmo, HEIKKINEN Jaakko, HANNULA Markus, et al. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity?[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 119: 346-353.
- [33] LIBUTTI Angela, FRANCAVILLA Matteo, MONTELEONE Massimo. Hydrological properties of a clay loam soil as affected by biochar application in a pot experiment[J]. Agronomy, 2021, 11(3): 489.
- [34] VITHANAGE Meththika, ASHIQ Ashiq, RAMANAYAKA Sammani, et al. Implications of layered double hydroxides assembled biochar composite in adsorptive removal of contaminants: Current status and future perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 139 718.
- [35] NATH Harjeet, SARKAR Biswajit, MITRA Sudip, et al. Biochar from biomass: A review on biochar preparation its modification and impact on soil including soil microbiology[J]. Geomicrobiology Journal, 2022, 39(3/4/5): 373-388.
- [36] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113-119.
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 113-119.
- [37] 姚宝林, 李光永, 李发永. 新疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4 453-4 462.
YAO Baolin, LI Guangyong, LI Fayong. Soil infiltration characteristics in fallow period of drip irrigation cotton fields in south Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4 453-4 462.
- [38] 魏一钊. 秸秆覆盖和冬灌条件下冻融土壤蒸发的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
WEI Yizhao. Study of soil evaporation under straw mulching and winter irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

Change in Water Flow in Clay Soils Amended by Cotton Biochar

WANG Tao¹, PU Shenghai^{2,3,4}, YANG Guang^{1*}, LI Pan^{2,3}, MA Xingwang^{2,3},
MA Honghong^{2,3,4}, WANG Zeyu^{2,3}, NIU Xinxiang^{2,3}, LIU Xiaoli^{2,3}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

3. Key Laboratory of Northwest Oasis Agricultural Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Urumqi 830091, China; 4. Xinjiang Huier Agricultural Group Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: 【Objective】 Biochar has been widely used to amend degraded soils to improve their quality and fertility. The aim of this paper is to investigate the change in hydraulic properties of clay soils after being amended by cotton biochar. **【Method】** The experiment was conducted in repacked columns, with soil in the top 20 cm being amended by

biochar at weight ratio 0 (C0), 1% (C1), 2% (C2) and 4% (C4), respectively. Each biochar amendment was associated with three irrigation treatments: 4 200 (W1), 5 100 (W2) and 6 000 m³/hm² (W3). For each treatment, we measured the advance of wetting front in the column, cumulative infiltration and infiltration rate, as well as water distribution in the soil. **【Result】** Biochar amendment enhanced water infiltration, with the enhancement increasing with biochar application amount. Compared with C0, C1, C2 and C3 increased initial infiltration rate, average infiltration rate, steady infiltration rate by 6.5%, 22.8% and 32.0%; 6.9%, 16.8% and 21.4%; and 1.4%, 38.6% and 40.9%, respectively. After the infiltration front crossed the top 20cm of soil layer, compared to C0, C1, C2 and C3 increased the cumulative infiltration by 5.0%, 6.0% and 9.8%, and soil water content at the column bottom by 1.2%, 4.5% and 6.3%, respectively. Overall, the cumulative infiltration increased with biochar application amount. On average, approximately 63.6%, 53.3% and 46.6% of the irrigated water in W1, W2 and W3 was stored in the soils, and the capacity the top 20 cm of soil layer to hold water increased with the biochar application amount. **【Conclusion】** Amending clay soil by cotton-stalk biochar improved its ability to store and infiltrate water. The improved ability of the amended top 20 cm soil layer was positively correlated with biochar application amount. Water percolation and evaporation was affected by irrigation amount more than by biochar amendment. Our results have implications for improving physical quality and productivity of clay soils.

Key words: cotton charcoal; wetting front; soil moisture; winter irrigation; infiltration

责任编辑：白芳芳

(上接第 23 页)

Combined Effect of Water and Salt Stress on Growth and Root Hydraulic Conductivity of Ultra-high Yield Wheat Seedling

FU Yuanyuan^{1,2}, SI Zhuanyun², WANG Xingpeng³, GAO Yang², LI Qian³,
DING Xiaohui², YANG Na², ZHAO Shuzhen^{1*}, WAN Sumei^{1*}

(1. College of Agriculture, Tarim University, Alar 843300, China; 2. Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 3. College of Water Resource and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: **【Background and objective】** Drought and soil salinization are two common abiotic stresses facing agricultural production worldwide. Plants develop various strategies to grow under these stresses, and the purpose of this paper is to investigate how winter wheat at seedling stage adjusts the hydraulic conductance of its roots as a response to change in water and salt stresses. **【Method】** The experiment was conducted in hydroponic culture, using the ultra-high variety Yannong 1212 as the model plant. Water stress was created by polyethylene glycol (PEG) and NaCl was used as a proxy for soil salinization. There were three treatments: 2% of PEG6000, 0.1% of NaCl, and 2% of PEG6000+0.1% NaCl. Wheat grown in Hoagland nutrient solution without abiotic stresses was taken as the control. For each treatment, we measured the root hydraulic conductivity and analyzed its relationship with environmental factors using stepwise regression method. **【Result】** ① Water stress and salt stress, working alone or in combination, reduced plant height and leaf area significantly, though the level of the significance varied with treatment. ② Compared with the control, water stress and salt stress working alone increased root-shoot ratio by 12% and 14% respectively, while their combination reduced this ratio by 6%; ③ Salt stress and water stress, working separately or in combination, increased Na⁺/K⁺ ratio in both leaves and roots, despite that the effect of water stress was not significant. ④ Water stress and salt stress and their combination significantly reduced total nitrogen content in the leaves, and reduced the root hydraulic conductivity by 58%, 51% and 93%, respectively, compared with the control. **【Conclusion】** Water and salt stresses reduced root hydraulic conductivity of the wheat at seedling stage, and the leaf area was positively correlated with the root hydraulic conductivity.

Key words: water and salt stress; super high yield wheat; K⁺ content; Na⁺ content; root hydraulic conductivity

责任编辑：韩 洋