渗墒灌溉节水降耗应用试验

周和平^{1*}, 赵经华², 张娜¹, 翟超¹, 刘玉甫³

1. 新疆水利管理总站, 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049

* E-mail: xjslzhp@126.com

收稿日期: 2018-01-30; 接受日期: 2018-06-25; 网络版发表日期: 2018-10-19

新疆水利科技专项(编号: G201602)资助项目

摘要 针对膜下滴灌存在的灌水频次多、能耗大、浅层土壤水分利用率低、地膜污染问题, 本文基于地下滴灌的渗墒灌溉特性, 设渗灌埋深、灌水定额、灌水频次、播种深度4因素3水平, 采用正交法进行渗墒灌溉与CK₁(膜下滴灌播深5 cm), CK₂(播深5 cm无膜渗灌埋深15 cm)田间玉米对比试验. 结果表明: (1) 无膜渗墒灌溉玉米平均出苗率94.2%与CK₁和CK₂平均出苗率97.0%和95.0%差异小, 生长前期玉米株高、叶面积系数、根长、根干质量、根生理切面直径、细胞量低于CK₁和CK₂, 但随着玉米生育至中期差异渐近尤其是根长、根干质量高于对照, 玉米深播生长正常; (2) 渗墒灌溉定额4200 m³/hm²灌水7次, 比CK₁灌水10次灌溉定额4500 m³/hm²分别减少30%和7%, 但玉米显著增产25.23%, 与CK₂差异不明显, 渗墒灌溉可减少灌水频次和用水定额节能降耗; (3) 渗墒灌溉土壤水分和作物耗水强度呈现表土小, 中下层增平稳状态恰与对照相反, 体现了渗墒灌溉土壤水分运行表土干燥水分扩散小及深层保墒效应, 为节能环保型农业高效节水灌溉提质增效提供了有益的探索.

关键词 渗墒灌溉, 深播玉米, 无地膜污染, 节能降耗

1 引言

截止2016年新疆地方系统已发展膜下滴灌229万hm², 占总灌溉面积的46%^[1], 膜下滴灌成为新疆干旱农业高效用水的主要灌溉模式, 为水肥调控节水增产、提升水利用效率、水资源总量控制与定额管理、推进经济社会与水生态用水结构调整发挥了重要作用. 膜下滴灌将地膜覆盖增温保墒与局部湿润节水集成创新微灌技术^[2,3], 与沟畦灌相比具有节水增产、灌

水定额和田间覆膜蒸发量小、灌水频次多等特点, 避免水分深层渗漏, 提高田间水分利用效率. 膜下滴灌土壤水分下渗较少作物根系分布浅, 影响植株抗性^[4]、深层土壤水分供给^[5,6]、棵间蒸发及作物蒸腾量^[7]. 地膜覆盖虽保墒节水、减少杂草生长、促进植物提早成熟^[8,9], 但农田长期地膜残留影响土壤理化性质, 水分分布不均土壤营养下降. 农田残膜密度2000 kg/hm²时, 土壤碱解氮、速效磷有效性下降55%^[10]. 研究表明新疆棉田每年有18 kg/hm²地膜残留

引用格式: 周和平, 赵经华, 张娜, 等. 渗墒灌溉节水降耗应用试验. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 76–86

Zhou H P, Zhao J H, Zhang N, et al. Infiltration of irrigation water and energy saving test of maize (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 76–86, doi: 10.1360/N092018-00028

土壤, 覆膜20 a地膜残留率将高达24%左右^[11,12]。毕继业等人^[13]研究发现, 残膜对作物产量负效应持续16 a会抵消由于地膜覆盖增温保墒使农作物增加的全部产量。目前国内正加快降解膜研制, 但存在成本大和完全降解的技术问题。克服地膜污染、还原土壤净化、维护土地生产能力需要探索新方法。膜下滴灌实际应用存在一些问题: (1) 滴灌系统每次灌水运行时间长因而能耗大; (2) 灌水湿润深度浅不利作物吸收深层土壤水分; (3) 滴灌地膜覆盖增加成本、污染土壤、影响地力。

近年水利工作者对农田节水降耗问题做了不懈努力, 针对果树采用喷灌、滴灌等方法存在用水量多、灌水时长耗能多、灌溉水温低等问题^[14,15], 提出供水与作物灌溉不同步的“蓄流分离式灌溉”方法, 实现灌溉耗时和作业均自动相对独立在田间完成, 改变了传统“供、配、灌、停”同步过程, 有较好的节水增产节能降耗提升灌溉水温效果, 但灌溉仍为地表实施, 且主要针对果树的微灌方法^[16,17]。

地下滴灌(渗灌)是一种高效节水方法, 具有改善调节土壤水、肥、气、热循环条件^[18,19]的功能。刘洪光等人^[20,21]研究表明, 地下滴灌可减少地面蒸发, 耕层以下土壤水分与作物根系协调利于节水高产。安俊波等人^[22]进行无膜、覆膜棉花地下滴灌小区试验表明, 薄膜利于棉花及早渡过缓苗期进入生殖生长阶段, 但后期薄膜对棉花总体影响不大; 雷成霞等人^[23]在不同覆膜条件下进行地下滴灌试验表明, 较大灌溉定额利于产量增加, 但对灌水频次高、灌溉时间长、系统能耗问题尚未研究。目前一些学者^[24]多针对常规自流灌溉土壤水资源存贮、调蓄分析, 土壤深层储水具有生物有效性利用潜力。国内外在作物耗水机理等方面做了大量研究^[25,26], 但尚缺乏针对地下滴灌“土壤水库”水肥耦合效应研究。对于滴灌和地下滴灌土壤水分运动, 有学者研究认为^[27]水分运动为三维流态, 入渗过程符合达西和质量守恒定律; 也有学者认为^[28]灌水后一定时期内靠近毛管土壤水处于饱和状态, 远离部分处于非饱和状态; 孙连宝等人^[29]通过地下滴灌滴头灌水试验表明, 灌水初期流量对湿润锋运移速率影响最大, 超过一定时间后, 各方向运移速率趋于一致, 流量越大滴头附近高含水率范围增大, 相同剖面处含水率也大, 地下滴灌具有耕层土壤渗流流体力学特征。因此, 地下滴灌与地表式滴灌或膜下滴灌的土壤水分相

比, 具有显著的渗滴灌溉水分特征。

地下滴灌的渗滴灌溉深层土壤供给水分贮存多, 为作物根系深层水分汲取提供了条件, 表层土壤水分和蒸发相对减少, 传统作物播种为浅播3~5 cm, 渗滴灌溉适宜播深15 cm甚至20 cm以上, 否则种子不能及时汲取渗滴水分影响种子萌发出苗, 而深播可降低作物出苗率延缓出苗时间, 减少幼苗干物质积累^[30,31]。钟改荣等人^[32]利用长根茎“早玉系列”玉米品种, 采用地面灌溉播深20 cm时可正常生长且产量正常, 普通玉米品种播深10 cm时出苗率不足40%, 表明不同玉米品种播深有差异^[33]。彭云玲等人^[34]进行播深10~15 cm试验, 随着播种深度增加玉米根长、中胚轴和胚芽鞘呈增加趋势, 15 cm播深可反映不同品种耐深播能力; 关小康等人^[35]在渗灌条件下设3, 5, 7, 9, 11 cm播种深度试验表明, 玉米出苗时间随播种深度增加延长, 3和11 cm播深出苗率和地上部干物质积累量低, 7~9 cm播深出苗率和干物质积累较好。已有研究表明, 渗灌作物播深15 cm甚至20 cm以上试验尚待研究。

滴灌以地表出流局部湿润灌溉, 渗灌在耕层土壤以渗灌出流湿润作物, 形成深层贮水、表土干燥水分蒸发小、渗滴保水、“土壤水库”的渗滴灌溉水分特征, 为综合实施无膜覆盖、作物深播深根、水肥深贮、少频次和适量加大灌水定额及渗灌流量等技术方法, 实现作物节水增效、节能降耗、根除地膜污染、农田生产能力可持续提供了条件。本文运用渗灌具有的渗滴灌溉水分特征, 进行玉米节水降耗试验探析, 为干旱区农业高效节水提质增效提供新途径。

2 材料与方法

2.1 试验区概况

试区位于新疆灌溉中心试验站(昌吉滨湖镇13户村), 87°18'E, 44°01'N, 平均海拔600 m。该区处于天山北坡冲积、洪积平原南缘, 属天山北坡带头屯河流域。年均降水181.7 mm、年蒸发1739.1 mm、年均日照时数7.8 h, 年均气温13.1℃, ≥0℃积温3834.3℃以上, 属典型内陆干旱性气候。棕漠土类土壤质地为中、轻壤土, 0~120 cm土壤干容重1.46~1.65 g/cm³, 耕层1.50~1.60 g/cm³, 0~120 cm田间容积持水量18.8%~23.9%, 耕层20.1%~23.4%。地表水和地下水矿化度分别为0.2和0.6 g/L, 耕层土壤全盐0.12%无盐渍化, 土壤

pH为8.7, 呈碱性. 耕层土壤有机质1.51%, 土壤全氮、全磷、全钾分别为0.09%, 0.07%, 1.51%, 有效氮、磷、钾分别为54.35, 68.73, 479.17 mg/kg, 肥力中偏下, 表现缺氮少磷钾丰富特点. 试区地下水埋深3.5~4.5 m, 供水井1眼单井出流量126 m³/h, 自动气象观测站1处, 2组防雨棚地下廊道试验测坑, 农田面积20 hm², 水利灌溉设施配套良好.

2.2 试验设计

2016~2017年进行无膜渗墒灌溉与膜下滴灌对比试验, 选择播种深度、渗灌埋深、灌水定额、灌水频次4因素, 每个因素设置3个水平, 安排膜下滴灌、浅埋无膜渗灌2个处理对照. 对照处理选择当地代表性灌溉方式和用水情况, 采用灌溉定额4500 m³/hm², 10次灌水; 渗墒灌溉试验设6~8次灌水, 灌水定额450, 600, 750 m³/hm², 相应灌溉定额2700~6000 m³/hm². 采用正交方法设计试验(表1), 每处理2次重复共安排22个小区, 每个小区长41 m、宽2 m, 试区净面积0.18 hm², 加保护带试区总面积0.20 hm², 以随机区组法进行田间试验.

2.3 试验过程

试验采用大禹节水公司生产的地埋内镶式滴灌带, 可埋深10~40 cm, 滴灌管内径25 mm、壁厚0.4 mm, 滴灌带间距0.5~0.7 m, 灌水器(滴头)间距

30~40 cm, 滴头流量2.4~2.8 L/h. 渗墒灌溉试验渗灌管埋深15~40 cm, 渗灌管行距70 cm, 灌水器间距30 cm, 渗流量2.8 L/h; 对照的膜下滴灌采用当地应用的迷宫滴头出流滴灌带, 毛管间距1 m, 比渗墒灌溉略长, 滴头间距20 cm比渗墒灌溉间距略小, 可使试验与对照田间作物用水一致. 对照处理滴头流量2.1 L/h, 渗墒灌溉及膜下滴灌田间灌溉工作压力150 kPa.

供试玉米华西146品种, 4月15日播种, 9月5日收获, 株距25 cm, 行距35 cm, 种植密度45000株/hm², 作物播时播量、栽培方式、施肥(药)种类数量等农业技术, 均按当地大田作物生产管理, 主要施用尿素和二铵, 施肥量375 kg/hm², 用1%浓度喷药消除玉米虫害.

试验观测气象数据由自动气象站采集, 试验处理小区灌溉水量由水表控制计量, 每个处理小区以滴头为中心等距离20 cm固定埋设2处土壤含水率观测管, 用TDR水分仪结合取土样烘干法对0~100 cm土层(每层20 cm), 每次灌水或降水前后加测土壤含水率. 按《灌溉试验规范》^[36]要求在作物不同生育期阶段, 采用小区1 m²样点3处取均值观测玉米生育期、群体密度、株高、叶面积动态, 玉米根质量根长及切片直径细胞量水分生理, 在苗期、抽穗期和灌浆期, 采用开挖剖面法取玉米根部活性样品, 送新疆大学重点实验室用XK-L2000系列生物显微镜观测玉米根系横切面生长细胞量. 玉米成熟后每个小区人工收割脱粒晾晒干净后进行千粒重、产量考种. 为了解收获前后土壤

表1 田间灌溉试验因素与设计水平

水平	试验因素				
	播种深度 (cm)	渗灌埋深 (cm)	灌水定额 (m ³ /hm ²)	灌水次数	说明
处理1	10	20	750	6	深埋无膜渗墒灌溉
处理2	10	25	600	7	深埋无膜渗墒灌溉
处理3	10	30	450	8	深埋无膜渗墒灌溉
处理4	15	20	600	8	深埋无膜渗墒灌溉
处理5	15	25	450	6	深埋无膜渗墒灌溉
处理6	15	30	750	7	深埋无膜渗墒灌溉
处理7	20	20	450	7	深埋无膜渗墒灌溉
处理8	20	25	750	8	深埋无膜渗墒灌溉
处理9	20	30	600	6	深埋无膜渗墒灌溉
对照CK ₁	5	0	450	10	常规膜下滴灌
对照CK ₂	5	15	450	10	浅埋无膜渗灌

理化变化状态, 进行土壤容重、田间持水量、小区耕层土壤有机质、有效氮、磷、钾取样分析。

2.4 分析方法

耗水量按水量平衡公式计算:

$$M = P_r + W + K - C, \quad (1)$$

式中, M 为耗水量, mm; P_r 为有效降水量, mm; W 为灌水量, mm; K 为地下水补给量, mm; C 为时段内排水量(地表排水与下层排水之和), mm. 试区地下水埋深大于3 m无补给, $K=0$, 试区为干旱纯灌溉, 不存在农田地表与下层排水问题, $C=0$. 有效降水量 P_r 以降水前后观测土壤含水率计算, 据试验灌水前后观测土壤含水率按下式计算:

$$\Delta S = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \cdot (\beta_{i1} - \beta_{i2}), \quad (2)$$

式中, i 为土层号数; n 为土层总数; γ_i 为第 i 层土壤干容重, g/cm³; H_i 为第 i 层土壤厚度, cm; β_{i1} 为第 i 层土壤时段始含水率(干土重的%); β_{i2} 为第 i 层土壤时段末含水率(干土重的%).

作物耗水强度按下式分析:

$$F = \sum_{i=1}^n M_i / N_i, \quad (3)$$

式中, F 为作物耗水强度, mm/d; i 为作物生长 i 阶段; n 为作物生长划分阶段数目; M_i 为作物生长 i 阶段耗水量, mm; N_i 为作物生长 i 阶段天数, d.

干旱区耗水量为作物生长期需水量、有效降水量、深层土壤贮水量之和, 其中, 作物需水量由下式计算:

$$ET = ET_0 \cdot K_c, \quad (4)$$

式中, ET 为作物需水量, mm; K_c 为作物系数, 玉米全生育期作物系数为0.75~1.10, 以本地玉米多年灌溉试验取0.87^[37]; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, mm, 按彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式^[38].

试验玉米灌溉水利用效率按下式计算:

$$\eta = Y_i / W, \quad (5)$$

式中, η 为灌溉水利用效率, kg/m³; Y_i 为作物单产, kg/hm²; W 为作物全生育期灌溉用水量, m³/hm².

利用SPSS19.0对试验数据进行方差 F 显著性检验, 采用Excel 2007绘制图表。

3 结果与分析

3.1 渗滴灌溉水分

图1为2016~2017年玉米不同生长期各试验处理灌水后土壤水分观测结果, 可看出, 渗滴灌溉耕层20 cm含水率11.8%较低, 40~80 cm含水率渐增且稳定在13.9%~14.6%, 深层100 cm含水率增至23.2%底墒水分积累, 随着土层增加呈现耕层水分由小渐增趋势; 对照膜下滴灌CK₁耕层20 cm含水率18.5%, 比渗滴灌溉含水率高36%, 40~80 cm含水量明显降至10.8%~13.5%略低于渗滴灌溉, 土壤水分呈现耕层大, 中层及以下由小渐增, 但相对渗滴灌溉增量小; 对照浅埋无膜渗灌CK₂耕层20 cm含水率14.0%, 比渗滴灌溉含水率多18%, 但比CK₁含水率减少24%; 40~80 cm含水率明显降至10.3%~13.1%略低于渗滴灌溉。

以上观测表明, 渗滴灌溉水分耕层小, 40~80 cm水分增加, 对照CK₁, CK₂在耕层和40~80 cm土壤水分变化与渗滴灌溉恰恰相反, 深层100 cm渗滴灌溉含水量与对照CK₁, CK₂有相同表现, 但明显高于对照。渗滴灌溉上层土壤含水率低, 可减少农田地表水分无效蒸发, 中下层水分多土壤贮水保墒好, 利于作物深根汲水提高土壤水分利用效率, 为“土壤水库”效应提供了条件。

渗滴灌溉埋深20~30 cm, 试验观测玉米平均主根28.9 cm须根长75.1 cm, 对照膜下滴灌CK₁主根20.0 cm须根长43.3 cm, 对照浅埋无膜渗灌CK₂埋深15 cm, 主根23.5 cm须根长50.0 cm, 渗滴灌溉比对照CK₁和CK₂根系长度明显增加73%和50%。表2由式(1)~(5)分析的渗滴灌溉与对照灌水前后土壤水分运移、水分利用、耗水强度。分析看出, 随着土层增加渗滴灌水后土壤水分由50.2 mm增至101.5 mm, 表现为上层小、中下层渐增线性式运移, 不同层次水分分布: 耕层20 cm占15.3%, 40~60 cm占34.7%, 80~100 cm占50.0%; 对照CK₁和CK₂土壤水分变化, 分别由78.7和59.6 mm增至92.4和98.6 mm, 呈现耕层水分多、中层减少、下层增加非线性运移; CK₁不同层次水分分布: 耕层20 cm占24.1%, 40~60 cm占29.7%, 80~100 cm占46.3%; CK₂不同层次水分分布: 耕层20 cm占19.8%, 40~60 cm占32.8%, 80~100 cm占47.4%。可以看出, 对照的不同土层水分变化接近。

全生育期渗滴灌溉耗水699.7 mm, 需水量

图1 (网络版彩图)不同处理土壤剖面含水率变化。(a) 4月16日出苗期; (b) 5月7日分蘖期; (c) 6月3日拔节期; (d) 7月5日抽穗期; (e) 7月14日开花期; (f) 7月21日灌浆期

663.1 mm, 未用水量36.6 mm占需水量的5.5%; 对照CK₁耗水728.9 mm, 需水量663.0 mm, 未用水量65.9 mm占需水量的9.9%; 对照CK₂耗水680.6 mm, 需水量646.1 mm, 未用水量34.5 mm占需水量的5.3%。分析看出, 渗墒灌溉与对照需水量663~646 mm基本接近, 但未利用的深层土壤水消耗CK₁明显多于渗墒灌溉, 渗墒灌溉和CK₂深层土壤耗水量相差不大。

渗墒灌溉作物耗水强度5.83 mm/d, 其中: 20~40 cm耗水强度0.89~0.99 mm/d较低; 60~80 cm增至1.04~1.12 mm/d; 100 cm最大1.80 mm/d, 呈现上层小、中下层渐增特点。对照CK₁耗水强度6.07 mm/d, 其中: 耕层20 cm耗水强度1.41 mm/d, 40~60 cm降至0.77~0.95 mm/d, 80~100 cm增至1.04~1.65 mm/d, 呈现

上层大、中层小、下层增加, CK₂和CK₁耗水强度具有相似变化, 只是上层耗水强度略低于CK₁。

综上所述, 渗墒灌溉可形成土壤水分由上至下运移, 增加土壤水有效贮量, 表层水分和耗水强度小, 耕层以下及深层水分和耗水强度增幅平稳, 利于提升土壤水利用; 对照CK₁, CK₂表层土壤水分和耗水强度高于耕层以下, 水分蒸发消耗多于渗墒灌溉, 深层土壤水利用相对减少, 地下滴灌形成的渗墒水分运移和贮水特性, 为玉米生长环境创造了条件。

3.2 渗墒灌溉玉米生长动态

玉米播后采用“干播湿出”法, 渗墒灌溉种子播深10~20 cm, 平均出苗率94.2%, 出苗天数10~12 d。对照

表 2 渗墒灌溉与对照土壤水分转化利用分析

处理	土层(cm)	土壤水分运移				全生育期耗水							
		灌后水分 (mm)	水分分布 (%)	对比 (%)		耗水 (mm)	有效降水 (mm)	灌溉水 (mm)	土壤水 (mm)	需水量 (mm)	未用水 (mm)	占需水量 (%)	耗水强度 (mm/d)
				CK ₁	CK ₂								
渗墒灌溉	20	50.2	15.3	-36.1	-15.7	148.1	46.5	64.1	37.5	148.1	0.0	0.0	0.89
	40	55.7	16.9	28.9	6.1	127.0	19.1	71.0	36.8	127.0	0.0	0.0	0.99
	60	58.5	17.8	9.8	25.8	111.6	-	74.7	37.0	111.6	0.0	0.0	1.04
	80	63.2	19.2	8.6	42.4	114.2	-	80.7	33.5	106.0	8.1	7.7	1.12
	100	101.5	30.8	9.9	3.0	198.8	-	129.5	69.3	170.3	28.5	16.7	1.80
	Σ/平均	329.2	100.0	1.1	9.1	699.7	65.6	420.0	214.1	663.1	36.6	5.5	5.83
CK ₁	20	78.7	24.1	-	-	199.3	46.5	101.4	51.3	199.3	0.0	0.0	1.41
	40	43.2	13.3	-	-	105.3	19.1	55.7	30.5	105.3	0.0	0.0	0.77
	60	53.3	16.4	-	-	103.2	-	68.7	34.5	103.2	0.0	0.0	0.95
	80	58.2	17.9	-	-	116.2	-	75.1	41.2	98.7	17.5	17.8	1.04
	100	92.4	28.4	-	-	204.9	-	119.1	85.8	156.6	48.4	30.9	1.65
	Σ/平均	325.7	100.0	-	-	728.9	65.6	420.0	243.3	663.0	65.9	9.9	6.07
CK ₂	20	59.6	19.8	-	-	168.7	46.5	83.0	39.2	168.7	0.0	0.0	1.15
	40	52.5	17.4	-	-	125.0	19.1	73.1	32.8	125.0	0.0	0.0	1.01
	60	46.5	15.4	-	-	90.6	-	64.8	25.9	90.6	0.0	0.0	0.90
	80	44.4	14.7	-	-	91.2	-	61.8	29.4	81.3	9.9	12.2	0.86
	100	98.6	32.7	-	-	205.1	-	137.3	67.8	180.5	24.6	13.6	1.91
	Σ/平均	301.6	100.0	-	-	680.6	65.6	420.0	195.0	646.1	34.5	5.3	5.67

CK₁(膜下滴灌播深5 cm)出苗率97.0%, 出苗天数6~7 d, 对照CK₂(浅埋无膜渗灌播深5 cm, 渗灌埋深15 cm)出苗率95.0%, 出苗天数10 d. 渗墒灌溉玉米不同生长阶段株高、叶面积系数、根长、根干重(表3),

根部生长生理切面直径、细胞量(图2), 与对照CK₁和CK₂差异显著, 表明地下滴灌渗墒灌溉水分充分适应作物生理生长要求.

3.3 玉米产量及效益分析

表4为正交试验统计和式(5)分析结果, 渗墒灌溉

灌水定额450~750 m³/hm², 灌溉定额2700~6000 m³/hm², 平均灌溉定额4200 m³/hm², 产量8906~9863 kg/hm², 平均产量9457 kg/hm², 灌溉水效率1.6~3.3 kg/m³, 平均2.3 kg/m³. 比对照CK₁产量增幅23.68%~26.55%, 平均增产25.23%, 平均节水6.67%, 增产明显; 比对照CK₂平均增产1.07%不明显, 地下滴灌浅埋15 cm不及深埋产量效果好.

由图3看出, 产量随播种深度先降后增, 最高为9652 kg/hm²; 渗灌埋深愈大产量越高, 最高9621 kg/hm²; 随着灌水定额降低, 产量增后下降, 最高

表 3 渗墒灌溉玉米不同生长阶段生长变化^{a)}

处理	5月5日苗期						7月5日抽穗期				7月28日灌浆期			
	出苗天数 (d)	出苗率 (%)	株高 (cm)	叶面积 指数	主根长 (cm)	主根干 重(g)	株高 (cm)	叶面积 指数	主根长 (cm)	主根干 重(g)	株高(cm)	叶面积 指数	主根长 (cm)	主根干重 (g)
渗墒灌	10~12**	94.2*	37.5**	0.094**	10.5	13.8**	198.9**	0.965**	27.7	27.7*	316.7**	1.663*	28.9*	55.3*
CK ₁	6~7	97.0	64.0	0.301	12.5	18.5	258.0	2.003	25.0	37.0	300.0	2.398	20.0	58.5
CK ₂	10*	95.0	59.0*	0.097**	11.5	14.0**	204.0*	0.996**	27.5	28.0*	338.0**	1.715*	23.5	56.0

a)“*”表示F(a=0.05)差异显著; “**”表示F(a=0.01)差异极显著.

图2 不同生育期玉米根部横切面细胞数量及分布. (a) 苗期(5月5日); (b) 抽穗期(7月5日); (c) 灌浆期(7月28日)

为 9522 kg/hm^2 , 对应灌水定额 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 灌水7次产量最高 9615 kg/hm^2 . 这些变化趋势说明, 渗墒灌溉深层土壤水分效应对作物生长产生积极影响. 试验表明, 渗墒灌水7次、灌水定额 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (灌溉定额 $4200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、玉米产量 9615 kg/hm^2 , 平均灌溉水效率 2.3 kg/m^3 较好. 采用播种深度 5 cm , 灌水10次, 灌水定额 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉定额 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的普通地下滴灌, 玉米产量 9354 kg/hm^2 , 平均灌溉水效率 2.1 kg/m^3 . 对照的膜下滴灌灌水10次, 灌水定额 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉定额 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 玉米产量 7552 kg/hm^2 , 平均灌溉水效率 1.7 kg/m^3 . 由此分析, 渗墒灌溉比膜下滴灌减少灌水3次、灌溉定额 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 增加产量 2063 kg/hm^2 , 增产27.3%, 省水6.7%. 种子播深、渗灌埋深因素对产量影响较大, 尚有扩大试验范围寻求最佳产量空间.

试区供水井1眼流量 $126 \text{ m}^3/\text{h}$, 灌溉面积 5.3 hm^2 , 电机功率 30 kW/h , 电价 0.40 元/(kW h) , 平均每次灌水用时 7 h , 用电量 $7 \times 30 = 210 \text{ kW}$, 单位面积电费 $210 \times 0.40 = 84 \text{ 元}$ (15.8 元/hm^2). 按目前玉米收购价 2.0 元/kg , 农业水价 0.07 元/m^3 , 地膜成本 1000 元/hm^2 , 种子化肥机耕物化成本按产值50%计算, 渗墒灌溉与

膜下滴灌效益比较(表5)看出, 渗墒灌溉效益 9210 元/hm^2 , 比膜下滴灌增加 3131 元/hm^2 , 增效52%、水费减少7%、电费减少30%, 农田无地膜覆盖, 渗墒灌溉节水增产、节能降耗、无膜环境污染初见成效.

4 结论与讨论

4.1 结论

渗墒灌溉玉米种子播深 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 出苗率93%以上生长正常, 相同农业管理技术条件下, 渗墒灌溉定额 $4200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水7次, 比膜下滴灌 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水10次少灌3水, 灌水频次和灌溉定额分别减少30%和7%, 产量提高25.23%. 玉米渗墒灌溉效益 9210 元/hm^2 , 比膜下滴灌增效52%, 减少水费和电费支出7%和30%. 试验证明, 渗墒灌溉具有节水增产、节能降耗、无膜环境污染的效果.

4.2 讨论

4.2.1 不同灌溉方式的水分运行

常规地面沟畦灌、喷灌、滴灌、膜下滴灌等灌溉

表 4 渗墒灌溉田间正交试验玉米产量分析结果^{a)}

试验号	播种深度 (cm)		渗灌埋深 (cm)		灌水定额 (m^3/hm^2)		灌水频次		平均产量 (kg/hm^2)	灌溉定额 (m^3/hm^2)	灌溉水效率 (kg/m^3)
	水平	值	水平	值	水平	值	水平	值			
1	1	10	1	20	1	750	1	6	8 987 [*]	4 500	2.0
2	1	10	2	25	2	600	2	7	9 703 ^{**}	4 200	2.3
3	1	10	3	30	3	450	3	8	9 650 ^{**}	3 600	2.7
4	2	15	1	20	2	600	3	8	9 281 [*]	4 800	1.9
5	2	15	2	25	3	450	1	6	8 906 [*]	2 700	3.3
6	2	15	3	30	1	750	2	7	9 630 ^{**}	5 250	1.8
7	3	20	1	20	3	450	2	7	9 511 ^{**}	3 150	3.0
8	3	20	2	25	1	750	3	8	9 863 ^{**}	6 000	1.6
9	3	20	3	30	2	600	1	6	9 582 ^{**}	3 600	2.7
10(CK ₁)	5		0		450		10		7 552	4 500	1.7
11(CK ₂)	5		15		450		10		9 354	4 500	2.1
不同试验因素产量 (kg/hm^2)	A_1	9 447		9 260		9 493		9 158	9 340	4 275	2.2
	A_2	9 272		9 491		9 522		9 615	9 475	4 238	2.2
	A_3	9 652		9 621		9 356		9 598	9 557	4 088	2.3
	$\bar{A}$	9 457		9 457		9 457		9 457	9 457	4 200	2.3
渗墒灌溉与对照增幅 (%)	A_1	—		—		—		—	23.68	-5.00	—
	A_2	—		—		—		—	25.46	-5.82	—
	A_3	—		—		—		—	26.55	-9.16	—
	$\bar{A}$	—		—		—		—	25.23	-6.67	—
	A_1	—		—		—		—	0.81	-5.00	—
	A_2	—		—		—		—	1.29	-5.82	—
	A_3	—		—		—		—	2.17	-9.16	—
	$\bar{A}$	—		—		—		—	1.07	-6.67	—

a) “*” $F(\alpha=0.05)$ 差异显著; “**” $F(\alpha=0.01)$ 极显著; “ $A_1\sim A_3$ ”为表中每列中相同试验因素对应产量相加后除以3值; “ $\bar{A}$ ”为“ $A_1\sim A_3$ ”产量之和的平均。

方式不同,但水源地面式、由表至下水分入渗方式未变。沟畦灌、喷灌等灌水过程存在地表径流。滴灌为局部湿润浅层小定额($300\sim 450\text{ m}^3/\text{hm}^2$)、小滴头流量($1.5\sim 2.1\text{ L/h}$)、多灌水频次($10\sim 15$ 次)、每次灌水时间长($5\sim 7\text{ h}$)、灌水周期短($7\sim 10\text{ d}$)、灌溉期运行时间长增加能耗。浅层灌水,作物根系生长浅,深层土壤水分利用低,加大灌水定额和滴头流量可减少灌水频次及能耗,但因滴灌入渗地表湿润面扩展积水甚至出现径流,土壤深层贮水补给缓慢不足。研究表明^[39,40],常规灌以及滴灌、膜下滴灌局部湿润浅层灌,可使深层土壤水分通过毛管上升蒸发至膜下空间并在上层凝结,使得上层水分增加而深层水分减少,土壤水下渗速度减缓贮水量少,作物生长“土壤水库”效应难以发挥。

无膜地下渗墒灌溉具有自身水分特征: (1) 灌溉水出流于深层土壤形成地下渗灌不产生地表径流,有利于实施较大规格滴头出流适当增加灌水定额,减少灌水频次、灌水时间,以期获得节能降耗效果; (2) 深层灌溉水入渗速率平稳湿润面均匀促进土壤贮水能力,有利于作物根系深扎及生长的水肥耦合响应; (3) 渗墒灌溉农田表土相对自然干燥,减少土壤水分蒸发提升土壤水保墒。渗墒灌溉为“土壤贮水-无膜栽培-种子深播-少灌次较大定额灌溉-节能降耗”提供了条件。

4.2.2 地下渗墒灌溉应用

本试验取得了初步效果但尚需进一步研究: (1) 作物播深尺度与墒情对接将影响种子出苗率高,为了

图3 渗墒灌溉不同因素与产量关系

提高渗墒灌溉条件下的种子出苗率, 需进行地下滴灌不同土层入渗并结合农机作业应用研究. (2) 试验观测发现, 种子播深和渗灌埋深对产量影响明显, 需进

表5 渗墒灌溉与膜下滴灌浅埋渗灌效益比较(元)

灌溉方式	玉米 产值	水费	电费	物化 成本	地膜	效益
渗墒灌溉	19230	294	110.6	9615	0	9210
CK ₁	15104	315	158	7 552	1000	6079
CK ₂	18708	315	158	9 354	0	8881
比CK ₁ (%)	27.3	-7	-30	27.3	-100	51.5
比CK ₂ (%)	2.7	-7	-30	2.7	0	3.7

一步实施中试检验. (3) 目前地下滴灌农田铺设需大马力农机作业成本大, 渗灌带长年埋设地下运行管护难度大, 制约了渗墒灌溉大面积应用, 需要创新地下渗灌布局 and 作业方法研究. (4) 渗墒灌溉深墒水分是区别滴灌浅层局部湿润微灌的“分水岭”, 本试验研究了渗墒垂直方向水分运行特征, 水平方向水分运行及贮量对作物生长影响尚待深入分析. (5) 提升节水增产潜力的渗墒播种施肥同步和不同量级水肥耦合试验尚需探究.

参考文献

1 新疆水利厅规划计划处. 新疆水利统计资料汇编. 乌鲁木齐: 新疆水利厅, 2016. 96-107

2 周和平, 兰玉军. 膜下滴灌条件下水盐运移研究综述. 节水灌溉, 2006, 4: 8-13

3 周和平, 王少丽, 等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究. 水利学报, 2013, 44: 1380-1388

4 李显激, 石建初, 左强. 新疆棉花膜下滴灌技术存在的问题改进措施. 农业工程, 2012, 2: 29-35

5 Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 1998, 115: 306-311

6 Stirzaker R J, Passioura J B. The water relations of the root-soil interface. *Plant Cell Environ*, 1996, 19: 201-208

7 王亮, 林涛, 严昌荣, 等. 地膜残留量对新疆棉田蒸散及棵间蒸发的影响. 农业工程学报, 2016, 32: 120-128

8 Anikwe M A N, Mbah C N, Ezeaku P I, et al. Tillage and plastic mulch effects on soil properties and growth and yield of cocoyam (*Colocasia esculenta*) on an ultisol in southeastern Nigeria. *Soil Tillage Res*, 2007, 93: 264-272

9 Mahajan G, Sharda R, Kumar A, et al. Effect of plastic mulch on economizing irrigation water and weed control in baby corn sown by different methods. *African J Agric Res*, 2007, 2: 19-26

10 董合干, 刘彤, 李勇冠, 等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响. 农业工程学报, 2013, 29: 91-99

11 梁志宏, 王勇. 我国农田地膜残留危害及防治研究综述. 中国棉花, 2012, 39: 3-8

12 严昌荣, 王序俭, 何文清, 等. 新疆石河子地区棉田土壤中地膜残留研究. 生态学报, 2008, 28: 3470-3474

13 毕继业, 王秀芬, 朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响. 农业工程学报, 2008, 24: 172-175

14 吴江宁, 周和平, 徐小波. 自流蓄灌节水新技术的初步研究. 节水灌溉, 2004, 4: 16-18

15 周和平, 等. 蓄流灌溉节水节能机理研究. 灌溉排水学报, 200, 5: 65-68

16 周和平, 徐小波, 加帕尔·肉孜. 蓄流灌溉技术试验分析. 灌溉排水学报, 2007, 26: 89-92

17 吴旭春, 周和平. 蓄流灌溉农业节水技术模式研究与应用. 人民黄河, 2016, 38: 134-138

18 Helms T C, Deckard E L, Goos R J, et al. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. *Agronomy J*, 1996, 88: 662

19 王建东, 龚时宏, 马晓鹏, 等. 地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证. 水利学报, 2010, 41: 368-373

- 20 刘洪光, 郑旭荣, 王振华, 等. 地下滴灌不同灌水量对棉花耗水量和产量影响研究. 节水灌溉, 2009, 2: 11–13
- 21 王振华, 郑旭荣, 安俊波, 等. 新疆棉花地下滴灌应用发展对策. 节水灌溉, 2008, 10: 16–18
- 22 安俊波, 王振华, 温新明, 等. 不同栽培方式对地下滴灌棉花形态指标及产量的影响. 灌溉排水学报, 2010, 29: 93–96
- 23 雷成霞, 王振华, 何新林, 等. 不同灌水次数对地下滴灌无膜移栽棉花生长发育和产量的影响. 中国农村水利水电, 2010, 8: 21–25
- 24 孟春红, 夏军. “土壤水库”储水量的研究. 节水灌溉, 2004, 4: 8–10
- 25 李全起, 刘孟雨, 董宝娣, 等. 农田深层土壤水利用现状与研究趋势. 中国农学通报, 2007, 23: 599–602
- 26 李红, 罗金耀. 地下滴灌条件下土壤水分研究概况. 节水灌溉, 2005, 3: 26–29
- 27 冯江, 李道西, 陈思翌. 滴灌土壤水分运动研究进展. 节水灌溉, 2011, 9: 36–41
- 28 件峰彭, 贵芳, 吕谋超, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动模型. 灌溉排水, 1996, 3: 24–29
- 29 孙连宝, 罗金耀, 李小平. 流量对地下滴灌土壤水分运动的影响研究. 节水灌溉, 2012, 9: 41–44
- 30 Rebetzke G J, Bruce S E, Kirkegaard J A. Longer coleoptiles improve emergence through crop residues to increase seedling number and biomass in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil*, 2005, 272: 87–100
- 31 Sanusan S, Polthanee A, Seripong S, et al. Seedling establishment and yield of direct-seeded rice under different seeding depths. *KhonKaen Agr*, 2009, 37: 15–22
- 32 钟改荣, 白永新, 孟俊文. 浅谈抗旱耐深播高产玉米新品种的利用与开发. 玉米科学, 1998, 2: 29–31
- 33 岳丽杰, 文涛, 杨勤, 等. 不同播种深度对玉米出苗的影响. 玉米科学, 2012, 20: 88–93
- 34 彭云玲, 杨芳林, 赵小强, 等. 不同玉米自交系耐深播能力的差异分析. 干旱地区农业研究, 2014, 32: 25–34
- 35 关小康, 杨明达, 白田田, 等. 适宜深度提高地下滴灌夏玉米出苗率促进苗期生长. 农业工程学报, 2016, 32: 75–80
- 36 中华人民共和国水利行业标准. 灌溉试验规范(SL 13-2015). 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 6–9
- 37 新疆滴灌作物需水量与灌溉制度试验研究成果汇编. 新疆水利厅, 2017. 41–42
- 38 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. 30–34
- 39 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 春玉米不同生育期土壤湿润层深度调控的稳产节水效应. 农业工程学报, 2016, 32: 125–132
- 40 张建军, 郭天文, 樊廷录, 等. 农用地膜残留对玉米生长发育及土壤水分运移的影响. 灌溉排水学报, 2014, 33: 100–103

Infiltration of irrigation water and energy saving test of maize

ZHOU HePing¹, ZHAO JingHua², ZHANG Na¹, ZHAI Chao¹ & LIU YuFu³

¹ Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management Station, Urumqi 830000, China;

² College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

³ Xinjiang Institute of Water Conservancy and Hydropower, Urumqi 830049, China

In view of the existing under mulch drip irrigation frequency, high energy consumption, low utilization rate of shallow soil moisture, plastic pollution problem, the irrigation infiltration characteristics of subsurface drip irrigation on irrigation with depth, irrigation quota, irrigation frequency, sowing depth of 4 factors and 3 levels for infiltration irrigation and CK₁ orthogonal method (drip irrigation sowing depth of 5 cm), CK₂ (sowing depth 5 cm membrane infiltration depth 15 cm) contrast test of maize field. The results show that: (1) no membrane infiltration irrigation corn average germination rate is 94.2% and the average germination rate of CK₁ and CK₂ between 97% and 95%, growth stage of maize plant height, leaf area index, root length, root dry weight, root diameter, cell physiology section was lower than that of CK₁ and CK₂, but with the difference of fertility to corn especially the mid asymptotic root length, root dry weight was higher than that of the control, the growth of normal corn sowing; (2) moisture infiltration irrigation quota of 4200 m³/hm² irrigation 7 times, reduced by 30% and 7% respectively compared with CK₁ irrigation with 10 times irrigation quota of 4500 m³/hm², but the maize were significantly increased by 25.23%, and CK₂ were not obviously, infiltration irrigation can reduce the irrigation frequency water quota and energy saving; (3) infiltration irrigation soil moisture and crop water consumption intensity showed a small increase in topsoil, lower steady state and just on the contrary, reflects the infiltration of irrigation soil moisture soil moisture diffusion drying operation Small and deep moisture effect, provides a useful exploration for energy-saving and environment-friendly agricultural efficient water-saving irrigation quality and efficiency.

infiltration irrigation, deep maize, without plastic film pollution, energy saving

doi: [10.1360/N092018-00028](https://doi.org/10.1360/N092018-00028)