

喷灌条件下耕作方式对土壤水分均匀性与冬小麦水分利用效率的影响

刘文涛, 安振, 张梦坤, 朱树伟, 李耕, 高天平, 刘振, 宁堂原

(作物生物学国家重点实验室, 农业部作物水分生理与抗旱种质改良重点实验室, 山东农业大学农学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为研究喷灌均匀系数对土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响, 进一步探讨喷灌条件下适宜耕作措施, 于 2018—2019 年冬小麦生长季进行试验, 试验设置旋耕(RT)、深松(ST)、深翻耕(CT)3 种耕作处理, 在每个处理选取 18 m×18 m 区域将其划分为 9 个 6 m×6 m 的小区作为试验区。结果表明: 在 3 种耕作方式下历次喷灌均匀系数均值在 63.91%~76.83%, 而表层土壤含水量均匀系数均值依然可以达到 84.20%~89.83%, 较前者高 14.48%~31.75%; 冬小麦产量均匀系数较历次灌溉均匀系数均值高出 9.99%~23.79%, 比累计灌溉均匀系数低 2.11%~7.85%, 与表层土壤含水量均匀系数均值相差 0.82%~6.04%。与 RT 相比, ST 和 CT 处理产量分别提高 9.38%, 13.22%, 水分利用效率分别增加 10.61%, 12.88%。即相较于历次灌溉均匀系数, 冬小麦产量均匀系数受累计灌溉均匀系数与表层土壤含水量均匀系数均值影响更大, 且 ST、CT 为该灌溉条件下适宜的耕作方式。

关键词: 喷灌; 均匀系数; 土壤含水量; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S275.5; S157.4⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0282-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.042

Effects of Tillage Methods on Soil Moisture Uniformity and Water Use Efficiency of Winter Wheat Under Sprinkler Irrigation

LIU Wentao, AN Zhen, ZHANG Mengkun, ZHU Shuwei, LI Geng,

GAO Tianping, LIU Zhen, NING Tangyuan

(State Key Laboratory of Crop Biology, Key Laboratory of Crop Water Physiology and Drought-Tolerant Germplasm Improvement, Ministry of Agriculture, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effects of sprinkler irrigation uniformity coefficient (CU) on soil moisture, crop yield and water use efficiency, and to explore the suitable tillage patterns under sprinkler irrigation conditions. Field experiments, which included rotary tillage (RT), subsoiling (ST) and conventional tillage (CT), were conducted during the winter wheat growing season in 2018—2019 with three plots of 18 m×18 m. Each plot was subdivided into 9 subplots of 6 m×6 m. The results showed that the average CU of sprinkler irrigation varied between 63.91%~76.83%, while the CU of soil moisture varied between 84.20%~89.83%, which were 14.48%~31.75% higher than the former. The CU of winter wheat yield were 9.99%~23.79% higher than the average CU of sprinkler irrigation, 2.11%~7.85% lower than the cumulative irrigation CU, and 0.82%~6.04% different from the averaged values of soil moisture CU. Compared with RT treatment, the yield of winter wheat in ST and CT treatments increased by 9.38% and 13.22%, respectively, and the water use efficiency increased by 10.61% and 12.88%, respectively. That was, compared with the sprinkler irrigation CU, the CU of winter wheat yield were more affected by those of the cumulative irrigation CU and the averaged values of soil moisture CU. ST and CT treatments were the suitable farming method under the sprinkler irrigation condition.

Keywords: sprinkler irrigation; uniformity coefficient; soil moisture content; yield; water use efficiency

收稿日期: 2019-09-16

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503121-05); 山东省 2017 年度农业重大应用技术创新项目

第一作者: 刘文涛(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高产高效栽培研究。E-mail: 834666015@qq.com

通信作者: 宁堂原(1976—), 男, 教授, 主要从事高效农作制度、资源高效利用研究。E-mail: ningty@163.com

农业用水是我国经济社会用水的重要组成部分,2018 年全国总用水量为 6 015.5 亿 m^3 ,其中农业用水量 3 693.1 亿 m^3 ,占总用水量的 61.4%,耕地实际灌溉用水量 5 475 m^3/hm^2 ,农田灌溉水有效利用系数 0.55^[1],与发达国家 0.7~0.8 的利用系数依然有较大差距,节水灌溉在我国依然有很大发展潜力。在全国水资源总量有限的前提下,既要保证粮食稳产增产,以确保谷物基本自给、口粮绝对安全,又要统筹全国用水量,使得农业用水总量没有增加,推广高效节水灌溉技术是解决这一问题的重要途径之一。

在诸多节水灌溉措施中,喷灌是较先进的一种灌溉方式。相比于传统的地面灌溉,喷灌取消了传统灌溉的输水渠道和田埂,采用管网输水,增大了播种面积,可提高土地利用率,灌溉水利用效率可达 0.85 以上。在灌溉过程中,喷灌对土壤结构影响较小^[2],可以有效地控制土壤水分^[3],提高作物的水分利用效率^[4-5],调节农田小气候^[6-8],促进小麦产量和品质的提高^[9-10]。因此国内外学者做了诸多研究,李久生等^[11]通过设计不同喷灌施肥均匀系数研究发现,在所研究均匀系数范围内,均匀系数对冬小麦产量影响不明显;吕丽华等^[12]对比畦灌和喷灌,认为喷灌可以促进冬小麦叶面积指数增加,在灌水次数较少、灌溉量较低条件下,喷灌处理增产增效显著;Cavero 等^[13]在地中海气候区对苜蓿田间试验研究显示,相较于白天灌溉,夜间进行灌溉水分散失较少,灌溉均匀系数较高。但是喷灌后,降落到地面的水量和土壤水分往往存在较大的不均匀性。这种不均匀性对产量有何影响,如何减少这种不均匀性,目前研究较少。因此,本试验通过对喷灌条件下不同耕作方式对冬小麦季土壤水分分布均匀性、作物产量及水分利用效率影响进行研究,以期对华北地区发展喷灌技术及该灌溉方式下合理耕作方式提供理论及应用指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地位于山东省龙口市北马镇前诸留村(37°37′59″N,120°23′32″E),属温带季风型气候,四季分明,季风进退明显,雨热同期。多年平均降水量 630 mm,而整个冬小麦季降水量仅为 185 mm,降水量难以满足作物生长需要,需要抽取大量地下水进行灌溉,以保证作物正常生长发育。年均气温 12.2 $^{\circ}\text{C}$,全年日照总时间 2 794.2 h,无霜期 190 d,太阳总辐射量 127.8 kJ/cm^2 , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年活动积温 4 444.7 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 3 951.3 $^{\circ}\text{C}$ 。试验区土壤类型为棕壤,试验开始时耕层(0—20 cm)土壤容重为 1.48 g/cm^3 ,有机质含量为 1.31%,速效磷含量为 15.6 mg/kg ,速效钾含量为 51.5 mg/kg 。

试验采用冬小麦—夏玉米一年两熟制,设置深翻耕(CT)、深松(ST)、旋耕(RT) 3 种耕作方式,作业深度分别为 30,35,15 cm(图 1)。小麦播种前玉米根茬 20 cm 秸秆还田。供试冬小麦品种为“烟农 1212”,播种前基施化肥纯 N 总量 110 kg/hm^2 , P_2O_5 总量 112.5 kg/hm^2 , K_2O 总量 158.6 kg/hm^2 ,于拔节期追施纯 N 总量 69.6 kg/hm^2 ,其他管理措施同一般高产田。

试验区灌溉设施为固定管道式高杆喷灌,所用喷头为任丘市程瑞达节水灌溉设备有限公司生产的 40 PY-2 喷头,喷嘴直径为 14.0 mm $\times$ 6.0 mm,喷射仰角为 17°,工作压力 0.4 MPa,射程 25 m,喷头出水量为 14 m^3/h 。喷头组合间距 36 m $\times$ 36 m,为正三角形组合方式,竖管高度 4 m(其中地上部分 3.4 m,地下部分 0.6 m)。在喷灌区域内选取喷头东北方向 18 m $\times$ 18 m 区域作为试验区,将其划分为 6 m $\times$ 6 m 的小区(每个处理 9 个小区)。在每个小区中心地面放置雨量筒,高度为 21.5 cm,开口直径为 16.6 cm,观测记录雨量筒中水量。

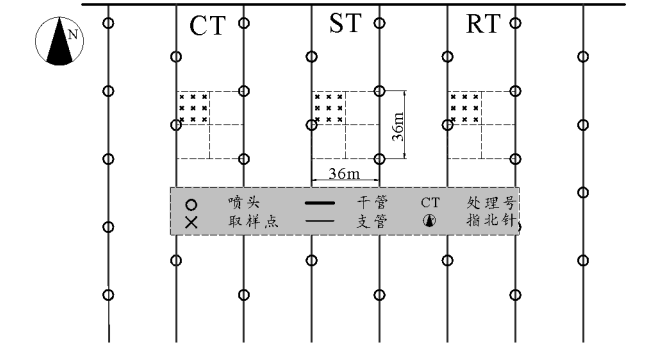


图 1 试验区域布置示意

试验期间月平均降雨量及气温见图 2。与冬小麦季多年平均降雨量 185 mm 相比,2018—2019 年冬小麦生育期降雨量仅 123 mm,属歉水年。月平均气温与往年接近,且无极端天气发生。因泵房水压限制,每次只开同一处理两侧的支管,灌溉在同一天按照 RT、ST、CT 顺序进行,各处理灌溉时长相同。各处理历次灌溉水量及风速见表 1。冬小麦生育期内各处理灌水量均在 120 mm 左右。

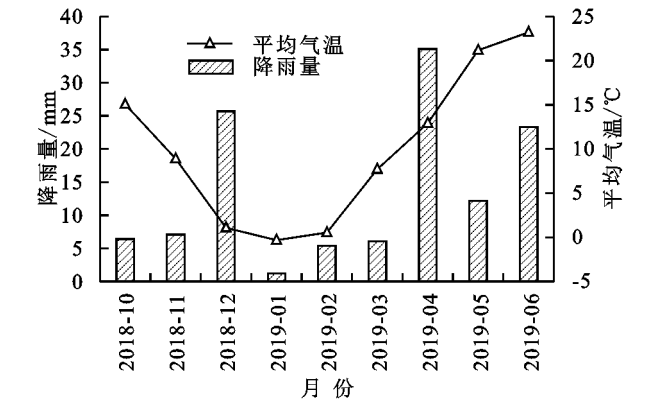


图 2 研究区域小麦生育期月降雨量及月平均气温

表 1 冬小麦生育期内各处理灌水日期及灌水量

灌水日期 (年-月-日)	CT		ST		RT	
	灌水量/	平均风速/	灌水量/	平均风速/	灌水量/	平均风速/
	mm	(m·s ⁻¹)	mm	(m·s ⁻¹)	mm	(m·s ⁻¹)
2018-10-20	30.93	1.10	30.93	1.10	30.93	1.10
2018-12-21	14.18	1.80	13.20	1.80	19.90	1.60
2019-04-01	19.56	2.80	9.14	3.50	14.04	2.20
2019-04-27	32.34	2.20	33.40	2.20	34.71	1.80
2019-05-23	29.83	3.20	32.86	3.40	25.57	2.80
合计	126.85		119.53		125.15	

1.2 测定项目与方法

1.2.1 气象资料、喷灌水量和土壤含水量 降雨量和气温数据通过当地气象局获取;风速、风向通过便携式风速仪测量;喷灌水量通过测定雨量筒中水量换算获得。于灌水前 1 天、灌水后 2 天,在取样点附近,用土钻钻取小麦行间土,每 10 cm 为 1 个层次至 100 cm,烘干法测得土壤含水量。

土壤含水量=(土壤鲜质量-土壤干质量)/土壤干质量×100%

土壤贮水量计算公式为^[14]:

$$W=h\times\rho\times\omega\times10$$

式中:W 为土壤贮水量(mm);h 为土层深度(cm);ρ 为土壤容重(g/cm³);ω 为土壤含水量(%)。

1.2.2 耗水量及作物耗水系数 冬小麦全生育期耗水量计算公式为^[15]:

$$ET=\Delta W+P+U+I-R-F$$

式中:ET 为冬小麦全生育期耗水量(mm);ΔW 为冬小麦 0—100 cm 深度范围内土壤贮水量的变化(mm),即 ΔW=W₂-W₁,W₁ 和 W₂ 分别为作物播前和收获后 0—100 cm 土层土壤贮水量(mm);P 为冬小麦生长期降雨量(mm);I 为灌溉水量(mm);由于本试验喷灌条件下水分入渗是不饱和入渗,无地表径流产生,且该地地下水埋深>2.5 m,故地表径流量 R、地下水补给量 U、深层渗透水量 F 的值均可视为 0。

在每个小区于收获期量取 1 m×1 m 区域,统计其穗数;随机选取 30 穗测定穗粒数;籽粒含水率为 13%时测定千粒重,每个处理重复 3 次。产量水分利用效率的计算公式为^[16]:

$$WUE=Y/ET$$

式中:WUE 为冬小麦水分利用效率(kg/(hm²·mm));Y 为冬小麦产量(kg/hm²)。

1.2.3 喷灌均匀系数、土壤含水量分布均匀系数及冬小麦产量均匀系数 喷灌均匀系数、土壤含水量分布均匀系数及冬小麦产量均匀系数使用克里斯琴森

均匀系数(C_u)来衡量,其计算公式^[16]为:

$$C_u=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^n|h_i-\bar{h}|}{\sum_{i=1}^nh_i}\right)\times100\%$$

式中:C_u 为均匀系数;h_i 为第 i 个测点的灌水量(mm)、土壤含水量(%)或产量(kg/hm²); $\bar{h}$ 为各测点平均灌水量(mm)、土壤含水量(%)或产量(kg/hm²);n 为测点数目。

1.2.4 数据处理 用 Microsoft Excel 2013 整理数据,采用 Origin 2017 软件进行绘图,采用 Matlab r2014b 进行等高线绘图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式下冬小麦生育期土壤水分垂直变化

由图 3 可知,在冬小麦不同生育期内,0—100 cm 土层,随着土层的深入灌溉前土壤含水率总体呈现先增加而后缓慢下降趋势。随着生育期推进,土壤含水量呈现逐步下降趋势,相较于越冬期,拔节期 RT、ST、CT 处理 0—40 cm 土层平均含水量分别下降 31.97%,35.71%,42.78%,60—100 cm 无明显变化。直到灌浆期,0—100 cm 土层土壤含水量较前一时期均呈下降趋势,这与 2018—2019 年冬小麦生长季降雨偏少且气温偏高有关。冬小麦收获时,取样前有 1 次降雨(降雨量 12 mm),各处理 0—40 cm 土层土壤含水量有所回升,但 60—100 cm 土层土壤含水量依然呈现下降趋势。在同一深度上,不同处理之间在 0—40 cm 土层含水量表现为 ST>RT=CT,在 40—60 cm 表现为 CT>ST>RT,在 60—100 cm 表现为 ST>CT>RT,ST 处理较 CT、RT 分别提高 5.99%,9.86%,说明 ST 处理最有利于深层水分保持。

相比于灌溉前,灌水后 2 天,0—40 cm 土层土壤含水量明显高于灌水前,而 40—100 cm 土层土壤含水量没有明显变化。4 次灌水后,RT、ST、CT 处理 0—40 cm 土层土壤含水率平均值较灌水前分别增加 56.67%,45.04%,48.27%,40—100 cm 较灌水前变化不明显。可以看出该灌溉方式下,灌溉水分主要分

布在 0—40 cm 土层,几乎没有深层渗漏产生。同一深度上,不同处理之间在 0—40 cm 土层含水量表现为 $RT>ST>CT$,40—60 cm 土层表现为 $CT>RT>ST$,60—100 cm 范围表现为 $ST>RT=CT$ 。

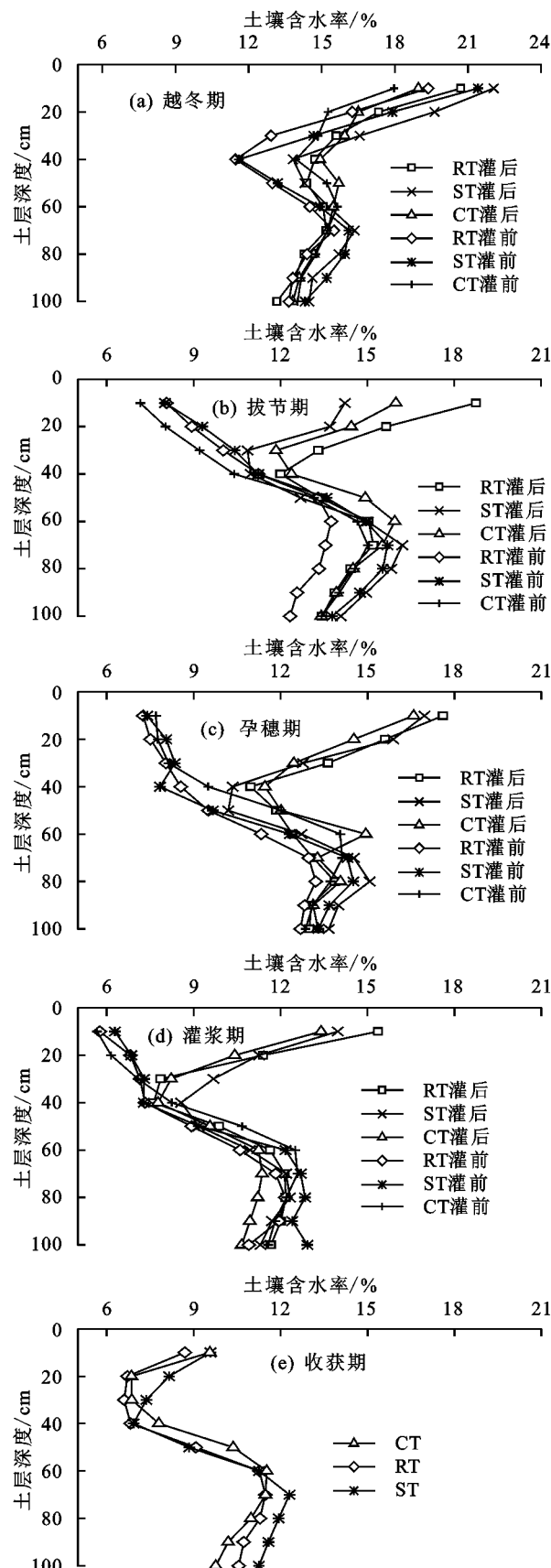


图 3 不同耕作模式灌溉前后 0—100 cm 土壤含水率变化

2.2 不同耕作模式下冬小麦灌溉均匀度及灌后土壤含水量均匀度变化

由图 4 可知,灌溉后 0—20 cm 土层土壤含水量均匀系数均高于灌溉均匀系数,灌溉均匀度越高,土壤含水率均匀度越高。当灌溉均匀度超过 80% 时,土壤含水量均匀系数超过 90%,其中越冬期 RT 处理土壤含水率均匀系数达到 94.81%,较灌溉均匀系数 82.66% 提高 14.70%。当喷灌均匀度较低时,土壤含水量均匀度增幅较大,拔节期 RT、ST 处理灌溉均匀系数只有 59.90%,31.59%,对应的土壤含水量均匀度分别达到 88.78%,82.25%,分别提高 48.21%,160.36%。在 4 次灌溉中,RT、ST、CT 处理灌溉均匀系数平均值表现为 $RT>CT>ST$,分别为 76.83%,63.91%,75.74%;土壤均匀系数平均值表现为 $RT>CT>ST$,分别为 89.84%,84.20%,86.70%,分别提高 16.92%,31.75%,14.48%。

2.3 不同耕作模式下喷灌水量均匀系数及作物产量均匀系数变化

从表 2 可以看出,各处理累计灌溉水量均匀系数 CU_2 与历次灌溉均匀系数平均值 CU_1 表现出相同趋势,表现为 $RT>CT>ST$,并且均为 $CU_2>CU_1$,这说明处理内各点在冬小麦生育期内累计受到的灌溉水量比单次灌溉水量均匀系数要高。产量及其构成因素均值的均匀系数高于历次灌溉均匀系数平均值 CU_1 ,数值与累计灌溉水量均匀系数 CU_2 更加接近,各处理间产量均匀系数表现出 $CT>RT>ST$ 。ST 处理虽然历次灌溉均匀系数平均值只有 63.91%,由于历次灌溉时因风速、水压等因素造成水量分布差异,弥补了单次灌溉水量均匀系数较低的状况,使其累计灌溉水量均匀系数依然达到 85.85%。产量均匀系数介于历次灌溉均匀系数平均值和累计灌溉水量均匀系数之间,RT、ST、CT 产量均匀系数分别比历次平均灌溉均匀系数高 9.99%,23.79%,15.42%,比累计灌溉水量均匀系数低 7.40%,7.85%,2.11%。

图 5 为各处理喷灌区域不同位点冬小麦产量构成因素分布情况,图中原点为喷头位置。各处理在穗数平均值上表现出 $ST>CT>RT$,穗数最大区域均出现在喷头正北方向,表现出喷头沿 X 轴向东逐渐减小趋势,均匀系数表现为 $CT=ST>RT$ 。穗粒数平均值为 $CT>ST>RT$,与 RT 相比,CT、ST 处理分别增加 18.41%,8.42%,相较于 ST,CT 和 RT 均匀系数更高,分布更加均匀。对于千粒重而言,RT 最高,CT、ST 处理分别较之减少 10.30%,10.52%。RT 与 ST 均匀系数大小相近,而又都小于 CT 处理。在产量方面,相较于 RT,ST、CT 分别提高 9.38%,13.22%;并且 CT 处理均匀系数最高,较最小的 ST 处理增加 10.50%。

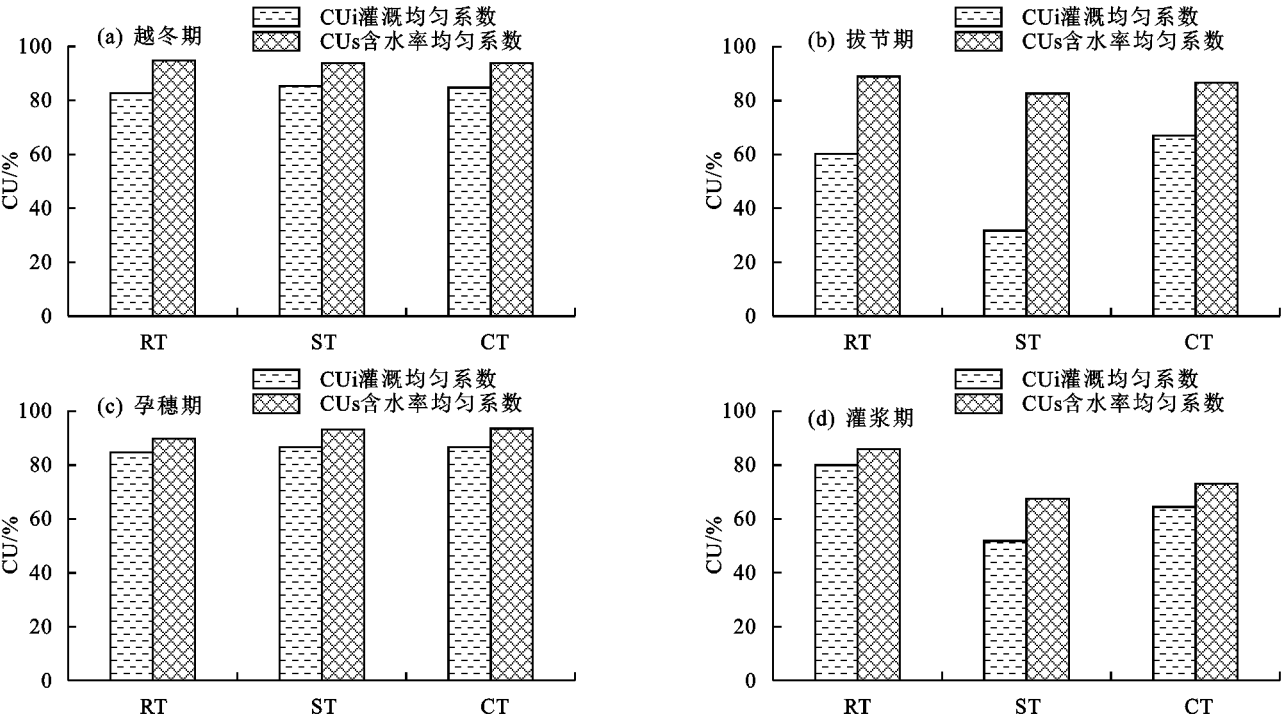


图 4 各处理喷灌均匀系数及灌后 0—20 cm 土层土壤含水量均匀系数

表 2 冬小麦生育期内灌水均匀系数及产量构成因素均匀系数

处理	土壤		累计			总耗水量/mm		穗数/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)		穗粒数		千粒重/g		产量/ (kg·hm ⁻²)		WUE/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
	耗水量/mm		灌水水量/mm			均值	CU	均值	CU	均值	CU	均值	CU	均值	CU	均值	CU
	均值	CU	均值	CU ₁	CU ₂												
RT	51.07	71.03	125.15	76.83	91.26	298.81	94.40	463.15	83.17	30.42	94.81	44.67	91.64	6237.89	84.51	20.73	89.82
ST	51.48	70.39	119.53	63.91	85.85	293.60	92.01	508.51	88.10	32.98	91.85	39.97	91.53	6822.88	79.11	22.93	85.55
CT	52.13	79.45	126.85	75.74	89.30	301.58	94.91	491.29	88.10	36.02	96.22	40.07	93.87	7062.34	87.42	23.40	89.71

注:CU₁为历次灌溉均匀系数平均值(%);CU₂为累计灌溉水量均匀系数(%).

2.4 不同耕作模式下各处理灌水量、耗水量及水分利用效率水平变化

由图 6 可知,各处理土壤耗水量相近,均呈现出喷头附近土壤耗水量较高,离喷头距离越远,土壤耗水量越少。灌溉水量呈现出距离喷头 6~18 m 的弧形区域水量较多,而在距离喷头较远处较少,这与喷头喷灌量程及单喷头水量分布有关;累计灌溉水量为 CT>RT>ST,与 ST 相比,CT、RT 分别增加 6.13%,4.70%。对于冬小麦生育期内总耗水量而言,表现出与灌溉水量类似规律,在距离喷头 18 m 弧线以外耗水量较少,总耗水量为 CT>RT>ST,CT、RT 分别比 ST 增加 2.72%,1.78%。各处理水分利用效率水平分布图跟产量水平相似,产量较高区域也是水分利用效率较高区域,总体呈现出 CT>ST>RT,对比 RT 处理,CT、ST 处理分别增加 12.88%,10.61%。

2.5 冬小麦产量、水分利用效率与耗水量回归分析

由图 7 可知,冬小麦产量、水分利用效率与耗水量呈二次函数关系,由于 2018—2019 年冬小麦生育期降雨量只有 122 mm,较往年明显减少,属于枯水

年,试验区域各样点冬小麦生育期耗水量在 200~350 mm,呈单调递增趋势,为了获得更好效益,土壤耗水量应该大于 350 mm。而水分利用效率增速小于产量增速,耗水量对冬小麦增产呈现递减效应。不同处理间,RT、ST、CT 随着耗水量的增加,产量增幅依次递减,其中 CT 处理在耗水量在 360 mm 附近时达到最大产量,在耗水量 302 mm 左右时,水分利用效率最高。不同处理回归分析差异可能是由于耕作措施不同,影响土壤结构,进一步影响水分在土壤中的分布所造成。

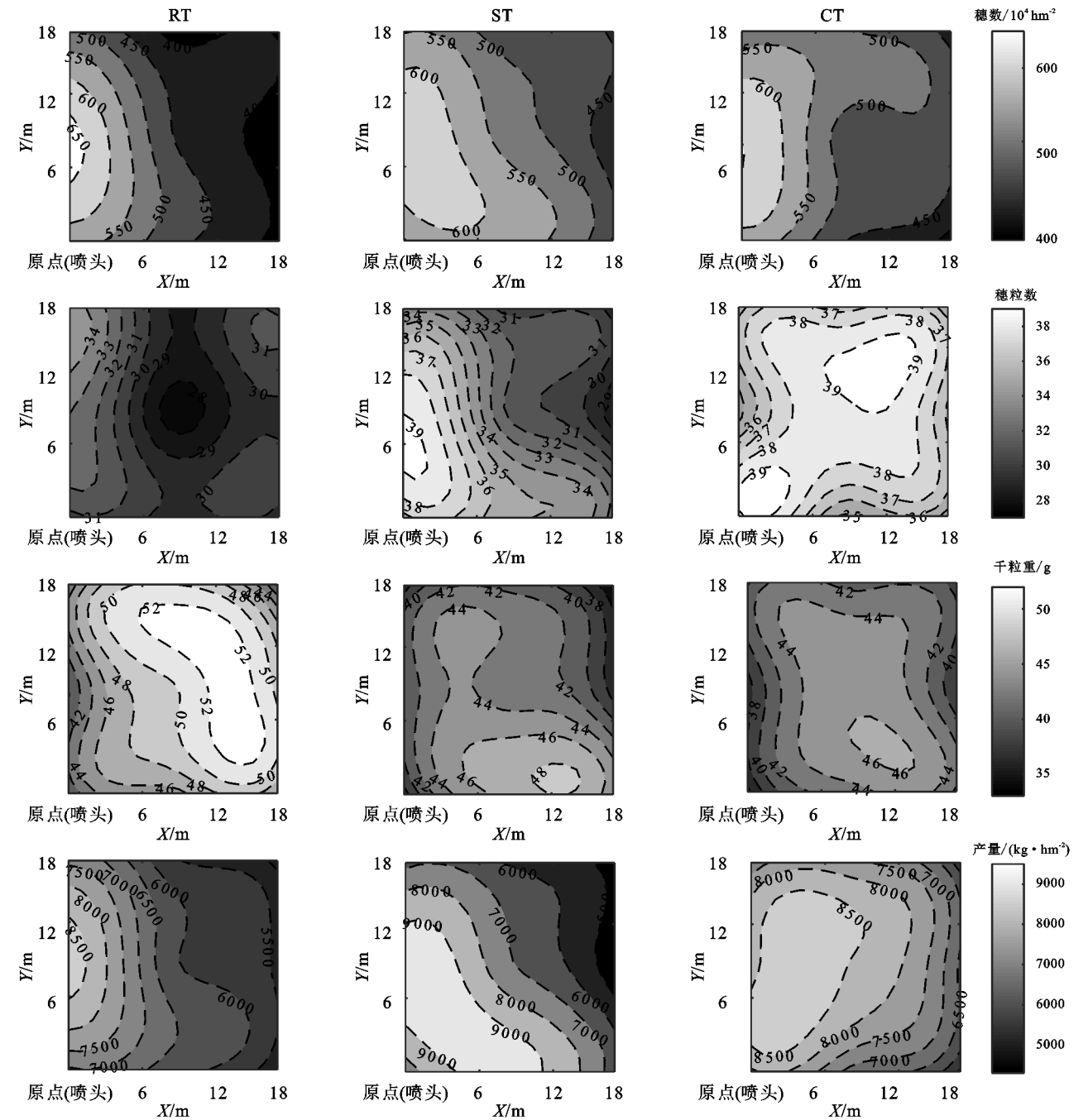
3 讨论

3.1 喷灌均匀系数对土壤含水量均匀系数及作物产量的影响

喷灌均匀系数是指在喷灌面积上水量分布的均匀程度,是衡量喷灌质量的重要指标和喷灌系统规划设计的重要参数。研究喷灌均匀度的目的是为了探求喷灌水量在空间上的分布情况,以便采取最优方式将水均匀地送往田间。水进入田间后,土壤中的水量分布情况与地面上的水量分布情况有一定的差异。Li^[17]研究表明,

灌溉后土壤含水率均匀系数高于灌溉均匀系数,并且作物产量均匀系数均在 90% 以上,较之灌溉均匀系数,作物产量均匀系数受土壤可利用贮水量均匀系数影响更大。本研究中,冬小麦产量均匀系数比历次灌溉均匀系数均值高出 9.99%~23.79%,与累计灌溉均匀系数相差 2.11%~7.85%,与表层土壤含水量均匀系数均值相差 0.82%~6.04%。这可能是因为历次灌溉时水量分布差异弥补了单次灌溉均匀性较低的影响;

降雨量对灌溉水量较少区域作物吸水也有较大补充。Ortiz 等^[18]对喷灌条件下的甜菜产量研究表明,甜菜的最终产量更大程度上取决于作物的土壤水量,而不是喷灌的均匀性,因为当灌溉均匀系数在 80% 左右时,相应的土壤水分均匀系数很容易达到 90%,与本文得出结论一致。由于作物冠层截留及灌溉水量进入土壤再分布影响,使得土壤含水量均匀系数均表现出高于喷灌均匀系数^[19-20]。



注: X 代表距喷头正东方向距离, Y 代表距喷头正北方向距离。下同。

图 5 不同耕作模式下冬小麦产量构成因素水平变化

3.2 不同耕作处理冬小麦产量、水分利用效率与耗水量关系

旱地土壤耕作的目的是建立适宜作物生长的土壤环境条件,增强蓄水保墒能力,促进作物增产^[21]。本研究中 ST、CT 较 RT 处理,冬小麦产量及水分利用效率均有显著提高,这可能是由于前 2 种耕作方

式耕作深度打破了犁底层,促进降雨及灌溉水分入渗,更易于冬小麦根系下扎,从而促进冬小麦产量及水分利用效率提高。郑洪兵等^[22]研究表明,深松作物水分利用效率显著高于免耕及传统旋耕,并且水

分利用效率与产量达到极显著水平,这与本试验结果相同;张丽华等^[23]通过 3 年定位试验研究表明,深松和翻耕均可提高小麦水分利用效率,且深松>翻耕>免耕。

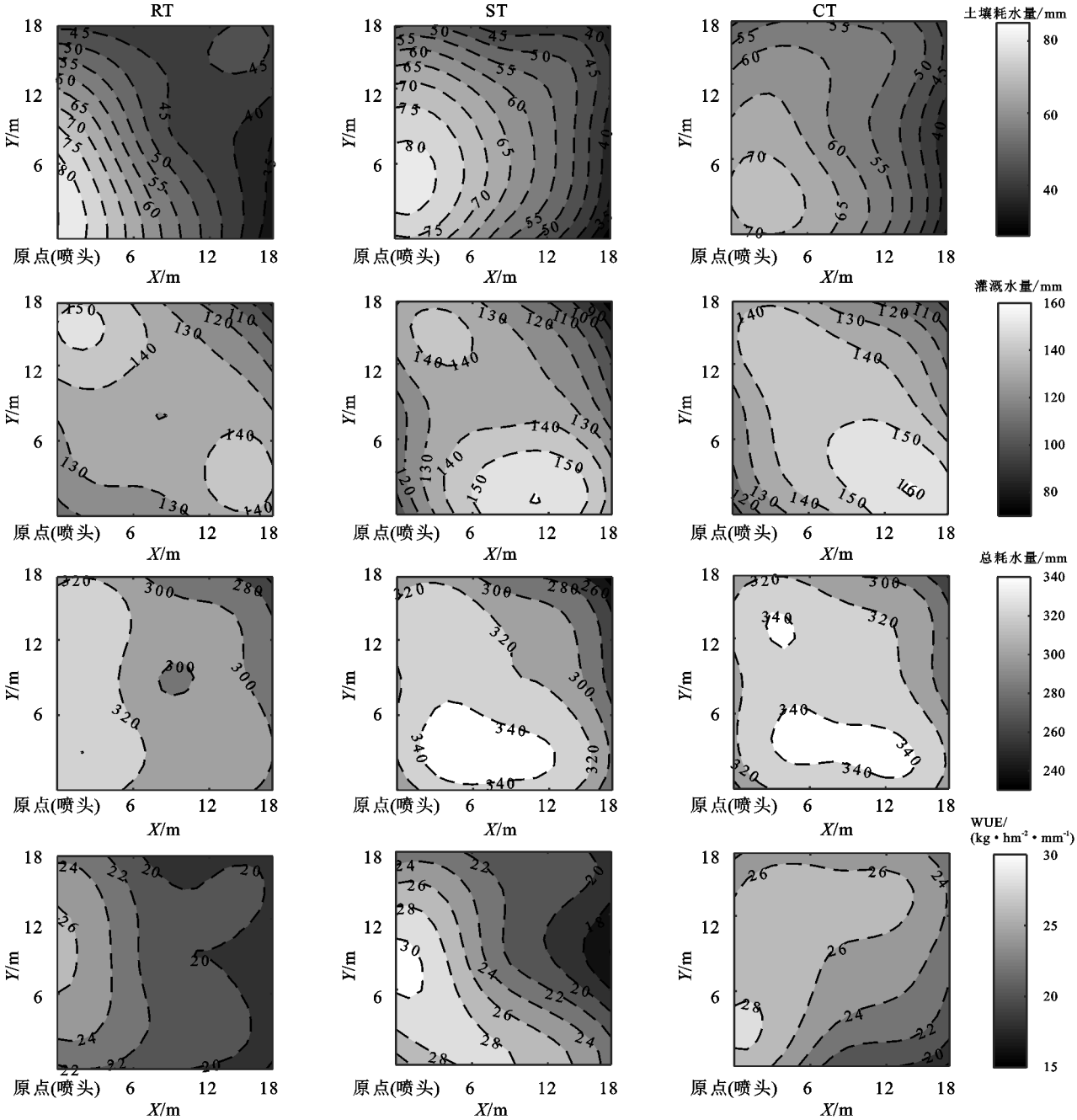


图 6 不同耕作模式下冬小麦耗水量及水分利用效率

耗水量对作物生长、产量、水分利用效率有显著影响,水分胁迫影响植物根系、茎叶以及通气组织等,进而影响植物光合作用,造成植物生长速率及干物质积累缓慢。Liu 等^[24]通过 3 年研究表明,当冬小麦季降雨量在 80.3~143.9 mm 时,其产量及水分利用效率均随降雨量增加而变大,灌溉水量在 80~180 mm 时,生育期总耗水量为 310~441 mm,冬小麦水分利用效率较高。在冬小麦生育期内降雨量为 118.6~137.9 mm 时,生育期内灌水 144~180.3 mm 时,可

以取得较高产量及水分利用效率^[25]。于利鹏等^[26]在喷灌条件下,通过不同灌水量处理,得出在耗水量为 490 mm 时冬小麦产量最高,在耗水量为 350 mm 时,水分利用效率最高,350~490 mm 时,产量和水分利用效率均较高。朱忠锐等^[27]研究表明,喷灌条件下耗水量 361~423 mm 时,有较好的高产效应。本试验研究得出,在冬小麦季降雨量为 123 mm 时,灌溉量为 180 mm 左右,即整个生育期耗水量大于 350 mm 时,有较高产量及水分利用效率。

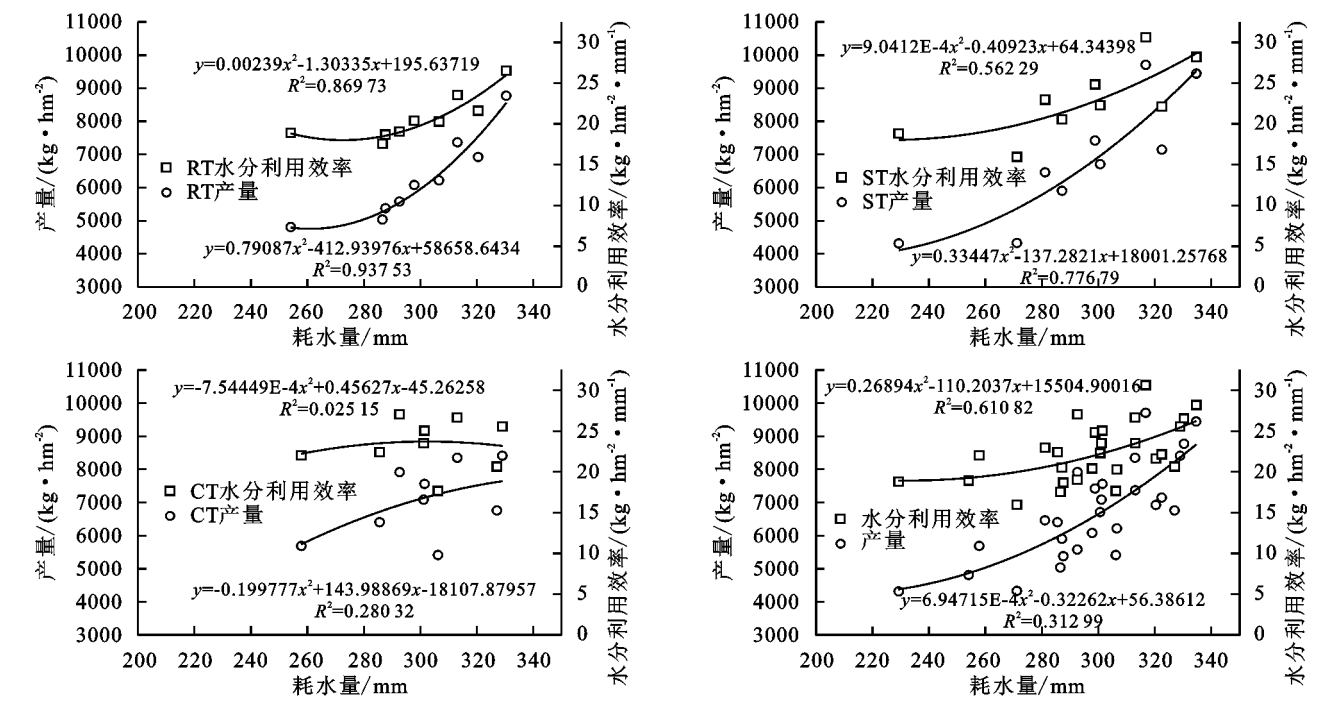


图7 冬小麦产量、水分利用效率与耗水量关系

4 结论

(1) 历次喷灌均匀系数均值在 63.91%~76.83% 波动,表层土壤含水量均匀系数均值在 84.20%~89.83%,土壤含水量均匀系数均值较喷灌均匀系数均值高 20%左右。

(2) 冬小麦产量均匀系数较历次平均灌溉均匀系数高出 9.99%~23.79%,而与累计灌溉均匀系数相差 2.11%~7.85%,与土壤含水量均匀系数均值相差 0.82%~6.04%。即相较于历次灌溉均匀系数,冬小麦产量均匀系数受累计灌溉均匀系数及土壤含水量均匀系数均值影响更大。

(3) 冬小麦产量及水分利用效率受耗水量影响,为了获得较高的产量及水分利用效率,冬小麦生育期耗水量不应低于 350 mm;3 种耕作方式中,ST 与 CT 较 RT 更利于深层土壤水分保持,使得产量及水分利用效率更高,是该灌溉条件下较好的耕作方式。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.2018 年中国水资源公报[EB/OL].[2019-07-23].http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201907/t20190712_1349118.html.

[2] Sun Z, Kang Y H, Jiang S F. Effect of sprinkler and border irrigation on topsoil structure in winter wheat field [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 419-426.

[3] Silva L L. Are basin and reservoir tillage effective techniques to reduce runoff under sprinkler irrigation in Mediterranean conditions? [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 50-56.

[4] Vories E, Stevens W, Rhine M, et al. Investigating irrigation scheduling for rice using variable rate irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 314-323.

[5] Xue J, Ren L. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 350-365.

[6] 赵伟霞,李久生,栗岩峰.考虑喷灌田间小气候变化作用确定灌水技术参数方法探讨[J].*中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1166-1172.

[7] 魏文杰,程知言,胡建,等.定额喷灌对滨海盐碱地的改良效果研究[J].*中国农学通报*, 2018, 34(27): 137-141.

[8] 徐红,龚时宏,贾瑞卿,等.ZY-2 喷头组合喷灌对农田小气候的影响研究[J].*灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 7-9.

[9] 姚素梅,吴大付,杨文平,等.喷灌促进小麦籽粒淀粉积累提高其品质[J].*农业工程学报*, 2015, 31(19): 97-102.

[10] Spanu A, Valente M, Langasco I, et al. Sprinkler irrigation is effective in reducing cadmium concentration in rice (*Oryza sativa* L.) grain: A new twist on an old tale? [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 1567-1581.

[11] 李久生,李蓓,宿梅双,等.冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应[J].*中国农业科学*, 2005, 38(8): 1600-1607.

[12] 吕丽华,李谦,董志强,等.灌水方式和灌溉量对冬小麦根冠结构的影响[J].*麦类作物学报*, 2014, 34(11): 1537-1544.

[13] Cavero J, Faci J M, Martínez-Cob, et al. Relevance of sprinkler irrigation time of the day on alfalfa forage production[J]. *Agricultural Water Management*, 2016,

- 178:304-313.
- [14] 李辉,柴守玺,常磊,等.西北半干旱区秸秆带状覆盖对土壤水分及马铃薯产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):148-156,256.
- [15] 邱野,王瑄.耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):128-137.
- [16] 韩文霆,王玄,孙瑜.喷灌水量分布动态模拟与均匀性研究[J].农业机械学报,2014,45(11):159-164,200.
- [17] Li J S. Increasing crop productivity in an eco-friendly manner by improving sprinkler and micro-irrigation design and management: A review of 20 years' research at the IWHR, China [J]. Irrigation and Drainage,2017,67(1):97-112.
- [18] Ortiz J N, Tarjuelo J M, Juan J A D. Effects of two types of sprinklers and height in the irrigation of sugar beet with a centre pivot [J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2012,10(1):251-263.
- [19] Sanchez I, Zapata N, Faci J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: I. Irrigation performance and soil water recharge in alfalfa and maize [J]. Agricultural Water Management, 2010,97:1571-1581.
- [20] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.
- [21] 田慎重,王瑜,宁堂原,等.转变耕作方式对长期旋免耕农田土壤有机碳库的影响[J].农业工程学报,2016,32(17):98-105.
- [22] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等.耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):264-270.
- [23] 张丽华,李军,贾志宽,等.渭北旱塬保护性耕作对冬小麦一春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J].应用生态学报,2011,22(7):1750-1758.
- [24] Liu H J, Yu L, Luo Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes [J]. Agricultural Water Management,2011,98:483-492.
- [25] Shiva K J, Tefo S R, Wang G, et al. Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2019,217:292-302.
- [26] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2031-2037.
- [27] 朱忠锐,范永申,段福义,等.喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):174-178.
- (上接第 281 页)
- [11] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China [J]. Geoderma,2010,154(3/4):364-369.
- [12] 何冰,李廷亮,栗丽,等.采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J].水土保持学报,2018,32(4):184-196.
- [13] 李建华,李华,郜春花,等.长期施肥对晋东南矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].华北农学报,2018,33(5):188-194.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50(3):627-633.
- [16] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.
- [17] Xie J, Peng B, Wang R, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthroso [J]. European Journal of Soil Science,2018,69:555-567.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [19] 李婕,杨学云,孙本华,等.不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.
- [20] 李映强,曾觉延.不同耕作制下水稻土有机物质变化及其团聚作用[J].土壤学报,1991,28(4):404-409.
- [21] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I: Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science,2016,67(1):11-21.
- [22] 安艳,姬强,赵世翔,等.生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J].环境科学,2016,37(1):293-300.
- [23] 谢钧宇,彭博,王仁杰,等.长期不同施肥对壤土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1-11.
- [24] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms [J]. Plant Soil, 2007,300(2):9-20.
- [25] 吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2006.