

·作物水肥高效利用·

文章编号: 1672-3317(2024)05-0001-08

不同灌水处理对春玉米土壤水分、耗水特征及产量的影响

赵经华^{1,3}, 袁如芯^{1,3}, 王金茂², 孟新梅⁴, 杨庭瑞¹

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司, 乌鲁木齐 830000; 3.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4.和布克赛尔县水利局, 新疆塔城 834499)

摘要:【目的】探究不同灌水定额对春玉米全生育期耗水特征及产量的影响, 优化克拉玛依地区春玉米节水灌溉制度, 以提高当地水分利用效率。【方法】于2021年5—9月在克拉玛依农业综合开发区开展春玉米田间试验, 设置6个灌水处理 W1 (225 m³/hm²)、W2 (300 m³/hm²)、W3 (375 m³/hm²)、W4 (450 m³/hm²)、W5 (525 m³/hm²)、W6 (600 m³/hm²), 探究不同灌水定额对春玉米耗水特征及产量的影响。【结果】①各生育期不同灌水处理 0~100 cm 土层土壤含水率随土层深度增加呈“增-减-增”的变化趋势。W5 处理在喇叭口期、抽穗散粉期、乳熟期、完熟期较 W1、W2、W3、W4、W6 处理 0~100 cm 土层土壤贮水量平均增加了 2.35%~9.11%、0.21%~4.37%、0.39%~1.79%、0.60%~4.48%。②完熟期 W5 处理百粒质量显著高于 W1 处理和 W2 处理, 但与 W3、W4、W6 处理无显著性差异。W5 处理穗粒数较其他处理显著提高 10.49%~36.01%, 穗长较其他处理显著提高 8.31%~27.12%。③综合评判模型计算得出 W5 处理 (525 m³/hm²) 综合评价指数最高。【结论】因此, 全生育期灌水 10 次, 灌水定额为 525 m³/hm² 是克拉玛依地区最优灌水处理。

关键词: 土壤含水率; 耗水特征; 产量; 春玉米; 灌水定额优化

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023501

赵经华, 袁如芯, 王金茂, 等. 不同灌水处理对春玉米土壤水分、耗水特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 1-7, 15.

ZHAO Jinghua, YUAN Ruxin, WANG Jinmao, et al. Effects of irrigation amount on soil water, water consumption and yield of spring maize in Northwestern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 1-7, 15.

0 引言

【研究意义】干旱因其范围广、持续时间长, 已成为人类面临最重大的自然灾害之一^[1-3]。而农业对干旱的高度敏感性和脆弱性, 使其更易受干旱灾害影响^[4]。新疆地处亚欧大陆内陆地区, 远离海洋, 干旱少雨^[5]。因此, 在保证粮食安全的情况下, 采用科学的种植技术和管理方式, 减少农业用水量和作物耗水量, 降低干旱对农业生产造成的损失, 已成为新疆迫切关注的问题。【研究进展】学者们通过调节灌溉制度, 研究了作物耗水量和耗水规律, 以期减少农业用水量和作物耗水量提供理论依据^[6-8]。呼红伟等^[9]通过调节作物生育期的灌水次数和施氮量, 发现灌水对产量有极显著影响, 而对作物水分利用效率无显著影响。漆栋良等^[10]通过交替隔沟调亏灌溉制种玉米, 发现全生育期内亏水、交替隔沟

灌溉均会抑制玉米的平均耗水强度, 并显著降低玉米产量。Fan 等^[11]通过设置低、中、高 3 个灌溉水平, 利用覆膜管道灌溉方式研究发现, 中等、高等灌溉水平可提高作物耗水量, 其中高灌溉水平下作物产量和水分利用效率与当地农场基本相同, 中等灌溉水平下作物产量和水分利用效率均高于当地农场, 说明中等灌溉水平能够满足作物需水量。综上所述, 合理的灌水量和灌溉方式会对作物产量、耗水量以及生长指标等因素产生影响。【切入点】近年来, 针对灌水量和灌溉方式对滴灌玉米的生理指标、产量、水分利用效率及耗水特征的影响研究较多, 但对滴灌玉米土壤水分分布的研究仍存在空白。【拟解决的关键问题】为此, 设置滴灌不同灌水处理, 研究灌水定额对克拉玛依地区春玉米的水分分布特征、耗水特征及产量影响, 探讨滴灌玉米适宜的灌水定额, 为优化北疆地区春玉米节水灌溉制度提供理论依据。

收稿日期: 2023-10-27 修回日期: 2024-02-18

基金项目: 新疆维吾尔自治区十四五重大专项项目 (2020A01003-4); 国家自然科学基金项目 (52169013); 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室项目 (ZDSYS-YJS-2022-04)

作者简介: 赵经华 (1979-), 男, 新疆奇台人。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: 105512275@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于 2021 年 5—9 月, 在克拉玛依市克

拉玛依区农业综合开发区 (84°50'—85°20'E, 45°22'—45°40'N) 进行。试验区属于典型的大陆性干旱气候, 年平均气温 8.3 °C, 最高气温 39.1 °C, 最低气温 -25.4 °C, 昼夜温差大, 年平均无霜期 197~268 d, 年积温较高。试验区表层土壤多为壤土, 深层以轻砂土为主, 0~100 cm 土层土壤平均干体积质量为 1.40 g/cm³, 田间持水率为 28.66%, 土壤基

础化学性状见表 1, 土壤肥力中等, 适合玉米等粮食作物生长。该地区农作物主要灌溉水源为克拉玛依市西郊水库的地表水, 输水方式为自压管道式输水, 玉米的灌溉方式为地表滴灌。气象数据由 HOBO 小型气象站测得, 试验区降水量及平均气温变化见图 1。

表 1 试验区土壤基础化学性状

Tab.1 Basic chemical properties of soil in experimental area

土层深度/cm	pH 值	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	全磷量/(g kg ⁻¹)	全钾量/(g kg ⁻¹)	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)	速效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)
0~20	7.13	11.852	0.409	0.878	21.16	29.18	11.847	103.869
20~40	7.11	10.912	0.533	0.827	16.936	30.106	10.605	106.523
40~60	7.17	8.075	0.466	0.785	16.727	25.485	8.034	80.112

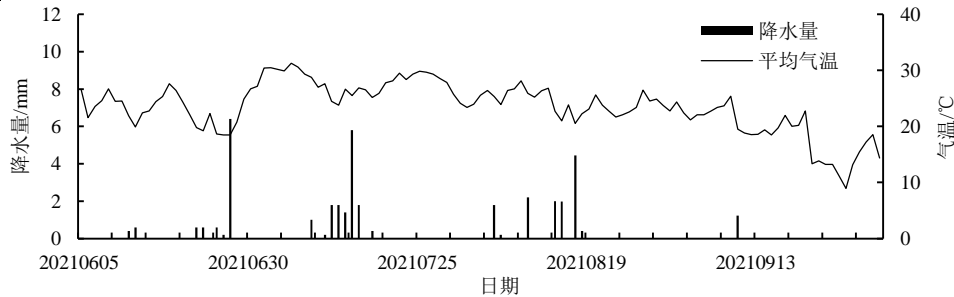


图 1 2021 年试验区降水量及日平均气温

Fig.1 Rainfall and daily average temperature map of the experimental area in 2021

1.2 试验方法

供试春玉米品种为太玉 339, 种植方式为无膜 1 管 2 行 (40 cm+70 cm+40 cm), 玉米株距为 20 cm (图 2), 播种日期为 2021 年 5 月 15 日, 收获日期为 2021 年 9 月 14 日。

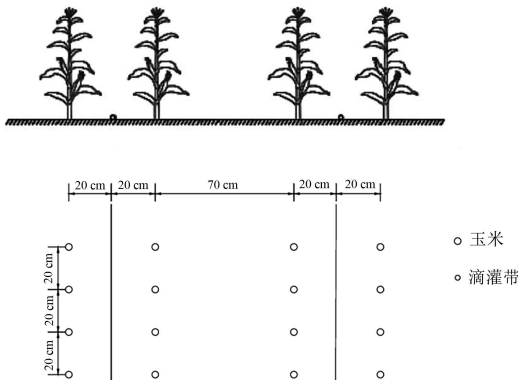


图 2 玉米种植布置

Fig.2 Maize planting layout

灌水定额设置 6 个水平, 分别是 225、300、375、450、525、600 m³/hm², 灌水周期为 7 d, 全生育期灌水 10 次。每个处理 3 次重复, 共 18 个小区, 小区面积为 58.7 m² (4.40 m×13.34 m)。滴灌带间距为 1.1 m, 滴头间距为 25 cm, 滴头流量为 2.8 L/h, 额定工作压力 0.1 MPa。根据当地施肥管理经验及作物生育阶段需求, 拔节期尿素: 磷酸一铵: 滴灌钾肥施肥比例为 15:5:5, 喇叭口期尿素: 磷酸一铵: 滴灌钾肥施肥比例为 1:1:1, 抽雄散粉期尿素: 磷酸一铵: 滴灌钾肥施肥比例为 8:15:15, 灌浆成熟期尿素: 磷酸一铵: 滴灌钾肥施肥比例为 8:5:5, 利用水肥一体化灌溉, 全生育期尿素施用总量为 600 kg/hm², 磷酸一铵施用总量为 245 kg/hm², 滴灌钾肥施用总量为 210 kg/hm²。苗期不做处理, 田间管理 (病虫害防治、除草) 一致, 苗期后灌水处理设计方案见表 2。

表 2 灌水设计

Tab.2 Irrigation design

生育期	日期	灌水次数	W1	W2	W3	W4	W5	W6
喇叭口期	0615—0710	3	225	300	375	450	525	600
抽雄散粉期	0711—0731	3	225	300	375	450	525	600
乳熟期	0801—0815	2	225	300	375	450	525	600
完熟期	0816—0914	2	225	300	375	450	525	600
全生育期	0523—0914	10	2 250	3 000	3 750	4 500	5 250	6 000

1.3 指标测定

1) 耗水量

利用土壤水分廓线仪 (产品型号: Diviner2000;

产地: 澳大利亚) 测定 0~100 cm 土层灌前、灌后 24 h 土壤剖面体积含水率。计算式为:

$$ET=(W_1+W_2)+P, \quad (1)$$

式中： ET 为耗水量，即生育期内的总耗水量 (mm)； W_1 、 W_2 分别为播前和收获期土壤贮水量 (mm)； P 为作物生育期 ≥ 5 mm 有效降水量 (mm)。

2) 土壤贮水量

土壤贮水量计算式为：

$$W=h \times \omega \times 10, \quad (2)$$

式中： W 为土壤贮水量 (mm)； h 为 0~100 cm 取样土层的土层深度 (cm)； ω 为灌前土壤体积含水率 (%)。

3) 生育阶段耗水量

生育阶段耗水量计算式为：

$$ET_i=\Delta W_i+P_i, \quad (3)$$

式中： ET_i 为第 i 个生育期耗水量 (mm)； ΔW_i 为第 i 个生育期土壤供水量 (mm)，即第 i 个生育期灌水前、后差值； P_i 为第 i 个生育期 ≥ 5 mm 有效降水量 (mm)。

4) 耗水模系数

耗水模系数计算式为：

$$CP=ET_i/ET, \quad (4)$$

式中： CP 为耗水模系数 (无量纲单位)； ET_i 为各生育期耗水量 (mm)。

5) 日耗水强度

日耗水强度计算式为：

$$CD=ET_i/d, \quad (5)$$

式中： CD 为日耗水强度 (mm/d)； d 为作物生育期持续时间 (d)。

6) 产量与产量构成要素

每个小区内随机选取 1 m^2 采样，脱粒、晾晒至恒质量，测量计算其平均秃尖长、百粒质量、穗粒数，并换算出单位面积的产量。

7) 水分利用效率 (WUE) 及灌溉水利用效率 ($IWUE$)

水分利用效率及灌溉水利用效率计算式为：

$$WUE=Y(a ET), \quad (6)$$

$$IWUE=Y(a I), \quad (7)$$

式中： WUE 为作物水分利用效率 (kg/m^3)； $IWUE$ 为作物灌溉水利用效率 (kg/m^3)； Y 为作物产量

(kg/hm^2)； I 为生育期灌溉量 (mm)； a 为单位换算系数，此式中 $a=10$ 。

1.4 数据分析

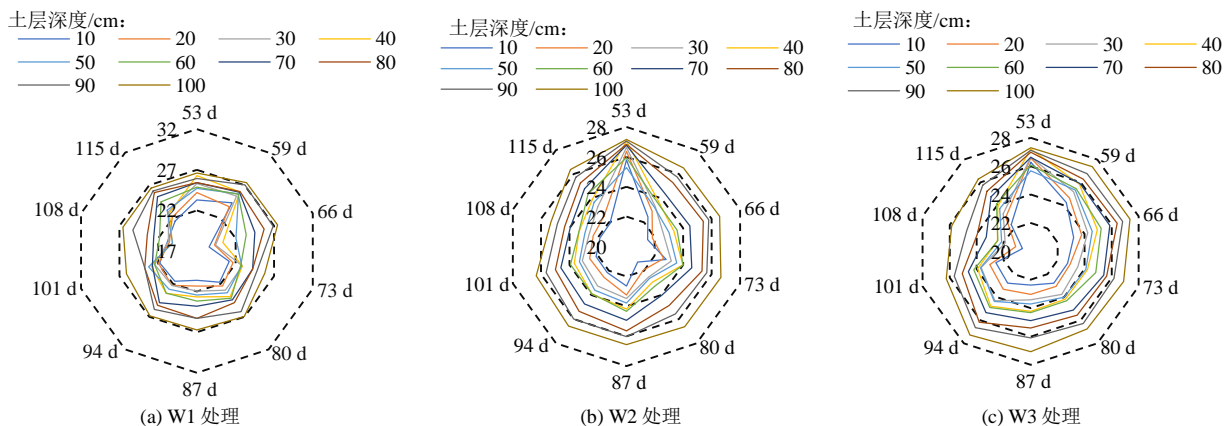
利用 SPSS 25.0 对试验结果进行均值误差分析，利用指标重要性相关分析 CRITIC 法^[12] (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation) 获得各项指标权重，并对春玉米产量构成要素和水分利用效率进行模糊综合评判^[13]，获得春玉米最优灌水定额。

2 结果与分析

2.1 灌水处理对土壤含水率和土壤贮水量的影响

图 3 为不同灌水定额灌后 0~100 cm 土层土壤含水率，图 3 中数值代表灌后土壤含水率 (%)；雷达图外围数值为植株生育期天数 (d)。由图 3 可知，全生育期内各处理 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层灌后土壤含水率分别介于 18.60%~28.64%、19.40%~29.41%、20.15%~27.94%、22.60%~28.69%、23.75%~29.04%，可见土壤含水率随土层深度增加呈上升趋势，其中由于作物种植区域垂直方向土层土壤质地不同，0~40 cm 土层为壤土，40~100 cm 土层为轻砂土，壤土通气透水，而轻砂土保水性较差，因此全生育期土壤含水率在 40 cm 土层交界处均存在突变，使得 50 cm 土层处土壤含水率突减，此后土壤含水率呈上升趋势，且逐渐接近于灌前土壤含水率。因此，该试验区土壤含水率随土层深度增加呈“增-减-增”的变化趋势。

0~20 cm 土层，全生育期内 W1 处理和 W2 处理较其他处理土壤含水率低，而 W3、W4、W5、W6 处理土壤含水率差异较小，且随着灌水量增大，各处理土壤含水率趋于稳定趋势；20~40 cm 土层，各处理土壤含水率在全生育期表现为：W5 处理>W6 处理>W4 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理；40~60 cm 土层，喇叭口期和抽雄散粉期土壤含水率随灌水量的增大而增大，乳熟期和完熟期各处理土壤含水率趋于稳定；80~100 cm 土层，各处理土壤含水率变化较小，深层土壤含水率与土壤初始含水率基本一致。



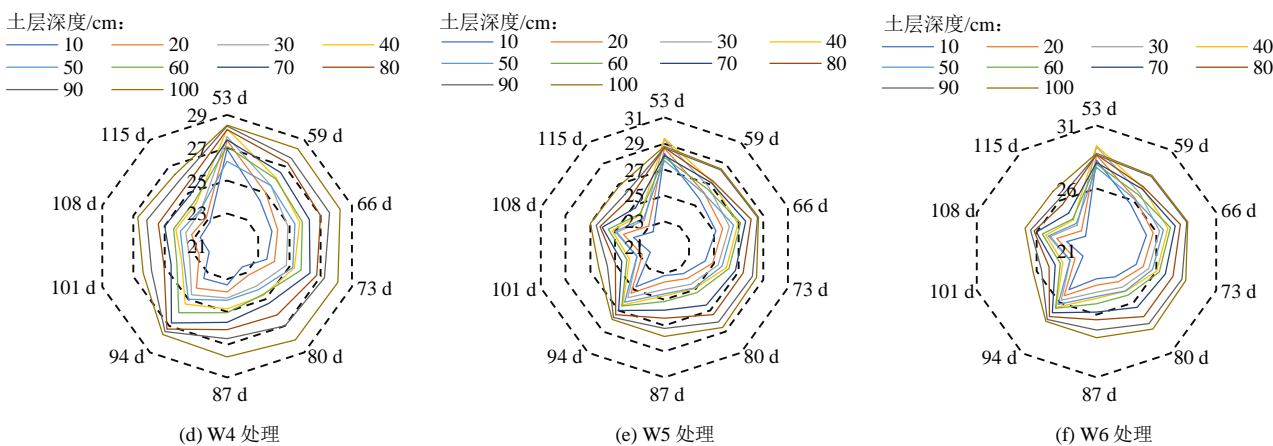


图 3 不同灌水处理灌后 0~100 cm 土层土壤含水率 (%) 分布

Fig.3 Soil water distribution of 0~100 cm soil layers under different irrigation quotas

播后 59 d (喇叭口期), W1、W2、W3、W4 处理各土层土壤含水率均小于 W5、W6 处理。该阶段内, 各处理 0~100 cm 土层土壤含水率为 22.46%~28.47%。播后 80 d (抽雄散粉期), 各处理土壤含水率为 21.27%~28.61%, 各土层土壤含水率随灌水量的增加而增大, 其中 W6 处理各土层土壤含水率均小于 W5 处理。播后 101 d (乳熟期), 不同灌水处理各土层土壤含水率分布差异进一步增大, 前期灌水量的累积效应对土壤水分分布影响明显, 各处理 0~100 cm 土层土壤含水率为 21.80%~26.38%。播后 115 d (完熟期), 各处理 0~100 cm 土层土壤含水率降低, 各处理土壤含水率为 21.55%~26.89%。

图 4 为春玉米各生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量。全生育期内各处理 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层灌前土壤贮水量分别为 61.67~82.47、68.00~87.17、69.00~93.91、78.03~101.80、98.43~109.4 mm, 可见土壤贮水量随土层深度增加呈上升趋势。且同一生育期内, 土壤贮水量随灌水量的增加而增加, 各处理土壤贮水量均随生育期推进呈“降-升-降”的变化趋势, 其中完熟期 0~100

cm 土层土壤贮水量最少。0~20 cm 土层, 全生育期内 W1、W2 处理较其他处理土壤贮水量低, 而 W3、W4、W5、W6 处理土壤贮水量差异较小, 且随着灌水量的增大, 土壤贮水量趋于稳定; 20~40 cm 土层, 各处理土壤贮水量在喇叭口期和抽雄散粉期表现为: W6 处理>W5 处理>W4 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理, 在乳熟期和完熟期表现为 W5 处理>W6 处理>W4 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理。

W5 处理各生育期内土壤贮水量显著高于其他处理, 喇叭口期 W5 处理土壤贮水量较 W6 处理提高 2.35%, 较其他处理提高 3.58%~9.11%。与低灌水量处理 (W1、W2、W3) 相比, 春玉米喇叭口期、抽雄散粉期、乳熟期、完熟期 W5 处理 0~100 cm 土层土壤贮水量平均增加了 7.05%~9.11%、2.84%~4.37%、0.44%~1.79%、3.34%~4.48%。与高灌水量处理 (W4、W6) 相比, W5 处理在春玉米 4 个关键生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量平均增加了 2.35%~3.58%、0.21%、0.39%~0.41%、0.60%~0.07%。故 W5 处理在春玉米 4 个关键生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量均最高。

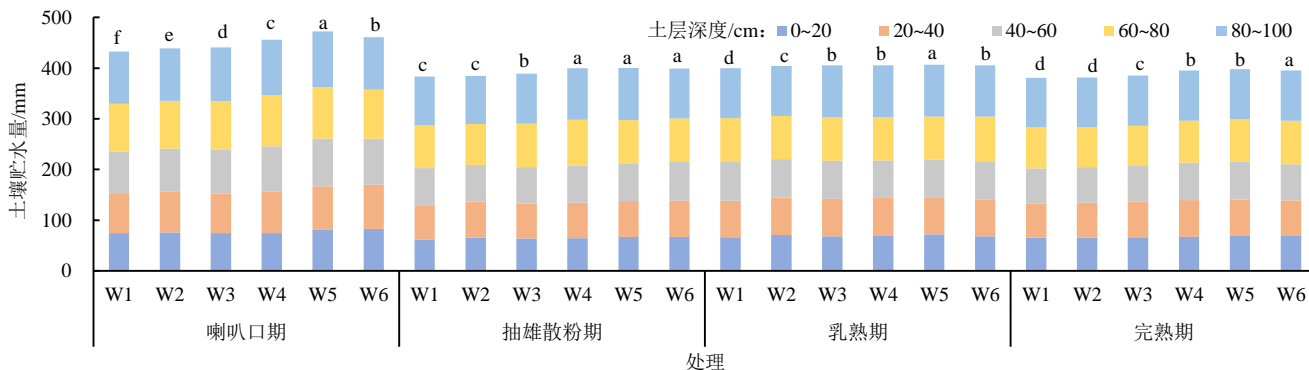


图 4 春玉米各生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量

Fig.4 Map of soil water storage in 0~100 cm layer at different growth stages of maize

2.2 灌水处理对春玉米各生育期耗水特征的影响

表 3 为不同灌水处理下春玉米各生育阶段耗水量 (ET_i)、日耗水强度 (CD) 和耗水模系数 (CP)。由

表 3 可知, 各处理春玉米阶段耗水量变化规律基本相同, 日耗水强度均呈先升高后降低的变化趋势。抽雄散粉期 W1、W2、W3、W5、W6 处理日耗水强度达

到最大值，分别为 5.66、6.50、7.61、8.68、9.34 mm/d，乳熟期 W4 处理日耗水强度达到最大值，为 8.25 mm/d。抽雄散粉期各处理耗水模系数最大。其中，W5 处理抽雄散粉期耗水模系数为 35%，乳熟期次之为 23%，其他处理耗水模系数介于 19%~38%。

由表 3 可知，W6 处理春玉米耗水量较 W5、W4、W3、W2、W1 处理分别高 4.29%、9.76%、22.87%、

29.91%、41.97%；W5 处理较 W4、W3、W2、W1 处理分别高 5.72%、19.41%、26.78%、39.37%；W4 处理较 W3、W2、W1 处理分别高 14.52%、22.33%、35.70%；W3 处理较 W2、W1 处理分别高 9.14%、24.78%；W2 处理较 W1 处理高 17.21%，其中 W1、W2、W3 处理耗水量相对较小。

表 3 玉米各生育阶段耗水量、日耗水强度、耗水模系数表

Tab.3 Water consumption, daily water consumption intensity and water consumption mode coefficient of maize at different growth stages

处理	喇叭口期			抽雄散粉期			乳熟期			完熟期		
	ET _i /mm	CD/(mm d ⁻¹)	CP/%	ET _i /mm	CD/(mm d ⁻¹)	CP/%	ET _i /mm	CD/(mm d ⁻¹)	CP/%	ET _i /mm	CD/(mm d ⁻¹)	CP/%
W1	60.13f	4.35f	19c	118.82f	5.66f	38a	76.98f	5.50f	24a	58.92f	4.21f	19d
W2	80.44e	5.75e	21a	136.49e	6.50e	36b	88.41e	6.31e	23bc	76.14e	5.44e	20c
W3	86.34d	6.17d	21ab	159.75d	7.61d	38a	95.43d	6.82d	23c	78.33d	5.60d	19d
W4	98.67c	7.05c	20bc	172.92c	8.23c	35c	115.54c	8.25c	24ab	104.05c	7.43c	21b
W5	105.88b	7.56b	20ab	182.25b	8.68b	35c	120.59b	8.61b	23bc	112.26b	8.02b	22a
W6	108.16a	7.73a	20bc	196.04a	9.34a	36b	122.39a	8.75a	22c	117.72a	8.41a	22a

注 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

2.3 灌水处理对春玉米产量及水分利用效率的影响

由表 4 可知，产量与百粒质量、穗粒数、穗长极显著正相关，与秃尖长负相关。因此，依据产量与其构成要素的相关关系，促进或抑制产量构成要素的积累，更有利于提高作物产量。

表 4 产量与产量构成要素之间的相关分析

Tab.4 Correlation analysis table between yield and yield components

指标	百粒质量	穗粒数	秃尖长	穗长
产量	0.848**	0.872**	-0.125	0.786**

注 “**” 表示 2 个因素在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

产量的构成要素受土壤水分影响较大，故提高作物产量需制定合理的灌溉制度。由表 5 可知，春玉米百粒质量受灌水量影响较大，其中 W5 处理百粒质量较大，W1、W2 处理百粒质量较小。各处理穗粒数表现为 W5 处理>W4 处理>W6 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理，其中 W5 处理穗粒数最高（572 粒），W1、W2、W3、W4、W6 处理穗粒数较 W5 处理分别显著降低约 36.01%、25%、20.10%、

10.49%、16.26%。且以 W3 处理为界，低灌水量处理（W1、W2）与高灌水量处理（W4、W5、W6）产量构成要素差异显著（除秃尖长以外）。随着灌水量增加，春玉米百粒质量、穗粒数、穗长呈阶梯状增加趋势，其中 W5 处理产量构成要素表现最优。

由表 5 可知，IWUE 随着灌水量增加而减小，不同灌水处理间存在显著性差异，说明灌水定额对 IWUE 的影响较大。WUE 在低灌水处理下维持在较高水平，且不同灌水处理下 WUE 值差异不显著。

2.4 春玉米产量构成要素和水分利用效率模糊综合评判

采用模糊综合评判法对春玉米产量构成要素和水分利用效率进行综合评判，其中产量构成要素选用百粒质量、穗粒数、秃尖长和穗长。采用 CRITIC 法获得各指标权重，指标隶属度分别为 W= (0.170, 0.091, 0.104, 0.114, 0.419, 0.102)，将数据进行模糊综合评判（表 5）。由表 5 可知，各处理的综合评判指数由大到小依次为 W5、W3、W2、W1、W4、W6 处理。

表 5 不同灌水处理下滴灌玉米水分利用效率和产量构成要素指标及模糊综合评判指数

Tab.5 Water use efficiency and yield components index table and fuzzy comprehensive evaluation index of drip irrigation maize under different irrigation treatments

处理	百粒质量/g	穗粒数/粒	秃尖长/cm	穗长/cm	WUE/(kg m ⁻³)	IWUE/(kg m ⁻³)	综合评判指数
W1	33.94±0.98c	366±31.19d	29.35±1.44a	22.72±0.86c	3.39±0.33a	4.67±0.46a	0.169
W2	37.54±0.72b	429±29.87c	29.91±7.25a	23.44±1.39c	3.31±0.24a	4.14±0.25b	0.170
W3	40.14±0.51a	466±14.73bc	32.23±0.82a	24.67±1.34bc	3.32±0.27a	3.66±0.28bc	0.171
W4	40.66±1.63a	512±26.16b	31.05±3.91a	25.78±1.02b	3.08±0.19a	3.32±0.21cd	0.168
W5	41.26±1.49a	572±15.62a	28.31±0.92a	28.89±0.96a	3.14±0.19a	3.08±0.20d	0.173
W6	40.38±1.42a	479±22.01bc	30.74±6.64a	26.67±1.00b	2.47±0.17b	2.22±0.16e	0.148

3 讨论

本研究表明,高灌水定额处理表层土壤含水率较高,而不同灌水定额处理下层土壤含水率差异不大,且 40~50 cm 土层土壤衔接处土壤含水率下降。而灌后 50~100 cm 土层土壤含水率呈上升趋势,由于本试验采用灌后 24 h 土壤含水率,此时距离灌溉结束时间不长,重力作用下土壤上部水分向下部及周围扩散,使得下部土壤含水率增加,上部土壤含水率减少,这与脱云飞等^[14]研究相似。灌水定额显著影响土壤剖面的水分分布和土壤含水率,且生育前期提高灌水量影响土壤含水率,生育后期灌水定额对土壤含水率影响不大,在同一生育期内,表层土壤含水率随灌水定额增大呈先增加后减少的趋势变化^[15]。

本研究发现在一定范围内土壤贮水量随灌水定额的增加而增加,总体表现为高灌水定额处理较低灌水定额处理土壤墒情更优,但灌水定额过高,土壤贮水量会下降。这与陈宣伊等^[16]研究相似。姚小英等^[17]研究表明,土壤贮水量主要受作物蒸腾和棵间蒸发的影响。故灌水定额过高时,植株吸收利用和土壤储存水分所需时间较长,使得灌溉水分将因植株蒸腾作用而流失,导致土壤贮水量降低。

春玉米不同生育期耗水模系数差别较小,日耗水强度随灌水定额的增加而增大,生育阶段耗水量(ET_i)随灌水定额的增加而增加,且表现为作物生育前期少、中后期多的变化趋势,其中 W5 处理和 W6 处理生育阶段耗水量显著高于其他处理($P<0.05$),这与翟超等^[6]、张国强等^[18]研究相似。不同灌水处理日耗水强度最大值出现在春玉米抽雄散粉期—乳熟期^[19],且均显著高于我国西北部干旱地区(4.5~7.0 mm/d)^[20],这与当地土壤质地为轻砂土,土壤保水性较差相关^[21]。本研究中 6 个处理各生育阶段日耗水强度和耗水模系数变化规律相同,耗水模系数的最小值均在喇叭口期,最大值均出现在抽雄散粉期,这与秦海霞等^[19]研究结论相似。

完熟期 W5 处理春玉米百粒质量高于 W1、W2、W3、W4、W6 处理,但与 W3、W4、W6 处理差异不显著,表明玉米百粒质量受灌水定额的影响较大,灌水定额的增加能显著促进春玉米百粒质量的增加,但过量灌溉会使春玉米百粒质量减小^[22]。同时, W5 处理穗粒数最高、穗长最长,与其他 5 个处理差异显著($P<0.05$),且 W6 处理春玉米百粒质量、穗粒数和穗长均呈下降趋势,说明提高灌水定额对促进春玉米生长的作用存在阈值,灌水定额过大可能会造成作物减产,与刘玉洁等^[23]和罗帅等^[24]研究结论

相似。不同灌水定额处理下 WUE 差异不显著,这与氮、磷、钾合理有效供应等因素相关,通过施加肥料促进作物生长,使得作物产量下降不明显, WUE 偏高,而高灌水定额 WUE 呈下降趋势,说明过量灌溉会降低作物水分利用效率^[25]。

本研究表明,模糊综合评判模型与产量构成要素和水分利用效率的分析结果具有一致性,说明模糊综合评判模型可实现对春玉米灌水定额的优化选择,这与路振广等^[26]研究结果一致。与专家打分法^[27-28]相比,本文采用客观赋权的 CRITIC 法计算模糊权重,能够量化不同指标的重要性程度,得到客观的决策结果,并对决策结果进行排序,从而得出最为合理的玉米灌溉制度。

4 结论

1) 灌水定额可显著影响土壤剖面的水分分布和土壤含水率。土层深度相同时,生育后期改变灌水定额对土壤含水率影响不大,在同一生育期内,土壤含水率随灌水定额的增大呈先增加后减小的趋势变化。

2) W5 处理可提高作物关键生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量,且 W5 处理对春玉米生长促进作用最优。W5 处理较 W6 处理百粒质量显著提高 2.23%,穗粒数较其他处理显著提高 10.49%~36.01%,穗长较其他处理显著提高 8.31%~27.12%。

3) 采用综合模糊评判模型对产量构成要素和水分利用效率综合评价得出, W5 处理为克拉玛依农业综合开发区最优灌水处理,即全生育期灌水 10 次,灌水定额为 525 m³/hm²。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] ZHOU S, WANG Y M, LI Z Y, et al. Characterizing spatio-temporal patterns of multi-scalar drought risk in mainland China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108 189.
 - [2] WAN W H, ZHAO J S, POPAT E, et al. Analyzing the impact of streamflow drought on hydroelectricity production: A global scale study[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(4): e2020WR028087.
 - [3] KAMALI B, JAHANBAKHSI F, DOGARU D, et al. Probabilistic modeling of crop-yield loss risk under drought: A spatial showcase for sub-Saharan Africa[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(2): 024 028.
 - [4] HA T V, HUTH J, BACHOFER F, et al. A review of earth observation-based drought studies in Southeast Asia[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3 763.
 - [5] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988—2015 年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究: 基于农作物水足迹的统计分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 242-253.
- ZHANG Pei, LONG Aihua, HAI Yang, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988—2015: Based on statistical analysis of crop water footprint[J].

- Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 242-253.
- [6] 翟超, 周和平, 赵健. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2 769-2 780.
ZHAI Chao, ZHOU Heping, ZHAO Jian. Experimental study on inter-annual water requirement and water consumption of drip irrigation maize in North of Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(14): 2 769-2 780.
- [7] MAL S, LI Y J, WU P T, et al. Coupling evapotranspiration partitioning with water migration to identify the water consumption characteristics of wheat and maize in an intercropping system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 290: 108 034.
- [8] 刘虎, 魏永富, 郭克贞. 北疆干旱荒漠地区青贮玉米需水量与需水规律研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 94-100.
LIU Hu, WEI Yongfu, GUO Kezhen. Water requirement and its law of silage corn in Northern Xinjiang arid desert grassland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(33): 94-100.
- [9] 呼红伟, 蔡焕杰, 王鑫宇, 等. 不同氮肥条件下补充灌溉对冬小麦生长、产量和 *WUE* 的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 51-59.
HU Hongwei, CAI Huanjie, WANG Xinyu, et al. Effects of supplementary irrigation on biomass, *WUE* and yield of winter wheat under different nitrogen fertilizer conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 51-59.
- [10] 漆栋良, 胡田田, 宋雪. 交替隔沟灌溉制度对制种玉米耗水规律和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 64-70.
QI Dongliang, HU Tiantian, SONG Xue. Effect of irrigation regime on water consumption pattern and grain yield of seed maize under partial root zone irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 64-70.
- [11] FAN Z L, CHAI Q, HUANG G B, et al. Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an Oasis Region[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 52-58.
- [12] KE Y Y, WANG Q S, XIAO H Z, et al. Hydropower unit health assessment based on a combination weighting and improved fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1 242 968.
- [13] XU X B, NIE C W, JIN X L, et al. A comprehensive yield evaluation indicator based on an improved fuzzy comprehensive evaluation method and hyperspectral data[J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108 204.
- [14] 脱云飞, 王克勤, 张丽娟, 等. 灌水定额对玉米膜孔灌土壤水运移转化试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 107-110.
TUO Yunfei, WANG Keqin, ZHANG Lijuan, et al. Experiment research on irrigation quota soil water nitrogen transformation under film hole irrigation for corn[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 107-110.
- [15] 张万锋, 杨树青, 靳亚红, 等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 228-237.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, JIN Yahong, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 228-237.
- [16] 陈宣伊, 师晶晶, 张向前, 等. 滴灌水量对土壤水分变化特征和玉米水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 38-48.
CHEN Xuanyi, SHI Jingjing, ZHANG Xiangqian, et al. Effects of drip irrigation amount on water variation characteristics of soil and water use efficiency of maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(9): 38-48.
- [17] 姚小英, 王莺, 王兴, 等. 黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征及对产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 292-297.
- [18] 张国强, 王克如, 肖春华, 等. 滴灌量对新疆高产春玉米产量和水分利用效率的影响研究[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 117-123.
ZHANG Guoqiang, WANG Keru, XIAO Chunhua, et al. Effect of drip irrigation on yield and water use efficiency of spring maize with high yield in Xinjiang[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(4): 117-123.
- [19] 秦海霞, 张玉顺, 邱新强, 等. 灌水定额对夏玉米生长及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 62-68.
QIN Haixia, ZHANG Yushun, QIU Xinqiang, et al. The effect of irrigation quota on growth and yield of summer maize[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 62-68.
- [20] WU Y, HUANG F Y, JIA Z K, et al. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 113-121.
- [21] WANG F, XIAO J F, MING B, et al. Grain yields and evapotranspiration dynamics of drip-irrigated maize under high plant density across arid to semi-humid climates[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247: 106 726.
- [22] XIAO R, HE Z B, ZHANG Y L, et al. Effects of different irrigation quotas on growth characteristics and yield of seed maize in Hexi Corridor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1): 012 087.
- [23] 刘玉洁, 李援农, 潘韬, 等. 不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 67-72.
LIU Yujie, LI Yuannong, PAN Tao, et al. Study on effects of different irrigation treatments on evapotranspiration and yield in spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 67-72.
- [24] 罗帅, 冯浩, 李成, 等. 旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 259-266.
LUO Shuai, FENG Hao, LI Cheng, et al. Effects of different irrigation amounts on soil water and salt and yield of spring maize under ridge with film mulching and furrow irrigation in arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 259-266.
- [25] 曲彦杉, 洪明, 常浩, 等. 水氮供应对北疆春玉米产量、水氮利用及品质的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(2): 125-135.
QU Junshan, HONG Ming, CHANG Hao, et al. Effects of water and nitrogen supply on yield, water-nitrogen utilization and quality of spring maize in northern Xinjiang[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(2): 125-135.
- [26] 路振广, 邱新强, 杨静敬, 等. 不同灌水定额条件下夏玉米生长发育及耗水特性分析[J]. 节水灌溉, 2012(12): 46-50.
LU Zhengguang, QIU Xinqiang, YANG Jingjing, et al. Experimental research on growth, development and water consumption characteristics of summer maize under different irrigation quotas[J]. Water Saving Irrigation, 2012(12): 46-50.
- [27] 汪顺生, 薛红利. 基于熵权的模糊物元模型优选夏玉米沟灌方式[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 362-368.
WANG Shunsheng, XUE Hongli. Optimization of fuzzy matter element model based on entropy for summer maize in furrow irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(4): 362-368.
- [28] 金贵, 王占岐, 胡学东, 等. 基于模糊证据权模型的青藏高原区土地适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 241-250.
JIN Gui, WANG Zhanqi, HU Xuedong, et al. Land suitability evaluation in Qinghai-Tibet Plateau based on fuzzy weight of evidence model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 241-250.

Developing optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert using the HYDRUS-1D model

MIAO Qingyuan^{1,2}, MI Lina¹, QIN Lanyu², ZHU Junyi², LU Qi³, YANG Wenbin⁴, CHENG Yiben^{1,2*}

(1. Cultivation Base of State Key Laboratory of Northwest Land Degradation and Ecological Restoration of Ningxia University/Key Laboratory of Northwest Degraded Ecosystem Restoration and Reconstruction of the Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China; 3. China Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China; 4. Inner Mongolia Low Coverage Desertification Control Technology Development Co., Ltd, Hohhot 010000, China)

Abstract: **【Objective】** Soil water is one of the most important abiotic factors influencing plant growth in arid areas. This paper aims to develop an optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert farmlands in Northwestern China. **【Method】** The study was based on the HYDRUS-1D model. It compared four irrigation schedules: intensive irrigation (LH-I), moderate intensity irrigation (MH-I), and low intensity irrigation (SM-I). Without irrigation was the control (CK). Each irrigation schedule was associated with five initial volumetric water contents in the 0-20 cm soil layer: 4% (S1), 6% (S2), 8% (S3), 10% (S4) and 12% (S5). Overall, there were 20 combinations. In the simulation for each treatment, we “measured” the time for soil water in the root zone to reach the wilting point, as well as the soil water content at the wilting point. We also measured the time-period during which the soil water content in the root zone remained above the wilting point. These enabled us to find the optimal irrigation schedule. **【Result】** The effect of SM-I and CK on the above criteria was more sensitive to change in the initial soil water content in the top 0-20 cm of soil. The plant roots were able to take up water even without irrigation when the initial soil water content in the 0-20 cm of soil was greater than 10%. When the initial soil water content was less than 20%, the majority of irrigated water in the LH-I treatment remained in the topsoil. With an appropriate initial moisture content, the topsoil had a positive effect on retaining the irrigation water from MH-I in the root zone. The retention time of water in the root zone was positively correlated with the topsoil water content in SM-I. The water content in the deep soil was greater in LH-I irrigation than in other treatments. Soil water content remained above the withering point for 5.7 days in MH-I, the longest among all treatments. **【Conclusion】** When initial volumetric water content in the 0-20 cm soil layer was less than 4%, LH-I was optimal, when the initial topsoil water content was higher than 4%, MH-I worked the best.

Key words: desert farmland; alfalfa; drip irrigation; moisture content; irrigation scheduling

责任编辑：韩洋

(上接第 7 页)

Effects of irrigation amount on soil water, water consumption and yield of spring maize in Northwestern China

ZHAO Jinghua^{1,3}, YUAN Ruxin^{1,3}, WANG Jinmao², MENG Xinmei⁴, YANG Tingrui¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Urumqi 830000, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Hebukesai County Water Conservancy Bureau, Tacheng 834499, China)

Abstract: **【Objective】** The production of spring maize in Northwestern China relies on irrigation. The purpose of this paper is to investigate experimentally the impact of irrigation amount on the yield, water consumption of the maize, as well as soil water dynamics. **【Method】** The field experiment was conducted from may to september 2021 at the Karamay Agricultural Comprehensive Development Zone. It comprised six treatments by irrigating the maize at: 225 m³/hm² (W1), 300 m³/hm² (W2), 375 m³/hm² (W3), 450 m³/hm² (W4), 525 m³/hm² (W5), and 600 m³/hm² (W6). In each treatment, we measured the spatiotemporal change in soil water, as well as ultimate yield and water consumption of the crop. **【Result】** ① Regardless of irrigation amounts, soil water content increased with soil depth first and then declined, followed by another increase in the soil depth from 0 to 100 cm. Compared with the other five treatments, W5 increased soil water storage in the 0-100 cm of soil by 2.35%-9.11%, 0.21%-4.37%, 0.39%-1.79%, 0.60%-4.48% at trumpet stage, tasseling stage, milk stage, and full maturity stage, respectively. ② At maturity stage, the 100-grain weight in W5 was significantly higher than that in W1 and W2, but was comparable to that in W3, W4 and W6. W5 also increased the grain number per spike by 10.49%-36.01% and the spike length by 8.31%-27.12%, compared with the other five treatments. ③ The results obtained from of the analysis of the comprehensive evaluation model showed the comprehensive evaluation index of W5 was 525 m³/hm², the highest among all treatments. **【Conclusion】** Irrigating 10 times, with the total irrigation amount being 525 m³/hm² during the whole growing season is optimal for spring maize production in the Karamay region in Northwestern China.

Key words: soil water content; characteristics of water expend; yield; spring corn; irrigation water quota optimization

责任编辑：白芳芳