

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51070

干旱灌区绿肥还田对减量灌水春小麦水分利用的调控效应

谢玮欣 毛守发 韦金贵 侯思宇 樊志龙 殷文 胡发龙 南运有
柴强*

省部共建干旱生境作物学国家重点实验室 / 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 针对干旱灌区春小麦耗水量大且水分利用效率偏低等问题, 探讨绿肥对减量灌水春小麦水分利用特征的调控效应, 以期对春小麦水分高效利用生产模式的构建提供理论支持。试验于 2021—2023 年在河西绿洲灌区进行, 采用裂区设计, 主区为灌溉定额, 设 420 mm (当地习惯灌溉定额, I3)、370 mm (减量 50 mm, I2) 和 320 mm (减量 100 mm, I1) 3 个水平, 副区为绿肥处理方式, 设麦后复种绿肥并全量还田(WG)、麦后复种绿肥仅根茬还田(WR)和麦后休闲(W) 3 种模式, 共组成 9 个处理。结果表明, 减量灌水显著降低春小麦籽粒产量, 但绿肥至少可补偿减量灌水 50 mm 造成的减产效应, 绿肥全量还田具有替代 100 mm 灌水量的潜力。小麦籽粒产量在 I1、I2 处理下较 I3 处理分别降低 11.6%、3.2%, WG、WR 较 W 籽粒产量分别提高 11.2%、5.0%; 与 WI3 相比, WGI2 籽粒产量提高 7.7%, 而 WGI1、WRI2 较 WI3 处理差异不显著。减量灌水和绿肥还田均可降低小麦季耗水量, 绿肥全量还田降低小麦季耗水量的效果优于根茬还田。小麦季耗水量在 I1、I2 处理下较 I3 分别降低 24.7%、10.5%, WG、WR 较 W 分别降低 7.8%、5.3%。这主要归因于: (1) 小麦季棵间蒸发量在 I1、I2 处理下较 I3 分别降低 36.8%、21.0%, WG、WR 较 W 分别降低 24.5%、17.8%; (2) 小麦蒸散比(E/ET)在 I1、I2 处理较 I3 分别降低 16.5%、12.0%, WG、WR 较 W 分别降低 18.5%、13.6%。麦后复种绿肥使复种系统总耗水量较单作小麦提高了 25.1%, 但减量灌水可有效抑制该增量。减量灌水和绿肥还田均显著提高春小麦的水分利用效率(WUE)和灌溉水利用效率(WUE_i), 且绿肥全量还田灌溉定额最小时的提升幅度最大。与 I3 处理相比, 春小麦 WUE 和 WUE_i 在 I1 处理下分别提高 17.4%和 34.9%, 在 I2 处理下分别提高 7.9%和 16.9%; 与 W 处理相比, 春小麦 WUE 和 WUE_i 在 WG 处理下分别提高 21.0%和 11.5%, 在 WR 处理下分别提高 11.4%和 5.0%。WGI1 较 WI3 的 WUE、WUE_i 分别提高 37.4%、51.2%, 绿肥全量还田结合减量灌水更有利于灌溉水利用效率的提高。在干旱绿洲灌区, 麦后复种绿肥全量还田在复种群体灌溉定额 320 mm 条件下可保证小麦稳产, 且显著提高水分利用效率和灌溉水利用效率, 是试区实现春小麦稳产和灌溉水高效利用的可行措施。

关键词: 复种; 绿肥; 减量灌水; 春小麦; 耗水特性; 水分利用效率

Effect of green manure returning pattern on water utilization of spring wheat under reduced irrigation in arid irrigation areas

Xie Wei-Xin, Mao Shou-Fa, Wei Jin-Gui, Hou Si-Yu, Fan Zhi-Long, Yin Wen, Hu Fa-Long, Nan Yun-You, and Chai Qiang*

State Key Laboratory of Arid Land Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China

本研究由国家自然科学基金项目(U21A20218), 国家重点研发计划项目(2021YFD1700204)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-22-G-12)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (U21A20218), the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700204), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-22-G-12).

* 通信作者(Corresponding author): 柴强, E-mail: chaiq@gau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: xieweixin0114@163.com

Received (收稿日期): 2025-07-28; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-11-26.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.s.20251126.1313.010>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Abstract: To address the challenges of high water consumption and low water use efficiency (WUE) in spring wheat cultivation in arid irrigated regions, this study investigated the regulatory effects of green manure on water utilization characteristics of spring wheat under reduced irrigation quotas, aiming to provide a theoretical basis for efficient water-saving cropping systems. A field experiment was conducted from 2021 to 2023 in the Hexi Oasis irrigation zone using a split-plot design. The main plot included three irrigation quotas: 420 mm (local conventional, I3), 370 mm (reduced by 50 mm, I2), and 320 mm (reduced by 100 mm, I1). The subplot comprised three green manure treatments: full biomass return after wheat harvest (WG), root and stubble return only (WR), and fallow (W). Results showed that reduced irrigation significantly decreased grain yield; However, green manure effectively offset yield losses. Full green manure return (WG) compensated for the yield loss under a 100 mm irrigation reduction, while WR compensated for a 50 mm reduction. Compared with I3, grain yield under I1 and I2 decreased by 11.6% and 3.2%, respectively. WG and WR treatments increased yield by 11.2% and 5.0% compared to W. Notably, WG12 increased yield by 7.7% relative to WI3, and both WG11 and WR12 showed no significant difference from WI3. Both reduced irrigation and green manure return decreased seasonal water consumption, with WG more effective than WR. Compared to I3, water consumption under I1 and I2 decreased by 24.7% and 10.5%, respectively; WG and WR decreased consumption by 7.8% and 5.3% relative to W. This was mainly due to: (1) lower inter-row evaporation under I1 and I2 (36.8% and 21.0% less than I3) and under WG and WR (24.5% and 17.8% less than W); (2) reduced E/ET under I1 and I2 (by 16.5% and 12.0%) and under WG and WR (by 18.5% and 13.6%). Although the wheat-green manure intercropping system increased total water consumption by 25.1% compared to monoculture wheat, reduced irrigation effectively constrained this increase. Both strategies improved WUE and irrigation water use efficiency (WUE_i), with the greatest gains observed under the lowest irrigation quota combined with full green manure return. Compared with I3, WUE and WUE_i increased by 17.4% and 34.9% under I1, and by 7.9% and 16.9% under I2. Compared with W, WUE and WUE_i increased by 21.0% and 11.5% under WG, and by 11.4% and 5.0% under WR. The WG11 treatment yielded a 37.4% increase in WUE and 51.2% in WUE_i compared to WI3, indicating that combining full green manure return with reduced irrigation is particularly effective for improving irrigation efficiency. Therefore, in arid oasis irrigation areas, returning full green manure to the field after wheat, under a 320 mm irrigation quota, can maintain stable wheat yields while significantly enhancing water use and irrigation water use efficiencies. This approach offers a viable strategy for achieving both yield stability and improved water productivity in spring wheat systems.

Keywords: multiple cropping; green manure; reduced irrigation; spring wheat; water consumption characteristics; water use efficiency

当前全球水资源短缺问题日益严峻,尤其在干旱和半干旱地区,已严重制约作物生产^[1]。虽然作物配置能够调控水资源投入,但由于过度追求单产提升而未能有效降低灌溉用水量,导致灌溉水利用效率仍然偏低^[2]。为此,亟需研发能够在维持作物产量稳定的同时提高有限灌溉水利用效率的节水技术。研究表明,优化灌溉制度^[3]、种植模式^[4]、覆盖措施^[5]及绿肥还田^[6]等农艺技术,均有助于提高作物水分利用效率。其中,适度减少灌溉量被认为是降低无效耗水、提高作物水分利用效率和灌溉水利用效率的有效途径之一^[7-8]。相关研究显示,随着灌水量的减少,春小麦籽粒产量和水分利用效率呈先升高后降低的趋势^[7-8]。因此,在节水技术研发时,精确量化作物的最大节水潜力至关重要。在农业生产实践中,种植绿肥作为增加地表覆盖度和降低休闲季节无效蒸发的重要生产模式^[9-10],其还田后可通过提高土壤保墒能力和调节土壤水分动态、优化作物耗水特性从而提高作物产量和水分利用效率^[4,11]。研究表明,在水分供应充足条件下,夏休闲种植豆科绿肥消耗的土壤水分可得到有效补充,并对后茬冬小麦产量和水分利用效率产生积极影响;而水分

供应不足时,绿肥自身生长耗水使后茬冬小麦籽粒产量降低 2.9%~19.9%,水分利用效率降低 7.3%~11.9%^[12]。此外,绿肥还田利用方式对后茬作物产量及水分利用效率的影响也存在显著差异^[6,11]。研究发现,在夏休闲种植绿肥后,提前翻压绿肥因绿肥生长期较短、耗水较少,可显著提高后茬冬小麦播前土壤贮水量和籽粒产量^[13]。另有研究指出,麦后复种绿肥还田能够改善土壤理化性质,增强土壤蓄水保墒能力,且绿肥全量还田处理在降低后茬玉米耗水量,提高产量和水分利用效率方面优于根茬还田^[11]。因此,集成应用绿肥要实现节水增效的目标,仍面临节水潜力的精确量化及绿肥应用模式优化等诸多科技挑战。西北干旱灌区资源性缺水问题突出。在春小麦长期连作且水资源消耗较大的生产背景下,本研究将单作小麦种植模式调整为小麦复种绿肥模式,并设置小麦复种绿肥系统灌溉定额减量的大田试验,以期通过绿肥还田补偿减量灌水实现小麦高产,并提高水分利用效率和灌溉水利用效率,通过系统分析减量灌水和复种绿肥对小麦复种绿肥模式各阶段耗水特征、春小麦产量及水分利用效率的影响,明确绿肥还田能否作为试区节水和小

麦水分高效利用的可行措施,旨在为绿洲灌区春小麦节水高效生产模式的构建提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究基于 2017 年在甘肃农业大学武威绿洲农业综合试验站(37°30'N, 103°5'E)开展的长期田间定位试验,数据采集时间为 2021—2023 年。该试验站位于甘肃河西走廊东端,气候类型为温带大陆性干旱气候,平均海拔 1776 m,无霜期约 156 d,年平均气温 7.3℃,日照时数 2945 h,多年平均降雨量不足 200 mm,年蒸发量大于 2000 mm,属于典型的一

熟有余、两熟不足的干旱灌溉农业区。2021—2023 年 3 至 10 月试验站降雨量和日平均气温情况如图 1 所示。

1.2 试验设计

本试验以小麦-绿肥复种系统为研究对象,采用裂区设计,主区为灌溉定额,设 420 mm (当地习惯灌溉定额, I3)、370 mm (减量 50 mm, I2)和 320 mm (减量 100 mm, I1) 3 个水平,副区为绿肥处理方式,设绿肥全量还田(WG)、绿肥根茬还田(WR)和麦后休闲(W) 3 种模式,共 9 个处理,其中 WI3 为试区习惯种植模式和灌水定额,每处理重复 3 次,小区面积 42 m²。不同处理的代码及灌溉制度见表 1。

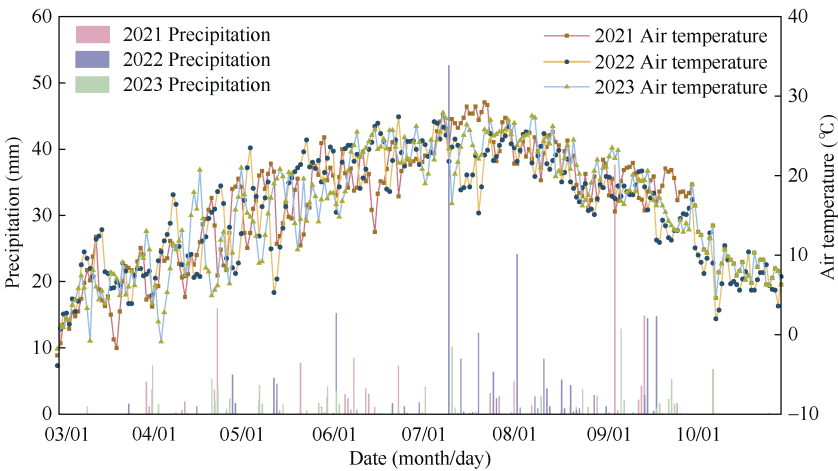


图 1 2021—2023 年试验区降雨量和平均气温变化
Fig. 1 Dynamics of precipitation and average air temperature in the study area from 2021 to 2023

表 1 不同处理的代码及灌溉制度
Table 1 Codes and irrigation schedules for different treatment (mm)

灌溉水平 Irrigation level	绿肥处理方式 Green manure re- turning method	处理代码 Treatment code	灌水定额 Irrigation quota				
			小麦季 Wheat			绿肥季 Green manure	
			苗期 Seedling stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	苗期 Seedling stage	现蕾期 Budding stage
当地习惯灌水 I3	全量还田 WG	WG13	90	110	90	60	70
	根茬还田 WR	WR13					
	不种绿肥 W	W13	90	110	90	—	—
减量 50 mm I2	全量还田 WG	WG12	75	90	75	60	70
	根茬还田 WR	WR12					
	不种绿肥 W	W12	75	90	75	—	—
减量 100 mm I1	全量还田 WG	WG11	60	70	60	60	70
	根茬还田 WR	WR11					
	不种绿肥 W	W11	60	70	60	—	—

I1、I2 和 I3 分别代表减量 100 mm、减量 50 mm 和当地习惯灌水量。WG、WR 和 W 依次为麦后复种绿肥并全量还田、绿肥仅根茬还田和麦后休闲。
I1, I2, and I3 represent irrigation reductions of 100 mm, 50 mm, and the local conventional irrigation amount, respectively. WG, WR, and W correspond to green manure with full biomass return after wheat, green manure with only root and stubble return, and fallow after wheat harvest, respectively.

试验用春小麦品种为宁春 4 号, 播种量为 450 kg hm^{-2} ; 绿肥箭筈豌豆品种为兰箭 2 号, 播种量为 225 kg hm^{-2} 。春小麦播种日期分别为 2021 年 3 月 23 日、2022 年 3 月 29 日和 2023 年 3 月 23 日, 收获日期分别为 2021 年 7 月 20 日、2022 年 7 月 19 日和 2023 年 7 月 20 日; 绿肥在春小麦收获后播种, 于当年 10 月中下旬(绿肥盛花期)还田。绿肥全量还田采用秸秆粉碎机进行粉碎后旋耕入土; 根茬还田则为去除地上部分, 仅保留根茬旋耕还田; 不种绿肥处理与其他绿肥处理在 10 月下旬同一时间进行翻耕。春小麦生育期内, 施氮(N) 180 kg hm^{-2} , 施磷(P_2O_5) 90 kg hm^{-2} , 均以基肥形式施入。绿肥生长期不施肥。各处理统一进行冬储灌溉, 灌水量为 120 mm 。

1.3 测定指标与计算方法

1.3.1 土壤含水量 春小麦播前、收获后及绿肥盛花期测定每个小区 0~120 cm 土层土壤含水量。其中, 0~30 cm 土层按每 10 cm 分层, 采用烘干法测定水分含量; 30~120 cm 土层则每 30 cm 设一层, 使用水分中子仪(美国 CPN 公司 503DR)进行测量, 每个小区设 1 个监测点, 各处理重复 3 次, 取 3 次重复的平均值作为每个处理土壤含水量的测定值。

1.3.2 土壤贮水量(soil water storage, SWS)

$$\text{SWS} = \sum_{i=1}^6 (h_i \times a_i \times \theta_i) \times 10$$
, 式中, h 为土层厚度(cm), a 为土壤容重(g cm^{-3}), θ 为土壤质量含水量(%), 10 为单位换算系数, i 为土壤层次^[4]。

1.3.3 作物耗水量(crop water consumption, ET)

$\text{ET} = \text{P} + \text{I} + \text{W} - \text{R} - \text{D} + \text{SWS}_1 - \text{SWS}_2$, 采用农田水分平衡公式计算^[14], 式中, P 为生育期内降雨量(mm), I 为生育期内灌水量(mm), W 为地下水补给量(mm), R 为地表径流量(mm), D 为深层渗漏量(mm)。SWS₁ 为播前土壤贮水量(mm), SWS₂ 为收获期土壤贮水量(mm)。由于试验区地下水在 30 m 以下, 且灌水量相对较少, 故忽略了地下上升水、地表径流及渗漏量的影响。

1.3.4 棵间蒸发量(evaporation, E) 用微型蒸发器(micro lysimeter)测定^[15]。该装置由直径 11 cm、高 15 cm、壁厚 5 mm 的 PVC 管制成, 底部以塑料薄膜密封, 并垂直嵌入预埋于小区中心作物行间、尺寸相匹配(直径 12 cm、高 15 cm)的 PVC 外管中。测量时, 将内置原装土样的微型蒸发器从外管中垂直提取, 使用 JY201 型电子天平(精度 0.1 mg)称重,

并记录数据。微型蒸发器中土样每减少 1 g 相当于蒸发水分 0.1051 mm。为保证土壤含水量与田间一致, 每隔 3~5 d 更换 1 次管内原状土样, 并在降雨或灌溉后及时补充测定。

1.3.5 蒸散比(E/ET) 棵间蒸发量(E)与耗水量(evapotranspiration, ET)之比, E/ET 越大, 水分利用效率越低。

1.3.6 春小麦籽粒产量(yield, Y) 每个小区在距离边界 1 m 的中间随机选取 1 个 4 m^2 的样方, 收获后单独脱粒, 用谷物水分仪测定籽粒含水量后, 折算成含水量 13% 的籽粒产量(kg hm^{-2})。

1.3.7 水分利用效率(water use efficiency, WUE)

$\text{WUE} = \text{Y}/\text{ET}$ 。

1.3.8 灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, WUE_i) $\text{WUE}_i = \text{Y}/\text{I}$, 式中, I 为春小麦生育期内总灌水量(mm)。

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2021 整理汇总数据, 使用 Origin 2021 绘图软件进行图表制作, 利用 SPSS 27.0 统计分析软件进行两因素方差分析(two-way ANOVA)和显著性检验(Duncan 法, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 春小麦籽粒产量对减量灌水和绿肥还田的响应

减量灌水降低了春小麦籽粒产量, 但绿肥还田能提高春小麦籽粒产量, 且绿肥能补偿减量灌水导致的减产(图 2)。减量 100 mm 灌水(I1)和减量 50 mm 灌水(I2)处理春小麦籽粒产量较常规灌水量(I3)分别降低了 11.6% 和 3.2%, 麦后复种绿肥并全量还田(WG)和麦后复种绿肥仅根茬还田(WR)较麦后休闲(W)籽粒产量分别提高 11.2% 和 5.0%。与常规灌水麦后休闲处理(WI3)相比, 减量 100 mm 灌水复种绿肥仅根茬还田(WRI1)籽粒产量降低了 8.0%, 但减量 100 mm 灌水复种绿肥全量还田(WGI1)籽粒产量与 WI3 差异不显著; 减量 50 mm 灌水复种绿肥全量还田(WGI2)籽粒产量较 WI3 提高 7.7%, 但减量 50 mm 灌水复种绿肥仅根茬还田(WRI2)籽粒产量与 WI3 差异不显著。说明麦后复种绿肥并全量还田能补偿减量 100 mm 灌水对籽粒产量造成的负效应, 绿肥仅根茬还田可以补偿减量 50 mm 灌水造成的小麦产量损失。

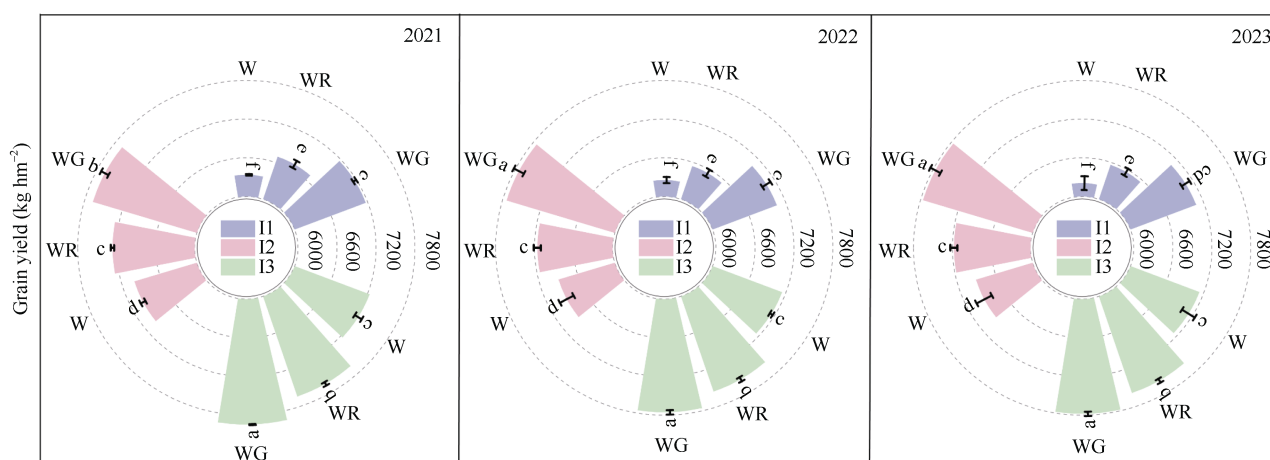


图 2 不同灌水及绿肥处理方式下春小麦籽粒产量

Fig. 2 Grain yield of spring wheat under different irrigation and green manure treatments

I1、I2 和 I3 分别代表减量 100 mm、减量 50 mm 和当地习惯灌水量。WG、WR 和 W 依次为麦后复种绿肥并全量还田、绿肥仅根茬还田和麦后休闲。同一年份不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

I1, I2, and I3 represent irrigation reductions of 100 mm, 50 mm, and the local conventional irrigation amount, respectively. WG, WR, and W correspond to green manure with full biomass return after wheat, green manure with only root and stubble return, and fallow after wheat harvest, respectively. Different letters within the same year indicate significant differences among treatments at the $P < 0.05$ level.

2.2 减量灌水下不同绿肥还田方式对春小麦-绿肥耗水特性的影响

2.2.1 春小麦播前、收获后以及绿肥还田时土壤贮水量 减量灌水降低了春小麦播前土壤贮水量，但绿肥还田能够提高播前土壤贮水量，尤其 0~30 cm 土层增幅最大(图 3)，且绿肥能补偿减量灌水导致的土壤贮水量降低(表 2)。I1、I2 处理播前土壤贮水量较 I3 分别降低 27.5%、8.6%，而 WG、WR 较 W 播前土壤贮水量分别提高 20.0%、8.2%，其中 0~30 cm 土层播前土壤贮水量在 WG、WR 处理下较 W 处理分别提高 31.8%和 14.4%。与 WI3 相比，WGI1、WRI1 处理播前土壤贮水量分别降低 13.4%、25.9%，而 WGI2 较 WI3 处理播前土壤贮水量提高 7.9%，WRI2 与 WI3 差异不显著。由此可见，绿肥能补偿减量 50 mm 灌水造成的播前土壤贮水量降低，且复种绿肥全量还田结合减量 50 mm 灌水提高下茬春小麦播前土壤贮水量的效果更突出。

减量灌水降低了春小麦收后土壤贮水量，但绿肥还田能够提高收后土壤贮水量，尤其 0~30 cm 土层增幅最大(图 3)，且绿肥能补偿减量灌水造成的土壤贮水量降低(表 2)。I1、I2 处理收后土壤贮水量较 I3 分别降低 30.8%、11.6%，而 WG、WR 较 W 收后土壤贮水量分别提高 41.7%、21.0%，其中 0~30 cm 土层收后土壤贮水量在 WG、WR 处理下较 W 处理分别提高 51.6%和 26.6%。与 WI3 相比，WGI1、WRI1

处理收后土壤贮水量分别降低 8.0%、25.0%，而 WGI2 较 WI3 处理收后土壤贮水量提高 17.4%，WRI2 与 WI3 差异不显著。说明绿肥能补偿减量 50 mm 灌水造成的收后土壤贮水量降低，且复种绿肥全量还田结合减量 50 mm 灌水可有效提高土壤蓄水能力。

减量灌水降低了绿肥还田时土壤贮水量，但种植绿肥能够提高绿肥还田时土壤贮水量，尤其 0~30 cm 土层增幅最大(图 3)，且绿肥能补偿小麦季减量灌水造成的土壤贮水量降低(表 2)。I1、I2 处理绿肥还田时土壤贮水量较 I3 分别降低 25.5%、9.0%，而 WG、WR 较 W 绿肥还田时土壤贮水量分别提高 31.1%、14.6%，其中 0~30 cm 土层绿肥还田时土壤贮水量在 WG、WR 处理下较 W 处理分别提高 40.4%和 18.1%。与 WI3 相比，WGI1、WRI1 处理绿肥还田时土壤贮水量分别降低 5.8%、21.8%，而 WGI2 较 WI3 处理绿肥还田时土壤贮水量提高 14.7%，WRI2 与 WI3 差异不显著。可见，绿肥能补偿小麦季减量 50 mm 灌水造成的绿肥还田时土壤贮水量降低，且复种绿肥全量还田结合减量 50 mm 灌水可进一步提高绿肥还田时土壤贮水量。

2.2.2 小麦-绿肥系统总耗水量及阶段性耗水量

减量灌水降低了小麦季、绿肥季及复种系统的耗水量，绿肥降低了小麦季耗水量，而提高了绿肥季与复种系统的耗水量，二者的互作效应对小麦

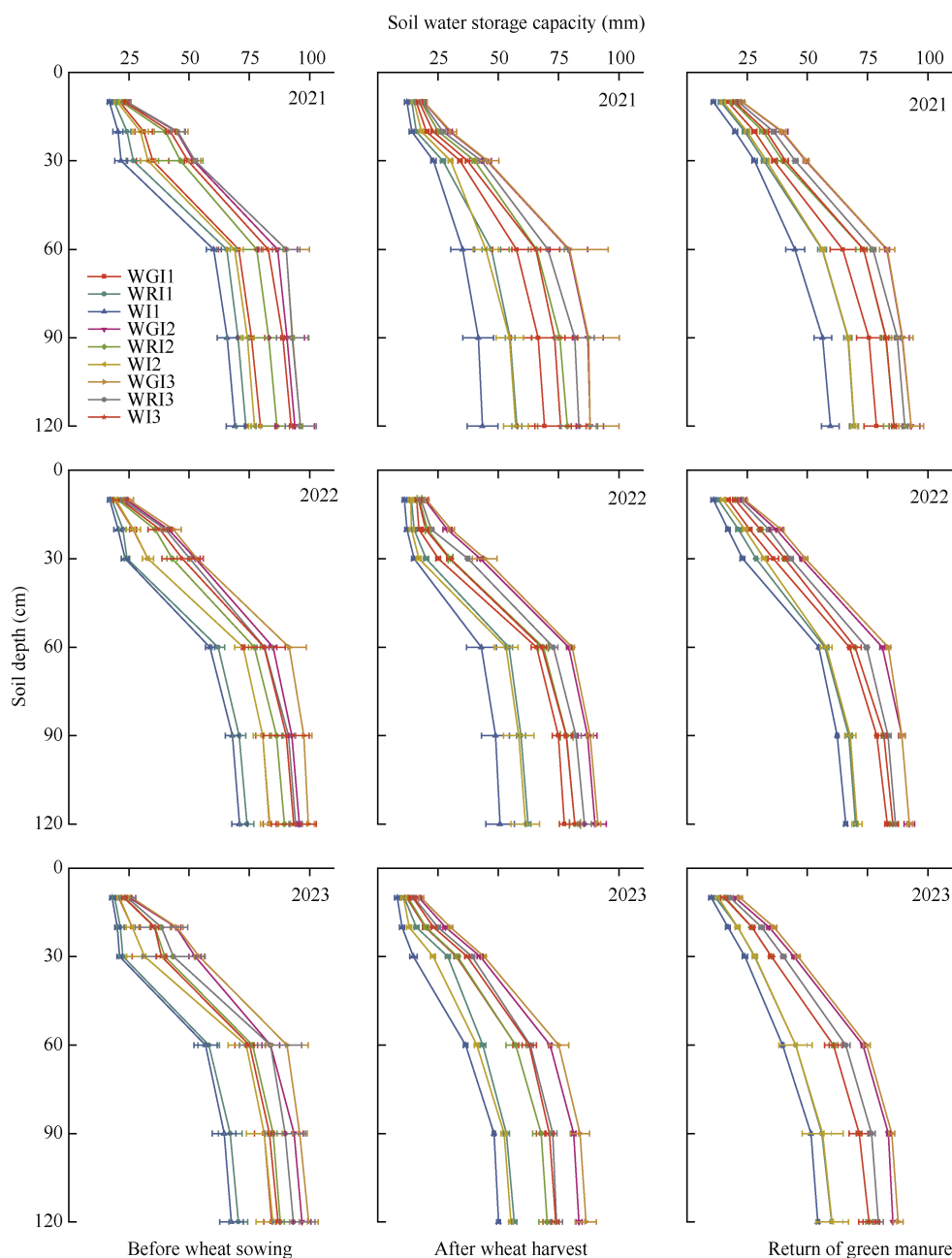


图 3 不同灌水及绿肥处理方式下春小麦播前、收获后以及绿肥还田时 0~120 cm 土层土壤贮水量的垂直变化

Fig. 3 Vertical distribution of soil water storage (0–120 cm) before sowing, after harvest, and at green manure incorporation under different irrigation and green manure treatments

处理同图 2。Treatments are the same as those given in Fig. 2.

季、绿肥季及复种系统的耗水量均不显著(表 2)。春小麦从播前至收获阶段的耗水量较大, 占总耗水量的 73.0%。I1、I2 处理小麦季耗水量较 I3 分别降低 24.7%、10.5%, WG、WR 较 W 小麦季耗水量分别降低 7.8%、5.3%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 小麦季耗水量分别降低 28.2%、27.4%、16.1%和 13.3%。在绿肥季, I1、I2 处理耗水量较 I3 分别降低了 6.7%、3.8%, 而 WG、WR 较

W 耗水量分别提高 284.3%、277.9%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 绿肥季耗水量分别提高 210.4%、212.9%、224.8%和 215.2%。小麦-绿肥系统较单作小麦增加耗水量 25.1%。在小麦-绿肥系统中, I1、I2 处理系统总耗水量较 I3 分别降低 20.1%、8.8%, 而 WG、WR 较 W 总耗水量分别提高 24.3%、25.8%。与 WI3 相比, WGI2、WRI2 较 WI3 处理总耗水量分别提高 12.6%、13.8%, 而 WGI1、WRI1

表 2 不同灌水水平及绿肥处理方式下土壤贮水量和作物耗水量
Table 2 Soil water storage and crop water consumption under different irrigation levels and green manure treatments (mm)

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	绿肥处理 Green manure treatment	土壤贮水量 Soil water storage			作物耗水量 Crop water consumption		
			小麦播前 Before wheat sowing	小麦收获 After wheat harvest	绿肥还田 Return of green manure	小麦季 Wheat	绿肥季 Green manure	复种系统 Multiple crop-ping
2021	I1	WG	313.8 bc	263.5 cd	300.2 d	320.6 e	188.6 a	509.2 c
		WR	279.4 cd	217.0 de	262.4 e	332.9 de	179.8 a	512.7 c
		W	254.2 d	169.6 e	220.0 f	355.0 cd	44.8 b	399.8 e
	I2	WG	392.0 a	348.8 ab	377.2 a	363.6 c	196.8 a	560.4 b
		WR	356.1 ab	302.4 abc	332.3 c	374.1 c	195.3 a	569.4 b
		W	303.1 c	220.4 de	266.0 e	403.1 b	49.6 b	452.7 d
	I3	WG	401.4 a	350.4 a	378.0 a	421.3 b	197.6 a	618.9 a
		WR	401.2 a	324.5 ab	357.6 b	447.1 a	192.1 a	639.2 a
		W	379.0 a	292.2 bc	336.1 c	457.2 a	51.3 b	508.5 c
2022	I1	WG	314.9 cd	276.5 c	308.0 d	331.5 d	210.4 ab	541.9 c
		WR	271.4 de	225.3 d	257.6 f	339.2 d	209.6 b	548.8 c
		W	258.5 e	180.7 e	234.2 g	370.9 cd	58.4 c	429.3 e
	I2	WG	390.9 ab	347.3 a	371.0 a	386.7 c	218.3 a	605.0 b
		WR	352.0 bc	297.0 bc	328.2 c	398.2 bc	210.7 ab	608.8 b
		W	315.5 cd	217.6 d	267.4 e	441.0 ab	62.1 c	503.1 d
	I3	WG	410.1 a	355.1 a	377.7 a	448.1 a	219.3 a	667.4 a
		WR	379.5 ab	318.6 b	343.8 b	454.0 a	216.7 ab	670.7 a
		W	371.3 ab	294.4 c	328.1 c	470.1 a	78.2 c	548.3 c
2023	I1	WG	317.8 d	259.5 c	286.0 c	307.6 d	160.4 a	468.0 c
		WR	258.7 e	209.7 d	222.2 d	298.3 d	174.5 a	472.8 c
		W	248.2 e	167.6 f	196.7 e	329.9 cd	27.9 b	357.9 e
	I2	WG	396.4 ab	324.0 a	340.9 a	371.6 bc	170.2 a	541.8 b
		WR	348.1 bcd	261.1 c	286.1 c	386.3 ab	162.0 a	548.3 b
		W	318.5 d	195.2 e	223.9 d	422.6 ab	28.3 b	450.9 d
	I3	WG	411.4 a	337.6 a	351.6 a	423.0 ab	173.1 a	596.1 a
		WR	373.3 abc	289.4 b	311.1 b	433.3 a	165.2 a	598.5 a
		W	342.4 cd	282.6 b	285.5 c	409.2 ab	50.7 b	459.9 c
显著性 Significance (<i>P</i> -value)								
灌水水平 Irrigation level (I)			**	**	**	**	*	**
绿肥处理方式 Green manure treatment (G)			**	**	**	**	*	**
灌水×绿肥 I×G			*	*	**	NS	NS	NS

处理同图 2。数据后不同字母表示同一年度中不同处理差异显著($P < 0.05$)。**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: 无显著差异。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters following the data indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: no significant difference.

与 WI3 无显著差异。由此可见, 复种绿肥由于绿肥自身生长需要消耗一定的水分, 使小麦-绿肥系统总耗水量显著高于单作小麦, 但减量灌水能降低小麦-绿肥系统总耗水量。

2.2.3 棵间蒸发量 减少灌水量降低了小麦季、绿肥季及复种系统的棵间蒸发量, 绿肥则增大了绿肥季棵间蒸发量, 而减少了小麦季棵间蒸发量, 二

者互作对小麦季、绿肥季及复种系统的棵间蒸发量均不显著(表 3)。在小麦季, I1、I2 处理棵间蒸发量较 I3 分别降低 36.8%、21.0%, WG、WR 较 W 棵间蒸发量分别降低 24.5%、17.8%, 说明绿肥全量还田降低棵间蒸发量的效果优于根茬还田。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 棵间蒸发量分别降低 51.6%、48.8%、39.7%和 33.6%。在绿肥季, I1、I2

处理棵间蒸发量较 I3 分别降低了 14.3%、6.7%, 而 WG、WR 较 W 棵间蒸发量分别提高 70.6%、61.2%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 绿肥季棵间蒸发量分别提高 32.1%、27.4%、46.4%和 37.6%。小麦-绿肥系统较单作小麦降低棵间蒸发量 2.2%。在小麦-绿肥系统中, I1、I2 处理系统总棵间蒸发量较 I3 分别降低 30.3%、17.0%, 不同绿肥还田方式间无

显著差异。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 系统总棵间蒸发量分别降低 33.6%、32.4%、21.3%和 18.4%。

2.2.4 蒸散比(E/ET) 减量灌水降低了小麦季及复种系统的 E/ET, 绿肥降低了小麦季、绿肥季及复种系统的 E/ET, 二者的互作效应对小麦季、绿肥季及复种系统的 E/ET 均不显著(表 3)。在小麦

表 3 不同灌水水平及绿肥处理方式下棵间蒸发量和蒸散比

Table 3 Soil evaporation and evaporation to evapotranspiration ratio under different irrigation levels and green manure treatments

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	绿肥处理 Green manure treatment	棵间蒸发量 Soil evaporation (mm)			蒸散比 Ratio of evaporation to evapotranspiration (%)		
			小麦季 Wheat	绿肥季 Green manure	复种系统 Multiple cropping	小麦季 Wheat	绿肥季 Green manure	复种系统 Multiple cropping
			Wheat	Green manure	Multiple cropping	Wheat	Green manure	Multiple cropping
2021	I1	WG	107.1 f	83.6 a	190.6 d	33.4 f	44.3 b	37.4 d
		WR	114.0 f	79.8 a	193.8 d	34.3 ef	44.2 b	37.8 d
		W	151.1 d	44.8 b	195.9 d	42.5 bc	100.0 a	49.2 b
	I2	WG	135.7 e	93.5 a	228.3 c	37.3 de	47.0 b	40.7 cd
		WR	146.8 d	88.0 a	234.8 bc	39.3 cd	44.6 b	41.2 cd
		W	185.0 b	49.6 b	234.6 bc	46.0 b	100.0 a	51.9 ab
	I3	WG	170.3 c	94.3 a	264.6 ab	40.5 cd	47.0 b	42.7 cd
		WR	190.4 b	86.4 a	276.8 a	42.6 bc	44.6 b	43.3 c
		W	228.4 a	51.3 b	279.6 a	50.0 a	100.0 a	55.0 a
2022	I1	WG	114.6 h	94.1 ab	208.7 c	34.6 d	44.7 b	38.5 d
		WR	119.5 h	90.2 ab	209.8 c	35.3 d	43.1 b	38.2 d
		W	146.0 f	58.4 d	204.4 c	39.4 bcd	100.0 a	47.5 b
	I2	WG	137.9 g	100.3 a	238.0 b	36.0 cd	45.9 b	39.3 cd
		WR	157.1 e	98.0 a	253.8 b	39.5 bcd	45.2 b	41.7 cd
		W	175.5 d	62.1 cd	237.6 b	39.8 bcd	100.0 a	47.2 b
	I3	WG	183.2 c	100.6 a	283.8 a	41.0 bc	46.0 b	42.6 bcd
		WR	195.3 b	98.7 a	294.0 a	43.0 ab	45.6 b	43.8 bc
		W	222.9 a	78.2 bc	301.1 a	47.7 a	100.0 a	55.2 a
2023	I1	WG	96.4 f	60.41 ab	156.8 d	31.4 d	37.8 bc	33.5 de
		WR	102.6 f	59.47 ab	162.1 d	34.5 cd	34.2 c	34.3 e
		W	136.0 d	27.94 c	163.9 d	41.4 b	100.0 a	46.0 b
	I2	WG	122.2 e	70.16 a	192.3 c	32.9 d	41.2 b	35.5 de
		WR	132.2 d	62.03 ab	194.2 c	34.2 cd	38.1 bc	35.4 de
		W	166.5 b	28.35 c	194.8 c	39.5 bc	100.0 a	43.3 bc
	I3	WG	153.3 c	73.09 a	226.4 b	36.4 bcd	42.0 b	38.1 cde
		WR	171.4 b	65.21 ab	236.6 b	40.0 bc	39.4 b	39.7 cd
		W	205.5 a	50.75 b	256.3 a	50.3 a	100.0 a	55.7 a

显著性 Significance (*P*-value)

灌水水平 Irrigation level (I)

**

*

**

**

NS

**

绿肥处理方式 Green manure treatment (G)

**

**

NS

**

**

**

灌水×绿肥 I×G

NS

NS

NS

NS

NS

NS

处理同图 2。数据后不同字母表示同一年度中不同处理差异显著($P < 0.05$)。**: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters following the data indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; NS: no significant difference.

季, I1、I2 处理 E/ET 较 I3 分别降低 16.5%、12.0%, WG、WR 较 W 处理 E/ET 分别降低 18.5%、13.6%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 的 E/ET 分别降低 32.9%、29.7%、28.3%和 23.7%。在绿肥季, 不同灌水水平之间的 E/ET 无显著差异, 而 WG、WR 处理 E/ET 较 W 分别降低 56.0%、57.9%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 的 E/ET 分别降低 57.7%、59.5%、55.3%和 57.4%。小麦-绿肥系统较单作小麦降低蒸散比 22.0%。在小麦-绿肥系统中, I1、I2 处理 E/ET 较 I3 分别降低 12.9%、9.6%, WG、WR 较 W 处理的 E/ET 分别降低 22.8%、21.2%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 系统总 E/ET 分别降低 34.0%、33.5%、30.3%和 28.7%。以上结果表明, 小麦-绿肥较单作小麦能够提高作物的

有效耗水比例, 降低无效耗水, 从而优化作物的耗水结构。

2.3 减量灌水下不同绿肥还田方式对春小麦水分利用效率的影响

2.3.1 春小麦水分利用效率 减量灌水、绿肥还田及其二者互作均提高了春小麦水分利用效率(图 4)。I1、I2 处理春小麦水分利用效率较 I3 分别提高 17.4%、7.9%, WG、WR 春小麦水分利用效率较 W 分别高 21.0%、11.4%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 春小麦水分利用效率分别提高 37.4%、26.4%、27.0%和 15.2%。以上结果表明, 麦后复种绿肥是提高下茬小麦水分利用效率的可行措施, 且绿肥全量还田较根茬还田对春小麦水分利用效率的促进作用更显著。

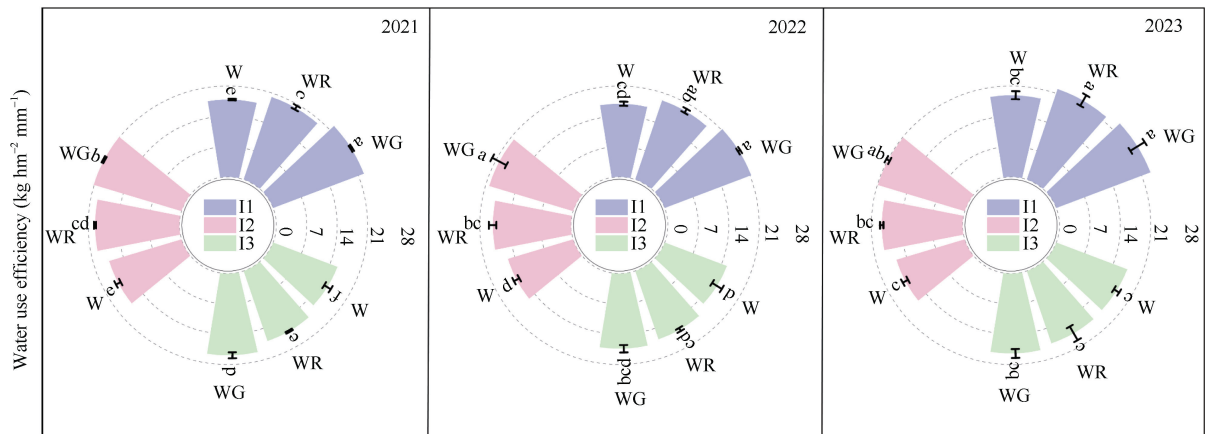


图 4 不同灌水及绿肥处理方式下春小麦水分利用效率

Fig. 4 Water use efficiency of spring wheat under different irrigation and green manure treatments

处理同图 2。同一年份不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters within the same year indicate significant differences among treatments at the $P < 0.05$ level.

2.3.2 春小麦灌溉水利用效率 减量灌水、绿肥还田及二者互作均提高了春小麦灌溉水利用效率(图 5)。I1、I2 处理春小麦灌溉水利用效率较 I3 分别提高 34.9%、16.9%, WG、WR 较 W 灌溉水利用效率分别提高 11.5%、5.0%。与 WI3 相比, WGI1、WRI1、WGI2 和 WRI2 春小麦灌溉水利用效率分别提高 51.2%、40.5%、30.1%和 21.3%。结果表明, 麦后复种绿肥并全量还田提高春小麦灌溉水利用效率的效果突出, 且结合减量 100 mm 灌水效果最好。

3 讨论

3.1 减量灌水下绿肥还田对春小麦籽粒产量的补偿机制

水分是影响作物生长发育和产量形成的关键要

素^[8,16]。已有研究表明, 灌水不足导致土壤含水量降低, 进而影响作物对水分和养分的吸收与利用, 最终导致作物减产^[16]。本研究中, 与当地习惯灌水量相比, 减量 50 mm 灌水和减量 100 mm 灌水使春小麦籽粒产量分别降低了 3.2%和 11.6%。绿肥作为一种清洁的有机肥源, 翻压后能够有效改善土壤的养分状况, 促进作物对水分和养分的吸收, 提高作物干物质积累和收获指数, 从而提高产量^[6,9,17]。本研究结果表明, 麦后复种绿肥并全量还田和麦后复种绿肥仅根茬还田较麦后休闲处理春小麦籽粒产量分别提高 11.2%和 5.0%。此外, 有研究证实, 长期种植并翻压箭筈豌豆可在灌水量减少 60 mm (340 mm) 条件下维持玉米产量^[18], 这与本研究结果相似。本研究发现, 与常规灌水麦后休闲处理相比, 减量 100 mm

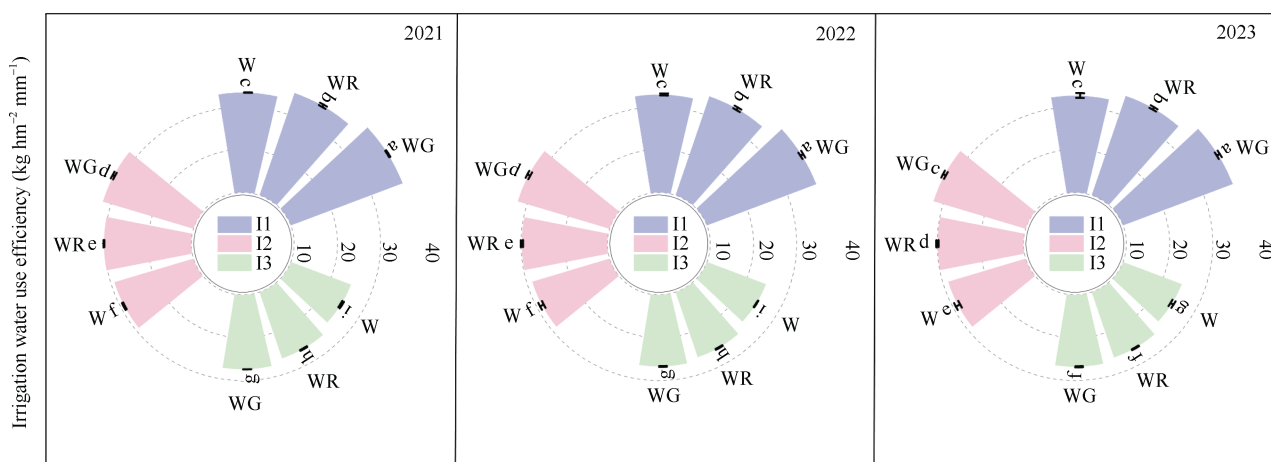


图5 不同灌水及绿肥处理方式下春小麦灌溉水利用效率

Fig. 5 Irrigation water use efficiency of spring wheat under different irrigation and green manure treatments

处理同图2。同一年份不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters within the same year indicate significant differences among treatments at the $P < 0.05$ level.

灌水复种绿肥仅根茬还田籽粒产量降低8.0%，但减量100 mm灌水复种绿肥全量还田籽粒产量与常规灌水麦后休闲处理差异不显著；减量50 mm灌水复种绿肥全量还田籽粒产量较常规灌水麦后休闲处理提高7.7%，但减量50 mm灌水复种绿肥仅根茬还田产量与常规灌水麦后休闲处理差异不显著。说明减量100 mm灌水下，复种绿肥并全量还田可补偿因减灌造成的春小麦产量损失，而复种绿肥仅根茬还田不足以补偿。减量50 mm灌水下，复种绿肥并全量还田和复种绿肥仅根茬还田均对减灌春小麦产量有补偿作用，且绿肥全量还田所产生的效应高于根茬还田。这主要是因为：(1) 绿肥还田改善了土壤的水分环境，为后茬作物水分和养分的吸收利用提供了有利条件，从而促进作物产量的提高^[6]；(2) 绿肥翻压还田能够增加养分的还田量，改善土壤养分状况，提升土壤肥力，从而维持或提高下茬作物产量^[19-20]；(3) 翻压还田的绿肥生物量也会对后茬作物的产量产生影响^[19-20]。

3.2 减量灌水下绿肥还田对春小麦耗水特性的调控效应

水资源在作物生产中发挥重要作用，水分亏缺不仅影响土壤中水分的有效性，而且限制作物对水分的吸收利用^[16]。本研究中，随着灌水量的减少，春小麦播前、收后和绿肥还田时土壤贮水量也相应降低。在减量灌水的情况下，需要通过其他农艺措施来弥补和提高土壤含水量。绿肥作为一种有机肥源，其茎叶繁茂，覆盖地表后能减少土壤无效蒸发，增

加水分入渗，提高土壤含水量^[9-10]；绿肥长期翻压还田后能改善土壤理化性质，促进土壤孔隙度和大团聚体形成，提高土壤持水供水能力^[21]。本研究结果表明，减量100 mm灌水下，复种绿肥并全量还田可补偿因减量灌水造成的播前和收后土壤贮水量的下降，而复种绿肥仅根茬还田不足以补偿。减量50 mm灌水下，复种绿肥并全量还田和复种绿肥仅根茬还田均对土壤贮水量有补偿作用，且绿肥全量还田所产生的效应优于根茬还田，这可能与翻压还田的绿肥生物量更高相关^[10,19]。但也有研究指出，相较于裸地休闲，种植填闲作物会在其生长期增加土壤水分消耗，进而使休闲期土壤含水量有所下降^[22-23]。本研究结果表明，尽管夏季种植绿肥会因自身生长消耗水分，但绿肥还田时土壤贮水量提高了14.6%~31.1%，其主要是因为：(1) 休闲期土壤贮水量的变化本质是绿肥作物生长过程中水分消耗与其遮荫作用所抑制的蒸发之间的平衡，尽管绿肥作物生长会消耗部分土壤水分，但其茎叶覆盖会增强水分入渗并提升表层含水量^[12]；(2) 在河西绿洲灌区，降雨并非农田土壤水分的主要来源，尽管种植绿肥会消耗部分土壤水分，但通过在绿肥生长阶段进行灌溉，可以有效弥补因种植绿肥带来的水分亏缺，并为下茬作物提供更优良的土壤水分环境^[4]。此外，通过分析春小麦播前、收后及绿肥还田时0~120 cm土层贮水量发现，随着土层深度增加变化趋缓，但各层均以减量50 mm灌水结合复种绿肥全量还田保持较高的土壤贮水量。因此，在减量50 mm

灌水下, 麦后复种绿肥并全量还田是实现节水保墒的最优策略, 兼具土壤改良与水分高效利用双重效益。

作物耗水量受作物蒸腾耗水与棵间蒸发共同影响, 其中棵间蒸发占较大比重, 因此, 减少棵间蒸发和土壤无效水分消耗是实现作物水分高效利用的重要策略^[15]。本研究中, 随着灌水量的减少, 春小麦和绿肥在各自生长阶段的棵间蒸发量和耗水量均呈下降趋势。这主要是因为减量灌水致使表层土壤水分降低, 无效蒸发也随之减少^[24], 进而降低了小麦和绿肥生长阶段的耗水量。也有研究指出, 绿肥还田能调控土壤水热特性、抑制土壤蒸发、促进作物水分有效利用^[25]。本研究中, 相较于不种绿肥处理, 绿肥还田使小麦季的棵间蒸发量和耗水量分别降低了 17.8%~24.5%和 5.3%~7.8%, 且绿肥全量还田所产生的效应高于根茬还田。一方面, 绿肥还田在一定程度上抑制土壤与大气层之间水分与能量交换, 抑制土壤蒸发, 减少土壤水分无效损失, 降低耗水总量^[11,25]; 另一方面, 绿肥还田后能增加土壤有机质^[26], 提高土壤孔隙度^[27]、导水率^[28]和团聚体稳定性^[21]来增强土壤蓄水保墒能力, 从而使更多的水向土壤深层入渗, 减少表层土壤的无效耗水。本研究结果还表明, 在绿肥生长阶段, 与麦后休闲相比, 复种绿肥使绿肥季的棵间蒸发量和耗水量分别提高了 61.2%~70.6%和 27.8%~28.4%, 但蒸散比降低了 56.0%~57.9%。主要原因是: (1) 灌溉是干旱地区土壤蒸发的主要驱动力^[24]。在河西灌区, 为满足绿肥生长耗水进行了额外灌水, 而麦后休闲处理不灌水。这导致复种绿肥处理的棵间蒸发量与耗水量增加。同时, 麦后休闲处理的耗水量完全来源于无效蒸发, 从而提高了其蒸散比。(2) 休闲期土壤蓄水量的变化本质上是绿肥生长消耗水分与其遮荫减少土壤蒸发 2 种作用共同调节的结果^[10,12], 但此阶段绿肥作物的耗水效应显著大于其遮荫保水效应^[10]。此外, 本研究结果还显示, 夏季休闲期种植绿肥因其自身生长需水, 使小麦-绿肥系统的耗水量较单作小麦提高 25.1%, 但系统的总耗水量随灌水量减少而降低。

3.3 减量灌水下绿肥还田对春小麦水分高效利用的促进作用

提高作物产量与降低耗水量是提升作物水分利用效率的 2 个主要途径。优化灌溉制度^[29]和绿肥还田方式^[11]可通过降低土壤无效蒸发并促进作物有效蒸腾来提高水分利用效率。已有研究表明, 在一定

范围内适度减少灌溉量可以提高作物水分利用效率, 但灌水不足反而降低水分利用效率^[7,16]。本研究结果显示, 与当地习惯灌水量相比, 减量 50 mm 灌水和减量 100 mm 灌水使春小麦水分利用效率分别提高 7.9%和 17.4%。这主要是因为, 在减量灌水的条件下作物产量虽有所下降, 但土壤无效蒸发和总耗水量也同步减少, 且耗水量的降幅大于产量的下降幅度, 从而提升了水分利用效率。也有大量研究已证实, 种植并翻压绿肥能增强土壤的持水能力, 改善土壤水分环境, 从而为主栽作物提供更优良的水分条件, 最终提高产量和水分利用效率^[6,11]。本研究得出相似结果, 与不种绿肥相比, 绿肥全量还田和绿肥根茬还田使春小麦水分利用效率分别提高 21.0%和 11.4%, 其中绿肥全量还田增幅更大。其主要原因是尽管在夏闲期种植绿肥会消耗部分土壤水分, 但翻压还田后能抑制小麦季土壤蒸发, 减少无效耗水, 降低耗水总量^[10]; 同时绿肥翻压还田后能增加土壤有机质^[19], 改善土壤理化性质, 使更多的降水和灌溉水保留在土壤内, 从而提高下茬作物籽粒产量和水分利用效率^[10,30]。此外, 减量灌水结合绿肥还田能进一步提高后茬春小麦的水分利用效率。在灌水量相同的条件下, 灌溉水利用效率反映了作物在有限水分条件下的产能大小^[31]。本研究中, 与当地习惯灌水量相比, 减量 50 mm 灌水和减量 100 mm 灌水使春小麦灌溉水利用效率分别提高 16.9%和 34.9%。此外, 多项研究表明, 种植绿肥有利于减少灌溉用水, 从而提高灌溉水利用效率^[32]。但也有研究指出, 种植绿肥并未使灌溉水利用效率增加, 甚至有所降低^[33]。本研究中, 与不种绿肥相比, 复种绿肥使春小麦灌溉水利用效率提高 5.0%~11.5%, 且绿肥还田结合减量灌水能进一步提高下茬春小麦灌溉水利用效率。综上表明, 通过优化灌溉制度并筛选合理的绿肥还田方式以改善小麦耗水特性, 是提高小麦产量、水分利用效率和灌溉水利用效率的重要途径。

4 结论

在干旱绿洲灌区, 复种绿肥较麦后休闲处理具有减少春小麦耗水量、提高籽粒产量和水分利用效率的优势。其中, 麦后复种绿肥全量还田可补偿因减量 100 mm 灌水(灌溉定额为 320 mm)造成的春小麦籽粒产量损失。同时, 减量 100 mm 灌水结合绿肥全量还田进一步降低了春小麦耗水量, 提高了春小

麦水分利用效率和灌溉水利用效率。因此, 减量100 mm 灌水结合复种绿肥并全量还田是实现干旱灌区春小麦节水、稳产和水分高效利用的可行生产模式。

References

- [1] Alharbi S, Felemban A, Abdelrahim A, et al. Agricultural and technology-based strategies to improve water-use efficiency in arid and semiarid areas. *Water*, 2024, 16: 1842.
- [2] Wang B, van Dam J, Yang X L, et al. Reducing water productivity gap by optimizing irrigation regime for winter wheat-summer maize system in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2023, 280: 108229.
- [3] Yan Z X, Zhang W Y, Liu X W, et al. Grain yield and water productivity of winter wheat controlled by irrigation regime and manure substitution in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2024, 295: 108731.
- [4] 张殿凯, 李盼, 范虹, 等. 西北灌区复种绿肥及减氮条件下春小麦产量及水分利用特征. *中国农业科学*, 2024, 57: 2189–2201.
Zhang D K, Li P, Fan H, et al. Soil water use characteristics of spring wheat with multiple-cropping green manure and nitrogen reduction in northwest irrigated areas. *Sci Agric Sin*, 2024, 57: 2189–2201 (in Chinese with English abstract).
- [5] Li R, Chai S X, Chai Y W, et al. Mulching optimizes water consumption characteristics and improves crop water productivity on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agric Water Manag*, 2021, 254: 106965.
- [6] 吕汉强, 于爱忠, 柴强. 绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28: 671–679.
Lyu H Q, Yu A Z, Chai Q. Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 671–679 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张钊, 黄超, 樊宜, 等. 滴灌量对北疆春小麦生长发育、产量及水分利用效率的影响. *灌溉排水学报*, 2024, 43(4): 22–27.
Zhang Z, Huang C, Fan Y, et al. Effect of drip irrigation amount on growth, yield and water use efficiency of spring wheat in northern Xinjiang. *J Irrig Drain*, 2024, 43(4): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- [8] Mu L, Su K Q, Zhou T, et al. Yield performance, land and water use, economic profit of irrigated spring wheat/alfalfa intercropping in the inland arid area of northwestern China. *Field Crops Res*, 2023, 303: 109116.
- [9] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用. *应用生态学报*, 2020, 31: 1389–1402.
Fan Z L, Chai Q, Cao W D, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 1389–1402 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张少宏, 王俊, RAJAN Ghimire, 等. 黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应: Meta 分析. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29: 1879–1892.
Zhang S H, Wang J, Ghimire R, et al. Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: a Meta-analysis. *Chin J Eco-Agric*, 2021, 29: 1879–1892 (in Chinese with English abstract).
- [11] Wang F, Wang Y L, Lyu H Q, et al. No-tillage mulch with leguminous green manure retention reduces soil evaporation and increases yield and water productivity of maize. *Agric Water Manag*, 2023, 290: 108573.
- [12] Zhang D B, Zhang C, Ren H L, et al. Trade-offs between winter wheat production and soil water consumption via leguminous green manures in the Loess Plateau of China. *Field Crops Res*, 2021, 272: 108278.
- [13] 李婧, 张达斌, 王峥, 等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 136–142.
Li J, Zhang D B, Wang Z, et al. Effect of fertilizer and green manure incorporation methods on the growth and water use efficiency of winter wheat. *Agric Res Arid Areas*, 2012, 30(3): 136–142 (in Chinese with English abstract).
- [14] Chai Q, Gan Y T, Turner N C, et al. Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Adv Agron*, 2014, 126: 149–201.
- [15] Yin W, Feng F X, Zhao C, et al. Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments. *Int J Biometeorol*, 2016, 60: 1423–1437.
- [16] Wang N, Zhang T H, Cong A Q, et al. Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region. *Agric Water Manag*, 2023, 289: 108566.
- [17] 张达斌, 李婧, 姚鹏伟, 等. 夏闲期连续两年种植并翻压豆科绿肥对旱地冬小麦生长和养分吸收的影响. *西北农业学报*, 2012, 21(1): 59–65.
Zhang D B, Li J, Yao P W, et al. Effect of two years incorporation of leguminous green manure during summer fallow period on winter wheat growth and nutrients uptake in dryland. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2012, 21(1): 59–65 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张刁亮, 柴强, 殷文, 等. 干旱灌区减量灌水下玉米农艺性状、产量及水肥利用效率对间作绿肥的响应. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(5): 85–96.
Zhang D L, Chai Q, Yin W, et al. Response of maize agronomic traits, yield, water and fertilizer use efficiency to intercropping green manure under reduced irrigation levels in arid irrigation areas. *Agric Res Arid Areas*, 2024, 42(5): 85–96 (in Chinese with English abstract).
- [19] 罗跃, 张久东, 周国朋, 等. 河西绿洲灌区间作绿肥及其不同利用方式对玉米产量及土壤肥力的提升效应. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28: 402–413.
Luo Y, Zhang J D, Zhou G P, et al. Intercropping maize with green manure crops at various utilization patterns improves maize yield and soil fertility in Hexi Oasis irrigated area. *J Plant Nutr Fert*, 2022, 28: 402–413 (in Chinese with English abstract).
- [20] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响. *应用生态学报*, 2015, 26: 2329–2336.
Yao Z Y, Wang Z, Li J, et al. Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 2329–2336 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [21] 吕奕彤, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 1194–1204.
- Lyu Y T, Yu A Z, Lyu H Q, et al. Composition and stability of soil aggregates in maize farmlands under different green manure utilization patterns in an oasis irrigation area. *Chin J Eco-Agric*, 2021, 29: 1194–1204 (in Chinese with English abstract).
- [22] Singh H, Northup B K, Vara Prasad P V. Water storage and use efficiencies of rainfed winter wheat-summer green manure systems of the US Southern Great Plains. *Eur J Agron*, 2023, 146: 126818.
- [23] 张祺, 王俊. 填闲种植和施氮量对旱作冬小麦农田土壤水分及作物产量的影响. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 120–124.
- Zhang Q, Wang J. Effects of cover crop and N fertilization on soil moisture and crop yield in a dryland winter wheat field. *Agric Res Arid Areas*, 2018, 36(6): 120–124 (in Chinese with English abstract).
- [24] 马守臣, 张伟强, 段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 9–14.
- Ma S C, Zhang W Q, Duan A W. Effects of different deficit irrigation modes on grain yield and water use efficiency of winter wheat. *J Irrig Drain*, 2019, 38(8): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 麦后复种绿肥翻压还田结合减氮对土壤水热特性及玉米产量的影响. 作物学报, 2023, 49: 2793–2805.
- Wang P F, Yu A Z, Wang Y L, et al. Effects of multiple cropping green manure after wheat harvest combined with reduced nitrogen application on soil hydrothermal characteristics and maize yield. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 2793–2805 (in Chinese with English abstract).
- [26] Poeplau C, Don A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops: a meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ*, 2015, 200: 33–41.
- [27] Villamil M B, Bollero G A, Darmody R G, et al. No-till corn/soybean systems including winter cover crops. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 1936–1944.
- [28] Blanco-Canqui H, Shaver T M, Lindquist J L, et al. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Agron J*, 2015, 107: 2449–2474.
- [29] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区水氮耦合对燕麦品种陇燕 3 号耗水特性及产量的影响. 作物学报, 2017, 43: 1370–1380.
- Feng F X, Mu P, Zhao G Q, et al. Interaction of irrigation and nitrogen on water consumption characteristics and yield in oat variety Longyan 3 in northwest oasis irrigation area. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 1370–1380 (in Chinese with English abstract).
- [30] Ma D K, Yin L N, Ju W L, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Res*, 2021, 266: 108146.
- [31] Koech R, Langat P. Improving irrigation water use efficiency: a review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. *Water*, 2018, 10: 1771.
- [32] Nielsen D C, Lyon D J, Hergert G W, et al. Cover crop mixtures do not use water differently than single-species plantings. *Agron J*, 2015, 107: 1025–1038.
- [33] Badon T B, Prince Czarnecki J M, Krutz L J, et al. Cover crop and minimum tillage effects on yield, irrigation water use, and net returns. *Agrosyst Geosci Environ*, 2021, 4: e20158.