麦类作物学报 2026,46(9):1219－1229
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.10

网络出版时间:2026-09-04
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260904.1130.004

# 渭北旱塬夏闲期高丹草还田对后茬冬小麦产量及水分利用效率的影响

张生祥[1],张 雪[1],薛丁丁[1],徐炳成[1,2]

(1.西北农林科技大学草业与草原学院,陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西杨凌 712100)

**摘 要**:为探究夏季绿肥高丹草还田对后茬冬小麦产量和水分利用效率的影响,于2023—2024年在渭北旱塬开展田间试验,以夏休闲处理为对照(CK),设置高丹草不刈割全部还田($M_0$)、刈割1/3后还田($M_1$)和刈割1/2后还田($M_2$)3个处理,比较分析不同还田方式下冬小麦土壤水分、叶片光合生理特征、生物量积累、产量和水分利用效率的差异。结果表明,高丹草生长显著降低冬小麦播前0～200 cm土壤贮水量,降幅为1.31%～1.93%。与CK相比,高丹草还田显著提高冬小麦扬花期和灌浆期叶片净光合速率,增幅分别为17.34%～46.97%和6.27%～25.33%。$M_1$处理下拔节至灌浆期冬小麦叶片水分利用效率较CK显著提高,增幅12.72%～18.79%。高丹草还田可促进冬小麦地上部生物量积累,其中成熟期地上部生物量较CK显著提高,增幅18.47%～38.88%。高丹草还田处理下冬小麦产量提升主要源于穗数(增幅7.77%～15.94%)和千粒重(增幅2.50%～4.48%)的增加,籽粒产量较CK增加6.37%～13.97%,产量水分利用效率显著提高8.85%～23.60%。一个轮作周期后,$M_0$、$M_2$处理下土壤贮水量较CK均显著降低,降幅分别为2.22%和2.92%,$M_1$处理下则无显著变化;$M_0$和$M_1$处理显著降低冬小麦生育期耗水量,其中$M_1$处理降幅最大(6.53%);各高丹草还田处理均显著提高冬小麦水分利用效率,其中$M_1$处理增幅最大(23.60%)。本试验条件下,渭北旱塬夏闲期种植高丹草并适量还田,可增强后茬冬小麦光合性能,提高水分利用效率,促进籽粒产量提升,其中,刈割1/3后还田处理表现最优。

**关键词**:渭北旱塬;高丹草;绿肥;土壤水分;冬小麦

**中图分类号**:S512.1; S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1219-11

# Effects of Sorghum-Sudangrass Hybrid Returned as Green Manure on Winter Wheat Yield and Water Use in the Summer-Fallow Season in Weibei Rainfed Highland

**Zhang Shengxiang[1], Zhang Xue[1], Xue Dingding[1], Xu Bingcheng[1,2]**

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract**: A field experiment was conducted during the 2023－2024 growing season on the Weibei rainfed highland to investigate the effects of summer green manure sorghum-sudangrass biomass incorporation on grain yield and water use efficiency of subsequent winter wheat. A summer fallow treatment was used as the control(CK), and three incorporation treatments were established: whole biomass incorporation without mowing($M_0$), incorporation of one-third mowed biomass($M_1$), and incorporation of half mowed biomass($M_2$). The effects of different biomass incorporation methods on soil water storage, leaf photosynthetic characteristics, aboveground biomass accumulation, grain yield, and wa-

收稿日期:2026-01-29 修回日期:2026-06-09
**基金项目**:陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-51)
**第一作者** E-mail:2634799624@qq.com(张生祥)
**通讯作者** E-mail:Bcxu@ms.iswc.ac.cn(徐炳成)

ter use efficiency of winter wheat were evaluated. The results showed that sorghum-sudangrass cultivation significantly decreased soil water storage in the 0—200 cm soil profile before winter wheat sowing, with reductions of 1.31%—1.93% compared with CK. Sorghum-sudangrass biomass incorporation significantly increased leaf net photosynthetic rate of winter wheat at anthesis and grain-filling stages, with increases of 17.34%—46.97% and 6.27%—25.33%, respectively. The leaf water use efficiency under $M_1$ was significantly improved by 12.72%—18.79% from jointing stage to filling stage. Biomass incorporation promoted aboveground biomass accumulation of winter wheat, with mature-stage aboveground biomass increasing by 18.47%—38.88%. The increase in grain yield was mainly attributed to enhanced spike number(7.77%—15.94%) and thousand-grain weight(2.50%—4.48%), resulting in a 6.37%—13.97% increase in grain yield and an 8.85%—23.60% improvement in yield water use efficiency. After one rotation cycle, soil water storage under $M_0$ and $M_2$ was significantly reduced by 2.22% and 2.92%, respectively, compared with CK, whereas no significant difference was observed under $M_1$. The $M_0$ and $M_1$ treatments significantly reduced seasonal water consumption of winter wheat, with the greatest reduction observed under $M_1$(6.53%). All sorghum-sudangrass incorporation treatments significantly increased winter wheat water use efficiency, and $M_1$ showed the greatest improvement(23.60%). Overall, summer cultivation and biomass incorporation of sorghum-sudangrass during the fallow period improved photosynthetic performance, enhanced water use efficiency, and increased grain yield of subsequent winter wheat under rainfed conditions on the Weibei highland. Among the tested incorporation methods, incorporation of one-third mowed sorghum-sudangrass biomass exhibited the most favorable agronomic performance.

**Keywords**: Weibei rainfed highland; *Sorghum bicolor* × *S. sudanense*; Green manure; Soil moisture; Winter wheat

长期过量施用化肥会造成养分利用效率下降和资源浪费，并可能引发土壤酸化、温室气体排放增加、水体富营养化等环境问题[1-4]。有机肥替代化肥被认为是发展绿色农业、稳产增效、增加地力的有效方法[5]。有机肥与化肥配施具有短期内使作物增产，长期提升地力的效果[6-7]。绿肥是有机肥的重要形式之一，种植绿肥作物和施用绿肥可为土壤生态系统提供碳源，促进土壤微生物生长，提高土壤酶活性，促进养分矿化；绿肥作物根系可穿透土壤，降低土壤容重，改善土壤结构，增强土壤持水能力，从而提高土壤有机质和氮、磷等养分供应水平[8]，被认为是构建资源节约型、环境友好型农业的关键。

绿肥作物可通过与主作物轮作、间作或套作，缓解长期连作导致的养分失衡、土壤微生物群落退化和病虫害加重等问题[9]。研究表明，种植绿肥作物可固持土壤，减少地表水分蒸发，是合理利用夏闲期光、热、水资源的重要举措[10]。目前，应用较广泛的绿肥主要为豆科、禾本科、十字花科等作物，其中部分绿肥作物兼有饲料用途，如豆科的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、紫云英(*Astragalus sinicus* L.)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)、毛苕子(*Vicia villosa* Roth.)和禾本科的黑麦草(*Lolium perenne* L.)和高丹草(*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*)等[11-12]。高丹草由高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)与苏丹草(*Sorghum sudanense* Piper Stapf)杂交而成，抗旱、抗盐碱和分蘖能力强，产草量高，适应性广，具有较强的再生能力[13]，生长期间可多次刈割，青贮后适口性较好，属于优良饲料作物[14]。

渭北旱塬位于关中平原与黄土高原的过渡带，是陕西省主要的粮食生产区之一，主栽作物为小麦、玉米等。该区为温带季风气候，光热资源充足，属典型雨养农业区，夏季土地多闲置撂荒，期间水热并行，蒸发量大，水分利用效率低[15]。在该区夏闲期种植高丹草，有望提高光热水资源利用效率并增加饲草或绿肥生物量，但其对土壤水分和后茬冬小麦生长和产量的影响尚不明确。本研究通过夏闲期种植高丹草并设置不同刈割程度处理，分析其对土壤水分变化及后茬冬小麦光合生理、生长和产量的影响，以期为渭北旱塬夏闲期填闲作物利用和小麦轮作模式优化提供依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

试验于 2023—2024 年在陕西省咸阳市长武县凤口村(35°12′N;107°44′E)进行。该区属温带季风气候区,作物为一年一熟,主要种植冬小麦(每年 9 月至次年 6 月)或春玉米(每年 4 月至 9 月),每两季冬小麦间具有 2～3 个月夏闲期。研究区年均温度 9.1 ℃,年均降水量 561.4 mm,试验期间总降水量年均 569.8 mm,2008—2023 年同期总降水量 548.5 mm,由此判断 2023－2024 年属平水年[16](图 1)。主要土壤类型为黑垆土[17],试验地 0～20 cm 土壤有机质含量 14.84 g·kg$^{-1}$,硝态氮含量 1.73 mg·kg$^{-1}$,铵态氮含量 2.54 mg·kg$^{-1}$,有效磷含量 3.63 mg·kg$^{-1}$,有效钾含量 226.4 mg·kg$^{-1}$,pH 值为 8.0。

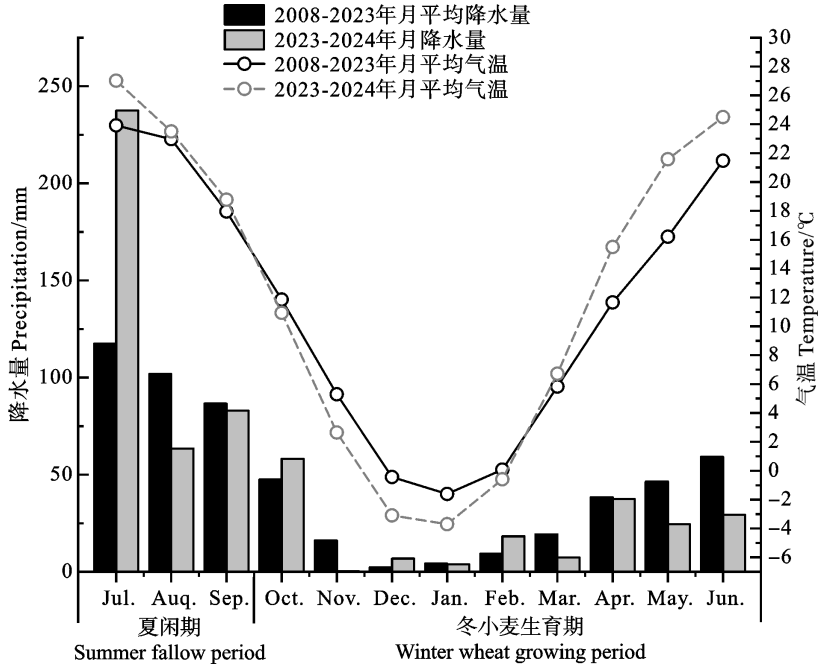



**图 1　研究区试验期间及 2008－2023 年月平均气温与降水量**

**Fig. 1　Average monthly temperature and precipitation in the study area during the experimental period and 2008—2023**

### 1.2　试验设计

试验为高丹草-冬小麦轮作,以夏休闲为对照(CK),高丹草设置 3 种刈割处理,以控制高丹草生长,达到模拟不同的高丹草还田量,分别为不刈割($M_0$,即 100%还田)、刈割 1/3($M_1$,即按照高丹草自然高度顶端的 1/3 刈割并移出,剩余部分还田)、刈割 1/2($M_2$,即按照高丹草自然高度顶端的 1/2 刈割并移出,剩余部分还田),共 4 个处理,每处理 3 次重复。小区面积 33 m$^2$(3 m × 11 m),共 12 个小区。

冬小麦为当地主栽品种长旱 58,是陕西省长武县农业技术推广中心选育的半冬性中晚熟大穗大粒型品种;高丹草品种为先锋,具有高生物量潜力和抗旱性。冬小麦和高丹草种子均采购自当地农资商店。2023 年 6 月 18 日整地后,采用撒播法播种高丹草,在孕穗期(8 月 20 日)使用园艺枝剪进行刈割,盛花期(9 月 4 日)使用镰刀将植株地上部全部刈割,原位均匀铺设后用秸秆还田机将其粉碎并还田入土,深度 25 cm。$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理下的总还田量(鲜重)分别约为 57 700 kg·hm$^{-2}$、38 400 kg·hm$^{-2}$ 和 28 800 kg·hm$^{-2}$。还田后间隔 14 d,于 9 月 18 日按当地常规施用量施基肥,分别为纯 N 180 kg·hm$^{-2}$,纯 P 120 kg·hm$^{-2}$,纯 K 90 kg·hm$^{-2}$。2023 年 9 月 20 日采用条播机播种冬小麦,行距 15 cm,播量为 150 kg·hm$^{-2}$[18],2024 年 6 月 5 日收获。本试验在雨养条件下进行,全生育期无补充灌溉。其他管理措施同当地大田。

### 1.3　指标测定与方法

#### 1.3.1　叶片光合生理指标的测定

分别于冬小麦拔节期(2024 年 4 月 25 日)、扬花期(2024 年 5 月 10 日)和灌浆期(2024 年 5

月 20 日),使用 CIRAS-II 型便携式光合系统测定仪(PP System,USA)测定叶片光合参数。在晴朗无云天气的上午 9:00—11:00,拔节期选取顶部完全展开叶,扬花期和灌浆期选取旗叶。每小区随机测定 5 片叶,主要包括净光合速率($P_n$)和蒸腾速率($T_r$),并利用二者之比计算叶片水分利用效率。

1.3.2 土壤含水量、土壤贮水量和冬小麦耗水量的测定

于 2023 年 6 月 19 日和 9 月 16 日在每小区中心位置埋设长 2.4 m,内径 4.5 cm 的中子管,分别于冬小麦播前(2023 年 9 月 18 日)、返青期(2024 年 3 月 15 日)、拔节期(2024 年 4 月 25 日)、扬花期(2024 年 5 月 10 日)、灌浆期(2024 年 5 月 20 日)和成熟期(2024 年 6 月 5 日)采用 CNC503B 型中子仪(北京超能科技公司)测定 0～200 cm 土壤含水量,每 20 cm 测定 1 次,中子仪读数通过标定公式换算为土壤质量含水量[19]。

于轮作开始前采用 100 $cm^3$ 环刀在 0～200 cm 深度(每 20 cm 为一层)土层采集原状土柱,测定土壤容重。土壤贮水量计算公式:

$$S_{WS}=\sum_{i=1}^{10}(D_i\times B_i\times\theta_i)\times 10$$

式中,$S_{WS}$ 为土壤贮水量,$D_i$ 为第 $i$ 层土层厚度(cm),$B_i$ 为第 $i$ 层土壤容重(g · $cm^{-3}$),$\theta_i$ 为第 $i$ 层土壤质量含水量,10 为单位换算系数。

冬小麦生育期耗水量采用水分平衡法计算,计算公式如下:

$$E_T=S_{WS_1}-S_{WS_2}+P+I-R-F$$

式中,$E_T$ 为生育期耗水量;$S_{WS_1}$ 和 $S_{WS_2}$ 分别为小麦播种期与收获期 0～200 cm 深度土壤贮水量(mm),$P$ 为冬小麦生育期降水量(mm),$I$ 为灌溉量(mm),$R$ 为地表径流量(mm),$F$ 为渗漏量(mm)。本研究为雨养条件,$I=0$;试验地位于塬面平坦区,地表径流和深层渗漏较小,计算中近似忽略 $R$ 和 $F$。

1.3.3 冬小麦地上部生物量、产量及其构成的测定

分别于返青期、拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期,在每小区随机选取 1 m×1 m 样方,齐地刈割采集冬小麦地上部样品。样品于 105 ℃杀青 30 min 后,在 75 ℃下烘干至恒重,测定地上部生物量。

成熟期每小区随机选取 1 m×1 m 样方,统计有效穗数并折算为单位面积穗数;每小区随机选取 30 个代表性麦穗测定穗粒数;脱粒风干后测定籽粒产量和千粒重,均按 13%含水量折算,随后折算为每公顷产量。

收获指数=籽粒产量/成熟期地上部总生物量

产量水分利用效率=籽粒产量/耗水量。

### 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理,数据统计分析采用 SPSS 20.0 软件。通过单因素方差分析(ANOVA)及 Duncan 法进行多重比较,采用 Pearson 相关系数分析各指标间的相关性,采用 Origin2021 绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 高丹草还田对冬小麦光合生理特征的影响

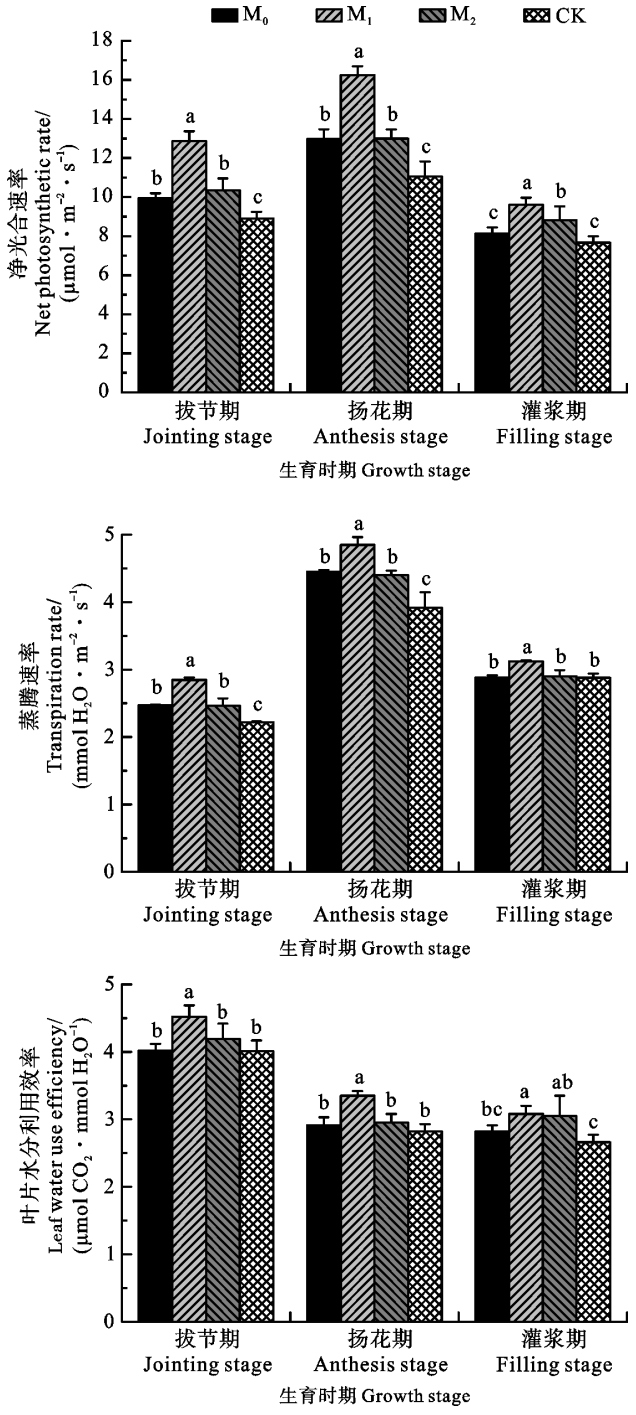
冬小麦 $P_n$ 和 $T_r$ 随生育进程的推进均呈先升后降趋势,在扬花期达到最高;叶片水分利用效率则以拔节期最高(图 2)。与 CK 相比,拔节期 $M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理的 $P_n$ 分别提高 11.89%、44.49%和 16.18%,扬花期分别提高 17.34%、46.97%和 17.56%,灌浆期分别提高 6.27%、25.33%和 15.14%。各个时期 $M_1$ 处理 $P_n$ 均显著高于其他处理。

不同处理下 $T_r$ 变化趋势与 $P_n$ 基本一致。拔节期,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理 $T_r$ 较 CK 分别提高 11.45%、28.31%和 11.18%;扬花期,各高丹草还田处理均显著高于 CK,其中 $M_1$ 处理增幅最高(23.78%);灌浆期,仅 $M_1$ 处理显著提高,增幅 8.41%。

$M_1$ 处理叶片水分利用效率在拔节期、扬花期和灌浆期较 CK 分别提高 12.72%、18.79%和 15.79%,且在拔节期和扬花期均显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理。$M_0$ 处理在各生育时期叶片水分利用效率与 CK 差异均不显著;$M_2$ 处理仅在灌浆期较 CK 显著提高,增幅 14.67%。总体来看,$M_1$ 处理更有利于提高冬小麦光合能力和叶片水分利用效率。

### 2.2 高丹草还田对土壤贮水量、耗水量和产量水分利用效率的影响

高丹草还田处理下冬小麦播前 0～200 cm 土壤贮水量均显著低于 CK,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理分别较 CK 降低 1.57%、1.31%和 1.93%,但 3 个高丹草还田处理间差异不显著;成熟期 $M_0$ 和 $M_2$ 处理显著降低 2.22%和 2.92%,$M_1$ 处理与 CK 差异不显著(表 1)。这说明夏闲期种植高丹草会消耗部分冬小麦播前深层土壤贮水量。




同一生育时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 4 同。

Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences among treatments($P < 0.05$). The same in figure 4.

**图 2　不同处理下冬小麦主要生育期净光合速率、蒸腾速率和叶片水分利用效率**

**Fig. 2　Net photosynthetic rate, transpiration rate, and leaf water use efficiency of winter wheat under different treatments at key growth stages**

从土壤剖面看,不同处理间土壤水分差异主要集中在 0～100 cm 土层,100～200 cm 土层差异相对较小(图 3)。0～100 cm 土层中,返青期各高丹草还田处理土壤贮水量均显著高于 CK,增幅为 4.22%～6.07%,其中 $M_0$ 和 $M_1$ 处理显著高于 $M_2$ 处理;拔节期,$M_0$ 和 $M_1$ 处理土壤贮水量较 CK 降低,其中 $M_0$ 处理显著低于 CK;扬花期,各绿肥处理土壤贮水量均显著高于 CK,增幅为 1.04%～6.97%,且 $M_1$ 处理最高;灌浆期,$M_0$ 和 $M_1$ 处理土壤贮水量显著高于 CK,而 $M_2$ 处理显著低于 CK。成熟期 0～200 cm 土壤贮水量表现为 $M_1$ 和 CK 较高,$M_0$ 和 $M_2$ 较低,说明不同还田量处理对冬小麦后期土壤水分保持效应存在差异。

由表 2 可知,与 CK 相比,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理冬小麦生育期耗水量分别显著降低 6.53%、6.18%和 2.29%,$M_2$ 与 $M_0$ 和 $M_1$ 处理差异均显著。不同高丹草还田处理均显著提高冬小麦产量水分利用效率,其中 $M_1$ 处理增幅最大(23.60%),显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理;$M_0$ 和 $M_2$ 处理分别较 CK 提高 14.25%和 8.85%,二者间差异不显著。结果表明,适度刈割还田处理($M_1$)在降低耗水量的同时提高了产量水分利用效率。

### 2.3　高丹草还田处理对冬小麦地上部生物量的影响

相较于 CK,返青期 $M_0$ 和 $M_1$ 处理冬小麦地上部生物量分别显著增加 10.39%和 16.27%;拔节期仅 $M_1$ 处理显著增加(13.72%);扬花期,$M_0$ 和 $M_1$ 处理分别显著增加 12.92%和 30.83%,而 $M_2$ 处理变化不显著;灌浆期,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理分别显著增加 10.42%、35.16%和 11.55%,其中 $M_1$ 处理显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理;成熟期,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理分别显著增加 21.60%、38.88%和 18.47%,且 $M_1$ 处理显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理(图 4)。总体来看,高丹草还田处理促进了冬小麦地上部干物质积累,其中以 $M_1$ 处理效果最佳。

### 2.4　高丹草还田处理对冬小麦产量与构成要素的影响

与 CK 相比,$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理均显著提高冬小麦穗数,增幅分别为 7.77%、15.94%和 8.65%,其中 $M_1$ 处理显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理;$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理均显著提高千粒重,增幅分别为 2.50%、4.48%和 3.90%,但高丹草还田处理间

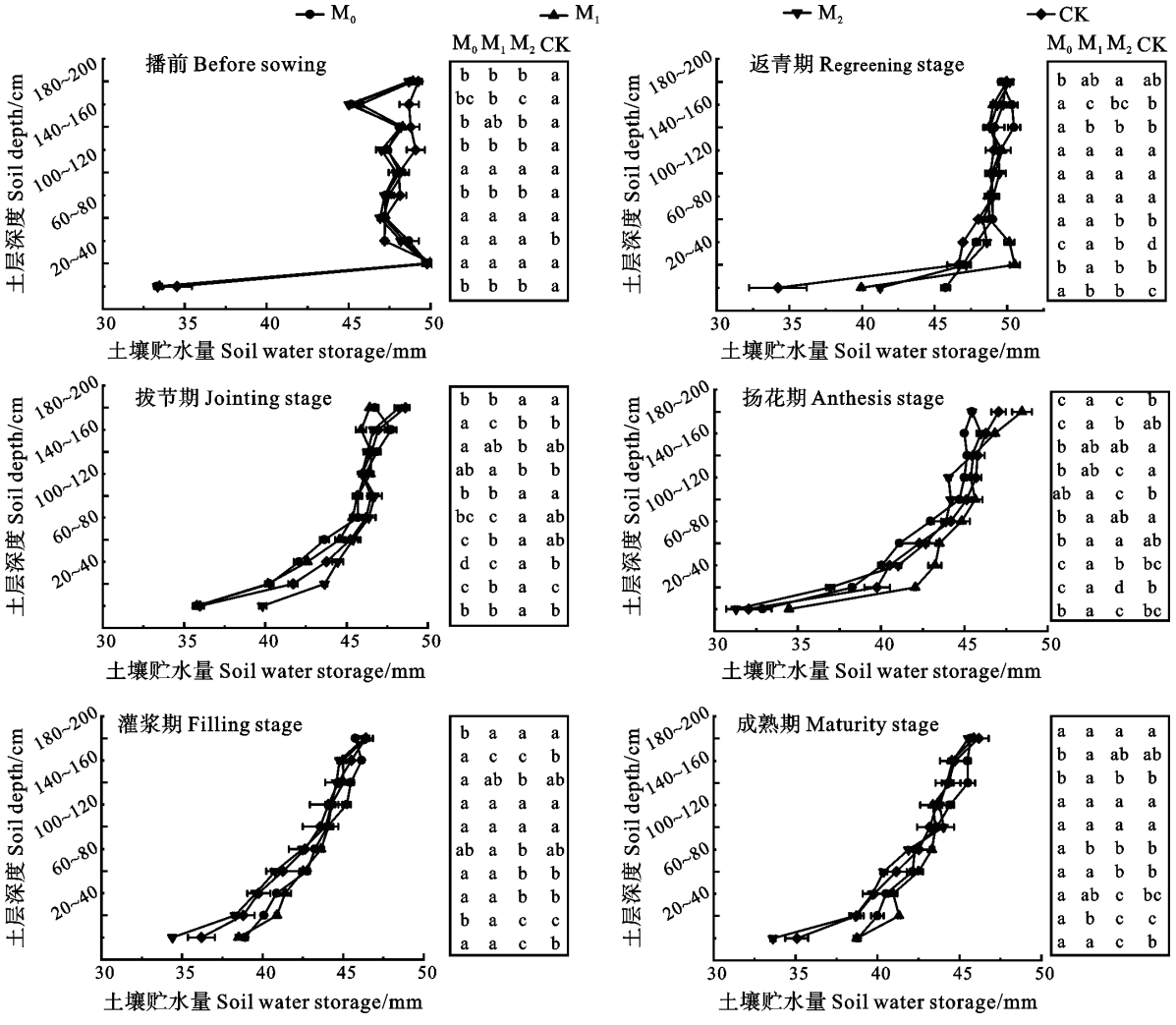
**表 1 不同处理下冬小麦不同生育时期土壤贮水量**

**Table 1 Soil water storage at different winter wheat growth stages under different treatments**

| 土层 Soil depth | 生育时期 Growth stage | $M_0$ | $M_1$ | $M_2$ | CK |
|---|---|---|---|---|---|
| 0～200 cm | 播前 Before sowing | 463.87±0.04b | 465.06±0.43b | 462.26±1.53b | 471.16±0.46a |
| | 成熟期 Maturity stage | 419.29±0.07b | 428.50±0.59a | 416.44±2.61b | 428.59±0.20a |
| 0～100 cm | 返青期 Regreening stage | 238.52±0.60a | 238.07±0.04a | 234.36±0.65b | 224.89±2.26c |
| | 拔节期 Jointing stage | 204.04±4.83c | 209.92±1.76bc | 218.39±1.46a | 212.92±0.68ab |
| | 扬花期 Anthesis stage | 196.55±0.19c | 208.11±0.63a | 197.56±0.29b | 194.54±0.35d |
| | 灌浆期 Filling stage | 205.84±0.14a | 206.94±0.50a | 195.55±0.32c | 198.64±1.14b |

同行数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Different lowercase letters following the values within the same row indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in table 2 and 3.




图右侧同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different letters for the same row on the right side of the figure indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

**图 3 不同处理下冬小麦生育时期 0～200 cm 土壤贮水量与剖面分布**

**Fig. 3 Soil water storage and profile distribution in the 0－200 cm soil layer of winter wheat under different treatments at different winter wheat growth stages**

差异不显著;$M_0$、$M_1$ 和 $M_2$ 处理下冬小麦籽粒产量分别提高 6.63%、13.97%和 6.37%,其中 $M_1$ 处理显著高于 $M_0$ 和 $M_2$ 处理(表 3)。各处理间收获指数差异均不显著。相关分析表明,穗数和千粒重与籽粒产量呈显著正相关(相关系数分别为 0.865 和 0.649),而穗粒数与籽粒产量相关性不显著(相关系数为 0.467),说明高丹草还田提高冬小麦产量主要与穗数和千粒重增加有关,其中 $M_1$ 处理增产效果最优。

**表 2　不同处理下冬小麦耗水量与产量水分利用效率**

**Table 2　Evapotranspiration and water use efficiency of winter wheat under different treatments**

| 处理 Treatment | 耗水量 Water consumption/mm | 产量水分利用效率 Water use efficiency at yield level/(kg·hm$^{-2}$·mm$^{-1}$) |
|---|---|---|
| $M_0$ | 248.54±1.07c | 27.50±0.81b |
| $M_1$ | 249.37±0.10c | 29.75±0.61a |
| $M_2$ | 258.72±1.22b | 26.20±0.46b |
| CK | 264.77±2.56a | 24.07±0.74c |

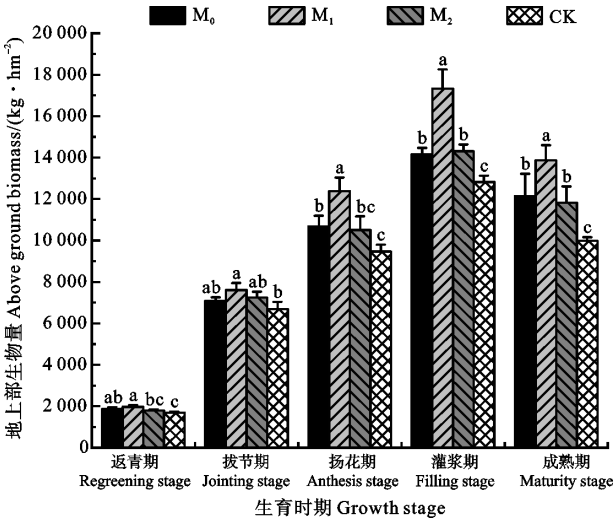



**图 4　不同处理下冬小麦生育时期地上部生物量**

**Fig. 4　Aboveground biomass of winter wheat at different growth stages under different treatments**

**表 3　不同高丹草还田处理下冬小麦产量、产量构成及收获指数**

**Table 3　Grain yield, yield components, and harvest index of winter wheat under different Sorghum-sudangrass hybrid incorporation treatments**

| 处理 Treatment | 穗数 Number of spikes (×10$^4$·hm$^{-2}$) | 穗粒数 Grain number per spike | 千粒重 1 000-grain weight/g | 产量 Yield/(×10$^4$ kg·hm$^{-2}$) | 收获指数 Harvest index/% |
|---|---|---|---|---|---|
| $M_0$ | 582.46±1.35b | 30.87±0.45a | 46.17±0.06a | 0.68±0.02b | 43.35±0.03a |
| $M_1$ | 626.64±5.26a | 31.50±0.61a | 47.06±0.24a | 0.73±0.03a | 43.29±0.02a |
| $M_2$ | 587.24±7.15b | 30.40±1.61a | 46.80±0.37a | 0.68±0.01b | 42.49±0.01a |
| CK | 540.49±3.82c | 29.53±0.75a | 45.04±0.49b | 0.64±0.01c | 40.53±0.02a |

## 3　讨论

### 3.1　高丹草还田对冬小麦光合生理特征的影响

绿肥还田可通过改善土壤水分状况和养分供应,促进作物光合生理功能提升。开花期至成熟期是冬小麦籽粒形成和干物质积累的关键阶段,该时期叶片光合能力的维持对干物质积累和产量形成至关重要[20]。本研究表明,高丹草还田处理提高了冬小麦花后净光合速率和叶片水分利用效率,其中以刈割 1/3 后还田处理表现最佳。该处理下冬小麦成熟期地上部干物质和籽粒产量分别较 CK 提高 38.88%和 13.97%,说明适量高丹草还田有助于改善冬小麦花后光合生产能力,促进干物质积累和产量形成。植物光合作用受土壤水分条件影响显著,而小麦经济产量约有 2/3 来源于开花后功能叶片光合产物的积累[21-24]。本研究中,高丹草还田处理在冬小麦花后阶段维持了相对较高的土壤贮水量,这可能有助于缓解花后水分限制,增强叶片光合功能和水分利用潜力。相应地,冬小麦扬花期和灌浆期叶片水分利用效率分别提高 3.19%～18.79%和 6.02%～15.79%,并最终通过提高穗数和千粒重促进籽粒产量增加。已有研究认为,小麦光合作用改善主要通过增加穗粒数和千粒重实现增产[25],而本研究中增产主要与穗数和千粒重提高有关。这种差异可能与绿肥种类、还田量、轮作模式、区域气候条件及小麦品种有关。

### 3.2　高丹草还田对土壤水分状况的影响

虽然绿肥生长会消耗水分,但其覆盖地表,可增强土壤蓄水能力[26-27]。研究表明,相较于裸地,夏闲期种植绿肥可能造成后茬小麦生育期水分亏缺,土壤贮水量降幅可达 13.2%[15,28-31]。本研究

中，高丹草种植使冬小麦播前土壤贮水量较 CK 下降 1.31%～1.93%，但降幅明显低于已有研究结果，这是由于本研究涉及的轮作周期（2023 年 6 月—2024 年 6 月）虽为平水年，但绿肥生长期间（2023 年 6—8 月）降水量占年降水量的 52.46%，而多年同期平均占比为 39.99%，加之绿肥覆盖增加水分入渗，有效补充了土壤水分，削弱了夏闲期绿肥耗水对小麦生长的制约；绿肥还田后，其残体可促进土壤大团聚体形成，提高土壤蓄水保水能力[26,28]，最终实现平水年冬小麦增产。因此，高丹草还田应结合降水年型和土壤墒情。在平水年且土壤墒情较好时，可考虑适时刈割还田，以兼顾培肥与增产效应[31]；在干旱年或播前墒情不足时，应谨慎种植或降低绿肥生物量，以避免绿肥耗水影响后茬作物生长[27]；在丰水年，可适当提高绿肥利用强度，并结合绿肥间作或套作降低病虫害风险，实现水分利用、土壤培肥和粮食产量的协同提升[9,32]。

### 3.3 高丹草还田对冬小麦生长和产量形成的影响

本研究结果表明，高丹草还田促进了冬小麦地上部生物量积累和籽粒产量提高，但不同还田量之间存在明显差异。其中，刈割 1/3 后还田处理成熟期地上部生物量和籽粒产量增幅最大。产量构成分析进一步表明，冬小麦籽粒产量提高主要归因于穗数和千粒重增加，而穗粒数和收获指数变化不显著。这说明高丹草还田主要通过促进群体建成、提高花后干物质积累量和籽粒充实能力实现增产，而不是通过改变光合产物在籽粒和营养器官之间的分配比例实现增产。在本研究中，过高或过低还田量下促进效果较弱。研究表明，当绿肥施用量超过 30 000 kg $hm^{-2}$，绿肥氮、磷、钾养分释放速率表现出下降趋势，氮素损失总量上升[33-37]。此外，化感物质积累可能是导致高还田量下小麦增产受到抑制的另一诱因，例如高粱属化感作用的特征物质酚酸对后茬作物生长表现出“低促高抑”效应[38-39]。高丹草绿肥过量还田时大量残体难以完全分解，积累的酚酸可能对后茬冬小麦生长造成抑制，使小麦干物质积累量和积累速率明显下降，进而抑制小麦增产或导致减产。

### 3.4 高丹草还田对冬小麦水分利用的影响

渭北旱塬为典型雨养农业区，小麦生育期耗水量主要来源于土壤贮水和降水，在平水年或干旱年，绿肥生长消耗的水分常难以得到有效补充，轮作绿肥可通过降低小麦播前土壤贮水量来降低小麦生育期耗水量[28]。还田绿肥主要通过改善土壤结构，提高土壤水稳性团聚体含量来增强土壤蓄水持水能力。此外，绿肥残体可阻隔土壤与大气直接接触，减缓气态水分交换，抑制土壤水分蒸发，从而降低小麦生育期耗水量[28,40-42]。本研究中，高丹草生长期间充足的降水可有效补充土壤水分，其主要通过影响土壤结构来影响小麦生育期耗水量。刈割 1/3 和不刈割处理均可显著降低冬小麦生育期耗水量，由于刈割 1/2 处理下高丹草还田量较低，对土壤结构的改良效果较弱，使小麦生育期耗水量变化不显著[33-37]。

冬小麦水分利用效率是衡量小麦节水能力和生产效益的重要指标。河西绿洲灌区和渭北旱塬的多项研究表明绿肥可提高小麦、玉米等作物水分利用效率，实现粮食作物增产[27,42-46]。本研究涉及的 3 个高丹草还田处理均在不改变冬小麦收获指数的情况下显著提高冬小麦水分利用效率，这说明施用高丹草还田未改变小麦光合产物的分配，增产主要来源于总生物量的提高。

综上所述，本研究中高丹草还田对冬小麦的增产机制可概括为“水分驱动型光合优化”：夏闲期充足降水结合绿肥覆盖的保墒效应，弥补了绿肥生长消耗的土壤水分，这一水分优势延续至小麦生育后期，使冬小麦于花后维持较高的光合速率和水分利用效率，从而促进小麦生物量的积累，实现小麦增产。

## 4 结论

本试验条件下，高丹草还田有利于降低冬小麦生育期耗水量，提高水分利用效率，籽粒产量可提高 6.37%～13.97%。相较于夏休闲，将高丹草绿肥刈割其自然高度的 1/3 后还田效果最好。本研究仅涉及单个夏绿肥-冬小麦轮作周期，有必要对不同降水年型以及绿肥作用机理作深入探究。

**参考文献：**

[1]吕殿青，同延安，孙本华，等. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报，1998，4(1)：8.
Lü D Q，Tong Y A，Sun B H，*et al*. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*，1998，4(1)：8.

[2]Dimkpa C O，Fugice J，Singh U，*et al*. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency-Trends and perspectives [J]. *Science of the Total Environment*，2020，731：139113.

[3]Ren K Y，Xu M G，Li R，*et al*. Optimizing nitrogen fertilizer

use for more grain and less pollution [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 360: 132180.

[4]Bai X G, Wang Y A, Huo X X, *et al*. Assessing fertilizer use efficiency and its determinants for apple production in China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 268.

[5]管彤彤,张 燕,陶海宁,等. 绿肥还田对土壤有机碳组分及碳转化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(14): 2791.
Guan T T, Zhang Y, Tao H N, *et al*. Effects of green manure return on soil organic carbon component and carbon invertase enzyme activities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(14): 2791.

[6]魏文良,刘 路,仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1384.
Wei W L, Liu L, Qiu H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1384.

[7]张奇茹,谢英荷,李廷亮,等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4866.
Zhang Q R, Xie Y H, Li T L, *et al*. Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4866.

[8]席凯鹏,杨苏龙,席吉龙,等. 长期棉花秸秆配施有机肥对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 82.
Xi K P, Yang S L, Xi J L, *et al*. Effects of long-term cotton straw incorporation and manure application on soil characters and cotton yield [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(7): 82.

[9]曹卫东,徐昌旭. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2010.
Cao W D, Xu C X. Technical regulations for production and utilization of green manure crops in major agricultural regions of china [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010.

[10]赵 娜,赵护兵,鱼昌为,等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(12): 41.
Zhao N, Zhao H B, Yu C W, *et al*. Effect of green manure in summer fallow period and nitrogen rate on winter wheat growth [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 41.

[11]曹卫东,包兴国,徐昌旭,等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450.
Cao W D, Bao X G, Xu C X, *et al*. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450.

[12]况胜剑,廖 恒,姚单君,等. 我国夏季绿肥的种植及利用现状研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(20): 62.
Kuang S J, Liao H, Yao D J, *et al*. Research progress on planting and utilization of China's summer green manure [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(20): 62.

[13]刘建宁,石永红,王运琦,等. 高丹草生长动态及收割期的研究[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 31.
Liu J N, Shi Y H, Wang Y Q, *et al*. Growth dynamics and optimum harvest period of sorghum hybrid sudangrass [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(1): 31.

[14]魏梓恒,卜 也,苏华维,等. 鲜饲高丹草替代玉米青贮对西门塔尔公牛生长性能、血清生化指标和粪便微生物区系的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(9): 5748.
Wei Z H, Bu Y, Su H W, *et al*. Effects of replacement of corn silage by fresh-fed sorghum hybrid sudangrass on growth performance, serum biochemical indices and fecal microbiota of simmental bulls [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(9): 5748.

[15]张树兰, Lars Lovdahl, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20.
Zhang S L, Lars L, Tong Y A. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(4): 20.

[16]刘艳妮,马 臣,于昕阳,等. 基于不同降水年型渭北旱塬小麦-土壤系统氮素表观平衡的氮肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 569.
Liu Y N, Ma C, Yu X Y, *et al*. Nitrogen application rate for keeping nitrogen balance in wheat-soil system in Weibei rainfed areas under different rainfall years [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(3): 569.

[17]刘苡轩,黄冬琳,刘 娜,等. 渭北旱塬豆科绿肥提高冬小麦籽粒锌的效应与影响因素研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4030.
Liu Y X, Huang D L, Liu N, *et al*. The increasing effect and influencing factors of leguminous green manure on wheat grain zn in Weibei highland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21): 4030.

[18]胡立勇,丁艳锋. 作物栽培学[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
Hu L Y, Ding Y F. Crop cultivation [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[19]殷 文,柴 强,胡发龙,等. 干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下春小麦田土壤水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7): 1247.
Yin W, Chai Q, Hu F L, *et al*. Characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches in dry inland irrigation areas [j]. *scientia agricultura sinica*, 2019, 52(7): 1247.

[20]殷 芳,何小七,樊志龙,等. 复种绿肥补偿减量施氮导致的小麦光合效能和产量损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 1990.

Yin F, He X Q, Fan Z L, *et al*. Compensation of photosynthesis indexes and yield loss of wheat caused by nitrogen reduction with multiple cropping green manures [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 1990.

[21]杨永辉,武继承,李学军,等. 耕作和保墒措施对冬小麦生育时期光合特征及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 534.

Yang Y H, Wu J C, Li X J, *et al*. Impact of tillage and soil moisture conservation measures on photosynthetic characteristics and water use of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 534.

[22]Ercoli L, Lulli L, Mariotti M, *et al*. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(2): 138.

[23]卢小兰,于振文,张永丽,等. 测墒补灌条件下不同穗型小麦耗水特性和同化物积累与分配研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(12): 1486.

Lu X L, Yu Z W, Zhang Y L, *et al*. Study on water consumption characteristics and dry matter assimilation accumulation and distribution of different spike type wheat varieties under supplemental irrigation based on soil moisture [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(12): 1486.

[24]杨 磊,孙 敏,林 文,等. 群体结构对旱地小麦土壤耗水与物质生产形成的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1356.

Yang L, Sun M, Lin W, *et al*. Effects of population structure on soil water consumption and dry matter production of dryland wheat [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1356.

[25]侯贤清,贾志宽,韩清芳,等. 轮耕对宁南旱区冬小麦花后旗叶光合性能及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(15): 3108.

Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, *et al*. Effects of rotational tillage on flag leaf photosynthetic characteristics and yield after anthesis of winter wheat in arid areas of southern Ningxia [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(15): 3108.

[26]陈 姣,张 池,陈玉佩,等. 不同绿肥和覆膜措施对渭北旱塬冬小麦产量和土壤水分动态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2136.

Chen J, Zhang C, Chen Y, *et al*. Effects of different green manure crops and mulching approaches on wheat yield and soil moisture dynamics in the dryland region [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12): 2136.

[27]李富翠,赵护兵,王朝辉,等. 渭北旱地夏闲期秸秆还田和种植绿肥对土壤水分、养分和冬小麦产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1861.

Li F C, Zhao H B, Wang C H, *et al*. Effects of straw mulching and planting green manure on soil water, nutrient and winter wheat yield on Weibei Plateau, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1861.

[28]胡铁成. 渭北旱塬绿肥种类、密度和种植方式对土壤性质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014: 6.

Hu T C. Effects of green manures on varieties, plant densities and planting patterns of soil properties in Weibei rainfed highland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014: 6.

[29]薛乃雯. 旱地麦田夏闲期覆盖及绿肥种植对土壤水分、养分及后作冬小麦生长的影响[D]. 太谷:山西农业大学, 2018: 139.

Xue N W. Effect of mulching and green manures during summer fallow on soil water, fertility and growth of winter wheat [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018: 139.

[30]Wang J, Zhang S H, Sainju U M, *et al*. A meta-analysis on cover crop impact on soil water storage, succeeding crop yield, and water use efficiency [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107085.

[31]杨文亭,王晓维,徐健程,等. 施氮量和土壤含水量对红壤区黑麦草腐解和氮素释放的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2589.

Yang W T, Wang X W, Xu J C, *et al*. Effects of nitrogen application rates and soil water contents on ryegrass decomposition and nitrogen release in red soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2589.

[32]薛乃雯,高志强,杨珍平. 旱地麦田夏闲期复种绿肥对后茬冬小麦产量、植株养分和土壤养分的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(5): 630.

Xue N W, Gao Z Q, Yang Z P. Effects of planting green manure in summer fallow period on yield, plant nutrients and soil nutrients of subsequent winter wheat in dryland wheat field [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(5): 630.

[33]De Oliveira Vargas T, Diniz E R, Pacheco A L V, *et al*. Green manure-15N absorbed by broccoli and zucchini in sequential cropping [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 214: 209.

[34]张松茂,胡发龙,殷 文,等. 河西灌区绿肥对春小麦化学氮肥的替代及增产潜力初探[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 256.

Zhang S M, Hu F L, Yin W, *et al*. Primary exploration of green manure on substitution of chemical N fertilizer and improvement of wheat yield in Hexi irrigation area [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 256.

[35]段志龙,王晨光,马 欣,等. 陕北旱地毛叶苕子不同翻压量下腐解速率及养分变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 182.

Duan Z L, Wang C G, Ma X, *et al*. Decomposition and nutrient release characteristics of different *Vicia villosa* green manure applications in uplands of northern Shaanxi [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(6): 182.

[36]Liang H, Li S, Zhang L, *et al*. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105369.

[37]N'Dayegamiye A, Tran T S. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(4): 371.

[38]Hussain M I, Danish S, Sánchez-Moreiras A M, *et al*. Unrav-

eling sorghum allelopathy in agriculture:concepts and implications [J]. *Plants*,2021,10(9):1795.

[39]刘昆昆,师尚礼,何 龙,等.紫花苜蓿/饲用玉米/高丹草彼此间的化感效应[J].草业科学,2024,41(2):394.
Liu C C,Shi S L,He L,*et al*. Study on allelopathic effects of alfalfa/forage maize/sorghum-sudangrass hybrid [J]. *Pratacultural Science*,2024,41(2):394.

[40]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[J].中国农业科学,2024,57(11):2189.
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 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2024,57(11):2189.

[41]Wang T H,Guo J J,Zhao Zaikun,*et al*. Evaluation of surface evaporation considering the effect of soil water gradient [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26 (8): 04021026.

[42]Wang Y L,Yu A Z,Lü H Q,*et al*. No-tillage mulch with green manure retention can mitigate carbon emissions, increase crop productivity, and promote agricultural sustainability [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 161: 127351.

[43]Zhao G,Wu P,Liu F,*et al*. Plow layer management during the fallow season can enhance the wheat productivity and resource utilization in a semi-arid region [J]. *Soil and Tillage Research*,2023,228:105633.

[44]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[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(5):671.
Lü 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 [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2020,28(5):671.

[45]樊志龙,胡发龙,殷 文,等.干旱灌区春小麦水分利用特征对绿肥与麦秸协同还田的响应[J].中国农业科学,2023,56(5):838.
Fan Z L,Hu F L,Yin W,*et al*. Response of water use characteristics of spring wheat to co-incorporation of green manure and wheat straw in arid irrigation region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2023,56(5):838.

[46]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 [J]. *Field Crops Research*,2021,272:108278.