doi：10.11838/sfsc.1673-6257.22111

# 生物炭配施有机肥对阴山北麓旱作燕麦生长及水分利用的影响

刘小月[1，2，3，4]，高日平[1，3，4#]，韩云飞[1，3，4]，高　宇[1，3，4]，高宏艳[1，3，4]，
张　鹏[1，3，4]，赵沛义[1，2，3，4]，任永峰[1，3，4*]

（1. 内蒙古自治区农牧业科学院，内蒙古　呼和浩特　010031；2. 内蒙古农业大学农学院，内蒙古　呼和浩特　010019；3. 内蒙古旱作农业重点实验室，内蒙古　呼和浩特　010031；4. 农业农村部内蒙古耕地保育科学观测实验站，内蒙古　呼和浩特　011705）

**摘　要：**为提高内蒙古阴山北麓旱作农区水分利用效率，对比分析了生物炭和有机肥配施（BM）、生物炭（B）、有机肥（M）、不施生物炭和有机肥（CK）4 种不同耕种方式对燕麦、全生育阶段土壤水分时空变化、土壤耗水特征及燕麦关键生育期农艺性状、产量构成和水分利用效率的影响。结果表明，生物炭和有机肥及两者配施均可促进燕麦生长发育，以灌浆期为例，与 CK 相比，B、M 和 BM 处理下燕麦株高分别提高 17.73%、22.29% 和 26.03%，单株叶面积分别提高 13.32%、17.05% 和 23.67%，地上部干物质积累量分别提高 6.48%、7.39% 和 20.30%，燕麦生育前中期生物炭效果优于有机肥，生育后期有机肥施用效果优于生物炭，两者耦合效果最好；BM 处理可提高 0 ~ 40 cm 土壤含水量 1.65% ~ 19.12%，显著降低燕麦土壤贮水消耗 11.34% ~ 20.09%，总耗水量降低 0.38% ~ 0.88%，施用生物炭保水减耗效果强于有机肥，随着生育期推进和降水增加，两者效果差异逐渐减小；在产量方面，BM 处理可同时显著提高收获穗数、穗粒数和单穗粒重，促进燕麦籽粒产量形成和水分利用，籽粒产量提高 7.63% ~ 14.80%，水分利用效率提高 8.62% ~ 16.64%。生物炭和有机肥配施可显著促进旱作燕麦生长，有效保持土壤水分，提高燕麦水分利用效率和产量，是适宜内蒙古阴山北麓地区旱作燕麦种植的抗旱保墒技术措施。

**关键词：**生物炭；有机肥；旱作燕麦；产量；水分利用

内蒙古阴山北麓农牧交错带位于我国北方典型旱作农业生产区域[1]，属中温带大陆性季风气候，光热条件优越，昼夜温差大，气候适宜，是内蒙古自治区重要的粮食产地[2-4]。但该区域常年自然降水不足，雨水资源季节分配不均，且缺乏灌溉条件，土壤水分亏缺成为制约该地区农业生产水平提高和经济发展的关键因素[5-7]。

生物炭是作物秸秆、禽畜粪便等有机物质在缺氧条件下热高温裂解形成的一类富碳、高度芳香化、稳定性强的固态颗粒物质[8-9]，在土壤改良、生态修复和提高粮食产量等方面效果显著[10-12]，对农田土壤水分固持和抑旱减蒸也有一定作用[13]。其多孔结构和较大的比表面积有利于土壤聚集水分、提高孔隙度、降低容重，可为植物生长提供良好的土壤环境[14-16]。但由于生物炭本身可供作物吸收的养分较少，单纯依靠施用生物炭难以稳定维持和提高土壤农田生产力。有机肥作为一种富含多种营养元素的有机物质[17]，在提高土壤养分，改善土壤结构，抑制土壤水分蒸发，增加降水入渗和改善作物品质等方面均具有良好的效果[18-20]，且阴山北麓地区畜牧业发达，也为有机肥资源的广泛利用提供了保障[21]。前人研究表明，生物炭和有机肥配施联用即可消除生物炭养分释放慢、含量低的缺点，又赋予了有机肥养分缓释性能，使两者互补、协同发挥作用[22]。

鉴于此，本研究针对阴山北麓旱作区水资源短缺、土壤纳雨增墒能力差等问题，探究生物炭配施有机肥对旱作燕麦生长、土壤水分保持及利用的影响，明确生物炭耦合有机肥施用的土壤水分蓄水减耗作用机制，为旱地燕麦高产高效栽培及抗旱保墒技术创新提供科学依据。

**收稿日期：**2022-03-03；**录用日期：**2022-07-10

**基金项目：**内蒙古自治区科技计划“阴山北麓农牧交错区水资源赋存演变与生态种植模式研究”（2019GG016）；内蒙古自治区科技重大专项（2020ZD0005）。

**作者简介：**刘小月（1996-），硕士研究生，研究方向为旱地作物栽培、E-mail：1037721769@qq.com。高日平（1995-），研究实习员，硕士，研究方向为作物栽培与土壤改良。E-mail：1101702390@qq.com。刘小月与高日平为共同第一作者。

**通讯作者：**任永峰，E-mail：37295591@qq.com。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验在内蒙古农牧业科学院武川旱作农田生态系统国家野外科学观测研究站内进行，位于内蒙古呼和浩特市武川县上秃亥乡新河村（41° 08′ 22.8″ N，111° 17′ 43.6″ E），该区域属中温带大陆性季风气候，海拔高度为1570 m，年降水量250 ~ 400 mm，蒸发量1848.3 mm，平均气温1.5 ~ 3.7 ℃，无霜期90 ~ 120 d，是典型的半干旱偏旱农牧交错区。土壤类型为栗钙土，质地较轻，孔隙度偏低，束缚水含量较高，土壤保水能力较差、有效含水量较低，土壤抗旱能力较弱。试验地0 ~ 20 cm土层土壤饱和持水量为160.92 mm、毛管持水量126.36 mm、田间持水量88.56 mm、最大吸湿量17.42 mm、萎蔫系数21.60、有机质含量为8.70 g · kg$^{-1}$，碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为48.5、9.2、117 mg · kg$^{-1}$，2020年燕麦试验地全生育阶段（播种期至收获期）降水量为292.5 mm（图1）。

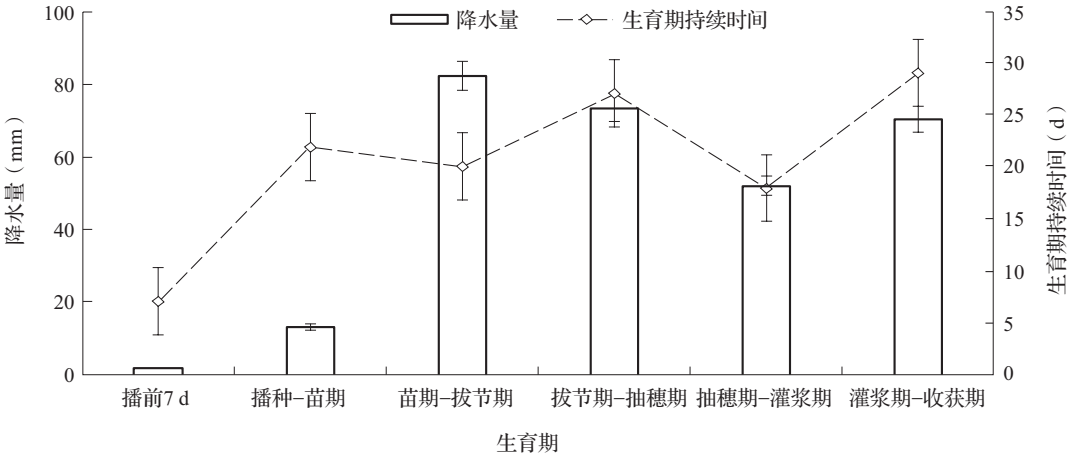


**图1　试验地降水量与燕麦生育期持续时间**

### 1.2　试验材料

有机肥：选用当地腐熟羊粪，含水量为35%，养分含量（%）为N–$P_2O_5$–$K_2O$=0.39–0.15–0.74，有机质含量为45%。

生物炭：购于内蒙古阜丰生物科技有限公司，原料为玉米秸秆，化学性质为全碳含量354.12 g · kg$^{-1}$，全氮含量6.36 g · kg$^{-1}$，有效磷含量1.12 g · kg$^{-1}$，速效钾含量45.52 g · kg$^{-1}$。

燕麦品种：坝莜1号。

### 1.3　试验设计

试验于2020年5 ~ 9月进行，共设生物炭和有机肥配施（BM）、单施生物炭（B）、单施有机肥（M）、不施生物炭和有机肥（CK）4个处理，每个处理设置3次重复，小区面积30 m$^2$（6 m × 5 m），随机区组排列。生物炭、有机肥田间施用量见表1，生物炭和有机肥均在播种前与种肥进行混合，所有处理于播前一次施入复合肥150 kg · hm$^{-2}$（氮、磷、钾含量分别为20%、15%、5%），燕麦采用机械条播，播种量150 kg · hm$^{-2}$，种植行距25 cm，肥料均通过分层播种机随播种施入土壤，施入深度为10 ~ 20 cm。5月18日播种，9月10日收获。试验地终年无灌溉。

**表1　不同处理的施肥种类及施肥量　（kg · hm$^{-2}$）**

| 处理 | 生物炭 | 有机肥 | 复合肥 |
|---|---|---|---|
| CK | 0 | 0 | 150 |
| B | 4500 | 0 | 150 |
| M | 0 | 15000 | 150 |
| BM | 4500 | 15000 | 150 |

### 1.4　测定项目与方法

#### 1.4.1　土壤水分指标

土壤质量含水量：在燕麦苗期（5月25日）、拔节期（6月15日）、抽穗期（7月10日）、灌浆期（8月1日）和成熟期（9月10日）分别以0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm共5个土层分取土样，采用土钻取土烘干法测定土壤含水量。计算公式如下。

土壤质量含水率（%）=（土壤鲜质量 – 土壤干质量）/

土壤干质量 ×100[23]　（1）

1.4.2　生育期耗水及水分利用指标

参照冯福学等[24]的方法进行计算，计算公式如下。

$$ET_{1-2} = Si+M+P_0+K \quad (2)$$

$$CD = ET_{1-2}/D \quad (3)$$

$$CP = ET_{1-2}/ETa \times 100 \quad (4)$$

$$WUE = Y/ETa \quad (5)$$

式中：$ET_{1-2}$ 为生育期阶段耗水量（mm）；M 为阶段内灌水量（mm）；$P_0$ 为阶段内降水量（mm）；K 为阶段内地下水补给量（mm）；Si 为阶段土壤贮水消耗量，即生育初期和生育末期土壤贮水量之差。本试验中试验期间无灌水（M = 0），地下水埋深在 10 m 以下。地下水埋深大于 2.5 m 时 K 值可以忽略不计（K=0）；CD 为阶段耗水强度（$mm \cdot d^{-1}$）；CP 为阶段耗水模系数（%）；D 为该阶段持续天数（d）；ETa 为全生育期总耗水量（mm）；WUE 为籽粒水分利用效率（$kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$）；Y 为籽粒产量（$kg \cdot hm^{-2}$）。

1.4.3　农艺性状指标

株高：燕麦出苗后，每小区定点定株标记植株 15 株，于燕麦拔节期（6 月 15 日）、抽穗期（7 月 10 日）、灌浆期（8 月 1 日）采用直尺法测定燕麦植株高度。

单株叶面积：采用长宽系数法，于燕麦拔节期（6 月 15 日）、抽穗期（7 月 10 日）、灌浆期（8 月 1 日）在每小区取生长均匀的燕麦 15 株进行测定，测量单株燕麦所有叶片的长和宽，计算公式如下。

单株叶面积 = 叶长 × 叶宽 ×0.73[25]　（6）

地上部干物质积累量：于燕麦拔节期（6 月 15 日）、抽穗期（7 月 10 日）、灌浆期（8 月 1 日）在每小区取 30 cm 长样段，自根部去除，将地上部分带回实验室用烘干法测定干物质，105℃杀青 30 min 后，80℃烘干至质量恒定。

1.4.4　燕麦产量指标

燕麦成熟后，每小区选取生育期内未取样的 1 $m^2$ 样点 3 个，晒干，带回实验室进行测产和考种（包括收获期穗数、穗粒数、单穗粒重、千粒重）。

1.5　数据处理

采用 Excel 2019 进行试验数据处理和绘制统计图表，选用 SPSS 25.0 数据处理系统进行显著性分析（LSD 法，$P<0.05$）。

## 2　结果与分析

### 2.1　生物炭配施有机肥对燕麦关键生育期农艺性状的影响

由表 2 可见，随着生育阶段的推移，燕麦株高、单株叶面积以及地上部干物质积累量均呈增长趋势。与 CK 相比，B 处理、M 处理和 BM 处理均能不同程度促进燕麦生长。以灌浆期为例，B 处理、M 处理和 BM 处理燕麦株高分别较 CK 提高了 17.73%、22.29% 和 26.03%；单株叶面积分别提高了 13.32%、17.05% 和 23.67%；地上部干物质积累量分别提高了 6.48%、7.39% 和 20.30%，其中，BM 处理在拔节期至灌浆期均能显著提高燕麦株高、单株叶面积和地上部干物质积累量。B 处理与 M 处理相比，在燕麦生育前中期（拔节期至抽穗期）株高、单株叶面积和地上部干物质积累量 B 处理均优于 M 处理，燕麦生育后期（灌浆期），M 处理则优于 B 处理。由此可见，单施生物炭利于燕麦前中期生长，但后期作用效果不及单施有机肥，这与试验地降水有一定关系。通过分析试验期间降水量可知，拔节期降水量较其他生育期虽较多，但日平均降水量较少，土壤水分有限，生物炭本身所具有的多孔结构和吸附能力能够将有限的水分固持，供应燕麦生长。总体来看，拔节期和抽穗期各处理表现为 BM>B>M>CK，灌浆期表现为 BM>M>B>CK。生物炭和有机肥配施处理在燕麦全生育阶段表现较好。

### 2.2　生物炭配施有机肥对 0 ~ 100 cm 土层土壤含水量的影响

随着燕麦生育阶段的推移，0 ~ 40 cm 土层土壤含水量均呈先增高后降低趋势（图 2），40 ~ 100 cm 土层土壤含水量在燕麦全生育阶段变化较小，且各处理土壤含水量在拔节期至灌浆期阶段较高。结合试验地降水规律分析，拔节期开始试验地降水逐渐增多，土壤含水量增加，之后随着降水减少和燕麦生长需水增多，导致燕麦生育后期土壤含水量下降。不同处理间 0 ~ 40 cm 土层土壤含水量在全生育阶段整体表现为 BM>B>M>CK。苗期和成熟期施用生物炭处理（B 和 BM）与 CK 差异显著。以苗期为例，B 处理和 BM 处理 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤含水量较 CK 分别提高 15.84%、19.12% 和 12.98%、18.95%，在土壤水分有限条件下，生物炭保水蓄水效果明显，随着生育

表 2　不同处理燕麦的农艺性状

| 农艺性状 | 处理 | 生育期 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 拔节期 | 抽穗期 | 灌浆期 |
| 株高（cm） | CK | 53.6 ± 3.32c | 100.1 ± 5.49c | 107.2 ± 2.87c |
| | B | 58.2 ± 2.53b | 114.6 ± 4.45b | 126.2 ± 2.66b |
| | M | 54.1 ± 2.25c | 105.9 ± 3.99c | 131.1 ± 2.05ab |
| | BM | 61.3 ± 2.43a | 121.0 ± 3.02a | 135.1 ± 3.69a |
| 单株叶面积（$cm^2$） | CK | 51.5 ± 1.46c | 102.1 ± 3.20d | 107.3 ± 2.76d |
| | B | 57.9 ± 1.52b | 112.8 ± 3.18b | 121.6 ± 1.61c |
| | M | 52.6 ± 1.57c | 107.4 ± 2.39c | 125.6 ± 2.48b |
| | BM | 63.6 ± 1.62a | 121.0 ± 3.22a | 132.7 ± 2.43a |
| 地上部干物质积累量（$kg \cdot hm^{-2}$） | CK | 2480.7 ± 160.04c | 7871.6 ± 147.25c | 9243.0 ± 322.88c |
| | B | 2607.6 ± 234.87b | 8283.9 ± 239.16b | 9841.7 ± 89.23b |
| | M | 2499.1 ± 151.56c | 8297.1 ± 153.63b | 9925.6 ± 120.92b |
| | BM | 3267.1 ± 249.07a | 9141.6 ± 269.46a | 11119.7 ± 318.46a |

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。下同。

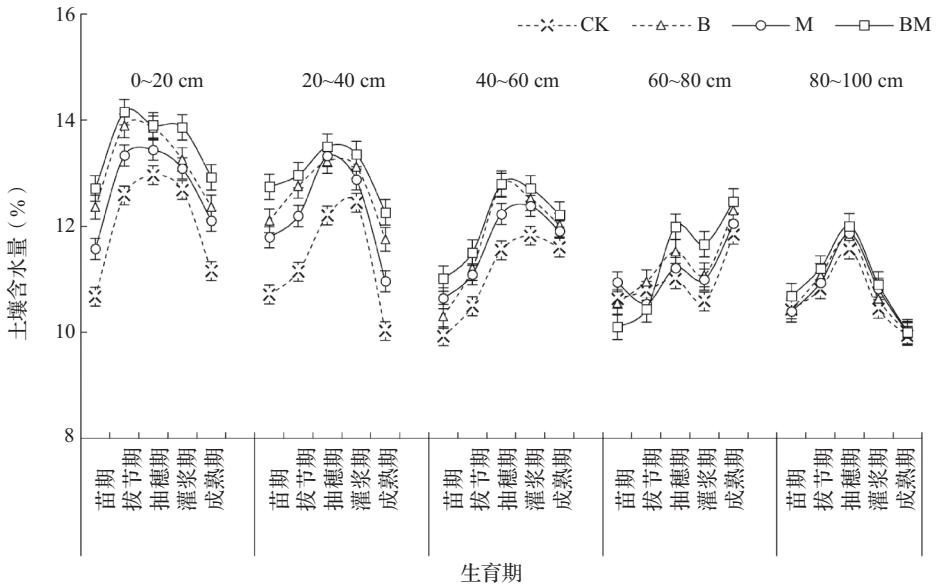


图 2　不同处理各土层全生育期土壤含水量变化

期推进，降水增多，土壤含水量增加，生物炭对土壤水分的吸附能力并未减弱，但与 M 处理的差异逐渐减小。BM 处理与其他 3 个处理差异显著，在拔节期时土壤含水量达到峰值，而 B、M、CK 处理间整体差异不大，说明单施生物炭和有机肥对土壤水分提升不如配施效果明显，而两者配施能够更好地在有限土壤水分条件下发挥作用。以拔节期和灌浆期为例，BM 处理 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较 CK、B、M 处理分别提高 12.48%、1.87%、6.15% 和 9.29%、4.57%、5.90%，20 ~ 40 cm 土层分别提高 16.34%、1.65%、6.32% 和 7.40%、1.83%、3.73%。可见，配施处理在全生育阶段土壤水分保持效果优于两个单施处理，且单施生物炭的效果优于单施有机肥。

### 2.3　生物炭配施有机肥对土壤耗水特征的影响

随着生育阶段的推进，燕麦阶段耗水量（$ET_{1-2}$）、阶段耗水强度（CD）、耗水模系数（CP）均呈现先增加后降低的趋势（表3）。播种—苗期阶段，耗水量主要源于田间蒸发，处理间表现为CK>M>B>BM，BM处理显著低于CK和M处理，在该时期生物炭配施有机肥保水作用较强，耗水量降低12.44%；苗期–拔节期，田间温度升高，农田蒸发耗水增大，燕麦对水分的需求增大，$ET_{1-2}$、CD、CP指标各处理均表现为CK>B>BM>M，且各处理间差异不显著。该阶段生物炭配施有机肥处理（BM）燕麦生长最快，需水量较大，但此生育阶段农田耗水主要决定因素仍为农田蒸发，因此，CK处理由于保水性差，耗水量仍最大。拔节期–抽穗期，抽穗期–灌浆期，这两个生育阶段各处理农田$ET_{1-2}$、CD、CP指标规律一致，整体表现为BM>M>B>CK，两个阶段耗水模系数总和达到50%以上，为燕麦生长需水最大时期。拔节期–灌浆期燕麦生长较快，冠层增大，光合蒸腾耗水增加，农田耗水主要源于燕麦生长需水。与CK相比，在拔节期–抽穗期和抽穗期–灌浆期，B处理、M处理和BM处理耗水量分别增加0.14%、1.59%、1.82%和3.95%、4.26%、5.65%。灌浆期–成熟期，环境温度下降，农田蒸发量减少，燕麦生长需水量也有所降低，各处理$ET_{1-2}$、CD、CP指标均降低，处理间差异均不显著。

**表3　不同处理各生育阶段的土壤耗水特征**

| 生育期 | 耗水特征 | 处理 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | CK | B | M | BM |
| 播种–苗期 | $ET_{1-2}$（mm） | 27.09 ± 1.62a | 24.09 ± 1.33c | 25.83 ± 1.57b | 23.72 ± 1.03c |
| | CD（mm·$d^{-1}$） | 1.23 ± 0.05a | 1.10 ± 0.03b | 1.17 ± 0.04b | 1.08 ± 0.02b |
| | CP（%） | 8.74 ± 0.15a | 7.81 ± 0.10b | 8.36 ± 0.11ab | 7.72 ± 0.07b |
| 苗期–拔节期 | $ET_{1-2}$（mm） | 93.51 ± 5.35a | 92.64 ± 4.52a | 90.35 ± 6.14a | 91.10 ± 3.24a |
| | CD（mm·$d^{-1}$） | 4.68 ± 0.07a | 4.63 ± 0.05a | 4.52 ± 0.08a | 4.56 ± 0.03a |
| | CP（%） | 30.16 ± 1.17a | 30.03 ± 1.03a | 29.24 ± 1.26a | 29.64 ± 0.91a |
| 拔节期–抽穗期 | $ET_{1-2}$（mm） | 84.22 ± 3.53b | 84.34 ± 3.48b | 85.56 ± 4.11a | 85.75 ± 4.05a |
| | CD（mm·$d^{-1}$） | 3.12 ± 0.05a | 3.13 ± 0.04a | 3.17 ± 0.06a | 3.18 ± 0.06a |
| | CP（%） | 27.16 ± 0.78b | 27.34 ± 0.63a | 27.69 ± 0.87a | 27.90 ± 0.80a |
| 抽穗期–灌浆期 | $ET_{1-2}$（mm） | 45.32 ± 2.21b | 47.11 ± 2.35a | 47.25 ± 2.22a | 47.88 ± 2.20a |
| | CD（mm·$d^{-1}$） | 2.52 ± 0.06b | 2.62 ± 0.07a | 2.63 ± 0.06a | 2.66 ± 0.06a |
| | CP（%） | 14.62 ± 0.38b | 15.27 ± 0.45a | 15.29 ± 0.40a | 15.58 ± 0.37a |
| 灌浆期–收获期 | $ET_{1-2}$（mm） | 59.92 ± 2.64a | 60.32 ± 2.77a | 60.02 ± 2.56a | 58.87 ± 2.12a |
| | CD（mm·$d^{-1}$） | 2.07 ± 0.07a | 2.08 ± 0.09a | 2.07 ± 0.05a | 2.03 ± 0.04a |
| | CP（%） | 19.33 ± 0.88a | 19.55 ± 0.93a | 19.42 ± 0.71a | 19.16 ± 0.53a |

### 2.4　生物炭配施有机肥对燕麦产量及其构成因素的影响

由表4可见，各处理收获穗数、穗粒数、单穗粒重均表现为BM>B>M>CK，千粒重表现为BM>M>B>CK。与CK相比，产量构成因素除千粒重外，B处理、M处理和BM处理收获穗数、穗粒数、单穗粒重均差异显著，其中仅BM处理可同时显著提高收获穗数、穗粒数和单穗粒重，B处理和M处理仅能显著提高穗粒数。以穗粒数为例，B处理、M处理和BM处理较CK分别提高32.83%、17.92%、45.75%。籽粒产量表现为BM>B>M>CK。B处理、M处理和BM处理籽粒产量较CK分别提高了10.59%、7.63%和14.80%，单施生物炭和有机肥及配施均可显著提高燕麦籽粒产量，以两者配施产量提高幅度最大。

表 4　不同处理燕麦的籽粒产量及产量构成因素

| 处理 | 收获穗数（$10^4$·$hm^{-2}$） | 穗粒数 | 单穗粒重（g） | 千粒重（g） | 籽粒产量（kg·$hm^{-2}$） |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 211.73 ± 7.38b | 53.12 ± 2.54d | 1.57 ± 0.04b | 22.31 ± 0.26a | 2093.64 ± 107.25c |
| B | 215.69 ± 6.96b | 70.56 ± 2.75b | 1.61 ± 0.06b | 22.46 ± 0.06a | 2315.26 ± 158.27ab |
| M | 212.41 ± 8.63b | 62.64 ± 3.67c | 1.59 ± 0.02b | 22.58 ± 0.07a | 2253.44 ± 40.00b |
| BM | 231.12 ± 7.59a | 77.42 ± 6.59a | 1.77 ± 0.06a | 23.12 ± 0.40a | 2403.53 ± 69.92a |

### 2.5　生物炭配施有机肥对燕麦水分利用的影响

生育阶段内总耗水量、土壤贮水消耗处理间整体表现为 CK>M>B>BM。单施生物炭（B）、单施有机肥（M）和配施（BM）对生育期内耗水量无显著影响（0.38% ~ 0.88%），但单施生物炭（B）和配施（BM）可以显著降低土壤贮水消耗，单施有机肥（M）与不施用（CK）间差异不显著，与 B、M、CK 处理相比，BM 处理土壤贮水消耗量分别降低了 11.34%、17.87%，20.09%。水分利用效率各处理表现为 BM>B>M>CK，与 CK 相比，B、M、BM 处理水分利用效率分别提高 12.18%、8.62%、16.64%，在减少土壤水分消耗和提升土壤水分利用方面，施用生物炭和有机肥均作用显著，其中单施生物炭效果优于单施有机肥，两者配施效果最佳（表 5）。

表 5　不同处理燕麦的水分利用特征

| 处理 | 总耗水量（mm） | 降水量（mm） | 土壤贮水消耗量（mm） | 水分利用效率（kg·$mm^{-1}$·$hm^{-2}$） |
|---|---|---|---|---|
| CK | 310.06 ± 7.54a | 292.5a | 20.36 ± 2.28a | 6.73 ± 0.25d |
| B | 308.50 ± 5.55a | 292.5a | 18.35 ± 1.66b | 7.55 ± 0.46b |
| M | 309.01 ± 4.32a | 292.5a | 19.81 ± 1.91a | 7.31 ± 0.20c |
| BM | 307.32 ± 5.17a | 292.5a | 16.27 ± 1.01c | 7.85 ± 0.36a |

## 3　讨论

### 3.1　施肥措施对土壤水分保持的影响

土壤水分是影响土壤肥力的重要组分，也是植物生存和生长发育的物质基础，如何有效提高土壤水分含量和减少水分消耗是提升土壤生产力、改善土壤环境和提高作物产量的首要因素。诸多研究表明，生物质炭因其独特的多孔隙结构和巨大的比表面积，使其具有一定的水分吸附能力，添加到土壤后可增加对土壤水分的固持，储存大量水分，从而提高土壤含水量[26-27]。程红胜等[28]研究表明，施用生物炭后土壤含水率可提高 13.54%；许健等[29]通过室内模拟试验研究表明，添加生物炭后土壤持水能力增强，提高土壤水含量的上升速度，有利于水分在土壤耕层蓄积。本研究表明，生物炭、有机肥单施及二者配施联用均能提高 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层土壤含水量，改善土壤水分状况，其中生物炭提升效果明显优于有机肥，尤以配施表现最好，这与王湛等[30]得出的结论一致。生物炭本身对土壤水分的保持作用较强，而有机肥也具有一定的蓄水保水能力，二者耦合后能在短时间满足有机肥中大量微生物的生存环境需求，同时发挥生物炭和有机肥的协同效应，更好地促进对土壤水分的保持。而对土壤含水量的影响主要集中在 0 ~ 40 cm 土层的原因可能与生物炭和有机肥在土壤中的施入部位有关。另外，本研究还发现，在燕麦生育初期（苗期前后）和末期（成熟期前后），降水量较少、土壤含水量较低的阶段，生物炭对土壤水分的固持作用较为明显，而随着降水的增多，土壤水分条件的改善，处理间差异逐渐缩小，这与魏永霞等[31]在东北黑土区通过 3 年的田间试验得出的施用生物炭后苗期耕层土壤含水率增加最多的结论类似。

### 3.2　施肥措施对土壤耗水特征的影响

生物炭自身特有的孔隙结构和理化特性，使其添加到土壤后可有效提高土壤持水能力，从而影响土壤水环境，进而对作物的耗水产生一定的影响。果才佳等[32]和阚正荣等[33]研究表明，添加生物

炭对作物植株的耗水量影响显著，全生育期土壤耗水量可降低 11.77% ~ 28.31%；王淑君等[34]研究表明，生物炭基肥降低了作物全生育期总耗水量，但未达到显著性水平；王湛等[35]研究认为，与传统耕作相比，生物炭配施有机肥周年耗水量降低 3.6% ~ 13.7%，且配施生物炭耗水量低于单施有机肥。本研究表明，单施生物炭、有机肥虽对燕麦各生育阶段耗水特征有一定影响，但总耗水量与对照未表现出显著性差异，生物炭和有机肥耦合施用对燕麦部分生育阶段耗水量影响较为显著。播种期至苗期，耗水量显著降低，这表明在燕麦生长需水不作为关键耗水因素时，生物炭配施有机肥可有效减少土壤水分无效蒸散，保水效果较好，而拔节期至抽穗期、抽穗期至灌浆期两个生育阶段，耗水量显著增加，燕麦生长需要达到关键时期，单施生物炭、有机肥及两者配施处理耗水量均较高，全生育时期耗水量虽表现为配施 < 单施生物炭 < 单施有机肥 < 不施用，但各处理间差异不显著。另外，本研究发现，生物炭和有机肥两者配施联用可显著降低作物生长对农田土壤原贮水的消耗，说明两者配施可实现对有限降水的充分利用，这可能是由于旱作区域影响阶段耗水量关键因素为降水量。

### 3.3　施肥措施对燕麦生长及产量的影响

彭辉辉等[36]研究表明，生物炭结合有机肥施用作物增产效果显著。本研究表明，施用生物炭和有机肥均可促进作物生长，增加作物产量，提高水分利用效率。二者耦合施用后效果最佳，可实现在全生育阶段促进燕麦生长，实现燕麦增产，提高水分利用效率，效果明显优于单施处理。分析其原因，一方面可能是由于有机肥的矿化分解和养分释放需适宜的水分环境，而生物炭可将土壤水分在燕麦生育初期进行贮存，为有机肥的分解和其内部微生物的大量繁殖提供良好的水分条件[8，15，37]，同时微生物的生命活动会产生大量的代谢产物使土壤结构变得较为松散，达到改善土壤结构的效果[18，38]。良好的土壤结构又为生物炭的长效发挥提供了基础，从而促进了旱作燕麦生长及产量形成，提高了水分利用效率；另一方面，有机肥与生物炭自身含有一定的氮、磷、钾含量，施入后二者的叠加效应使土壤水分状况得到改善的同时，也有助于土壤中养分元素的转化和累积，较好地提高了土壤养分，为地上部作物的生长补充输入了营养物质，实现了作物增产[39]。

本研究针对阴山北麓旱作农区的生产现状，结合当前燕麦施肥措施存在的土壤水分亏缺的问题，提出生物炭配施有机肥应用于燕麦生产；但本研究主要是关于施肥培肥，在保证农田土壤水分正常供应的前提下，土壤化学和生物学特性变化尚不明确，下一步拟将土壤结构、土壤养分、土壤微生物变化特征与土壤水分和耗散机理进行综合深入分析研究。

## 4　结论

（1）生物炭和有机肥施用均显著提高了燕麦关键生育阶段株高、单株叶面积和地上部干物质积累量，燕麦生育前中期生物炭作用效果优于有机肥，生育后期则反之，两者耦合效果最好。

（2）生物炭和有机肥施用均显著提高了土壤含水量，降低了燕麦贮水消耗和总耗水量，施用生物炭保水减耗效果强于施用有机肥，随着生育期推进和降水量增加，两者效果差异逐渐减小。

（3）生物炭耦合有机肥施用可显著提高收获穗数、穗粒数和单穗粒重，促进燕麦籽粒产量形成和水分利用。

综上，生物炭和有机肥配施可显著促进旱作燕麦生长发育，有效保持土壤水分和减少土壤耗水，并提高燕麦水分利用效率和产量。

## 参考文献：


[1]　侯建伟，段玉，张君，等．内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用［J］．土壤，2018，50（1）：79–85.

[2]　贾立国，石晓华，秦永林，等．内蒙古阴山北麓地区马铃薯产量潜力的估算［J］．作物杂志，2015（1）：109–113.

[3]　秦永林，井涛，康文钦，等．阴山北麓马铃薯在不同灌溉模式下的水肥效率［J］．中国生态农业学报，2013，21（4）：426–431.

[4]　邢海峰，秦永林，樊明寿．内蒙古阴山北麓高产马铃薯的群体特征［J］．中国土壤与肥料，2016（6）：116–120，151.

[5]　康文钦，杜磊，于利峰，等．阴山北麓地区降水特性和作物需水耦合关系分析——以武川县为例［J］．北方农业学报，2020，48（5）：83–89.

[6]　任永峰，路战远，赵沛义，等．不同种植方式对旱地马铃薯水分利用及产量的影响［J］．作物杂志，2019（5）：120–124.

[7]　胡琦，谭英，杨鹏宇，等．阴山北麓农牧交错带不同沟垄宽度集雨技术对马铃薯的影响［J］．干旱区资源与环境，2017，31（11）：116–121.

[8]　Meng J，He T Y，Edmond S，et al．Development of the straw

biochar returning concept in China［J］. Biochar，2019，1（2）：139–149.

［9］ Praadhan S，Abdelaal A H，Kamal M，et al. Biochar from vegetable wastes：agro–environmental characterization［J］. Biochar，2020，2（4）：439–453.

［10］ 齐瑞鹏，张磊，颜永毫，等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响［J］. 应用生态学报，2014，25（8）：2281–2288.

［11］ Pathy A，Ray J，Paramasivan B. Biochar amendments and its impact on soil biota for sustainable agriculture［J］. Biochar，2020，2（3）：287–305.

［12］ 宋大利，习向银，黄绍敏，等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2017，23（2）：369–379.

［13］ 王浩，焦晓燕，王劲松，等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响［J］. 水土保持学报，2015，29（2）：253–257，287.

［14］ Qian Z，Tang L，Zhuang S，et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at south China［J］. Biochar，2020，2（4）：1–10.

［15］ 陈温福，张伟明，孟军. 农用生物炭研究进展与前景［J］. 中国农业科学，2013，46（16）：3324–3333.

［16］ 丁艳丽，刘杰，王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展［J］. 应用生态学报，2013，24（11）：3311–3317.

［17］ 牛新胜，巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用［J］. 植物营养与肥料学报，2017，23（6）：1462–1479.

［18］ 宁川川，王建武，蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展［J］. 生态环境学报，2016，25（1）：175–181.

［19］ 陶磊，褚贵新，刘涛，等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响［J］. 生态学报，2014，34（21）：6137–6146.

［20］ 李娟，葛磊，曹婷婷，等. 有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响［J］. 水土保持学报，2019，33（2）：121–127.

［21］ 李焕春，何文清，安昊，等. 长期有机无机肥料配施对干旱区栗钙土微生物量碳的影响［J］. 中国土壤与肥料，2014（5）：22–26.

［22］ 顾美英，杨蓉，徐万里，等. 棉秆炭配施生物有机肥对连作棉花根际土壤微生态和棉花生长的影响［J］. 中国农业科技导报，2019，21（10）：47–57.

［23］ 田露，刘景辉，赵宝平，等. 保水剂与微生物菌肥配施对黄土高原旱作燕麦生长及水分利用的影响［J］. 水土保持通报，2020，40（3）：317–324.

［24］ 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［J］. 作物学报，2017，43（9）：1370–1380.

［25］ 李雁鸣. 燕麦叶面积测定方法的初步研究［J］. 河北农业大学学报，1993，16（1）：25–28.

［26］ 孙树臣，赵鑫，翟胜，等. 生物质炭施用对土壤水分影响的研究进展［J］. 灌溉排水学报，2020，39（11）：112–119.

［27］ 潘全良，陈坤，宋涛，等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响［J］. 水土保持研究，2017，24（1）：115–121.

［28］ 程红胜，沈玉君，孟海波，等. 生物炭基保水剂对土壤水分及油菜生长的影响［J］. 中国农业科技导报，2017，19（2）：86–92.

［29］ 许健，牛文全，张明智，等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响［J］. 应用生态学报，2016，27（11）：3505–3513.

［30］ 王湛，李银坤，王利春，等. 生物炭配施有机肥对菜田土壤水分及水分利用效率的影响［J］. 中国农业气象，2017，38（12）：771–779.

［31］ 魏永霞，王鹤，刘慧，等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响［J］. 农业机械学报，2019，50（9）：290–299.

［32］ 果才佳，Gamareldawla H D，佘冬立. 生物炭施用对滨海盐碱地番茄生长与耗水规律的影响［J］. 中国农村水利水电，2021（7）：181–184，191.

［33］ 阚正荣，刘鹏，李超，等. 施用生物炭对华北平原土壤水分和夏玉米生长发育的影响［J］. 玉米科学，2019，27（1）：142–150.

［34］ 王淑君，夏桂敏，李永发，等. 生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响［J］. 水土保持学报，2017，31（6）：285–290，301.

［35］ 王湛，李银坤，王利春，等. 生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响［J］. 农业机械学报，2018，49（12）：273–280.

［36］ 彭辉辉，刘强，荣湘民，等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米养分利用及产量的影响［J］. 南方农业学报，2015，46（8）：1396–1400.

［37］ 陈伟，周波，束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响［J］. 中国农业科学，2013，46（18）：3850–3856.

［38］ 高学振，张丛志，张佳宝，等. 生物炭、秸秆和有机肥对砂姜黑土改性效果的对比研究［J］. 土壤，2016，48（3）：468–474.

［39］ Zhang Z Y，Dong X X，Wang S M，et al. Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems in Xinjiang，China［J］. Scientific Reports，2020，10（1）：1–10.

**Effects of biochar combined with organic manure on growth and water use of dryland oat in northern foothill of Yinshan mountain**

LIU Xiao-yue[1, 2, 3, 4], GAO Ri-ping[1, 3, 4], HAN Yun-fei[1, 3, 4], GAO Yu[1, 3, 4], GAO Hong-yan[1, 3, 4], ZHANG Peng[1, 3, 4], ZHAO Pei-yi[1, 2, 3, 4], REN Yong-feng[1, 3, 4*]（1. Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot Inner Mongolia 010031; 2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Farming, Hohhot Inner Mongolia 010031; 4. Science Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation Inner Mongolia, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot Inner Mongolia 011705）

**Abstract:** To improve the water use efficiency in dry farming areas at the northern foothill of Yinshan mountain in Inner Mongolia, the effects of four different tillage methods, namely, biochar and organic manure combined（BM）, biochar alone（B）, organic manure alone（M）and no biochar and organic manure（CK）, on the temporal and spatial changes of soil moisture, soil water consumption characteristics, and agronomic traits, yield components and water use efficiency in key growth stages of oats were compared and analyzed. The results showed that biochar, organic manure and their combination promoted the growth and development of oats. Compared with CK, the plant height of B, M and BM oats increased by 17.73%, 22.29% and 26.03%, respectively, the leaf area per plant increased by 13.32%, 17.05% and 23.67%, and the aboveground dry matter increased by 6.48%, 7.39% and 20.30%, respectively. The effect of biochar was better than that of organic manure in the early and middle stages of oat growth, and the effect of organic manure was better than that of biochar in the late growth, and the coupling effect was the best. BM increased soil water content of 0 ~ 40 cm by 1.65% ~ 19.12%, significantly reduced oat soil water storage consumption by 11.34% ~ 20.09%, and total water consumption by 0.38% ~ 0.88%. The effect of biochar on water conservation and consumption reduction was stronger than that of organic manure. With the growth period and precipitation increasing, the difference between the two effects decreased gradually. In terms of yield, BM simultaneously significantly increased the number of harvested spikes, grain number per spike and grain weight per spike, and promoted the formation of grain yield and water use efficiency of oats. Grain yield increased by 7.63% ~ 14.80%, and water use efficiency increases by 8.62% ~ 16.64%. Combined application of biochar and organic manure can significantly promote the growth of dryland oats, effectively maintain soil moisture, and improve water use efficiency and yield of oats. It is a drought-resistant and moisture-conserving technical measure suitable for dryland oat planting in the northern foothill of Yinshan mountain in Inner Mongolia.

**Key words:** biochar; organic manure; dry-farming oat; yield; water use