



# 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物 氮素积累分配及产量的影响

普布仓决,王金平,姚丽茹,朱员正,贺峥峥,韩娟

(西北农林科技大学 农学院,陕西杨凌 712100)

**摘要** 为探索陕西关中地区冬小麦—夏玉米复种体系氮肥减量增效潜力,构建适宜的作物养分管理体系,于2018—2019年采用田间试验研究了减氮并配施不同肥料对麦玉复种体系作物生长状况、植株氮素积累分配、作物产量以氮素利用效率的影响。试验设置5个处理:常规施氮( $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $N_{100}$ );减氮20% ( $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80}$ );减氮配施生物炭( $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 生物炭  $22\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80} + \text{BC}$ );减氮配施缓释肥( $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 尿素:缓释肥 = 1:1,  $N_{80} + \text{S}$ );减氮配施微生物菌肥( $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 微生物菌肥  $3\ 600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80} + \text{BF}$ )。结果表明:减氮及其配施不同肥料对夏玉米大喇叭口期后株高、干物质和氮素积累没有显著影响;而  $N_{80} + \text{BF}$  促进了夏玉米氮素向籽粒中的分配;  $N_{80} + \text{BC}$  提高了夏玉米产量和收获指数,且较  $N_{80}$  处理分别显著提高8.3%和20.1%;减氮下三种配施处理均能提高夏玉米氮农学利用率和氮肥偏生产力,且以  $N_{80} + \text{BC}$  处理表现最佳,较  $N_{100}$  分别显著提高43.3%和29.0%,较  $N_{80}$  分别显著提高45.8%和8.3%;  $N_{80} + \text{BC}$  和  $N_{80} + \text{BF}$  还能显著提高夏玉米氮肥表现观回收率,二者较  $N_{100}$  显著增加18.1%和10.7%,较  $N_{80}$  处理显著增加26.9%和19.0%。与  $N_{80}$  相比,  $N_{80} + \text{BF}$  有效提高了冬小麦扬花期和成熟期分蘖数、茎蘖成穗率以及成熟期干物质和氮素积累量,并能显著提高冬小麦穗数和产量,增幅分别为13.7%和16.2%。减氮下3种配施处理均能提高冬小麦氮农学利用率、氮肥偏生产力和氮素利用率,其中氮农学利用率和氮肥偏生产力在  $N_{80} + \text{BF}$  处理表现最佳,较  $N_{100}$  分别显著提高了31.2%和28.4%,较  $N_{80}$  分别显著提高了33.7%和16.2%,氮素利用率在  $N_{80} + \text{S}$  处理表现最佳。综上所述,减氮及其配施处理中,  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  配施生物炭( $22\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )和  $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  配施微生物菌肥( $3\ 600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )更有利于作物生长,促进氮素积累与分配,提高作物产量和氮素利用效率,实现关中地区麦玉复种体系氮肥管理的“减量增效”。

**关键词** 夏玉米—冬小麦;氮肥减量;肥料配施;产量;氮素利用率

氮素是决定作物产量的关键因素<sup>[1]</sup>。自20世纪80年代初以来,为追求高产,中国化肥投入量增加了约3.6倍<sup>[2]</sup>,其中氮肥的投入占化肥总投入的比例最高。而在氮肥投入水平快速增长的背景下,氮肥利用率显著低于国际水平,其中小麦和玉米的氮肥利用率仅有28.2%和26.1%<sup>[3]</sup>。陕西关中地区是我国重要的粮产主产区,冬小麦—夏玉米复种是该的主要种植模式,因此,实现该地区小麦和玉米的高产增效对保障中国粮食生产有着重要意义。但是目前该地区农业生产中普遍存在着氮肥过量投入和忽视有机肥施用等问题,小麦和玉米单季投入氮肥量分别高达286

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $332\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,过量施氮农户分别占55.3%和78.2%<sup>[4-5]</sup>。长期过量且单一施用氮肥不仅未能显著提高作物产量,反而导致土壤功能退化,造成氮肥利用率低、养分不平衡和资源浪费,同时还会引发一系列生态环境问题<sup>[6-8]</sup>。因此,如何在保证作物产量的前提下通过调整肥料类型优化氮肥使用量,建立高效的作物养分管理策略是该地区农业生产中亟需解决的关键问题。生物炭是一种良好的土壤改良剂,能够改良土壤理化性质,提高作物养分吸收率,促进作物生长和发育<sup>[9]</sup>。首先,生物炭具有发达的多孔结构和丰富的含氧官能团,可以提高土壤的保水能力,降低

收稿日期:2022-12-15 修回日期:2023-03-17

基金项目:陕西省重点研发计划重点项目(2018ZDXM-NY-002)。

第一作者:普布仓决,女,硕士研究生,研究方向为旱区高效农作制度与作物栽培技术。E-mail:pbj030065@163.com

通信作者:韩娟,女,博士,教授,研究方向为旱区作物水肥高效利用。E-mail:hjpost@nwsuaf.edu.cn

土壤体积质量,减少土壤养分元素的淋失,保持较高的土壤肥力<sup>[10]</sup>。生物炭还包括大量的有机质和丰富的养分元素为作物提供所需养分,促进作物生长和发育<sup>[11]</sup>,提高作物干物质重量和产量<sup>[12-13]</sup>。研究表明,减氮条件下基施生物炭可以显著提高氮素吸收利用率<sup>[14]</sup>。柳瑞等<sup>[15]</sup>研究表明,氮肥减施或配施稻秆生物炭能有效保持土壤养分,促进水稻对氮素的吸收,提高氮素利用率。向伟等<sup>[16]</sup>研究表明,相较于常规施氮配施生物炭后作物产量提高 9.9%~11.98%,氮肥利用效率和氮肥偏生产力分别提高了 7.7%~8.1%和 52.3%~57.1%,柳瑞等<sup>[17]</sup>通过稻田试验发现,稻秆生物炭替代 20%~40%的氮肥时,能够达到水稻稳产的目的。

缓释肥具有肥效期长且稳定的特点,单次施用即可满足玉米在整个生育期对养分的需求<sup>[18]</sup>。杨峰等<sup>[19]</sup>研究认为缓释肥不仅能提高作物产量氮肥利用效率,还能减少玉米生育后期土壤中养分残留,降低氮损失。在水稻大田试验中,施用缓释肥后显著提高氮素利用率和水稻产量,缓释肥尤其在氮肥减量的研究中起到稳产增产的作用<sup>[20-22]</sup>。李若楠等<sup>[23]</sup>和王薇等<sup>[24]</sup>研究认为氮肥减量基础上配施缓释肥可以实现小麦稳产增产的同时,还能降低成本,提高经济效益;常凤等<sup>[25]</sup>研究表明,减氮 20%配施缓释肥对冬小麦具有较明显的增产效果,氮肥利用率较高。

微生物菌肥含有大量的活性有益微生物,通过其生命活动来满足作物生长发育所需要的营养<sup>[26]</sup>。大量研究表明,微生物菌肥具有改善土壤结构、提高作物的肥料利用率、提高土壤有效养分、增加作物对养分的吸收、减少病虫害、提高作物抗病能力等多种功能<sup>[27-33]</sup>,从而提高作物产量和品质。Michael 等<sup>[34]</sup>认为氮肥减量 23%~52%基础上配施生物菌肥,能够实现减肥增效的目的,同样杨国威等<sup>[35]</sup>也研究发现,生物菌肥替代氮肥 50%时,作物产量比常规施氮处理提高了 7.9%,黄鹏等<sup>[36]</sup>研究表明,在氮肥减量 15%以内时,配施生物菌肥可以实现玉米增产稳产的效果,并可以提高资源利用效率。综上所述,生物炭、缓释肥及微生物菌肥与普通氮肥配施受到越来越多的关注,但是 3 种不同肥料在麦玉复种体系氮肥减量化生产中的作用尚不明确,仍需进一步研究实证。

因此,本研究以关中地区小麦—玉米周年复

种体系为研究对象,在氮肥减量下配施不同类型肥料(生物炭、缓释肥和微生物菌肥),探究不同施肥处理下夏玉米—冬小麦周年复种体系作物群体生长状况、植株氮素积累分配、作物产量以氮素利用效率的影响。旨在明确满足该地区麦玉增产增收和资源高效利用的施肥方案,以期为关中地区氮肥减量增效技术的应用和绿色可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018 年 6 月—2019 年 6 月在陕西省咸阳市泾阳县云阳镇西北农林科技大学斗口试验站(东经 108°88',北纬 34°61')进行。2018 年夏玉米和 2018—2019 年冬小麦全生育期内降水量分别为 176.79 mm 和 79.3 mm,两季作物生育期降雨量及日平均温度如图 1。播前土层(0~20 cm)基本理化性质如下:pH 8.3,有机质 17.05 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.13 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.58 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷 14.12 mg·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 60.49 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 286.00 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

田间试验采取单因素随机区组设计,设置 5 处理:以常规施氮(播前基施 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>+拔节追施 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>,N<sub>100</sub>)为对照,设置 4 个减氮及其配施处理:减氮 20%(播前基施 90 kg·hm<sup>-2</sup>+拔节追施 90 kg·hm<sup>-2</sup>,N<sub>80</sub>);减氮配施生物炭(夏玉米播前基施 90 kg·hm<sup>-2</sup>和生物炭 22 500 kg·hm<sup>-2</sup>+拔节追施 90 kg·hm<sup>-2</sup>,N<sub>80</sub>+BC),减氮配施缓释肥(播前基施 180 kg·hm<sup>-2</sup>,尿素:缓释肥=1:1,N<sub>80</sub>+S);减氮配施微生物菌肥(播前基施 90 kg·hm<sup>-2</sup>和微生物菌肥 3 600 kg·hm<sup>-2</sup>+拔节追施 90 kg·hm<sup>-2</sup>,N<sub>80</sub>+BF),除了小麦季没有基施生物炭以外,两季作物施肥量一致。磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,16%)和钾肥(K<sub>2</sub>O,56%)分别以 120 kg·hm<sup>-2</sup>和 90 kg·hm<sup>-2</sup>的施用量于两季作物播前基施,每个处理重复 3 次,共 15 个小区,小区面积为 45.5 m<sup>2</sup>(3.5 m×13 m)。玉米和小麦供试品种分别为‘陕单 609’和‘小偃 22’。供试肥料中的氮肥为普通尿素(N≥46%);生物炭为小麦秸秆在 450 °C 厌氧热解制备而得(含氮量 0.49%),购自南京勤丰秸秆科技有限公司,其基本理化性质为 pH 10.40,有机碳含量 467.05 g·kg<sup>-1</sup>,全磷

0.61 g · kg<sup>-1</sup>,全钾 20.03 g · kg<sup>-1</sup>,钙 10.02 g · kg<sup>-1</sup>,C/N 比为 79.10,灰分含量 20.8%;缓释肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=28:6:6)购自奥磷丹公司;微生物菌肥为富朗微生物菌剂(有效活菌数≥6.0亿/g,含解淀粉芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌,含氮量2%,不含磷和钾等养分)。

夏玉米播种时间为2018年6月13日,密度

均为6.75万株·hm<sup>-2</sup>,在播种后和拔节追肥后进行定量灌溉,灌溉量均为100mm。冬小麦播种时间为2018年10月7日,行距25cm,播量187.5kg·hm<sup>-2</sup>,在越冬前和拔节追肥后进行定量灌溉,灌溉量均为100mm,灌溉方式采取微喷灌,其他同当地常规管理措施相一致。

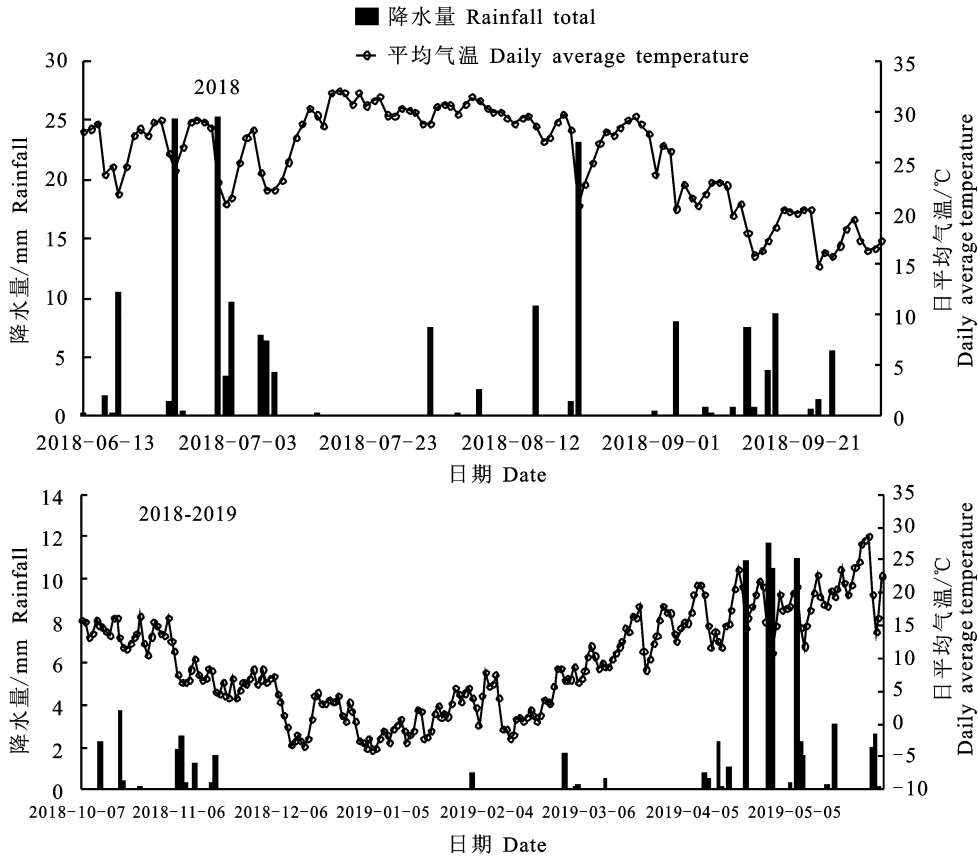


图1 试验区气温与降雨量变化

Fig.1 Changes in monthly mean air temperature and monthly precipitation in experimental area

1.3 测定指标与方法

1.3.1 群体指标测定 夏玉米株高:在夏玉米各关键生育时期选取5株,用米尺测量株高。

冬小麦茎蘖动态:在冬小麦苗期于各小区选取长势均匀1m<sup>2</sup>进行标记并统计基本苗数,在越冬期、拔节期、扬花期和成熟期调查标记区的分蘖数,并计算茎蘖成穗率。

干物质质量:在夏玉米关键生育时期每个小区随机选取3株鲜样,在冬小麦关键生育时期每个小区选取具有代表性的连续20cm鲜样,二者植株样品按照植株不同部位分样处理,在105℃下杀青30min,转80℃烘干至恒量。

1.3.2 氮素积累与分配 将烘干称量后的玉米

和小麦植株各器官进行粉碎过筛,采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消解-靛酚蓝比色法测定其全氮含量。根据各器官氮含量计算植株含氮量。氮素积累与分配相关计算公式如下:

$$\text{植株氮素积累量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{)} = \text{植株干物质质量} / 1000 \times \text{植株氮素含量}$$

$$\text{各器官氮素积累量 (g} \cdot \text{株}^{-1}\text{)} = \text{各器官干物质质量} \times \text{氮素含量}$$

$$\text{各器官氮素分配比例} = \text{各器官氮素积累量} / \text{整株氮素积累量} \times 100\%$$

1.3.3 产量性状测定 夏玉米成熟期随机选取各小区长势均匀的15株,统计穗粒数,测量穗粗和穗长、百粒质量,并各小区随机取20穗,在晾晒

后脱粒测定 14% 含水量下的产量。

冬小麦成熟期于各小区内收割长势均匀的 1 m<sup>2</sup> 的植株,调查小麦穗数,并取 20 cm 植株样统计穗粒数,脱粒后测定 14% 含水量下的产量以及千粒质量。

1.3.4 氮素利用效率测定 氮素利用效率相关计算公式如下:

氮农学利用率(kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥偏生产力(kg·kg<sup>-1</sup>)=籽粒产量/施氮量

氮素利用率(kg·kg<sup>-1</sup>)=籽粒产量/成熟期植株地上部氮素积累量

氮肥表观回收率(%)=(成熟期施氮区植株氮素积累量-不施氮区植株氮素积累量)/总施氮量

## 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2019、SAS 9.4 和 Origin 2021 软件进行数据整理、分析及作图。

## 2 结果与分析

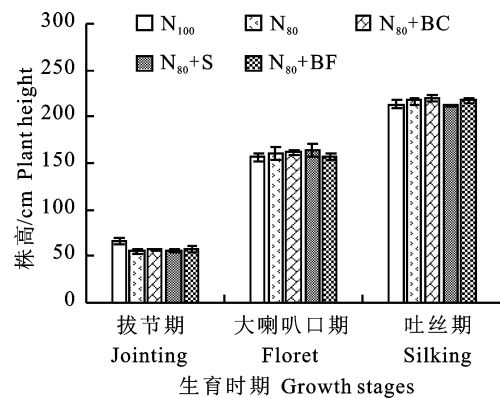
### 2.1 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物生长的影响

#### 2.1.1 对夏玉米株高和冬小麦茎蘖动态的影响

夏玉米株高随着生育期的推进呈逐渐递增的趋势,吐丝期达到最高(图 2)。拔节期,N<sub>100</sub> 处理玉米株高显著高于其他处理;而大喇叭口期和吐丝期,减氮及其配施处理 N<sub>80</sub>、N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S、N<sub>80</sub>+BF 与 N<sub>100</sub> 间均无显著差异。

冬小麦茎蘖数在整个生育期内呈先升后降趋

势,拔节期达到峰值(表 1)。越冬期茎蘖数表现为 N<sub>100</sub>>N<sub>80</sub>+BF>N<sub>80</sub>>N<sub>80</sub>+S>N<sub>80</sub>+BC, N<sub>100</sub> 显著高于 N<sub>80</sub>+BC,但和其他处理无显著差异;扬花期表现为 N<sub>80</sub>+BF>N<sub>100</sub>>N<sub>80</sub>+BC>N<sub>100</sub>+S>N<sub>80</sub>,其中 N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S、N<sub>80</sub>+BF 与 N<sub>100</sub> 之间均无显著差异,成熟期表现趋势与扬花期一致,且 N<sub>80</sub>+BF 较 N<sub>80</sub> 冬小麦茎蘖数在扬花期和成熟期分别显著提高 12.0% 和 13.8%;冬小麦茎蘖成穗率表现为 N<sub>80</sub>+BF>N<sub>80</sub>+S>N<sub>80</sub>+BC>N<sub>100</sub>>N<sub>80</sub>,其中 N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S、N<sub>80</sub>+BF 较 N<sub>100</sub> 茎蘖成穗率提高了 4.2%~11.6%,较 N<sub>80</sub> 提高了 4.5%~11.9%,且 N<sub>80</sub>+BF 处理效果最佳。



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments( $P<0.05$ ). The same below

图 2 不同施肥处理的夏玉米株高

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on plant height of summer maize

表 1 不同施肥处理的冬小麦茎蘖动态和茎蘖成穗率( $\bar{x}\pm s$ )

Table 1 Effects of different fertilization treatments on tiller dynamics and spike rate of winter wheat

处理 Treatment	基本苗/m <sup>-2</sup> Basic seedling	越冬期/m <sup>-2</sup> Before winter	拔节期/m <sup>-2</sup> Jointing stage	扬花期/m <sup>-2</sup> Anthesis stage	成熟期/m <sup>-2</sup> Maturity stage	茎蘖成穗率/% Spike rate
N <sub>100</sub>	300.00±6.93 a	655.78±4.22 a	1 620.67±13.38 a	592.02±4.32 a	582.17±3.09 a	35.92±0.13 a
N <sub>80</sub>	304.00±4.00 a	612.58±9.4 ab	1 485.33±22.43 a	556.56±4.04 b	532.00±4.04 b	35.83±0.52 a
N <sub>80</sub> +BC	293.56±7.22 a	564.78±2.61 b	1 535.56±126.14 a	597.39±22.75 ab	572.44±42.26 ab	37.43±1.83 a
N <sub>80</sub> +S	288.00±8.11 a	602.22±19.20 ab	1 479.56±72.17 a	582.15±9.98 ab	557.67±15.54 ab	37.94±2.70 a
N <sub>80</sub> +BF	300.44±4.89 a	614.22±38.34 ab	1 520.44±105.85 a	624.07±21.62 a	605.50±15.75 a	40.08±1.89 a

注:不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments( $P<0.05$ ). The same below.

2.1.2 对夏玉米和冬小麦地上部干物质积累的影响 夏玉米干物质积累量随着生育期的推进呈逐渐递增的趋势,成熟期达到最高(图 3)。拔节期各处理干物质积累量表现为 N<sub>100</sub>>N<sub>80</sub>+BC>

N<sub>80</sub>+S>N<sub>80</sub>+BF>N<sub>80</sub>, N<sub>100</sub> 显著高于 N<sub>80</sub>、N<sub>80</sub>+BF,但 N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S 与 N<sub>100</sub> 间无显著差异,且 N<sub>80</sub>+BC 和 N<sub>80</sub>+S 较 N<sub>80</sub> 分别显著提高 22.8% 和 19.5%;而大喇叭口期至成熟期,减

氮及其配施处理  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$ 、 $N_{80} + S$ 、 $N_{80} + BF$  与  $N_{100}$  间均无显著差异。

冬小麦干物质积累量也随着生育期的推进而呈逐渐递增的趋势,成熟期达到最高(图3)。拔节期各处理干物质积累量表现为  $N_{80} + S > N_{100} > N_{80} + BC > N_{80} > N_{80} + BF$ ,所有减氮及其配施处

理与  $N_{100}$  间均无显著差异,且  $N_{80} + S$  较  $N_{80}$  显著提高了 16.9%;成熟期表现为  $N_{100} > N_{80} + BF > N_{80} + BC > N_{80} + S > N_{80}$ , $N_{100}$  显著高于  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$ 、 $N_{80} + S$ ,但与  $N_{80} + BF$  间无显著差异,且  $N_{80} + BF$  较  $N_{80}$  显著提高了 12.7%。

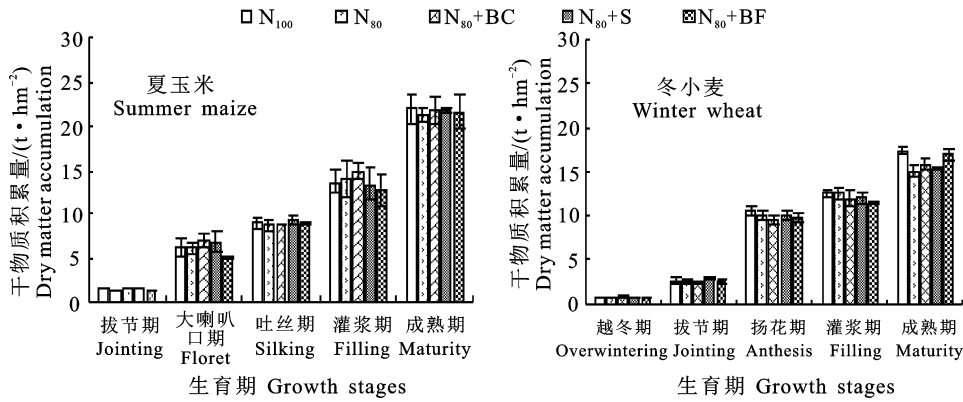


图3 不同施肥处理下夏玉米、冬小麦上部干物质的积累量  
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on aboveground dry matter accumulation of summer maize and winter wheat

### 2.2 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物养分积累及分配的影响

2.2.1 对夏玉米和冬小麦地上部植株氮素积累的影响 夏玉米吐丝期和成熟期地上部植株氮素积累在各处理间均无显著差异( $P < 0.05$ ,图4)。吐丝期地上部植株氮积累量表现为  $N_{80} + S > N_{100} > N_{80} > N_{80} + BF > N_{80} + BC$ ,在成熟期则表现为  $N_{100} > N_{80} + BC > N_{80} + BF > N_{80} + S > N_{80}$ 。可见,减氮不会影响夏玉米植株氮素积累。

冬小麦扬花期地上部植株氮素积累在各处理间均无显著差异(图4),而成熟期各处理间存在一定差异。成熟期植株氮素积累量表现为  $N_{100} > N_{80} + BF > N_{80} + BC > N_{80} > N_{80} + S$ , $N_{100}$  显著高于  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$  和  $N_{80} + S$ ,但与  $N_{80} + BF$  无显著差异,且  $N_{80} + BF$  较  $N_{80}$  处理增加了 13.4%。可见,微生物菌肥可弥补减氮对冬小麦干物质积累造成的负效应。

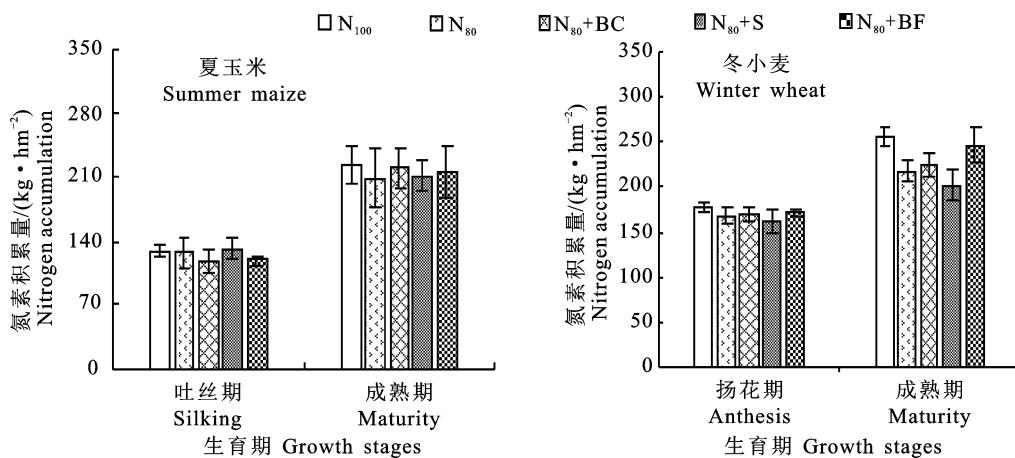


图4 不同施肥处理下夏玉米、冬小麦地上部的氮素积累量  
Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on nitrogen accumulation in aboveground plants of summer maize and winter wheat

2.2.2 对夏玉米和冬小麦地上部植株氮素分配的影响 夏玉米成熟期不同器官中籽粒的氮素含量及分配比例最大(表 2)。不同器官氮素含量在各处理间均无显著差异。在茎+叶+苞叶中氮素分配比例表现为  $N_{80} + BC > N_{100} > N_{80} > N_{80} + S > N_{80} + BF$ , 其中  $N_{100}$  显著高于  $N_{80} + BF$ , 但与其他处理无显著差异; 在籽粒中氮素分配表现为  $N_{80} + BF > N_{80} > N_{100} > N_{80} + S > N_{80} + BC$ , 其中  $N_{80} + BF$  较  $N_{100}$  和  $N_{80}$  分别提高了 8.5% 和 5.2%。

冬小麦成熟期不同器官中也是籽粒的氮素含

量及分配比例最大(表 2)。在茎叶中氮素含量表现为  $N_{100} > N_{80} + BC > N_{80} > N_{80} + BF > N_{80} + S$ ,  $N_{100}$  显著高于  $N_{80} + S$ ,  $N_{80} + BF$ , 但与  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$  间无显著差异; 在籽粒中表现为  $N_{100} > N_{80} + BF > N_{80} > N_{80} + BC > N_{80} + S$ ,  $N_{100}$  显著高于  $N_{80} + S$ , 但与  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$ 、 $N_{80} + BF$  间均无显著差异。冬小麦各器官氮素分配比例均没有受到减氮的影响, 且减氮下三种配施处理  $N_{80} + BC$ 、 $N_{80} + S$  和  $N_{80} + BF$  相比  $N_{100}$  和  $N_{80}$  还能在一定程度上提高冬小麦籽粒中的氮分配比例。

表 2 不同施肥处理下夏玉米、冬小麦成熟期植株各器官氮素分配比例( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 Distribution ratio of nitrogen in plant organs of summer maize and winter wheat under different fertilization treatments

指标 Index	处理 Treatment	夏玉米 Summer maize			冬小麦 Winter wheat		
		茎+叶+苞叶 Stem+leaf+bract	穗轴 Cob	籽粒 Grain	茎+叶+苞叶 Stem+leaf+bract	穗轴 Cob	籽粒 Grain
氮素含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Nitrogen content	$N_{100}$	7.57±0.43 a	4.61±0.52 a	14.35±0.37 a	4.94±0.14 a	6.23±0.5 a	22.4±0.64 a
	$N_{80}$	7.41±0.73 a	4.44±0.09 a	15.21±0.88 a	4.76±0.37 a	6.03±0.15 a	22.18±0.81 ab
	$N_{80} + BC$	7.93±0.33 a	4.82±0.02 a	15.18±1.22 a	4.78±0.26 a	5.88±0.4 a	21.29±0.19 ab
	$N_{80} + S$	6.88±0.11 a	4.51±0.45 a	16.17±0.69 a	3.74±0.17 b	4.99±0.35 a	20.33±0.8 b
	$N_{80} + BF$	7.3±0.17 a	5.03±0.48 a	14.82±0.49 a	3.79±0.00 b	6.19±0.5 a	22.21±0.6 ab
氮素分配比例/% Nitrogen distribution ratio	$N_{100}$	39.48±3.9 a	3.11±0.3 a	57.41±5.08 ab	12.67±1.19 a	3.19±0.61 a	84.65±1.63 a
	$N_{80}$	38.17±1.32 a	2.59±0.28 a	59.25±1.34 ab	12.76±1.36 a	3.21±0.24 a	84.53±1.5 a
	$N_{80} + BC$	42.53±1.93 a	2.67±0.23 a	54.79±2.21 b	12.88±1.06 a	2.91±0.43 a	84.66±0.85 a
	$N_{80} + S$	38±4.05 a	3.2±0.41 a	54.96±8.66 b	10.5±0.30 a	2.63±0.38 a	87.21±0.5 a
	$N_{80} + BF$	34.34±3.07 b	3.35±0.52 a	62.31±3.25 a	11.84±1.81 a	3.20±0.22 a	85.44±1.91 a

### 2.3 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物产量及氮素利用率的影响

2.3.1 对夏玉米和冬小麦产量的影响 夏玉米穗粗、穗长、穗粒数和百粒质量均在各处理间均无显著差异, 而产量和收获指数在各处理间存在一定的差异(表 3)。产量表现为  $N_{80} + BC > N_{80} + S > N_{100} > N_{80} + BF > N_{80}$ , 收获指数则表现为  $N_{80} + BC > N_{80} + S > N_{80} + BF > N_{100} > N_{80}$ , 其中  $N_{80} + BC$  较  $N_{100}$  夏玉米产量和收获指数分别提高了 3.2% 和 16.7%, 较  $N_{80}$  分别显著提高了 8.3% 和 20.1%, 其余减氮处理与  $N_{100}$  之间无显著差异。

冬小麦穗粒数和收获指数在各处理间均无显著差异, 而穗数、千粒质量和产量在各处理间存在一定的差异(表 3), 且主要通过提高穗数来增加冬小麦产量。穗数和产量均表现为  $N_{80} + BF > N_{100} > N_{80} + BC > N_{80} + S > N_{80}$ , 其中  $N_{80} + BF$  较  $N_{100}$  冬小麦穗数和产量分别提高 4.0% 和 2.7%, 较  $N_{80}$  分别显著提高 13.7% 和 16.2%; 千粒质量表现出  $N_{80} + BC > N_{80} + S > N_{100} > N_{80} + BF > N_{80}$ ,  $N_{80}$ 、 $N_{80} + BC$ 、 $N_{80} + S$ 、 $N_{80} + BF$  与  $N_{100}$  无显著差异, 且  $N_{80} + BC$  和  $N_{80} + S$  较  $N_{80}$  均显著提高 3.7%。

表 3 不同施肥处理下夏玉米、冬小麦的产量及其构成因素( $\bar{x} \pm s$ )

Table 3 Effects of different fertilization treatments on yield and yield components of summer maize and winter wheat

处理 Treatment	夏玉米 Summer maize						冬小麦 Winter wheat				
	穗粗/cm Ear diameter	穗长/cm Ear length	穗粒数 Number per ear	百粒质量/g Mass per 100 kernels	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) Grain yield	收获指数/% Harvest index	穗数/m <sup>-2</sup> Number	穗粒数 Grain spike	千粒质量/% Mass per 1 000 kernels	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) Grain yield	收获指数/% Harvest index
$N_{100}$	4.63±0.08 a	13±0.08 a	416.73±13.84 a	26.72±0.09 a	7 514.53±240.9 ab	34.33±1.95 ab	582.17±2.52 a	31.28±0.17 a	41.63±0.08 a	7 580.49±11.23 a	43.68±0.62 a
$N_{80}$	4.58±0.04 a	13.27±0.13 a	410.95±6.55 a	25.83±0.71 a	7 159.15±85.99 b	33.39±0.36 b	532.00±3.30 b	31.19±0.05 a	40.23±0.24 b	6 700.96±69.46 b	44.52±1.62 a
$N_{80} + BC$	4.7±0.01 a	13.37±0.25 a	412.59±11.41 a	27.85±0.38 a	7 755.16±97.63 a	40.04±2.33 a	572.44±34.51 ab	31.07±0.21 a	41.73±0.33 a	7 406.83±349.17 ab	46.61±2.93 a
$N_{80} + S$	4.66±0.11 a	13.66±0.45 a	412.12±11.13 a	27.08±1.11 a	7 549.17±239.7 ab	35.22±1.32 ab	557.67±12.69 ab	31.30±0.47 a	41.72±0.11 a	7 285.25±237.43 ab	47.6±1.89 a
$N_{80} + BF$	4.59±0.02 a	13.39±0.16 a	399.73±9.96 a	26.69±0.94 a	7 204.2±102.43 ab	34.86±2.23 ab	605.5±12.86 a	31.21±0.11 a	41.73±0.33 b	7 785.69±106.39 ab	45.88±1.68 a

2.3.2 对夏玉米和冬小麦氮素利用率的影响

夏玉米氮农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观回收率在各处理间均存在一定的差异,氮素利用率各处理间无显著差异(表4)。氮农学利用率 $N_{80}+BC$ 处理表现最高,较 $N_{100}$ 和 $N_{80}$ 分别显著提高了43.3%和45.8%;氮肥偏生产力表现出 $N_{80}+BC>N_{80}+S>N_{80}+BF>N_{80}>N_{100}$ ,其中 $N_{80}$ 、 $N_{80}+BC$ 、 $N_{80}+S$ 、 $N_{80}+BF$ 较 $N_{100}$ 分别显著提高19.1%、29.0%、25.6%、19.8%,且 $N_{80}+BC$ 较 $N_{80}$ 显著提高8.3%;氮肥表观回收率表现为 $N_{80}+BC>N_{80}+BF>N_{100}>N_{80}+S>N_{80}$ ,其中 $N_{80}+BC$ 和 $N_{80}+BF$ 较 $N_{100}$ 分别显著提高18.1%和10.7%,较 $N_{80}$ 分别显著提高26.9%和19.0%。

冬小麦氮农学利用率、氮素利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观回收率在各处理间均存在一定的差异(表4)。氮农学利用率在 $N_{80}+BF$ 处理表现最大,较 $N_{100}$ 和 $N_{80}$ 分别显著提高31.2%和33.67%;氮素利用率表现出 $N_{80}+S$ 处理表现最大,较 $N_{100}$ 和 $N_{80}$ 分别显著提高了21.9%和16.6%;氮肥偏生产力表现出 $N_{80}+BF>N_{80}+BC>N_{80}+S>N_{80}>N_{100}$ ,其中 $N_{80}+BC$ 、 $N_{80}+S$ 、 $N_{80}+BF$ 较 $N_{100}$ 分别显著提高22.1%、20.1%、28.4%,且 $N_{80}+BF$ 还显著高于 $N_{80}$ ,增幅为16.17%;氮肥表观回收率表现为 $N_{80}+BF>N_{80}+BC>N_{100}>N_{80}>N_{80}+S$ ,其中 $N_{80}+BF$ 、 $N_{80}+BC$ 较 $N_{100}$ 和 $N_{80}$ 均有所提高,但差异不显著。

表4 不同施肥处理的夏玉米、冬小麦氮素利用效率( $\bar{x} \pm s$ )

Table 4 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency of summer maize and winter wheat

作物类型 Crop	处理 Treatments	氮农学利用率/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) NAE	氮素利用率/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) NUE	氮肥偏生产力/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) NFP	氮肥表观 回收率/% RE
夏玉米 Summer maize	$N_{100}$	7.35±1.07 b	33.84±2.32 a	33.4±1.07 c	24.66±7.39 b
	$N_{80}$	7.22±0.48 b	34.73±2.98 a	39.77±0.48 b	22.94±10.64 b
	$N_{80}+BC$	10.53±0.54 a	35.41±2.13 a	43.08±0.54 a	29.13±8.19 a
	$N_{80}+S$	9.38±1.33 ab	35.74±1.91 a	41.94±1.33 ab	24.42±4.8 b
	$N_{80}+BF$	7.47±0.57 ab	33.59±2.78 a	40.02±0.57 ab	27.31±9.51 a
冬小麦 Winter wheat	$N_{100}$	18.21±0.54 b	29.51±0.61 b	33.69±0.06 c	60.62±2.58 ab
	$N_{80}$	17.88±0.25 b	30.87±1.25 b	37.23±0.47 bc	60.4±3.17 ab
	$N_{80}+BC$	21.8±1.86 ab	32.99±2.11 ab	41.15±2.38 ab	63.26±4.05 ab
	$N_{80}+S$	21.12±1.88 ab	35.97±0.34 a	40.47±1.62 ab	54.55±3.04 b
	$N_{80}+BF$	23.9±1.21 a	31.67±1.35 ab	43.25±0.72 a	71.75±4.36 a

3 讨论

3.1 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物生长的影响

稳定的群体结构是保证作物产量的前提,而保持群体的稳定则需要良好的个体发育。氮肥是影响作物生长发育的关键因素。研究表明,氮肥减施或减氮配施生物炭对水稻株高没有显著影响<sup>[17]</sup>,与常规施氮相比,减氮配施缓释肥或生物炭不会造成玉米后期株高降低<sup>[37-38]</sup>。本研究与上述结论相似,本研究中,夏玉米拔节期常规施氮处理株高较高,但是大喇叭口期之后减氮及其配施处理的株高均接近于常规施氮处理,且没有显著差异。说明减氮情况下,通过基施可以满足玉米前期生长需求,随着试验周期的延长,后期通过追肥和生物炭、缓释肥和微生物菌肥的肥效优势来满足玉米生长所需养分,使株高增加效应逐步显现,最终与常规施氮处理之间无显著差异。研究表明,过量施用氮肥会造成冬小麦无效分蘖的增

多,从而导致茎蘖成穗率的降低<sup>[39]</sup>,氮肥减量下配施生物炭或生物菌肥均能显著提高22.9%~31.4%的冬小麦茎蘖成穗率<sup>[40]</sup>。本研究中,减氮配施微生物菌肥处理( $N_{80}+BF$ )较单纯减氮处理( $N_{80}$ )显著提高了冬小麦扬花期和成熟期茎蘖数;减氮下三种配施处理( $N_{80}+BC$ 、 $N_{80}+S$ 和 $N_{80}+BF$ )均能提高冬小麦茎蘖成穗率(4.2%~11.9%),其中以减氮配施微生物菌肥处理( $N_{80}+BF$ )效果最佳,这与孙利华等<sup>[41]</sup>研究结果相似。原因可能是微生物菌肥改善土壤理化性质,促进作物对营养元素的吸收,进而增加冬小麦有效分蘖数。其次,微生物菌肥具有肥肥供肥的特点,减少了养分的淋失,延缓了肥料释放速率,可以满足小麦中后期养分供应需求,进而提高成穗率<sup>[42]</sup>。

干物质积累是作物产量形成的物质基础,丛艳霞等<sup>[43]</sup>认为增强作物生育期内干物质的积累能力是提高籽粒产量的有效途径。氮素是影响作物干物质积累的重要因素,但是过量施氮会对作物生长带来很多不利影响。适量减氮对作物植株

的干物质积累具有促进作用,本研究中,减氮配施微生物菌肥处理( $N_{80} + BF$ )与单纯减氮( $N_{80}$ )相比能显著促进冬小麦成熟期干物质的积累。这可能是由于微生物菌肥中的活体微生物能够促进植株的新陈代谢,增加小麦的叶面积指数和光合速率,促进光合产物的积累及向穗部的分配,调控茎鞘物质的转运特性,从而有效提高小麦地上部干物质积累量<sup>[44]</sup>。

### 3.2 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物氮素积累及分配的影响

作物养分积累是其干物质积累的基础,是影响作物产量的重要因素,侯云鹏等<sup>[45]</sup>研究表明,玉米地上部氮、磷、钾养分积累与产量均存在显著或极显著正相关关系。在作物的生长发育过程中,植株内的养分处于不断的吸收、同化、转运和分配的动态中<sup>[46]</sup>。研究表明,在施氮量  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的基础上分别减氮 25%、50% 和 75% 时不仅可以提高玉米籽粒的氮素积累量,还能促进花前营养器官中氮素向籽粒的分配<sup>[47]</sup>。本研究中,常规施氮( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )基础上减氮 20% 对夏玉米吐丝期和成熟期植株氮素积累量没有显著影响,这与胡迎春等<sup>[37]</sup>的研究结论一致。许永胜等<sup>[48]</sup>认为施用生物菌肥可以促进燕麦成熟期植株对氮素的吸收,本研究中,与常规施氮相比,减氮配施微生物菌肥不仅不会影响冬小麦氮素积累量,与单纯减氮( $N_{80}$ )相比,还能有效提高冬小麦成熟期氮素积累量。说明微生物菌肥可弥补减氮对冬小麦氮素积累造成的负效应,分析可能是微生物菌肥中的固氮菌依赖植物根系分泌物生长和固氮,通过固氮作用为作物提供氮素<sup>[49]</sup>;或者微生物菌肥中的微生物可以通过合成或分解土壤中的有机质为作物提供氮素等养分<sup>[50]</sup>。

氮肥是作物高产稳产最基本的物质保证,但是过量施用氮肥使植株营养器官氮素代谢旺盛,不利于氮素向籽粒中的分配<sup>[51]</sup>,减少供氮可以促进营养体氮素再转运<sup>[47]</sup>。王士红等<sup>[52]</sup>在棉花试验上研究发现,施氮量过大导致植株生殖器官氮素分配比例下降,降低施氮量可以促进氮素的高效利用。本研究中,夏玉米和冬小麦成熟期植株各器官氮素含量及分配比例均以籽粒中最大,减氮不仅不会影响夏玉米各器官中的氮素含量,减氮配施微生物菌肥还有利于促进氮素向玉米籽粒中的分配。这是因为微生物菌肥肥效具有长效性且稳定的特点,有效协调了氮素在玉米花前和花

后植株中的分配,既能保持较高的转运量,也能满足玉米生育后期叶片正常的光合作用,保障玉米在生殖生长阶段仍保持较高的同化能力,进而提高籽粒中的氮素分配<sup>[47]</sup>。本研究还发现,冬小麦籽粒中氮素含量在配施生物炭和微生物菌肥中没有受到减氮的影响,说明减氮基础上通过配施生物炭和微生物菌肥可有效保证冬小麦籽粒氮素含量维持在较稳定的水平;减氮没有抑制氮素向冬小麦各器官中的分配,减氮下配施生物炭、缓释肥和微生物菌肥可在一定程度上促进氮素向小麦籽粒的分配,这可能是生物炭、缓释肥和微生物菌肥养分时效长,可以保持土壤养分供应能力,促进作物养分的吸收,有效协调氮素的积累和再转运<sup>[53-54]</sup>,有利于保持小麦成熟期籽粒同化物分配比例。

### 3.3 减氮下不同肥料配施对麦玉复种体系作物产量及氮素利用率的影响

玉米产量是通过果穗粗、穗长、穗粒数、百粒质量和收获指数等产量构成因素来体现的。马星竹等<sup>[55]</sup>认为适当减少氮肥施用量可以提高土壤速效养分含量和养分利用率,增加玉米籽粒产量。柳瑞等<sup>[17]</sup>在水稻试验中研究发现,氮肥减量 40% 的基础上配施生物炭较于常规施氮显著提高早稻产量 18.07%,而相较于单纯减氮显著增加早稻产量 14% 左右。也有研究表明,施用生物炭能够促进玉米地下部根系生长发育,延缓根系衰老,进而提高作物产量性状<sup>[56]</sup>。刘洪亮等<sup>[57]</sup>研究发现,与常规施肥相比,施用微生物肥处理显著提高棉花和番茄产量,增幅达 3.7%~10.9%。本研究中,常规施氮( $220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )基础上减氮 20% 不会降低夏玉米产量,这与李恩尧等<sup>[58]</sup>的研究结果一致,且与单纯减氮相比,减氮下配施生物炭、缓释肥和微生物菌肥均能在一定程度上增加夏玉米和冬小麦产量,其中在夏玉米中减氮配施生物炭处理表现最优,增产幅度为 8.3%,而在冬小麦中减氮配施微生物菌肥处理表现最佳,增产幅度为 16.2%。说明通过配施生物炭(夏玉米季)和微生物菌肥(冬小麦季)以达到氮肥减量具有可行性。其原因可能是生物炭提高土壤养分总含量,促进速效养分的供<sup>[59]</sup>,有效提高小麦叶面积指数,实现叶片光合产物转运到穗部,从而提高夏玉米产量;微生物菌肥具有保肥特性,可显著抑制土壤氮素流失和挥发,有效提高氮素利用率<sup>[60]</sup>,进而提高冬小麦产量。



适当减少氮肥施用量,有利于提高氮肥利用率和氮肥生理效率<sup>[61-62]</sup>,胡娟等<sup>[63]</sup>研究表明,在常规施肥(200 kg·hm<sup>-2</sup>)基础上减氮20%,并配施缓控释肥能够提高玉米的NAE、NfP、NupE、NHI和NUE。刘诗璇等<sup>[64]</sup>发现传统尿素与控释尿素以7:3或者5:5配施,均能提高NAE和NfP。窦露等<sup>[65]</sup>研究发现,与常规施肥相比,氮肥配施生物菌肥可以显著提高冬小麦的NAP、NfP以及RE。Ven等<sup>[66]</sup>认为生物炭的施用可以显著提高作物氮肥利用率,孟繁昊等<sup>[67]</sup>研究发现,施氮水平在150 kg·hm<sup>-2</sup>时配施生物炭,春玉米的产量可以达到峰值,并能显著提高作物氮肥利用率。本研究结果显示,减氮下3种配施处理(N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S和N<sub>80</sub>+BF)均能增加夏玉米和冬小麦氮农学利用率和氮肥偏生产力,其中夏玉米季中配施生物炭处理(N<sub>80</sub>+BC)表现最优,与常规施氮和单纯减氮相比氮农学利用率显著增加了43.3%~45.8%,氮肥偏生产力显著增加了28.9%~30.0%;而在冬小麦季中配施微生物菌肥处理(N<sub>80</sub>+BF)表现最佳,与常规施氮和单纯减氮相比氮农学利用率显著增加了31.2%~33.67%,氮肥偏生产力显著增加了16.2%~28.4%;N<sub>80</sub>+BC和N<sub>80</sub>+BF处理均能提高夏玉米和冬小麦氮肥表观回收率,且在夏玉米季中达到显著水平显著,二者较常规施氮显著增加了10.7%~18.1%,较单纯减氮显著增加了19.0%~26.9%。说明生物炭和微生物菌肥在氮肥减量中起到积极的增效作用,这是因为生物炭通过提高土壤团聚体稳定性来促进作物对土壤氮素养分的吸收<sup>[68]</sup>,加上生物炭具有独特的孔隙结构有利于改善紧密性土壤物理结构,促进土壤微生物繁殖,从而活化容易被固定的氮素养分<sup>[69-70]</sup>,进一步提高植株对作物氮素养分的吸收和利用;微生物菌肥通过固氮作用,将空气中的氮转化供植物体吸收利用<sup>[71]</sup>,加上微生物菌肥含有大量的活性有益微生物,能够帮助溶解土壤中的氮素养分,促进植株对氮素的吸收和利用<sup>[69,72]</sup>。本研究中,减氮下3种配施处理(N<sub>80</sub>+BC、N<sub>80</sub>+S和N<sub>80</sub>+BF)还能增加冬小麦氮素学利用率,其中减氮配施缓释肥处理达到显著水平,与常规施氮和单纯减氮相比显著增加了16.6%~21.9%,说明适量减氮配施缓释肥可提高冬小麦氮素利用率。

#### 4 结论

短期内减氮对夏玉米干物质及氮素积累无显

著影响,而减氮配施微生物菌肥(N<sub>80</sub>+BF)促进夏玉米氮素向籽粒中的分配,减氮配施生物炭(N<sub>80</sub>+BC)保证夏玉米产量和氮素利用效率(NAE、NfP、RE)处于最佳状态。减氮配施微生物菌肥(N<sub>80</sub>+BF)有效提高了冬小麦扬花期和成熟期分蘖数及茎蘖成穗率,增加了冬小麦成熟期干物质和氮素积累量,进而提高了冬小麦产量,且获得更高的氮素利用效率。综上所述,180 kg·hm<sup>-2</sup>配施生物炭(22 500 kg·hm<sup>-2</sup>)和180 kg·hm<sup>-2</sup>配施微生物菌肥(3 600 kg·hm<sup>-2</sup>)实现增产的同时节约氮肥资源,二者均可视为关中地区麦玉周年复种体系减氮增效的可行施肥模式。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 孙 剑. 变量施肥对玉米产量及土壤养分的影响[J]. 世界热带农业信息, 2022(1): 5-6.  
SUN J. Effects of variable fertilization on maize yield and soil nutrients[J]. *World Tropical Agricultural Information*, 2022(1): 5-6
- [2] 张维理, 徐爱国, 张认连, 等. 中国耕地保育技术创新不足已危及粮食安全与环境安全[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2374-2378.  
ZHANG W L, XU A G, ZHANG R L, et al. Shortage of innovative technology for arable land fertility management endangered food security and environmental safety in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2374-2378.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.  
ZAHNG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.  
CHANG Y L, LIU J M, LI Y H, et al. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong plain, Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 51-61.
- [5] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军. 关中平原农户冬小麦养分资源投入的调查与分析[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(6): 1135-1139.  
ZHAO H B, WANG ZH H, GAO Y J. Investigation and analysis on farmers' input of nutrient resources for winter wheat in Guanzhong Plain[J]. *Journal of Wheat Crops*, 2010, 30(6): 1135-1139.
- [6] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.  
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [7] JU X, XING G, CHEN X, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agri-

- cultural systems. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 1-6.
- [8] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6115-6123.  
YANG X L, LU Y L, TONG Y A, *et al.* Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6115-6123.
- [9] 田 筱,张龙芬,王高飞,等. 化肥减量配施生物炭对辣椒生长及养分吸收利用的影响[J]. *辣椒杂志*, 2022, 20(1): 12-17.  
TIAN X, ZHANG L F, WANG G F, *et al.* Effect of reduced fertilizer with supplementary biochar on growth and nutrient uptake and utilization of pepper [J]. *Journar of China Capsicum*, 2022, 20(1): 12-17.
- [10] JOHANNERS L, JOSE P D S, CHRISTOPH S, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin; fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [11] 袁金华,徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.  
YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 779-785.
- [12] 李帅霖,上官周平. 生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 8-15.  
LI SH L, SHANGGUAN ZH P. Effects of biochar on wheat yield under different water and nitrogen conditions [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 8-15.
- [13] 邱海燕,孙 娇,陈 刚,等. 生物炭对宁夏新垦地玉米产量及农艺性状的影响研究[J]. *宁夏农林科技*, 2017, 58(11): 27-30.  
QIU H Y, SUN Q, CHEN G, *et al.* Effects of biochar on yield and agronomic traits of maize in newly reclaimed land of Ningxia [J]. *Ningxia Journal of Agro-Forestry Science and Technology*, 2017, 58(11): 27-30.
- [14] 乔志刚,陈 琳,李恋卿,等. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(5): 175-180.  
QIAO ZH G, CHEN L, LI L Q, *et al.* Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 30(5): 175-180.
- [15] 柳 瑞, Hafeez Abdul, 李恩琳,等. 减氮配施稻秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2381-2389.  
LIU R, Hafeez Abdul, LI E L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer reduction and biochar application on paddy soil nutrient and nitrogen uptake of rice [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2381-2389.
- [16] 向 伟,王 雷,刘天奇,等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4634-4645.  
XIANG W, WANG L, LIU T Q, *et al.* Effects of biochar plus inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields [J]. *China Agricultural Science*, 2020, 53(22): 4634-4645.
- [17] 柳 瑞,高 阳,李恩琳,等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 926-932.  
LIU R, GAO Y, LI E L, *et al.* Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(5): 926-932.
- [18] KANETA Y A H M Y. The non-tillage rice culture by single application of fertilizer in a nursery box with controlled-release fertilizer [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1994, 65: 385-391.
- [19] 杨 峰,闫秋艳,鲁晋秀,等. 氮肥运筹对夏玉米产量、氮素利用率及土壤养分残留量的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(1): 171-178.  
YANG F, YAN Q Y, LU J X, *et al.* Effects of nitrogen application on summer maize yield, nutrient utilization efficiency and soil available nutrient residues [J]. *Journal of North China Agricultural Sciences*, 2017, 32(1): 171-178.
- [20] 鲁艳红,聂 军,廖育林,等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 155-161.  
LU Y H, NIE J, LIAO Y L, *et al.* Effects of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 155-161.
- [21] 徐明岗,李菊梅,李冬初,等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1010-1015.  
XU M G, LI J M, LI D CH, *et al.* Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(5): 1010-1015.
- [22] 唐控虎,徐培智,陈建生,等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 591-596.  
TANG SH H, XU P ZH, CHEN J SH, *et al.* Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2007, 13(4): 591-596.
- [23] 李若楠,王丽英,张彦才,等. 氮肥追施时期及包膜控释氮肥对冬小麦产量和氮素吸收的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 277-280.  
LI R N, WANG L Y, ZHANG Y C, *et al.* Effect of top-dressing time of nitrogen fertilizer and controlled-release coated urea on winter wheat yield and apparent nitrogen recovery rate [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2010, 18(2): 277-280.
- [24] 王 薇,李子双,赵同凯,等. 控释尿素减量施用对冬小麦和夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(5): 83-85.  
WANG W, LI Z SH, ZHAO T K, *et al.* Effects of decrea-

- sing controlled-release urea application rate on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat and summer-maize[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2016, 48(5): 83-85.
- [25] 常 凤,王海标,陶静静,等. 减氮配施控释尿素对冬小麦产量及氮肥效率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(25): 1-6.  
CHANG F, WANG H B, TAO J J, *et al.* Combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate affect yield and N utilization efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(25): 1-6.
- [26] 王 涛,乔卫花,李玉奇,等. 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 578-583.  
WANG T, QIAO W H, LI Y Q, *et al.* Effects of rotation and microbial fertilizer on soil physicochemical properties and biological activity of continuous cropping cucumber[J]. *Soil Notification*, 2011, 42(3): 578-583.
- [27] 高宏峰. 不同磷细菌肥对玉米生育期土壤养分及酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(6): 651-655.  
GAO H F. Effects of different phosphorus bacteria fertilizers on soil nutrients and enzyme activity in maize in growing period[J]. *Shanxi Agricultural Science*, 2012, 40(6): 651-655.
- [28] 王 涛,李 剑,覃 娟,等. 几种微生物菌剂处理下连作黄瓜的生长分析[J]. 北方园艺, 2010(18): 15-19.  
WANG T, LI J, TAN J, *et al.* Growth analysis of continuous cropping cucumber under several microbial agents[J]. *Northern Horticulture*, 2010(18): 15-19.
- [29] 闫飞扬,段廷玉,张 峰. 农业管理措施对 AM 真菌功能影响的研究进展[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2230-2241.  
YAN F Y, DUAN T Y, ZHANG F. Effects of agricultural managements on the function of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Grassland Science*, 2014, 31(12): 2230-2241.
- [30] 邓家礼,李红丽,李小龙,等. 生物菌剂对青枯病的防治效果研究[J]. 天津农业科学, 2015, 21(4): 117-119.  
DENG J L, LI H L, LI X L, *et al.* Effect of microbial agent on tobacco wilt[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2015, 21(4): 117-119.
- [31] 鲁 杰,刘宝忠,周传远,等. 生物有机菌肥对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(6): 146-150.  
LU J, LIU B ZH, ZHOU CH Y, *et al.* Effect of biological manure fertilizer on yield and quality of rice[J]. *China Agricultural Journal*, 2009, 25(6): 146-150.
- [32] 杨玉新,王纯立,谢志刚,等. 微生物肥对土壤微生物种群数量的影响[J]. 新疆农业科学, 2008(S1): 169-171.  
YANG Y X, WANG CH L, XIE ZH G, *et al.* The influence of the microbial fertilizer on microbial population density in soil[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2008(S1): 169-171.
- [33] 武杞蔓,张金梅,李玥莹,等. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(5): 221-230.  
WU Q M, ZHANG J M, LI Y Y, *et al.* Recent advances on the mechanism of beneficial microbial fertilizers in crops[J]. *Biotechnology Notification*, 2021, 37(5): 221-230.
- [34] MICHAELT R, TO L P, DANG K N, *et al.* Up to 52% N fertilizer replaced by biofertilizer in lowland rice via farmer participatory research[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(4): 857-868.
- [35] 杨国威,杨亚东,臧华栋,等. 半干旱区生物菌肥替代氮肥对裸燕麦生长和产量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 5-10.  
YANG G W, YANG Y D, ZANG H D, *et al.* Effects of biofertilizer substituting synthetic nitrogen fertilizer on growth and yield of naked oat in semi-arid area[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(1): 5-10.
- [36] 黄 鹏,何 甜,杜 娟. 配施生物菌肥及化肥减量对玉米水肥及光能利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 76-79.  
HUANG P, HE T, DU J. Effect on water, fertilizer and light use efficiency of maize under biological bacterial fertilizer and chemical fertilizer reduction[J]. *China Agricultural Journal*, 2011, 27(3): 76-79.
- [37] 胡迎春,韩云良,施成晓,等. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(7): 1068-1078.  
HU Y CH, HAN Y L, SHI CH X, *et al.* Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in loess plateau[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(7): 1068-1078.
- [38] 陈云梅. 减氮配施有机物料对玉米—白轮作系统作物产量、光合特性和产品品质的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4391-4400.  
CHEN Y M. Effects of nitrogen reduction combined with organic materials on crop yield, photosynthetic characteristics, and product quality of corn-cabbage rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4391-4400.
- [39] 张秋丽,陈 旭,周锋利,等. 不同施氮量及氮肥运筹对机条播小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 上海农业科技, 2017(2): 100-102.  
ZHANG Q L, CHEN X, ZHOU F L, *et al.* Effects of different nitrogen rates and nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of mechanized drilling wheat[J]. *Shanghai Agricultural*, 2017(2): 100-102.
- [40] 董云杰,呼延艺洁,王金平,等. 优化施肥对关中灌区冬小麦产量及氮肥利用的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(3): 270-278.  
DONG Y J, HUYAN Y J, WANG J P, *et al.* Effects of optimized fertilization on yield and nitrogen utilization of winter wheat in Guanzhong irrigation area[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(3): 270-278.
- [41] 孙利华,马晓燕,徐爱琴,等. 小麦施用生物菌肥试验[J]. 安徽农业科学, 2003(6): 1078-1079.  
SUN L H, MA X Y, XU A Q, *et al.* Experiment on application of bio-fertilizer in wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003(6): 1078-1079.
- [42] 阎世江,李照全,张治家. 固氮菌肥对小麦生长和产量的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 181-184.  
YAN SH J, LI ZH Q, ZHANG ZH J. Bacteria fertilizer on

- f wheat growth and yield[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(15): 181-184.
- [43] 丛艳霞, 赵明, 董志强, 等. 乙萘啉对春玉米干物质积累和茎秆形态的调控[J]. 作物杂志, 2008(4): 68-71.  
CONG Y X, ZHAO M, DONG ZH Q, et al. Regulation of yimei mixture on dry matter accumulation and stem morphology of spring maize [J]. *Journal of Crops*, 2008(4): 68-71.
- [44] 王春虎, 张胜利, 王俊平, 等. 不同浓度光合菌肥对小麦生长和产量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(16): 48-50.  
WANG CH H, ZHANG SH L, WANG J P, et al. Effects of different concentrations of photosynthetic bacteria fertilizer on growth and yield of wheat[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2011, 38(16): 48-50.
- [45] 王欣, 马俊祥, 滕泽宇, 等. 春玉米农艺性状及养分积累动态对水溶肥管理的响应[J]. 中国农学通报, 2022, 38(13): 13-19.  
WANG X, MA J X, TENG Z Y, et al. Responses of spring maize agronomic characters and nutrient accumulation dynamics to water-soluble fertilizer management [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(13): 13-19.
- [46] SCHILTZ S, MUUNIER-JOLAIN N, JEUDY C, et al. Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by <sup>15</sup>N in vivo labeling throughout seed filling. [J]. *Plant Physiology*, 2005, 137(4): 1463-1473
- [47] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 等. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3183-3197.  
WANG X M, LUO W H, LIU P ZH, et al. Regulation effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(15): 3183-3197.
- [48] 许永胜, 胡跃高, 曾昭海, 等. 施用生物菌肥对裸燕麦氮素积累和光合生理的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2586-2591.  
XU Y SH, HU Y G, ZENG SH H, et al. Effect of Bio-fertilizer on oat (*Avena sativa* L.) nitrogen accumulation and photosynthetic physiology [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(6): 2586-2591.
- [49] 沈世华, 荆玉祥. 中国生物固氮研究现状和展望[J]. 科学通报, 2003, 48(6): 535-540.  
SHEN SH H, JING Y X. Research status and prospect of biological nitrogen fixation in China [J]. *Scientific Instrument News*, 2003, 48(6): 535-540.
- [50] 段迪瀚, 刘情宇, 荣梦瑶, 等. 微生物菌肥的特点及其作用机制研究进展[J]. 农业技术与装备, 2022(8): 98-99.  
DUAN D H, LIU Q Y, RONG M Y, et al. Research progress on the characteristics and mechanism of microbial fertilizer [J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2022(8): 98-99.
- [51] 何萍, 金继运, 林葆. 不同氮磷钾用量下春玉米生物量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 123-130.  
HE P, JIN J Y, LIN B, et al. Study on biological yield and its components dynamic and nutrient absorption model of spring maize under different amount of nitrogen, phosphorus and potassium [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1998, 4(2): 123-130.
- [52] 王士红, 杨中旭, 史加亮, 等. 增密减氮对棉花干物质和氮素积累分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 395-407.  
WANG SH H, YANG ZH X, SHI J L, et al. Effects of increasing planting density and decreasing nitrogen rate on dry matter, nitrogen accumulation and distribution, and yield of cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 395-407.
- [53] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 829-838.  
HUANG Q Y, TANG SH H, ZHANG F B, et al. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 829-838.
- [54] 姜佰文, 董雯昕, 王春宏, 等. 减氮配施液体牛粪对寒地玉米花后期干物质积累和养分吸收转运规律的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(9): 29-38.  
JIANG B W, DONG W X, WANG CH H, et al. Effects of nitrogen reduction combined with liquid cattle manure on dry matter accumulation, nutrient absorption and translocation of maize in cold regions after anthesis [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(9): 29-38.
- [55] 马星竹, 郝小雨, 高中超, 等. 氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 131-135.  
MA X ZH, HAO X Y, GAO ZH CH, et al. Effects of nitrogen application rate on soil nutrient content, spring maize yield and agronomic efficiency [J]. *Maize Science*, 2016, 24(6): 131-135.
- [56] 蒋健, 王宏伟, 刘国玲, 等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 62-66.  
JIANG J, WANG H W, LIU G L, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in maize [J]. *Maize Science*, 2015, 23(4): 62-66.
- [57] 刘洪亮, 赵风梅, 黄琴. 微生物菌肥对作物产量和品质的影响[J]. 新疆农垦科技, 2005(3): 47-48.  
LIU H L, ZHAO F M, HUANG Q. Effect of microbial fertilizer on crop yield and quality [J]. *Xinjiang Agricultural Reclamation Technology*, 2005(3): 47-48.
- [58] 李恩尧, 邱亚群, 彭佩钦, 等. 洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 32-35.  
LI E Y, QIU Y Q, PENG P Q, et al. Effects of reducing nitrogen and controlling phosphorus on maize yield and runoff nitrogen and phosphorus in red soil slope land of dongting lake [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 32-35.
- [59] PENG X, YE L L, WANG C H, et al. Temperature and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.
- [60] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 等. 氮肥与移栽密度互作对低产

- 田水稻群体结构及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1319-1328.
- CHEN H F, FENG Y, CAI H M, *et al.* Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1319-1328.
- [61] 王成雨, 石玉华, 井跃博. 持续减量施氮对冬小麦土壤硝态氮含量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 642-647.
- WANG CH Y, SHI Y H, JING Y B. Effects of decreasing nitrogen inputs on nitrate-nitrogen in soil and nitrogen fertilizer use efficiency [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(6): 642-647.
- [62] 彭正萍, 刘亚男, 李迎春, 等. 持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 74-79.
- PENG ZH P, LIU Y N, LI Y CH, *et al.* Effects of continuous nitrogen regulation on nitrogen utilization and apparent loss in the rotation system wheat and maize [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 74-79.
- [63] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 116-120.
- HU J, WU J G, SUN J M, *et al.* Effects of combined application of nitrogen reduction and slow control fertilizer on soil nitrogen supply characteristics and maize yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 116-120.
- [64] 刘诗璇, 陈松岭, 蒋一飞, 等. 控释氮肥与普通氮肥配施对东北春玉米氮素利用及土壤养分有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 939-947.
- LIU SH X, CHEN S L, JIANG Y F, *et al.* Effect of controlled-release combined application with common nitrogen fertilizers for spring-maize on nitrogen fertilizer use efficiency and soil available nutrient in Northeast China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5): 939-947.
- [65] 窦露. 减氮优化施肥对黄土旱塬冬小麦产量及水肥利用的影响[D]. 山西太谷: 山西农业大学, 2019.
- DOU L. Effects of nitrogen reduction and optimized fertilization on winter wheat yield and water and fertilizer utilization in loess dryland [D]. Taigu Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [66] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, *et al.* Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [67] 孟繁昊, 于晓芳, 王志刚, 等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2020(1): 142-150.
- MENG F H, YU X F, WANG ZH G, *et al.* Effects of physical property of soil and yield of spring corn by combined application of biochar and Nitrogen [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020(1): 142-150.
- [68] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- SHANG J, GENG ZH CH, ZHAO J, *et al.* Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [69] 刘晓. 微生物菌肥在农业生产中的应用研究[J]. 河南农业, 2021(17): 14-15.
- LIU X. Application of microbial fertilizer in agricultural production [J]. *Henan Agriculture*, 2021(17): 14-15.
- [70] BERNARD F, FMJOHANNES L, KARSTEN K, *et al.* Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical ultisol under conventional hand-hoe tillage [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 190-197.
- [71] 成思轩, 于嘉欣, 肖析蒙, 等. 一种微生物菌肥对雷竹笋生长、土壤养分及微生物的影响[J]. 农学通报, 2021, 27(1): 106-109.
- CHENG S X, YU J X, XIAO X M, *et al.* Effects of a kind of bacterial fertilizer on the growth rate of bamboo shoots, soil nutrients and microorganisms [J]. *Anhui Agricultural Journal*, 2021, 27(1): 106-109.
- [72] WU S C, CAO Z H, LI Z G, *et al.* Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial [J]. *Geoderma*, 2005, 125(1/2): 155-166.

## Effects of Different Fertilizers on Nitrogen Accumulation and Distribution and Yield of Wheat-maize Multiple

Pubucangjue, WANG Jinping, YAO Liru, ZHU Yuanzheng,  
HE Zhengzheng and HAN Juan

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract** To explore the potential for reducing nitrogen fertilizer and improving efficiency in winter wheat-summer maize multiple cropping system in Guanzhong area of Shaanxi Province, and to establish a suitable crop nutrient management system, a field experiment was conducted to investigate the effects of nitrogen reduction combined with different fertilizers on crop growth, plant nitrogen accumulation and distribution, crop yield and nitrogen use efficiency in wheat-maize multiple cropping sys-

tem from 2018 to 2019. Five treatments were set as follows : conventional nitrogen application ( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $N_{100}$ ); nitrogen reduction 20% ( $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80}$ ); nitrogen reduction combined with biochar( $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , biochar  $22\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80} + \text{BC}$ ); nitrogen reduction combined with slow-release fertilizer( $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , urea slow-release fertilizer = 1 : 1,  $N_{80} + \text{S}$ ); nitrogen reduction combined with microbial fertilizer( $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , microbial fertilizer  $3\ 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $N_{80} + \text{BF}$ ). The results showed that nitrogen reduction and its combination with different fertilizers had no significant effect on plant height, dry matter and nitrogen accumulation of summer maize after large bell stage. The application of  $N_{80} + \text{BF}$  promoted the distribution of nitrogen in summer maize towards grain development, while  $N_{80} + \text{BC}$  increased the yield and harvest index of summer maize by 8.3% and 20.1%, respectively. Under nitrogen reductions, all three combined treatments increased Nitrogen Agronomic Efficiency (NAE) and Nitrogen Fertilizer Productivity (NFP) of summer maize.  $N_{80} + \text{BC}$  treatment exhibited the best performance, showing a significant increase of 43.3% and 29.0% compared to  $N_{100}$ , and a significant increase of 45.8% and 8.3% compared to  $N_{80}$ , in terms of NAE and NFP, respectively. Both  $N_{80} + \text{BC}$  and  $N_{80} + \text{BF}$  significantly increased Recovery Efficiency (RE) of summer maize, with a significant increase of 18.1% and 10.7% compared to  $N_{100}$ , and a significant increase of 26.9% and 19.0% compared with  $N_{80}$ . Compared to  $N_{80}$ ,  $N_{80} + \text{BF}$  effectively increased the tiller number, tiller spike rate, dry matter and nitrogen accumulation during flowering and maturity stages, and significantly increased the spike number and yield of winter wheat by 13.7% and 16.2%, respectively. The NAE, NFP and NUE of winter wheat were improved by the three treatments under nitrogen reduction. Among them, NAE and NFP  $N_{80} + \text{BF}$  treatment performed best, with a remarkable increase of 31.2% and 28.4%, respectively, compared with  $N_{100}$ , and these parameters increased by 33.7% and 16.2% when compared to the  $N_{80}$  treatment. NuE performed best in  $N_{80} + \text{S}$  treatment. In summary, in the treatment of nitrogen reduction and its combined application,  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  combined with biochar( $22\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  combined with microbial fertilizer ( $3\ 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) are more conducive to crop growth, promote nitrogen accumulation and distribution, improve crop yield and nitrogen utilization rate, and realize the ‘reduction and efficiency’ of nitrogen management in wheat-maize multiple cropping system in Guanzhong area.

**Key words** Summer maize and winter wheat; Nitrogen fertilizer reduction; Fertilizer application; Yield; Nitrogen use efficiency

**Received** 2022-12-15

**Returned** 2023-03-17

**Foundation item** Shaanxi Province Key R&D Plan(No. 2018ZDXM-NY-002).

**First author** Pubucangjue, female, master student. Research area: efficient farming system and crop cultivation technology in arid areas. E-mail: pbcj030065@163.com

**Corresponding author** HAN Juan, female, Ph. D, professor. Research area: efficient utilization of crop water and fertilizer in arid area. E-mail: hjepost@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)