

# 减氮配施有机肥对豫西旱区玉米产量及氮肥利用率的影响

吕梦<sup>1</sup>, 黄明<sup>1</sup>, 侯园泉<sup>1</sup>, 歹英豪<sup>1</sup>, 焦念元<sup>1</sup>, 尹飞<sup>1</sup>, 赵振欣<sup>2</sup>, 付国占<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学农学院/河南省旱地农业工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023

2. 河南省洛阳市孟津区农业技术推广服务中心, 河南 洛阳 471100)

**摘要:** 采用大田小区定位试验, 设5种施肥处理模式, 分别为不施氮肥(CK)、农户习惯施肥(CF)、减氮纯施化肥(R)、减氮配施20%有机肥(R<sub>20</sub>)和减氮配施40%有机肥(R<sub>40</sub>), 研究豫西半湿润偏旱地区冬小麦-夏玉米1年2熟区氮肥减量配施有机肥两年后对玉米干物质积累和分配、氮素积累和分配、产量和氮肥利用率的影响。结果表明, 施氮处理玉米干物质积累总量、氮素积累总量和子粒产量平均分别比对照增加17.07%、31.63%和36.61%。R<sub>20</sub>处理氮肥利用效率显著提高40.01%~60.63%, 氮肥农学效率显著提高35.86%~82.78%, 氮肥偏生产力显著提高5.14%~32.93%, 肥料贡献率显著提高24.10%~55.63%。因此, R<sub>20</sub>处理可实现玉米稳定增产, 是提高氮肥利用效率的合理施肥方法。

**关键词:** 玉米; 减氮施肥; 有机肥; 氮肥利用率

**中图分类号:** S513.062

**文献标识码:** A

## Effects of Nitrogen Reduction Combined with Organic Fertilizer Application on Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency in Western Henan Arid Region

LÜ Meng<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1</sup>, HOU Yuan-quan<sup>1</sup>, DAI Ying-hao<sup>1</sup>, JIAO Nian-yuan<sup>1</sup>,

YIN Fei<sup>1</sup>, ZHAO Zhen-xin<sup>2</sup>, FU Guo-zhan<sup>1</sup>

(1. School of Agriculture, Henan University of Science and Technology /

Henan Dry Land Agricultural Engineering Technology Research Center, Luoyang 471023;

2. Luoyang Mengjin Agricultural Technology Extension Service Center, Luoyang 471100, China)

**Abstract:** To determine the appropriate nitrogen management measures for winter wheat and summer maize double cropping in the semi-humid and semi-arid region of Western Henan, the field plot positioning test was adopted, and five fertilization treatment modes were set up, namely, no nitrogen fertilizer(CK); Farmers' habitual fertilization(CF); N reduction and pure application of chemical fertilizer(R); Reduce N and apply 20% organic fertilizer(R<sub>20</sub>); Reduce N and apply 40% organic fertilizer(R<sub>40</sub>). The effects of reduced N fertilizer combined with organic fertilizer on dry matter accumulation and distribution, N accumulation and distribution, yield and N use efficiency of maize were studied. The results showed that the dry matter accumulation, N accumulation and grain yield of Maize under N application treatment increased by 17.07%, 31.63% and 36.61%, respectively. R<sub>20</sub> treatment significantly increased N use efficiency by 40.01%~60.63%, N agronomic efficiency by 35.86%~82.78%, N partial productivity by 5.14%~32.93%, fertilizer contribution rate by 24.10%~55.63%. Therefore, R<sub>20</sub> treatment can achieve stable yield increase of maize under the conditions of this experiment, which is a reasonable fertilization method to improve nitrogen use efficiency.

**Key words:** Maize; Nitrogen fertilizer reduction; Organic fertilizer; Nitrogen use efficiency

录用日期: 2022-04-25

**基金项目:** 国家重点研发计划重点专项“河南多热少雨区小麦-玉米周年集约化丰产增效技术集成与示范”(2018YFD0300707)、国家重点研发计划重点专项“黄淮海南部小麦-玉米周年光热资源高效利用与水肥一体化均衡丰产增效关键技术研究与模式构建”(2017YFD0301101)

**作者简介:** 吕梦, 女, 硕士, 研究方向为作物栽培生理生态研究。E-mail: remylv@126.com

赵振欣和付国占为本文通信作者。E-mail: mjxjzw@163.com E-mail: gzfu@haust.edu.cn

肥料是作物的“粮食”,在作物生产中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>,施用化肥是农业增产最重要的措施之一<sup>[2]</sup>。化肥的过量使用,造成肥料利用率低、耕地质量下降、环境污染等问题,增加了我国粮食安全的风险<sup>[3,4]</sup>。如何合理施肥,在保证作物产量稳步提高的同时提高肥料利用效率,对保证粮食安全和绿色可持续发展具有重要意义。

围绕合理施肥和提高肥料利用效率,前人从施肥种类<sup>[5]</sup>、施肥数量<sup>[6]</sup>和施肥时期<sup>[7]</sup>等方面进行了大量研究。有研究表明,减少氮肥用量,作物产量未受到明显影响<sup>[8]</sup>,氮肥利用效率增加<sup>[9]</sup>。施用有机肥对土壤质量有益,可改善土壤孔隙度,增加土壤有机碳含量<sup>[10]</sup>,是实现化肥零增长和保持土壤肥力的重要途径之一<sup>[11,12]</sup>。有研究表明,单施有机肥会降低作物产量<sup>[13]</sup>,单施有机肥还存在肥效缓慢、对作物前期养分供应能力不足的弊端,因此单施有机肥无法满足作物生长需求,需要有机肥和化肥配合施用<sup>[14]</sup>。有机无机肥配施的方案可以使速效养分和有机养分实现优势互补,满足作物整个生育期养分供给,实现土壤肥力、作物产量、肥料利用率等方面的提升<sup>[15]</sup>。有机无机肥配施对试验年限、作物、气候、土壤和肥料替代比例的不同而存在显著差异<sup>[16]</sup>。

豫西黄土高原东部边缘半湿润区是河南省重要的偏干旱粮食生产区,种植方式以冬小麦-夏玉米1年2熟制为主。调查发现,这一地区存在过量施用氮肥并缺失有机肥的现象,这会造成肥料的大量浪费导致肥料利用率降低,氮的挥发和淋失还会造成大气和土壤的污染,并且土壤板结保肥能力差。本研究在豫西开展定点试验,研究定点两年后减氮配施有机肥对玉米干物质积累分配和转移、氮素积累分配和转移、氮肥利用率及产量的影响,以探明豫西旱地玉米种植区减氮配施有机肥的合理施肥方式,为黄土旱地的玉米稳产增产以及氮肥减施技术提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在河南省洛阳市孟津区白鹤镇沟口村进行,该地区属黄土高原东部边缘半湿润偏旱区,海拔362 m,年平均气温13.7℃,年均降水量为550~600 mm,年均积温5 046℃·d左右,平均无霜期为235 d左右。种植制度为补灌条件下的小麦-玉米两熟。试验地供试土壤为褐土,土壤理化性质,pH值为8.0,有机质12.1 g/kg,全氮1.05 g/kg,碱解氮95.2 mg/kg,有效磷23.5 mg/kg,速效钾123 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验于2018年10月小麦播种季开始,种植制度为冬小麦-夏玉米1年2熟。设5种施肥处理,分别为不施氮肥(CK);农户习惯施肥(CF),小麦季施肥量N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别为192、154.5、60 kg/hm<sup>2</sup>,玉米季施肥量N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别为210、50.4、84 kg/hm<sup>2</sup>(根据农户施肥调查结果确定);减氮纯施化肥(R),在CF处理的基础上氮肥减量20%<sup>[17,18]</sup>,小麦季施肥量N 153.6 kg/hm<sup>2</sup>,玉米季施肥量N 168 kg/hm<sup>2</sup>,磷钾肥用量不变;减氮配施20%有机肥(R<sub>20</sub>),在R处理基础上将20%氮肥用有机肥替代;减氮配施40%有机肥(R<sub>40</sub>),在R处理基础上将40%氮肥用有机肥替代。部分处理中磷和钾肥不足时用化学肥料补足。施用氮肥为尿素(含N 46.4%),磷肥为过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为氯化钾(含K<sub>2</sub>O 50%)。有机肥为启禾有机肥(有机质≥50%,N≥2%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥1.5%、K<sub>2</sub>O≥2.5%,有效活菌数≥0.2亿个/g)。不施氮肥处理除不施氮肥外,磷钾养分与减氮施肥处理相同。有机肥、磷肥、钾肥作为基肥一次施入,化肥氮小麦季70%基施、30%拔节期追施;玉米季40%为基肥、60%在玉米9~10展叶时追施。采取随机区组排列,3次重复,小区面积72 m<sup>2</sup>(10 m×7.2 m),其他田间管理同常规大田。供试玉米品种为中科四号,种植密度60 000株/hm<sup>2</sup>,2020年9月20日收获,进行相关指标测定分析。

### 1.3 测定项目与方法

每个小区选择代表性植株样,分为子粒、茎、叶、鞘和其他(其他为雄穗、苞叶和穗轴等混合样品)几个部分,将样品在105℃杀青,30 min后于70℃下烘干至恒重,计算各器官和植株干物质积累量,粉碎并过0.5 mm筛。采用硫酸-双氧水法消煮,凯氏定氮法进行测定各器官氮含量,计算氮积累量。

成熟期每个小区选择代表性植株,收获中间3行玉米,晒干脱粒称重,以含水量14%的重量折算小区产量。取代表性的30个穗进行考种,调查穗长、穗行数、穗粒数、行粒数和秃顶长,测定百粒重。相关计算公式参考文献[19]。

各器官氮素积累量=氮素含量×干物质质量;

氮素收获指数(NHI)=子粒氮素积累量/植株氮素积累量×100%;

氮素利用效率(NUE)=子粒产量/成熟期植株氮素积累量;

氮肥表观利用率(NRE)=(施氮区植株氮素积累量-不施氮区植株氮素积累量)/施氮量×100%;

氮肥农学效率(NAE)=(施氮区子粒产量-不施氮区子粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(NPFP)= 施氮区产量/施氮量;  
肥料氮贡献率(FCR)=(施氮产量-不施氮产量)/  
施氮产量×100%。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据计算,采用 Excel  
2010 和 Origin 8.5 进行图表制作,采用 SPSS 23.0 软  
件进行处理之间单因素方差分析(LSD), $P<0.05$  为差  
异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对夏玉米产量及其构成要素的 影响

施用氮肥能显著增加玉米穗长,降低秃尖长,提

高玉米穗粒数、粒重和子粒产量(表 1),处理 2 年后施  
氮处理穗粒数、百粒重和子粒产量平均分别比对照  
增加 16.84%、12.60% 和 36.61%。与农户习惯施肥  
处理相比,减氮纯施化肥处理玉米穗粒数、百粒重和  
产量增加,差异不显著。减氮配施 20% 有机肥处理  
穗粒数和百粒重进一步增加,穗粒数分别比农户习  
惯施肥处理和减氮纯施氮肥处理增加 0.94% 和  
0.78%,差异不显著;百粒重分别增加 9.13% 和  
7.81%,差异显著;子粒产量显著提高,分别比农户  
习惯施肥处理和减氮纯施氮肥处理增加 10.77% 和  
9.52%。减氮配施 40% 有机肥处理与农户习惯施肥  
处理和其他 2 个减氮处理相比,穗粒数、百粒重减  
少,产量显著下降。

表 1 不同处理对夏玉米产量和构成要素的影响

Table 1 Effects of different treatments on grain yield and its components of summer maize

处 理 Treatment	穗长(cm) Ear length	秃尖长(cm) Bald tip length	穗粒数(粒/穗) Grains per ear	百粒重(g) 100-grain weight	产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Grain yield
CK	15.86 b	0.35 a	428.10 c	28.67 c	7 128.23 d
CF	16.61 a	0.22 b	501.56 a	31.76 b	9 589.98 b
R	16.89 a	0.12 b	502.36 a	32.15 b	9 699.66 b
R <sub>20</sub>	16.92 a	0.11 b	506.26 a	34.66 a	10 622.76 a
R <sub>40</sub>	16.86 a	0.10 b	490.65 b	30.56 b	9 039.36 c

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。  
Note: Different lowercase letters after the numbers in the same column indicated significant differences at the 0.05 level. The same below.

### 2.2 不同施肥处理对夏玉米收获期植株干物质积 累与分配的影响

干物质积累量是作物子粒产量形成的物质基  
础。由表 2 可知,与不施氮相比,施用氮肥可以增加  
植株干物质积累,干物质积累总量平均提高 17.07%,  
子粒、鞘、叶、茎和其他平均分别提高 33.39%、  
3.15%、3.55%、2.21% 和 10.79%,以子粒的干物质质量  
增加最多。与农户习惯施肥处理相比,减氮纯施化  
肥处理茎、叶等营养器官干物质积累量及总干物质

积累量减少,且差异不显著,子粒的积累量增加  
2.09%,差异不显著。与减氮纯施化肥处理相比,减  
氮配施 20% 有机肥处理茎、叶和鞘干物质积累量分  
别增加 0.82%、1.93% 和 0.75%,且差异不显著,子粒  
干物质积累量显著增加 10.97%,最终总干物质积累  
量增加 5.99%,达显著水平;减氮配施 40% 有机肥处  
理与减氮配施 20% 有机肥处理相比,叶和鞘干物质  
积累量继续增加,分别增加 1.65% 和 0.99%。减氮  
配施 40% 有机肥处理子粒干物质积累量显著减少,

表 2 不同施肥处理对夏玉米收获期干物质积累与分配的影响

Table 2 Effects of different fertilizer treatments on dry matter accumulation  
and distribution of summer maize at maturity stage

处 理 Treatment	子 粒 Grain	鞘 Vaginae	叶 Leaf	茎 Stem	其 他 Others	总积累量 Total accumulation
CK	7 172.45 d	1 485.43 d	2 853.39 b	3 255.43 b	1 501.43 b	16 268.13 c
CF	9 264.11 b	1 570.17 a	2 950.21 a	3 373.78 a	1 715.22 a	18 873.49 b
R	9 457.82 b	1 507.04 c	2 902.58 a	3 304.72 a	1 652.73 a	18 824.89 b
R <sub>20</sub>	10 495.50 a	1 518.34 bc	2 958.71 a	3 331.67 a	1 647.86 a	19 952.08 a
R <sub>40</sub>	9 051.11 c	1 533.34 b	3 007.66 a	3 299.28 a	1 637.73 a	18 529.12 b

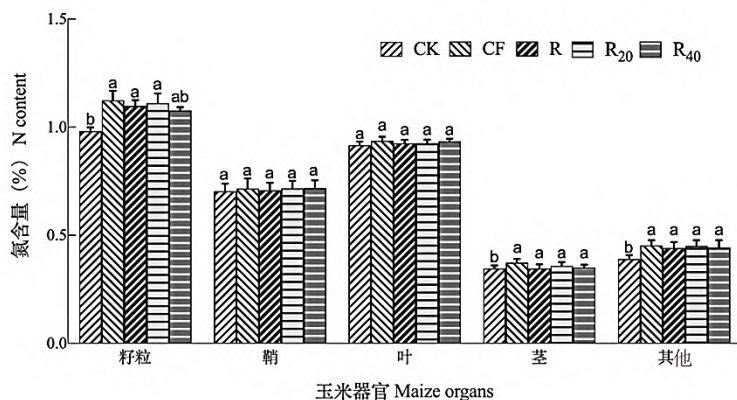


在所有施氮处理中最低,总干物质积累量也在所有施氮处理中最低。

### 2.3 不同施肥处理对夏玉米成熟期植株各器官氮含量的影响

由图1可以看出,成熟期夏玉米各器官氮含量以子粒最高,依次为叶、鞘、其他和茎。与不施氮处理相比,施用氮肥可增加植株氮含量,施氮处理子

粒、叶、鞘、其他和茎平均比对照处理分别提高12.50%、1.63%、2.14%、6.55%和2.14%,以子粒氮含量增加最多。与农户习惯施肥处理相比,减施氮肥处理子粒、叶、茎和其他的氮含量平均降低2.08%、0.71%、4.50%和3.62%。减氮配施20%有机肥处理较减氮纯施化肥处理和减氮配施40%有机肥的子粒氮含量增加0.91%和2.78%,差异不显著。



注:其他为雄穗、苞叶和穗轴等混合样品。图中不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Others indicate for the tassel, husks and cob and other mixed samples. Different lowercase letters indicate significant differences under various treatments in the same organ at  $P<0.05$ .

图1 不同施肥处理对夏玉米成熟期各器官氮含量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on nitrogen content in organs of summer maize at maturity stage

### 2.4 不同施肥处理对夏玉米成熟期植株各器官氮积累和分配的影响

由表3可知,施用氮肥可大幅度提高夏玉米各器官氮素积累量和总氮素积累量。施氮处理在子粒、鞘、叶、茎和其他器官的氮素积累量较不施氮肥处理平均分别提高49.95%、4.53%、5.47%、5.36%和27.11%,总积累量较不施氮肥处理提高31.63%。减氮纯施化肥处理与农户习惯施肥处理相比,各器官

及总氮氮积累量减少,差异不显著。减氮配施20%有机肥处理与减氮纯施化肥处理相比,各器官及总氮积累量增加,子粒和总氮积累量分别提高12.32%和9.00%,达显著水平;与减氮纯施化肥处理相比分别提高11.95%和6.85%,达显著水平。减氮配施40%有机肥处理除叶片氮积累量较高外,氮积累量减少,总氮积累量显著小于其他施氮处理。

表3 不同施肥处理对夏玉米成熟期植株氮积累的影响

Table 3 Effects of different fertilizer treatments on N accumulation of summer maize

kg/hm<sup>2</sup>

处 理 Treatment	子 粒 Grain	鞘 Vaginae	叶 Leaf	茎 Stem	其 他 Others	总积累量 Total accumulation
CK	70.37 c	10.45 a	26.16 a	11.25 a	5.84 b	124.06 d
CF	104.17 b	11.15 a	27.63 a	12.56 a	7.76 a	163.27 b
R	103.83 b	10.67 a	26.86 a	11.42 a	7.27 a	160.05 bc
R <sub>20</sub>	116.62 a	10.86 a	27.65 a	11.92 a	7.40 a	174.45 a
R <sub>40</sub>	97.45 b	11.01 a	28.21 a	11.51 a	7.26 a	155.43 c

### 2.5 不同施肥处理对夏玉米氮吸收利用效率的影响

由表4可知,与农户习惯施肥处理相比,减氮处

理氮素收获指数升高。减氮处理的氮素利用效率、氮肥利用效率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、肥料氮贡献率均高于农户习惯施肥处理,平均增加

1.95%、25.12%、35.07%、25.73%、4.60%。减氮配施20%有机肥处理相比减氮纯施化肥处理,氮素利用效率、氮肥利用效率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、肥料氮贡献率分别增加0.48%、40.01%、35.86%、5.14%、24.10%,其中,氮肥农学效率、氮肥利用效

率、氮肥偏生产力和肥料氮贡献率达到显著水平。减氮配施20%有机肥处理氮肥偏生产力最高,相比农户习惯施肥处理、减氮纯施化肥处理和减氮配施40%有机肥处理的氮肥偏生产力分别显著提高32.93%、5.14%和12.82%。

表4 不同施肥处理对夏玉米氮肥利用效率的影响  
Table 4 Effects of different fertilization treatments on nitrogen use efficiency of summer maize

处 理 Treatment	氮素收获指数 (%) NHI	氮素利用效率 (kg/kg) NUE	氮肥表观利用率 (%) NRE	氮肥农学效率 (kg/kg) NAE	氮肥偏生产力 (kg/kg) NPFP	肥料氮贡献率 (%) FCR
CK	0.57 b	57.46 b	—	—	—	—
CF	0.64 ab	58.74 ab	18.67 b	11.72 c	45.67 d	25.67 b
R	0.65 a	60.60 a	21.42 b	15.31 b	57.74 b	26.51 b
R <sub>20</sub>	0.67 a	60.89 a	29.99 a	20.80 a	60.71 a	32.90 a
R <sub>40</sub>	0.63 ab	58.16 b	18.67 b	11.38 c	53.81 c	21.14 c

3 结论与讨论

3.1 减氮配施有机肥对夏玉米干物质积累和产量的影响

本研究表明,施氮肥可提高夏玉米干物质积累并促进干物质向子粒的转运,子粒干物质含量和产量均显著升高<sup>[20,21]</sup>。减氮纯施化肥处理较农户处理干物质积累量下降,子粒干物质升高,产量提高,差异均不显著。赵亚南等<sup>[22]</sup>研究表明,适量减氮可提高干物质积累,进而增加产量。减氮配施20%有机肥显著提高产量、干物质积累量及子粒干物质积累量。刘占军等<sup>[23]</sup>研究表明,配施有机肥有利于延缓营养器官的衰老,提高生育后期光合产物的积累,干物质在子粒的分配比例和吐丝后干物质对子粒贡献率升高。氮肥减量配施40%有机肥会出现减产现象,因为有机肥的有机营养释放缓慢,显著降低玉米生育前期土壤中速效养分含量,进而降低了对玉米氮的供应<sup>[24]</sup>。在配施有机肥时,需要注意有机肥与化肥的配施比例,有机肥过多还易引起贪青晚熟现象,大量施用有机肥有费工费时的缺点<sup>[25]</sup>。

3.2 减氮配施有机肥对夏玉米氮素吸收和利用效率的影响

氮素在作物产量形成中起着关键作用,合理施肥是作物生产中获得较高目标产量的关键措施<sup>[26]</sup>。氮肥利用率低是我国面临的主要问题,可通过氮肥表观利用率、氮素利用效率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、肥料贡献率等多个指标来衡量氮肥利用率。本研究表明,减氮纯施化肥处理的氮肥利用率高于农户习惯施肥处理。刘学军等<sup>[27]</sup>研究表明,在

前茬高施氮量下减少氮肥用量有利于提高作物的氮肥利用率。减氮配施20%有机肥能够提高玉米的地上部氮素积累量并促进氮素向子粒的分配,子粒氮素积累量增加。施用有机肥能增加土壤养分含量,改善土壤的物理、化学及生物学性质,促进根系生长,有利于作物对氮素的吸收和利用。化肥肥效快、有机肥肥效缓慢,有机肥配施化肥可满足玉米整个生育期对氮素的需求,提高玉米对肥料氮的吸收利用,最终提高氮效率<sup>[28-30]</sup>。

因此,在黄土高原东部边缘豫西半湿润偏旱地区冬小麦-夏玉米两熟区保证夏玉米产量的同时,减氮至氮168 kg/hm<sup>2</sup>是可行的,氮肥利用效率增加,产量不下降。减氮配施20%有机肥能显著增加玉米穗粒数、粒重、干物质积累量和子粒产量,氮肥利用率也显著增加。

参考文献:

[1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.  
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)

[2] 闫 湘,金继运,何 萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.  
YAN X, JIN J Y, HE P, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 450-459. (in Chinese)

[3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[4] CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.

[5] 裴培欣,陈智勇,张阳阳,等. 不同类型肥料对潮土冬小麦产量和

- 品质及氮肥利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(8): 1023–1032.
- GOU P X, CHEN Z Y, ZHANG Y Y, et al. Effects of different fertilizers on yield, quality and nitrogen use efficiency of winter wheat in alluvial soil farmland[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(8): 1023–1032. (in Chinese)
- [6] 张 鹰, 曹国军, 耿玉辉, 等. 氮素调控对吉林省东部高产玉米氮素积累分配规律及产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 132–136, 142.
- ZHANG Y, CAO G J, GENG Y H, et al. Effects of nitrogen regulation on nitrogen accumulation distribution and yield of spring maize of eastern Jilin[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(1): 132–136, 142. (in Chinese)
- [7] 夏来坤, 陶洪斌, 许学彬, 等. 不同施氮时期对夏玉米干物质积累及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(5): 138–140.
- XIA L K, TAO H B, XU X B, et al. Effects of nitrogen application time on dry matter accumulation and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(5): 138–140. (in Chinese)
- [8] 易 琼, 张秀芝, 何 萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1069–1077.
- YI Q, ZHANG X Z, HE P, et al. Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(5): 1069–1077. (in Chinese)
- [9] 陈 磊, 宋书会, 云 鹏, 等. 连续三年减施氮肥对潮土玉米生长及根际土壤氮素供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1482–1494.
- CHEN L, SONG S H, YUN P, et al. Effects of reduced nitrogen fertilizer for three consecutive years on maize growth and rhizosphere nitrogen supply in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9): 1482–1494. (in Chinese)
- [10] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 165–180.
- [11] FAN M, SHEN J, YUAN L, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13–24.
- [12] RASMUSSEN P E, GOULDING K, BROWN J R, et al. Long-Term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change[J]. Science, 1998, 282(5390): 893–896.
- [13] CHIVENCE P, VANLAUWE B, SIX J. Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis[J]. Plant & Soil, 2011, 342(1–2): 1–30.
- [14] 张迎春, 颜建明, 李 静, 等. 生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 196–205.
- ZHANG Y C, XIE J M, LI J, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on asparagus lettuce and soil physical-chemical properties and microorganisms[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 196–205. (in Chinese)
- nese)
- [15] XÜ M G, LIU H B, HUANG S M, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 47–56.
- [16] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22–32.
- LÜ F L, HOU M M, ZHANG H T, et al. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat - summer maize rotation system in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 22–32. (in Chinese)
- [17] 蒋龙刚, 黄 明, 宋庆赞, 等. 基于土壤有机质含量推荐的旱地冬小麦施氮量研究[J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 2020–2023.
- JIANG L G, HUANG M, SONG Q Y, et al. Research on nitrogen fertilizer application recommended method based on soil organic matter in dryland wheat production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(10): 2020–2023. (in Chinese)
- [18] 张欣欣, 石 磊, 何 刚, 等. 陕西省粮食生产的减肥潜力及经济环境效益[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 4010–4023.
- ZHANG X X, SHI L, HE G, et al. Potential of fertilizer reduction and benefits of environment and economic for cereal crops production in Shaanxi province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 4010–4023. (in Chinese)
- [19] 于 飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物化肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311–1324.
- YU F, SHI W M. Analysis of nitrogen use efficiency of main grain crops in Mainland China in recent 10 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311–1324. (in Chinese)
- [20] 李青军, 张 炎, 胡 伟, 等. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 755–760.
- LI Q J, ZHANG Y, HU W, et al. Effects of nitrogen management on dry matter accumulation, nitrogen absorption and distribution and yield of maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(3): 755–760. (in Chinese)
- [21] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789–794.
- LIU E K, ZHAO B Q, HU C H, et al. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2007, 13(5): 789–794. (in Chinese)
- [22] 赵亚南, 宿敏敏, 吕 阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864–873.
- ZHAO Y N, SU M M, LÜ Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiency and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 864–873. (in Chinese)
- [23] 刘占军, 谢佳贵, 张 宽, 等. 不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 38–47.

- LIU Z J, XIE J G, ZHANG K, et al. Effects of different nitrogen fertilizer management on growth and nutrient absorption of Spring maize in Jilin province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 38–47. (in Chinese)
- [24] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 352–360.
- SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on rapeseed growth, micro-organism and enzyme activities in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 352–360. (in Chinese)
- [25] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1330–1338.
- LU W D, LI J H, LUO T, et al. Effects of different organic fertilizer replacement rates on wheat yield and soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1330–1338. (in Chinese)
- [26] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田化肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783–795.
- JÜ X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 783–795. (in Chinese)
- [27] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2004(3): 458–462.
- LIU X J, JÜ X T, ZHANG F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat–summer maize cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(3): 458–462. (in Chinese)
- [28] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3934–3943.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934–3943. (in Chinese)
- [29] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 281–287.
- HE H, ZHANG Y T, WEI C Z, et al. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 281–287. (in Chinese)
- [30] 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化肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1384–1394.
- 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): 1384–1394. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)