

## 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响

肖倩, 武升, 刘莹, 曹迟, 廖霞, 马友华

### 引用本文:

肖倩, 武升, 刘莹, 曹迟, 廖霞, 马友华. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2291–2300.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1271>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

#### 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

#### 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周慧, 史海滨, 徐昭, 郭珈玮, 付小军, 李正中

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1649–1656 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1406>

#### 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响

杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 闫颖, 刘鸣达, 谢桂先

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2443–2450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0416>

#### 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周炜, 孙国峰, 王鑫, 童红玉, 盛婧

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1743–1750 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1614>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖倩, 武升, 刘莹, 等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2291-2300.  
XIAO Q, WU S, LIU Y, et al. Effects of different combinations of organic nutrients and chemical fertilizers on wheat yield, nitrogen use efficiency, and soil fertility[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2291-2300.

# 不同有机养分替代化肥对小麦产量、 氮肥利用率及土壤肥力的影响

肖倩, 武升, 刘莹, 曹迟, 廖霞\*, 马友华

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:**为探究有机肥种类和替代比例对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响,通过田间小区试验,设置不施肥(CK),常规施肥(CN),优化减量施肥(ON),优化减量配施15%(ONL-15%)、30%(ONL-30%)和50%(ONL-50%)沼液氮,优化减量配施30%堆肥氮(ONC-30%),优化减量配施30%商品有机肥氮(ONS-30%)共8个处理。结果表明:与CN处理相比,ON、ONL-15%和ONL-30%处理均显著增加小麦籽粒产量和氮肥利用率,其中ONL-15%处理小麦产量最高,较CN和ON处理分别增产16.18%和14.08%,该处理下氮肥利用率也由CN处理的18.41%增至36.46%,表明优化减量配施15%沼液氮肥为减氮配施沼液最佳比例。在30%替代比例下,不同种类有机肥配施对小麦增产效果存在差异,与ON处理相比,沼液配施增加小麦产量和氮肥利用率,而堆肥和商品有机肥配施显著降低小麦产量。堆肥配施可以促进土壤全氮、水解性氮和有效磷的积累,商品有机肥配施对缓解土壤酸化、增加土壤有机质含量具有较好效果。有机无机配施处理减少32.60%~65.91%硝态氮在耕层土壤的残留,增加土壤有效氮含量。研究表明:堆肥和商品有机肥与化肥配施能培肥土壤;沼液与化肥配施通过促进土壤有效氮供应,提高氮肥利用率,从而增加小麦产量,在施氮量为 $165\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,以沼液替代15%化肥氮比例效果最佳。

**关键词:**有机肥;减量化肥;小麦产量;氮肥利用率;土壤肥力

中图分类号:S512.1;S141 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)10-2291-10 doi:10.11654/jaes.2022-1271

## Effects of different combinations of organic nutrients and chemical fertilizers on wheat yield, nitrogen use efficiency, and soil fertility

XIAO Qian, WU Sheng, LIU Ying, CAO Chi, LIAO Xia\*, MA Youhua

(Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control in Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** The effects of organic fertilizer types and substitution proportions on wheat yield, N use efficiency, and soil fertility were investigated. A field experiment was designed with the following treatments: no fertilization (CK), conventional fertilization (CN), optimized reduced fertilizer (ON), partial replacement of optimized chemical fertilizer by 15% (ONL-15%), 30% (ONL-30%) and 50% (ONL-50%) biogas slurry nitrogen, partial replacement of optimized chemical fertilizer by 30% compost nitrogen (ONC-30%) and 30% commercial organic fertilizer nitrogen (ONS-30%). The results showed that, compared with CN treatment, ON, ONL-15%, and ONL-30% treatments significantly increased wheat grain yield and fertilizer N use efficiency (NUE). Among them, the wheat yield of plots treated with ONL-15% was the highest, showing an increase of 16.18% compared to CN treated plots and 14.08% compared to the ON plots. The fertilizer

收稿日期:2022-12-15 录用日期:2023-03-28

作者简介:肖倩(1998—),女,安徽广德人,硕士研究生,从事有机养分与面源污染研究。E-mail:xqian1018@163.com

\*通信作者:廖霞 E-mail:xliao@ahau.edu.cn

基金项目:农业农村部全国绿色种养循环农业试点项目(202110);安徽农业大学自然科学基金项目(K2152002)

**Project supported:** National Pilot Project of Green Planting and Recycling Agriculture, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (202110); Natural Science Youth Fund Project, Anhui Agricultural University (K2152002)

NUE of the ONL-15% treatment also increased from 18.41% under the CN treatment to 36.46%, indicating that the 15% biogas slurry replacement proportion was the optimal proportion for fertilizer reduction. Under 30% substitution proportion, the effect of organic fertilizer on wheat yield varied with their types. Compared with ON treatment, biogas slurry combined application increased wheat yield and NUE, and compost and commercial organic fertilizer significantly reduced wheat yield. Compost combined application was found to promote the accumulation of soil total N, hydrolysable N, and available P, and commercial organic fertilizer effectively alleviated soil acidification and increased soil organic matter content. Combined application of organic and inorganic fertilizer reduced by 32.60% to 65.91% the nitrate nitrogen residue in topsoil and increased soil available nitrogen content. In conclusion, combined application of organic and inorganic fertilization significantly improved soil fertility; at an application rate of N 165 kg·hm<sup>-2</sup>, biogas slurry with chemical fertilizer was shown to maintain high yield, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency of the wheat crop. The optimal substitution proportion of biogas slurry to reduced fertilizer was 15%.

**Keywords:** organic fertilizer; reduced chemical fertilizer; wheat yield; nitrogen use efficiency; soil fertility

自20世纪50年代以来,化肥因肥效迅速、增产显著、施用方便等特点迅速成为农业生产的主导肥源<sup>[1]</sup>。我国化肥施用量占世界31%,每公顷化肥用量是世界平均用量的4倍,超出国际公认安全线2倍左右<sup>[2]</sup>。安徽省作为全国重要小麦种植基地及小麦外调重点省份之一,在确保粮食生产的同时,化肥大量投入是该地区农业生产的显著特点。据统计,安徽省化肥施用量从2001年的2.62×10<sup>6</sup> t增加至2020年的2.90×10<sup>6</sup> t,单位面积作物化肥施用量高达349.8 kg·hm<sup>-2</sup>,超出定额标准5.8%<sup>[3]</sup>。过量施用化肥不仅对作物增产效果不显著,而且还会导致土壤酸化、肥力降低、环境污染等问题<sup>[4]</sup>。

近年来,随着畜禽养殖业专业化、规模化、集约化的迅速发展,农业面源污染问题日益突出。截至2016年底,我国畜禽粪便排泄量达到2.38×10<sup>9</sup> t,约为工业废弃物年排放量的2.4倍<sup>[5]</sup>。2020年巢湖流域全年生猪、蛋禽、肉禽、牛和羊的规模养殖比例已经分别达到37.44%、16.27%、37.80%、2.51%和5.98%,畜禽粪便排泄量达1.08×10<sup>9</sup> kg<sup>[6]</sup>。畜禽粪便大量排放造成耕地负担日益严重,已成为我国农业面源污染的主要来源。据统计,我国每年约产生200亿t养殖废水,其中80%以上的养殖场污水未经处理直接排放。未经处理的污水携带有大量的病原微生物和重金属,造成水体污染、土壤污染、空气污染,严重威胁人类健康<sup>[7-8]</sup>。

畜禽粪便含有丰富的有机物质和作物生长所需的N、P、K及中微量元素,经过无害化处理,可转换为优质肥料、饲料或能源。然而,与化肥相比,有机肥养分含量低、肥效缓慢,单独施用不能满足作物生长需求。根据科学施肥原则,从源头减少化肥用量,将畜禽粪便废弃物肥料化,作为有机养分与化肥配合施入

农田,进行循环利用是建立绿色农业发展的主要途径。大量研究表明,有机肥与无机肥配施在促进作物高产稳产、培肥土壤、改善农田生态环境等方面效果显著<sup>[9-10]</sup>。张然等<sup>[11]</sup>研究认为有机无机肥配施较单施化肥能显著增加冬小麦产量,5 a内产量平均提高13%,同时可以降低0~40 cm土壤容重。赵吉霞等<sup>[12]</sup>对云南红壤坡耕地的研究发现,有机肥等氮替代30%化肥处理的玉米籽粒产量和秸秆产量达到最高。王秋君等<sup>[13]</sup>发现猪粪、菜籽和中药渣3种堆肥具有“缓释剂”和“增效剂”的作用,其可通过阳离子交换作用与化肥形成有机无机复合体,使得小麦的氮素利用率显著增加。长期配施有机肥还能降低土壤容重并增加土壤有效养分,增强土壤肥力<sup>[14]</sup>。

有机肥与无机肥配合施用对作物和土壤的影响,取决于有机肥种类、替代比例、土壤质地、耕作制度、气候因素以及试验周期等因素。因此,在特定地区开展不同有机肥种类与无机肥配施最佳比例的研究,对于培肥土壤、提高氮肥利用率具有重要意义。本研究采用沼液、堆肥和商品有机肥3种有机肥与化肥配施,设计15%、30%和50%3种等氮替代比例,探究化肥减氮配施有机肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响,明确巢湖流域稻麦轮作土壤有机无机配施在小麦上的最适种类和最佳比例,探索适宜皖中地区的合理培肥模式,以期高效绿色生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验地概况

试验地点位于安徽省合肥市庐江县郭河镇广寒村(31°29′06″N, 117°12′15″E),该地属于亚热带季风气候区,年平均气温为15.9℃,平均降水量为1 262.9 mm,

年均蒸发量为 1 648.9 mm, 年均日照时数为 1 794.3 h, 年无霜期为 301 d。

### 1.1.2 供试土壤

供试土壤类型为河流冲积物发育的潮土, 土壤质地为壤土(砂粒 53%、黏粒 11%、粉粒 36%), 前茬作物为水稻, 0~20 cm 土壤基本理化性质如下: 土壤容重为  $0.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , pH 值为 5.77, 有机质含量为  $25.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 铵态氮  $14.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 硝态氮  $3.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 水解性氮  $141.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $46.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $126.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.1.3 供试肥料

供试化肥为尿素( $\text{N} \geq 46.4\%$ )、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 44\%$ )和氯化钾( $\text{K}_2\text{O} \geq 60\%$ )。供试有机肥包括沼液、堆肥、商品有机肥。沼液原料由猪粪尿发酵得到, 堆肥原料由猪粪在好氧条件下堆制得到, 均由安徽省合肥市庐江县姚和坤养殖场提供; 商品有机肥以鸡粪、鸭粪和秸秆为主料, 以蘑菇菌棒为辅料, 通过好氧堆肥, 后续添加有益菌剂二次发酵而成, 由安徽祥丰肥业有限公司提供。供试有机肥具体性质列于表 1。

### 1.1.4 供试小麦品种

供试小麦品种为扬麦 25, 生育期为 202 d 左右,

行距 25 cm, 播种量为  $337 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 1.2 试验设计

试验设置 8 个处理: 不施肥(CK)、常规施肥(CN)、优化减量施肥(ON)、优化减量配施 15% 沼液氮(ONL-15%)、优化减量配施 30% 沼液氮(ONL-30%)、优化减量配施 50% 沼液氮(ONL-50%)、优化减量配施 30% 堆肥氮(ONC-30%)、优化减量配施 30% 商品有机肥氮(ONS-30%)。CN 处理为当地农户习惯施肥量, ON 处理在常规施肥的基础上减少 8.3% 的氮肥投入和 22.2% 的钾肥投入, 各配施处理以 ON 处理氮肥施用量为参照, 以等氮施用为基础, 依据替代比例及沼液、堆肥和商品有机肥氮含量确定其用量。每个处理 3 次重复, 小区面积为  $30 \text{ m}^2$  ( $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ), 采用随机区组设计排列。各处理养分施用量列于表 2。尿素分为基肥和追肥两次施入(基肥 60%+追肥 40%), 沼液、堆肥和商品有机肥作为基肥施用, 施肥方式为人工撒施, 2021 年 11 月 17 日施入基肥后翻耕土壤, 翻耕深度为 15 cm, 磷肥和钾肥以过磷酸钙和氯化钾补足; 2022 年 2 月 28 日追肥, 追肥方式为人工撒施后浇水。其他田间管理措施与当地常规措施保持一致。小麦生长期为 2021 年 11 月 17 日至 2022 年 5 月 27 日。

表 1 供试有机肥养分含量

Table 1 Nutrient content of the tested organic fertilizers

有机肥 Organic fertilizer	N/%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	K <sub>2</sub> O/%	有机质 Organic matter/%	pH(H <sub>2</sub> O)	含水率 Moisture content/%
沼液 Biogas slurry	0.09	0.08	0.04	1.82	7.4	99.32
堆肥 Compost	0.50	1.35	0.45	30.60	8.3	25.66
商品有机肥 Commercial organic fertilizers	2.50	5.00	3.20	79.00	6.7	23.00

注: 养分含量以干基计。

Note: Nutrient content based on dry sample.

表 2 不同处理施肥类型和施肥量

Table 2 Fertilizer type and amount of different treatments

处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer/(kg·hm <sup>-2</sup> )				追肥 Supplement fertilizer/(kg·hm <sup>-2</sup> )		折合纯养分 Converted to pure nutrients/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Superphosphate	氯化钾 Potassium chloride	尿素 Urea		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	0	0	0	0	0		0	0	0
CN	0	233	205	225	155		180	90	135
ON	0	213	205	175	142		165	90	105
ONL-15%	27 500	181	155	157	142		165	90	105
ONL-30%	55 000	149	105	138	142		165	90	105
ONL-50%	91 667	107	38	114	142		165	90	105
ONC-30%	9 900	149	0	101	142		165	90	105
ONS-30%	1 980	149	0	69	142		165	90	105

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤样品采集与测定

本试验于2021年10月13日小麦播种前和2022年5月27日小麦收获后采集土壤样品,每个小区采用五点法采集0~20 cm耕层土样,各点土样充分混匀后作为一个土壤样品,土样于4℃下进行低温保存。pH值采用电位法测定(土水比1:2.5);有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;铵态氮、硝态氮含量采用2 mol·L<sup>-1</sup> KCl浸提,过滤后在流动分析仪上测定;水解性氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量用火焰光度法测定。

#### 1.3.2 植株样品采集与测定

于小麦成熟期进行收获测产,收获前每个小区取1个1 m双行的小麦植株样品测定小麦株高、穗粒数、千粒质量,脱粒后将样品按秸秆和籽粒分开粉碎后用于籽粒和秸秆的养分含量分析,全氮含量用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消化-凯氏法测定。

#### 1.3.3 小麦产量测定

小麦成熟后,每个小区实行单打、单收、单计产,分别收集每个小区的籽粒和秸秆称质量,并取部分具有代表性的样品于60℃烘干至恒质量后计算含水量,按烘干质量换算成小麦籽粒产量和地上部生物量。

### 1.4 计算公式

植株地上部吸氮量(kg·hm<sup>-2</sup>)=籽粒产量(kg·hm<sup>-2</sup>)×籽粒含氮量(%) + 秸秆产量(kg·hm<sup>-2</sup>)×秸秆含氮量(%)

氮肥利用率=[施肥处理作物地上部吸氮量(kg·hm<sup>-2</sup>) - 对照处理作物地上部吸氮量(kg·hm<sup>-2</sup>)]/施肥量(kg·hm<sup>-2</sup>)×100%

氮肥利用率是指施入的氮肥被作物吸收利用的百分率,施氮量中包含化肥和有机肥的氮量。

### 1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2019进行数据计算,SPSS 17.0进行处理之间单因素方差分析(LSD),*P*<0.05为差异显著,Origin 8.5进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对小麦籽粒产量和秸秆产量及产量构成的影响

不同施肥处理下小麦籽粒产量与秸秆产量的变化规律基本一致(表3)。施肥处理小麦籽粒产量为3 543.88~5 244.74 kg·hm<sup>-2</sup>,秸秆产量为2 705.00~3 701.21 kg·hm<sup>-2</sup>,与CK相比,各施肥处理显著增加小麦籽粒产量和秸秆产量,增幅分别为30.17%~92.65%和37.14%~87.65%;其中,ONL-15%处理下的小麦籽粒产量和秸秆产量均达到最大值,分别为5 244.74 kg·hm<sup>-2</sup>和3 701.21 kg·hm<sup>-2</sup>。与CN处理相比,沼液氮替代处理中,ONL-15%和ONL-30%处理能增加小麦籽粒产量和秸秆产量,增幅分别为16.18%、12.85%和2.03%、6.30%,ONL-50%处理对小麦秸秆产量无显著影响,但降低了小麦籽粒产量,降幅为1.83%。在优化减量施肥的基础上,随着沼液氮替代比例的增加,小麦籽粒和秸秆产量呈现降低的趋势(ONL-15%>ONL-30%>ONL-50%)。其中,与ON处理相比,ONL-15%处理显著增加小麦籽粒产量和秸秆产量,增幅分别为14.08%和11.46%,ONL-30%处理对小麦籽粒产量和秸秆产量无显著影响,而ONL-50%处理显著降低小麦籽粒产量,降幅为3.61%。当有机肥替代30%化肥氮时,ONC-30%和ONS-30%处理显著降低小麦籽粒

表3 不同施肥处理对小麦株高、产量及产量构成的影响

Table 3 Effects of different fertilization practices on plant height, yield and the yield components of wheat

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	穗粒数 Number of grains per ear/粒	千粒质量 1000-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	秸秆产量 Straw yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	53.74±1.03c	20.44±0.69b	40.04±0.54c	2 722.41±4.50g	1 972.38±127.47d
CN	67.17±2.19ab	34.78±8.04a	43.21±0.52b	4 514.45±17.59c	3 279.67±205.61b
ON	67.00±1.10ab	31.33±8.72a	45.34±0.40a	4 597.45±4.23b	3 320.76±310.01b
ONL-15%	68.24±1.24a	38.67±4.37a	45.76±0.87a	5 244.74±11.88a	3 701.21±99.49a
ONL-30%	68.18±2.80a	34.11±4.14a	42.76±0.19b	4 606.11±17.38b	3 486.19±37.39ab
ONL-50%	65.54±1.24ab	34.89±3.56a	42.55±0.93b	4 431.65±13.21d	3 368.19±92.80b
ONC-30%	66.53±1.76ab	29.44±1.39ab	39.83±0.36c	3 661.83±32.08e	2 705.00±222.82c
ONS-30%	63.70±2.36b	31.00±6.69a	40.31±0.27c	3 543.88±8.49f	2 981.46±108.70c

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同字母表示处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。

Note: Means ± standard deviation. Different letters within the column indicate significant different among treatments (*P*<0.05). The same below.

产量,籽粒产量较CN处理分别降低18.89%和21.50%,较ON处理分别降低20.35%和22.92%;ONL-30%处理对小麦的增产效果显著,较ONC-30%和ONS-30%相比,小麦籽粒产量分别增加25.79%和29.97%,秸秆产量分别增加28.88%和16.93%。

小麦株高及产量组成指标的影响结果显示(表3),与CN相比,ON处理能显著增加小麦千粒质量,增幅为4.94%,但对小麦株高和穗粒数无显著影响。随沼液氮替代比例的增加,小麦株高和千粒质量呈逐渐下降趋势。ONL-15%处理小麦株高、穗粒数和千粒质量均达到最大值,但与ON处理之间无显著差异。当有机氮替代比例相同时,与ON处理相比,ONL-30%处理增加小麦株高和穗粒数,增幅分别为1.75%和8.87%,而ONC-30%和ONS-30%处理小麦穗粒数分别降低6.03%和1.06%,千粒质量分别降低12.16%和11.11%。

## 2.2 不同处理对小麦氮吸收量和氮肥利用率的影响

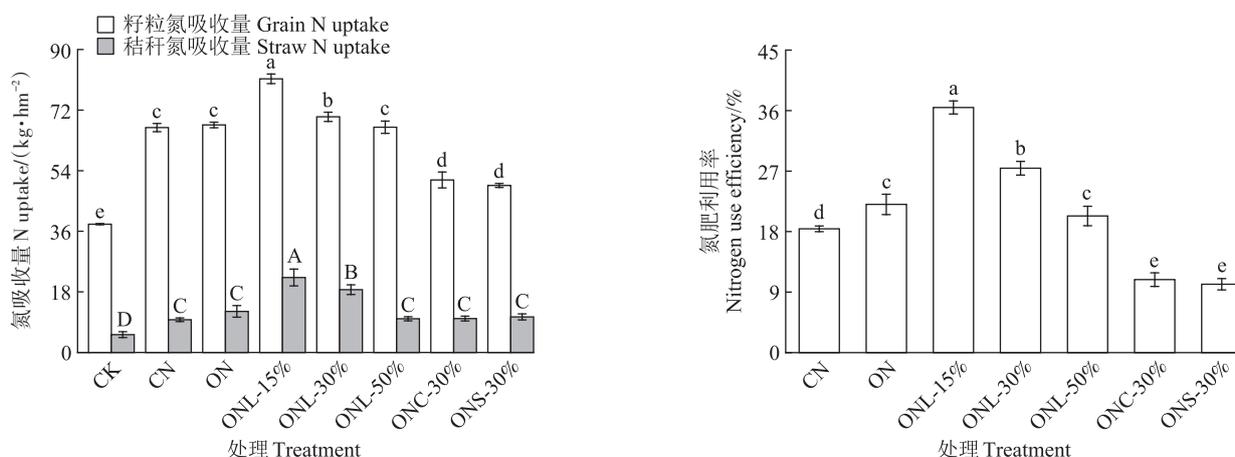
不同处理小麦氮吸收量和利用率的结果显示(图1),CN处理的小麦籽粒和秸秆氮吸收量分别为66.82 kg·hm<sup>-2</sup>和9.72 kg·hm<sup>-2</sup>,ON处理对小麦籽粒和秸秆氮吸收量无显著影响。在3个沼液氮替代化肥氮处理中,小麦籽粒和秸秆氮吸收量随配施比例的增加呈现递减的趋势,最大值为ONL-15%处理。与ON处理相比,ONL-15%和ONL-30%处理小麦籽粒氮吸收量分别增加20.29%和3.59%,ONL-50%处理则降低小麦秸秆氮吸收量,降幅为17.93%。在30%有机氮替代比例下,与CN处理相比,ONC-30%和ONS-30%处理显著降低小麦籽粒氮吸收量,降幅分别为

23.30%和25.75%,但对小麦秸秆氮吸收量无显著影响。ONL-30%处理显著增加小麦籽粒氮吸收量,与ONC-30%和ONS-30%处理相比,分别增加36.60%和41.11%。施肥处理小麦氮肥利用率为10.17%~36.46%。与CN处理相比,ON处理显著增加氮肥利用率,增幅为19.79%。在各有机氮替代处理中,ONL-15%处理氮肥利用率最高,ONL-30%处理次之,较ON处理分别显著提高65.35%和24.39%。与ON处理相比,ONC-30%和ONS-30%处理氮肥利用率显著降低,降幅分别为50.77%和53.89%。

## 2.3 不同处理对土壤理化性质的影响

由表4可知,有机肥与化肥配施处理降低了土壤容重,与ON处理相比降幅为1.08%~5.78%。CN和ON处理的土壤pH值分别为4.83和4.81,而有机肥与化肥配施各处理的土壤pH值为5.17~5.38,与CN处理相比,有机肥与化肥配施处理的土壤pH值提高了0.34~0.55个单位。有机肥配施化肥能增加土壤有机质含量,与CN处理相比,增幅为4.35%~28.05%,且随有机肥替代比例的增加而增加。与CN处理相比,ONL-15%处理增加了土壤有机质、有效磷和速效钾含量;ONC-30%处理土壤全氮(表5)和有效磷含量最高,分别为1.42 g·kg<sup>-1</sup>和17.37 mg·kg<sup>-1</sup>,较ON处理显著增加。除ONS-30%处理外,其余有机氮替代处理的土壤速效钾含量较ON显著增加28.87%~44.85%。

与CN处理相比,有机肥替代化肥处理均增加土壤水解性氮含量,增幅为1.31%~27.20%。在沼液氮替代处理下,土壤水解性氮含量随替代比例的增加而



不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Different letters indicate significant difference among treatments at  $P<0.05$ .

图1 不同施肥处理对小麦氮吸收量和氮肥利用率的影响

Figure 1 Effects of different fertilization practices on wheat N uptake and N use efficiency

表4 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of different fertilization practices on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/(mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	1.03±0.04a	5.40±0.12a	15.10±1.05c	9.57±0.49b	103.33±7.64b
CN	1.01±0.05a	4.83±0.17b	16.87±1.18bc	10.63±1.04b	124.67±21.46b
ON	1.03±0.11a	4.81±0.17b	17.13±2.63bc	10.17±1.27b	129.33±25.40b
ONL-15%	1.02±0.01a	5.37±0.06a	17.60±0.20bc	11.17±1.46b	170.00±10.00a
ONL-30%	0.97±0.16a	5.17±0.08a	18.23±1.84b	11.90±1.00b	187.33±23.69a
ONL-50%	0.98±0.04a	5.20±0.17a	18.43±1.04b	11.63±1.89b	166.67±25.66a
ONC-30%	0.99±0.05a	5.22±0.07a	21.53±1.14a	17.37±1.42a	168.16±8.91a
ONS-30%	1.01±0.07a	5.38±0.11a	21.60±1.00a	9.87±0.46b	119.41±5.54b

表5 不同施肥处理对土壤氮素含量的影响

Table 5 Effects of different fertilization practices on soil nitrogen content

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/(g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg·kg <sup>-1</sup> )	水解性氮 Hydrolysable nitrogen/(mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	0.95±0.04d	8.36±2.10a	0.48±0.15c	106.57±8.76b
CN	1.11±0.08c	9.24±3.11a	1.56±0.53a	109.67±6.43b
ON	1.11±0.04c	9.19±6.51a	1.15±0.32ab	102.80±13.10b
ONL-15%	1.14±0.04c	10.07±7.40a	1.05±0.32b	139.50±13.50a
ONL-30%	1.27±0.04b	8.83±1.97a	0.86±0.07bc	133.00±16.00a
ONL-50%	1.21±0.07bc	6.42±3.54a	0.83±0.06bc	122.00±11.79ab
ONC-30%	1.42±0.08a	6.13±0.32a	0.55±0.02c	135.35±7.17a
ONS-30%	1.41±0.07a	7.18±0.33a	0.53±0.04c	111.11±5.15b

降低,其中 ONL-15% 处理水解性氮含量最高,为 139.50 mg·kg<sup>-1</sup>,较 ON 处理相比显著增加 35.70%。当有机肥替代比例为 30% 时,ONC-30% 处理水解性氮含量最高,为 135.35 mg·kg<sup>-1</sup>,较 ON 相比显著增加 31.66%,与 ONS-30% 处理相比显著增加 21.82%。ONL-15% 处理土壤铵态氮含量较 CN 和 ON 处理分别增加 8.95% 和 9.58%,各处理之间铵态氮含量无显著差异。与 CN 处理相比,ON 处理硝态氮含量降低 26.57%,二者差异未达到显著水平,但在优化减量施肥基础上配施有机肥能显著降低 32.60%~65.91% 的土壤硝态氮含量,且土壤硝态氮含量随沼液氮替代比例的增加整体呈递减趋势。在 30% 有机氮替代比例下,ONS-30% 处理土壤硝态氮含量最低,较 CN 处理显著降低 65.91%。

### 3 讨论

#### 3.1 有机养分替代对小麦有效氮供应的影响

水解性氮含量能反映当季土壤氮素供应情况,吕真真等<sup>[15]</sup>通过 28 a 长期定位试验发现,配施有机肥能

显著提高土壤水解性氮含量,并且以 70% 比例配施处理的水解性氮含量最高。张琳等<sup>[16]</sup>研究认为鸡粪与化肥配施后耕层土壤水解性氮含量显著增加 25.32%~131.54%。李彦等<sup>[17]</sup>的研究表明在等氮条件下配施有机肥,第 3、5、20 年后水解性氮含量分别增加 32%、36.81%、18.04%。本研究发现,有机养分替代处理均能增加土壤水解性氮含量,且随替代比例的增加而降低。

本研究中,0~20 cm 土壤铵态氮含量均较低(<12 mg·kg<sup>-1</sup>),各施肥处理对铵态氮含量影响较小。这与巨晓棠等<sup>[18]</sup>的研究结果相似,铵态氮在土壤中的累积量很小,不随施氮量和施肥方式而发生显著的变化。李树山等<sup>[19]</sup>认为化肥氮的施用与土壤硝态氮含量的增加具有显著正相关关系,单施化肥处理下有 27% 的硝态氮来自外源化肥氮的转化,而在有机肥配施处理下仅有 5% 的硝态氮来自外源有机肥氮的转化。马臣等<sup>[20]</sup>的研究表明,化肥与有机肥配施使大量硝态氮固定在耕层,抑制其向深层累积和迁移。本研究中,小麦收获季土壤硝态氮含量随沼液氮替代比例的

增加而减少,其原因可能是有机肥可以增加土壤团聚体和活性碳含量,增加对硝态氮的固持能力,并且施用有机肥后土壤C/N升高,激发了土壤微生物活性使无机氮被固持,从而减少硝态氮的累积<sup>[21]</sup>。

### 3.2 有机养分替代对小麦氮肥利用率的影响

本研究中小麦氮肥利用率为10.17%~36.46%,低于陈志龙等<sup>[22]</sup>报道的17.20%~43.80%,可能是因为本试验的施氮量(165 kg·hm<sup>-2</sup>)高于陈志龙等报道的120 kg·hm<sup>-2</sup>。耿维等<sup>[2]</sup>研究发现巢湖地区氮肥施用量为1.89×10<sup>6</sup> t,是作物养分需求量的1.75倍,过多的氮素随径流和挥发而损失,导致氮肥利用率降低。前人研究表明,有机肥与无机肥配合施用显著提高作物肥料利用效率<sup>[23-25]</sup>。一方面有机肥氮素缓慢释放使土壤具有更为持久的供氮能力。本研究中,有机肥与化肥配施处理显著增加土壤有机质与全氮含量,促进植物对肥料氮吸收,增加氮肥利用率。王站付等<sup>[26]</sup>研究发现单施化肥处理小麦干物质累积量和养分吸收量在前期较高,而减氮20%并配施有机肥处理有利于小麦全生育期对养分的吸收,成熟期氮素累积量显著增加,同时提高氮肥利用率。另一方面,施用有机肥能增加土壤微生物数量与活性,更多的无机氮被微生物固定,不仅可以减少作物生育前期的氮素损失,还能在作物需肥量增加时将氮素释放供作物吸收<sup>[27]</sup>。

但有机肥的替代比例并非越高越好,而是存在最适比例。刘亦丹等<sup>[28]</sup>发现有机肥氮替代75%化肥氮处理的氮肥利用率为53.3%,较单施化肥显著提高9.4%。Abbasi等<sup>[29]</sup>指出有机肥替代25%的化肥显著促进小麦各器官的氮素吸收量,并增加25%的氮肥利用率。刘学彤等<sup>[25]</sup>的研究表明,在推荐施肥基础上有机氮替代15%处理的氮肥利用率最高,这与本研究中15%沼液氮替代处理下氮肥利用率最佳的结果一致。原因可能是当沼液替代化肥比例过大时,小麦无效分蘖易增多,从而影响穗粒数和千粒质量,阻碍产量增加<sup>[30]</sup>。本研究中同一替代比例下不同有机肥处理的氮肥利用率表现出一定差异,以沼液氮替代处理的氮肥利用率最高,其原因可能是沼液中铵态氮占总氮量70%以上,且与其他固体有机肥相比湿度更大,施入土壤后既能减少氨挥发,还不利于硝化作用产生N<sub>2</sub>O,进而减少氮素损失<sup>[31]</sup>。

### 3.3 有机养分替代对小麦产量的影响

近年来,氮肥减量施用技术一直在不断探索和改进,并在作物生产中得到广泛应用。本研究中,与常规施肥相比,优化减量施肥处理的产量显著增加,但

后者氮素投入量却减少15 kg·hm<sup>-2</sup>,表明在试验地区小麦种植系统中存在氮肥投入过多现象,减氮潜力达8.33%。彭正萍等<sup>[24]</sup>研究认为,在农民习惯施氮(392 kg·hm<sup>-2</sup>)基础上减少20%施氮量,不会显著影响玉米产量,反而促进玉米氮素利用,减少氮素损失。

冯伟等<sup>[32]</sup>认为在基施沼液的基础上追施尿素,可提高小麦产量,尤其以基施25%沼液氮+追施75%尿素氮处理的植株光合功能最强,籽粒产量最高。本研究中,沼液替代15%和30%化肥氮显著增加小麦籽粒和秸秆产量,较常规施肥相比增幅达16.18%、12.85%和2.03%、6.30%。李瑞等<sup>[33]</sup>研究认为施氮量相同时,沼液与化肥配施能显著提升土壤氮矿化势、矿化速率和累积矿化量,增加土壤供氮能力。随着沼液施用量的增加,土壤全氮、速效钾和有机质的含量也增加<sup>[34]</sup>。本研究中,施用沼液显著增加土壤水解性氮含量,促进小麦对氮素的吸收利用,降低硝态氮在土壤中的残留,表明沼液与化肥配施可通过协调氮素供应进而增加作物产量。潘飞飞等<sup>[35]</sup>研究发现与纯化肥处理相比,100%沼液处理的冬小麦地上部产量显著降低。这与本研究结果相似,随着沼液替代化肥比例的增加,小麦产量呈逐渐下降趋势,其中沼液替代15%化肥处理所获得的小麦产量最高。但当沼液替代比例为50%时,小麦产量显著低于常规处理。王桂良等<sup>[30]</sup>发现沼液替代量较高时小麦基部节间长度显著增加,不良气候条件下易发生倒伏减产。同时,沼液施用过多可能会导致速效养分含量较低,植株生长不良,阻碍产量形成<sup>[36]</sup>。

有机无机配施制度中作物产量不仅受配施比例的影响,还与不同种类有机肥有关。孙国峰等<sup>[37]</sup>的研究表明,50%沼液配施化肥处理对小麦增产稳产效果优于堆肥。刘术新等<sup>[38]</sup>在茶叶上的研究结果表明,在施氮量相同的基础上,沼液、堆肥及海产品残渣有机肥均能提高茶叶品质,尤其以猪粪沼液效果显著。本研究中,在30%有机氮替代比例下,沼液对小麦的增产效果优于堆肥和商品有机肥,主要原因是堆肥和商品有机肥中氮素释放缓慢,不能满足当季小麦的养分需求;而沼液中的速效养分可促进土壤有机氮的分解,其与化肥配施可以减少作物生育期内土壤氮素损失,因此不同有机肥在小麦产量指标上表现出显著性差异。此外,有机肥与无机肥配施可以疏松土壤,增加土壤通气性,降低土壤容重<sup>[15]</sup>。但孙泽强<sup>[39]</sup>研究发现土壤容重过低则会影响作物生长发育及产量形成,这与本研究结果一致。容重过小使土壤孔隙增加,虽

然通气性强,但土粒间黏结力弱,与根系无法直接接触,使得养分与水分难以向植物运输,影响幼苗生长和植物发育,进而导致产量降低<sup>[40]</sup>。

#### 4 结论

(1)优化减量施肥处理较常规施肥处理可以在减少8.3%氮肥用量的条件下增加小麦籽粒产量和氮肥利用率,表明试验地块所在区域稻麦轮作下小麦施肥还具有一定的化肥减氮空间。

(2)15%沼液氮替代比例下小麦籽粒和秸秆产量均最高,有效促进小麦对氮磷养分的吸收和利用,有利于增加土壤养分含量,但50%沼液配施不利于小麦地上部干物质的积累和土壤肥力的提升。

(3)在养分相同条件下,与试验所用堆肥和商品有机肥相比,沼液与化肥配施对增加小麦产量的效果较好;堆肥与化肥配施可以促进土壤全氮、水解性氮和有效磷的积累,商品有机肥与化肥配施可以缓解土壤酸化,增加土壤有机质含量。

#### 参考文献:

- [1] 王军, 申田田, 车钊, 等. 有机和无机肥配比对黄褐土硝化和反硝化微生物丰度及功能的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(3): 641-650. WANG J, SHEN T T, CHE Z, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilizers on abundances of nitrifiers and denitrifiers and their function in yellow-cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 641-650.
- [2] 耿维, 袁嫚嫚, 邬刚, 等. 安徽省作物养分供需分析及化肥减施潜力研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 221-235. GENG W, YUAN M M, WU G, et al. Study on the input and demand of crop nutrients and the potential of fertilizer reduction in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(2): 221-235.
- [3] 王昕, 周睿, 徐刚. 基于农作物养分平衡的畜禽粪污还田潜力预测: 以安徽省为例[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2022, 37(3): 57-64. WANG X, ZHOU R, XU G. Potential and prediction of livestock and poultry waste returning to field based on crop nutrient balance: a case study of Anhui Province[J]. *Journal of Jiujiang University(Natural Science Edition)*, 2022, 37(3): 57-64.
- [4] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783. ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [5] 石晓晓, 郑国砥, 高定, 等. 中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 403-411. SHI X X, ZHENG G D, GAO D, et al. Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(2): 403-411.
- [6] 徐文萍. 庐江县畜禽粪污资源化利用整县推进项目前期调查摸底情况的思考与建议[J]. 现代农业科技, 2020(14): 169-171. XU W P. Thoughts and suggestions on the preliminary investigation of the whole county to promote the resource utilization of livestock and poultry manure in Lujiang County[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(14): 169-171.
- [7] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176. WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [8] QIAN Y, SONG K, HU T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 702-709.
- [9] 陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 280-287. CHEN J R, QIN W J, WANG S X, et al. Effects of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) incorporation on rice yield and nitrogen use efficiency in double-rice cropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 280-287.
- [10] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 549-552. XU Y C, SHEN Q R, LEI B K, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 549-552.
- [11] 张然, 史雷, 马龙, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 325-330. ZHANG R, SHI L, MA L, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield and soil physical properties in dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 325-330.
- [12] 赵吉霞, 禹妍彤, 周芸, 等. 有机肥等氮替代化肥对玉米产量和氮素吸收利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 374-381. ZHAO J X, YU Y T, ZHOU Y, et al. Effect of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on main yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 374-381.
- [13] 王秋君, 张小莉, 罗佳, 等. 不同有机无机复混肥对小麦产量、氮效率和土壤微生物多样性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1003-1009. WANG Q J, ZHANG X L, LUO J, et al. Effects of different organic-inorganic mixed fertilizations on yield of wheat, nitrogen use efficiency and soil microbial diversity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(5): 1003-1009.
- [14] ISMAIL C, HIKMET G, MESUT B, et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions[J]. *Geoderma*, 2010, 160(2): 236-243.
- [15] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 904-913. LÜ Z Z, WU X D, HOU H Q, et al. Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double crop-

- ping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4):904-913.
- [16] 张琳, 吕玉虎, 李亚光, 等. 化肥减量配施鸡粪对土壤肥力及水稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(15):143-145. ZHANG L, LÜ Y H, LI Y G, et al. Effect of the combined application of reducing chemical fertilizer and chicken manure on soil fertility and rice yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(15):143-145.
- [17] 李彦, 孙翠平, 井永革, 等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7):1386-1394. LI Y, SUN C P, JING Y P, et al. Effects of long-term application of organic manure on soil fertility and nitrate-N transport in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1386-1394.
- [18] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1):97-99. JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Dynamics of different soil nitrogen pools after applying different types of nitrogen fertilizers[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1):97-99.
- [19] 李树山, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6):1185-1193. LI S S, YANG J C, JIANG H M, et al. Effects of organic and inorganic fertilizer on nitrogen pool and distribution of residual N fractions in fluvo-aquic soil under the winter wheat system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1185-1193.
- [20] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4):1240-1248. MA C, LIU Y N, LIANG L, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-N in dryland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4):1240-1248.
- [21] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4707-4716. HAO X Y, MA X Z, GAO Z C, et al. Variation characteristics of fractions of active nitrogen and organic nitrogen under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4707-4716.
- [22] 陈志龙, 陈杰, 许建平, 等. 有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(7):55-57. CHEN Z L, CHEN J, XU J P, et al. Effects of organic fertilizer nitrogen replacing part of chemical fertilizer nitrogen on wheat yield and nitrogen utilization[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(7):55-57.
- [23] 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 C 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.
- [24] 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 Z P, LIU Y N, LI Y C, et al. Effects of constant nitrogen regulation on the nitrogen utilization and apparent loss in the rotation system of wheat and maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6):74-79.
- [25] 刘学彤, 黄少辉, 邢素丽, 等. 有机肥氮替代部分化肥氮对冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11):71-75. LIU X T, HUANG S H, XING S L, et al. Effects of organic fertilizer nitrogen replacing part of chemical fertilizer nitrogen on winter wheat yield and nitrogen utilization[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(11):71-75.
- [26] 王站付, 施俭, 陆亮, 等. 有机无机肥配施对小麦产量及氮肥利用效率的影响[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2019, 37(6):94-101. WANG Z F, SHI J, LU L, et al. Influence of organic-synthetic combined fertilizers on yield and nitrogen use efficiency in wheat[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2019, 37(6):94-101.
- [27] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2):532-542. MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2):532-542.
- [28] 刘亦丹, 迟凤琴, 谷思玉, 等. 有机肥替代部分化学氮肥对春小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2):442-448. LIU Y D, CHI F Q, GU S Y, et al. Effects of organic fertilizer substituted by mineral nitrogen fertilizer on yield of spring wheat and nitrogen utilization efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2):442-448.
- [29] ABBASI M K, TAHIR M M. Economizing nitrogen fertilizer in wheat through combinations with organic manures in Kashmir, Pakistan[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(1):169-177.
- [30] 王桂良, 张家宏, 王守红, 等. 沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(5):467-475. WANG G L, ZHANG J H, WANG S H, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5):467-475.
- [31] 黄红英, 曹金留, 常志州, 等. 猪粪沼液施用对稻、麦产量和氮磷吸收的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(3):412-418. HUANG H Y, CAO J L, CHANG Z Z, et al. Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous uptakes by rice and wheat[J]. *Soils*, 2013, 45(3):412-418.
- [32] 冯伟, 管涛, 王永华, 等. 沼液与尿素配施对冬小麦光合特性及籽粒产量的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(8):1401-1408. FENG W, GUAN T, WANG Y H, et al. Effects of biogas slurry combined with urea on photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(8):1401-1408.
- [33] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8):1364-1375. LI R, ZHANG X, YANG Y, et al. Effects of substituting biogas slurry for chemical nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen and bacterial communities in coastal paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8):1364-1375.

- [34] 王静童, 王勇, 殷金忠, 等. 短期沼液还田对小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2019, 47(4): 5-9. WANG J T, WANG Y, YIN J Z, et al. Effects of short-term biogas slurry returning on wheat yield and soil physiochemical properties [J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(4): 5-9.
- [35] 潘飞飞, 唐蛟, 孙壮, 等. 沼液替代化肥对冬小麦产量的影响[J]. 作物杂志, 2022(3): 174-180. PAN F F, TANG J, SUN Z, et al. Effects of biogas slurry instead of chemical fertilizer on winter wheat yield[J]. *Crops*, 2022(3): 174-180.
- [36] 黄红英, 曹金留, 靳红梅, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2353-2361. HUANG H Y, CAO J L, JIN H M, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [37] 孙国峰, 周炜, 何加骏, 等. 猪粪沼液施用后土壤理化性状及小麦产量的变化[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 1054-1060. SUN G F, ZHOU W, HE J J, et al. Changes of soil physical and chemical properties and wheat yield after swine manure or slurry application[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(5): 1054-1060.
- [38] 刘术新, 丁枫华, 刘巧玲. 不同肥源有机肥对茶叶产量、品质及安全性的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(12): 45-48. LIU S X, DING F H, LIU Q L, et al. Effects of different organic fertilizers on yield, quality and safety of tea[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(12): 45-48.
- [39] 孙泽强, 韩成卫, 孔晓民, 等. 鲁西南褐土土壤容重对冬小麦生长发育及养分吸收的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(11): 69-74. SUN Z Q, HAN C W, KONG X M, et al. Effect of cinnamon soil bulk density on growth, development and nutrient uptake of wheat in southwest of Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2020, 52(11): 69-74.
- [40] 张宝峰, 曾路生, 李俊良, 等. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 309-314. ZHANG B F, ZENG L S, LI J L, et al. Soil bulk density and porosity in greenhouse vegetables field under the optimized fertilization treatment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(32): 309-314.