

# 长期施肥下黑土不同团聚体氮组分的植物有效性差异

杨洪波<sup>1,2</sup>, 申艳<sup>1</sup>, 徐明岗<sup>1</sup>, 史天昊<sup>1</sup>, 段英华<sup>1\*</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;  
2 亿利生态修复股份有限公司, 北京 100022)

**摘要:**【目的】土壤团聚体组分形成机制不同, 其所含有的氮的转化和有效性也不同。阐明不同团聚体中氮素有效性差异, 可为科学施肥、培育高效的土壤结构、提高氮肥利用率提供重要的理论依据。【方法】依托吉林黑土长期定位试验, 于 2014 年进行了室内土壤培养试验和黑麦草盆栽试验。供试土壤选择的定位试验处理包括不施肥 (CK)、氮磷钾 (NPK)、氮磷钾 + 秸秆 (NPKS)、氮磷钾 + 农家肥 (NPKM)。采集 1000 g 土样于 2 L 塑料瓶内, 加入 <sup>15</sup>N 丰度为 20.12% 的尿素 0.247 g, 置于 25℃ 培养箱中恒温控湿培养 40 天。培养完成后将土样风干, 将有机物分为粗游离颗粒有机物 (cfPOM, > 250 μm)、微团聚体有机物 (iPOM, 53~250 μm) 和矿物结合有机物 (MOM, < 53 μm), 矿物结合有机物又进一步分为团聚体内矿物结合有机物 (MOMi) 和团聚体外矿物结合有机物 (MOMo), 分析了不同团聚体组分中 <sup>15</sup>N 的固持量。称取各粒级土壤样品 40 g, 分别与 20 g 细石英砂混匀, 于 80 mL 小塑料盆中, 每盆黑麦草定苗 7 株于温室内培养, 20 天时加入适量磷、钾营养液。培养 30 天后, 分别采集黑麦草地上部和根系, 烘干、称重、研磨, 测定养分含量及 <sup>15</sup>N 丰度。【结果】在 NPK 处理和 NPKM 处理的土壤中, 植株生物量分别在 MOMo 和 cfPOM 下最高, 分别为每盆 100.2 mg 和 99.8 mg。黑麦草尿素氮含量在 MOMo 的 NPK 处理最大, 在其他三个组分均表现为 CK > NPK > NPKS > NPKM, 其中 cfPOM 组分氮固持量与黑麦草氮含量表现一致; 黑麦草吸收的氮素主要来自 cfPOM 和 MOMo 组分中 (0.1~0.21 mg/pot), 在其他组分下不足 0.05 mg/pot; cfPOM、iPOM、MOMi 和 MOMo 中的氮素利用率分别为 14.1%~19.3%、5.5%~15.4%、3.1%~4.9% 和 12.7%~23.6%, 在 NPKM 处理下, 以 cfPOM 组分中最高, 为 19.3%, 在 NPK 处理下以 MOMo 组分最高, 为 23.6%。【结论】施用有机肥可促进外源氮肥保存在粗游离颗粒中, 其固持的氮有效性最高, 有利于后季养分的供应。单施化肥处理团聚体外部矿物结合有机物中固持氮的有效性最高; 团聚体内部矿物结合有机物组分虽固持氮含量较高, 但氮有效性很低。

**关键词:** 团聚体; 氮固定; 氮供应; 氮肥利用率; 黑麦草

## Difference in plant availability of nitrogen in aggregates of black soil under long-term fertilization

YANG Hong-bo<sup>1,2</sup>, SHEN Yan<sup>1</sup>, XU Ming-gang<sup>1</sup>, SHI Tian-hao<sup>1</sup>, DUAN Ying-hua<sup>1\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Elion Ecological Restoration Co. LTD, Beijing 100022, China)

**Abstract:** 【Objectives】The formation mechanism of soil aggregates is different, and the conversion and availability of the contained nitrogen (N) in these aggregates are different as well. The differences in N availability among soil aggregates were investigated in this study to provide theoretical basis for rational fertilization, build-up of good soil structure and the improvement of N fertilizer use efficiency. 【Methods】An incubation experiment and a pot experiment were conducted in 2014. The soils used were collected from the long-term fertilization experiment of black soil in Jilin province, and involved treatments included: no fertilization (CK), chemical NPK

收稿日期: 2018-05-04 接受日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200301); 国家自然科学基金项目 (41471247; 41601238); 北京市自然科学基金项目 (6142018); 国家重点研发计划 (2016YFC0500708); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金 (Y412201405) 资助。

联系方式: 杨洪波 E-mail: 502952735@qq.com; \* 通信作者 段英华 E-mail: duanyinghua@caas.cn

fertilizers (NPK), chemical NPK fertilizers and straw returning (NPKS), and chemical NPK fertilizers and manure (NPKM). Urea with a  $^{15}\text{N}$  abundance of 20.12% was mixed into 1000 g of soil and incubated within 2 L volume of plastic bottles for 40 days at 25 °C. The incubated soil was separated into 4 aggregate fractions: coarse free particulate organic matter ( $> 250\ \mu\text{m}$ , cfPOM), micro-aggregate organic matter (53–250  $\mu\text{m}$ , iPOM), outer mineral-associated organic matter (MOMo,  $< 53\ \mu\text{m}$ ), and inner mineral-associated organic matter (MOMi,  $< 53\ \mu\text{m}$ ). Residing differences of fertilizer N in aggregates were analyzed. Ryegrass (*Loliumperenne* L.) was planted in each soil fraction for 30 days, then the biomass, fertilizer N uptake and fertilizer N use efficiency of ryegrass were analyzed. 【Results】 The plant biomass was the highest in MOMo (100.2 mg/pot) and cfPOM (99.8 mg/pot) in treatments of NPK and NPKM, respectively. The urea N content of ryegrass in three soil fractions was in the order of CK  $>$  NPK  $>$  NPKS  $>$  NPKM. The resided nitrogen in cfPOM was consistent with the nitrogen content of ryegrass, except that it was highest in NPK treatment for the fraction of MOMo. N absorbed by ryegrass was mainly from cfPOM and MOMo (0.1–0.21 mg/pot), and less than 0.05 mg/pot from other fractions. The nitrogen use efficiencies were 14.1%–19.3%, 5.5%–15.4%, 3.1%–4.9%, and 12.7%–23.6% in cfPOM, iPOM, MOMi, and MOMo, respectively. In NPKM treatment, N use efficiency was highest in cfPOM (19.3%), and that in NPK was highest in MOMo (23.6%). 【Conclusions】 The application of organic fertilizer promotes exogenous N to be stored in large aggregates and held the highest nitrogen efficiency of large aggregates, which is beneficial to the nutrient supply in the later season. The application of chemical fertilizer facilitates the use efficiency of N immobilized by outer mineral-associated organic matter. The residual nitrogen availability is low in inner mineral-associated organic matter though the residual amount is high.

**Key words:** aggregate; nitrogen fixation; nitrogen supplying; nitrogen use efficiency; ryegrass (*Loliumperenne* L.)

氮肥施入土壤后,一部分被作物吸收利用,一部分因挥发或淋溶而损失,其余部分便残留在土壤中<sup>[1]</sup>。巨晓棠等<sup>[2]</sup>对我国北方石灰性旱作土壤的田间原位观测试验结果表明,一季作物之后化肥氮在根区的残留率约为 30%。残留氮以多种形式存在于土壤中,如硝态氮、交换性铵、生物固定的有机氮、土壤稳定组成中的有机氮等。当氮肥施用量高时,土壤中有大量氮肥残留。这些残留养分都可以被后茬作物吸收利用,并且由于土壤有机氮各组分的有效性及其在残留氮和土壤固有氮中的分布不同,使得残留肥料氮的有效性高于土壤固有氮<sup>[3]</sup>。 $^{15}\text{N}$  标记肥料长期定位试验结果表明,1982 年施入土壤的标记氮肥在之后的 30 年中被作物累计吸收 60%~65%,有 8%~12% 流向了水体,土壤残留仍有 12%~15%<sup>[4]</sup>。我国目前普遍施肥量大,长期以来土壤氮素盈余不断积累,其后效影响开始显现<sup>[5]</sup>。所以,阐明土壤残留氮的有效性,对于后季种植中合理施肥,挖掘土壤中已累积的氮素资源具有重要意义。

Jastrow 等<sup>[6]</sup>研究表明,表层土壤近 90% 的氮素存于团聚体中。团聚体组分由于其形成机制不同,在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用,进而影响有机氮在土壤中的有效性<sup>[7-8]</sup>。笔者通过采集长期不施肥、化肥、化肥+秸秆和化肥+

有机肥的黑土,模拟田间施肥量加入  $^{15}\text{N}$  标记的尿素,研究了粗游离颗粒有机物(cfPOM,  $> 250\ \mu\text{m}$ )、微团聚体有机物(iPOM, 53~250  $\mu\text{m}$ )、团聚体内矿物结合有机物(MOMi,  $< 53\ \mu\text{m}$ )和团聚体外矿物结合有机物(MOMo,  $< 53\ \mu\text{m}$ )等 4 个组分中尿素氮的固持量及固持效率<sup>[9]</sup>。然而,这些固持氮的有效性又因组分的差异而不同。为深入阐明各组分残留氮的植物有效性,本文用以上获得的团聚体组分来培养黑麦草,以阐明长期不同施肥下农田土壤各级团聚体中氮的有效性差异,以期氮肥合理施用,提高氮肥利用率和农业可持续性发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 黑土团聚体组分样品的制备

原始土壤采自于位于吉林公主岭“国家黑土肥力长期试验站”(124°48'34"E, 43°30'23"N)的长期定位施肥试验。该试验始于 1990 年,种植制度为玉米连作,一年一熟制。本研究选择该试验中的 4 个处理:不施肥(CK)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾+秸秆(NPKS)、氮磷钾+农家肥(NPKM)。2014 年 10 月份作物收获后,采集 1000 g 土样到 2 L 的塑料瓶,加入  $^{15}\text{N}$  丰度为 20.12% 的尿素,置于 25 °C 培养箱中恒

温控湿培养 40 天。培养完成后将土样风干, 采用 Six 等<sup>[7]</sup>的团聚体分离方法得到不同组分的有机物, 包括粗游离颗粒有机物 (cfPOM, > 250 μm)、微团聚体有机物 (iPOM, 53~250 μm) 和矿物结合有机物 (MOM, < 53 μm), MOM 又包括团聚体内矿物结合有机物 (MOMi) 和团聚体外矿物结合有机物 (MOMo), 分析不同团聚体组分中<sup>15</sup>N 的固持量, 以阐明外源氮肥在团聚体中的分布特征。试验地概况、施肥处理、土样培养和团聚体筛分方法及相应结果详见文献<sup>[9]</sup>。本文利用该培养试验分离获得的不同团聚体组分, 采用黑麦草培养试验, 重点分析这些团聚体组分中固持氮对植物的有效性。

1.2 黑麦草培养试验

基于杨洪波等<sup>[9]</sup>不同施肥处理下各组分固持尿素<sup>15</sup>N 含量的结果, 本试验取 cfPOM、iPOM、MOMo、MOMi 四种土壤组分继续研究 (表 1), 而细游离颗粒有机物轻组分 (ffPOM, 53~250 μm) 量非常少, 不足以种植黑麦草, 故舍去。分别用各个组分种植黑麦草, 培养过程如下: 用浓度为 30% 双氧水对黑麦草种子、石英砂消毒灭菌 30 分钟并用蒸馏水清洗干净, 黑麦草种子放进培养皿于 25℃ 培养箱中培养 3~4 天发芽, 石英砂 105℃ 烘干。称取各粒级土壤样品 40 g 分别与 20 g 细石英砂混均, 放进约 80 mL 小塑料盆中, 塑料盆直径 40 mm、高 65 mm, 每盆播黑麦草籽 9 粒, 加水调节至土壤湿度为 200 g/kg,

放于温室内培养, 每天观察出苗情况, 并间苗, 间苗后每盆定苗 7 株。培养期间用称重法浇适量去离子水, 保持土壤湿度为 200 g/kg。培养 20 天时加入浓度分别为 7.3 mmol/L 和 22.1 mmol/L 的磷、钾营养液各 1 mL, 补充黑麦草对其养分需求, 每天浇水 1~2 次, 以保持土壤湿度。

1.3 植物样品采集处理与测定

培养 30 天后, 分别采集黑麦草地上部和根系, 烘干、称重、研磨, 测定养分含量及<sup>15</sup>N 丰度。植株的<sup>15</sup>N 丰度采用 ISOPRIME100/VARIO PYRO CUBE 质谱分析仪测定。

1.4 计算方法与数据分析

1.4.1 各组分下黑麦草吸收尿素<sup>15</sup>N 含量

$$N_c = (B - C) / (D - C) \times T$$

式中:  $N_c$  为吸收尿素<sup>15</sup>N 含量 (mg/g);  $B$  为黑麦草吸收尿素<sup>15</sup>N 丰度 (%);  $C$  为自然丰度 (0.3663%);  $D$  为施用尿素<sup>15</sup>N 丰度 20.12%;  $T$  为黑麦草全氮含量 (mg/g)。

1.4.2 各组分下黑麦草吸氮量

$$N_{up} = N_c \times m_i$$

式中:  $N_{up}$  为黑麦草吸收尿素氮量 (mg/盆);  $N_c$  为吸收尿素<sup>15</sup>N 含量 (mg/g);  $m_i$  为各组分黑麦草生物量 (g/盆)。

1.4.3 各组分下黑麦草尿素氮利用率

$$N_{ur} = N_{up} / (X \times Ms) \times 100\%$$

式中:  $N_{ur}$  为黑麦草尿素氮利用率 (%);  $N_{up}$  为黑麦草吸收尿素氮量 (mg/盆);  $X$  为各组分固持尿素氮含量 (mg/kg);  $Ms$  为土壤质量 0.04 kg/盆。

数据采用 SAS8.0 软件系统进行方差分析。

表 1 不同施肥处理下各组分固持尿素<sup>15</sup>N 含量 (mg/kg)  
Table 1 The content of urea <sup>15</sup>N in aggregate grades under different treatments

| 处理<br>Treatment | cfPOM    | iPOM    | MOM       |          |
|-----------------|----------|---------|-----------|----------|
|                 |          |         | MOMi      | MOMo     |
| CK              | 36.55 Aa | 3.99 Ad | 25.59 Ac  | 30.80 Ab |
| NPK             | 27.65 Ba | 3.61 Ac | 20.68 BCb | 22.33 Bb |
| NPKS            | 26.13 Ba | 4.58 Ab | 23.98 ABa | 22.89 Ba |
| NPKM            | 17.76 Ca | 6.73 Ab | 18.14 Ca  | 18.12 Ca |

注 (Note): cfPOM—粗游离颗粒有机物 Coarse free particulate organic matter (> 250 μm); iPOM—微团聚体有机物 Microaggregate organic matter (53~250 μm); MOM—矿物结合有机物 Mineral-associated organic matter (< 53 μm); MOMi—团聚体内部结合有机物 Inner mineral-associated organic matter; MOMo—团聚体外部结合有机物 Outer mineral-associated organic matter; 同列数据后大写字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平, 同行数据后不同小写字母表示不同组分间差异达 5% 显著水平 Upper case letters in a column mean significant difference at the 5% level, lower case letters in a row mean significant difference at the 5% level.

2 结果与分析

2.1 各团聚体中黑麦草生物量差异

在不同施肥处理下, 各组分的黑麦草生物量差异较大 (图 1)。粗游离颗粒有机物和团聚体外部矿物结合有机物的黑麦草地上部生物量要显著大于细游离颗粒有机物和团聚体内部矿物结合有机物; 团聚体内部矿物结合有机物组分的黑麦草生物量按照 CK、NPK、NPKS、NPKM 处理的顺序依次增加。在 CK 处理下, 粗游离颗粒有机物下的黑麦草地上部、地下部生物量与团聚体外部矿物结合有机物下的持平, 显著大于细游离颗粒有机物和团聚体内部矿物结合有机物培养下的; 在 NPK 处理下, 较高的生物量表现在团聚体外部矿物结合有机物组分, 地上部生物量高出其他组分 19.1~43.8 mg/盆, 地下部高出 8.1~

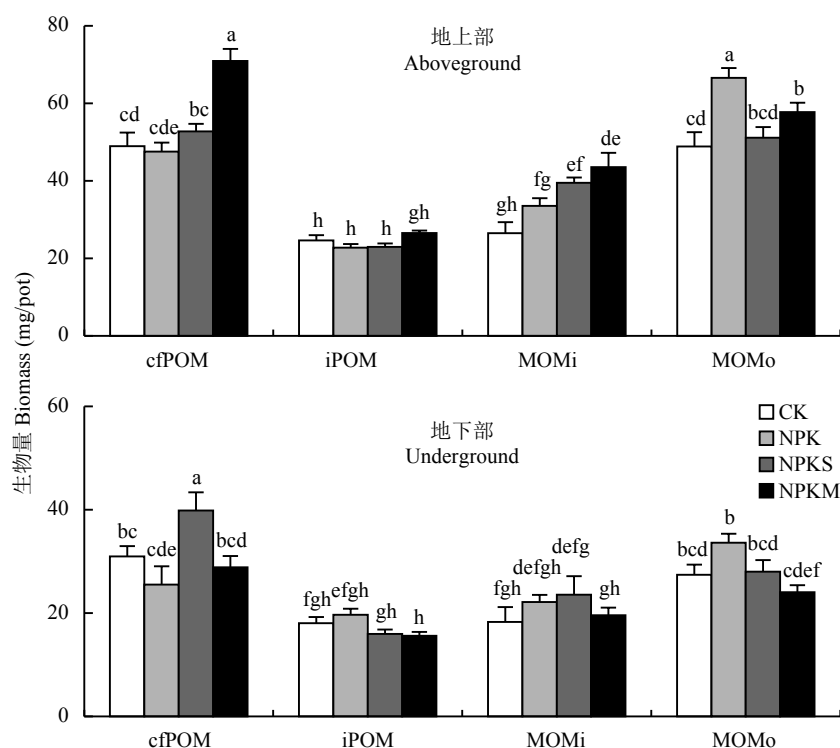


图 1 长期不同施肥处理下各团聚体中黑麦草生物量

Fig. 1 The biomass of *Lolium perenne* L. in aggregate fractions under different treatments

[注 (Note): cfPOM—粗游离颗粒有机物 Coarse free particulate organic matter (>250  $\mu\text{m}$ ); iPOM—微团聚体有机物 Microaggregate organic matter (53~250  $\mu\text{m}$ ); MOMi—团聚体内部结合有机物 Inner mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ); MOMo—团聚体外部结合有机物 Outer mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ). 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 5% level.]

13.9 mg/盆; 在 NPKM 处理下, 较高的生物量则出现在粗游离颗粒有机物组分, 地上部生物量显著高出其他组分 13.2~44.3 mg/盆, 地下部则高出 4.8~13.3 mg/盆; 在 NPKS 处理下, 地上部生物量在粗游离颗粒有机物和团聚体外部矿物结合有机物组分中持平, 但对于地下部生物量, 粗游离颗粒有机物组分要显著高出其他组分 11.9~23.0 mg/盆。

## 2.2 各团聚体中黑麦草尿素<sup>15</sup>N 含量

由图 2 可以看出, 黑麦草地上部、地下部尿素<sup>15</sup>N 含量主要分布在粗游离颗粒有机物和团聚体外部矿物结合有机物中。粗游离颗粒有机物组分下黑麦草地上部、地下部尿素<sup>15</sup>N 含量为 1.6~3.3、0.7~1.3 g/kg; 在团聚体外部矿物结合有机物组分下黑麦草地上部、地下部尿素<sup>15</sup>N 含量为 1.5~2.6、0.5~1.2 g/kg; 其中, 粗游离颗粒有机物组分中, CK、NPK 处理较 NPKS、NPKM 处理显著高出了 1.0~1.7、0.5~0.6 g/kg; 而在团聚体外部矿物结合有机物组分中, CK、NPK 处理较 NPKS、NPKM 处理显著高出了 0.4~1.1、0.2~0.7 g/kg; 在各个组分中, NPKM 处理的黑麦草地上部、地下部尿素<sup>15</sup>N 的含量均最低,

表现出 NPKM < NPKS < NPK < CK 的规律。

## 2.3 各团聚体中黑麦草总吸氮量

从图 3 可以看出, 黑麦草在粗游离颗粒有机物和团聚体外部矿物结合有机物两个组分中吸收更多的标记尿素氮量 (0.1~0.21 mg/盆), 在细游离颗粒有机物和团聚体内部矿物结合有机物两个组分吸收不足 0.05 mg/盆; 在粗游离颗粒有机物组分下, CK、NPK 处理下黑麦草所吸收尿素<sup>15</sup>N 量较 NPKS、NPKM 处理高出 0.04~0.07 mg/盆; 在细游离颗粒有机物组分下, 各处理之间没有显著差异, 吸收尿素<sup>15</sup>N 量为 0.01~0.02 mg/盆; 团聚体外部矿物结合有机物组分中的吸收量为 0.10~0.20 mg/盆, 比团聚体内部矿物结合有机物组分中高出 0.06~0.12 mg/盆, 团聚体外部在各处理间有差异, NPK 处理显著高出 CK 0.05 mg/盆, NPKM 处理则显著低于 CK 0.03 mg/盆, 团聚体内部矿物结合有机物在各处理间没有显著差异。

## 2.4 黑麦草对土壤中肥料<sup>15</sup>N 的利用率

由图 4 可知, 黑麦草在粗游离颗粒有机物、细游离颗粒有机物、内部矿物结合有机物和外部矿物结合有机物组分下对土壤<sup>15</sup>N 的利用率分别为 14.1%~

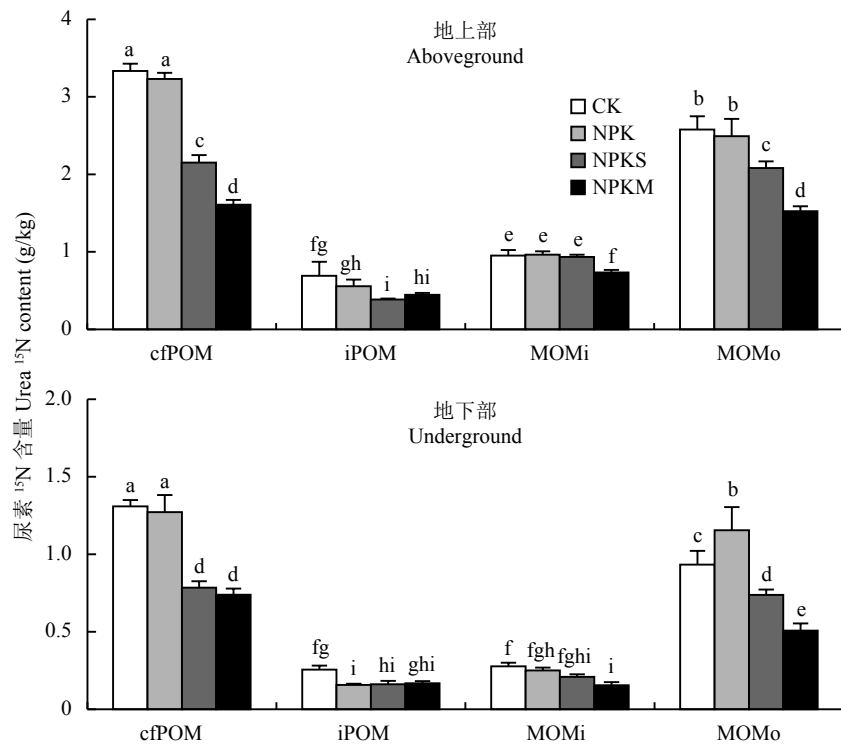


图 2 长期不同施肥下各团聚体中黑麦草的肥料氮含量

Fig. 2 Fertilizer nitrogen contents of *Lolium perenne* L. in aggregate fractions under different treatments

[注 (Note): cfPOM—粗游离颗粒有机物 Coarse free particulate organic matter (>250  $\mu\text{m}$ ); iPOM—微团聚体有机物 Microaggregate organic matter (53~250  $\mu\text{m}$ ); MOMi—团聚体内部结合有机物 Inner mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ); MOMo—团聚体外部结合有机物 Outer mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ). 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 5% level.]

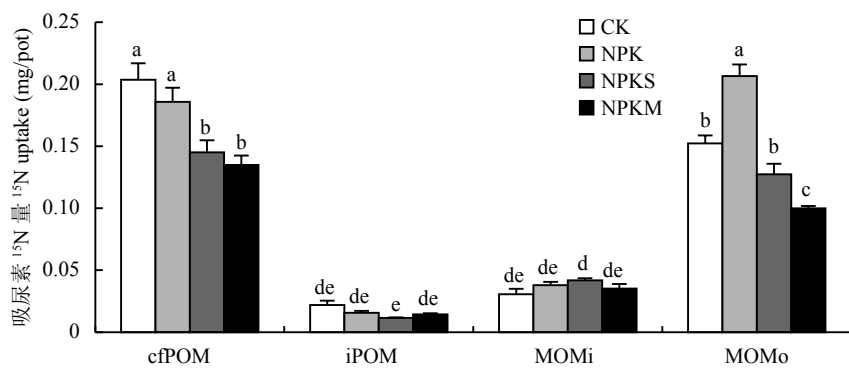


图 3 长期不同施肥下各团聚体中黑麦草总吸氮量

Fig. 3 The total nitrogen uptake of *Lolium perenne* L. in aggregate fractions under different treatments

[注 (Note): cfPOM—粗游离颗粒有机物 Coarse free particulate organic matter (>250  $\mu\text{m}$ ); iPOM—微团聚体有机物 Microaggregate organic matter (53~250  $\mu\text{m}$ ); MOMi—团聚体内部结合有机物 Inner mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ); MOMo—团聚体外部结合有机物 Outer mineral-associated organic matter (<53  $\mu\text{m}$ ). 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 5% level.]

19.3%、5.5%~15.4%、3.1%~4.9% 和 12.7%~23.6%, 团聚体内部矿物结合有机物各处理间无显著差异, 且  $\text{N}^{15}$  利用率不足 5%; 在团聚体外部矿物结合有机物组分下, NPK 处理利用率为 23.6%, 比 CK 处理显著高出约 11 个百分点, 其他组分利用率没有显著差

异 (12.7%~14.2%); 在粗游离颗粒有机物组分下, NPKM 处理利用率最大, 显著高出 CK 处理 5 个百分点, 其次是 NPK 处理, 显著高出 CK 处理 3 个百分点; 在细游离颗粒有机物组分下, CK 分别比 NPK、NPKS、NPKM 显著高出 4、9、10 个百分点。

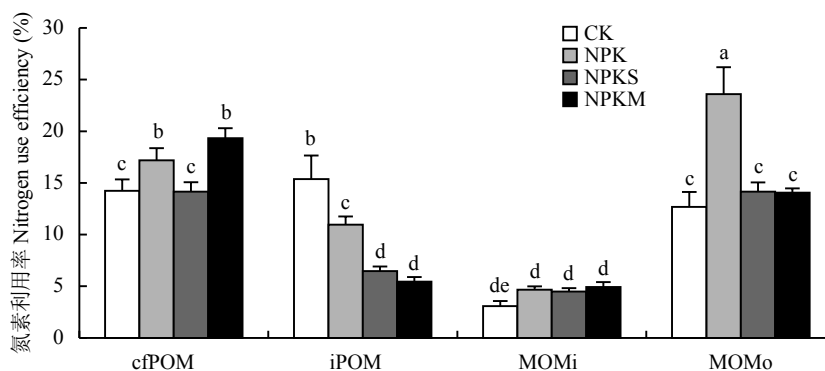


图 4 不同处理不同组分下黑麦草对尿素氮的利用率

Fig. 4 The fertilizer nitrogen use efficiency of *Lolium perenne* L. in aggregate fractions under different treatments

[注 (Note): cfPOM—粗游离颗粒有机物 Coarse free particulate organic matter ( $>250\ \mu\text{m}$ ); iPOM—微团聚体有机物 Microaggregate organic matter ( $53\sim250\ \mu\text{m}$ ); MOMi—团聚体内部结合有机物 Inner mineral-associated organic matter ( $<53\ \mu\text{m}$ ); MOMo—团聚体外部结合有机物 Outer mineral-associated organic matter ( $<53\ \mu\text{m}$ ). 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences at the 5% level.]

### 3 讨论

本试验结果表明, 团聚体氮组分有效性除团聚体内部矿物结合有机物无差异外, 其他三个组分均有显著差异。化肥配施有机肥处理使得粗游离颗粒有机物组分中氮素的有效性最高, 单施化肥使团聚体外部矿物结合有机物组分的氮有效性最高, 这三个组分差异的原因分析如下:

1) 本研究表明, 长期施用有机肥,  $>250\ \mu\text{m}$  的粗游离颗粒有机物组分比例明显增加,  $<53\ \mu\text{m}$  的矿物结合有机物组分比例明显降低, 团聚体的比例决定了团聚体氮素的储量。大团聚体增加, 有机氮的储量响应增加, 大团聚体的含量是影响团聚体水稳性的主要因素, 因此有机氮的稳定性与大团聚体的含量呈正相关, 有机肥的施用提高了大团聚体的含量进而有利于提高有机氮的稳定性<sup>[9]</sup>。另一方面, 粗游离颗粒有机物 ( $>250\ \mu\text{m}$ ) 组分的氮有效性提高 (图 4), 主要是因为施用有机肥提高了大团聚体的微生物活性<sup>[10-11]</sup>, 进而促进了土壤氮矿化, 提高了氮素的供应能力。刘晶等<sup>[12]</sup>研究结果表明, 不同土地利用方式下土壤团聚体细菌生物量均在  $0.25\sim2\ \text{mm}$  粒级下最高, 相似研究也均发现大团聚体中微生物活性都高于小团聚体<sup>[13-15]</sup>; 另外, 还有大团聚体相对疏松的团粒结构及微生物群落数量等因素, 为氮素矿化过程提供了更适合的环境, 促进了矿化过程的进行, 进而提高了氮的有效性<sup>[16-18]</sup>。丛耀辉等<sup>[19]</sup>研究结果表明, 各级团聚体有机氮组分及其矿化之间, 土壤以粗游离颗粒有机物 ( $>250\ \mu\text{m}$ ) 组分最大, 是优势粒级, 具有明显的固氮及释放能力。

2) 化肥配施秸秆和化肥配施有机肥处理下细游离颗粒有机物 ( $53\sim250\ \mu\text{m}$ ) 组分中的氮素的利用率不超过 6%, 有效性低 (图 4)。原因可能为, ① 该组分下固持氮含量很低, 且化肥配施有机肥处理下微生物量较对照大, 微生物本身也消耗一部分氮素, 使得微生物与作物竞争氮素, 作物可利用氮素变少; ② 尿素氮转化成的铵离子全部被土壤带负电荷胶体微粒中和凝聚, 同时相对于粗游离颗粒有机物, 细游离颗粒胶体的比表面积较大, 为减少表面能, 胶体也具有相互吸引、凝聚的趋势<sup>[20]</sup>。所以, 氮素的有效性较低, 此情况下可以合理加施速效氮肥。

3) 本研究发现, 单施化肥处理使团聚体外部矿物结合有机物组分 ( $<53\ \mu\text{m}$ ) 的氮素有效性明显较高。单施化肥, 由于土壤中缺少有机肥中的有效胶结物质, 使得土壤破碎, 从而促进了小粒级团聚体的形成, 小团聚体的比例升高。小粒级团聚体的比表面积大, 对  $\text{NH}_4^+$  等阳离子吸附性强, 储备了更多的易矿化氮; 另一方面, 小团聚体与酶类接触的面积大, 如脲酶直接参与着土壤中含氮有机化合物的转化过程, 从而有效地促进了有机氮的矿化, 因此, 小团聚体中含有比大团聚体更多的易矿化有机氮。邵兴芳等<sup>[21]</sup>对黑土旱田的团聚体氮矿化研究结果表明,  $<53\ \mu\text{m}$  粒级团聚体组分中氮矿化量在所有粒级中最高; Craswell 等<sup>[22]</sup>研究认为, 不同粒级土壤团聚体经培养后, 其氮矿化率随着团聚体粒径的减小而增大, 使得小粒级团聚体对土壤养分储量的贡献率越来越突出, 这些研究与本文结果类似。本试验还发现, 在小粒级团聚体中, 团聚体外部矿物结合有机物组分比内部矿物结合有机物组分上固持氮素有效

性更高, 说明了团聚体内部黏粒对化肥氮素的吸附能力更强。

总的来说, 粗游离颗粒有机物和团聚体外部矿物结合有机物中氮素的有效性最高, 其肥料氮的利用率可达到 15% 以上, 其次为细游离颗粒有机物 (53~250  $\mu\text{m}$ ), 团聚体内矿物结合有机物中氮素的有效性最低。化肥配施有机肥不仅能够促进肥料氮在粗游离颗粒有机物组分中的积累, 还提高了其有效性, 这可能是施用有机肥提高氮肥利用率的机制之一。细游离颗粒有机物不仅氮素固持量很低, 其有效性也较低。单施化肥处理的团聚体外部矿物结合有机物组分中氮的有效性较高。

### 参 考 文 献:

- [1] Xu H G, Zhong G R, Lin J J, *et al.* Effect of nitrogen management during the panicle stage in rice on the nitrogen utilization of rice and succeeding wheat crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 41–47.
- [2] 巨晓棠. 氮肥有效性的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 921–933.
- Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio-discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921–933.
- [3] Broadbent F E. Residual effects of labeled N in field trials[J]. *Agronomy Journal*, 1980, 72: 325–329.
- [4] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185–18189.
- [5] 史天昊. 不同施肥下典型农田氮素残留特征及可利用性[D]. 贵阳: 贵州大学硕士论文, 2015.
- Shi T H. Nitrogen residual characteristics and availability on typical farmlands under different fertilization in China [D]. Guiyang: MS Thesis of Guizhou University, 2015.
- [6] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801–807.
- [7] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 49–53.
- Chen E F, Guan L Z, Wang J K, *et al.* Compositional proportion of soil characteristic micro aggregates and soil fertility evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 49–53.
- [8] Bimüller C, Kreyling O, Kölbl A, *et al.* Carbon and nitrogen mineralization in hierarchically structured aggregates of different size[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 23–33.
- [9] 杨洪波, 史天昊, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下肥料氮在不同黑土团聚体有机物中的固持差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 357–364.
- Yang H B, Shi T H, Xu M G, *et al.* Residing differences of fertilizer nitrogen in aggregates of black soil under long-term fertilization treatments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 357–364.
- [10] 李桂花. 不同施肥对土壤微生物活性、群落结构和生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 204–208.
- Li G H. Effect of organic amendments and chemical fertilizer on soil microbial activity, biomass and community structure[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 204–208.
- [11] 李东坡, 武志杰, 陈利军. 有机农业施肥方式对土壤微生物活性的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2): 99–101.
- Li D P, Wu Z J, Chen L J. Influence of fertilizing modes of organic agriculture on the microbial activities[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 99–101.
- [12] 刘晶, 张跃伟, 张巧明, 等. 土地利用方式对豫西黄土丘陵区土壤团聚体微生物生物量及群落组成的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(4): 771–780.
- Liu J, Zhang Y W, Zhang Q M, *et al.* Effect of different land use types on soil aggregates microbial biomass and community composition in the Loess Hilly region of west Henan[J]. *Grassland Science*, 2018, 35(4): 771–780.
- [13] Leinweber P, Reuter G. The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1992, 13(2): 119–124.
- [14] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 780–782.
- Zhu Z L. Reserch on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 780–782.
- [15] 文倩, 赵小蓉, 陈焕伟, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(10): 1504–1509.
- Wen Q, Zhao X R, Chen H W, *et al.* Distribution characteristics of microbial biomass carbon in different soil aggregates in semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(10): 1504–1509.
- [16] 刘玮, 蒋先军. 耕作方式对土壤不同粒径团聚体氮素矿化的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 464–469.
- Liu W, Jiang X J. Effects of tillage on nitrogen mineralization in aggregate-size fractions of subtropical rice soil[J]. *Soils*, 2013, 45(3): 464–469.
- [17] 王岩, 徐阳春, 沈其荣. 有机、无机肥料<sup>15</sup>N在土壤不同粒级中的分布及其生物有效性[J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 410–413.
- Wang Y, Xu Y C, Shen Q R. Distribution of <sup>15</sup>N from organic and inorganic fertilizers in different size fractions of soil and its availability[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6): 410–413.
- [18] 黄生斌, 陈新平, 张福锁. 冬小麦施氮对下茬夏玉米的后效[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(1): 54–58.
- Huang S B, Chen X P, Zhang F S. Effect of residual nitrogen applied to winter wheat on the following summer maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(1): 54–58.
- [19] 丛耀辉. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机氮组分及其对矿化氮的贡献[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2016.
- Cong Y H. Soil organic nitrogen forms and their contributions to mineralizable nitrogen in water-stable aggregates of paddy soil in black soil region [D]. Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2016.
- [20] 王红旗. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社. 2006. 40–45.
- Wang H Q. Soil environment science [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 40–45.
- [21] 邵兴芳. 长期有机培肥模式下黑土团聚体碳氮积累及矿化特征[D]. 武汉: 武汉科技大学硕士学位论文, 2014.
- Shao X F. Aggregates under long-term manure fertilization practices on Black Soil [D]. Wuhan: MS Thesis of Wuhan University of Technology, 2014.
- [22] Craswell E T, Saffigna P G, Waring S A. The mineralization of organic nitrogen in dry soil aggregates of different sizes[J]. *Plant and Soil*, 1970, 33(1–3): 383–392.