

# 氮肥配施牛粪对干旱区棉田土壤团聚体及其微生物残体氮的影响<sup>①</sup>

秦金鑫, 吴茂林, 王昕悦, 张宇辰, 刘耘华\*, 盛建东

(新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为探究氮肥及其与有机肥配施对干旱区农田土壤中微生物残体氮在团聚体中赋存和分配的影响, 在新疆南部阿克苏地区沙雅县进行田间定位试验, 共设置5个氮肥施入量(0、200、300、400、500 kg/hm<sup>2</sup>)和在此5个施氮量上配施牛粪(3 000 kg/hm<sup>2</sup>)共10个处理, 并于试验的第3年, 在棉花的吐絮期, 测定土壤团聚体粒级分布及其中真菌残体氮和细菌残体氮的含量。结果表明, 单施氮肥提高了土壤大团聚体和小团聚体的比例, 降低了微团聚体和粉黏粒的比例; 不同量氮肥与牛粪配施可提高土壤大团聚体的占比, 而降低小团聚体的占比。同一施氮量下, 配施牛粪仅能显著提高粉黏粒中的全氮含量。微生物残体氮含量占土壤全氮的35.93%~49.81%; 真菌残体氮和细菌残体氮含量分别占微生物残体氮含量的65.57%~75.83%和26.48%~35.69%。施入氮肥均可提高微生物残体氮特别是真菌残体氮的含量; 施氮量较高时, 配施牛粪提高细菌残体氮的含量。仅施氮肥和氮肥配施牛粪均降低了大、小团聚体和微团聚体中的真菌残体氮含量, 却提高了细菌残体氮含量。施用氮肥及其与牛粪配施能改变土壤团聚体的分布, 并提高土壤全氮和微生物残体氮含量; 较高施氮量时配施牛粪能提高微生物残体氮含量。

**关键词:** 干旱区; 棉田; 氮肥; 牛粪; 团聚体; 微生物残体氮

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

## Effects of Nitrogen Fertilizer Combined with Cattle Manure on Soil Aggregates and Their Microbial Residue Nitrogen in Cotton Field of Arid Area

QIN Jinxin, WU Maolin, WANG Xinyue, ZHANG Yuchen, LIU Yunhua\*, SHENG Jiandong

(College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In order to study the effects of nitrogen fertilizer and its combined application with organic fertilizer on the occurrence and distribution of microbial residual nitrogen in aggregates in farmland soils in arid areas, a field positioning test was carried out in Shaya County, Aksu Prefecture, southern Xinjiang. A total of 10 treatments were set up with 5 nitrogen application rates (0, 200, 300, 400, 500 kg/hm<sup>2</sup>) and 5 nitrogen application rates combined with cattle manure (3 000 kg/hm<sup>2</sup>). In the third year of the experiment, the particle size distribution of soil aggregates, the contents of fungal and bacterial residue nitrogen were determined at the boll opening stage of cotton. The results showed that, single application of nitrogen fertilizer increased the proportion of large and small aggregates and decreased the proportion of micro aggregates, silts and clays; different amounts of nitrogen fertilizer with cattle manure increased the proportion of large aggregates and decreased the proportion of small aggregates. The same amount of nitrogen application with cattle manure only significantly increased the total nitrogen content in silts and clays. The proportion of microbial residue nitrogen content to total nitrogen content ranged from 35.93% to 49.81%, and the proportion of fungal and bacterial residue nitrogen contents to microbial residue nitrogen content ranged from 65.57% to 75.83% and 26.48% to 35.69%, respectively. The application of nitrogen fertilizer increased the content of microbial residual nitrogen, especially the fungal residual nitrogen; when the application of nitrogen was higher, the dosing of cattle manure increased the content of microbial residual nitrogen from bacteria. Both nitrogen only and nitrogen fertilizer with cattle manure decreased fungal residual

<sup>①</sup>基金项目: 阿克苏棉花绿色增产增效技术集成与示范项目(ZYYD2024CG03)、国家重点研发计划子课题(2022YFD190010304)和新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)资助。

\* 通信作者(yunhua.liu@xjau.edu.cn)

作者简介: 秦金鑫(1998—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: 1522607876@qq.com

nitrogen content in large and small aggregates and microaggregates, but increased bacterial residual nitrogen content. In conclusion, the application of nitrogen fertilizer and its combination with cattle manure altered the distribution of aggregates and increased the total and microbial residual nitrogen content in soil; and the combination of cattle manure contributed to the accumulation of microbial residual nitrogen at higher nitrogen application rates.

**Key words:** Arid area; Cotton field; Nitrogen fertilizer; Cattle manure; Aggregate; Microbial residue nitrogen

氮是植物生长发育需要量最大的元素<sup>[1]</sup>。植物吸收的氮素有 50% ~ 80% 来自土壤氮库<sup>[2]</sup>。其中, 微生物主导的固氮作用是增加土壤氮素的重要途径之一, 且微生物本身也可作为氮的来源。活体微生物量氮占土壤总有机氮库的 1% ~ 5%<sup>[3]</sup>。但是, 微生物通过细胞增殖和死亡等连续迭代途径驱动其残体的累积, 使得其残体能贡献 80% 以上的有机氮和近 60% 的全氮<sup>[4]</sup>。其中, 真菌残体对全氮的贡献占 40% ~ 60%, 细菌残体占 10% ~ 12%<sup>[5]</sup>。因此, 微生物残体是重要的土壤氮库。此外, 微生物残体还可作为潜在的缓效性氮库, 在土壤氮素的储存与供应上具有重要作用。例如, Wang 等<sup>[6]</sup>利用  $^{15}\text{N}$  标记示踪法对微生物及残体进行了培育试验, 发现微生物残体氮在 231 d 的室内培养中有 60% 以上转化为了硝态氮。进一步的研究发现, 土壤微生物残体氮与矿质氮之间存在二次曲线相关关系, 即在一定含量范围内, 矿质氮含量随微生物残体氮的增加而增加; 在矿质氮含量较低时, 微生物残体氮会矿化以补充矿质氮<sup>[5]</sup>。

氨基糖是微生物细胞壁的主要成分, 是应用最广泛的微生物残体标识物。目前能被检测的氨基糖包括氨基葡萄糖、氨基半乳糖、氨基甘露糖和胞壁酸, 其中, 氨基葡萄糖主要来源于真菌细胞壁, 而胞壁酸只在细菌细胞壁中被发现<sup>[7]</sup>。目前已经具有较为完善的使用氨基糖含量计算真菌和细菌微生物残体碳氮含量的方法<sup>[8]</sup>。

土壤团聚体是碳氮等养分的贮存库, 其粒径大小与养分含量密切相关<sup>[9]</sup>。微生物会通过产生胞外多糖和黏合物质等分子促进土壤颗粒之间的结合, 促进团聚体的形成, 而团聚体作为微生物、酶和底物之间的物理屏障, 也能使得其内的微生物残体具有较高的稳定性<sup>[10]</sup>。较大粒径团聚体中微生物残体含量较高。并且, 较大粒级团聚体的孔隙结构适合真菌生长, 所以真菌残体含量高, 而微小粒级团聚体能为细菌提供较多保护作用, 使得细菌残体多聚集于较小的团聚体中<sup>[11]</sup>。

施用氮肥是增加农田生态系统土壤氮含量的主要措施。施氮能够影响土壤团聚体的组成。例如, 郭戎博等<sup>[12]</sup>在西北旱区褐土进行的定位试验发现, 长期施氮增加了大团聚体比例; 但是, 李彩霞等<sup>[13]</sup>在

潮土上的试验发现, 施氮会促使大团聚体转化为较小的团聚体, 且不利于微团聚体和粉黏粒团聚形成大团聚体。关于施氮对微生物残体氮的影响, 在我国西北和华中地区农田进行的长期试验表明, 施用适宜量的氮肥有利于微生物残体特别是真菌残体的累积, 能提升氮库的稳定性, 而施氮不足或过量施氮则增加了细菌在氮素积累中的贡献, 不利于氮库的稳定<sup>[14]</sup>。

有机肥具有肥效长、可补充土壤肥力等优点, 施用有机肥可以提高氮肥的利用效率, 也可减少氮肥的施用量<sup>[15]</sup>。有机无机肥配施是当前倡导的提高氮肥利用率的主要手段。有机无机肥配施也能够改变土壤微生物残体氮含量。例如, Ding 等<sup>[16]</sup>的研究发现, 连续 3 年以尿素为氮源向黏土中施入 90 kg/hm<sup>2</sup> 的纯氮, 并配施 3 750 kg/hm<sup>2</sup> 的猪粪, 可使氨基糖含量增加 8.40%

新疆是典型的干旱区, 也是我国重要的棉花产区。但是, 新疆农田土壤全氮含量低, 均值仅为 0.80 ~ 0.90 g/kg, 依据全国第二次土壤普查推荐的土壤肥力分级标准, 属于较低水平<sup>[17]</sup>。新疆农田氮肥施用量较大, 2023 年就达 103.8 万吨<sup>[18]</sup>。因此, 在新疆棉田实行有机无机肥配施以增加土壤氮含量和提高氮肥利用率更有必要。牛粪是新疆畜禽养殖粪污产出比例最大的有机肥源, 每年产出 3 500 万吨以上(鲜重), 腐熟牛粪是新疆常用的有机肥<sup>[19]</sup>。基于新疆棉田施肥的实情, 本研究在新疆主要棉花产区阿克苏地区沙雅县进行了 3 年的田间定位试验, 以研究氮肥施入及其与牛粪配施对土壤团聚体分布以及不同粒级团聚体中细菌残体氮和真菌残体氮含量的影响, 以期深入了解施氮水平及其与有机肥配施对干旱区农田土壤氮赋存和形态的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验田位于新疆阿克苏地区沙雅县海楼镇(82°72' E, 41°28' N), 该地属温带大陆性气候, 风向为北风或东北风, 平均日照 8.3 h, 平均气温 10.7 °C, 年均降水量 47.3 mm, 年均蒸发量 2 000.7 mm。供试土壤为棕漠土, 种植作物为棉花, 播种前 0 ~ 20 cm

的土壤养分、各粒级团聚体占比以及不同粒级团聚体

中微生物残体氮的含量见表 1 和表 2。

表 1 土壤养分状况  
Table 1 Soil nutrient status

pH	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	微生物残 体氮(g/kg)	真菌残体氮 (g/kg)	细菌残体 氮(g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	有效钾 (mg/kg)
7.85	318.00	11.14	0.51	13.54	0.27	0.08	0.19	0.80	19.04	13.42	162.22

表 2 土壤各粒级团聚体占比及其中全氮和微生物残体氮的含量

Table 2 Proportion of aggregates in each particle size, total nitrogen and microbial residue nitrogen content

团聚体粒级(mm)	团聚体占比(%)	全氮含量(g/kg)	微生物残体氮(g/kg)	真菌残体氮(g/kg)	细菌残体氮(g/kg)
大团聚体(>2)	20.88	0.45	0.28	0.24	0.04
小团聚体(0.25~2)	19.80	1.01	0.29	0.22	0.07
微团聚体(0.053~0.25)	40.35	0.78	0.32	0.25	0.06
粉黏粒(<0.053)	18.96	0.22	0.18	0.10	0.09

## 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 氮肥水平依据当地施肥量, 设置 5 个水平, 分别为 0、200、300、400 和 500 kg/hm<sup>2</sup>, 分别记为 N<sub>0</sub>、N<sub>200</sub>、N<sub>300</sub>、N<sub>400</sub> 和 N<sub>500</sub>; 另在 5 个氮肥处理水平上配施 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 的腐熟牛粪, 分别记为 N<sub>0</sub><sup>+</sup>、N<sub>200</sub><sup>+</sup>、N<sub>300</sub><sup>+</sup>、N<sub>400</sub><sup>+</sup> 和 N<sub>500</sub><sup>+</sup>。牛粪在播种前作为基肥一次性施入土壤耕层(0~20 cm)。牛粪养分含量见表 3。

表 3 牛粪养分含量

Table 3 Nutrient contents of cattle manure

有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
136.25	8.03	3.42	4.89	14.66	19.86	16.99

试验中施用的氮、磷、钾肥分别为尿素(N 含量≥46%)、重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量≥46%)和硫酸钾(K<sub>2</sub>O 含量≥52%)。氮肥按照基肥与追肥 1:4 的比例施用。不同处理的磷、钾肥施用量相同, 均为当地推荐施用量, 分别为 160 kg/hm<sup>2</sup>(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)和 90 kg/hm<sup>2</sup>(以 K<sub>2</sub>O 计)。磷肥和钾肥全部作为基肥在播种前施用。

田间试验自 2021 年 4 月开始, 每年施肥方式及用量相同。每个处理 3 个重复, 共计 30 个田间试验小区, 每个小区面积为 10 m×6.6 m。棉花品种为源棉 8 号, 种植模式为一膜六行, 宽窄行 66 cm+10 cm 的膜下滴灌, 理论株数为 180 000 株/hm<sup>2</sup>。全生育期共灌水 10 次, 总计灌水量 4 200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。棉田化控、防病虫害等管理措施按生产实际进行, 各处理之间保持一致。

## 1.3 样品采集与测定

2023 年 9 月 22 日, 在棉花吐絮期进行样品采集。每个小区内按 5 点取样法采集 0~20 cm 耕层土壤样

品, 充分混合后, 一部分用于团聚体分级, 分级后的团聚体测定其中氨基糖含量; 一部分风干后过 0.15 mm 筛用于测定土壤全氮含量。

用全自动振动筛分仪(Retsch AS200 control, 德国)对土壤团聚体进行分级。称取去除杂质的新鲜土壤样品 100 g, 将土壤样品均匀置于由 2、0.25、0.053 mm 组成的套筛的顶部, 将套筛置于土壤团粒分析仪内, 振幅设置为 3.8 cm, 振频设置为 30 次/min, 筛分 15 min, 将土壤筛分为大团聚体(>2 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)、粉黏粒(<0.053 mm)4 个粒级<sup>[20]</sup>。

土壤全氮含量用元素分析仪(EA3000)测定; 氨基糖测定采用邻苯二酚(O-Phthalaldehyde, OPA)柱前衍生-高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)<sup>[21]</sup>。步骤为取 1 g 干土于水中, 加入 10 mL 盐酸(6 mol/L), 105 °C 下烘干 6 h 后进行水解, 并使用 OPA 衍生, 使用配备十八烷基硅烷键合硅胶填料(Octadecylsilyl, ODS)的高效液相色谱仪分离, 使用激发波长为 330 nm 和发射波长为 445 nm 的荧光检测器检测, 采用混合氨基糖的标准溶液色谱图对氨基糖进行鉴定和定量。

## 1.4 数据处理与统计分析

使用氨基葡萄糖和胞壁酸的含量分别计算真菌残体氮和细菌残体氮的含量<sup>[8]</sup>:

$$\text{真菌残体氮含量(g/kg)} = (\text{氨基葡萄糖含量} / 179.17 \times \text{胞壁酸含量} / 251.23) \times 179.17 \times 1.4$$

$$\text{细菌残体氮含量(g/kg)} = \text{胞壁酸含量} \times 6.67$$

$$\text{微生物残体氮含量(g/kg)} = \text{真菌残体氮含量} + \text{细菌残体氮含量}$$

以上公式是假定细菌细胞中氨基葡萄糖和胞壁酸的摩尔比为 2:1。其中, 179.17 是氨基葡萄糖的

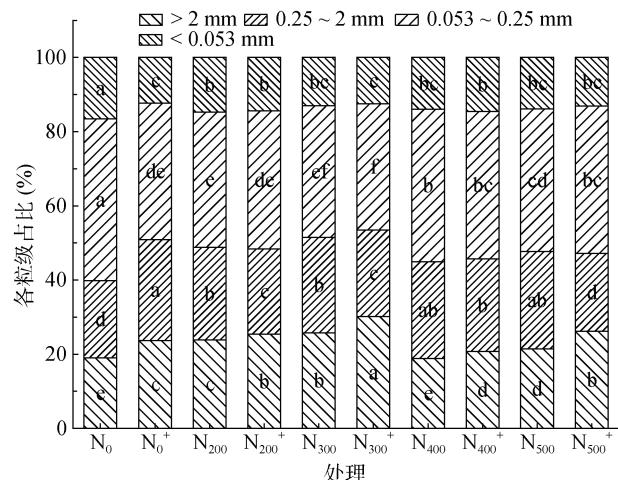
分子质量, 251.23 是胞壁酸的分子质量, 1.4 为氨基葡萄糖向真菌残体氮的转化系数, 6.67 为胞壁酸向细菌残体氮的转化系数。

使用 SPSS 25.0 软件中的单因素方差分析检验不同处理间全氮含量和不同处理下同一粒级团聚体内全氮、微生物残体氮、真菌残体氮和细菌残体氮含量的差异性; 使用双因素方差分析检验氮肥用量、牛粪添加及其交互作用对团聚体分布及其全氮和微生物残体氮含量的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥及其与牛粪配施对土壤各粒级团聚体分布的影响

由图 1 可知, 施用氮肥及与牛粪配施处理大团聚体、小团聚体、微团聚体和粉黏粒占比分别为 19.01% ~ 30.08%、20.80% ~ 26.33%、34.02% ~ 43.62% 和 12.35% ~ 16.56%。单施氮肥时, 施用量为 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 大团聚体占比较高; 相比于不施氮肥, 各施氮量处理均提高了小团聚体的占比, 但降低了微团聚体和粉黏粒的占比; 不同施氮量对小团聚体和粉黏粒占比的影响没有显著差异; 施用量为 400 kg/hm<sup>2</sup> 时, 微团聚体占比较大(图 1)。



(图中小写字母不同表示相同粒级团聚体不同处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下同)

图 1 氮肥及其与牛粪配施对土壤各粒级团聚体占比的影响

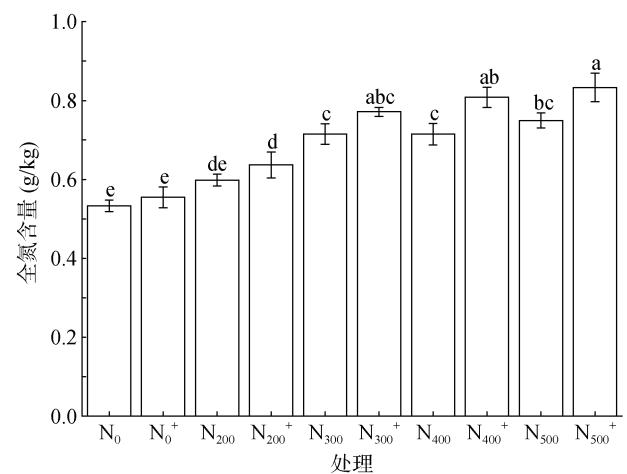
Fig. 1 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on proportion of soil aggregates

在同一施氮量下, 配施牛粪相比于单施氮肥显著增加了大团聚体占比。在施氮 300 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪对大团聚体占比的增加幅度最大, 为 30.18%; 在施氮量为 200、300 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 牛粪配施与仅

施入同量氮肥相比, 显著减小了小团聚体的占比; 不施氮肥时, 增施牛粪降低了微团聚体和粉黏粒的占比; 在其他施氮量时, 配施牛粪对微团聚体和粉黏粒的占比没有显著影响(图 1)。

### 2.2 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中全氮含量的影响

单施氮肥时, 随着施用量增加, 土壤全氮含量呈增加趋势。施氮量为 400 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪显著增加了土壤全氮含量, 增幅为 11.16% ~ 13.10% (图 2)。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下同)

图 2 氮肥及其与牛粪配施对土壤全氮含量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on soil total nitrogen content

小团聚体的全氮含量最高, 为 1.10 ~ 1.26 g/kg; 其次为微团聚体, 为 0.81 ~ 1.12 g/kg; 粉黏粒的全氮含量为 0.18 ~ 1.13 g/kg; 大团聚体内含量为 0.47 ~ 0.67 g/kg。单施氮肥时, 各施氮水平对不同粒级团聚体内全氮含量没有显著影响。在同一施氮量时, 牛粪配施仅能显著增加粉黏粒中的全氮含量, 并随着施氮量的增加而增加(图 3)。

### 2.3 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中微生物残体氮含量的影响

土壤微生物残体氮含量占全氮含量的 35.93% ~ 49.81%。相比于对照, 施入氮肥可提高微生物残体氮含量, 但不同施氮量处理间无显著差异。施氮量为 400 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪显著增加微生物残体氮含量(图 4)。

微团聚体中的微生物残体氮含量最高, 为 0.27 ~ 0.33 g/kg; 其次为小团聚体, 为 0.28 ~ 0.32 g/kg; 粉黏粒中含量为 0.19 ~ 0.31 g/kg; 大团聚体中含量最低, 为 0.18 ~ 0.27 g/kg(图 5)。与不施氮相比, 施氮

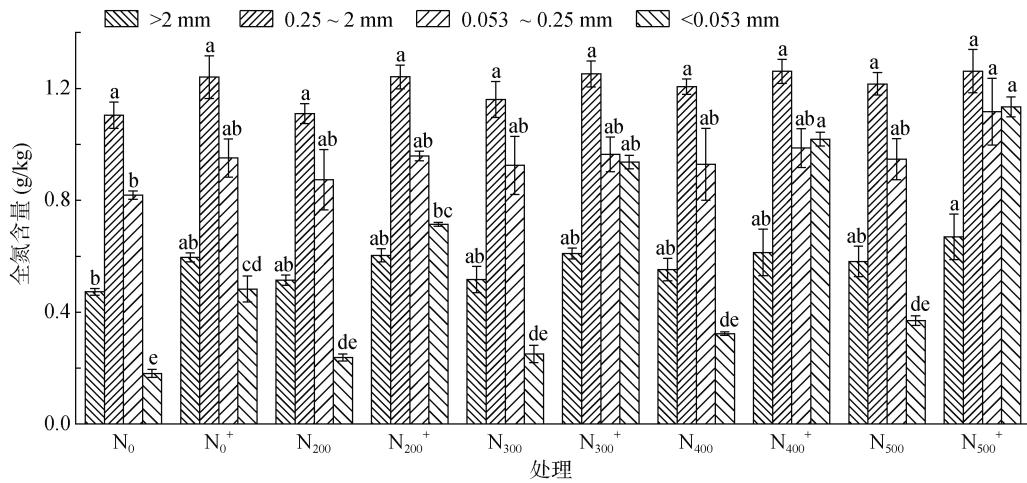


图 3 氮肥及其与牛粪配施对各粒级团聚体中全氮含量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on total nitrogen contents in aggregates with different particle sizes

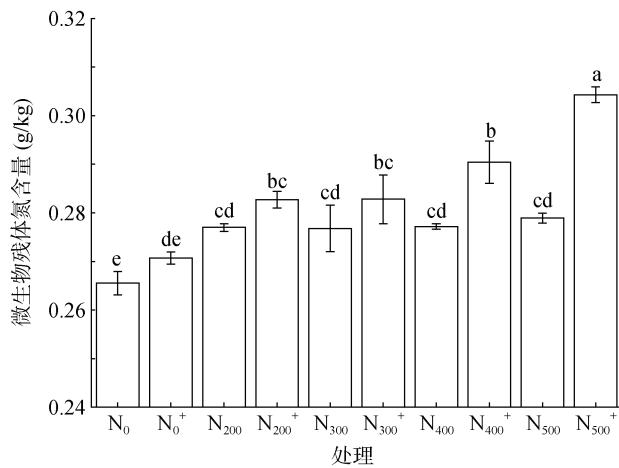


图 4 氮肥及其与牛粪配施对土壤中微生物残体氮含量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on nitrogen contents of microbial residues in soil

300 和 400 kg/hm<sup>2</sup> 显著降低了大团聚体中的微生物残体氮含量；施氮 200 和 400 kg/hm<sup>2</sup> 显著降低了小团聚体及微团聚体中的含量；粉黏粒中的含量则随着施氮量的增加而增加，其中施氮 500 kg/hm<sup>2</sup> 时，相比于不施氮肥，含量增加了 64.22%。同一施氮量下，配施牛粪显著增加了微团聚体中微生物残体氮的含量，其中施氮量为 200 kg/hm<sup>2</sup> 时配施牛粪使微生物残体氮含量的增加幅度最大，为 13.49%。

#### 2.4 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中真菌残体氮含量的影响

真菌残体氮含量分别占土壤微生物残体氮和全氮含量的 65.57%~75.83% 和 24.78%~36.18%。单施氮肥均可提高真菌残体氮含量，施氮量为 500 kg/hm<sup>2</sup> 时含量较高，为 0.21 g/kg。同一施氮量下，配施牛粪与仅施氮肥相比，并没有增加真菌残体氮的含量(图 6)。

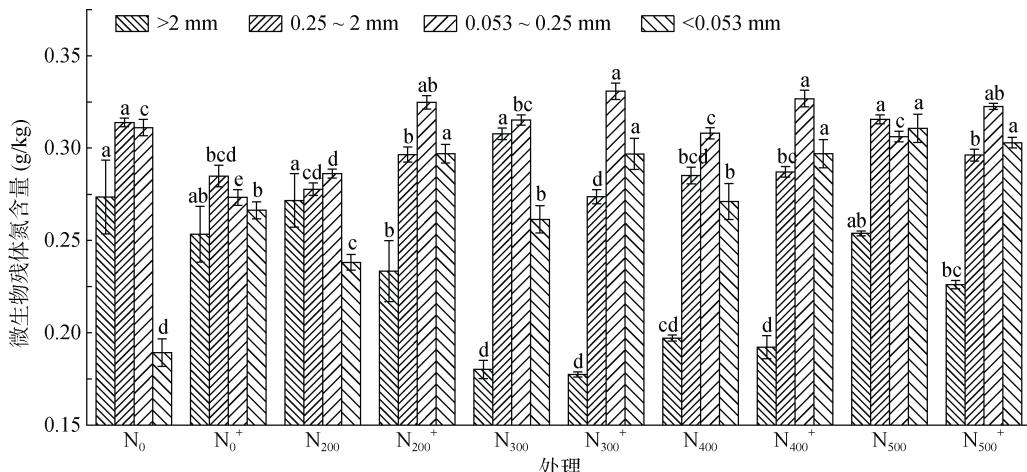


图 5 氮肥及其与牛粪配施对各粒级团聚体中微生物残体氮含量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on microbial residue nitrogen contents in aggregates with different particle sizes

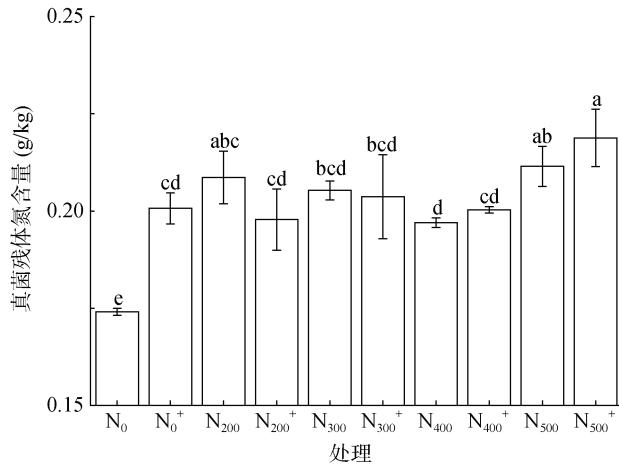


图 6 氮肥及其与牛粪配施对土壤中真菌残体氮含量的影响

Fig. 6 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on nitrogen content of fungal residues in soil

微团聚体中的真菌残体氮含量最高, 为 0.19 ~ 0.26 g/kg; 其次为小团聚体, 为 0.18 ~ 0.25 g/kg; 粉黏粒中含量为 0.09 ~ 0.23 g/kg; 大团聚体中的含量最低, 为 0.11 ~ 0.21 g/kg(图 7)。与不施氮肥相比,

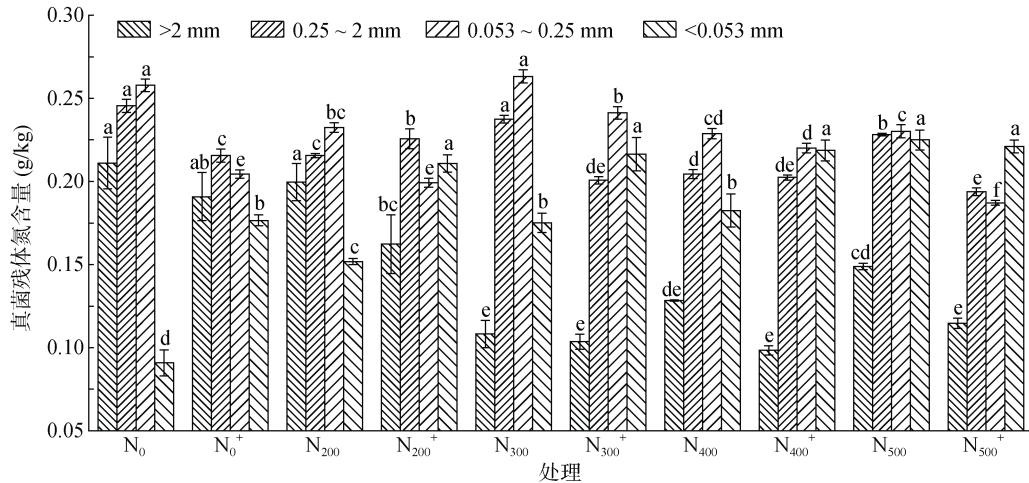


图 7 氮肥及其与牛粪配施对各粒级团聚体中真菌残体氮含量的影响

Fig. 7 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on fungal residue nitrogen contents in aggregates with different particle sizes

微团聚体中的细菌残体氮含量最高, 为 0.067 ~ 0.119 g/kg; 其次为大团聚体, 为 0.063 ~ 0.111 g/kg; 粉黏粒和小团聚体内的含量分别为 0.078 ~ 0.098 g/kg 和 0.068 ~ 0.102 g/kg(图 9)。单施氮肥时, 大团聚体、小团聚体和微团聚体中的细菌残体氮含量随着施氮量的增加呈现逐渐增大趋势; 而粉黏粒中细菌残体氮含量却随着施氮量的增加而减小。施氮量为 200 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪显著增加了小团聚体和微团聚体内的细菌残体氮含量; 施氮 400 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪增加了大团聚体内细菌残体氮含量, 但降低了粉黏粒

施氮均显著降低了大团聚体中的真菌残体氮含量; 施氮 200、400 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 显著降低了小团聚体及微团聚体中的含量; 粉黏粒中的含量则随着施氮量的增加而增加, 其中施氮 500 kg/hm<sup>2</sup> 相比于不施氮, 增加了 21.48%。同一施氮量下, 配施牛粪显著降低施氮 300 kg/hm<sup>2</sup> 时小团聚体和微团聚体内真菌残体氮的含量, 并且显著降低施氮 500 kg/hm<sup>2</sup> 时大团聚体、小团聚体和微团聚体内真菌残体氮的含量; 施氮量为 200、300 和 400 kg/hm<sup>2</sup> 时配施牛粪显著增加了粉黏粒中真菌残体氮的含量。

## 2.5 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中细菌残体氮含量的影响

细菌残体氮含量分别占微生物残体氮以及全氮含量的 26.48% ~ 35.69% 和 9.97% ~ 13.19%。单施氮肥时, 施氮量为 400 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 时显著增加了细菌残体氮含量。施氮量为 200、300 和 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪显著增加了细菌残体氮含量, 其中施氮量为 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 增加幅度最大, 为 17.03%(图 8)。

内的含量; 施氮量为 500 kg/hm<sup>2</sup> 时, 配施牛粪显著增加了小团聚体和微团聚体中细菌残体氮的含量。

## 3 讨论

### 3.1 氮肥及其与牛粪配施对土壤团聚体粒级分布的影响

单施氮肥增加了大团聚体和小团聚体的比例, 而降低了微团聚体和粉黏粒的比例; 氮肥与牛粪配施增加了大团聚体的比例, 而降低了小团聚体的比例。这与以往的研究结果类似<sup>[22]</sup>。适宜的施氮量和有机肥

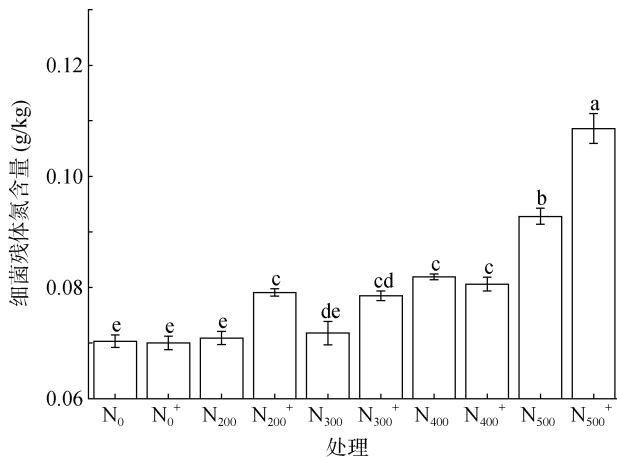


图 8 氮肥及其与牛粪配施对土壤中细菌残体氮含量的影响  
Fig. 8 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on nitrogen content of bacterial residues in soil

施入可促进植物和土壤微生物的生长,产生更多由根系分泌物、植物残体和微生物的代谢产物组成的有机

碳,而有机碳可作为胶结物质将粒径较小的团聚体结合形成更多的较大粒级的团聚体,因此导致大团聚体的比例增加而较小粒级团聚体比例下降<sup>[23]</sup>。

### 3.2 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中全氮含量的影响

同一施氮量下,配施牛粪能增加土壤的全氮含量。这是因为牛粪等有机肥养分释放速度缓慢,可有效缓解氮素的淋溶损失,并且自身也携带大量微生物,可促进微生物的代谢作用,增加微生物活性和数量,从而增加土壤氮的含量<sup>[24]</sup>。本研究中,小团聚体的全氮含量最高,而粉黏粒中含量最低。王怡宁等人<sup>[25]</sup>也发现,与小粒级团聚体相比,更大的粒级中含有更多的碳氮。这是因为,较大粒级的团聚体是较小粒级团聚体由有机胶结物质结合而形成,除了拥有较小粒级团聚体内养分,还拥有菌丝或根系分泌物等其他胶结物质的养分<sup>[9]</sup>。

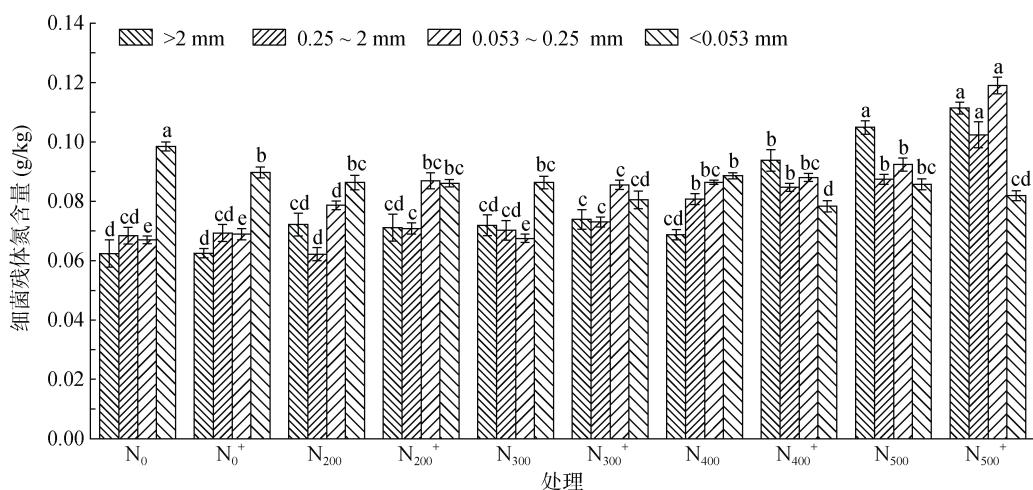


图 9 氮肥及其与牛粪配施对各粒级团聚体中细菌残体氮含量的影响  
Fig. 9 Effect of nitrogen fertilizer combined with cattle manure on bacterial residue nitrogen contents in aggregates with different particle sizes

以往关于施肥对不同粒级团聚体中养分分配影响的研究结果并不一致。例如,有研究发现,施氮肥显著提高各粒级团聚体中全氮含量<sup>[26]</sup>;另有研究发现,化肥与牛粪配施仅能增加大团聚体中的全氮含量<sup>[27]</sup>。但在本研究中,单施氮肥对不同粒级团聚体内全氮含量都没有显著影响,这说明,本研究中单施氮肥是通过改变团聚体的比例而影响土壤全氮含量的。而且,在同一施氮量时,牛粪配施仅能显著增加粉黏粒中的全氮含量,这可能与粉黏粒对氮稳定性有较强的保护作用有关。

### 3.3 氮肥及其与牛粪配施对土壤和各粒级团聚体中微生物残体氮含量的影响

本研究中,微生物残体氮占全氮的百分比范围为

35.93%~49.81%,而 Liang 等人<sup>[8]</sup>研究表明微生物残体来源的氮素对全氮的贡献为 40% 以上。本研究中微生物残体氮占比出现偏低的原因可能是:干旱区因降雨量较小,土壤中的养分含量低于其他地区,导致微生物的数量和活性也较低<sup>[28]</sup>。真菌残体氮含量占微生物残体氮含量的百分比高于细菌残体氮,这是因为真菌具有比细菌更厚的细胞壁和菌丝结构而使其生物量较大;再者,土壤有机质主要由真菌分解,所以真菌残体的累积量更大<sup>[29]</sup>。本研究中,真菌和细菌残体氮均在微团聚体中较高,这可能是因为黏粒和粉粒是微生物残体积累的主要贮存库<sup>[30-31]</sup>。

单施氮肥时,施氮量大于 200 kg/hm<sup>2</sup> 时,微生物残体氮含量不再增加。氮肥的施入会提高土壤微生物

物活性, 增加微生物的生物量和氨基糖的累积, 从而增加微生物残体氮含量<sup>[32]</sup>, 但过多地施用氮肥又会限制微生物的生长和代谢<sup>[33]</sup>。有机肥的输入为土壤微生物提供更多的基质, 使微生物的增殖过程变得更加频繁, 导致土壤中微生物生物量的增加, 增大了微生物残体在土壤中的累积<sup>[34]</sup>。本研究还发现, 只有在较高水平的氮肥(400和500 kg/hm<sup>2</sup>)与牛粪配施时, 微生物残体氮含量才有所增加, 这表明有机肥有助于将过多的氮转化为更稳定的氮库。

单施氮肥均可提高真菌残体氮的含量, 但在较高施氮水平时才能增加细菌残体氮含量。这可能是因为低氮水平时, 因活性养分较少, 易降解的底物含量比例较低, 难以被细菌利用, 而更有利于真菌群落的生长, 导致真菌残体氮的累积较明显<sup>[35]</sup>。而当施氮量增大, 土壤中的养分环境满足细菌生长需求时, 细菌的活性增加, 从而使细菌残体氮的累积逐渐增大<sup>[36]</sup>。与仅施氮肥相比, 氮肥配施牛粪仅增加了细菌残体氮含量。这表明微生物残体的积累受有机肥质量的影响, 粪肥为适宜碳氮比较低的细菌生存提供合适的养分, 更有利于促进细菌的生长繁殖。

无论是仅施氮肥还是氮肥与牛粪配施, 并没有增加各粒径团聚体中的微生物残体氮, 甚至会降低微生物残体氮, 说明氮肥及其与牛粪配施会导致微生物残体在团聚体中损失或向其他粒级团聚体中迁移。以往有研究表明, 较大粒径团聚体中的养分相比于较小粒径的团聚体更易受到施肥等农业措施的影响<sup>[37]</sup>。但在本研究中, 氮肥及其与牛粪配施对粉黏粒中的微生物残体氮影响也较大。此外, 大团聚体、小团聚体和微团聚体中真菌残体氮的含量随着施氮量的增大而减小, 而细菌残体氮含量却随之增大。

## 4 结论

单施氮肥及其与牛粪配施提高较大粒级团聚体的比例; 单施氮肥对土壤全氮含量的影响是通过改变团聚体的比例, 而非通过影响团聚体中的全氮含量; 在同一施氮量时, 牛粪配施仅能显著提高粉黏粒中的全氮含量。较高的施氮量并不利于微生物残体氮的增加, 但与牛粪配施时却有助于微生物残体氮的积累; 单施氮肥均可提高真菌残体氮的含量, 但在较高施氮水平时才能增加细菌残体氮含量; 牛粪配施仅提高了细菌残体氮含量。氮肥及其与牛粪配施均未能提高各粒径团聚体中的微生物残体氮含量。

## 参考文献:

- [1] 张敏, 田玉华, 尹斌, 等. 稻田氮素淋失测定方法的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 440–445.
- [2] Stevens W B, Hoeft R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. interactions with soil nitrogen[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4): 1037–1045.
- [3] Li W J, Li J H, Knops J M H, et al. Plant communities, soil carbon, and soil nitrogen properties in a successional gradient of sub-alpine meadows on the eastern Tibetan Plateau of China[J]. Environmental Management, 2009, 44(4): 755–765.
- [4] Liu Y, Tian J, He N P, et al. Global microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 19: 3578–3590.
- [5] 马南, 安婷婷, 张久明, 等. 添加玉米秸秆和根茬对不同肥力黑土微生物残体碳氮的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(4): 686–696.
- [6] Wang X, Wang C, Cotrufo M F, et al. Elevated temperature increases the accumulation of microbial necromass nitrogen in soil via increasing microbial turnover[J]. Global Change Biology, 2020, 26(9): 5277–5289.
- [7] 王子郡, 黄菁华, 麦建军, 等. 外源有机物料性质对黑土农田土壤微生物碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(5): 980–995.
- [8] Liang C, Amelung W, Lehmann J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3578–3590.
- [9] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7–31.
- [10] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1625–1632.
- [11] 薛萍落. 玉米不同残体添加对棕壤团聚体中氨基糖和微生物残体氮的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [12] 郭戎博, 李国栋, 潘梦雨, 等. 秸秆还田与施氮对耕层土壤有机碳储量、组分和团聚体的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(20): 4035–4048.
- [13] 李彩霞, 陈津赛, 付媛媛, 等. 施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 59–64, 80.
- [14] Hu Q Y, Liu T Q, Ding H N, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil microbial residues and their contribution to soil organic carbon and total nitrogen in a rice-wheat system[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 181: 104648.
- [15] 段海芹, 秦秦, 吕卫光, 等. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1486–1495.
- [16] Ding X L, Han X Z, Zhang X D. Long-term impacts of manure, straw, and fertilizer on amino sugars in a silty clay loam soil under temperate conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(7): 949–954.

- [17] 谢家迅. 浅析测土配方施肥技术在新疆棉花生产上的应用[J]. 南方农业, 2023, 17(16): 255–257.
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [19] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 103–111.
- [20] 安丰华. 苏打盐渍土团聚体稳定性与有机质组分变化的机理研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2022.
- [21] Indorf C, Dyckmans J, Khan K S, et al. Optimisation of amino sugar quantification by HPLC in soil and plant hydrolysates[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(4): 387–396.
- [22] 于锐, 王其存, 朱平, 等. 长期不同施肥对黑土团聚体及有机碳组分的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 594–600.
- [23] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3–22.
- [24] 孙泰朋. 生物质炭对黑土土壤团聚体稳定性及活性有机碳影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [25] 王怡宁, 郝鲜俊, 高文俊, 等. 有机肥对矿区复垦土壤团聚体活性有机碳含量的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(11): 1299–1306.
- [26] 郭子繁. 我国北方典型农田土壤团聚体氮素累积与淋溶特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [27] 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: 武汉理工大学, 2014.
- [28] 蒋烨林, 王让会, 彭擎, 等. 基于熵权物元模型的土壤养分评价: 以新疆干旱区艾比湖流域人工绿洲为例[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(9): 852–859.
- [29] López-Mondéjar R, Brabcová V, Štursová M, et al. Decomposer food web in a deciduous forest shows high share of generalist microorganisms and importance of microbial biomass recycling[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(7): 1768–1778.
- [30] 张彬, 陈奇, 丁雪丽, 等. 微生物残体在土壤中的积累转化过程与稳定机理研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1479–1491.
- [31] Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 61–82.
- [32] 霍海南, 李杰, 张效琛, 等. 不同施肥管理措施对农田土壤中植物和微生物残留组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3060–3066.
- [33] 裴志福, 红梅, 尚星玲, 等. 氮添加对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响: 基于 Meta 分析[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1129–1136.
- [34] Peltre C, Gregorich E G, Bruun S, et al. Repeated application of organic waste affects soil organic matter composition: Evidence from thermal analysis, FTIR-PAS, amino sugars and lignin biomarkers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 117–127.
- [35] 李俊娣, 张玉铭, 赵宝华, 等. 长期添加外源有机物料对华北平原不同粒级土壤氮素和氨基糖的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 507–518.
- [36] 胡可, 王利宾. BIOLOG 微平板技术在土壤微生态研究中的应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 819–821.
- [37] 宋红梅, 吴昕阳, 石馨晔, 等. 长期施肥对黄土旱塬麦田土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(4): 726–734.