doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19490

减施化肥下紫云英翻压量对土壤团聚体及铁锰氧化物的影响

徐永昊¹,聂 军²,鲁艳红²,耿明建¹,黄 丽^{1*}

(1. 华中农业大学,农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,湖北 武汉 430070;2. 湖南省土壤肥料研究所,农业农村部湖南耕地保育科学观测实验站,湖南 长沙 410125)

摘 要: 以湖南省南县长期紫云英 – 双季稻轮作的土壤为对象,在化肥减量 20% 和 40%,紫云英翻压量 15、 22.5、30、37.5 t · hm⁻² 4 个水平下,研究减量化肥与翻压不同量紫云英的土壤团聚体中铁锰氧化物的变化及与团聚体水稳性的关系。结果表明:(1)与对照[紫云英翻压(MV)和施用 100% 化肥(F)处理]相比,减施 20% 和 40% 化肥配施紫云英增加了 >0.25 mm 团聚体的含量,降低了 <0.25 mm 团聚体的含量;减施化肥下紫云英翻压量为 15 和 22.5 t · hm⁻² 时团聚体稳定性提高 8.91% ~ 45.45%。(2)与对照相比,减施化肥 20% 紫云英翻压量为 15 ~ 30 t · hm⁻² 时J聚体稳定性提高 8.91% ~ 45.45%。(2)与对照相比,减施化肥 20% 紫云英翻压量为 15 ~ 30 t · hm⁻² 时,土壤团聚体的游离铁锰含量随着翻压量的增加呈现下降的趋势,但非晶质、络合铁锰含量分别显著提高 7.70% ~ 72.31% 和 10.75% ~ 58.53%。(3)相关性与通径分析显示,化肥减施与紫云英翻压下土壤团聚体 稳定性主要取决于铁氧化物的含量;而在铁氧化物中,非晶质与络合态铁对团聚体稳定性的提高起直接作用。 关键词:化肥减施;紫云英;团聚体;铁锰氧化物

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,对土壤 理化性质有着重要影响,是土壤肥力的基础^[1]。良 好的团聚体组成可促进植物对土壤养分的吸收,维 持生物群落多样性,抵抗地表土壤侵蚀^[2]。土壤团 聚体的分布与稳定性受到众多因素的影响;通常, 团聚体稳定性与团聚体的胶结物质呈正相关^[3]。氧 化物是团聚体的重要胶结物质之一,其在土壤中的 类型、含量以及分布等直接影响土壤团聚体的形成 与稳定^[4]。

紫云英是南方稻田的一种主要绿肥作物,紫 云英翻压能够提高土壤有机质含量,且能长效地 为土壤提供氮素,一定程度上起到替代化肥的作 用^[5]。曹卫东等^[6]研究认为,在翻压紫云英 22.5 t·hm⁻²后,减少 20% ~ 40% 的化肥用量,水稻产 量仍有提高。在实际生产中,紫云英作为有机物料 加入土壤中被微生物分解产生胶结物质^[7],促使 土壤颗粒粘结形成团聚体,且微生物分解利用产 生的代谢产物提高了团聚体的稳定性,有研究指

收稿日期: 2019-10-19; 录用日期: 2019-12-27

出,翻压紫云英虽未显著提高土壤中大团聚体的含量,但明显提高了团聚体的稳定性,随着紫云英翻压量的提高,团聚体平均重量直径(MWD)逐渐增加^[8]。紫云英作为有机肥,其翻压在影响土壤团聚体分布的同时,可以改变团聚体中氧化物的分布,在不同程度上影响氧化物的转化^[9]。有报道,长期施用化肥及化肥与紫云英、稻草、猪粪配施显著地提高了各级团聚体中的非晶质铁含量(增幅10.5%~58.5%),降低了游离铁的含量(降幅0.4%~13.8%),团聚体中铁的活化度提高了19%~76%^[10]。

紫云英翻压能给土壤带来大量的外源有机物 料,促进土壤团聚体的形成,并且水稻土频繁的干 湿交替环境也会影响铁锰氧化物的形态。目前,对 于紫云英翻压配合化肥减施的研究主要针对土壤肥 力、水稻产量等方面,而土壤团聚体中铁锰氧化物 的转化及其与团聚体稳定性之间的关系并不清楚。 为此,本文以湖南省南县长期紫云英种植还田的水 稻土为对象,探讨在化肥用量减少20%和40%的 情况下,翻压不同量紫云英对土壤团聚体水稳性以 及铁锰氧化物的影响,明确减施化肥条件下紫云英 的适宜翻压量,以期为南方双季稻种植区紫云英的 合理利用提供理论依据。

基金项目:国家绿肥产业技术体系(CARS-22);国家自然科学基金(41977020)。

作者简介: 徐永昊(1995-),男,山东青岛市人,硕士研究生, 主要从事土壤化学方面的研究。E-mail: 1257666407@qq.com。 通讯作者: 黄丽, E-mail: daisyh@mail.hzau.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2009 年在湖南省南县三仙湖乡万元 桥村(N 29°13', E 112°28',海拔高度 30 m)进 行。试验区属亚热带湿润气候,年均降水量 1 238 mm,年均气温 16.6℃,全年日照时数 1 775 h。供 试土壤为河湖沉积物母质发育的紫潮土。试验 前 耕 层 0 ~ 20 cm 土壤 的 pH 7.78、有 机 质 47.9 g・kg⁻¹、全氮 2.52 g・kg⁻¹、全磷 1.05 g・kg⁻¹、全 钾 20.9 g・kg⁻¹、碱解氮 219 mg・kg⁻¹、有效磷 23.4 mg・kg⁻¹、速效钾 92.3 mg・kg^{-1[11]}。

1.2 试验设计

设置 10 个处理:

处理1: 紫云英単独翻压(MV),不施化肥、 种植翻压紫云英 22.5 t・hm⁻²;

处理2:当地常规全量100%施肥(F),冬季 休闲、不种植翻压紫云英;

处理3至6: 化肥减量20%条件下(F80), 分别翻压15.0、22.5、30.0、37.5 t・hm⁻²紫云英 (鲜重),分别表示为: 15 t+F80, 22.5 t+F80, 30 t+F80, 37.5 t+F80;

处理7至10:化肥减量40%条件下(F60), 分别翻压15.0、22.5、30.0、37.5 t・hm⁻²紫云英 (鲜重),分别表示为:15 t+F60,22.5 t+F60,30 t+F60,37.5 t+F60;

上述减肥处理中氮、钾肥均同比例减施,磷肥 用量不变。10个处理在田间采用完全随机区组排 列,重复3次,紫云英翻压时,小区内多余紫云英 移出,若不足则从邻近地块移入、按量补足。

全量 100% 化肥施用量为: N 150 kg·hm⁻²; P₂O₅ 75 kg·hm⁻²; K₂O 120 kg·hm⁻²。氮磷钾化肥品 种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾;氮肥 50% 作 基肥于移栽前 1 d 施入,50% 作追肥在分蘖盛期施 入,磷肥和钾肥均在移栽前作基肥施入。

早稻于每年4月中旬移栽,7月中旬收获,品种(组合)为湘早籼45号;晚稻在每年7月中下旬移栽,10月中旬收获,品种(组合)为黄华占。

1.3 样品采集与测定

2018年4月紫云英盛花期,按照随机取样法 取表层(0~20 cm)土样,带回室内风干,剔除 其中的石块、根系,分别过0.85、0.25和0.15 mm 筛待测。

将一定重量土样通过孔径依次为5、2、0.25、 0.053 mm 套筛,分别称重计算出各级干筛团聚体 占土壤总量百分率,并按干筛的比例配成100g的 风干土样。然后用 Elliott^[12]的土壤团聚体湿筛法 获得不同粒径的水稳性团聚体:将样品放置于孔径 自上而下为5、2、0.25、0.053 mm 套筛之上,先用 水浸润10 min,竖直上下震荡10 min;收集各级筛 子上的团聚体并分别转移至铝盒中,依次得到>5、 5~2、2~0.25、0.25~0.053、<0.053 mm 水稳 性团聚体,然后40℃烘干称重。

水稳性团聚体稳定性指标,使用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)^[13] 表示,分别见公式(1)~(3)。

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} (\overline{X}_{i}W_{i})$$
 (1)

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^{n} W_{i} \ln \overline{X}_{i}\right)$$
(2)

$$(3-D)\lg\left(\frac{\overline{X}_{i}}{\overline{X}_{\max}}\right) = \lg\left[\frac{W_{(\delta \leq \overline{X}_{i})}}{W_{0}}\right]$$
(3)

式中: \overline{X}_i 为某级的团聚体平均直径, W_i 为该级团聚体质量的百分含量, X_{max} 为最大粒级土粒的平均直径, $W_{(\delta < \overline{X}_i)}$ 为小于 \overline{X}_i 的累积土粒质量, W_0 为土壤各粒级质量的总和。

游离态铁锰用连二亚硫酸钠 – 柠檬酸钠 – 重 碳酸钠 (DCB) 提取,非晶质铁锰用酸性草酸铵提 取,络合铁锰用焦磷酸钠提取,用原子吸收光谱法 (AA240FS 型原子吸收光谱仪)测定各形态铁锰的 含量。

1.4 数据分析

实验数据差异显著性分析、相关性分析用 SPSS 22.0,通径分析使用 R 语言, Origin 8.0 软件 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水稳性团聚体的分布和稳定性

试验结果(图1)表明,不同处理下土壤水稳 性团聚体表现出相似的分布规律。各粒级水稳性 团聚体含量由高到低依次为>5、2~0.25、5~2 和<0.053、0.25~0.053 mm。>5 mm 粒级团聚体 的含量为55.58%~80.78%,与MV处理相比,除 37.5 t+F 80、15 t+F 60处理外,其他紫云英与化肥 配施各处理均显著提高了>5 mm 团聚体的含量,

-10 -

15 t+F 80、30 t+F 80、22.5 t+F 60 处理分别增加了 43.71%、33.59%、41.20%。5~2 mm 粒级团聚体 的含量为 8.10%~ 16.95%,较 MV 处理,化肥减 施与不同紫云英翻压量处理降低了该粒级团聚体的 含量,降幅为 0.81%~ 36.04%。2~0.25 mm 粒 级团聚体的含量为 7.94%~ 17.17%,在减施化肥 20% 条件下,不同处理间表现为团聚体含量随着紫 云英翻压量的增加逐渐减小。0.25 ~ 0.053 mm 粒 级团聚体的含量为 1.29% ~ 4.88%, 15 t+F 80 处理 的含量最低,较 MV 处理降低了 69.12%。不同处 理较 MV 处理均显著地降低了 <0.053 mm 团聚体的 含量,降幅为 27.59% ~ 93.94%。



图 1 土壤团聚体的分布

注:不同小写字母表示处理之间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示组分之间差异显著(P<0.05),下同。

土壤平均重量直径(MWD)、几何平均直径 (GMD)、水稳性大团聚体百分比(WSA)反映了土 壤团聚体大小分布状况,其值越大表示团聚体的平 均团聚度越高,其稳定性也越好。与 MV 相比(表 1),各处理平均重量直径增加了0.82%~33.26%, 几何平均直径增加了6.29%~45.45%,水稳性大团

IJ

处理	MWD (mm)	GMD (mm)	WSA (%)	分形维数(D)
MV	$4.84\pm0.25~\mathrm{c}$	$1.43\pm0.14~\mathrm{c}$	$84.41 \pm 4.40 \; \rm b$	2.63 ± 0.07 a
F	6.00 ± 0.09 abc	$1.91\pm0.04~\mathrm{ab}$	$95.13 \pm 1.09 \mathrm{~ab}$	$2.35\pm0.10~{\rm abcd}$
15 t+F 80	6.45 ± 0.22 a	2.08 ± 0.06 a	98.02 ± 0.57 a	$2.17\pm0.05~\mathrm{d}$
22.5 t+F 80	$5.77 \pm 0.84 ~\rm{abc}$	$1.82\pm0.31~\rm{abc}$	$92.04\pm6.30~\mathrm{ab}$	$2.39\pm0.19~\mathrm{abcd}$
30 t+F 80	6.08 ± 0.62 abc	$1.93\pm0.22~\mathrm{ab}$	$94.80 \pm 3.59 ~\rm{ab}$	$2.28\pm0.19~\rm{bcd}$
37.5 t+F 80	$4.95\pm0.62~\mathrm{c}$	$1.57\pm0.27~{\rm bc}$	$88.21 \pm 7.37 \ \mathrm{ab}$	$2.48 \pm 0.16 \; \mathrm{abcd}$
15 t+F 60	$4.88\pm0.50\;\mathrm{c}$	$1.52\pm0.21~{\rm bc}$	$87.30\pm5.16~\mathrm{ab}$	$2.55\pm0.10~\mathrm{ab}$
22.5 t+F 60	$6.38\pm0.16~\mathrm{ab}$	2.05 ± 0.06 a	96.88 ± 1.20 a	$2.21\pm0.12~{\rm cd}$
30 t+F 60	$5.19\pm0.82~{\rm abc}$	$1.67\pm0.31~\rm{abc}$	$90.29 \pm 7.75 \mathrm{ab}$	$2.42\pm0.17~\mathrm{abcd}$
37.5 t+F 60	$5.25\pm0.39~{\rm abc}$	1.64 ± 0.13 abc	$90.03 \pm 2.64 \text{ ab}$	$2.51\pm0.06~{\rm abc}$

注: 表中不同字母表示处理之间 P<0.05 水平上的差异显著,下同。

聚体增加了 2.89% ~ 13.61%。化肥减施与紫云英 不同翻压量处理均降低了团聚体的分形维数。其中 15 t+F 80 和 22.5 t+F 60 处理与 MV 相比分别显著 降低了 17.49% 和 15.96%, 22.5 t+F 80、30 t+F 80、 37.5 t+F 80 处理与 15 t+F 80 处理相比分别提升了 10.14% 5.07% 14.29%

减施化肥 20% 与 40% 各处理中随着紫云英翻 压量的增加团聚体稳定性的变化不一致,除 30 t+F 80 处理外,减施化肥 20% 各处理团聚体的稳定性 均高于减施化肥 40% 的处理; 在减施化肥 20% 各 处理中, 15 t+F 80 处理团聚体稳定性最高,相比 于 MV, 平均重量直径、几何平均直径、水稳性大 团聚体分别增加了 33.26%、45.45%、13.61%、分 形维数降低了 17.49%。在减施化肥 40% 各处理中, 团聚体稳定性指标反映出 22.5 t+F 60 处理团聚体的 稳定性最高, 15 t+F 60 处理的最低。

2.2 铁锰氧化物的分布

2.2.1 游离铁锰

供试土壤中游离铁含量为 29.9 ~ 35.4 g · kg⁻¹ (表2),其中化肥减施20%的各处理游离铁含量 均高于化肥减施40%;随着紫云英翻压量的增加, 化肥减施 20% 与 40% 的各处理土壤中游离铁的含 量基本是逐渐下降,降幅为 6.06%、 8.87%; 与 MV 处理相比, 15 t+F 80、22.5 t+F 80 处理游离铁含量 均显著增加,增幅分别为8.97%、5.1%。

各处理团聚体的游离铁含量均高于原土,随 着团聚体粒径的减小逐渐增加;团聚体的游离铁 主要集中在 0.25 ~ 0.053、<0.053 mm 的团聚体中, 大团聚体(>0.25 mm)中的游离铁含量较低。这 与 Peng 等^[14] 在 2015 年的研究类似,其团聚体内 游离铁在砂粒(2~0.25和0.25~0.053mm)中 比粉粒(0.053~0.002 mm)中的含量更高,并 目粘粒(<0.002 mm)中游离铁的含量均高于其他 粒径。

相比于 MV, 减施化肥各处理的 5~0.053 mm 各粒径中游离铁的含量均升高; 化肥减施 40% 条 件下土壤团聚体的游离铁含量均高于化肥减施 20% 处理: 化肥减施 20% 与 40% 的各处理随着紫云英 翻压量的增加, 团聚体各粒径中游离铁的含量逐渐 上升,这与原土的变化趋势相反。

相比于 MV 处理(表3),紫云英翻压与化肥 配施各处理游离锰的含量均显著降低(P<0.05), 其中在 30 t+F 80 处理降幅最大,相比 MV 降低了 39.33%。这可能是由于大量有机肥配施化肥能使土 壤的氧化还原电位降低。

除 MV 处理,其他各处理团聚体的游离锰含量 均高于原土, 这与游离铁类似: 游离锰主要集中在 <2 mm 团聚体中,并在 2~0.25 mm 粒径中含量最 高, 变化趋势为: 2~0.25 mm>0.25~0.053 mm> $(<0.053 \text{ mm}) > 5 \sim 2 \text{ mm} > (>5 \text{ mm})_{\circ}$

不同处理下土壤团聚体中游离锰含量差异明 显, 化肥减施 40% 下各处理团聚体中游离锰含量 均高于化肥减施 20%; 在化肥减施 20% 与 40% 条 件下,随着紫云英翻压量的增加团聚体中游离锰 含量显著提高,特别是在翻压量 30 与 37.5 t · hm⁻² 下,游离锰含量增加显著。

表 2 化肥减施与绿肥翻压下土壤和团聚体的游离铁含量(g·kg ⁻¹							
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	$2 \sim 0.25 \text{ mm}$	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm	
MV	$32.5\pm3.1\rm{abc}$	$35.3\pm0.4~\mathrm{Bde}$	$35.8\pm0.3~\mathrm{Bde}$	$36.4\pm0.1~\mathrm{ABd}$	$37.5 \pm 1.1 ~\mathrm{Ad}$	$37.6 \pm 1.0 \; \mathrm{Abc}$	
F	$33.1 \pm 1.4 \mathrm{abc}$	$37.0\pm0.6~{\rm Abcd}$	$36.3\pm2.4~{\rm Acd}$	$38.7 \pm 1.9 \; \mathrm{Aabc}$	$39.3 \pm 1.0 \; \mathrm{Abcd}$	$37.2 \pm 1.5~\mathrm{Acd}$	
15 t+F 80	35.4 ± 2.2 a	$36.0\pm0.4~\mathrm{CDde}$	$35.8\pm0.3~\mathrm{Dde}$	$36.7\pm0.5~\mathrm{BCcd}$	$37.9\pm0.2~{\rm Acd}$	$36.9\pm0.4~\mathrm{Bed}$	
22.5 t+F 80	34.2 ± 3.5 ab	$34.8 \pm 1.8 \; \mathrm{Ae}$	$33.5\pm1.7\mathrm{Ae}$	$33.6\pm1.6~{\rm Ae}$	$34.5\pm2.5~{\rm Ae}$	$34.8 \pm 1.9 \; \mathrm{Ad}$	
30 t+F 80	$33.3 \pm 3.5 \mathrm{abc}$	37.2 ± 0.7 ABab	$36.5\pm0.5~\mathrm{Bbcd}$	$37.9\pm0.7~\mathrm{ABbc}$	$38.5\pm0.4~{\rm Acd}$	$38.9\pm0.2~{\rm Abc}$	
37.5 t+F 80	$33.3\pm2.2~{\rm abc}$	$36.6\pm0.8~{\rm Acde}$	$37.1\pm0.3~{\rm Abcd}$	$37.7\pm0.3~{\rm Abcd}$	$38.2\pm1~{\rm Acd}$	$38.3\pm2.1~{\rm Abc}$	
15 t+F 60	32.9 ± 1.2 abc	$36.5\pm0.8~\mathrm{Bcde}$	$36.9\pm0.4~\mathrm{Bbcd}$	$37.9\pm0.8~\mathrm{ABbc}$	$39.0\pm0.9~\mathrm{Abcd}$	$38.0\pm0.9\;\mathrm{ABbc}$	
22.5 t+F 60	33.2 ± 2.1 abc	$38.6\pm0.5~\mathrm{Aab}$	$39.7 \pm 1.8 \; \mathrm{Aa}$	39.3 ± 0.2 Aab	$40.3\pm0.7~{\rm Aab}$	$39.4\pm0.8~\mathrm{Aab}$	
30 t+F 60	$31.3\pm1.7~{\rm bc}$	38.6 ± 1.1 Ca	39.3 ± 1.2 BCab	40.5 ± 0.4 BCa	$41.9\pm0.1~{\rm Aa}$	$40.9\pm0.5~\mathrm{ABa}$	
37.5 t+F 60	$29.9 \pm 1.5 \ \mathrm{c}$	38.5 ± 0.7 Ca	$38.9\pm0.9~\mathrm{BCab}$	$40.5\pm0.6~\mathrm{ABa}$	41.1 ± 1.1 Aab	$40.4\pm0.4~\mathrm{ABab}$	

未2 化肥减施与绿肥额压下土壤和闭聚体的滋室结合量

注:不同小写字母表示处理之间差异显著(P<0.05);不同大写字母表示组分之间差异显著(P<0.05),下同。

-12 -

		表 3 化肥减施与约	绿肥翻压ト土壌杯	团聚体的游离锰谷	·重	$(mg \cdot kg^{-1})$	
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm	
MV	790 ± 41a	$709\pm76~{\rm Bcd}$	$686\pm70~\mathrm{Bb}$	$875\pm80~{\rm Aab}$	$800 \pm 15 \text{ ABe}$	$789 \pm 31 \ \mathrm{ABb}$	
F	$715\pm20~\mathrm{b}$	$728 \pm 37 \; \mathrm{Bbcd}$	$724 \pm 42 \; \mathrm{Bb}$	$864 \pm 78~\mathrm{Aab}$	$834 \pm 32 \text{ ABde}$	$822 \pm 44 \text{ ABab}$	
15 t+F 80	$711 \pm 49 \; \mathrm{b}$	$753\pm21~{\rm Cbcd}$	$818 \pm 40 \; \mathrm{BCb}$	833 ± 43 BCab	922 ± 22 Aabc	$878 \pm 60 \; \mathrm{ABab}$	
22.5 t+F 80	$611 \pm 35 ~\mathrm{c}$	$669 \pm 35 \; \mathrm{Ad}$	$677\pm60~{\rm Ab}$	$780\pm55~{\rm Ab}$	772 ± 63 Af	$772 \pm 54~\mathrm{Ab}$	
30 t+F 80	$479 \pm 51 ~\rm d$	$704\pm10~{\rm Bcd}$	$693\pm8~\mathrm{Bb}$	$961 \pm 89 \ \mathrm{Aab}$	$885\pm27~{\rm Aabc}$	$866 \pm 90 \; \mathrm{Aab}$	
37.5 t+F 80	$480 \pm 57 ~\rm{d}$	$680 \pm 54 \; \mathrm{Cd}$	$768 \pm 22 \text{ BCb}$	902 ± 37 Aab	$844 \pm 78 \; \mathrm{ABcd}$	$781 \pm 17 \; \mathrm{BCb}$	
15 t+F 60	$488 \pm 40 \; \mathrm{d}$	$666 \pm 30 \text{ Cd}$	$813\pm50~{\rm Bb}$	$931 \pm 29 \text{ Aab}$	$873 \pm 11 \; \mathrm{ABed}$	$848 \pm 13 \; \mathrm{Bab}$	
22.5 t+F 60	$486\pm30~{\rm d}$	$838 \pm 49 \; \mathrm{Aa}$	$835\pm101~{\rm Ab}$	$914 \pm 47~\mathrm{Aab}$	959 ± 90 Aab	908 ± 111 Aab	
30 t+F 60	$509\pm20~{\rm d}$	$790 \pm 31 \; \mathrm{Babc}$	$1~085 \pm 111~\mathrm{Ab}$	$1\ 007 \pm 111\ \mathrm{ABa}$	988 ± 21 ABa	931 ± 29 ABa	
37.5 t+F 60	$510\pm25~{\rm d}$	817 ± 70 Cab	799 ± 11 Cb	1 035 ± 29 Aa	944 ± 19 Babe	933 ± 35 Ba	

2.2.2 非晶质铁锰

原土中非晶质铁与游离铁的表现不同(表 4),相比于 MV 处理,减施化肥与不同紫云英翻 压量配合可以显著提高土壤的非晶质铁含量,增 幅 5.15% ~ 19.62%,这与刘侯俊等^[15]的研究结果 一致。非晶质铁在化肥减施 20% 各处理的含量为 7.99 ~ 8.26 g·kg⁻¹,在 30 t+F 80 处理的含量最高; 化肥减施 40% 的各处理,非晶质铁含量随着紫云 英翻压量的增加呈逐渐减小的趋势,在 15 t+F 60 处理下非晶质铁含量最高,为 8.35 g·kg⁻¹。

减施化肥与不同紫云英翻压量处理的团聚体中,非晶质铁含量较 MV 处理显著提高,其中 22.5 t+F 80 处理的最高(6.69~8.15g·kg⁻¹),团聚体的非晶质铁含量显著高于其他处理,这与原土的变化一致;化肥减施 20% 各处理的团聚体中,非晶质铁含量均高于化肥减施 40%;在化肥减施 20% 与 40% 各处理中,随着紫云英翻压量的增加团聚体的非晶质铁含量没有显著性变化。

土壤非晶质锰含量为 348 ~ 384 mg·kg⁻¹(表 5),化肥减施 20% 各处理土壤的非晶质锰含量与化 肥减施 40% 的差异不显著。同一化肥水平下,不同 紫云英翻压量之间非晶质锰含量的差异不显著。除 15 t+F 80 和 22.5 t+F 80 处理外,其他紫云英与化肥 配施处理非晶质锰含量相比于 MV 的均下降。

团聚体中非晶质锰主要集中在 <2 mm 粒径中, 并在 2 ~ 0.25 或 0.25 ~ 0.053 mm 粒径中含量最高。 不同紫云英翻压量下,团聚体中非晶质锰含量差异 明显,在化肥减施 20% 与 40% 各处理中,随着紫 云英翻压量的增加团聚体的非晶质锰含量显著提 高,特别是在翻压量 37.5 t · hm⁻²下,这可能是大 量有机物料的翻压增加了团聚体的表面电荷从而促 进了非晶质锰的转化。

表 4	化肥减施与绿肥翻压下土壤和团聚体的非晶质铁含量
-----	-------------------------

 $(\mathbf{g} \cdot \mathbf{kg}^{-1})$

					1-2	(8
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	$<0.053~\mathrm{mm}$
MV	$6.98\pm0.40\;\mathrm{b}$	$5.40\pm0.20~\mathrm{Bde}$	$6.88 \pm 0.61 \ \mathrm{Aabc}$	$6.60\pm0.49~\mathrm{Abcd}$	$5.04\pm0.35~\mathrm{Ba}$	$5.28\pm0.44~\mathrm{Bab}$
F	8.45 ± 0.71 a	$6.45\pm0.59~\mathrm{Bbcd}$	$8.05\pm0.50~\mathrm{Aa}$	$8.53\pm0.40~\mathrm{Aa}$	$7.93\pm0.47~\mathrm{Aa}$	$7.50\pm0.61~\mathrm{ABa}$
15 t+F 80	$7.99\pm0.71~\mathrm{ab}$	$6.72\pm0.44~\mathrm{Aabc}$	$7.41 \pm 0.81 \ \mathrm{Aab}$	$7.59 \pm 1.19 \; \mathrm{Aabc}$	$6.99\pm0.98~\mathrm{Aa}$	$7.12\pm0.56~\mathrm{Aa}$
22.5 t+F 80	$8.07\pm0.70~\mathrm{ab}$	$8.07\pm0.51~\mathrm{Aa}$	$8.15\pm0.16~\mathrm{Aa}$	$7.95\pm0.34~\mathrm{Aab}$	$7.45\pm0.75~\mathrm{Aa}$	$6.69\pm0.32~\mathrm{Aab}$
30 t+F 80	8.26 ± 0.32 a	$7.68\pm0.15~\mathrm{ABab}$	$7.87\pm0.04~\mathrm{Aa}$	7.24 ± 0.19 BCabC	$6.65\pm0.28~\mathrm{Da}$	6.91 ± 0.39 Da
37.5 t+F 80	$8.01 \pm 0.81 \; \mathrm{ab}$	$7.74\pm0.29~\mathrm{Aab}$	$7.79\pm0.60~\mathrm{Aa}$	$7.58 \pm 1.13~\mathrm{Aabc}$	$7.58 \pm 1.01 \; \mathrm{Aa}$	$6.32\pm0.74~\mathrm{Aab}$
15 t+F 60	8.35 ± 0.51 a	$6.06\pm0.40~{\rm Acde}$	$6.16\pm0.15~{\rm Ac}$	$5.48 \pm 0.58~\mathrm{Ad}$	$5.27 \pm 1.02 \text{ Aa}$	$5.77\pm0.83~\mathrm{Aab}$
22.5 t+F 60	$7.80\pm0.70~\mathrm{ab}$	$5.36\pm0.64~{\rm Ae}$	$6.35\pm0.40~{\rm Abc}$	$6.04\pm0.83~{\rm Acd}$	$5.35\pm0.63~\mathrm{Aa}$	$6.06\pm0.54~\mathrm{Aab}$
30 t+F 60	$7.34\pm0.77~\mathrm{ab}$	$6.82 \pm 1.19 \text{ ABabC}$	$7.56\pm0.99~\mathrm{Aab}$	6.52 ± 1.12 ABabC	$5.83\pm0.85~\mathrm{ABa}$	$4.44\pm0.70~\mathrm{Bb}$
37.5 t+F 60	$7.47\pm0.91~\mathrm{ab}$	$6.92\pm0.40~\mathrm{Aabc}$	7.23 ± 0.48 Aabc	$6.91 \pm 0.53~\mathrm{AabC}$	$5.50\pm1.06~\mathrm{Aa}$	$5.68 \pm 1.33~\mathrm{Aab}$

	表 5 化肥减施与绿肥翻压下土壤和团聚体的非晶质锰含量						
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	$2 \sim 0.25 \text{ mm}$	0.25 ~ 0.053 mm	$<0.053~\rm{mm}$	
MV	$370\pm20~{\rm ab}$	210 ± 34 Bf	$236\pm36~\mathrm{ABc}$	$318\pm22~{\rm Ac}$	326 ± 34 Ab	$316\pm27~\mathrm{ABc}$	
F	$361\pm20~{\rm ab}$	339 ± 23 Ce	$422 \pm 37 \ \mathrm{BCb}$	$493 \pm 54 \text{ ABab}$	$488 \pm 40 \; \mathrm{Aab}$	$413 \pm 49 \text{ ABab}$	
15 t+F 80	$376 \pm 10 \; \mathrm{ab}$	$334\pm45~{\rm Cbcd}$	$351\pm51~\rm BCb$	$420\pm58~\mathrm{ABbc}$	$476\pm30~{\rm Aab}$	$419 \pm 29 \text{ ABab}$	
22.5 t+F 80	384 ± 31 a	$348 \pm 28 \; \mathrm{Ade}$	$406\pm31~{\rm Ab}$	$468 \pm 49 \; \mathrm{Abc}$	$437 \pm 45 \; \mathrm{Aab}$	$380\pm82~{\rm Ab}$	
30 t+F 80	361 ± 6 ab	$363\pm36\;\mathrm{Acde}$	$377 \pm 45 \; \mathrm{Ab}$	$400\pm42~{\rm Abc}$	$386 \pm 29 \text{ Aab}$	$403\pm46~{\rm Ab}$	
37.5 t+F 80	362 ± 7 ab	$469\pm27~{\rm Ab}$	523 ± 22 Aa	$559 \pm 41 \; \mathrm{Aab}$	$471\pm60~{\rm Aab}$	$368 \pm 22 \; \mathrm{Ab}$	
15 t+F 60	$369 \pm 25~\mathrm{ab}$	$342\pm12~{\rm Ce}$	365 ± 10 Ba	$377\pm 6~\mathrm{ABbc}$	393 ± 21 ABab	$403\pm7~{\rm Ab}$	
22.5 t+F 60	$348 \pm 16 \; \mathrm{b}$	$375\pm32~\mathrm{Bbcd}$	383 ± 34 Ba	$401 \pm 33 \; \mathrm{Bbc}$	443 ± 29 Bab	$487 \pm 45 \; \mathrm{Aa}$	
30 t+F 60	$363 \pm 7ab$	$447\pm37~\mathrm{Bbc}$	502 ± 22 Aa	$512 \pm 19 \text{ ABab}$	$524\pm41~{\rm Aa}$	$498 \pm 46 \text{ ABab}$	
37.5 t+F 60	$353\pm30~\mathrm{b}$	$519\pm72~{\rm Aa}$	534 ± 44 Aa	535 ± 34 Aa	$481 \pm 11 \text{ Aab}$	334 ± 46 Aab	

2.2.3 络合铁锰

土壤络合铁的变化趋势与非晶质铁相似(表6), 表现为:F处理>化肥减施与紫云英翻压各处理>MV (最低, 0.58 g · kg⁻¹); 化肥减施 20% 的各处理随着 紫云英翻压量的增加,络合铁含量先增加后降低,在 22.5 t+F 80 处理的含量最高(0.89 g · kg⁻¹); 化肥减 施 40% 各处理的络合铁与化肥减施 20% 的变化相反, 随着紫云英翻压量的增加络合铁含量先减小后增加。

络合铁在大团聚体(>5、5~2、2~0.25 mm)中比微团聚体(0.25~0.053 mm)以及粉粘 粒(<0.053 mm)的含量高,其在 <0.25 mm 团聚体 中的含量比大团聚体的降低了 14.28% ~ 22.41%. 这与 Xue 等^[16]在 2019 年对湖北省两个地区红壤 团聚体的研究结果类似。

减施化肥 20% 各处理团聚体的络合铁含量均 高于减施化肥40%;而在化肥减施20%条件下, 在紫云英翻压量提高到 37.5 t · hm⁻² 时团聚体的络 合铁含量显著下降。

除 MV、F 处理,其余各处理的络合锰含量 间差异不显著(表7);减施化肥20%与40%各 处理中,土壤络合锰的含量随着紫云英翻压量 的增加而减小;减施化肥20%各处理的络合锰 含量相比于减施化肥40%均有所增加,增幅为 $5.19\% \sim 14.49\%_{\odot}$

团聚体中络合锰的含量为 59~ 251 mg·kg⁻¹, 其随着粒径的减小先增加后降低,在2~0.25 mm 含量最高, 30 t+F 80 处理团聚体的络合锰含量显著 高于其他处理。

除 37.5 t+F 80, 减施化肥 20% 各处理团聚体中 络合锰含量均高于减施化肥 40%;在减施化肥 20% 下,翻压量在 37.5 t · hm⁻² 时团聚体的络合锰含量 显著下降,这与络合铁的变化一致。减施化肥40% 各处理随着紫云英翻压量的增加团聚体的络合锰含 量没有显著变化。

又0 化肥减他匀琢肥翻压下工壤和凶家件的给育	0	化肥减加匀琢肥翻压	・トエ・・トロート・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・アン・	凹汞冲的环	16 扶名 5
------------------------	---	-----------	---	-------	---------

		表 6 化肥减施与	球肥翻压下工壤和	团衆体的络合铁含	重	$(\mathbf{g} \cdot \mathbf{kg}^{-})$
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm
MV	$0.58\pm0.04~\mathrm{c}$	$0.64\pm0.04~\mathrm{Bbc}$	$0.82\pm0.07~{\rm Abc}$	$0.69\pm0.06\;\mathrm{ABb}$	$0.40\pm0.05~{\rm Ce}$	$0.39\pm0.08~{\rm Cc}$
F	0.91 ± 0.07 a	$0.56\pm0.02~{\rm Cbc}$	$1.21\pm0.12~\mathrm{Ba}$	$1.16\pm0.06~\mathrm{Ba}$	$0.90\pm0.03~\mathrm{Ca}$	$0.88\pm0.06~\mathrm{Cab}$
15 t+F 80	0.81 ± 0.08 ab	$0.77\pm0.15~\mathrm{Ab}$	$1.11\pm0.19~\mathrm{Aab}$	$0.91\pm0.22~\mathrm{Aab}$	$0.73\pm0.17~\mathrm{Aab}$	$0.70\pm0.18~\mathrm{Ab}$
22.5 t+F 80	0.89 ± 0.08 a	$1.11\pm0.06~\mathrm{ABa}$	$1.20\pm0.04~\mathrm{Aa}$	$1.09\pm0.19~\mathrm{ABa}$	$0.92\pm0.11~\mathrm{Ba}$	$0.99\pm0.04~\mathrm{ABa}$
30 t+F 80	0.84 ± 0.08 ab	$1.25\pm0.18~\mathrm{Aa}$	$1.30\pm0.25~\mathrm{Aa}$	$1.08\pm0.24~\mathrm{ABa}$	$0.74\pm0.15~\mathrm{Bab}$	$0.82\pm0.17~\mathrm{ABab}$
37.5 t+F 80	$0.78\pm0.07~{\rm abc}$	$0.65\pm0.17~\mathrm{ABbc}$	$0.78\pm0.17~{\rm Ac}$	$0.56\pm0.2~\mathrm{ABb}$	$0.48\pm0.08~\mathrm{ABbc}$	$0.24\pm0.03~\mathrm{Bc}$
15 t+F 60	0.84 ± 0.07 ab	$0.61\pm0.07\;{\rm Abc}$	$0.72\pm0.11~{\rm Ac}$	$0.56\pm0.13~\mathrm{Ab}$	$0.35\pm0.01~{\rm Ac}$	$0.38\pm0.09\;{\rm Ac}$
22.5 t+F 60	$0.70\pm0.08~{\rm abc}$	$0.41\pm0.05~{\rm Cc}$	$0.76\pm0.02~{\rm Ac}$	$0.62\pm0.03~\mathrm{Bb}$	$0.35\pm0.05~{\rm Cc}$	$0.28\pm0.02~{\rm Cc}$
30 t+F 60	$0.64\pm0.06~{\rm bc}$	$0.63\pm0.09\;{\rm Abc}$	$0.66\pm0.07\;{\rm Ac}$	$0.59\pm0.12\;\mathrm{ABb}$	$0.34\pm0.08\;\mathrm{BCc}$	$0.20\pm0.03~{\rm Cc}$
37.5 t+F 60	$0.76\pm0.07~{\rm abc}$	$0.60\pm0.03~{\rm Abc}$	$0.63\pm0.07\;{\rm Ac}$	$0.54\pm0.1\mathrm{Ab}$	$0.36\pm0.02~{\rm Bc}$	$0.33\pm0.05~{\rm Bc}$

	7	長7 化肥减施与	禄肥翻压下土壤 和	和团聚体的络合锰合	含量	$(mg \cdot kg^{-1})$
处理	原土	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm
MV	$140\pm5~\mathrm{b}$	143 ± 16 Bab	$158 \pm 14 \; \mathrm{ABbc}$	$189 \pm 14 \; \mathrm{Abc}$	169 ± 12 ABab	$167\pm8\;\mathrm{ABb}$
F	$131\pm10\mathrm{b}$	$115\pm18~{\rm Cbc}$	$169 \pm 10 \; \mathrm{Bbc}$	$195\pm10~{\rm Ab}$	$178 \pm 1 \text{ Bab}$	$151 \pm 16 \; \mathrm{Bbc}$
15 t+F 80	$150\pm8~\mathrm{ab}$	152 ± 10 Ba	$197 \pm 18 \; \mathrm{Aab}$	$195\pm3~{\rm Ab}$	168 ± 22 ABab	$143 \pm 14 \; \mathrm{Bbc}$
22.5 t+F 80	158 ± 20 a	137 ± 8 Bab	$175 \pm 14 \; \mathrm{ABbc}$	$196\pm31~{\rm Ab}$	$178 \pm 15~\mathrm{ABab}$	$170\pm10~\mathrm{ABb}$
30 t+F 80	142 ± 9 ab	162 ± 7 Ba	$218 \pm 29 \text{ ABa}$	$251 \pm 49 ~\mathrm{ABa}$	214 ± 33 ABa	$211 \pm 44 \; \mathrm{Aa}$
37.5 t+F 80	$146\pm8~\mathrm{ab}$	$59\pm13~{\rm Bd}$	$98\pm19~{\rm Ae}$	132 ± 22 Ad	$134\pm15~{\rm Abc}$	$116\pm10~{\rm Ac}$
15 t+F 60	144 ± 16 ab	$80\pm7~{\rm Bd}$	$113 \pm 14 \; \mathrm{Ade}$	$133\pm8~{\rm Acd}$	$127\pm4~{\rm Abc}$	$135\pm11~{\rm Abc}$
22.5 t+F 60	$138\pm8~\mathrm{b}$	$69\pm8~{\rm Bd}$	$147 \pm 11 \; \mathrm{Acd}$	$156 \pm 12 \ \mathrm{Abcd}$	$114\pm39~\mathrm{ABc}$	$73\pm20~{\rm Bd}$
30 t+F 60	$135\pm 6~\mathrm{b}$	$90\pm25~{\rm Bd}$	$182 \pm 16 \; \mathrm{Aabc}$	$140\pm30~\mathrm{ABbcd}$	$107\pm29~{\rm Bc}$	$122\pm8~{\rm Be}$
37.5 t+F 60	$136\pm12~\mathrm{b}$	$63\pm 6~{\rm Bd}$	$109\pm26\;\mathrm{ABde}$	151 ± 26 Abcd	$140\pm23~{\rm Abc}$	$131 \pm 18 \; \mathrm{Abc}$

2.3 铁锰氧化物与团聚体稳定性的关系

2.3.1 相关性分析

供试土壤的平均重量直径(MWD)、几何平 均 直 径 (GMD)、水 稳 性 大 团 聚 体 (R>0.25 mm) 与铁氧化物含量间均呈正相关(r=0.084~0.332) 或显著和极显著正相关(r=0.296*, r=0.479**~ 0.495^{**})(表 8),分形维数(D)与铁氧化物含量 之间呈负相关(r=-0.217~-0.123)或显著负相关 $(r=-0.444^{*});$ 而团聚体稳定性指标与各形态锰的相 关性不显著,表明土壤中铁氧化物对团聚体稳定性 的贡献高于锰氧化物。

各形态铁锰氧化物对团聚体稳定性的影响表现 为: 络合铁 > 非晶质铁 > 非晶质锰 > 游离铁 > 络合 锰、游离锰,表明土壤中铁氧化物特别是络合铁与 非晶质铁的含量与团聚体稳定性的关系密切。

非晶质铁和络合铁含量与 MWD 在 2~0.25

mm 团聚体中呈显著和极显著正相关:在5~2mm 团聚体中呈正相关和极显著正相关(表9)。在团 聚体各形态氧化物中,络合铁含量与 MWD 相关性 最高,非晶质铁次之,表明络合铁和非晶质铁是土 壤团聚体稳定和大团聚体形成的关键因素, 这与表 8的结果一致。在5~0.25 mm 各粒径团聚体中, MWD 与游离锰和非晶质锰的含量呈负相关, 与络 合锰含量呈正相关。

2.3.2 通径分析

根据相关性分析的结果,以土壤各形态铁 锰氧化物为自变量(X1~X6)与平均重量直径 (MWD)为因变量(Y)进行通径分析。由表 10 可 知,络合铁对 MWD 等的直接作用最强,非晶质铁 次之,呈正效应,即络合铁、非晶质铁含量增加可 以直接提高 MWD,从而提高团聚体的稳定性,这 与相关性分析的结果一致。在锰氧化物中,非晶质

表 8	团聚体稳定性与土壤铁锰氧化物含量间的相关性

项目	游离铁	非晶质铁	络合铁	游离锰	非晶质锰	络合锰
平均重量直径(MWD)	0.110	0.332	0.479**	0.069	0.194	0.185
几何平均直径(GMD)	0.105	0.296^{*}	0.495**	0.150	0.178	0.049
R>0.25 mm	0.084	0.264	0.494**	-0.020	0.152	-0.144
分形维数(D)	-0.123	-0.217	-0.444*	0.053	-0.147	-0.08

注:* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关, 下同; n=30。

表 9 平均重量 直径(MWD)与 团聚体铁锰氧化物 含量的 相关性										
粒级	游离铁	非晶质铁	络合铁	游离锰	非晶质锰	络合锰				
>5 mm	0.133	-0.232	0.204	0.207	-0.174	0.207				
5 ~ 2 mm	0.117	0.250	0.525**	-0.235	-0.178	0.393*				
2 ~ 0.25 mm	-0.150	0.407^{*}	0.575**	-0.356	-0.180	0.257				
$0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$	-0.143	0.513**	0.456^{*}	0.148	0.213	0.247				
< 0.053 mm	-0.222	0.594**	0.451*	0.091	0.377^{*}	0.146				

锰对于团聚体稳定性的直接作用最强,呈负效应, 即非晶质锰含量的增加可降低团聚体稳定性。游离 铁对 MWD 的间接作用最强,说明游离铁含量的增加可间接提高团聚体的稳定性。

自变量	与 MWD 的 相关系数	直接作用 (通径系数)	间接作用(间接通径系数)										
			络合铁	络合锰	非晶质铁	非晶质锰	游离铁	游离锰	总计				
络合铁	0.46	0.54	_	0.01	0.04	-0.07	-0.03	-0.04	-0.1				
络合锰	0.09	0.08	0.07	—	0.02	-0.1	0.01	0.03	0.03				
非晶质铁	0.32	0.48	0.4	0.03	—	-0.09	-0.02	-0.08	0.23				
非晶质锰	0.19	-0.18	0.22	0.05	0.02	—	-0.03	0.1	0.17				
游离铁	0.11	-0.10	0.17	0.01	0.01	-0.04	—	0.09	0.25				
游离锰	0.07	0.05	-0.05	0.01	-0.01	-0.04	-0.02	_	-0.11				

表 10 诵径分析结果

3 讨论

土壤团聚体的分布与稳定性主要受到施肥方 式、种植制度和轮作方式等的影响^[17]。张钦等^[18] 研究发现, 化肥与有机肥配施有利于大团聚体的形 成,特别是对5~0.25 mm 水稳性大团聚体的促进 作用最明显。本研究中,减施20%和40%化肥配 施紫云英均能较好地提高土壤团聚体的稳定性,这 与上述研究结果基本相同。在本研究中,减施化肥 20% 与 40% 下,适量增加紫云英翻压量(15、22.5 $t \cdot hm^{-2}$)有利于 >5 mm 团聚体的形成,并且降低了 <0.25 mm 团聚体的含量。这主要是由于长期紫云英 翻压后,土壤有机质增加,充足的营养对作物根系 生长发育十分有利, 而根系本身可以通过缠绕作用 促进大团聚体的形成^[19],发育良好的根系也会增 加根际微生物量,促进大团聚体的形成和稳定,进 而增加土壤的团聚性^[20]。本研究在减施化肥 20% 与 40% 各处理中, 当紫云英翻压量超过 30 t · hm⁻² 时,土壤水稳性大团聚体含量降低,团聚体的稳定 性下降,这可能是豆科作物的紫云英含氮量高,大 量紫云英翻压进入土壤, 会使土壤 C/N 失调, 导致 微生物活性降低, 菌根的生长变缓, 因此团聚体的 形成受到抑制^[21],团聚体稳定性下降。

减施化肥配合不同紫云英翻压量的土壤和团聚 体中,铁锰氧化物的变化不一致,但对于铁锰氧化 物的提高有积极作用。研究表明,有机物料翻压能 阻止氧化物的老化,可能是非晶质铁强烈吸附有 机质而阻碍氧化铁晶核的生长^[22],也可能是铁与 富里酸形成络合物,影响了结晶速率和结晶产物 的性质^[23]。与对照 MV 相比,紫云英与化肥配施 各处理显著地提高了各粒径团聚体中的非晶质铁含 量,这可能是各配施处理的土壤有机碳组分更易与 非晶质铁吸附或结合,促进了非晶质铁的转化。然 而,施用100%化肥(F)处理土壤的非晶质铁含 量 $(8.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$ 最高,这与王莹等^[10]在 2013 年 的研究结果一致,可能是化肥中的亚硝酸盐能作为 低价铁的电子受体^[24],或者是磷与非晶质铁的吸 附与解析^[25-26],促进了非晶质铁的转化,使得 F 处理的非晶质铁含量增加。有研究表明, 水稻土中 铁锰氧化物还原过程与土壤 pH 密切相关, 随着碱 性水稻土 pH 的降低氧化物还原减弱, 而酸性水稻 土 pH 升高促进了氧化物的还原^[27]。此外,土壤 在中性条件下更容易引起非晶型氧化物的沉淀, 增 加氧化物的活化度^[28]。供试土壤中性偏碱性,紫 云英作为固氮作物,其与化肥一同进入土壤中会 使 pH 降低,向中性靠近,从而有利于非晶质铁锰 的形成。翻压紫云英带来的有机质与铁锰氧化物结 合,可以形成有机-无机矿物复合体,从而提高铁 锰氧化物自身的稳定性与活性^[29]。但相比于 MV 和F对照处理,减施化肥配施大量紫云英的土壤中 各形态锰氧化物含量下降,可能是大量有机物质进 入土壤导致铁与各形态锰发生拮抗反应,从而降低 了土壤中锰的含量^[30]。

相关性与通径分析表明,供试土壤中铁氧化物 是团聚体稳定性和大团聚体形成的关键因素。许多 研究表明,铁氧化物是土壤中的主要胶结剂,它 的作用主要是对微团聚体甚至小粒径(<0.053 mm) 团聚体的胶结^[31],氧化铁对阴离子具有高亲和力, 通过静电吸附于粘土矿物表面,并通过聚合作用促 进团聚体形成^[2]。本研究中各形态铁氧化物对团聚

-16 -

体稳定性影响最大的是络合态,其次是非晶质态, 游离态最弱。络合铁是一种与有机质结合形成的络 合物^[32],有机质可以通过有机团聚与矿物的结合 来增加团聚体内部的稳定性,络合铁在有机质对团 聚体稳定性的影响上起着中介的作用,其影响机制 有待进一步研究。

4 结论

减施化肥与不同紫云英翻压量处理主要增加 了 >5 mm 团聚体、降低了 <0.25 mm 团聚体的含 量。减施化肥 20% 紫云英翻压量为 37.5 t · hm⁻² 时, >5 mm 团聚体的含量下降;减施化肥 40% 下, 随紫云英翻压量增加提升 >0.25 mm 团聚体的含量 (2.9% ~ 12.47%),降低 <0.053 mm 团聚体的含量 (27.59% ~ 92%)。减施化肥条件下合理的紫云英 翻压量(15、22.5 t · hm⁻²)可以显著提高团聚体的 稳定性。

相比于单独种植翻压紫云英处理,减施化肥条件下,随着紫云英翻压量(15~30 t·hm⁻²)的增加团 聚体中游离铁锰含量逐渐降低,非晶质、络合态铁锰 含量显著提高,在减施化肥40%、紫云英翻压量为30 t·hm⁻²时的非晶质、络合铁锰含量达到最高。

铁氧化物中的非晶质与络合态是影响团聚体稳 定性的直接因素,其含量与团聚体稳定性呈显著或 极显著正相关,游离铁含量增加间接提高了团聚体 的稳定性。

参考文献:

- [1] 乔丹丹,吴名宇,张倩,等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐 土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. 中国土壤与肥 料,2018(3):92-99.
- [2] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及 微生物量碳、氮的影响[J].中国土壤与肥料,2018(5): 122-128.
- [3] 杨东伟,张慧敏,章明奎.水田返旱地后铁锰氧化物及其相关性状的变化[J].土壤通报,2014,45(2):257-264.
- [4] Zhang Z B, Zhou H, Lin H. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils [J]. Geoderma, 2016, 262: 155–164.
- [5] 吕玉虎,郭晓彦,李本银,等.翻压不同量紫云英配施减量 化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J].中国土壤与肥料, 2017(5):94-98.
- [6] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6): 1450-1461.

- [7] 李增强,张贤,王建红,等.紫云英施用量对土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2018
 (4):14-20.
- [8] 刘春增,刘小粉,李本银,等.紫云英翻压对水稻产量、土 壤团聚性及其有机碳和全氮分布的影响[J].华北农学报, 2012,27(6):224-228.
- [9] Zhao J S, Chen S, Hu R G, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides
 [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 167: 73–79.
- [10] 王莹, 尧水红, 李辉信, 等. 长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系 [J]. 土壤, 2013, 45 (4): 666-672.
- [11] 廖海燕,鲁艳红,廖育林,等.紫云英与化肥配施对双季稻 产量及氮钾平衡的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学 版),2017,43(2):129-134.
- [12] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3): 627-633.
- [13] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896-1896.
- [14] Peng X, Yan H, Zhou Y Z, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 89–98.
- [15] 刘侯俊,陈红娜,王俊梅,等.长期施肥对棕壤铁形态及其 有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1): 36-43.
- [16] Xue B, Huang L, Huang Y N, et al. Effects of organic carbon and iron oxides on soil aggregate stability under different tillage systems in a rice-rape cropping system [J]. Catena, 2019, 177: 1-12.
- Huang X L, Jiang H, Li Y, et al. The role of poorly crystalline iron oxides in the stability of soil aggregate-associated organic carbon in a rice-wheat cropping system [J]. Geoderma, 2016, 279: 1-10.
- [18] 张钦,于恩江,林海波,等. 连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳分布及其固持特征 [J]. 中国土壤与肥料,2019(1): 71-78.
- [19] Huang X L, Tang H Y, Kang W J, et al. Redox interfaceassociated organo-mineral interactions: A mechanism for C sequestration under a rice-wheat cropping system [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 12-23.
- [20] Guggenberger G, Elliott E T, Frey S D, et al. Microbial contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 407-419.
- [21] de Moraes Sá J C, Lal R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol [J]. Soil & Tillage

Research, 2008, 103 (1): 46-56.

- [22] Schwertmann U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide [J]. Nature, 1966, 212: 645-646.
- [23] Cross A F, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems [J]. Geoderma, 1995, 64: 197–214.
- [24] Chen X, Wei X, Hao M D, et al. Changes in soil iron fractions and availability in the Loess Belt of Northern China after 28 years of continuous cultivation and fertilization [J]. Pedosphere, 2019, 29 (1): 123-131.
- [25] Xue B, Huang L, Huang Y N, et al. Roles of soil organic carbon and iron oxides on aggregate formation and stability in two paddy soils
 [J]. Soil & Tillage Research, 2019, 187: 161–171.
- [26] Wang P, Wang J D, Zhao H. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (2): 588-600.
- [27] 吴超,曲东,刘浩.初始 pH 值对碱性和酸性水稻土微生物 铁还原过程的影响 [J]. 生态学报,2014,34(4):933-

942.

- [28] Colombo C, Palumbo G, He J Z, et al. Review on iron availability in soil: Interaction of Fe minerals, plants, and microbes [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 14 (3): 538-548.
- [29] Huang X, Feng C, Zhao G, et al. Carbon sequestration potential promoted by oxalate extractable iron oxides through organic fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81 (6): 1359-1370.
- [30] Porras R C, Hicks C P, Torn M S, et al. Synthetic iron (hydr) oxide-glucose associations in subsurface soil: Effects on decomposability of mineral associated carbon [J]. Science of the Total Environment, 2018, 613-614: 342-351.
- [31] Wang J G, Yang W, Yu B, et al. Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China [J]. Catena, 2016, 137: 545–553.
- [32] Yin Y, Wang L, Liang C, et al. Soil aggregate stability and iron and aluminium oxide contents under different fertiliser treatments in a long-term solar greenhouse experiment [J]. Pedosphere, 2016, 26: 760-767.

Effects of different returning amount of Chinese milk vetch on soil aggregates and iron and manganese oxides under reduced fertilizer application

XU Yong-hao¹, NIE Jun², LU Yan-hong², GENG Ming-jian¹, HUANG Li^{1*} [1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410125]

Abstract: The soils of long-term Chinese milk vetch-double cropping rice rotation in Nanxian County, Hunan Province were taken as the research object. When the fertilizer reduction was 20% and 40%, and the return amount of Chinese milk vetch was set at 15, 22.5, 30, 37.5 t \cdot hm⁻², the effects of both reduced fertilizer and different returning amount of Chinese milk vetch on iron-manganese oxides in soil aggregates and their relationships with water stability of aggregates were studied. The results showed that: (1) Compared with the control [alone returning of Chinese milk vetch (MV) and application of 100% fertilizer (F)], reducing the application of 20% and 40% of the chemical fertilizers combined with the application of Chinese milk vetch increased the content of >0.25 mm aggregates, reduced the content of <0.25 mm aggregates; the stability of aggregates increased by 8.91% ~ 45.45% at 15 and 22.5 t \cdot hm⁻² Chinese milk vetch returning when reduced the application of chemical fertilizers. (2) Compared with the control, when the fertilizer was reduced by 20%, the free iron and manganese content in the soil aggregates decreased with the increase of returning amount of Chinese milk vetch (15 ~ 30 t \cdot hm⁻²). But the content of crystalline and complex iron and manganese significantly increased by 7.70% ~ 72.31% and 10.75% ~ 58.53%, respectively. (3) Correlation and path analysis showed that the stability of soil aggregates under chemical fertilizer reduction and Chinese milk vetch returning mainly depended on the iron oxide contents. While in iron oxides, amorphous and complex irons played a direct role in improving the stability of aggregates.

Key words: fertilizer reduction; Chinese milk vetch; aggregates; iron manganese oxide