

DOI: 10.11766/trxb202402240077

CSTR: 32215.14.trxb202402240077

敖晖, 陈冲, 周虎. 餐厨垃圾堆肥对水稻土团聚体稳定性的影响及机制[J]. 土壤学报, 2025, 62 (3): 716–728.

AO Hui, CHEN Chong, ZHOU Hu. Effect and Mechanism of Food Waste Compost on the Stability of Paddy Soil Aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (3): 716–728.

餐厨垃圾堆肥对水稻土团聚体稳定性的影响及机制*

敖 晖^{1, 2}, 陈 冲¹, 周 虎^{1†}

(中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学有机循环研究院(苏州), 江苏苏州 215100)

摘 要: 餐厨垃圾堆肥含有丰富的有机质与盐分, 施用于土壤后对土壤结构的影响及其机制尚不清楚。为探究餐厨垃圾堆肥施用对水稻土团聚体稳定性的影响, 本研究基于田间定位试验(包括六个处理: 不施肥、化肥、餐厨新鲜堆肥、餐厨陈化堆肥、鸡粪有机肥、猪粪有机肥), 采用多种团聚体稳定性测定方法分析不同处理下水稻土团聚体稳定性, 运用相关性分析与冗余分析(RDA)探讨团聚体稳定性的主要影响因素, 结合土壤表面电化学参数分析团聚体稳定机制。结果表明, 施用餐厨垃圾堆肥可增强水稻土团聚体水稳定性, 降低气爆作用和非均匀膨胀作用。土壤表面电化学性质是影响团聚体稳定性的主要因素, 四种有机肥处理的土壤表面电荷密度均增加了 29.0%~45.2%。有机质与表面电荷密度、比表面积、表面电荷数量具有显著相关性, 相关系数分别为 0.67、0.53、-0.63。交换性钙与有机质之间具有显著正相关性, 相关系数为 0.90。上述结果表明餐厨垃圾堆肥可通过增加有机质增强土壤表面电荷密度, 从而增加交换性钙与土壤颗粒之间的胶结作用, 进而增强土壤团聚体稳定性。

关键词: 餐厨垃圾堆肥; 团聚体稳定性; 土壤表面电化学性质; 水稻土

中图分类号: S152.4; S153.2 **文献标志码:** A

Effect and Mechanism of Food Waste Compost on the Stability of Paddy Soil Aggregates

AO Hui^{1, 2}, CHEN Chong¹, ZHOU Hu^{1†}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Organic Cycle Research Institute, China Agricultural University (Suzhou), Suzhou, Jiangsu 215100, China)

Abstract: 【Objective】 Food waste composting is one of the potential directions of food waste resource utilization. Food waste compost is rich in organic matter and salt, and its impact on soil aggregates is still unclear. Exploring the influence of food waste compost application on the stability of paddy soil aggregates and its mechanism can provide references for agricultural utilization of food waste compost. 【Method】 Six treatments were set up in this study: No fertilizer (CK), Chemical fertilizer (F), Food waste fresh compost (FC), Food waste aged compost (AC), Chicken manure organic fertilizer (CM), Pig manure organic fertilizer (PM). The effects of these treatments and the influence of food waste compost on the stability of soil aggregates and soil

* 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023RC047)资助 Supported by the Special Fund for Basic Scientific Research for Central Universities (No. 2023RC047)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhouhu@cau.edu.cn

作者简介: 敖 晖 (1999—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构研究。E-mail: aohui@cau.edu.cn

收稿日期: 2024-02-24; 收到修改稿日期: 2024-06-04; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-19

surface electrochemical parameters were investigated. Correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to investigate the main factors affecting the stability of aggregates. 【Result】 The results showed that: (1) Food waste compost enhanced the water stability of paddy soil aggregates, and reduced the slaking and differential swelling effects. Also, the MWD_{Yoder} , $MWD_{LB-fast}$, and $MWD_{LB-slow}$ of AC were 21.4%, 107.8%, and 49.3% higher than CK, respectively. (2) The electrochemical properties of the soil surface were the main factors affecting the stability of aggregates and the surface charge density of the four organic fertilizers increased by 29.0%–45.2%. (3) Organic matter has a significant correlation with surface charge density, specific surface area, and surface charge number, and the correlation coefficients are 0.67, 0.53, and -0.63, respectively. Furthermore, exchangeable calcium showed a significant positive correlation with organic matter and the correlation coefficient was 0.90. 【Conclusion】 Food waste compost can enhance the surface charge density of soil by increasing soil organic matter, thus increasing the cementation between exchangeable calcium and soil particles and enhancing the stability of soil aggregates.

Key words: Food waste compost; Aggregate stability; Electrochemical properties of soil surface; Paddy soil

我国每年产生的餐厨垃圾超过 3000 万吨,餐厨垃圾的正确处理对环境和公共卫生至关重要^[1-2]。以“生物干化+好氧发酵”为核心的餐厨垃圾堆肥技术具有效率高、减量化、无害化的特点^[3],被认为是未来餐厨垃圾资源化利用的方向之一。该项技术生产的餐厨垃圾堆肥富含有机质,但同时也具有高油、高盐的特性^[4],这可能会导致餐厨垃圾堆肥施用于土壤后具有潜在的环境风险。目前,餐厨垃圾堆肥对土壤性质影响的研究多集中于土壤养分及其基本理化性质,如有机质、氮含量、阳离子交换量、pH(酸性土壤)、电导率等^[5],然而餐厨垃圾堆肥对土壤结构的影响及其机制尚不清楚。

土壤结构是水稻土最重要的物理性质之一,直接影响水稻土生产力^[6]。土壤团聚体稳定性是定量土壤结构的关键指标,且土壤物理化学性质深刻影响土壤团聚体稳定性^[7]。有机质和盐基离子是影响团聚体形成和稳定的重要因素。土壤有机质能增加大团聚体数量,提高团聚体稳定性^[8-10]。土壤有机质还会改变土壤表面电化学性质,调节土壤颗粒间相互作用力(土壤内力)^[11-12],进而影响团聚体稳定性。有研究也证实有机质可以通过削弱静电斥力来增加团聚体稳定性^[13-14]。土壤盐基离子可以影响土壤颗粒的凝聚和分散^[15-16]。单价阳离子如钠离子,由于水化半径大,使得土壤颗粒表面双电层厚度增加,导致土壤颗粒间膨胀增大^[17],从而降低土壤团聚体的稳定性^[18]。与钠离子相同,钾离子也可造成团聚体的分散^[19]。此外,多价阳离子如钙离子,可通过絮凝黏粒、形成阳离子桥键来稳定团聚体^[20]。

餐厨垃圾堆肥中存在丰富的有机质和盐基离子,它们分别对土壤团聚体稳定性造成的影响尚不清楚。因此,本研究旨在明确餐厨垃圾堆肥对水稻土团聚体稳定性的影响,并在介观尺度下,通过土壤表面电化学性质揭示不同有机肥处理造成土壤团聚体稳定性差异的机制,为未来餐厨垃圾堆肥的农业利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究大田试验位于江苏省苏州市临湖镇中国农业大学水稻生态农场临湖基地(31°7'12"N, 120°27'0"E),所在区域属于北亚热带湿润性季风气候类型,年均气温为 16℃,年均降水量为 1160 mm。试验地土壤类型为典型黄泥水稻土,试验前土壤 pH 为 6.23,电导率为 118 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,有机质含量为 27.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 1.48 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量为 0.66 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量为 18.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

田间试验始于 2019 年。试验共设 6 个处理:不施肥对照(CK)、化肥(F)、餐厨新鲜堆肥(FC)、餐厨陈化堆肥(AC)、鸡粪有机肥(CM)和猪粪有机肥(PM)。化肥为当地测土配方肥,餐厨新鲜堆肥为生物干化+好氧堆肥处理(未陈化),餐厨陈化堆肥由餐厨新鲜堆肥经过两个月的陈化后得到,鸡粪有机肥为市售商品有机肥(南通尔康生物有机肥有限公司生产),猪粪有机肥为市售商品有机肥(杭

州汇仁有机肥料有限公司生产)。鸡粪与猪粪有机肥均为市场常见商品有机肥,选取目的是对比餐厨垃圾堆肥与市售有机肥之间的差异。各处理肥料基本性质及用量见表 1。每个处理设 3 个重复,共 18 个小区,采用随机区组设计,小区面积为 10 m×10 m。

为避免小区之间相互影响,各小区用田埂隔开。试验田埂宽 0.5 m,高度 0.4 m,两边薄膜埋深 0.2 m。小区采用单灌单排,防止窜水窜肥。试验田种植水稻,种植方式为移栽插秧,品种为“南粳 46 号”,于 6 月移栽,11 月收获。

表 1 不同肥料的基本信息

Table 1 Basic information about different fertilizers

处理 Treatments	有机质 SOM/%	pH	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)	氮 N/%	磷 P/%	钾 K/%	钠 Na/%	钙 Ca/%	镁 Mg/%	施用量 Application/ (kg·hm ⁻²)
F	—	—	—	16.00	12.00	17.00	—	—	—	1 874
FC	65.22	6.82	5.23	4.02	0.37	0.40	0.21	1.02	0.02	7 462
AC	66.10	8.11	4.60	2.96	1.57	0.68	0.19	1.51	0.02	10 135
CM	54.61	6.86	4.71	2.50	1.22	1.32	0.08	1.42	0.19	12 000
PM	49.96	7.47	3.58	2.91	1.17	2.14	0.07	0.46	0.19	10 309

注: F: 化肥; FC: 餐厨新鲜堆肥; AC: 餐厨陈化堆肥; CM: 鸡粪有机肥; PM: 猪粪有机肥。Note: F-Chemical fertilizer, FC-Food waste fresh compost, AC-Food waste aged compost, CM-Chicken manure organic fertilizer, PM-Pig manure organic fertilizer.

1.3 样品采集及预处理

2022 年 11 月水稻收获后采集表层(0~10 cm)土壤样品。每个小区随机采集 5 个样点土样,混合为一个土样并放入保温箱带回实验室,于阴凉处风干,剔除石块、根系、秸秆等杂物。在土壤含水量适宜时,沿着土壤解理面将样品剥制成大小约为 10 mm 的土块,待风干后过 10 mm 筛用于团聚体稳定性分析。取部分样品研磨过 2 mm,测定阳离子交换量、交换性盐基离子和有机质。阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。交换性盐基离子(交换性钾、钠、钙、镁)均采用乙酸铵溶液提取,交换性钾、钠采用火焰光度法测定,交换性钙、镁采用原子吸收分光光度法测定。有机质采用重铬酸钾外加热法测定。

1.4 团聚体稳定性测定

为更加准确地了解水稻土团聚体稳定机制,分别采用干筛法、Yoder 湿筛法和 Le Bissonnais (LB) 法对供试土壤样品进行团聚体稳定性分析。

干筛法:取约 500 g 风干土样放入套筛中,套筛孔径为 7、5、3、2、1、0.5 和 0.25 mm,使用电动振筛仪进行筛分,频率为 180 r·min⁻¹,振筛时间为 2 min,筛分完成后取出土样称重,得到各级团聚体所占比例。

Yoder 湿筛法:将基于干筛法的粒级配比成 50 g 土样放入烧杯中,用去离子水浸泡 10 min,然后转移至套筛的最上级筛子,采用孔径为 5、2、1、0.25、0.053 mm 的套筛在湿筛仪上进行筛分,湿筛仪转速为 30 r·min⁻¹,上下振幅 4 cm,振荡 10 min。然后取出套筛,将各级团聚体分别冲洗至已知重量铝盒中,在烘箱中 105 ℃下烘干后称重,得到各级团聚体所占比例。< 0.053 mm 的团聚体所占比例通过差减法计算。

LB 法:取 3~5 mm 团聚体,使用快速润湿、慢速润湿和润湿后搅拌的三种方法测定团聚体稳定性^[21]。

采用土壤团聚体平均质量直径(MWD)、相对消散指数(RSI)和团聚体破坏率(PAD)表征团聚体稳定性。计算方法如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \tag{1}$$

$$RSI = \frac{MWD_{LB-slow} - MWD_{LB-fast}}{MWD_{LB-slow}} \times 100\% \tag{2}$$

式中, \bar{x}_i 为 i 粒级团聚体平均直径, mm; W_i 为 i 粒

级团聚体的质量分数。干筛和湿筛法测定的土壤平均质量直径分别标记为 MWD_{dry} 和 MWD_{Yoder} , LB 法中快速润湿、慢速润湿和机械扰动测定的土壤平均质量直径分别标记为 $MWD_{LB-fast}$, $MWD_{LB-slow}$ 和 $MWD_{LB-stir}$ 。

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $DR_{0.25}$ 表示干筛方法下 > 0.25 mm 团聚体所占百分比; $WR_{0.25}$ 表示湿筛方法下 > 0.25 mm 团聚体所占百分比。

1.5 土壤表面电化学性质的测定:

土壤表面电化学性质主要包括土壤表面电位 (ϕ)、表面电荷密度 (σ)、比表面积 (SSA)、表面电荷数量 (Q)。采用物质表面性质联合测定法测定土壤表面电化学性质^[11], 主要步骤如下:

(1) 制备 HCl 饱和土样: 称取 100 g 土壤放入离心瓶中, 再加入 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液 600 mL, 振荡 12 h 之后离心弃去上清液, 此步骤重复 3 次, 完成上述步骤后, 再加入 600 mL 去离子水, 重复三次振荡、离心, 之后在 65°C 条件下烘干土样, 再研磨过 0.25 mm 筛装袋备用。

(2) 离子交换吸附试验: 称取 5 g HCl 饱和土样放入 100 mL 的离心管内, 加入 $0.016 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 和 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合溶液 30 mL,

在摇床上振荡 24 h ($240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 温度 25°C), 随后用冰醋酸调节混合液的 pH 与 Yoder 湿筛法中湿筛液 pH 一致, 振荡 12 h 后继续测定 pH, 使混合液的 pH 维持在湿筛液 pH 范围内, 用 Na、Ca 选择电极测定混合液中 Ca^{2+} 、 Na^{+} 的浓度, 重复 3 次。

(3) 土壤表面电化学性质参数计算: 利用 Na、Ca 选择电极测定离子在界面反应发生前后的浓度变化^[22], 土壤表面电位 (ϕ)、表面电荷密度 (σ)、比表面积 (SSA)、表面电荷数量 (Q) 的计算参考 Li 等^[11]。

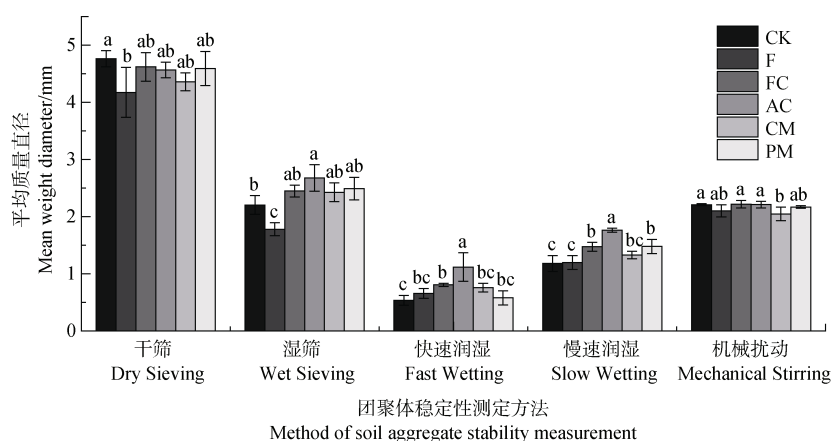
1.6 数据处理

采用 SPSS 26 进行单因素方差分析 (ANOVA), 在 $P=0.05$ 水平下进行显著性检验 (Tukey's HSD test)。使用 Origin 进行 Person 相关性分析, 以确定土壤基本理化性质和表面电化学性质的关系; 使用 Canoco 5 软件对土壤环境因子与土壤团聚体稳定性进行冗余分析 (RDA)。

2 结 果

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

采用干筛、湿筛法和 LB 法 (快速润湿、慢速润湿和机械扰动) 测定不同肥料处理下土壤团聚体 MWD (图 1)。湿筛法结果表明, AC 处理的 MWD_{Yoder} 最高, 为 2.47 mm, 显著高于 CK; 其他有机肥处理



注: 不同小写字母表示不同施肥处理间团聚体稳定性差异显著 ($P \leq 0.05$), CK: 不施肥, F: 化肥, FC: 餐厨新鲜堆肥, AC: 餐厨陈化堆肥, CM: 鸡粪有机肥, PM: 猪粪有机肥。Note: Different lowercase letters indicate significant difference in aggregate stability of different fertilization treatments ($P \leq 0.05$), CK-No fertilization, F-Chemical fertilizer, FC-Food waste fresh compost, AC-Food waste aged compost, CM-Chicken manure organic fertilizer, PM-Pig manure organic fertilizer.

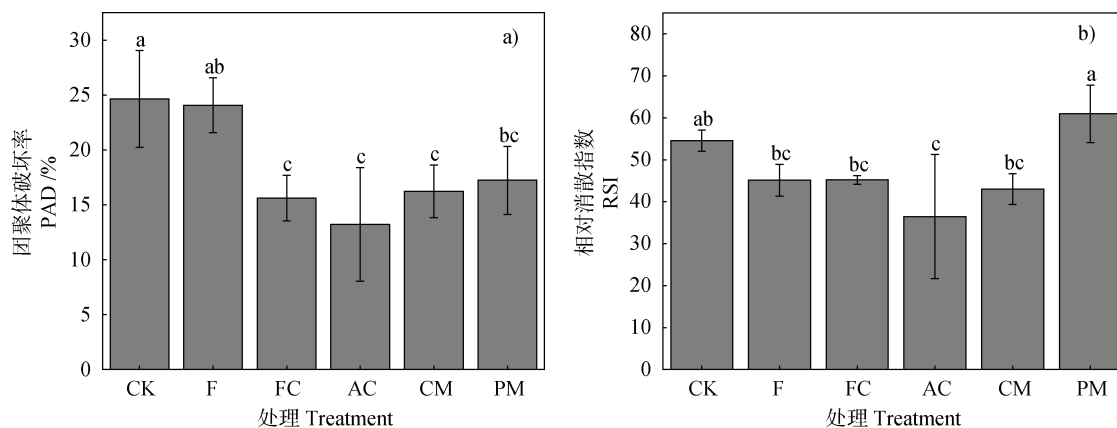
图 1 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on the stability of soil aggregates

(FC、CM 和 PM) MWD_{Yoder} 介于 AC 和 CK 之间, 但差异均不显著; 化肥处理 (F) 下 MWD_{Yoder} 显著低于 CK 处理。快速润湿和慢速润湿结果呈现相似趋势, 均为 AC 处理水稳性团聚体的 $MWD_{LB-fast}$ 和 $MWD_{LB-slow}$ 显著高于其他处理, FC 显著高于 CK 处理, 其中 AC 处理 $MWD_{LB-fast}$ 与 $MWD_{LB-slow}$ 分别较 CK 高 107.8%、49.3%, CK 和 F 处理 $MWD_{LB-fast}$ 与 $MWD_{LB-slow}$ 最低, 且二者无显著差异, FC、CM、PM 之间 $MWD_{LB-fast}$ 与 $MWD_{LB-slow}$ 无显著性差异。干筛法结果表明, CK 处理的机械稳定性团聚体 MWD_{dry} 显著高于 F 处理, 四种有机肥处理 MWD_{dry} 介于二者之间, 且均无显著性差异。在机械扰动方

法下, CM 处理机械稳定性团聚体 $MWD_{LB-stir}$ 最低, 显著低于 CK、FC 和 AC 处理, 而其他处理间均无显著差异。

图 2 是不同施肥处理对土壤团聚体破坏率 (PAD) 和相对消散系数 (RSI) 的影响。有机肥处理 PAD 均显著低于 CK 处理, 且四种有机肥之间 PAD 无显著性差异。与 CK 相比, FC、AC、CM、PM 处理 PAD 分别下降了 9.0%、11.4%、8.4% 和 7.4%。F 处理与 CK 处理 PAD 无显著性差异。F、FC、CM 之间 RSI 无显著性差异, AC 处理 RSI 显著低于其他处理, 较 CK、F、FC、CM、PM 分别降低了 18.1%、8.7%、8.8%、6.6%、24.5%。



注: 不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著 ($P \leq 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments ($P \leq 0.05$).

图 2 不同施肥处理对土壤团聚体破坏率 (PAD) 和相对消散系数 (RSI) 的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on the percentage of aggregate destruction (PAD) and relative slaking index (RSI)

2.2 不同施肥处理对土壤化学性质的影响

不同施肥处理改变了土壤有机质、pH 和电导率 (表 2)。CK 处理有机质含量与 F 处理没有显著差异, 而有机肥处理 (FC、AC、CM、PM) 较 CK 处理有机质含量提高了 10.8%~22.5%。其中 AC、CM、PM 处理有机质含量均显著高于 FC 处理。不同施肥处理土壤 pH 介于 5.05~5.89 之间。与 CK 相比, F 处理显著降低了土壤 pH, 而 AC、CM 和 PM 显著提高了土壤 pH。土壤电导率表现为 CK 最低, 为 $156.13 \mu S \cdot cm^{-1}$; F 处理最高, 为 $271.43 \mu S \cdot cm^{-1}$; 其余有机肥处理之间电导率无显著性差异。

不同施肥处理改变了土壤阳离子交换量与交换性盐基离子含量 (表 3)。与 CK 相比, F 处理与四种有机肥处理阳离子交换量提高了 18.2%~34.1%。

CM、PM 的交换性钾的含量分别较 CK 处理高出 48.0%、52.0%, 其余处理交换性钾含量无显著性差异。各处理之间交换性钠含量无显著性差异。各处理之间交换性钙含量顺序为 $AC > CM > PM > FC > CK > F$, 其中 AC、CM 处理土壤中交换性钙含量较 CK 处理高 48.0%、52.0%, 而 CK 与 F 处理之间交换性钙无显著性差异。CM、PM 处理交换性镁含量显著高于 CK, 而 FC、AC 处理交换性镁含量显著低于 CK。施用化肥和有机肥处理均提高了交换性酸含量, 但是各施肥处理间无显著性差异。

土壤表面电化学性质包括了表面电位、表面电荷密度、比表面积和表面电荷数量等指标 (表 4)。施用化肥或有机肥均降低了土壤表面电位, 其中 AC 处理表面电位最高, 且较 CK 降低了 11.6%。施肥

表 2 不同施肥处理对土壤有机质、pH、电导率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on SOM, pH, and EC

处理 Treatments	土壤有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	pH	电导率 Electrical conductivity/ (μS·cm ⁻¹)	处理 Treatments	土壤有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	pH	电导率 Electrical conductivity/ (μS·cm ⁻¹)
CK	35.2 ± 0.6c	5.50 ± 0.09b	156.1 ± 12.7b	AC	44.5 ± 0.7a	5.79 ± 0.09a	227.9 ± 44.2ab
F	37.4 ± 0.7bc	5.05 ± 0.10c	271.4 ± 91.5a	CM	45.4 ± 0.7a	5.88 ± 0.16a	233.7 ± 60.3ab
FC	39.0 ± 1.0b	5.36 ± 0.06b	216.1 ± 18.9ab	PM	43.1 ± 2.8a	5.89 ± 0.04a	192.8 ± 9.3ab

注：不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著（ $P \leq 0.05$ ）。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments（ $P \leq 0.05$ ）。

表 3 不同施肥处理对土壤阳离子交换量与交换性盐基离子的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on soil cation exchange capacity and exchangeable base ions

处理 Treatments	阳离子交换量 Cation exchange capacity / (cmol·kg ⁻¹)	交换性 K ⁺ Exchangeable K ⁺ / (cmol·kg ⁻¹)	交换性 Na ⁺ Exchangeable Na ⁺ / (cmol·kg ⁻¹)	交换性 Ca ²⁺ Exchangeable Ca ²⁺ / (cmol·kg ⁻¹)	交换性 Mg ²⁺ Exchangeable Mg ²⁺ / (cmol·kg ⁻¹)	交换性酸 Exchangeable acids/ (cmol·kg ⁻¹)
CK	11.83 ± 1.65b	0.25 ± 0.02b	0.82 ± 0.19a	4.74 ± 0.2d	1.72 ± 0.05b	4.32 ± 1.56b
F	14.46 ± 0.56a	0.27 ± 0.02b	0.89 ± 0.21a	4.39 ± 0.26d	1.60 ± 0.04bc	7.31 ± 0.26a
FC	14.54 ± 0.38a	0.22 ± 0.00b	0.94 ± 0.17a	5.29 ± 0.15c	1.56 ± 0.05c	6.53 ± 0.29a
AC	15.79 ± 0.38a	0.26 ± 0.00b	1.11 ± 0.16a	6.32 ± 0.07a	1.65 ± 0.12bc	6.46 ± 0.42a
CM	15.86 ± 0.53a	0.37 ± 0.02a	0.94 ± 0.06a	6.21 ± 0.08a	1.91 ± 0.04a	6.42 ± 0.54a
PM	15.58 ± 0.26a	0.38 ± 0.06a	0.83 ± 0.08a	5.8 ± 0.21b	1.92 ± 0.08a	6.65 ± 0.38a

注：不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著（ $P \leq 0.05$ ）。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments（ $P \leq 0.05$ ）。

表 4 不同施肥处理对土壤表面电化学性质的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on electrochemical properties of soil surface

处理 Treatments	表面电位 φ / (mV)	表面电荷密度 / (C·m ⁻²)	比表面积 SSA/ (m ² ·g ⁻¹)	表面电荷数量 Q / (cmol·kg ⁻¹)
CK	-112.33 ± 5.45a	0.31 ± 0.05b	53.28 ± 4.30a	16.72 ± 1.41c
F	-121.96 ± 2.88b	0.41 ± 0.03a	45.37 ± 1.27b	19.34 ± 1.01ab
FC	-118.81 ± 2.98ab	0.42 ± 0.07a	41.02 ± 5.88b	17.51 ± 0.26bc
AC	-124.23 ± 2.60b	0.45 ± 0.02a	42.24 ± 0.94b	19.83 ± 1.16a
CM	-122.13 ± 1.86b	0.44 ± 0.03a	41.13 ± 3.19b	18.81 ± 0.71ab
PM	-119.79 ± 3.42b	0.40 ± 0.04a	44.32 ± 2.93b	18.36 ± 0.98abc

注：不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著（ $P \leq 0.05$ ）。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments（ $P \leq 0.05$ ）。

处理表面电荷密度较 CK 提高了 29.0%~45.2%，而各施肥处理之间无显著差异。F 处理与四种有机肥的施用显著降低了土壤比表面积，降幅介于 14.8%~23.0%之间，但 F 与四种有机肥之间无显著性差异。F、AC 和 CM 处理表面电荷数量均显著高于 CK。

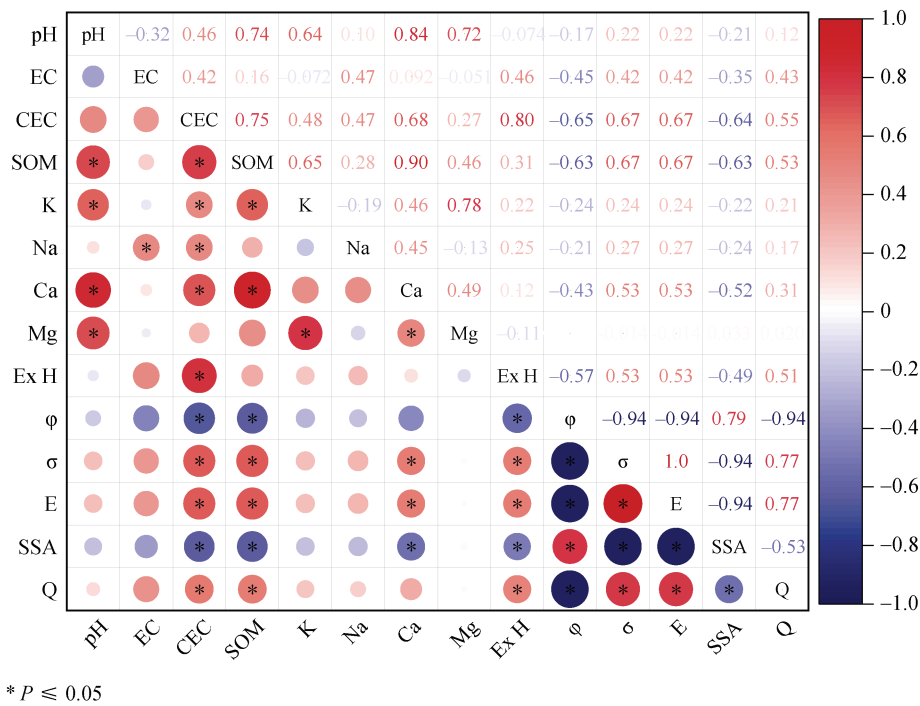
2.3 土壤表面电化学性质与土壤基础化学性质的关系

土壤表面电化学性质与土壤基础化学性质 Person 相关性分析结果如图 3 所示。土壤表面电学参数（表面电位、表面电荷密度、比表面积和表面电荷数量）和有机质含量、阳离子交换量、交换性钙、交换性酸相关性最强。表面电位与阳离子交换量、有机质、交换性酸呈显著负相关关系，相关系数分别为-0.65、-0.63 和-0.57。表面电荷密度与阳离子交换量、有机质、交换性钙呈显著正相关关

系，相关系数分别为 0.67、0.67 和 0.53。表面电荷数量与阳离子交换量、有机质、交换性酸呈显著正相关关系，相关系数分别为 0.55、0.53 和 0.51。

2.4 土壤团聚体稳定性与土壤化学性质之间的关系

冗余分析结果表明土壤化学性质对土壤团聚体机械稳定性的累积解释量高达 91.5% (图 4a)，其中第一典范轴对土壤团聚体机械稳定性的累积解释量为 88.3%。团聚体机械稳定性参数如 $MWD_{LB-stir}$ 主要受土壤基础化学性质因子影响，其中电导率、交换性钾、交换性镁与 $MWD_{LB-stir}$ 呈负相关关系，而 pH、交换性钠、表面电学参数与 $MWD_{LB-stir}$ 相关性均较弱。 MWD_{dry} 与表面电学参数相关性较强，其中表面电荷密度、表面电荷数量与 MWD_{dry} 呈正相关关系，表面电位、比表面积与 MWD_{dry} 呈负相关关系。 MWD_{dry} 也受土壤基础化学性质因子影响，与电导率、交换性钾、交换性镁呈负相关关系。



注：EC：电导率；CEC：阳离子交换量；SOM：土壤有机质；φ：表面电位；σ：表面电荷密度；SSA：比表面积；Q：表面电荷数量；K：交换性钾；Na：交换性钠；Ca：交换性钙；Mg：交换性镁；ExH：交换性酸。Note: SOM-Soil organic matter; EC-Electrical conductivity; φ-Surface potential; σ-Surface charge density; SSA-Specific surface area; Q-Surface charge quantity; CEC-Cation exchange capacity; K-Exchangeable potassium; Na-Exchangeable sodium; Ca-Exchangeable calcium; Mg-Exchangeable magnesium; ExH-Exchangeable acid.

图 3 土壤表面电化学性质和土壤基础化学性质的相关性
Fig. 3 Correlation between soil surface electrochemical properties and soil basic chemical properties

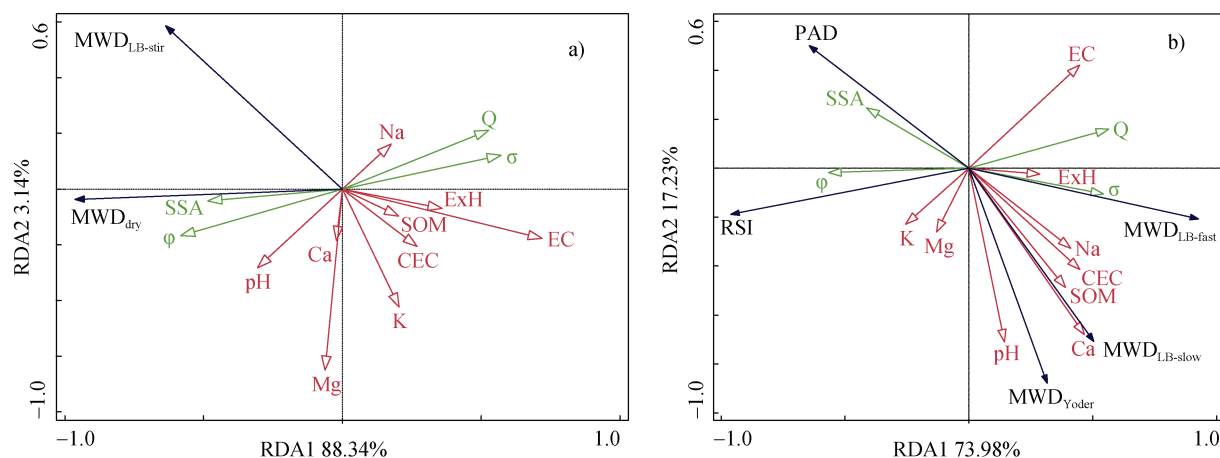
土壤化学性质因子对土壤团聚体水稳定性的累积解释量高达 93.4% (图 4b), 其中第一典范轴对土壤团聚体水稳定性的累积解释量为 74.0%。土壤 pH、有机质、交换性钙、交换性钠、交换性酸、阳离子交换量与团聚体水稳定性参数如 $MWD_{LB-fast}$ 、 $MWD_{LB-slow}$ 、 MWD_{Yoder} 呈正相关, 与 RSI 和 PAD 呈负相关。交换性钙、有机质、阳离子交换量对 $MWD_{LB-slow}$ 的影响大于 $MWD_{LB-fast}$, 其中交换性钙对 $MWD_{LB-slow}$ 影响最大, 相关性最强, 有机质和阳离子交换量次之。 MWD_{Yoder} 受 pH 影响最大, 交换性钙次之。 $MWD_{LB-fast}$ 、 $MWD_{LB-slow}$ 与表面电荷密度、表面电荷数量呈正相关, 与表面电位、比表面积呈负相关, 其中 $MWD_{LB-fast}$ 与表面电荷密度、表面电荷数量相关性要强于 $MWD_{LB-slow}$ 。表面电学参数对 RSI 影响最大, 相关性最强, 对 PAD 的影响更小。RSI 和 PAD 与表面电位、比表面积呈正相关关系, 与表面电荷密度、表面电荷数量呈负相关关系。

总体而言, 土壤表面电学参数是影响团聚体

稳定性的重要因素 (表 5 和表 6), 对团聚体稳定性具有显著影响 ($P \leq 0.05$)。表面电位、表面电荷密度、表面电荷数量对团聚体机械稳定性的解释度分别为 30.1%、28.9%和 24.7%, 对团聚体水稳定性的解释度分别为 23.9%、22.3%和 24.2%。此外, 在土壤基础化学性质因子中, 电导率和交换性钙对团聚体稳定性具有显著影响 ($P \leq 0.05$), 电导率对团聚体机械稳定性的解释度最高, 为 45.9%, 交换性钙对团聚体水稳定性的解释度为 24.1%。

3 讨 论

由于单一团聚体测定方法不能全面揭示团聚体的稳定机制^[23-24], 本研究通过多种团聚体稳定性测定方法以表征不同施肥处理影响下团聚体稳定机制。干筛法和湿筛法可分别表征土壤团聚体在水分含量极低和饱和时对机械破坏的抵抗能力; 而 LB 法是 Le Bissonnais 基于团聚体的主要破碎机制, 利用快速润湿、慢速润湿、预润湿后扰动, 分别表征



注: 黑色箭头是团聚体稳定性参数, 为响应变量, 红色与绿色箭头均为解释变量, 其中红色为土壤基础化学性质因子, 绿色为土壤表面电学参数。 MWD_{dry} : 干筛法; MWD_{Yoder} : 湿筛法; $MWD_{LB-fast}$: 快速润湿; $MWD_{LB-slow}$: 慢速润湿; $MWD_{LB-stir}$: 机械扰动; PAD: 团聚体破坏率; RSI: 团聚体相对消散指数; SOM: 土壤有机质; EC: 电导率; ϕ : 表面电位; σ : 表面电荷密度; SSA: 比表面积; Q: 表面电荷数量; CEC: 阳离子交换量; K: 交换性钾; Na: 交换性钠; Ca: 交换性钙; Mg: 交换性镁; ExH: 交换性酸。Note: The black arrows are the aggregate stability parameters and are response variables, and the red and green arrows are explanatory variables, where the red is the soil's basic chemical property factors and the green is the soil surface electrochemical parameters. MWD_{dry} -Dry sieving, MWD_{Yoder} -Wet sieving, $MWD_{LB-fast}$ -Fast wetting, $MWD_{LB-slow}$ -Slow wetting, $MWD_{LB-stir}$ -Mechanical Stirring; PAD-Percentage of aggregate destruction; RSI-Relative slaking index of soil aggregate; SOM-Soil organic matter; EC- Electrical conductivity; ϕ - Surface potential; σ -Surface charge density; SSA-Specific surface area; Q-Surface charge number; CEC-Cation exchange capacity; K-Exchangeable potassium; Na-Exchangeable sodium; Ca-Exchangeable calcium; Mg-Exchangeable magnesium; ExH-Exchangeable acid.

图 4 土壤化学性质与团聚体稳定性的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil chemical properties and aggregate stability

表 5 土壤化学性质对土壤团聚体机械稳定性的解释度、F 值、P 值

Table 5 Explanatory degree, F-value, and P-value of soil chemistry properties on the mechanical stability of soil aggregate

因子	解释度	F	P	因子	解释度	F	P
Factor	Explains/%			Factor	Explains/%		
电导率 EC	45.9	13.5	0.004	阳离子交换量 CEC	6.5	1.1	0.294
表面电位 φ	30.1	6.9	0.018	交换性钾 ExK	4.2	0.7	0.418
表面电荷密度 σ	28.9	6.5	0.022	有机质 SOM	3.6	0.6	0.41
表面电荷数量 Q	24.7	5.2	0.04	交换性钠 ExNa	2.8	0.5	0.548
比表面积 SSA	20.8	4.2	0.056	交换性镁 ExMg	1.7	0.3	0.628
交换性酸 ExH	11.4	2.1	0.128	交换性钙 ExCa	0.1	<0.1	0.956
pH	8.5	1.5	0.244				

表 6 土壤化学性质对土壤团聚体水稳定性的解释度、F 值、P 值

Table 6 Explanatory degree, F-value, and P-value of soil chemistry properties on the water stability of soil aggregates

因子	解释度	F	P	因子	解释度	F	P
Factor	Explains/%			Factor	Explains/%		
表面电荷数量 Q	24.2	5.1	0.026	交换性钠 ExNa	14.4	2.7	0.088
交换性钙 ExCa	24.1	5.1	0.02	比表面积 SSA	13.8	2.6	0.12
表面电位 φ	23.9	5	0.032	pH	10.4	1.9	0.162
表面电荷密度 σ	22.3	4.6	0.028	交换性酸 ExH	6.6	1.1	0.31
电导率 EC	18	3.5	0.048	交换性钾 ExK	5.9	1	0.374
阳离子交换量 CEC	18	3.5	0.058	交换性镁 ExMg	3.1	0.5	0.564
有机质 SOM	15.4	2.9	0.078				

团聚体对消散作用（又称气爆作用）、非均匀膨胀作用、机械扰动作用（排除气爆作用后的）影响下的团聚体稳定性^[21]。

干筛与机械扰动方法测得的团聚体机械稳定性结果表现出相似的趋势（图 1），说明二者在表征团聚体破坏机制上的共性。除有机胶结剂在团聚体稳定性中发挥胶结作用外，无机胶结剂（金属氧化物，黏粒等）对团聚体机械稳定性同样具有重要影响。有证据表明无机胶结剂可通过在团聚体孔隙内黏附与沉淀，加强团聚体稳定性^[25]，特别是在水分含量较低时，团聚体无机胶结剂的胶结能力将得到加强，其次，有机物可以通过阻碍氧化铁晶核的生长^[26]，降低水稻土中金属氧化物对土壤团聚体的机械稳定作用，这可能是不施肥处理（CK）与四种有机肥处理团聚体机械稳定性相同甚至前者略高于后者的原因。有机肥处理的团聚体破坏率显著低于不施肥处理（图 2），说明机械稳定性相似的团聚体，其稳定

能力仍然不同。由于团聚体机械稳定性与水稳定性的稳定机制不同，只利用机械稳定性表征土壤结构的好坏具有局限性（机械稳定性并非越高越好）。

团聚体水稳定性在不同测定方法下表现出相似的趋势，相较于不施肥（CK）和施化肥（F）处理，有机肥处理均在不同程度上增加了团聚体水稳定性，这与其他研究的结果相同^[27-28]。其中湿筛法综合了气爆作用、非均匀膨胀作用与机械扰动作用的影响，最能代表团聚体水稳定性。餐厨陈化堆肥（AC）在湿筛、快速润湿、慢速润湿方法下土壤团聚体稳定性特征表现一致，在所有处理中土壤团聚体稳定性均为最高，表明施用 AC 处理可显著增强土壤团聚体的水稳定性，削弱气爆作用和非均匀膨胀作用。综合而言，AC 处理稳定团聚体能力也优于餐厨新鲜堆肥（FC）、鸡粪（CM）与猪粪有机肥（PM）。相较于 FC 处理，AC 经过长达两月的陈化形成了更加稳定的有机质^[29]，有助于减少堆肥施用

后有机碳的矿化,增加土壤有机质含量,AC 处理有机质含量显著高于 FC 也印证了这一点(表 2)。由于交换性钙与有机质含量呈正相关,AC 处理交换性钙含量也显著高于 FC 处理。CM 与 PM 处理在所有测定方法中团聚体稳定性并未表现出差异(图 1),但 PM 处理相对消散系数(RSI)显著高于其他有机肥处理(图 2b),这可能是因为 PM 处理交换性钙含量偏低(表 3),对气爆作用更为敏感,RDA 分析也表明 RSI 与交换性钙呈负相关。

快速润湿方法测得团聚体稳定性在 LB 方法中最低。因为在快速润湿方法下,干燥的团聚体具有很高的基质吸力,浸水后溶液迅速进入团聚体孔隙中,并在土粒表面形成水膜并增大团聚体内部压强,压迫闭蓄空气继续挤压孔隙中的空气,土粒内部压强持续增加,直至团聚体中某一脆弱面破裂,此时孔隙内部空气产生爆破作用在短时间内快速释放导致团聚体破碎,这种气爆作用很强,可以使团聚体破碎成更小的颗粒^[30];其次,在快速润湿下团聚体中电解质浓度快速降低,静电斥力快速增大^[12],导致团聚体发生崩解。在本研究中餐厨陈化堆肥(AC)显著提高了土壤中有机质含量,土壤有机质已被证明是促进土壤团聚的重要胶结剂^[31],可以增强团聚体的水稳定性^[32]、降低容重^[33]、提高孔隙连通性和复杂性从而稳定团聚体结构^[34],进而削弱气爆作用,减少团聚体的破坏;其次 AC 处理交换性钙含量较高,交换性钙可通过加强黏粒、有机质的结合增强土壤颗粒间吸引力^[35],增强自身抵抗气爆作用的能力。因此有机质与交换性钙含量可能是 AC 处理 $MWD_{LB-fast}$ 高于 CK、F、FC 处理的原因,而对于 CM、PM 处理,二者有机质含量与 AC 无显著性差异,但交换性钾含量为 AC 的 1.7 倍~1.8 倍,这可能导致钾离子取代多价阳离子的吸附点位,破坏阳离子桥键^[36],从而影响团聚体稳定性。

在慢速润湿条件下,土壤颗粒的膨胀作用是团聚体的主要破坏形式。本研究中餐厨陈化堆肥(AC)土壤表面电荷密度为不施肥处理(CK)的 1.45 倍,导致 AC 处理吸附交换性钙的能力高于其他处理(表 3),而交换性钙水合半径最小,可减弱土壤膨胀作用对团聚体的破坏^[37],因此 AC 处理 $MWD_{LB-slow}$ 高于 CK、F、FC 处理;CM、PM 处理下的土壤团聚体稳定性较 AC 更低,这可能是由于 CM、PM 处理中交换性钾显著高于其他处理(表 3),

而钾离子产生的水合半径偏大,仅次于钠离子,因此降低了团聚体的稳定性。上述分析表明离子含量与离子水合半径之间的差异很可能是影响慢速润湿条件下土壤团聚体稳定性的重要因素。值得一提的是,同价离子的非经典极化(电场-量子涨落耦合效应)作用可以放大离子体积的微小差异,使得胶体颗粒表面被电场诱导而产生极化,影响颗粒间相互作用力从而影响土壤团聚体的稳定性^[38]。

RDA 分析表明土壤表面电化学性质是影响团聚体稳定性的最主要因素,表面电荷数量、表面电荷密度、表面电位均显著影响了土壤机械稳定性与水稳定性($P \leq 0.05$)。但土壤机械稳定性与水稳定性受表面电化学性质的影响机制并不同,这可能是由于测定过程中土壤含水量的差异导致的。含水量越低,土壤中离子浓度越高,而土壤表面电位受土壤中离子浓度影响^[12],高离子浓度会导致表面电荷密度降低。在干筛状态下,由于含水量很低,土壤中离子浓度很高,导致土壤颗粒对阳离子吸附减弱,并减弱了交换性离子对土壤机械稳定性的影响,因此交换性钾、钠、钙、镁对土壤机械稳定性的解释度较低(表 5),此外,团聚体机械稳定性还受电导率影响,同等情况下,电导率高的土壤具有更高的离子浓度,从而降低土壤电场,使得土壤颗粒对无机胶体(Fe、Al 等)胶结作用更弱,团聚体机械稳定性更低。本研究中,施用化肥(F)后土壤电导率显著高于其他处理(表 2),因此 F 处理的团聚体机械稳定性偏低,这与他人研究结果相同^[39]。此外,施用化肥(F)还会降低土壤 pH、有机质含量,这些均可能阻碍团聚体的形成,从而降低团聚体稳定性。除鸡粪有机肥处理在机械扰动方法下稳定性较低外,餐厨垃圾堆肥(FC、AC)的团聚体机械稳定性并未与鸡粪(CM)、猪粪(PM)有机肥表现出显著差异(图 1),这是因为四种有机肥的电导率、表面电位、电荷密度均无显著性差异,而不施肥处理(CK)电导率最低,导致其土壤颗粒对无机胶体(Fe、Al 等)胶结作用较其他处理更强,从而提高了团聚体机械稳定性。

在团聚体水稳定性测定过程中,由于土壤处于饱和状态,离子浓度降低,表面电荷密度较机械稳定性测定时更高。表面电荷密度越高说明土壤颗粒吸附离子的能力越强,并且表面电荷密度高的土壤颗粒较表面电荷密度低的土壤颗粒更容易形成团聚

体^[40],这可能与其吸附的阳离子种类有关^[41],钙离子由于其较强的桥键作用与极化作用易被土壤颗粒吸附^[42]。本研究中交换性钙与表面电荷密度具有显著正相关,相关系数为 0.53 ($P \leq 0.05$),也证实了这一点。RDA 分析还表明交换性钙是影响团聚体水稳定性的主要因素之一,这可能是由于土壤盐基离子由于其化合价的差异会对土壤胶体双电层产生不同程度的压缩,交换性钙作为高价离子对双电层压缩能力更强,具有更强的凝聚作用,更能提高团聚体的稳定性^[15]。其次,核外电子排布的差异使得离子半径和水合半径不同,离子半径大小表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 。一般认为离子半径越小水合半径越大,颗粒间静电相互作用就越弱,不利于土壤颗粒凝聚,进而不利于团聚体形成。尽管施用餐厨垃圾堆肥可能导致土壤盐渍化的报道^[43],但餐厨垃圾堆肥的高盐特性在本研究中并未表现出来,这可能是由于水稻土长期处于淹水环境,随着反复的灌水、排水等田间水分管理,堆肥中的盐基离子被充分稀释,从而减少了盐分在土壤中的直接累积。

Person 相关性分析表明有机质和土壤表面电学性质有显著相关性 ($P \leq 0.05$),这与他人研究结果相同^[44]。有机质增加可以增加土壤表面电荷数量、表面电荷密度,降低表面电位,这是因为有机质一般带负电荷,每增加 1% 的有机质含量,可以增加 $1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的负电荷量^[45]。同时在有机质的分解过程中也可以产生更多带电荷的有机官能团^[46]。有机质和交换性钙也有着显著正相关关系,相关系数为 0.90,这与 Yao 等^[20]的结果相似,这可能是由于交换性钙可通过阳离子桥键和促进黏粒絮凝使有机质结合到黏粒表面,从而实现有机质的稳定,这说明了交换性钙与有机质除了直接促进团聚体稳定性外,还可通过相互作用来强化此影响。综合 RDA 分析与 Person 相关性分析来看,餐厨垃圾堆肥有机质可通过增强表面电荷密度增加交换性钙含量,从而增强土壤团聚体稳定性。

4 结 论

施用餐厨垃圾堆肥可提高水稻土团聚体水稳定性,同时削弱了团聚体气爆作用和非均匀膨胀作用。与不施肥相比,餐厨陈化堆肥显著增加了土壤有机质、pH、表面电荷数量和密度,增加了盐基离子中

交换性钙含量,与餐厨新鲜堆肥、猪粪和鸡粪有机肥相比,餐厨陈化堆肥稳定团聚体的效果最优。团聚体稳定性与土壤有机质、表面电学性质、交换性钙存在显著相关性,土壤有机质除了可直接增强团聚体稳定性外,还可通过改变土壤表面电荷性质来影响交换性钙的吸附,从而提升团聚体稳定性。

致 谢 感谢沈阳农业大学李嵩老师在表面电学参数计算方面提供的指导!

参考文献 (References)

- [1] Li Y Y, Jin Y Y, Li J H. Enhanced split-phase resource utilization of kitchen waste by thermal pre-treatment[J]. *Energy*, 2016, 98: 155—167.
- [2] Paritosh K, Kushwaha S K, Yadav M, et al. Food waste to energy: An overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling[J]. *BioMed Research International*, 2017, 2017: 2370927.
- [3] Zhou J, Wang M Y, Wang G H, et al. Research status and prospect of food waste utilization technology[J]. *Biotic Resources*, 2020, 42 (1): 87—96. [周俊, 王梦瑶, 王改红, 等. 餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望[J]. *生物资源*, 2020, 42 (1): 87—96.]
- [4] Cerda A, Artola A, Font X, et al. Composting of food wastes : Status and challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 57—67.
- [5] Shiralipour A, McConnell D B, Smith W H. Physical and chemical properties of soils as affected by municipal solid waste compost application[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1992, 3 (3/4): 261—266.
- [6] Zong Y T, Lu S G. Does long-term inorganic and organic fertilization affect soil structural and mechanical physical quality of paddy soil?[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66 (5): 625—637.
- [7] Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (5): 1297—1308. [谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动下的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (5): 1297—1308.]
- [8] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (14): 2099—2103.
- [9] Six J, Elliott E, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62 (5): 1367—1377.
- [10] Li S, Wang B L, Zhang X, et al. Soil particle aggregation and aggregate stability associated with ion specificity and

- organic matter content[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116285.
- [11] Li H, Chang L Q, Wei S Q, et al. An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: Theory[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275 (1): 172—176.
- [12] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces contribute more than raindrop impact force to rainfall splash erosion[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 91—98.
- [13] Yu Z H, Zheng Y Y, Zhang J B, et al. Importance of soil interparticle forces and organic matter for aggregate stability in a temperate soil and a subtropical soil[J]. *Geoderma*, 2020, 362: 114088.
- [14] Ali W, Hussain S, Chen J Z, et al. Cover crop root-derived organic carbon influences aggregate stability through soil internal forces in a clayey red soil[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116271.
- [15] Zuo Y, Li S B, Wang T T, et al. Effect of different base ions on Zeta potential and aggregation process of black soil colloid[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51 (1): 99—104. [左研, 李少博, 王童彤, 等. 不同盐基离子对黑土胶体 zeta 电位及凝聚过程的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51 (1): 99—104.]
- [16] Guo Z C, Zhang J B, Fan J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1029—1037.
- [17] Hseung Y. Soil colloid-Volume II-Soil colloid research method[M]. Beijing: Science Press, 1985. [熊毅. 土壤胶体-第二册-土壤胶体研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [18] Crescimanno G, Iovino M, Provenzano G. Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59 (6): 1701—1708.
- [19] Levy G J, Torrento J R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium[J]. *Soil Science*, 1995, 160 (5): 352—358.
- [20] Yao Y, Chen J D, Li F, et al. Exchangeable Ca^{2+} content and soil aggregate stability control the soil organic carbon content in degraded Horqin grassland[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108507.
- [21] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (4): 425—437.
- [22] Tang L L. Combined determination of soil particles surface parameters using an ion-selective electrode method[D]. Chongqing: Southwest University, 2021. [唐玲玲. 采用离子选择电极法测定土粒表面性质参数的方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.]
- [23] Almajmaie A, Hardie M, Acuna T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 39—45.
- [24] Thomaz E L, Araujo-Junior C F, Vendrame P R S, et al. Mechanisms of aggregate breakdown in (sub) tropical soils: Effects of the hierarchical resistance[J]. *Catena*, 2022, 216: 106377.
- [25] Safar F, Whalen J K. Mechanical stability of newly-formed soil macroaggregates influenced by calcium concentration and the calcium counter-anion[J]. *Geoderma*, 2023, 430: 116333.
- [26] Coward E K, Thompson A T, Plante A F. Iron-mediated mineralogical control of organic matter accumulation in tropical soils[J]. *Geoderma*, 2017, 306: 206—216.
- [27] Blanco-Canqui H, Schlegel A J. Implications of inorganic fertilization of irrigated corn on soil properties: Lessons learned after 50 years[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42 (3): 861—871.
- [28] Fang H, Liu K L, Li D M, et al. Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105137.
- [29] Bai J J. The adsorption of ammonia nitrogen by naturally aging biochar in the field and the effect of soil organic matter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021. [白嘉骏. 田间自然陈化生物质炭对氨氮的吸附及土壤有机质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.]
- [30] Fu Y, Zhang Y J, Gu H Y, et al. Influence of slaking on the size distributions of water-stable aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86 (5): 1241—1248.
- [31] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 627—643. [刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (3): 627—643.]
- [32] Lu J W. Study on water stability of soil aggregates and its relationship with soil erodibility[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2002. [卢金伟. 土壤团聚体水稳定性及其与土壤可蚀性之间关系研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002.]
- [33] Zhou H, Fang H, Mooney S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. *Geoderma*, 2016, 266: 66—74.
- [34] Qiu C, Han X Z, Lu X C, et al. Effect of straw incorporation on the stability and pore structure of aggregates in the black soil[J]. *Soils and Crops*, 2023, 12 (2): 170—178. [邱琛, 韩晓增, 陆欣春, 等. 秸秆还田对农田黑土团聚体稳定性及孔隙结构的影响[J]. *土壤与作物*, 2023, 12 (2): 170—178.]
- [35] 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.
- [36] Niu J C, Zhang L N, Zhang Y M, et al. Impacts of exogenous potassium and sodium ions on soil aggregates and organic carbon mineralization in Loessial soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28 (5): 786—797. [牛金臻, 张丽娜, 张亚美, 等. 钾钠离子添加对塬土土壤团聚体和有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28 (5): 786—797.]
- [37] Zhao C Z. Soil swelling and its research methods[J]. Progress in Soil Science, 1982, 10 (2): 1—12. [赵诚斋. 土壤膨胀及其研究方法[J]. 土壤学进展, 1982, 10 (2): 1—12.]
- [38] Liu J F. The effects of soil internal forces on aggregate stability and splash erosion of main soils in Loess region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022. [刘婧芳. 土壤内力对黄土区主要土壤团聚体稳定性及溅蚀的影响机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.]
- [39] Okebalama C B, Marschner B. Reapplication of biochar, sewage waste water, and NPK fertilizers affects soil fertility, aggregate stability, and carbon and nitrogen in dry-stable aggregates of semi-arid soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161203.
- [40] Ma R T, Hu F N, Liu J F, et al. Evolution of soil surface electrochemical characteristics with vegetation restoration on Loess Plateau in Ziwuling Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 392—402. [马任甜, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化性质演变特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 392—402.]
- [41] Wang Q, Wen J, Wen Y J, et al. Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104956.
- [42] Huang X R, Li H, Li S, et al. Role of cationic polarization in humus-increased soil aggregate stability[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67 (3): 341—350.
- [43] Man J Y, Lin Y F, Li C L, et al. Effects of kitchen waste compost on the yield and quality of rice and soil nutrient content[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26 (11): 165—179. [满吉勇, 林永锋, 李丛林, 等. 餐厨垃圾堆肥对水稻生长、产量及土壤养分含量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26 (11): 165—179.]
- [44] Tu K, Hu F N, Xu C Y, et al. Effect of wheat straw and its biochar addition on surface electrochemical characteristics of loessal soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (1): 360—367. [涂坤, 胡斐南, 许晨阳, 等. 小麦秸秆及其生物炭添加对黄绵土表面电化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 360—367.]
- [45] Yu T R. Establishment and development of soil electrochemistry[J]. Soils, 1999, 31 (5): 231—235, 254. [于天仁. 土壤电化学的建立与发展[J]. 土壤, 1999, 31 (5): 231—235, 254.]
- [46] Gruba P, Mulder J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 655—662.

(责任编辑: 檀满枝)