

DOI: 10.11766/trxb202501150030

CSTR: 32215.14.trxb202501150030

陈绘融, 王小燕, 向依玲, 陈展鹏, 陈方鑫. 不同秸秆还田方式对土壤质量的影响及其效应评价[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1651–1664.
CHEN Huirong, WANG Xiaoyan, XIANG Yiling, CHEN Zhanpeng, CHEN Fangxin. Effects of Different Straw Incorporation Methods on Soil Quality and its Effect Evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1651–1664.

不同秸秆还田方式对土壤质量的影响及其效应评价*

陈绘融¹, 王小燕^{1, 2†}, 向依玲¹, 陈展鹏^{1, 2}, 陈方鑫^{1, 2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 秸秆还田在改善土壤结构、减少土壤侵蚀、提高土壤肥力等方面发挥着积极作用, 科学合理地评估秸秆还田下的土壤质量对推进秸秆高效利用、实现作物高产具有重要意义。本研究以不同秸秆还田方式(秸秆不还田、秸秆覆盖还田、秸秆翻耕还田)下的稻-油轮作农田土壤为研究对象, 分析土壤性状的变化, 并运用土壤质量指数进行质量评价, 深入探讨秸秆还田的影响及作用机理。结果表明:(1) 秸秆覆盖还田显著增加了>1 mm 粒径团聚体含量, 土壤团聚体平均质量直径、几何平均直径分别增加 6.60%和 23.58%, 秸秆翻耕还田则表现出与之相反的变化;(2) 秸秆覆盖还田显著增加了各粒径土壤团聚体有机碳含量, 粒径 2~1 mm 团聚体的养分含量最高, 但>5 mm 粒径土壤团聚体养分贡献率最大;(3) 秸秆覆盖还田显著提高了各粒径团聚体的碳氮比和碳磷比, 而秸秆翻耕还田下其比值降低;(4) 基于最小数据集评价不同秸秆还田方式下的土壤质量, 覆盖还田的土壤质量指数显著高于其他处理, 采用研究多个变量之间多层因果关系及其相关强度的路径分析表明, 团聚体稳定性对土壤质量的影响最为显著, 作用强度达到了 0.681。综上, 秸秆覆盖还田是提高农田土壤质量、保存土壤养分、维持团聚体化学计量平衡的最佳还田方式。

关键词: 秸秆还田; 土壤质量指数; 土壤团聚体; 土壤养分; 土壤生态化学计量比

中图分类号: S154 文献标志码: A

Effects of Different Straw Incorporation Methods on Soil Quality and Its Effect Evaluation

CHEN Huirong¹, WANG Xiaoyan^{1, 2†}, XIANG Yiling¹, CHEN Zhanpeng^{1, 2}, CHEN Fangxin^{1, 2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] Straw incorporation is a vital agricultural practice that positively impacts soil structure improvement, erosion mitigation, and fertility enhancement. Given the increasing pressure on agricultural systems to maintain high productivity while minimizing environmental degradation, scientific evaluation of soil quality under straw incorporation holds significant

* 重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0117)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2017B025、XDJK2018B042)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202410635088)共同资助 Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing, China (No.CSTB2023NSCQ-MSX0117) and the Fundamental Research Funds of the Central Universities of China (Nos.XDJK2017B025, XDJK2018B042) and National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.202410635088)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: youblue@swu.edu.cn

作者简介: 陈绘融(2001—), 女, 陕西镇安人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 2509239767@qq.com

收稿日期: 2025-01-15; 收到修改稿日期: 2025-07-03; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-21

implications for advancing efficient straw utilization and achieving high crop yields. Soil quality assessment can guide farmers and policymakers in optimizing straw use efficiency, thereby supporting long-term crop productivity and ecological sustainability. This study focuses on evaluating the effects of different straw management strategies on paddy soil quality under a rice-rapeseed rotation system. It aims to analyze the impact of straw incorporation methods on soil physicochemical properties and elucidates the mechanisms of straw incorporation through soil quality assessment, providing theoretical support for sustainable soil management in rice-rapeseed rotation systems. 【 Method 】 To study the impact of straw incorporation on soil quality, three straw management practices were implemented: no straw return (CK), straw mulching (T1), and straw plowing (T2). Field experiments and laboratory analyses were conducted to assess differences in soil aggregate stability, nutrient distribution, and stoichiometry. The soil quality index (SQI) was calculated using the minimum data set (MDS) method while pathway analysis was employed to explore the mechanisms by which soil physicochemical factors affect soil quality. 【 Result 】 The results revealed that (1) Compared with the CK and T2 treatments, straw mulching significantly increased the content of soil >1 mm water-stable aggregates. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates increased by 6.60% and 23.58%, respectively, indicating that straw mulching enhanced structural stability. (2) T1 increased the organic carbon content of aggregates with different particle sizes, among which the nutrient levels of 2~1 mm aggregates were the highest. Notably, the >5 mm aggregates demonstrated the greatest nutrient contribution capacity, highlighting their role in long-term carbon sequestration. (3) T1 significantly increased the carbon-nitrogen ratio (C/N) and the carbon-phosphorus ratio (C/P). On the contrary, these ratios decreased under T2. (4) The soil quality assessment results based on the MDS revealed that T1 achieved the highest SQI, which was superior to CK and T2 whereas pathway analysis demonstrated that the direct influence of aggregate stability on SQI was the strongest (path coefficient = 0.681). 【 Conclusion 】 Straw mulching optimizes soil quality by promoting the formation of large aggregates, enhancing aggregate stability, improving organic carbon sequestration, and balancing ecological chemometrics. It is the most effective strategy for improving soil health in rice-rapeseed rotation systems. In contrast, the benefits of straw plowing are limited, possibly due to carbon loss caused by disturbance. These findings provide farmers with actionable insights, indicating that straw mulching should be prioritized over plowing to maximize soil quality.

Key words: Straw incorporation; Soil quality index; Soil aggregate; Soil nutrients; Soil ecological stoichiometric ratio

秸秆还田是资源化利用的重要方式,能显著改善土壤结构,增加大团聚体数量,提高土壤生产力稳定性^[1]。相关统计数据显示,2022年我国的秸秆产生量为8.65亿吨,在全国范围内,秸秆的直接还田量达到了4.02亿吨,在秸秆可回收量中,秸秆的直接还田量占了54.7%^[2]。秸秆不还田会对土壤质量、作物生产和环境产生负面影响,所以在农业生产中建议采取秸秆还田的方式,以改善土壤健康和生态环境。以耕作配合秸秆还田为主的保护性耕作措施在土壤肥力提升和土壤结构改善等方面效果显著^[3]。目前,农业生产中存在多种秸秆还田方式,如秸秆覆盖还田、浅旋还田、翻耕还田等。覆盖还田能够稳定土壤结构,促进有机碳的积累,减少矿化^[4],增加土壤养分,从而提高土壤质量,但也会使土壤容重增加,孔隙度减少,影响作物的出苗和根系下扎^[5]。翻耕还田能够改变耕层结构,打破犁底层,增加下层土壤养分,有利于创造较深厚的耕层,具有增产

效果,但翻耕耗时耗力,且因其对耕层土壤的扰动,会使土壤大团聚体含量及稳定性降低,耕层土壤养分含量也有减少的趋势,对耕层土壤质量具有负面影响。

秸秆覆盖还田和秸秆翻耕还田这两种还田方式最显著的差异是对耕层的扰动程度,而耕层的扰动反映在土壤团聚体的组成与有机质的矿化分解上。秸秆覆盖还田因其免耕对耕层扰动较小,还田后土壤有机质不断积累,矿化速度降低,土粒在胶结作用下大团聚体的数量不断增加。在一项长达30年的秸秆还田长期定位试验中发现,秸秆覆盖还田的有机碳含量较不还田处理提高17.90%^[6]。土壤团聚体作为土壤结构的基础单元,在土壤质量管理及其生态功能中起着至关重要的作用,其组成和稳定性是影响有机碳的重要因素之一^[7]。有研究表明土壤耕层约90%的有机碳位于团聚体中^[8],有机碳含量随着团聚体粒径的增大而增加,且大团聚体与微团聚

体相比含有更多初期新形成的不稳定有机成分^[9]。土壤团聚体作为土壤养分储存、迁移、动植物吸收的关键场所，其不同粒径储存了大量的养分，如碳、氮和磷，有机质和团聚体特征的变化使得土壤团聚体中氮、磷含量发生相应的改变，从而影响着土壤生态化学计量比的平衡。Wang 等^[10]研究表明，团聚体稳定性与不同粒径的养分之间存在显著的正相关关系。生态化学计量比影响着化学元素之间的牵制与平衡，是理解土壤养分迁移、固存、植物吸收养分、养分限制和土壤质量的关键工具^[11]。适当的生态化学计量比能够提高土壤养分有效性，增强微生物活性，改善土壤结构与水分保持能力，从而增强土壤对外部环境变化的适应能力，抵抗干旱、盐碱等不利条件。而土壤质量与生态化学计量比密切相关，合理的养分比率能够促进土壤的各项功能，提升土壤健康和可持续利用能力。土壤质量是在支持植物生长、维护生态系统功能和提供环境服务方面的综合能力，包含土壤理化性状、生物特性等。土壤质量评价需综合具体可测的土壤指标定量反映土壤健康状况，以此评判不同秸秆还田方式下土壤质量的高低。

目前，在西南紫色土区有关秸秆还田对土壤质量的相关研究多集中在秸秆还田、有机肥还田、覆盖及耕作方式交互影响下土壤理化性质^[12]、土壤有机碳及碳库管理指数^[13-14]、土壤酶活性及细菌群落^[15-16]等方面，对稻-油轮作系统下秸秆还田对土壤团聚体稳定性及养分分布的影响机制尚不清楚，缺乏土壤质量综合评价，以及探寻影响土壤质量的关键因素。因此，利用水稻、油菜秸秆还田田间试验，研究在西南紫色土稻-油轮作条件下，不同秸秆还田方式对土壤质量的影响规律；探索影响土壤质量的主要因素，为改进稻-油轮作区传统施肥方式，提高秸秆资源利用效率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在重庆市大足区回龙镇姚龙水稻种植专业合作社实施（29°44'N，105°51'E），该区属西南土石山区，地处亚热带季风气候区，海拔 238 m，年均降雨量 1 010 mm，降雨主要集中在 5—10 月，年均

日照时数达 1 157 h，年蒸发量 1 146 mm，蒸发量季节分配不均，年均气温 17.9 °C，有灌溉条件。试验地地层属侏罗系上统遂宁组，母岩为 20309-泥岩-细砂岩，土壤类型为红棕紫泥土，成土母质为紫色泥砂岩，供试区耕作方式为水稻-油菜轮作。

1.2 试验设计

试验地秸秆还田年限为 5 年，于 2023 年 11 月 25 日采样，试验采用单因素随机区组设计，常规化肥施用，设置秸秆不还田(CK)、秸秆覆盖还田(T1)、秸秆翻耕还田(T2)3 种处理，重复 3 次，小区面积为 60 m²。各田间处理如下：(1) 秸秆不还田采取人工收割秸秆移走的方式；(2) 秸秆覆盖还田利用秸秆粉碎机将秸秆粉碎至长度小于 10 cm 后平铺地表，除机械播种作业外，作物整个生长期均不进行中耕管理；(3) 秸秆翻耕还田采取与覆盖还田相同的秸秆粉碎方式将秸秆粉碎覆盖于地表，再将秸秆全量翻埋（兰驼 1LF 翻转犁）于 30 cm 土层中。稻-油轮作方式为一年一季水稻+一季油菜，自试验设计之初开始到土样采集，每年水稻、油菜秸秆均为全量还田，且还田量一致。

各处理采用当地油菜种植已经成熟的灌溉和施肥制度，各试验小区施肥水平相同，自初始秸秆还田年份起，每年进行两次人工撒施商品有机肥（有效活菌数 ≥ 0.2 亿 $\cdot g^{-1}$ 、有机质 $\geq 400 g \cdot kg^{-1}$ 、N+P₂O₅+K₂O $\geq 10\%$ ）375 kg $\cdot hm^{-2}$ ，复合肥（25-7-8）225 kg $\cdot hm^{-2}$ ，硼肥 1.5 kg $\cdot hm^{-2}$ ，病虫害防治等按常规进行，各小区管理保持一致。

1.3 样品采集与测定

于 2023 年 11 月 25 日使用环刀法采集 0~20 cm 耕层土样，测定土壤容重、总孔隙度等指标，每个小区采集 3 个重复样品。每个小区采用五点混合法采集 0~20 cm 耕层土壤样品，共 9 个土样，放入对应编号的样品袋中，土样带回实验室风干后，一部分过 1 mm 筛和 0.25 mm 筛用于测定土壤养分，一部分按干筛比例称取 50 g 的风干土样测定水稳性团聚体。

土壤容重、孔隙度采用环刀法测定；土壤机械组成采用吸管法测定；土壤总有机碳采用重铬酸钾氧化滴定法测定；土壤全氮采用凯氏定氮仪测定；土壤全磷采用氢氧化钠熔融—钼蓝比色法测定；土壤全钾采用火焰光度法测定；碱解氮采用碱解扩散

法测定；有效磷采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法测定；速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定；土壤团聚体采用萨维诺夫干筛法和土壤颗粒分析仪

(TPF-100) 进行湿筛测定。3 种不同秸秆还田方式下 0~20 cm 耕层土壤基础理化性质和土壤机械组成分别见表 1 和表 2。

表 1 不同秸秆还田方式下土壤理化性质

Table 1 Effects of different straw incorporation methods on soil physico-chemical properties

处理 Treatment	容重 Soil bulk density / (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	有机质 Organic matter / (g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon / (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)
CK	1.26±0.04a	52.35±1.67a	16.51±0.06b	9.58±0.03b	1.30±0.02b	0.85±0.01a
T1	1.31±0.09a	50.42±3.54a	18.15±0.86a	10.02±0.13a	1.47±0.02a	0.91±0.07a
T2	1.18±0.09a	55.59±3.42a	13.78±0.68c	8.00±0.39c	1.25±0.05b	0.87±0.08a

处理 Treatment	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
CK	19.30±0.57a	111.7±9.15a	5.65±0.62c	128.3±2.89b	7.35±0.15a
T1	19.32±0.12a	107.3±4.10a	12.73±0.63a	165.0±5.00a	7.16±0.42a
T2	19.06±0.39a	88.2±1.40b	8.17±1.42b	123.3±5.77b	6.97±0.50b

注：CK：秸秆不还田；T1：秸秆覆盖还田；T2：秸秆翻耕还田，下同。数据为“平均值±标准差”；不同的小写字母表示不同处理间存在显著性差异 (P<0.05)。Note: CK: no straw return; T1: straw mulching; T2: straw plowing. The same below. Data is “mean ± standard deviation”; Different letters indicate significant differences between different treatments (P< 0.05) .

表 2 不同秸秆还田方式的土壤机械组成

Table 2 Effects of different straw incorporation methods on soil mechanical composition

处理 Treatment	砂粒 Sand /% (2~0.05 mm)	粉粒 Silt/% (0.05~0.002 mm)	黏粒 Clay/% (<0.002 mm)
CK	42.00 ± 2.00a	48.67 ± 1.55c	10.33 ± 2.08a
T1	13.33 ± 2.31b	73.33 ± 2.31a	13.33 ± 2.31a
T2	20.67 ± 1.15c	64.00 ± 4.00b	14.67 ± 2.31a

1.4 土壤团聚体结构、养分指标计算

平均质量直径 (MWD) 计算公式：

$$MWD = \sum A_i W_i \quad (1)$$

式中， A_i 为任一土壤粒径团聚体的平均直径，mm； W_i 为湿筛后任一土壤粒径团聚体质量占样品总质量的比例。

几何平均直径 (GMD) 计算公式：

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum m_i \ln A_i}{\sum m_i} \right) \quad (2)$$

式中， m_i 为湿筛后土壤任一粒径团聚体的质量，g； $\ln A_i$ 为任一大小范围团聚体的平均直径的自然对数。

>0.25 mm 团聚体质量分数 ($R_{0.25}$) 计算公式：

$$R_{0.25} = \frac{m_{0.25}}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $m_{0.25}$ 为土壤粒径 >0.25 mm 团聚体质量，g； M 为待测样品总质量，g。

平均质量比表面积 (MWSSA) 计算公式：

$$MWSSA = \sum \frac{6W_i}{2.65d_i} \quad (4)$$

式中， d_i 为相邻 2 粒径直径的平均值，cm； W_i 为与 d_i 对应的粒径质量百分比，%。

分形维数 (D) 计算公式为：

$$(3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{max}} \right) = \lg \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (5)$$

式中, d_i 为相邻 2 筛分粒径直径的平均值, mm; W 为小于 d_i 的累积土粒质量, g; W_0 表示土壤各粒径质量的总和; d_{\max} 为最大粒径土粒的平均直径, mm。

养分贡献百分比 (PNC)、养分保存能力 (NPC) 计算公式^[17]:

$$\text{PNC} = \frac{W_1 \times W_2}{W_3} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{NPC} = \frac{W_1 \times W_2}{100} \quad (7)$$

式中, W_1 为粒径的养分含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; W_2 为该粒径水稳性团聚体占比, %; W_3 为耕层土壤碳 (氮) 含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.5 土壤质量指数 (SQI) 评价方法

本试验采用聚类分析的方法构建最小数据集来评估土壤质量。在 SPSS22.0 中运用欧氏距离最短法对评价指标进行 R 型聚类分析。在相应的聚合水平之间, 将评价指标划分为反映耕层土壤质量不同方面特征的若干分组。根据相关分析, 每组中相关性显著的指标可相互代替, 以此剔除冗余指标, 选择具有代表性且相互独立的指标进入最小数据集。本研究指标可明显划分为 6 类, 土壤有机碳、平均质量直径、几何平均直径、 >0.25 mm 团聚体质量分数、碱解氮、有效磷、速效钾为第一类, 土壤容重为第二类, 全钾为第三类, 全氮为第四类, 全磷为第五类, 土壤分形维数、平均质量比表面积为第六类。依据相关性原则, 最终确定将有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、容重 (BD)、有效磷 (AP)、平均质量比表面积 (MWSSA) 纳入最小数据集。

根据评价指标对耕层土壤质量的正负效应, 建立指标与土壤质量之间的隶属函数。

对最小数据集中的指标做主成分分析, 对其结果进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验和 Barlett (巴特利) 检验, KMO 取样適切性量数为 $0.564 > 0.5$, 较为适宜; $P=0.015 < 0.05$ 较为适宜, 数据具有结构效度, 满足使用主成分分析。最后提取评价指标的公因子方差, 各项指标公因子方差占公因子方差之和的比例为各数据集中评价指标的权重值, 结合隶属度对土壤质量指数进行计算, 公式如下:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n w_i s_i \quad (8)$$

式中, w_i 为指标权重, s_i 为隶属度值。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2014 进行数据分析, 采用 Origin 2020 绘制图表, 采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (One Way-ANOVA)、Duncan 法多重比较 ($P < 0.05$)。采用 Spearman 相关分析检验不同指标之间的关系, 使用线性回归分析探讨不同粒径下 C、N、P 含量之间及化学计量比之间的关系, 采用聚类分析、主成分分析构建最小数据集并计算权重, 路径分析阐明影响土壤质量的因素。

2 结果

2.1 土壤团聚体组成及稳定性

由图 1 可知, 不同处理下水稳性团聚体的分布以 0.5 mm 粒径为界限呈现两种趋势, 即秸秆覆盖还田处理下 >0.5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体质量百分数较秸秆不还田均有一定程度提高, 增幅为 $3.54\% \sim 29.04\%$, 其中 $5 \sim 2$ mm、 $2 \sim 1$ mm 粒径水稳性团聚体所占百分数与秸秆不还田间差异显著; 而秸秆翻耕还田呈现降低趋势, 降幅为 $1.17\% \sim 7.94\%$ 。在 <0.5 mm 的两个粒径中, 两种还田处理对于团聚体数量的影响效果相反, 即秸秆覆盖还田土壤水稳性团聚体质量百分数较不还田降低, 在 <0.25 mm 粒径下差异显著, 降低了 24.01% ; 而秸

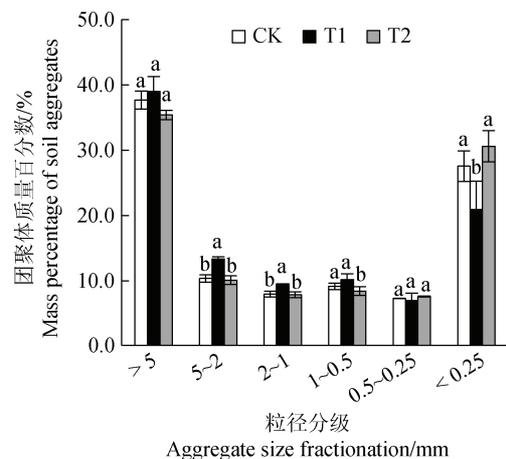


图 1 土壤团聚体粒径分布

Fig. 1 Soil aggregate size distribution

秆翻耕还田较不还田使团聚体数量增加。较秸秆翻耕还田, 秸秆覆盖还田下 5~0.5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体质量百分数提高了 21.02%~32.06%, 且差异显著; 秸秆覆盖还田下 <0.5 mm 粒径的水稳性团聚体所占比例降低了 8.30%~31.56%, 且在 <0.25 mm 粒径的两种还田处理间差异显著。

由图 2 可知, 秸秆覆盖还田的 >0.25 mm 粒径团聚体 ($R_{0.25}$) 接近 80%; 较秸秆不还田处理, 秸秆覆

盖还田使 $R_{0.25}$ 、平均质量直径 MWD、几何平均直径 GMD 均有显著增加, 分别增加了 9.13%、6.60% 和 23.58%, 且显著降低了土壤的分形维数 D 、平均质量比表面积, 分别降低了 3.22% 和 18.98%。相较于秸秆翻耕还田, 覆盖还田土壤 $R_{0.25}$ 、平均质量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 分别提高了 13.91%、12.5% 和 38.43%, 分形维数 D 和平均质量比表面积值分别降低了 4.07% 和 25.62%, 且两处理间差异显著。

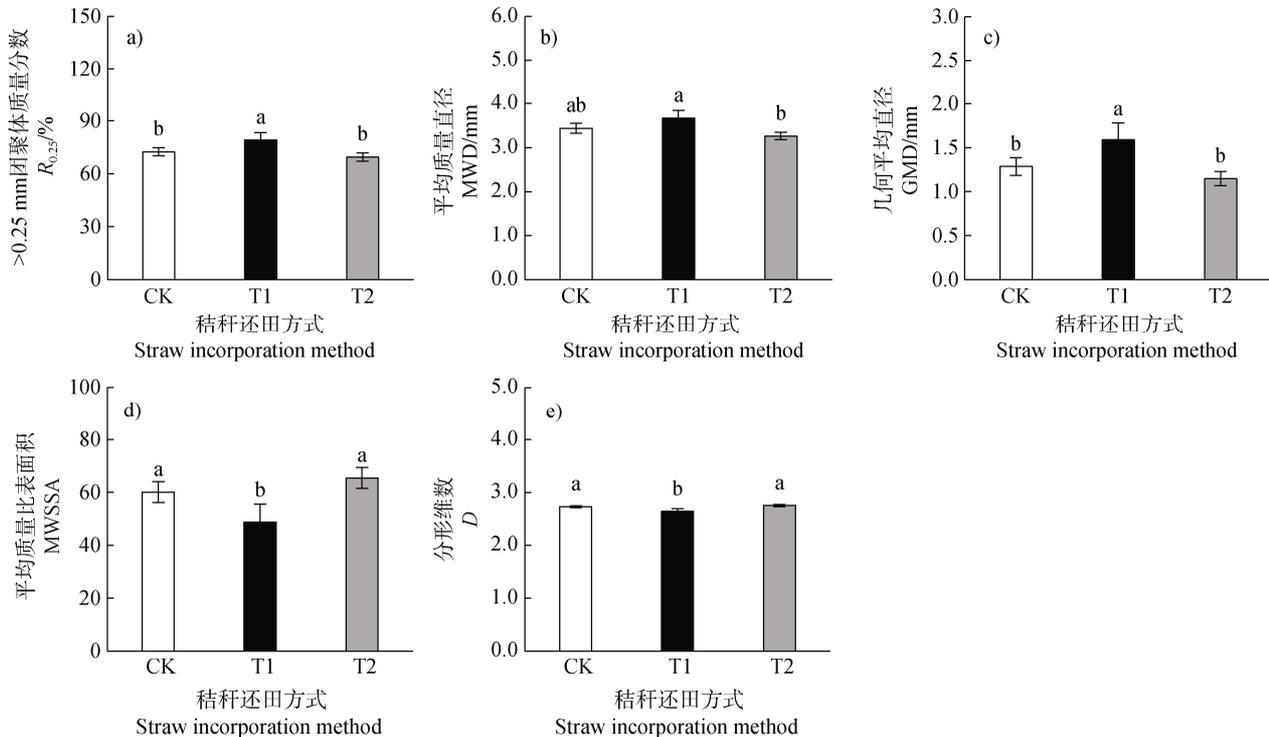


图 2 不同秸秆还田方式对团聚体分布及稳定性的影响

Fig.2 Effects of different straw incorporation methods on the distribution and stability of aggregates

2.2 秸秆还田方式下土壤团聚体 C、N、P 浓度及化学计量比分布

由图 3a 可知, 秸秆覆盖还田处理下各粒径团聚体 SOC 的含量均显著高于其他处理, 秸秆覆盖还田耕层土壤各粒径团聚体中的有机碳明显富集, 其中较秸秆不还田, 秸秆覆盖还田处理下以 0.5~0.25 mm 粒径 SOC 含量增幅最大, 为 76.45%, 秸秆翻耕还田处理下只有 >5 mm、0.5~1 mm 粒径 SOC 含量与秸秆不还田之间差异显著; 由图 3b 可知, 除了 5~2 mm 粒径, 其余粒径秸秆覆盖还田处理 TN 含量均高于秸秆不还田, 秸秆翻耕还田处理下只有 >5 mm、5~2 mm 粒径 TN 含量显著小于秸秆不还田; 由图 3c 可知, 在 >2 mm 和 1~0.5 mm 粒径下

秸秆覆盖还田处理的 TP 含量显著高于秸秆不还田, 而秸秆翻耕还田的 TP 含量在 5~2 mm 粒径下显著高于秸秆不还田, 在 >5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径下秸秆翻耕还田处理的 TP 含量显著低于秸秆覆盖还田处理。此外, 随着土壤团聚体粒径降低, 土壤团聚体中的 SOC、TN、TP 含量分布趋势类似, 各处理土壤养分含量均大致呈先增后降的趋势, 在粒径为 2~1 mm 时达到最高值。

由图 3d~图 3f 可以看出, 土壤团聚体 C/N 和 C/P 呈现相似的变化趋势, 各粒径的 C/N 和 C/P 均以秸秆覆盖还田处理为最大, 秸秆翻耕还田处理为最小, N/P 对不同秸秆还田方式的响应变化较小。相较于秸秆不还田, 秸秆覆盖还田处理的土壤团聚体

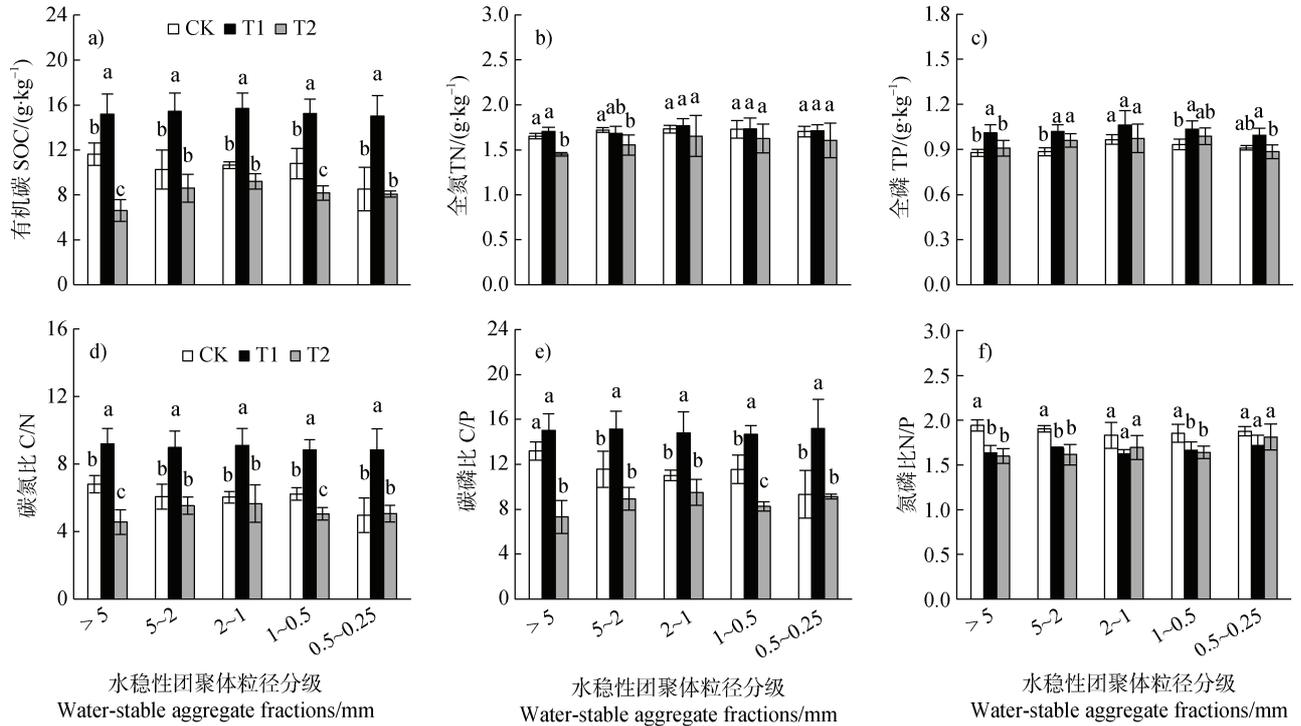


图3 不同措施对不同粒径土壤团聚体有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 含量 (a-c) 和化学计量比的影响 (d-f)

Fig.3 The effects of different measures on SOC, TN, and TP contents (a-c) and stoichiometry (d-f) of soil aggregates

C/N 以 0.5~0.25 mm 粒径增幅最大, 为 78.16%, 相较于秸秆翻耕还田处理以 >5 mm 粒径增幅最大, 为 50.35%; 秸秆覆盖还田处理的 C/N 在 >5 mm 时达到最大值。相较于秸秆不还田, 秸秆覆盖还田处理土壤团聚体 C/P 以 0.5~0.25 mm 粒径增幅最大, 相较于秸秆翻耕还田处理以 >5 mm 粒径增幅最大。秸秆覆盖还田、秸秆翻耕还田处理的 N/P 比在 >2 mm 和 1~0.5 mm 粒径与秸秆不还田之间差异显著, 均以 >5 mm 粒径降幅最大, 分别为 15.77% 和 17.66%, 秸秆覆盖还田处理的 C/P、N/P 比在 0.5~0.25 mm 粒径达到最大。

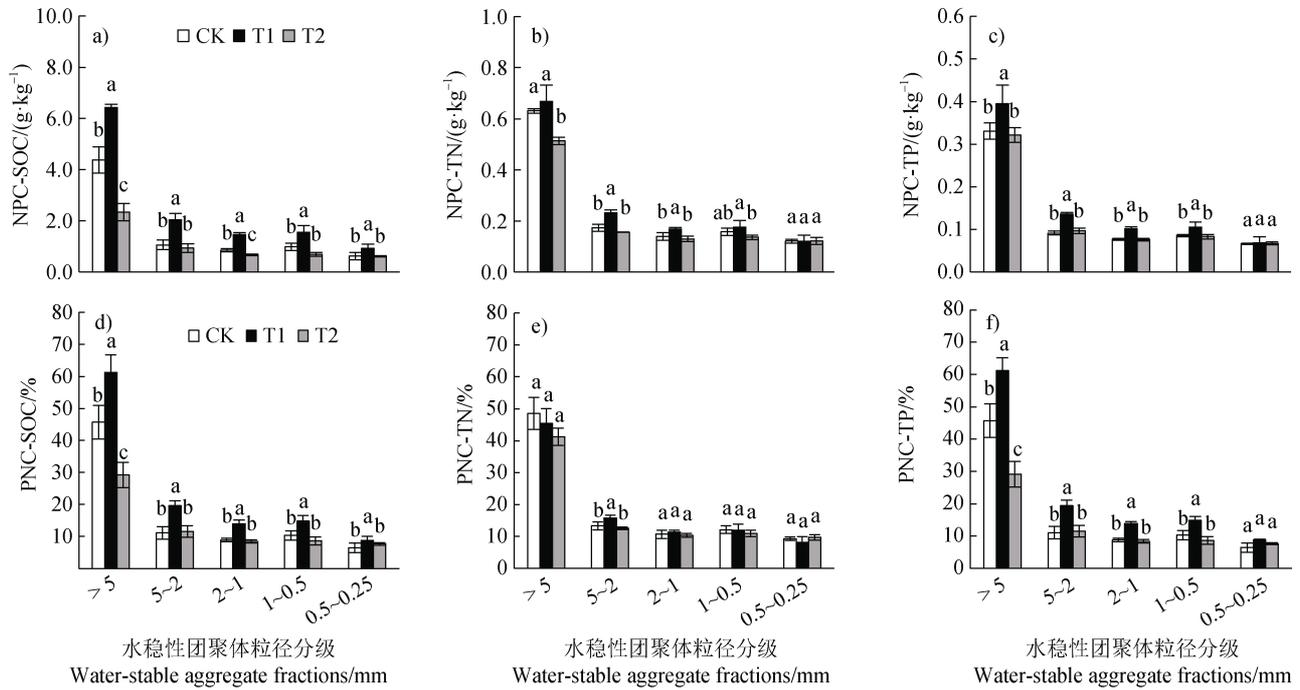
2.3 秸秆还田方式下土壤团聚体养分保存率及贡献率

由图 4 可知, 不同粒径土壤团聚体 C、P 保存能力与 C、P 贡献率分布相似, 且秸秆覆盖还田处理在 >5 mm 粒径有更高的 C、P 保存能力和贡献率。图 4a 和图 4d 结果表明, 与不还田相比, 秸秆覆盖还田处理各粒径 SOC 保存能力显著增大, 以 5~2 mm 粒径增幅最大, 秸秆翻耕还田处理 SOC 保存能力在 >5 mm、2~1 mm 粒径与其他处理差异显著, 均显著下降。由图 4b、图 4e 可知, 5~1 mm 粒径

秸秆覆盖还田处理 TN 保存能力显著高于秸秆不还田和秸秆翻耕还田; 5~2 mm 粒径秸秆覆盖还田处理 TN 贡献率显著高于秸秆不还田和秸秆翻耕还田处理。图 4c、图 4f 可知, 除了 0.5~0.25 mm 粒径, 其余粒径秸秆覆盖还田处理 TP 的保存能力、TP 贡献率显著高于秸秆不还田和秸秆翻耕还田处理, 与秸秆不还田相比, 秸秆翻耕还田 TP 贡献率仅在 >5 mm 粒径时呈现显著差异。

2.4 不同秸秆还田方式下土壤质量评价

最小数据集 (MDS) 是反映土壤质量的最少指标参数集合, 通过建立 MDS 可以筛选出最适宜的土壤质量指标, 从而减少数据冗余。根据聚类分析, 最终确定将 SOC、TN、TP、TK、BD、AP、MWSSA 纳入最小数据集。详细构建过程见 1.5 节。对 MDS 进行主成分分析, 得到表 3。由表 3 可知, 前两个主成分的总贡献率达 73.53%, 满足累计贡献率 >70% 的要求。第一主成分贡献率为 55.49%, 从结果来看, 有机碳、全氮、全磷、容重、有效磷、平均质量比表面积的主成分载荷值均在 0.5 以上; 第二主成分贡献率为 18.05%, 全钾的主成分载荷值也在 0.5 以上。结果表明, 有机质、全氮、全磷、全钾、容重、



注：NPC-SOC、NPC-TN、NPC-TP：土壤有机碳、全氮、全磷的养分保存能力；PNC-SOC、PNC-TN、PNC-TP：土壤有机碳、全氮、全磷的养分贡献百分比。Note: NPC-SOC, NPC-TN, NPC-TP: Nutrient conservation capacity of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus; PNC-SOC, PNC-TN, PNC-TP: Percentage of nutrient contribution of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus.

图 4 不同措施对不同粒径土壤团聚体养分保存能力 (a-c) 和养分贡献率 (d-f) 的影响

Fig. 4 The effects of different measures on nutrient preservation capacity (a-c) and percent nutrient contribution (d-f) of soil aggregates

表 3 土壤质量指标降维与权重分析

Table 3 Dimension reduction and weight analysis of Soil Quality indicators

最小数据集指标 MDS Index	主成分载荷 Load of principal component		公因子方差 Common factor variance	权重/% Weight value
	PC1	PC2		
	土壤有机碳 SOC	0.835		
全氮 TN	0.922	-0.083	0.857	15.47
全磷 TP	0.485	0.201	0.276	14.54
全钾 TK	0.085	0.969	0.946	14.67
容重 BD	0.786	0.207	0.661	15.57
有效磷 AP	0.844	-0.087	0.720	15.20
平均质量比表面积 MWSSA	-0.873	-0.410	0.930	8.74
方差贡献率 Variance contribution rate/%	55.485	18.049		
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	55.485	73.533		
主成分特征值 Principal component eigenvalues	3.884	1.263		

有效磷、平均质量比表面积的权重值分别为 15.81%、15.47%、14.54%、14.67%、15.57%、15.20%、8.74%。说明有机碳对研究区 0~20 cm 耕层土壤质量的贡献率最高，其次贡献率较大的指标为容重和全氮。有机碳作为土壤有机质的重要组成部分，其含量和形态对土壤质量具有决定性作用，有机碳通过腐殖质与矿物质相结合，促进土壤团粒结构的形成，提高土壤稳定性、持水能力，还通过分解释放氮、硫、磷等元素，为植物生长提供养分来源，此外还能提高微生物活性，促进养分循环，影响土壤酸碱缓冲能力和污染物降解能力，有机碳影响着土壤物理、化学、生物性状等方面，所以在评价土壤质量时占有较高的比重。

对最小数据集集中的指标进行归一化处理，再利用式(8)对土壤质量指数进行计算，得出不同秸秆还田方式下土壤质量指数，表现为秸秆覆盖还田(0.765) > 秸秆不还田(0.526) > 秸秆翻耕还田(0.479)。秸秆不还田、秸秆翻耕还田处理土壤质量指数与覆盖还田相比差异显著，分别较覆盖还田小 31.17%和 37.35%。

3 讨 论

3.1 不同秸秆还田方式对土壤结构的影响

秸秆还田作为一种有效改良土壤的保护性耕作措施，可以增加土壤养分含量，促进土壤微团聚体向大团聚体转化，影响土壤团聚体的构成，而土壤水稳性团聚体的数量和分布状况能有效反映土壤结构的稳定性^[18]。对此，国内外学者已针对秸秆还田对土壤团聚体粒径分布及其稳定性展开了大量研究^[19-21]。本研究得出，秸秆覆盖还田较秸秆翻耕还田更有利于增强土壤水稳性团聚体的稳定性，有助于土壤中大团聚体(>0.25 mm)的形成。这与于洪久等^[22]的研究结果类似，即与秸秆翻耕还田相比，秸秆覆盖还田 0~20 cm 耕层>2 mm 水稳性大团聚体占比增加，团聚体稳定性增强。原因可能与土壤有机碳含量的高低有关，研究表明^[23]，土壤有机碳与团聚体关系密切。团聚体的形成和稳定性依赖于有机质含量，秸秆还田增加了土壤有机质，促使小颗粒在有机质和根系作用下团聚成更大、更稳定的颗粒，从而改善土壤结构。

王天高等^[24]和李景等^[25]研究发现，与翻耕相比，长期秸秆覆盖还田可提高土壤 0~20 cm 层各粒径团聚体有机碳含量，尤其对>2 mm 团聚体有机碳含量的提升最多，本研究得出>5 mm 粒径团聚体较其他粒径团聚体更易对耕作方式发生迅速反应。从土壤机械组成来看，秸秆覆盖还田土壤的粉粒和黏粒含量较高，推测其团聚体中这两种颗粒也较多，由于粉粒和黏粒影响团聚体形成与转化，进而调节微生物对有机碳的利用，因此秸秆覆盖还田各粒径团聚体的有机碳含量均高于不还田和翻耕还田土壤。本研究得出秸秆覆盖还田后，0.5~0.25 mm 粒径土壤团聚体的有机碳含量相比于秸秆不还田增幅最大，前人针对农田土壤团聚体有机碳对秸秆还田响应进行了 Meta 分析^[26]，研究表明在西南地区秸秆还田条件下，小团聚体碳含量的相对变化率最高，本研究得到的结果与前人的研究结果类似。本研究还得出，秸秆翻耕还田虽增加了外源有机碳，但其 0~20 cm 耕层各粒径团聚体的有机碳含量均低于其他处理。原因在于翻耕将地表秸秆和浅层根系等新碳源翻入深层土壤，这些新碳与土壤颗粒结合紧密、矿化稳定性高，促进了深层土壤有机碳积累^[27]。因此，翻耕还田提升有机碳的作用主要体现在深层土壤。

3.2 不同秸秆还田方式对土壤养分的影响

生态化学计量比特征用于指示土壤养分在循环过程中的有效性，是表征土壤内部 C、N、P 元素循环的重要指标^[28]。到目前为止，前人已经做了不少关于秸秆覆盖还田的土壤碳氮比的研究，得出秸秆还田能够提高土壤碳氮比的结论^[29-30]。本研究得出秸秆覆盖还田显著提高了各粒径土壤团聚体的 C/N 比，这与前人研究结果类似，原因可能是外源秸秆输入虽能够提高土壤碳含量，但会加剧土壤微生物与作物对氮素营养的竞争^[31]，使土壤 C/N 比上升。有研究表明^[32]，土壤 C/N 与有机质矿化成反比，即 C/N 越低，有机质矿化作用越快。翻耕还田处理下的土壤 C/N 比小于其他处理，原因可能是研究对象为 0~20 cm 耕层土壤，翻耕使得土壤结构被破坏，加速有机质的矿化分解速率；且本研究各粒径 N 含量对于不同措施的响应不显著，含量均在 1.5~2.0 g·kg⁻¹之间，导致 C/N 比小于其他处理。在生态化学计量学应用方面，通常将土壤 C/P 作为指示磷

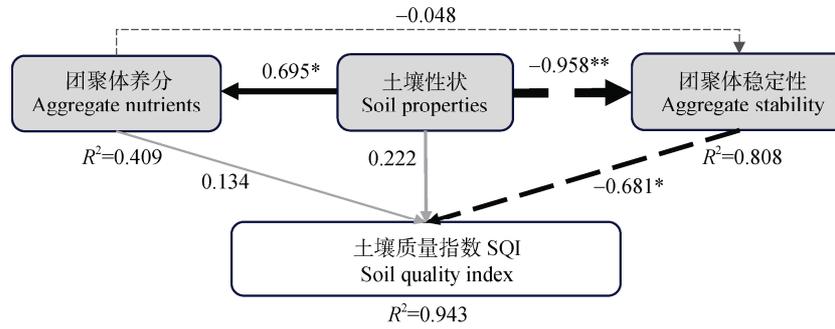
有效性的重要指标^[33], N/P 作为限制性养分判断的重要指标^[34]。有研究发现^[35], 当 C/P<200 时, 土壤微生物碳素短暂增加, 磷素发生净矿化作用。本研究秸秆覆盖还田和翻耕还田处理的 C/P 均值分别为 14.97 和 8.62, 远小于 200, 综合 C/N 比的差异, 最终表明翻耕还田处理提高了土壤有机质的分解速率及磷的有效性; 覆盖还田处理降低了有机残体的分解速率, 提升了磷的有效性。Güsewell^[36]的研究表明, 当 N/P<10 时, 作物生产力受氮限制; 当 N/P>20 时, 作物生产力受磷限制。本研究秸秆覆盖还田和翻耕还田处理 N/P 均值均为 1.67, 远小于 10, 即秸秆还田土壤主要养分限制因素是氮。Mehnaz 等^[37]发现, 外源碳、磷添加诱导了微生物生长的氮限制, 使微生物通过挖掘土壤有机质中的氮来满足自身营养需求, 增加了激发效应的强度, 这可能是该研究下氮限制的原因。本研究各处理间土壤团聚体 C/N 比与 C/P 比的分布特征趋于一致, 线性回归分析也表明其之间的 R^2 达到 0.918, 呈极显著的正相关关系。这是由于全磷和全氮对不同措施的响应趋势一致, 原因可能是氮的微生物固持与挥发损失、反硝化作用抵消了部分氮输入^[38], 而磷易被铁铝氧化物固定为难溶性磷酸盐导致释放的磷难以积累^[39]; 此外, 化肥提供的氮磷以及土壤肥力背景值可能掩盖秸秆还田的贡献^[40-42], 导致统计差异不显著。

3.3 不同秸秆还田方式对土壤质量指数的影响

本研究对土壤质量影响指标进行筛选得到最小数据集, 以此对不同秸秆还田方式下的土壤质量进行评价, 研究表明秸秆覆盖还田的土壤质量指数显著大于其他处理。秸秆还田可通过改善土壤结构、提高养分含量从而提高土壤质量。相关性分析表明, 土壤平均质量直径和几何平均直径与土壤 C/N 比相关系数分别达到 0.624 和 0.573, 表明土壤团聚体稳定性与化学计量比之间存在一定的正相关关系。土壤 C/N 比能反映土壤中有机物质的分解过程和土壤肥力, 当土壤 C/N 比较高时, 意味着土壤中有机碳相对较多, 而土壤有机碳与土壤矿物形成的复合体是团聚体的重要组成部分^[43], 且有机质含量与团聚体稳定性呈显著正相关^[44], 所以 C/N 比的提高有利于形成稳定的土壤团聚体, 这与白秀梅等^[45]研究的结果类似。另一方面, 土壤稳定性的提高导致土壤结构进一步改善, 从而增加了土壤孔隙及土壤水分, 为微生物提供更适宜的生境, 增加微生物生物量碳

及微生物活性^[46], 促进有机碳稳定化, 使得土壤 C/N 比提高^[47]。秸秆覆盖还田通过增加外源碳投入和减少土壤扰动, 促进小团聚体形成稳定的大团聚体。一方面, 大团聚体保存有机碳能力更强, 相比秸秆翻耕还田能减缓有机质分解, 保存并富集土壤养分, 维持土壤化学计量平衡^[48], 影响作物对养分的吸收利用。另一方面, 大团聚体提升土壤抗侵蚀能力^[49]、保水、通气、供肥能力, 支持更多微生物和根系活动, 显著增强土壤稳定性和肥力^[50]。这可能是秸秆覆盖还田土壤质量优于翻耕还田的原因。

本研究基于秸秆还田样地土壤质量指标的最小数据集, 建立土壤质量预测模型。路径分析显示, 该模型拟合良好, 对土壤质量指数 (SQI) 具有较高的解释力 (图 5)。结果表明土壤团聚体稳定性 (作用强度 0.681) 是影响土壤质量的主导因素, 因为土壤团聚体是土壤的关键结构成分, 影响并反映了土壤物理、化学和生物特性之间的相互关系, 是土壤健康和农业可持续发展的关键因素。本研究还发现, 在指标间的影响效应中发现了最高的解释力, 即土壤性状对团聚体稳定性的影响达到了 -0.958, 说明土壤性状主要通过影响土壤团聚体稳定性间接影响土壤质量。裴亚楠等^[51]研究得出, 土壤有机质、有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾等养分指标与 >0.5 mm 粒径土壤水稳性大团聚体的含量呈显著或极显著的正相关关系。虽然团聚体养分对 SQI 的直接作用强度只有 0.134, 但是也不能就此忽视它对土壤质量指数的间接影响。例如, 团聚体中的有机碳可以通过提高团聚体稳定性减少土壤侵蚀风险^[52], 从而提升土壤质量指数中的物理指标 (孔隙度、渗透性等), 还可以通过吸附阳离子 (如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})^[53] 提高土壤保肥能力, 减少养分流失; 团聚体中的氮、磷是植物生长的关键元素, 其比例决定着养分限制类型, 过低的 C/N 比还可能引起 NH_3 和 NO_3^- 的过多释放, 造成土壤酸化^[54], 从而影响土壤质量指数中的化学指标 (pH、养分有效性指标)。总之, 团聚体中碳、氮、磷含量的差异造成不同的生态化学计量比, 其理想的比例是土壤健康的标志, 比例失衡会限制微生物活动和植物生长, 降低 SQI, 而稳定的团聚体结构可以物理保护有机碳和养分, 减缓分解速率, 形成长期碳库, 提升 SQI 可持续性指标。



注：实线和虚线分别表示正相关和负相关。线的暗度或明度表示显著性，粗细表示影响的大小。 R^2 ，决定系数；* $P < 0.05$ ；** $P < 0.01$ 。Note: Solid and dashed lines indicate positive and negative correlations, respectively. The darkness or lightness of the line indicates significance, and the thickness indicates the size of the influence. R^2 , coefficient of determination; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

图5 影响土壤质量指数各因素的直接和间接作用强度

Fig. 5 The direct and indirect effects of each factor on soil quality index

4 结 论

秸秆覆盖还田显著增加了 >0.5 mm 粒径团聚体含量，尤其是 $5\sim 2$ mm 和 $2\sim 1$ mm 粒径，同时降低了 <0.5 mm 粒径团聚体含量，而翻耕还田则呈现相反趋势。覆盖还田提高了土壤团聚体稳定性指标，降低了分形维数和平均质量比表面积值，而翻耕还田降低了耕层稳定性。覆盖还田显著增加了各粒径团聚体的有机碳含量，而翻耕还田则使各粒径团聚体的有机碳含量减少。各处理下土壤养分含量在 $2\sim 1$ mm 粒径达到峰值，但 >5 mm 粒径的养分贡献率和保存能力最大。秸秆覆盖还田的土壤有机碳和全磷含量在各粒径团聚体中最高，且碳氮比、碳磷比显著高于其他处理。路径分析表明，秸秆覆盖还田处理的土壤质量指数最高，团聚体稳定性对土壤质量的影响最为显著。综上，秸秆覆盖还田通过增加大团聚体数量、提高土壤稳定性、增加有机碳和养分含量、优化生态化学计量比，显著提升了稻-油轮作农田土壤质量，是改良土壤结构和提升地力的最佳方式之一。本研究为改进紫色土区轮作农田的传统施肥方式，推进秸秆资源高效利用提供了理论依据和技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] Liu J X, Xiao C X. Effects of returning double-season rice straw to the field and reducing N-fertilizer on yield and soil physicochemical properties[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43 (4): 1—5. [刘金霞, 肖朝霞. 秸秆还田与减施氮肥对双季稻产量及土壤理化性质的影响[J]. 热带农业科学, 2023, 43 (4): 1—5.]
- [2] Yan D Q, Xue Y H, Xu Z Y, et al. Current utilization status, technical models and development proposals for direct crop straw returning to field in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44 (4): 1—14. [严东权, 薛颖昊, 徐志宇, 等. 我国农作物秸秆直接还田利用现状、技术模式及发展建议[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44 (4): 1—14.]
- [3] Wang X, Qi J Y, Jing Z H, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (24): 121—128. [王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (24): 121—128.]
- [4] Kan Z R, Liu W X, Liu W S, et al. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective[J]. Global Change Biology, 2022, 28 (3): 693—710.
- [5] Fatumah N, Tilahun S A, Mohammed S. Water use efficiency, grain yield, and economic benefits of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under four soil tillage systems in Mukono District, Uganda[J]. Heliyon, 2021, 7 (2): e06308.
- [6] Hu X C, Xie W Y, Ma X N, et al. Effects of long-term straw returning on organic carbon and carbon pool management index in dryland maize soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38 (34): 8—13. [胡雪纯, 解文艳, 马晓楠, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38 (34): 8—13.]
- [7] Deng H, Gao M, Long Y, et al. Effects of biochar and

- straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (11): 5481—5490. [邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42 (11): 5481—5490.]
- [8] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure[J]. *Geoderma*, 1993, 56 (1/2/3/4): 377—400.
- [9] Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (4): 1035—1041. [刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035—1041.]
- [10] Wang Y, He C, Shi Y T, et al. Short-term cultivation limiting soil aggregate stability and macronutrient accumulation associated with glomalin-related soil protein in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantations[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 878: 163187.
- [11] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540—550.
- [12] Ma S L, Kuang F H, Lin H Y, et al. Effects of straw returning quantity on soil physical characteristics of winter wheat-summer maize rotation system in the central hilly area of Sichuan basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56 (7): 1344—1358. [马胜兰, 况福虹, 林洪羽, 等. 秸秆还田量对川中丘陵冬小麦-夏玉米轮作体系土壤物理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (7): 1344—1358.]
- [13] Lu C, Xu C, Huang R, et al. Effect of straw and biochar on soil organic carbon and carbon pool management index in purple soil under rape-maize rotation[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35 (3): 482—490. [陆畅, 徐畅, 黄容, 等. 秸秆和生物炭对油菜-玉米轮作下紫色土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35 (3): 482—490.]
- [14] Xu M, Yu L, Wang F H, et al. Response of soil organic carbon content in different slope positions to fertilization management in purple soil sloping fields[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (11): 5491—5499. [徐曼, 余砾, 王富华, 等. 紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J]. *环境科学*, 2021, 42 (11): 5491—5499.]
- [15] Liu D H, Qiao Y, Li X, et al. Effects of different amounts of straw returning on soil enzyme activity in purple soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022 (7): 107—113. [刘东海, 乔艳, 李晓, 等. 紫色土区不同秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (7): 107—113.]
- [16] Chen S H, Gao R C, Xiang X L, et al. Straw mulching and nitrogen application altered ammonia oxidizers communities and improved soil quality in the alkaline purple soil of southwest China[J]. *AMB Express*, 2021, 11 (1): 52.
- [17] Li W Q, Liu Y J, Duan J, et al. Leguminous cover orchard improves soil quality, nutrient preservation capacity, and aggregate stoichiometric balance : A 22-year homogeneous experimental site[J]. *Agriculture , Ecosystems & Environment*, 2024, 363: 108876.
- [18] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26 (2): 81—92.
- [19] Bai N L, Zhang H L, Zhou S, et al. Long-term effects of straw return and straw-derived biochar amendment on bacterial communities in soil aggregates[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 7891.
- [20] Sun H Y, Ji Q, Wang Y, et al. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (2): 369—376. [孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (2): 369—376.]
- [21] Liang Y, Cai H G, Yang L, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (1): 133—140. [梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (1): 133—140.]
- [22] Yu H J, Wang G L, Duan Y, et al. Effects of different tillage and straw returning depths on soil aggregate stability of different soil layers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024 (1): 1—7. [于洪久, 王根林, 段衍, 等. 耕作与秸秆还田深度变化对不同土层团聚体稳定性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024 (1): 1—7.]
- [23] Gupta Choudhury S, Srivastava S, Singh R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 76—83.
- [24] Wang T G, He S Q, Yin Z, et al. Distribution of soil aggregates and its humus under different vegetation types in mountain forests-arid valley ecotone[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (6): 222—227. [王天高, 何淑勤, 尹忠, 等. 山地森林/干旱河谷交错带不同植被条件下土壤团聚体及其腐殖质分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 (6): 222—227.]
- [25] Li J, Wu H J, Wu X P, et al. Impact of long-term

- conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (2): 378—386. [李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (2): 378—386.]
- [26] Li Y R, Wang X X, Liang Y W, et al. Response of farmland soil aggregate-associated organic carbon to straw return: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32 (1): 41—52. [李怡燃, 王秀薪, 梁耀文, 等. 农田土壤团聚体有机碳对秸秆还田响应的 Meta 分析[J]. *中国生态农业学报*, 2024, 32(1): 41—52.]
- [27] Wang J, Xue Y, Pan J J, et al. Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (5): 121—127. [王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (5): 121—127.]
- [28] Peng Y M, Wu J, Cai L Q, et al. Effects of no-tillage and straw mulching on carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in spring wheat and soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (4): 1062—1072. [彭亚敏, 武均, 蔡立群, 等. 免耕及秸秆覆盖对春小麦-土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40 (4): 1062—1072.]
- [29] Shen J Q, Liu H B, Hu W L, et al. Effects of different agronomic techniques on soil organic matter fractions and risk of nitrogen leaching[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26 (4): 1578—1584. [申军强, 刘宏斌, 胡万里, 等. 不同农艺措施对土壤有机质组分和氮素流失风险的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26 (4): 1578—1584.]
- [30] Luo Z Z, Huang G B, Zhang R Z, et al. Effect of long-term conservation tillage on soil fertility in rain-fed areas of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18 (3): 458—464. [罗珠珠, 黄高宝, 张仁陟, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤肥力质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18 (3): 458—464.]
- [31] Yang X, Zhu J, Ren T, et al. The influence of straw treatment methods on straw mineralization and priming effects in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (6): 1755—1765. [杨昕, 朱俊, 任涛, 等. 秸秆预处理方式对秸秆在土壤中矿化和激发效应的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62 (6): 1755—1765.]
- [32] Yang Y, Qiu K Y, Zhu Y C, et al. Soil ecological stoichiometric and its influencing factors of bulk soil and ectorrhizosphere soil in *Picea crassifolia* forest along an elevation gradient in the middle of Helan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (19): 7974—7986. [杨壹, 邱开阳, 朱亚超, 等. 贺兰山中段不同海拔青海云杉林非根和根围土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43 (19): 7974—7986.]
- [33] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8): 3937—3947. [王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28 (8): 3937—3947.]
- [34] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40 (3): 523—534.
- [35] Jia Y, Xu B C, Li F M, et al. Availability and contributions of soil phosphorus to forage production of seeded alfalfa in semiarid Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1): 42—47. [贾宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27 (1): 42—47.]
- [36] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164 (2): 243—266.
- [37] Mehnaz K R, Corneo P E, Keitel C, et al. Carbon and phosphorus addition effects on microbial carbon use efficiency, soil organic matter priming, gross nitrogen mineralization and nitrous oxide emission from soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 134: 175—186.
- [38] Liu Z, Suo P H, Xuan H F, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and microbial biomass carbon, nitrogen along restoration ages of *Pinus massoniana* plantations in red soils erosion region at southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45 (5): 2094—2103. [刘政, 索沛衡, 轩寒风, 等. 南方红壤侵蚀区马尾松林植被恢复对土壤氮有效性和微生物量碳、氮季节动态的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45 (5): 2094—2103.]
- [39] Li H M, Wang R, Zhong Y M, et al. Rhizosphere communication and its effects on improving phosphorus utilization in high-input vegetable production system: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (4): 924—934. [李慧敏, 王瑞, 仲月明, 等. 高投入蔬菜种植体系磷素高效利用的根际对话及效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (4): 924—934.]
- [40] He M, Wang L G, Wang Y C, et al. Response of the active carbon pool and enzymatic activity of soils to maize straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (9): 1942—1951. [贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (9): 1942—1951.]
- [41] Du P, Zhang J J, Guo W, et al. Effect of nitrogen application on nitrogen nutrition and yield of wheat in

- fields of different fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (2): 176—186. [杜盼, 张娟娟, 郭伟, 等. 施氮对不同肥力土壤小麦氮营养和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (2): 176—186.]
- [42] Ma L, Yang L Z, Ci E, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1050—1058. [马力, 杨林章, 慈恩, 等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1050—1058.]
- [43] Wang L Y, Qin L, Lv X G, et al. Progress in researches on effect of iron promoting accumulation of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1041—1050. [王璐莹, 秦雷, 吕宪国, 等. 铁促进土壤有机碳累积作用研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (5): 1041—1050.]
- [44] Liao C L, Li L N, Xie L H, et al. Effect of increased or decreased application of organic manure on aggregates stability and soil cement in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (4): 978—988. [廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (4): 978—988.]
- [45] Bai X M, Han Y Z, Guo H Q. Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Panguangou Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (7): 1654—1662. [白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J]. *生态学报*, 2014, 34 (7): 1654—1662.]
- [46] Yu P F, Xian M H, Dai S Q, et al. Soil microbial stoichiometric characteristics of different successive generations of Eucalyptus plantations[J]. *Forestry Science & Technology*, 2024, 49 (6): 22—27. [余平福, 贤明华, 戴舒琼, 等. 不同连栽代代桉树人工林土壤微生物化学计量特征[J]. *林业科技*, 2024, 49 (6): 22—27.]
- [47] Peng X H. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 1—3.
- [48] Chen P. Enrichment effects of soil nutrients and salts of *Tamarix chinensis* shrubs at different groundwater depths in Yellow River Delta[D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023. [陈萍. 黄河三角洲不同潜水埋深下柽柳灌丛土壤养分和盐分的富集效应[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2023.]
- [49] He Z T, Xia D, Luo T, et al. Effects of land use change on soil aggregate stability and organic carbon stock in the small watershed of western Hubei karst area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23 (1): 200—210. [何志腾, 夏栋, 罗婷, 等. 鄂西喀斯特小流域土地利用变化对土壤团聚体稳定性及有机碳储量的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23 (1): 200—210.]
- [50] Hao S Y, Zhou R, Xu C, et al. Association between exchangeable calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}) with other soil properties in tobacco planting area of northeast Chongqing[J]. *Soils*, 2023, 55 (2): 288—294. [郝尚妍, 周嵘, 徐宸, 等. 重庆渝东北植烟区土壤交换性钙镁与土壤属性的关联特性研究[J]. *土壤*, 2023, 55 (2): 288—294.]
- [51] Pei Y N, Lyu W G, Guo T, et al. Effects of straw-returning combined with application of microbial inoculants on soil aggregates and related nutrients[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34 (12): 3357—3363. [裴亚楠, 吕卫光, 郭涛, 等. 秸秆还田配施促腐菌剂对土壤团聚体及其养分的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34 (12): 3357—3363.]
- [52] Wang J, Ren S C, Wei Y J, et al. Response of water stability of lateritic aggregates with different land use types under different antecedent moisture content[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (4): 978—988. [王杰, 任少聪, 魏玉杰, 等. 不同土地利用方式砖红壤团聚体水稳性及其对前期含水率的响应[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (4): 978—988.]
- [53] Matus J F, Lusk H C, Maire R C. Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in chilean rain forest and agricultural soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 39 (1/2): 187—201.
- [54] Xu Y, Yu Z H, Li Y S, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil-microorganism-crop systems in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55 (2): 562—572. [徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2024, 55 (2): 562—572.]

(责任编辑: 檀满枝)