



玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响

安媛媛^{1,2}, 马 琨², 王明国³, 马占旗⁴

(1. 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021;

3. 宁夏农业技术推广总站, 银川 750001; 4. 宁夏同心县农业技术推广中心, 宁夏同心 751300)

摘要 为揭示玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响, 采用单因素随机区组设计, 设置秸秆不还田(T_0)、秸秆还田 $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_1)、 $6\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_2)、 $9\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_3)、 $12\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_4) 5 个处理, 研究持续 5 a 秸秆还田条件下, 秸秆还田量与土壤团聚体组成及其团聚体碳氮分布间的相互关系。结果表明: 连续秸秆还田对土壤总碳、碱解氮、速效钾有显著影响。与 T_0 相比, T_3 和 T_4 处理土壤总碳提高 4.29%、6.13%, 土壤碱解氮含量提高 11.41%、13.86%, 土壤速效钾含量提高 11.63%、14.89%。 T_4 处理下土壤粒径大小为 $1\sim 2\ \text{mm}$ 的水稳性团聚体百分含量与 T_0 间差异显著, T_3 处理下土壤粒径大小为 $0.5\sim 1\ \text{mm}$ 的水稳性团聚体百分含量显著低于 T_0 。随秸秆还田量的增加, 土壤平均重量直径(MWD)、水稳系数(K)增加。整体上, 受持续秸秆还田影响, 土壤水稳性团聚体中氮含量以 T_3 处理最高, 但不同粒径的土壤水稳性团聚体中碳含量间差异不显著。多元分析表明: $>5\ \text{mm}$ 粒径的土壤水稳性团聚体所占百分数与土壤 MWD 及 K 值间显著正相关; 各粒径土壤水稳性团聚体中的全氮、总碳含量与土壤总碳含量均呈正相关。持续玉米秸秆还田提高土壤水稳性团聚体的 MWD 和 K 值, 促进 $>5\ \text{mm}$ 粒径的土壤大团聚体的形成; 土壤水稳性团聚体中氮含量的差异较碳更显著, 氮更易富集。

关键词 秸秆还田; 团聚体碳、氮; 平均重量直径; 水稳系数

中图分类号 S156.92

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2020)05-0766-10

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元, 是衡量土壤结构性好坏与肥力高低的重要指标, 其含量、分布及稳定性与土壤物理结构、化学性质及生物学特性有着密切的关联^[1-2]。

秸秆还田是一种广泛使用的保护性耕作措施, 可以有效增加土壤养分含量, 影响土壤团聚体的构成, 改变土壤结构^[3-4]。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。已有研究表明, 小麦、高粱秸秆还田可增加土壤有机碳和 $>0.25\ \text{mm}$ 粒径大团聚体的百分含量^[5]。稻田进行绿肥作物覆盖还田后, 可增加土壤有机碳含量^[6]。连续种植绿肥有利于土壤水稳性大团聚体的形成, 使土壤结构和稳定性得到明显改善^[7]。也有研究认为, 长期施用秸秆或者其与化肥配施可显著提高稻田土壤中 $>2\ \text{mm}$ 和 $0.25\sim 2\ \text{mm}$ 的水稳性大团聚体的百分含量及团聚体平

均重量直径(MWD), 显著促进大团聚体形成、提高土壤团聚体的稳定性^[8]。由于土壤碳氮的变化与土壤团聚体形成、分布和稳定性有着紧密的关系^[9]。也有研究表明, 秸秆还田能够有效减缓有机碳的损失, 促进土壤碳库固碳, 进而改善土壤微环境^[10-11]。王双磊等^[12]的研究也证实, 棉花秸秆还田能显著提高各粒径土壤水稳性团聚体中碳氮的含量。孙汉印等^[13]研究也表明不同秸秆还田对土壤大团聚体碳的增加具有显著影响。由此可见, 以秸秆还田为主的农业管理活动会对农田土壤团聚体的组成、碳氮分布及稳定性产生影响。目前, 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水稳性小团聚体与大团聚体间的转化、团聚体碳氮的富集及各级团聚体有机碳的再分配特征等研究^[14-16], 而有关旱作区持续秸秆还田对土壤水稳性团聚体的稳定

收稿日期 2019-12-15 修回日期 2020-02-24

基金项目 国家自然科学基金(31660132); 中央引导地方科技专项计划(NX201801, NX201901); 宁夏回族自治区重点研发计划园区专项(2018BBF03002, 2019BBF03011)。

第一作者 安媛媛, 女, 硕士研究生, 研究方向为农业生态学。E-mail: 1632996558@qq.com

通信作者 马 琨, 男, 博士, 教授, 研究方向为农田生态学及土壤微生物生态学。E-mail: makun0411@163.com

性及碳氮分布影响的机制还不够清楚。因此,利用玉米秸秆还田的长期定位试验,研究在宁夏旱作条件下,以秸秆还田方式带入的外源有机碳氮在各粒径团聚体内的动态分布特征;秸秆还田对土壤养分、土壤水稳性团聚体稳定性的影响规律,为改进旱作区传统施肥方式,推进秸秆资源高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏同心县河西镇农场村(37°9′34″N,105°48′2″E),该区域海拔 1 306 m,年均降水量 276 mm,年均蒸发量为 2 325 mm,年均气温 8.7 °C。土壤质地为砂质壤土。试验开始前土壤基本理化性状为:pH 8.26;全盐 0.28 g·kg⁻¹;有机质 9.2 g·kg⁻¹;全氮 0.54 g·kg⁻¹;碱解氮 41 mg·kg⁻¹;全磷 0.83 g·kg⁻¹;有效磷 41.5 mg·kg⁻¹;全钾 20.2 g·kg⁻¹;速效钾 216 mg·kg⁻¹;缓效钾 1 014 mg·kg⁻¹;阳离子代换量 9.3 mol·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验开始于 2014 年,采用单因素随机区组设计,常规化肥施用,以秸秆不还田(T₀)为对照,设玉米秸秆还田量为 3 000 kg·hm⁻²(T₁)、6 000 kg·hm⁻²(T₂)、9 000 kg·hm⁻²(T₃)、12 000 kg·hm⁻²(T₄)共 5 个处理,重复 3 次,小区面积为 4 m×15 m。秸秆在还田前粉碎为 3~5 cm 的小段,深耕翻入 0~40 cm 土层。供试玉米品种为‘先玉 335 号’,播种密度 6 500 株·667m⁻²。2014—2018 年,玉米全生育期氮肥(N)用量分别为 32 kg·667m⁻²、28 kg·667m⁻²、24 kg·667m⁻²、26 kg·667m⁻²、26 kg·667m⁻²,磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)的施用量均为 12.5 kg·667m⁻²、5 kg·667m⁻²。2018 年 10 月,在玉米收获前,采用多点取样法,采集耕层 0~20 cm 土壤,每小区随机采集两个土样,各样本相互独立,共采集 30 个土样。部分土样低温保存在 2~8 °C 冰箱,用于土壤微生物生物量碳的测定;部分土壤样品自然风干,用于土壤基本理化性状及土壤机械组成的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤理化性质 土壤总碳(TC)、全氮(TN)以及各粒径的土壤水稳性团聚体碳氮均采

用碳氮分析仪(Elementar Vario MAX)测定;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比色;碱解氮采用碱解扩散法;速效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法;土壤 pH 采用酸度计测定^[17],水土体积比为 5:1。土壤微生物生物量碳(SMBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提,总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-L)测定。

1.3.2 土壤团聚体平均重量直径及水稳系数

土壤团聚体组成采用干筛法和湿筛法测定^[18]。土壤团聚体平均重量直径(MWD)的计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n B_i W_i$$

式中: B_i 为湿筛出来的任一大小范围团聚体的平均直径(mm); W_i 为任一粒径大小的团聚体相应质量占土壤样品干质量的分数。

土壤团聚体水稳系数的计算公式为:

$$K = A/M \times 100$$

式中: K 为水稳系数(%); A 为 >0.25 mm 的水稳性团聚体总量(g); M 为 >0.25 mm 的机械稳定性团聚体总量(g)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据处理,利用 DPS 7.05 进行方差分析,Canoco 5.0 进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 不同玉米秸秆还田量对土壤理化及生物学特性的影响

由表 1 可见,与 T₀ 相比,连续 5 a 玉米秸秆还田后,不同还田量下的土壤养分含量均有不同程度的变化。T₂、T₃、T₄ 处理下,土壤中总碳、碱解氮与速效钾的含量均显著高于 T₀($P < 0.05$)。T₃、T₄ 处理下,土壤微生物生物量碳较 T₀ 增加 45.1%、69.5%($P < 0.05$)。T₄ 处理土壤 pH 较 T₀ 显著提高 0.07。除 T₃ 处理土壤全磷较 T₀ 显著提高 10.61%外;其余秸秆还田处理土壤中全磷、速效磷、全氮、C/N 均与 T₀ 无显著差异。

可见,受玉米秸秆还田量及还田时间的影响,旱作区农田土壤的基本理化性状及主要生物学指标会发生明显变化,但短期(5 a)的秸秆还田并不会显著影响土壤的 C/N。

表 1 不同处理土壤理化及生物学性状($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Soil physicochemical and biological properties under different treatments

处理 Treatment	总碳/% TC	全氮/% TN	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) AN	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) TP	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) AP	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) AK	pH	C/N	微生物量碳/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) SMBC
T ₀	1.63±0.03 b	0.080±0.00 ab	28.65±1.20 b	0.66±0.03 b	24.98±1.72 a	196.36±11.28 c	8.58±0.03 bc	20.51±0.77 a	219.58±36.61 c
T ₁	1.62±0.03 b	0.078±0.00 b	28.84±2.95 b	0.68±0.02 b	25.54±2.54 a	200.00±9.48 bc	8.55±0.01 c	20.62±0.58 a	209.71±44.32 c
T ₂	1.73±0.01 a	0.085±0.01 a	31.70±1.16 a	0.68±0.04 b	26.09±1.73 a	217.51±11.55 ab	8.62±0.07 ab	20.93±1.76 a	203.14±101.75 c
T ₃	1.70±0.03 a	0.082±0.00 ab	31.92±1.63 a	0.73±0.06 a	26.19±3.69 a	219.19±6.90 ab	8.58±0.06 bc	20.62±0.87 a	318.53±33.38 b
T ₄	1.70±0.05 a	0.082±0.00 ab	32.62±0.96 a	0.69±0.03 ab	28.47±3.62 a	225.59±23.48 a	8.65±0.04 a	21.00±0.58 a	372.28±57.46 a

注:数据为“平均值±标准差”;同列数值后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。表 2、表 3 同。

Note: Data are “means±standard deviation”; different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$). The same as in table 2 and table 3.

2.2 不同玉米秸秆还田量对土壤非稳性及水稳性团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体数量、稳定性及形态直接影响着土壤结构的优劣,而土壤结构的稳定性及保水性主要受团聚体数量及分布状况的影响^[19]。由表 2 可见,整体上,不同秸秆还田量处理下,各粒径的土壤非水稳性团聚体所占的比例与对照处理间均无显著性差异。

由表 3 可见, T₁、T₂、T₃ 处理不同粒径的水稳性团聚体所占比例与 T₀ 间均无显著性差异。随秸秆还田量的增加,除 T₂ 处理外,其余处理下 >5 mm 粒径的土壤水稳性团聚体所占比例较 T₀ 均呈现增加的趋势,但各处理间无显著差异。

此外,粒径为 2~5 mm、1~2 mm 的水稳性团聚体所占百分含量均随秸秆还田量的持续增加呈现逐渐降低的趋势,而粒径为 0.5~1 mm 的水稳性团聚体所占百分含量表现为 T₁ = T₄ > T₂ > T₃。当秸秆还田量达到 12 000 kg·hm⁻² (T₄) 时,粒径在 2~5 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 的水稳性团聚体所占百分数与 T₀ 间无明显差异,但粒径为 1~2 mm 的水稳性团聚体所占百分数较对照处理显著降低 38.6% ($P < 0.05$)。与 T₁ 相比,T₄ 处理下 1~2 mm 粒径水稳性团聚体所占百分数也显著降低 42.6%;与 T₂、T₃ 相比,T₄ 处理 1~2 mm 的水稳性团聚体所占百分数分别下降 27.8%、22.5%,但三者间无显著

表 2 不同处理土壤非水稳性团聚体组成

Table 2 Composition of soil nonwater-stable aggregates under different treatments

处理 Treatment	各粒级土壤非水稳性团聚体的质量百分数/% Percentage of mass of soil non water-stable aggregates					
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
T ₀	57.9±4.8 a	20.0±3.8 a	6.9±1.0 a	3.7±0.9 ab	3.4±0.9 a	8.2±1.5 a
T ₁	53.5±10.6 a	22.8±6.7 a	7.7±2.1 a	3.8±1.2 a	3.4±1.0 a	8.7±1.1 a
T ₂	59.6±4.2 a	19.1±2.7 a	6.8±1.0 a	3.6±0.9 ab	3.0±0.7 a	7.9±0.7 a
T ₃	57.0±3.6 a	22.6±3.0 a	7.2±0.8 a	2.9±0.2 ab	2.5±0.3 a	7.8±1.1 a
T ₄	58.8±4.7 a	21.8±3.5 a	6.7±0.9 a	2.8±0.4 b	2.5±0.6 a	7.5±0.8 a

表 3 不同处理土壤水稳性团聚体组成

Table 3 Composition of soil water stable aggregates under different treatments

处理 Treatment	各粒级土壤团聚体的质量百分数/% Percentage of mass of soil aggregates under different size fractions					平均重量 直径/mm MWD	K/%
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm		
T ₀	6.7±2.2 a	12.8±.7 ab	11.4±2.6 a	23.6±9.8 a	48.8±9.5 a	1.15±0.19 b	10.97±2.13 d
T ₁	16.9±9.3 a	14.6±3.8 a	12.2±2.8 a	18.5±2.9 ab	48.3±5.4 a	1.16±0.13 ab	11.78±2.32 cd
T ₂	5.5±4.1 a	13.9±5.3 a	9.7±1.4 ab	17.9±2.3 ab	54.7±5.7 a	1.16±0.17 ab	14.52±1.84 bc
T ₃	15.5±18.6 a	10.4±4.8 ab	8.8±3.6 ab	16.1±2.5 b	51.8±11.3 a	1.20±0.31 ab	15.16±3.50 b
T ₄	18.9±20.7 a	8.6±3.7 b	7.0±3.3 b	18.5±6.2 ab	47.0±9.0 a	1.67±0.79 a	18.60±1.31 a

差异。可见,玉米秸秆还田影响土壤水稳性团聚体的组成;持续还田有利于促进中小粒径团聚体的胶结,驱动 2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒径的水稳性团聚体向 >5 mm 粒径的大团聚体转变。

团聚体的水稳定性一般用 MWD 及 K 来表示,MWD 越大,土壤水稳定性团聚体的百分比越高;K 值越大,土壤团聚体越稳定^[20]。由表 3 可见,土壤 MWD 和 K 均表现为随秸秆还田量的增加而逐步提升,两者的变化规律较一致。土壤 MWD 依次为: $T_4 > T_3 > T_2$ 、 $T_1 > T_0$,除 T_4 处理 MWD 显著高于对照外($P < 0.05$),其余处理的 MWD 与对照间均无显著差异。土壤 K 表现为 $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_0$,除 T_1 与 T_0 间 K 无显著性差异外,其余处理均显著高于对照($P < 0.05$)。

2.3 不同秸秆还田量对土壤团聚体中碳氮分布的影响

由表 4 可见, T_2 处理时,不同粒径的土壤水稳性团聚体中碳的含量均高于其他处理;与 T_0 处理相比,各粒径团聚体中的碳有较明显富集现象,

但仅 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 粒径的团聚体中碳含量显著高于 T_0 。随秸秆还田量的继续增加, T_3 、 T_4 处理不同粒径的水稳性团聚体中碳的含量与 T_0 处理相比均无明显差异。土壤团聚体中的氮分布与碳分布趋势类似,除 1~2 mm 粒径的氮含量在 T_4 处理下最高外,整体上以 T_2 、 T_3 时各粒径团聚体中氮含量较高;其中, T_3 处理下,各粒径水稳性团聚体氮的含量分别较 T_0 处理显著提高 37.5%、25.0%、11.1%、30.0%、22.2%。 T_2 、 T_3 处理氮在不同粒径的水稳性团聚体中有明显的富集现象。

不同粒径的水稳性团聚体中,秸秆还田会使 >5 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 粒径的土壤 C/N 呈下降的趋势。总体而言, T_3 处理下,除 1~2 mm 粒径外,其他粒径的团聚体中土壤 C/N 均与 T_0 间差异显著 ($P < 0.05$)。可见,持续玉米秸秆还田及还田量的高低会对土壤水稳性团聚体中的氮分布及其 C/N 产生明显影响;土壤各粒径的水稳性团聚体中,氮比碳表现出更明显的积累现象。

表 4 不同处理土壤水稳性团聚体中碳氮含量

Table 4 Carbon and nitrogen of soil aggregate under different treatments

项目 Item	处理 Treatment	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm
C/%	T_0	1.87±0.17 a	1.82±0.16 a	2.02±0.17 ab	2.15±0.16 b	1.87±0.15 b
	T_1	1.83±0.09 a	1.64±0.08 b	1.94±0.19 b	2.08±0.07 b	1.91±0.12 b
	T_2	2.21±0.25 a	1.95±0.13 a	2.20±0.23 a	2.42±0.14 a	2.25±0.25 a
	T_3	1.89±0.50 a	1.87±0.19 a	2.07±0.23 ab	2.22±0.24 b	1.96±0.13 b
	T_4	1.81±0.08 a	1.82±0.08 a	2.12±0.17 ab	2.20±0.10 b	1.91±0.04 b
N/%	T_0	0.08±0.01 b	0.08±0.01 bc	0.09±0.01 a	0.10±0.01 b	0.09±0.01 b
	T_1	0.08±0.01 b	0.07±0.01 c	0.09±0.01 a	0.10±0.01 b	0.09±0.01 ab
	T_2	0.11±0.01 a	0.09±0.01 ab	0.10±0.02 a	0.12±0.01 ab	0.11±0.01 a
	T_3	0.11±0.02 a	0.10±0.02 a	0.10±0.03 a	0.13±0.04 a	0.11±0.04 a
	T_4	0.09±0.01 b	0.09±0.01 ab	0.11±0.01 a	0.11±0.01 ab	0.10±0.01 ab
C/N	T_0	23.16±2.24 a	22.33±1.40 a	21.62±1.26 a	21.24±1.32 a	21.32±0.69 a
	T_1	21.93±1.16 ab	23.10±2.07 a	22.36±1.02 a	20.72±0.98 a	21.12±0.82 a
	T_2	20.99±1.66 ab	21.37±1.28 ab	21.69±1.19 a	19.74±0.86 ab	20.06±2.55 ab
	T_3	16.76±1.15 c	19.81±3.22 b	20.62±4.58 a	18.02±3.01 b	18.01±3.93 b
	T_4	20.63±0.92 b	21.60±0.91 ab	19.99±1.26 a	19.57±0.94 ab	20.60±0.72 a

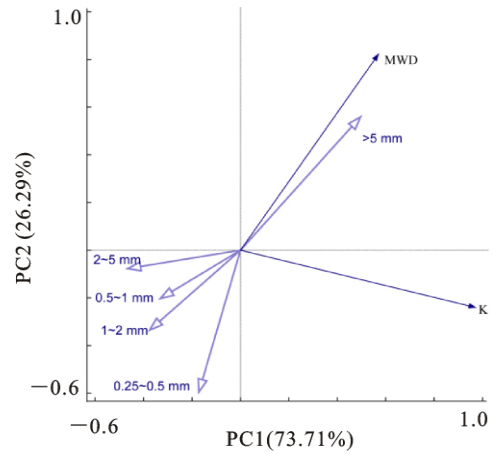
注:数据为“平均值±标准误”;不同小写字母表示不同处理同一粒级差异显著($P < 0.05$)。

Note: Data are “mean±SE”; different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level under different treatments with same size aggregate.

2.4 不同玉米秸秆还田量下土壤团聚体稳定性及各粒径团聚体中碳氮分布与土壤理化性状间的相互关系

由图 1 可以看出,第一、二排序轴能够分别在方差累积贡献率达到 73.71%、26.29%上解释土壤水稳性团聚体组成与 MWD、K 的相互关系。 >5 mm 土壤水稳性团聚体所占的百分数与 MWD、K 呈正相关关系,而与其他粒径水稳性团聚体所占百分数呈负相关关系,这表明,持续较高数量的玉米秸秆还田比较低数量的秸秆还田更容易影响不同粒径土壤水稳性团聚体的组成;土壤水稳性团聚体的 MWD 和 K 主要受土壤中粒径 >5 mm 的水稳性团聚体所占的百分比高低而影响。

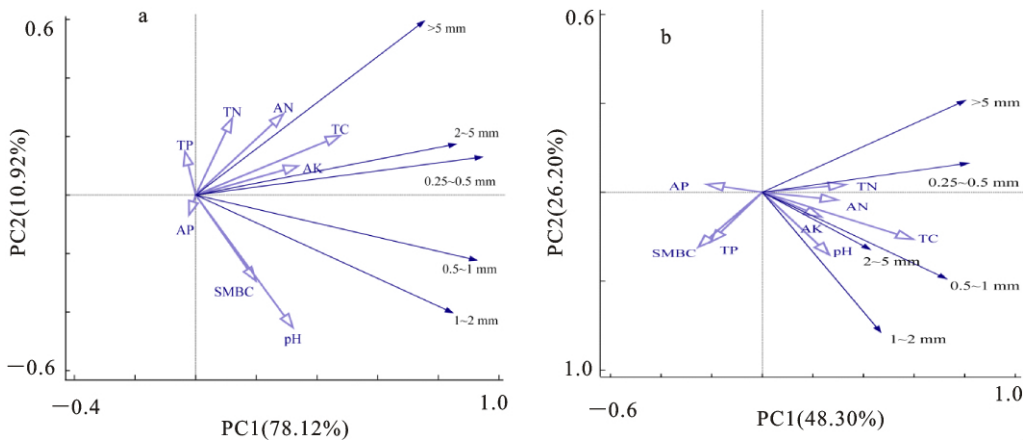
由图 2-a 可知,第一、二排序轴能够分别在方差累积贡献率达到 78.12%、10.92%上解释土壤不同粒径水稳性团聚体中的氮含量与土壤主要理化指标及生物学性状之间的相互关系($r_1=0.58$, $r_2=0.80$)。 >5 mm、2~5 mm、0.25~0.5 mm 的土壤水稳性团聚体中的氮与土壤总碳、碱解氮、速效钾、全氮呈正相关; $0.5\sim 1$ mm、1~2 mm 的土壤水稳性团聚体中氮与土壤总碳、微生物生物量碳以及土壤 pH 间也存在正相关关系。图 2-b 中,不同粒径水稳性团聚体中的碳与土壤全碳均



>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 分别指不同粒径水稳性团聚体所占百分比;MWD 指团聚体平均重量直径;K 指团聚体水稳系数

>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm and 0.25~0.5 mm respectively refer to percentage of water-stable aggregates with different particle sizes;MWD refers to mean mass diameter of aggregate;K refers to the water stability coefficient of aggregate

图 1 秸秆还田下水稳性土壤团聚体组成与土壤平均重量直径及水稳系数间的多元分析
Fig.1 Multivariate analysis of composition of soil water-stable aggregate between mean weight diameter and water stability coefficient of soil aggregates



>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 分别指不同粒径土壤水稳性团聚体中氮(a)、碳(b)含量;TC、SMBC、TN、AN、TP、AP、AK、pH 分别指土壤总碳、土壤微生物生物量碳、土壤全氮、碱解氮、土壤全磷、速效磷、速效钾、pH

>5 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm and 0.25~0.5 mm respectively refer to nitrogen or carbon of different particle diameters of water stability aggregate; TC, SMBC, TN, AN, TP, AP, AK, pH respectively refer to soil total carbon, soil microbial biomass carbon, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available potassium and pH

图 2 秸秆还田土壤不同粒径水稳性团聚体中氮(a)碳(b)组成与土壤理化、生物性状间的多元分析
Fig.2 Multivariate analysis of nitrogen, carbon of different soil water-stable aggregate between soil physi-chemical and biological characteristics

呈正相关关系($r_1=0.83$, $r_2=0.60$);土壤微生物生物量碳与 1~2 mm 粒径的土壤团聚体中的碳呈正相关关系,与 >5 mm、2~5 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm 粒径水稳性团聚体中的碳呈负相关。第一、二排序轴能够在方差累积贡献率达到 74.57%上解释了土壤不同粒径水稳性团聚体中的碳含量与土壤主要理化指标及生物学性状之间的相互关系。

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤碳氮的影响

农作物秸秆富含植物生长所必须的氮磷钾等营养元素,是农业生产中重要的肥料来源和潜在碳库。本研究表明,持续秸秆还田下,秸秆还田量高低直接影响土壤中总碳、碱解氮、速效钾及土壤微生物生物量碳的含量,而土壤全氮及 C/N 未受明显影响。已有研究表明,秸秆还田配施常量化肥会增加土壤碳储量^[21];水稻秸秆还田下,化肥减量 15%也能提高土壤碳含量^[22]。分析认为,C/N 较高的玉米秸秆还田后会激发土壤氮的矿化效应,增加土壤碱解氮含量,影响土壤氮素供应^[23],显著增加土壤微生物生物量碳^[24];此外,由于秸秆富含钾素,且其存在形态与秸秆中有机结合态的碳氮有明显差别;因此,随秸秆的腐解,以离子形态广泛存在的钾更容易回到土壤而积累。此外,由于土壤碳氮的变化主要受外源秸秆、化肥输入的影响,随秸秆翻压、还田,土壤通透性增强,耕层土壤温度降低,因而减缓了土壤碳的矿化速率,促进土壤耕层碳的固存,有利于土壤氮的硝化^[25]。玉米秸秆本身含有较高的 C/N,土壤微生物在分解有机物质的同时需要获取更多氮素;因此,在促进土壤碳素固定的同时,也增加了土壤微生物生物量碳的含量。也有研究认为,外源秸秆输入虽能够提高土壤碳氮含量^[26-27],但会加剧土壤微生物与作物对氮素营养的竞争^[28];秸秆还田后,土壤微生物优先作物利用土壤氮素,从而加速了秸秆的腐解,促使土壤微生物生物量氮的增加;而在化肥配施条件下,土壤较丰富无机氮素的存在,能降低微生物与作物对土壤氮的竞争。因此,这可能就是不同秸秆还田量配施化肥后,土壤全氮含量在各处理间无明显差异,而土壤碱解氮较全氮变化更明显的主要原因。

土壤 C/N 是影响土壤微生物的重要因素^[29]。秸秆还田腐解后,部分氮素被释放并供土

壤微生物及作物吸收利用,从而导致土壤 C/N 增加。丘清燕等^[30]认为秸秆还田会导致土壤 C/N 偏大,凌宁等^[31]也印证了这一结论。相反,杨滨娟等^[32]研究表明 3 000 kg·hm⁻² 秸秆粉碎还田配施不同比例化肥降低了土壤 C/N;13 500 kg·hm⁻²的玉米秸秆还田会导致土壤 C/N 失衡^[33]。本研究表明,持续 5 a 秸秆还田及还田量的高低对土壤 C/N 无显著影响,土壤 C/N 较稳定,这与前人的研究结果并不一致。这些结果表明,影响土壤 C/N 变化的原因很可能是由土壤质地类型、秸秆种类、秸秆还田方式及秸秆腐解速率等综合因子作用,具体还需要针对试验土壤环境因子等进一步深入研究。

3.2 秸秆还田对土壤水稳性团聚体稳定性及团聚体中碳氮分布的影响

团聚体作为土壤结构的物质基础,其组成、结构和稳定性会直接影响土壤质量,导致土壤 MWD 及 K 的改变。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。相关研究结果表明,秸秆还田配施化肥能提高土壤>0.25 mm 水稳性团聚体质量百分比,显著增加土壤的平均重量直径^[34];水稻秸秆粉碎还田对红壤水稳性团聚体 MWD 有显著性影响^[35];棕壤添加玉米秸秆以后,不仅促进棕壤>2 mm 水稳性团聚体的形成,而且显著提高棕壤团聚体的 MWD^[36]。本研究中,与 T₀ 处理相比,秸秆还田量的高低影响土壤水稳性团聚体的质量百分数、MWD 与 K;土壤水稳性团聚体 MWD 与粒径>5 mm 的水稳性团聚体所占的百分比呈正相关。分析认为,其直接原因是持续秸秆还田有利于土壤腐殖质的形成,同时随秸秆的腐解,碳、氮、磷、钾等元素的释放,能为作物提供丰富的营养物质,促进作物的生长,使作物根系分泌物增加,从而使土壤周围的有机胶结物质增加,促进了土壤水稳性大团聚体的形成^[37];其间接原因是因为随作物秸秆残体输入土壤,能促进真菌菌丝体生长,微生物的分泌物也有助于将土壤微生物、土壤矿物质和粗颗粒有机物胶结为大团聚体,最终促进大团聚体的形成^[38]。

本研究表明,秸秆还田后,土壤总碳较全氮更容易积累,而土壤团聚体中碳氮的富集则表现出相反的趋势。王碧胜等^[39]研究发现,相同培养时期内添加秸秆,显著提高了>2 mm 和 0.25~2 mm 团聚体中碳的含量。连续有机、无机肥配施

可大幅度提高团聚体中氮的含量^[40]。分析认为,在秸秆腐解时,氮素易被土壤微生物所吸收利用,易转化为土壤微生物生物量氮;但微生物存活周期较短,分解之后易被各粒径土壤团聚体所吸附。因此,这就导致不同粒径土壤水稳性团聚体中氮含量的增加。可见,干旱地区通过长期跟踪、定位分析秸秆还田配施化肥方式对土壤水稳性团聚体稳定性及其碳氮分布规律的影响,将有助于进一步揭示其作用机理。

4 结论

持续玉米秸秆还田会显著影响土壤总碳、碱解氮、速效钾及生物学微生物数碳的含量,但短期(5 a)内秸秆还田量的高低对土壤 C/N 无显著影响。旱作区农田土壤团聚体平均重量直径(MWD)及水稳系数(K)主要由秸秆还田量的数量以及粒径>5 mm 的土壤水稳性团聚体所占百分比决定。持续玉米秸秆还田后,不同粒径土壤水稳性团聚体中总氮较总碳含量受秸秆还田量的影响更明显。

参考文献 Reference:

- [1] ZHOU D X, SU Y, NING Y C, *et al.* Estimation of the effects of maize straw return on soil carbon and nutrients using response surface methodology[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(3): 411-421.
- [2] MIKHA M M, RICE C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809-816.
- [3] ANNABI M, RACLOT D, BAHRI H, *et al.* Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia[J]. *Catena*, 2017, 153: 157-167.
- [4] QIU Q Y, WU L F, ZHU O Y, *et al.* Priming effect of maize residue and urea N on soil organic matter changes with time[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 65-74.
- [5] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 等. 秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 36-40.
SUN L X, CHEN M N, XUE J F, *et al.* Short-term responses of soil aggregate characteristics to different annual straw incorporation rates in winter wheat-summer sorghum cropping system[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 36-40.
- [6] 杨滨娟, 黄国勤, 兰 延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
YANG B J, HUANG G Q, LAN Y, *et al.* Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [7] 张 钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 9-16.
ZHANG Q, YU E J, LIN H B, *et al.* Stability and erodibility of aggregate affected by different continuous green manure cultivations[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 9-16.
- [8] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828-838.
MAO X L, LU K P, HE L ZH, *et al.* Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 828-838.
- [9] WILLIAM H, PHILIP R, JAMES W. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 770-778.
- [10] 万晓晓, 石元亮, 依艳丽. 长期秸秆还田对白浆土有机碳含量及腐殖质组成的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(3): 7-11.
WAN X X, SHI Y L, YI Y L. Effect of straw returning on content of organic carbon and composition of humus in albic soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(3): 7-11.
- [11] 李昌珍, 张婷婷, 杨改河, 等. 秸秆覆盖和施肥对关中灌区夏玉米生长后期土壤呼吸速率的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 411-416.
LI CH ZH, ZHANG T T, YANG G H, *et al.* Effect of straw mulching and fertilization on soil respiration from summer-maize farmland during later growth period in Guanzhong irrigation district[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3): 411-416.
- [12] 王双磊, 刘艳慧, 宋宪亮, 等. 棉花秸秆还田对土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3944-3952.
WANG SH L, LIU Y H, SONG X L, *et al.* Effects of cotton straw returning on soil organic carbon, nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3944-3952.
- [13] 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.
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.

- [14] 张志毅,熊桂云,吴茂前,等.有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):1-9.
ZHANG ZH Y,XIONG G Y,WU M Q,*et al.* Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat-rice system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2020,28(3):1-9.
- [15] 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(5):760-767.
- [16] KARAMI A,HOMAEI M,AFZALINIA S,*et al.* Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*,2012,148(4):22-28.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000:22-114.
BAO SH D. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3rd Ed. Beijing:China Agriculture Press,2000:22-114.
- [18] 石宗琳,王加旭,梁化学,等.渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J].土壤学报,2017,54(2):387-399.
SHI Z L,WANG J X,LIANG H X,*et al.* Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei[J].*Acta Pedologica Sinica*,2017,54(2):387-399.
- [19] NSABIMANA D,HAYNES RJ,WALLIS FM. Size,activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. *Applied Soil Ecology*,2003,26(2):81-92.
- [20] 范 围,吴景贵,李建明,等.秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J].土壤学报,2018,55(4):835-846.
FAN W,WU J G,LI J M,*et al.* Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in Northeast China and maize yield therein[J].*Acta Pedologica Sinica*,2018,55(4):835-846.
- [21] 王 虎,王旭东,田霄鸿.秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3491-3498.
WANG H,WANG X D,TIAN X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*,2014,25(12):3491-3498.
- [22] 吴玉红,郝兴顺,田霄鸿,等.秸秆还田与化肥减量配施对稻茬麦土壤养分、酶活性及产量影响[J].西南农业学报,2018,31(5):998-1005.
WU Y H,HAO X SH,TIAN X H,*et al.* Effects of reduction of fertilizer application rates plus rice straw return on soil nutrient,enzyme activities and wheat yield in rice-wheat rotation system[J].*Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2018,31(5):998-1005.
- [23] ZHAO S C,LI K J,ZHOU W,*et al.* Changes in soil microbial community,enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2016,216:82-88.
- [24] 朱利群,韩新忠,顾克军,等.耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):272-275,281.
ZHU L Q,HAN X ZH,GU K J,*et al.* Effects of tillage and crop residues incorporation on soil nutrient,microbial biomass and enzyme activity under rice-wheat rotation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2013,27(2):272-275,281.
- [25] 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.
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.
- [26] WANG J ZH,WANG X J,XU M G,*et al.* Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2015,102(3):371-381.
- [27] ZHAO J,TIAN N,XUN W B,*et al.* Influence of straw incorporation with and without straw decomposer on soil bacterial community structure and function in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*,2017,101(11):4761-4773.
- [28] ROBERT M D,JUHA M,ROLAND B,*et al.* Influence of microbial activity on plant-microbial competition for organic and inorganic nitrogen[J]. *Plant and Soil*,2006,289(1/2):321-334.
- [29] 王利利,董 民,张 璐,等.不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1073-1077.
WANG L L,DONG M,ZHANG L,*et al.* Effects of organic manures with different carbon-to-nitrogen ratios on soil microbial biomass of organic agriculture[J].*Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2013,21(9):1073-1077.
- [30] 丘清燕,梁国华,黄德卫,等.森林土壤可溶性有机碳研究进展[J].西南林业大学学报,2013,33(1):86-96.
QIU Q Y,LIANG G H,HUANG D W,*et al.* Advances in studies on soluble organic carbon in forest soils[J].*Journal of Southwest Forestry University*,2013,33(1):86-96.
- [31] 凌 宁,荀卫兵,沈其荣.根际沉积碳与秸秆碳共存下作物与微生物氮素竞争机制及其调控[J].南京农业大学学报,2018,41(4):589-597.
LING N,XUN W B,SHEN Q R. Plant-microbial competition for nitrogen in rhizosphere under straw returning regime;mechanisms and manipulation[J].*Journal of Nanjing Agricultural University*,2018,41(4):589-597.

- [32] 杨滨娟,黄国勤,徐 宁,等.秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J].生态学报,2014,34(13):3779-3787.
YANG B J, HUANG G Q, XU N, *et al.* The effects of returning straw containing fertilizer with varying nutrient ratios on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3779-3787.
- [33] 路文涛,贾志宽,张 鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):522-528.
LU W T, JIA ZH K, ZHANG P, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522-528.
- [34] SODHI G P S, BERI V, BENBI D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice - wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 103(2): 412-418.
- [35] 刘 哲,韩霖昌,孙增慧,等.外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J].环境科学学报,2017, 7(6): 2351-2359.
LIU ZH, HAN J CH, SUN Z H, *et al.* Effects of fresh carbon on distribution and stability of aggregates and organic carbon in red soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 7(6): 2351-2359.
- [36] 顾 鑫,安婷婷,李双异,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):243-247,312.
GU X, AN T T, LI SH Y, *et al.* Effects of application of straw on organic carbon in brown soil aggregates by $\delta^{13}\text{C}$ method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 243-247, 312.
- [37] JONES D L, ROUSK J, EDWARDS-JONES G, *et al.* Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113-124.
- [38] 胡 诚,陈云峰,乔 艳,等.秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J].植物营养与肥料学报,2016, 22(1):59-66.
HU CH, CHEN Y F, QIAO Y, *et al.* Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59-66.
- [39] 王碧胜,于维水,武雪萍,等.添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].中国农业科学,2019, 52(9):1553-1563.
WANG B SH, YU W SH, WU X P, *et al.* Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1553-1563.
- [40] 苏慧清,韩晓日,杨劲峰,等.长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J].植物营养与肥料学报,2017, 23(4): 924-932.
SU H Q, HAN X R, YANG J F, *et al.* Effect of long-term fertilization on distribution of aggregates and organic carbon and total nitrogen contents in a brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 924-932.

Effect of Maize Straw Returning to Field on Soil Aggregates and Their Carbon and Nitrogen Distributions

AN Yuanyuan^{1,2}, MA Kun², WANG Mingguo³ and MA Zhanqi⁴

(1.College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

3.Ningxia Agricultural Technology Extension Station, Yinchuan 750001, China;

4.Tongxin Agricultural Technology Extension Center, Tongxin Ningxia 751300, China)

Abstract To reveal the effect of continuous maize straw returning to the field on soil aggregate composition and the distribution of soil carbon and nitrogen in aggregates, we set up five treatments by the method of single factor randomized block design, including no straw returning to the field (T_0), straw returning to the field $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_1), $6\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_2), $9\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_3) and $12\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (T_4). The relationships among soil aggregate composition, the distribution of carbon, nitrogen in the aggregates and the amount of straw returning to the field were discussed. The results showed that soil total carbon, the available nitrogen and the available potassium were significant difference under the different treatment ($P < 0.05$). Compared with control (T_0), the contents of soil total carbon were increased by 4.29% and 6.13%, the contents of soil available nitrogen increased by 11.41% and 13.86% and the content of soil available potassium increased by 11.63% and 14.89% under T_3 and T_4 treatments, separately. The percentage of soil water-stable aggregates with particle size of 1–2 mm under T_4 treatment was significantly different under T_0 treatment. The percentage of soil water-stable aggregates with particle size of 0.5–1 mm was also significantly lower in T_3 than in T_0 . The mean weight diameter (MWD) and soil water stability coefficient (K) were enhanced with the increase of straw returning amount. On the whole, the soil nitrogen of water-stability aggregates was the highest in T_3 , but there was no significant difference for soil carbon in different particle size of soil water-stable aggregates. The results of multivariate analysis showed that there was a significant positive correlation between the percentage of soil water-stable aggregates with particle size over 5 mm and soil MWD and K values. The contents of total nitrogen and total carbon in soil water-stable aggregates were positively correlated with the contents of soil total carbon. In summary, the value of MWD and K of soil water-stable aggregates increased and the percentage of soil large aggregates (> 5 mm in diameter) were promoted by the continuous application of maize straw after 5 years. The difference of the nitrogen content in different particle size of soil water-stable aggregates were more significant than the soil carbon, and soil nitrogen was more easily accumulated in soil aggregate.

Key words Straw returning; Carbon and nitrogen of soil aggregate; Mean weight diameter; Water-stable coefficient

Received 2019-12-15

Returned 2020-02-24

Foundation item National Nature Science Foundation of China (No.31660132); Special Plan of Central Government for Guidance of Local Government Development in Science and Technology (No. NX201801, No. NX201901); Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region (No.2018BBF03002, No.2019BBF03011).

First author AN Yuanyuan, female, master student. Research area: agricultural ecology. E-mail: 1632996558@qq.com

Corresponding author MA Kun, male, Ph.D, professor. Research area: farmland ecology and soil microbial ecology. E-mail: makun0411@163.com

(责任编辑:史亚歌 **Responsible editor: SHI Yage**)