



施肥方式对陇东黄土丘陵沟壑区玉米田 土壤团聚体分布及有机碳的影响

李文文,王工作,韩芬,何倩,段义字,刘家溪

(平凉市水土保持科学研究所,甘肃平凉744000)

摘要:为提高陇东黄土丘陵沟壑区土壤肥力,促进农业绿色低碳发展,基于甘肃平凉窑店镇玉米种养基地,设4个氮水平(N₀、N₁、N₂、N₃),施氮量分别为0,100,200,300 kg·hm⁻²;有机肥为副处理,设配施(N₀+M、N₁+M、N₂+M、N₃+M)和不配施2个水平(N₀、N₁、N₂、N₃),探究不同施肥方式对该地区土壤团聚体稳定性及土壤碳汇能力的影响。结果表明,(1)0~60 cm土层各施肥处理下土壤团聚体均以2~5 mm粒级含量最高,60~80 cm土层以<0.25 mm粒级含量占比最高。(2)化肥有机肥配施能够显著增加0~40 cm土层土壤平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和大团聚体含量(R_{m0.25}),降低分形锥数D和可侵蚀因子K,在施氮量200 kg·hm⁻²配施化肥时土壤MWD、GMD、R_{m0.25}均达到最大,分形锥数D和可侵蚀因子K达到最低。(3)在0~60 cm土层有机碳含量均在粒级<0.25 mm达到最大,土壤各粒级土壤有机碳随着土层深度增加而逐渐减少。在0~40 cm土层各处理均以2.00~5.00 mm粒级团聚体对有机碳贡献率最大,化肥有机肥配施显著增加了土壤各粒级有机碳含量及大团聚体对有机碳贡献率。(4)在不同土层单施化肥施氮量对GMD、MWD、土壤可侵蚀因子K、土壤各粒级有机碳含量无显著影响。综上,在陇东黄土丘陵沟壑区,化肥有机肥配施可显著改善0~40 cm土层土壤结构,提高土壤稳定性、提升土壤肥力,增强土壤碳汇能力,且施氮量在200 kg·hm⁻²时配施化肥提升效果最好。

关键词:施肥;陇东黄土丘陵沟壑区;土壤团聚体;稳定性;有机碳

土壤团聚体是耕作土壤基本单元,对土壤理化性质具有非常重要的影响,团聚体的数量多少对耕作土壤的储存养分、土壤持水性及土壤通透性能力均有影响^[1-3]。土壤团聚体组成和稳定性也是土壤压实、板结和侵蚀等过程与作用的主要指标之一,是评价土壤质量和肥力基础的重要指标^[4-5]。有研究表明,施肥会对土壤团聚体的形成和稳定产生影响,进一步导致土壤团聚体中养分分布差异化^[6-7]。不施肥或单施化肥会对土壤结构及功能产生不良影响^[8-9]。有机肥和无机肥配施可提高土壤各粒级团聚体中大团聚体含量。有机碳影响着团聚体的数量和分布,土壤团聚体也是有机碳的重要贮存场所,团聚体有机碳含量的提高有利于土壤稳定性的增强,对耕地的土壤肥力起着重要作用,决定着土壤结构和质量^[10]。平凉市地属陇东黄土高原沟壑区,土壤本身较为贫瘠、加上当地农民为追求作物高产而大量盲目施肥加速了土壤质量的退化,降低了土壤碳汇能

力,影响了土壤有机碳的积累,不利于农业绿色低碳发展^[11]。

基于此,本研究依托甘肃省平凉市泾川县窑店镇甘肃农通达玉米种养基地,研究不同施肥对陇东黄土丘陵沟壑区玉米土壤团聚体分布、团聚体稳定性和有机碳含量的影响,探寻窑店镇更适宜的玉米施肥方式,进而提高该地土壤碳汇能力,促进传统高投入及高消耗的粗放型种植模式向绿色低碳种植方式转变,为发展当地农业生产的绿色低碳可持续发展提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2024年玉米生长季在窑店镇种养基地进行,该试验地位于平凉市泾川县窑店镇(35°26'N, 107°69'E),地形以黄土丘陵沟壑为主,该地区属于温带半干旱气候,多年平均气温6.2℃,年平均降水量410 mm,年均日照时数2 437 h,年平均风速3.3 m·s⁻¹,无霜期150 d左

收稿日期:2024-01-20

基金项目:平凉市科技人才专项计划项目(PL-STK-2023A-029)。

第一作者:李文文(1997—),女,硕士,助理工程师,从事水土保持以及相关科学研究。E-mail:3190465091@qq.com。

通信作者:王工作(1988—),男,学士,高级工程师,从事水土保持以及相关科学研究。E-mail:1322942522@qq.com。

右。该地土壤类型是黄绵土,土层瘠薄,耕作层(0~20 cm)土壤基本性状为:有机碳 6.78 g·kg⁻¹,全氮 0.60 g·kg⁻¹,速效磷 6.70 mg·kg⁻¹,速效钾 46.30 mg·kg⁻¹。

1.2 材料

试验地种植的玉米品种为瑞普 909,所施用的化肥为尿素(含 N46%)、氯化钾(含 P₂O₅ 16%)、过磷酸钙(含 K₂O₅ 60%),与化肥配施的有机肥为纯羊粪发酵有机肥料,有机肥中含有有机质≥30%,全氮,全磷和全钾养分含量分别为 4.50%、3.06%和 2.10%。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 试验采取两因素裂区试验,采用化学氮肥与有机肥配施的试验设计,氮肥为主处理,设 4 个氮水平(N0、N1、N2、N3),施氮量分别为 0,100,200 和 300 kg·hm⁻²;有机肥为副处理,设配施(N0+M、N1+M、N2+M、N3+M)和不配施 2 个水平(N0、N1、N2、N3);有机肥为纯羊粪发酵有机肥,施用量均为 3.75 t·hm⁻²。试验共 8 个处理,3 次重复,主区面积 30 m²。各处理具体肥料施用量分别见表 1。试验开始于 2024 年 4 月,结束于 2024 年 11 月。于 4 月 19 日覆膜,采用全膜平作,每膜幅宽 1.23 m。于 4 月 24 日人工点播,播种深度 3~5 cm。每幅膜种 3 行,行距 0.4 m,等行距种植,株距 0.25 m。在玉米播种时将化肥和有机肥以人工施撒方式一次性施入农田,后期不追肥,试验地作物生长依靠自然降水,其他农事操作均参照当地玉米种植管理。

表 1 试验小区施肥处理

处理	有机肥羊粪/ (t·hm ²)	氮肥 N/ (kg·hm ⁻²)	磷肥 P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	钾肥 K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)
N0	0	0	375	225
N1	0	100	375	225
N2	0	200	375	225
N3	0	300	375	225
N0+M	3.75	0	375	225
N1+M	3.75	100	375	225
N2+M	3.75	200	375	225
N3+M	3.75	300	375	225

1.3.2 样品采集及测定 各小区施肥后,按“S”多点取样法采集 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 耕层土壤样品。剔除土样中夹杂的根

系和石块后自然风干,采集的土样分为两份,一份用于土壤有机碳测定,一份用于土壤力稳性团聚体测定。

土壤团聚体测定:力稳性团粒结构采用振荡式机械筛分仪按照干筛法测定。取风干土样 200 g,放置在套筛的最上层(套筛孔径分别为 5.00, 2.00,1.00,0.50 和 0.25 mm),底层安放底盒,以收取<0.25 mm 的土壤团聚体。在最大功率下振荡 10 min^[12]。干筛后,将各级筛网上的土样分别收集并称量,计算出各级别团聚体百分含量(W_i)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)^[13]、土壤可侵蚀因子(K)^[14]、分形锥数(D)^[15]和大于 0.25 mm 团聚体质量分数(R_{m0.25})^[16],具体计算公式如下。

$$W_i(\%) = \frac{M_i}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6} \times 100$$

(1)

式中,W_i为各粒级团聚体百分含量,M_i为第 i 级团聚体的质量。

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i$$

(2)

$$GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}\right]$$

(3)

式中,MWD 为土壤团聚体的平均质量直径;x_i为筛分出来的任一粒级范围团聚体的平均直径;ω_i为任一粒级范围团聚体的质量占土壤样品干质量的分数;GMD 为几何平均直径。

$$K = 7.954 \times \{0.0017 + 0.0494 \times \exp[-0.5 \times (\frac{\log GMD + 1.675}{0.6986})^2]\}$$

(4)

$$D = 3 - \frac{\lg(\frac{W(\delta < \overline{X}_i)}{W_t})}{\lg(\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}})}$$

(5)

式中,K 为土壤可侵蚀因子;D 为分形锥数;W_t为所有粒径团聚体质量占比;W(δ<X_i)为小于X_i粒径团聚体质量占比;X_i为 i 粒径团聚体平均直径;X_{max}为最大粒径团聚体平均直径。

$$R_{m0.25} = \frac{m_i > 0.25}{m_i}$$

(6)

式中,R_{m0.25}为大团聚体含量;m_i为粒径大于 0.25 mm 的团聚体质量,m_i为团聚体总质量。

土壤有机碳测定:土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法测定^[17]。

1.3.3 数据分析 数据采用 Excel 2020 进行数据整理统计,用 SPSS 26.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对团聚体分布的影响

团聚体分组一般以 0.25 mm 为界线,把土壤粒径>0.25 mm 团聚体分为大团聚体,把<0.25 mm 团聚体分为微团聚体^[18]。由表 2 可知,在 0~20 cm 土层,团聚体 2.00~5.00 mm 粒级含量占比最大,不同施肥处理下土壤力稳性团聚体含量随着土壤粒级的减小均呈现先增后减再增的趋势,单施化肥时,当施氮水平达到 200 kg·hm⁻² (N2 处理)时,土壤大团聚体的比例占到了 84.77%,显著高于其他单施化肥处理;化肥与有机肥配施显著增加了土壤大团聚体含量的比例,在 N2+M 处理下达到最大值,为 90.78%。

在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,团聚体仍以 2.00~5.00 mm 粒级含量占比最大,各施肥处理下土壤团聚体变化趋势与 0~20 cm 土层一致,在 20~40 cm 土层,单施化肥时,当施氮水平达到 200 kg·hm⁻² (N2 处理)时,土壤大团聚体的比例达到最大,为 83.41%。化肥有机肥配施显著增加了土壤大团聚体的含量。N2+M 施肥处理下含量达到最大值,为 88.78%。在 40~60 cm 土层,单施化肥与有机肥化肥配施情况下大团聚体含量无显著性差异。

在 60~80 cm 土层,团聚体以<0.25 mm 粒级含量占比最大,不同施肥处理的团聚体含量随着土壤粒级的减小呈先增后减再增的趋势,N3 处理下土壤大团聚体含量显著低于其他各施肥处理,为 72.14%,其他各施肥处理间土壤大团聚体含量差异不显著。

表 2 不同施肥方式对土壤力稳性团聚体含量的影响

土层深度/ cm	处理	土壤力稳性团聚体含量/%						大团聚体含量 (R _{m0.25})/%
		>5.00 mm	2.00~5.00 mm	1.00~2.00 mm	0.50~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
0~20	N0	18.28±0.97 c	26.58±0.32 d	11.99±1.11 cd	11.58±1.34 b	15.47±1.24 ab	16.10±0.98 b	83.90±0.21 d
	N1	17.60±0.88 cd	27.59±1.34 c	10.03±0.67 d	11.67±1.33 b	16.52±1.44 a	16.59±1.11 b	83.41±0.77 d
	N2	19.94±1.23 bc	27.26±0.78 c	12.06±0.97 c	11.99±0.89 b	13.52±1.32 c	15.23±1.09 bc	84.77±0.89 c
	N3	19.71±1.21 bc	28.62±1.65 bc	9.13±2.12 c	9.03±0.76 c	13.73±0.32 c	19.78±2.00 a	80.22±0.77 e
	N0+M	20.05±2.21 b	28.08±2.00 bc	13.06±0.24 b	12.74±0.39 a	11.59±1.21 e	14.48±0.12 c	85.52±0.34 c
	N1+M	21.66±1.21 b	29.76±1.14 b	11.11±0.55 cd	12.43±1.34 a	12.12±1.56 cd	12.92±0.76 d	87.08±0.43 b
	N2+M	23.03±1.11 a	31.13±1.52 a	16.39±0.53 a	9.08±1.27 c	9.22±0.56 f	11.15±0.54 e	90.78±0.51 a
	N3+M	23.27±0.98 a	29.58±0.89 b	12.41±1.22 c	11.11±1.32 b	11.42±1.21 e	12.21±1.45 dc	88.79±0.17 b
20~40	N0	16.85±1.21 c	24.03±0.47 e	18.34±1.11 ab	12.25±1.57 ab	10.36±0.43 c	18.17±1.76 a	81.83±2.78 d
	N1	15.42±1.57 c	25.08±1.23 cd	18.61±2.09 ab	9.81±1.89 d	12.16±1.33 a	18.92±0.89 a	81.08±1.12 d
	N2	17.13±1.78 bc	26.94±1.11 c	18.14±2.21 ab	9.37±0.46 d	11.83±0.56 ab	16.59±1.68 bc	83.41±1.11 c
	N3	18.25±2.07 b	26.01±0.88 c	17.34±1.46 c	8.96±1.22 dc	10.87±1.57 c	18.57±2.98 a	81.43±1.58 d
	N0+M	18.38±1.22 b	26.82±2.39 c	16.28±1.89 d	10.47±1.11 c	10.07±2.09 c	17.98±3.01 b	82.02±1.89 cd
	N1+M	19.67±1.34 ab	27.58±1.67 bc	18.84±2.08 ab	10.83±0.97 c	8.21±1.24 d	14.87±2.17 c	85.13±2.25 b
	N2+M	21.03±0.57 a	29.13±1.89 a	19.39±2.56 a	13.08±0.58 a	6.15±1.11 e	11.22±0.78 d	88.78±2.35 a
	N3+M	20.94±1.22 a	28.48±2.03 ab	18.37±0.57 ab	11.87±1.33 b	6.92±1.78 e	13.42±1.57 c	86.58±0.44 b
40~60	N0	15.85±2.01 d	24.11±0.47 c	17.01±1.11 ab	12.34±1.57 a	11.36±0.43 a	19.33±1.76 ab	80.67±2.57 a
	N1	15.42±1.99 d	24.08±1.23 c	18.61±2.09 a	10.81±1.89 c	11.16±1.33 a	19.92±0.89 ab	80.08±3.26 a
	N2	15.13±1.87 d	25.94±1.11 b	17.14±2.21 b	9.37±0.46 cd	11.83±0.56 a	20.59±1.68 a	79.41±2.42 a
	N3	15.25±1.15 d	26.01±0.88 a	17.34±1.46 b	8.96±1.22 d	11.87±1.57 a	20.57±2.98 a	79.43±2.67 a
	N0+M	18.42±0.23 c	24.82±2.39 c	16.28±1.89 c	10.47±1.11 c	10.07±2.09 ab	19.94±3.01 ab	80.06±1.98 a
	N1+M	20.55±0.34 a	22.68±1.67 d	17.84±2.08 b	11.83±0.97 b	8.21±1.24 b	18.89±2.17 b	81.11±2.21 a
	N2+M	19.03±1.08 a	22.13±1.89 d	18.39±2.56 a	12.08±0.58 a	8.15±1.11 b	20.22±0.78 a	79.78±4.12 a
	N3+M	19.94±1.21 b	24.48±2.03 c	18.37±0.57 a	10.87±1.33 c	6.92±1.78 c	19.42±1.57 ab	80.58±3.45 a

表 2 (续)

土层深度/ cm	处理	土壤力稳性团聚体含量/%						大团聚体含量 (R _{m0.25})/%
		>5.00 mm	2.00~5.00 mm	1.00~2.00 mm	0.50~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
60~80	N0	14.02±0.25 cd	22.46±1.11 b	14.37±2.22 a	13.46±1.27 a	11.98±1.11 b	23.71±2.34 c	76.29±2.12 a
	N1	15.41±0.57 c	21.92±1.54 c	13.55±1.88 b	11.76±2.67 bc	13.03±2.00 a	24.33±2.51 b	75.67±3.12 a
	N2	13.13±0.77 d	23.08±2.21 ab	14.48±1.34 a	12.44±0.78 b	12.27±2.12 ab	24.60±1.89 b	75.40±1.89 a
	N3	13.22±1.27 d	24.33±1.67 a	12.49±0.56 c	9.43±1.46 d	12.67±1.24 ab	27.86±0.87 a	72.14±0.79 b
	N0+M	19.15±1.47 b	21.67±0.78 c	14.73±1.32 a	10.18±2.47 cd	10.82±0.92 bc	23.45±1.01 c	76.55±1.11 a
	N1+M	19.11±1.35 b	21.89±0.89 c	14.16±0.45 b	11.48±3.26 bc	11.27±1.11 b	23.09±2.03 c	76.91±0.89 a
	N2+M	22.44±1.89 a	24.35±1.11 a	10.34±1.25 d	9.12±0.44 d	9.32±0.34 c	24.43±1.55 b	76.57±1.23 a
	N3+M	18.69±2.43 c	23.63±1.03 ab	14.54±2.11 a	9.07±3.01 d	10.67±1.21 bc	23.40±1.67 c	76.60±3.12 a

注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2.2 不同施肥方式对团聚体稳定性参数的影响

由表 3 可知,在 0~20 cm 土层,在单施化肥时,几何平均直径(GMD)、平均质量直径(MWD)、土壤可侵蚀因子 K 之间差异不显著。化肥有机肥配施相比单施化肥显著提高了 GMD 和 MWD,且均在 N2+M 达到最大值,分别为 1.52 和 2.61 mm。配施有机肥显著降低了分形锥数 D 和可侵蚀因子 K ,均在 N2+M 处理达最小值,分别为 2.20 和 0.024。

在 20~40 cm 土层,单施化肥时,GMD、MWD、分形锥数 D 、土壤可侵蚀因子 K 间差异不显著。化肥有机肥配施显著增加了 GMD 和 MWD,均在 N2+M 达到最大值,分别为 1.48 和 2.50 mm。分形锥数 D 和可侵蚀因子 K 显著降低,也在 N2+M 处理达最小值,分别为 2.29

和 0.026。

在 40~60 cm 土层,单施化肥时各处理 GMD、MWD、土壤可侵蚀因子 K 均差异不显著,化肥有机肥配施使 GMD、MWD 显著增高,分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K 显著降低。

在 60~80 cm 土层,单施化肥时各处理 GMD、MWD、分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K 均无显著性差异。化肥有机肥配施显著增加了 GMD 和 MWD,降低了分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K ,在 N2+M 时土壤 GMD 和 MWD 最高,分别为 1.03 和 2.26 mm,分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K 最低,分别为 2.34 和 0.034。有机肥配施各处理间 GMD 和土壤可侵蚀因子 K 差异不显著。

表 3 不同施肥方式对土壤团聚体稳定性参数的影响

土层深度/cm	处理	几何平均直径(GMD)/mm	平均质量直径(MWD)/mm	分形锥数 D	土壤可侵蚀因子 K
0~20	N0	1.11±0.35 bc	2.19±0.75 cd	2.39±0.97 a	0.033±0.002 a
	N1	1.07±0.67 c	2.17±0.69 cd	2.39±0.39 a	0.033±0.001 a
	N2	1.19±0.32 bc	2.29±0.75 bc	2.35±0.97 b	0.031±0.015 ab
	N3	1.07±0.67 c	2.27±0.69 bc	2.33±0.39 bc	0.033±0.002 a
	N0+M	1.24±0.22 b	2.34±0.64 b	2.33±0.49 bc	0.029±0.003 b
	N1+M	1.32±0.08 b	2.45±0.79 ab	2.26±0.57 b	0.028±0.003 bc
	N2+M	1.52±0.16 a	2.61±0.79 a	2.20±1.12 c	0.024±0.018 cd
	N3+M	1.42±0.08 ab	2.53±1.01 ab	2.23±0.38 b	0.026±0.018 c
20~40	N0	1.09±0.13 cd	2.11±0.09 bc	2.46±0.07 a	0.033±0.037 a
	N1	1.04±0.07 cd	2.07±0.11 bc	2.47±0.02 a	0.034±0.044 a
	N2	1.14±0.08 c	2.21±0.09 b	2.41±0.11 ab	0.032±0.046 ab
	N3	1.12±0.18 c	2.21±0.06 b	2.40±0.19 ab	0.032±0.056 ab
	N0+M	1.14±0.07 c	2.24±0.10 b	2.39±0.17 b	0.032±0.077 ab
	N1+M	1.29±0.08 b	2.36±0.09 ab	2.35±0.22 b	0.028±0.089 b
	N2+M	1.48±0.11 a	2.50±0.05 a	2.29±0.49 c	0.026±0.076 b
	N3+M	1.38±0.09 b	2.45±0.19 a	2.31±0.89 b	0.027±0.038 b

表 3 (续)

土层深度/cm	处理	几何平均直径(GMD)/mm	平均质量直径(MWD)/mm	分形锥数 <i>D</i>	土壤可侵蚀因子 <i>K</i>
40~60	N0	1.03±0.12 c	2.05±0.36 c	2.48±0.12 a	0.035±0.004 a
	N1	1.02±0.25 c	2.04±0.48 c	2.49±0.23 a	0.035±0.008 a
	N2	1.01±0.43 c	2.06±0.57 c	2.46±0.79 b	0.035±0.004 a
	N3	1.01±0.36 c	2.07±1.01 c	2.46±0.86 b	0.035±0.008 a
	N0+M	1.08±0.23 b	2.18±0.79 b	2.42±0.47 c	0.033±0.079 b
	N1+M	1.15±0.44 a	2.23±0.99 a	2.42±0.55 c	0.032±0.032 c
	N2+M	1.09±0.47 b	2.15±0.56 b	2.46±0.46 b	0.033±0.026 b
	N3+M	1.16±0.38 a	2.26±1.89 a	2.40±0.59 c	0.031±0.015 c
60~80	N0	0.89±0.13 b	1.88±0.22 c	2.54±0.89 a	0.040±0.009 b
	N1	0.88±0.12 b	1.91±0.78 c	2.52±0.11 a	0.040±0.008 b
	N2	0.86±0.18 b	1.85±0.11 c	2.54±0.99 a	0.041±0.012 b
	N3	0.80±0.24 bc	1.85±0.97 c	2.52±0.79 a	0.044±0.003 ab
	N0+M	0.97±0.14 a	2.13±0.04 b	2.47±0.11 ab	0.037±0.011 c
	N1+M	0.98±0.03 a	2.14±0.23 b	2.46±0.57 ab	0.036±0.009 c
	N2+M	1.03±0.18 a	2.26±0.14 a	2.34±0.37 c	0.034±0.011 c
	N3+M	0.99±0.09 a	2.18±0.09 b	2.44±0.23 ab	0.036±0.009 c

注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2.3 不同施肥方式对土壤团聚体有机碳含量的影响

由表 4 可知,在 0~20 cm 土层,各处理粒级 <0.25 mm 团聚体的有机碳含量均达到最大值,单施化肥各处理土壤有机碳含量随着土壤粒级减小呈现先增后减再增趋势,单施处理间有机碳含量差异不显著。有机肥配施处理中 N0+M 和 N1+M 团聚体有机碳含量随粒级减小逐渐增大,N2+M 和 N3+M 则先增后减再增。有机肥化肥配施显著增加了土壤各粒级有机碳含量,各粒级有机碳含量均在 N2+M 处理达到最大值。相较于单施化肥,化肥有机肥配施对 >5.00 mm、 $2.00\sim 5.00$ mm、 $1.00\sim 2.00$ mm、 $0.50\sim 1.00$ mm、 $0.25\sim 0.50$ mm、 <0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量分别增加了 24.38%、26.00%、26.68%、24.87%、32.10%和 32.79%。

在 20~40 cm 土层,各处理粒级 <0.25 mm 团聚体的有机碳含量均达到最大值。N2+M、N3+M 有机碳含量随着粒级减小呈逐渐增加趋势,其他各施肥处理呈先增后减再增趋势,单施化肥施氮量对土壤各粒径有机碳含量影响不显著。相较于单施化肥,化肥有机肥配施对 >5.00 mm、 $2.00\sim 5.00$ mm、 $1.00\sim 2.00$ mm、 $0.50\sim 1.00$ mm、

$0.25\sim 0.50$ mm、 <0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量分别增加了 19.30%、21.05%、27.52%、24.09%、27.85%和 24.09%。在 N2+M 施肥处理土壤各粒级有机碳含量达到最大值。

在 40~60 cm 土层,各处理仍是粒级 <0.25 mm 团聚体的有机碳含量达到最大值。N0、N1、N3、N3+M 处理随着粒级减小土壤有机碳含量呈逐渐增大趋势,其他施肥均呈先增后减再增的趋势,单施化肥各处理不同粒级土壤有机碳含量差异不显著。相较于单施化肥,化肥有机肥配施显著增加了土壤各粒级有机碳含量,对 >5.00 mm、 $2.00\sim 5.00$ mm、 $1.00\sim 2.00$ mm、 $0.50\sim 1.00$ mm、 $0.25\sim 0.50$ mm、 <0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量分别增加了 26.01%、25.30%、26.33%、26.25%、25.49%和 19.92%。

在 60~80 cm 土层,N0、N1、N3、N3+M 为粒径 $0.25\sim 0.50$ mm 团聚体有机碳含量最大。N2、N0+M、N1+M 为 <0.25 mm 团聚体有机碳含量最高;N2+M 为 $1.00\sim 2.00$ mm 团聚体有机碳含量最高。单施化肥和化肥有机肥配施情况下各粒径团聚体有机碳含量均无显著差异。随着土层深度增加,各粒级土壤团聚体有机碳含量逐渐降低。

表 4 不同施肥方式对土壤团聚体有机碳含量的影响

土层深度/ cm		团聚体有机碳含量/(g·kg ⁻¹)					
	处理	>5.00 mm	2.00~5.00 mm	1.00~2.00 mm	0.50~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm
0~20	N0	8.55±0.89 d	8.67±0.07 d	8.88±0.34 d	8.90±0.89 c	8.78±1.23 c	9.69±1.11 d
	N1	8.43±0.33 de	8.67±0.23 d	8.89±0.29 d	8.32±079 cd	8.61±0.88 c	9.09±1.23 de
	N2	8.85±0.67 d	8.89±0.34 d	8.97±0.12 d	8.77±0.45 c	8.72±0.45 c	9.64±1.22 d
	N3	8.63±0.77 d	8.77±0.38 d	8.89±1.11 d	8.99±0.55 c	8.63±0.33 c	9.21±1.11 de
	N0+M	9.86±1.23 c	9.99±0.45 c	10.11±0.99 c	10.22±1.23 b	11.09±0.24 b	11.87±1.09 c
	N1+M	9.44±0.23 c	9.55±0.35 c	10.22±1.45 c	10.31±0.32 b	11.34±0.31 b	12.43±1.34 b
	N2+M	12.11±0.01 a	12.67±0.78 a	12.88±0.78 a	12.12±0.24 a	12.22±0.87 a	13.34±0.98 a
	N3+M	11.45±0.88 b	11.89±1.07 b	11.99±0.99 b	11.03±0.25 b	11.24±1.23 b	12.33±0.11 b
20~40	N0	7.90±0.45 c	7.98±0.23 bc	7.01±0.78 c	7.34±1.21 c	7.12±0.24 c	8.09±1.03 d
	N1	7.22±0.12 cd	7.34±0.24 c	7.44±0.99 c	7.87±0.88 bc	7.65±0.88 bc	8.54±0.87 cd
	N2	7.22±0.56 cd	7.23±0.89 c	7.31±0.78 c	7.20±0.79 c	7.11±0.67 c	8.09±0.76 d
	N3	7.56±0.34 c	7.67±0.77 bc	7.78±0.28 bc	7.89±0.98 bc	7.67±0.45 bc	8.53±1.00 cd
	N0+M	8.11±0.10 c	8.23±0.65 b	8.55±0.35 b	8.45±0.78 b	8.33±0.89 b	9.21±1.09 c
	N1+M	8.23±0.45 c	8.34±0.89 b	8.79±0.44 b	8.56±0.23 b	8.44±1.11 b	9.61±0.58 c
	N2+M	10.22±0.13 a	10.34±1.21 a	10.55±0.67 a	10.67±0.98 a	10.98±0.54 a	11.88±0.67 a
	N3+M	9.11±0.89 b	9.67±0.57 ab	9.78±0.89 ab	9.99±1.21 ab	10.03±0.23 a	10.56±1.11 b
40~60	N0	5.99±0.22 c	6.11±0.34 c	6.12±0.03 c	6.23±0.33 c	6.33±0.78 cd	7.21±0.45 c
	N1	6.12±0.34 c	6.23±0.35 c	6.44±0.89 c	6.53±0.46 c	6.67±0.55 cd	7.58±0.76 c
	N2	5.99±0.78 c	5.98±0.89 cd	6.02±0.57 c	6.24±0.77 c	6.01±0.67 c	6.99±1.01 cd
	N3	6.12±1.08 c	6.23±0.67 c	6.33±0.34 c	6.45±1.04 c	6.57±1.06 cd	7.28±0.98 c
	N0+M	7.01±0.56 b	7.09±0.99 b	7.34±0.24 b	7.56±1.11 b	7.43±1.08 b	8.21±1.34 b
	N1+M	7.21±0.88 b	7.23±1.02 b	7.45±1.02 b	7.58±1.08 b	7.44±0.88 b	8.34±0.99 b
	N2+M	8.09±0.78 a	8.11±0.88 a	8.23±0.54 a	8.53±0.89 a	8.39±0.79 a	9.07±1.23 a
	N3+M	8.21±0.23 a	8.33±0.56 a	8.45±0.56 a	8.46±0.24 a	8.84±0.89 a	9.23±0.54 ab
60~80	N0	6.02±0.76 a	6.15±0.22 a	6.47±0.11 ab	6.89±0.88 ab	7.47±0.12 a	7.46±0.33 a
	N1	6.04±0.88 a	6.07±0.21 a	6.07±0.13 ab	6.19±0.79 ab	7.55±0.11 a	7.43±0.78 a
	N2	6.89±0.57 a	6.33±0.19 a	6.12±0.03 ab	6.45±0.69 ab	7.11±0.23 a	7.21±0.34 a
	N3	6.09±0.89 a	6.11±0.08 a	6.45±0.13 ab	6.67±0.89 ab	7.66±0.33 a	7.53±0.22 a
	N0+M	6.11±0.79 a	6.12±0.02 a	7.22±0.35 a	7.45±1.01 a	7.68±0.25 a	7.91±0.24 a
	N1+M	6.22±0.77 a	6.34±0.27 a	7.09±0.67 a	7.11±0.88 a	7.21±0.26 a	7.89±0.35 a
	N2+M	6.81±0.89 a	6.82±0.35 a	7.99±0.46 a	7.23±0.68 a	7.21±0.45 a	7.19±0.24 a
	N3+M	6.45±0.79 a	6.67±0.79 a	7.72±0.78 a	7.89±0.99 b	7.99±0.89 a	7.12±0.89 a

注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2.4 不同施肥方式对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

由表 5 可知,在 0~20 cm 土层不同施肥处理均以 2.00~5.00 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,单施化肥时大团聚体有机碳贡献率差异不显著。化肥有机肥配施显著增加了大团聚体对有机碳的贡献率,在 N2+M 处理大团聚体贡献率最大,为 89.48%。N0+M、N1+M、N2+M、N3+M 处理相比 N0、N1、N2、N3 处理对大团聚

体有机碳贡献率分别提高 10.65%、7.58%、12.34% 和 7.60%。

在 20~40 cm 土层,各处理 2.00~5.00 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,N1、N2、N3 间大团聚体贡献率差异不显著。当化肥有机肥配施后,随着土壤团聚体粒级变小团聚体对有机碳贡献率表现为先增再减再增再减的趋势。化肥有机肥配施显著增加大团聚体对有机碳贡献率,N2+M 处理大团聚体贡献率最大,为 88.21%。N0+

M、N1+M、N2+M、N3+M 处理相比 N0、N1、N2、N3 处理大团聚体对有机碳贡献率分别提高 6.11%、6.08%、7.53%和 5.15%。

在 40~60 cm 土层,N3 在<0.25 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,其他处理在 2.00~5.00 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,N0、N1、N2 大团聚体对有机碳贡献率差异不显著,N3 显著降低,为 73.81%。N0+M、N1+M 相比

较 N0、N1 大团聚体对有机碳贡献率无显著性差异,N2+M、N3+M 相比 N2、N3 团聚体对有机碳贡献率显著提升 5.49%和 6.63%。

在 60~80 cm 土层,各处理均以<0.25 mm 粒径大团聚体对有机碳贡献率最大。化肥有机肥配施与单施化肥间大团聚体对有机碳贡献率无显著性差异。

表 5 不同施肥方式对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

土层深度/ cm	处理	团聚体有机碳贡献率/%						大团聚体贡献率 (R _{m0.25})/%
		>5.00 mm	2.00~5.00 mm	1.00~2.00 mm	0.50~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
0~20	N0	18.97±0.79 c	26.51±0.57 d	10.34±0.57 c	10.74±0.79 c	11.66±1.00 b	21.78±0.34 b	78.22±1.23 c
	N1	17.38±0.97 cd	27.32±1.21 cd	12.76±0.89 a	10.88±1.01 c	11.77±1.21 b	19.89±0.33 b	80.11±0.98 c
	N2	18.91±0.88 c	27.45±1.22 cd	11.98±0.99 b	10.76±1.04 c	10.47±0.97 c	20.35±0.32 b	79.65±0.67 c
	N3	19.30±0.67 bc	28.79±1.09 bc	10.33±0.79 c	10.43±0.99 c	11.24±0.88 b	19.87±0.29 b	80.13±0.58 c
	N0+M	20.34±0.66 bc	28.54±1.08 bc	12.45±1.21 a	11.33±0.98 b	13.89±0.68 a	13.45±0.28 c	86.55±1.22 b
	N1+M	21.09±0.79 b	29.33±0.97 b	10.88±1.90 bc	11.56±0.78 b	13.32±0.57 a	13.82±0.27 c	86.18±2.11 b
	N2+M	22.57±0.88 a	31.89±0.88 a	11.45±0.89 b	13.24±1.45 a	10.33±0.55 c	10.52±0.33 d	89.48±0.99 a
	N3+M	21.40±1.21 b	29.89±0.78 b	10.45±0.99 c	11.32±0.96 b	13.11±0.79 a	13.78±0.32 c	86.22±0.79 b
20~40	N0	17.34±0.22 c	25.13±0.34 d	11.11±1.01 a	9.91±0.79 c	15.89±0.23 b	20.62±0.89 a	79.38±1.08 e
	N1	19.34±0.89 b	26.21±0.76 c	9.34±1.00 b	9.87±0.88 c	16.31±0.99 a	18.93±0.99 b	81.07±1.11 d
	N2	20.13±0.77 ab	26.35±0.78 c	10.10±0.99 ab	9.21±0.79 c	16.24±0.94 a	17.97±1.01 bc	82.03±1.97 d
	N3	18.89±0.67 bc	26.44±0.79 c	9.44±0.89 b	10.67±0.93 b	16.34±1.11 a	18.22±1.05 b	81.78±1.89 d
	N0+M	19.23±0.97 b	26.56±0.89 c	11.34±0.79 a	10.21±0.83 b	16.89±1.21 a	15.77±1.89 d	84.23±0.11 c
	N1+M	20.12±0.88 ab	27.65±0.99 b	10.78±0.69 ab	11.22±0.38 a	16.23±0.79 a	14.00±0.89 e	86.00±1.14 b
	N2+M	21.34±0.83 a	28.55±0.75 a	11.11±1.11 a	11.34±1.01 a	15.87±0.98 b	11.79±0.77 f	88.21±1.09 a
	N3+M	20.78±0.82 ab	27.34±0.79 b	10.22±1.34 ab	11.34±1.00 a	16.31±0.88 a	14.01±0.76 e	85.99±0.98 b
40~60	N0	18.91±1.11 b	24.51±0.98 d	8.89±0.11 c	12.34±1.21 a	13.21±1.11 b	22.14±0.99 b	77.86±1.23 c
	N1	17.89±1.21 bc	25.55±0.99 c	8.72±0.34 c	12.34±0.99 a	14.21±1.21 a	21.29±0.78 b	78.71±0.88 c
	N2	18.11±0.98 b	26.61±0.97 b	9.88±0.89 b	11.32±0.78 b	12.34±1.34 c	21.74±0.94 b	78.26±0.76 c
	N3	17.67±0.99 bc	25.11±0.82 c	9.70±0.99 b	10.12±1.21 c	11.21±0.99 d	26.19±0.35 a	73.81±0.88 d
	N0+M	18.32±0.78 b	25.34±0.23 c	10.89±0.79 a	9.87±1.23 d	14.21±0.96 a	21.37±0.54 b	78.63±1.24 bc
	N1+M	19.87±0.77 ab	26.14±0.24 b	10.08±0.67 a	10.23±0.97 c	13.32±0.22 b	20.36±0.44 bc	79.64±1.46 bc
	N2+M	20.11±0.76 a	27.89±0.78 a	10.21±0.80 a	10.11±0.99 c	13.24±0.14 b	17.44±0.37 d	82.56±0.67 a
	N3+M	19.78±0.65 ab	25.34±0.99 c	10.01±1.21 a	11.23±088 b	14.34±0.53 a	21.30±0.97 b	78.70±2.31 b
60~80	N0	17.56±0.35 b	22.89±0.79 c	9.79±0.55 bc	10.90±0.77 ab	9.86±0.54 c	29.00±0.99 a	71.00±0.94 a
	N1	17.46±0.89 b	22.18±0.99 c	9.99±0.57 bc	10.99±0.89 ab	9.77±0.66 c	29.61±0.56 a	70.39±0.68 a
	N2	17.25±0.99 b	24.11±0.53 a	9.91±0.89 bc	10.21±0.65 ab	9.87±0.76 c	28.65±0.24 a	71.35±0.79 a
	N3	17.34±0.69 b	23.12±0.44 b	9.97±0.99 bc	11.23±0.58 a	9.98±0.87 c	28.36±0.35 a	71.64±1.46 a
	N0+M	17.43±0.78 b	22.42±0.37 c	11.34±0.74 a	11.24±0.67 a	9.98±0.99 c	28.59±0.54 a	71.41±2.76 a
	N1+M	18.68±0.88 a	22.12±0.67 c	10.23±0.69 b	10.98±0.99 ab	10.98±1.11 b	27.01±0.98 a	72.99±1.88 a
	N2+M	18.99±1.21 a	22.54±0.66 c	11.23±0.53 a	9.21±1.01 b	9.21±1.09 c	28.82±1.11 a	71.18±1.45 a
	N3+M	17.99±0.66 b	20.35±0.89 d	11.34±0.44 a	11.21±0.88 a	14.35±1.11 a	28.76±1.02 a	75.24±1.36 a

注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理间在 P<0.05 水平差异显著。

3 讨论

大团聚体通常能包裹有机碳,大团聚体含量高的土壤有机碳分解速率相对较低,有利于有机碳在土壤储存。GMD 和 MWD 均可以衡量土壤稳定性,土壤稳定性越强,抗破坏能力越高,越有利于提高土壤碳汇能力,MWD、GMD、 $R_{m0.25}$ 是衡量土壤团聚体稳定性的重要指标^[19]。分形锥数 D 可以描述土壤团聚体大小分布和形状复杂性,团聚体状况直接影响土壤可侵蚀因子 K ,分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K 值越小,土壤稳定性越高^[20]。本研究表明,在陇东黄土丘陵沟壑区的土地条件下,在 0~20 cm、20~40 cm 土层化肥有机肥配施显著增加了土壤 GMD、MWD、 $R_{m0.25}$,降低了分形锥数 D 和土壤可侵蚀因子 K 。这与前人^[21-23]的研究结果基本一致。化肥有机肥配施可以有效提升土壤碳源,增加土壤团聚体胶结剂,促进土壤颗粒和微团聚体的黏结和微团聚体向大团聚体转化,促进土壤粒径分布更均,有效改善玉米土壤结构,提升土壤抗侵蚀能力、稳定性以及土壤肥力。

土壤各粒级团聚体有机碳含量可以体现土壤有机质平衡和矿化速率,土壤不同粒径颗粒的固碳作用不同,对土壤碳汇贡献能力也不一样,大团聚体对有机碳贡献率高有助于形成更稳定的有机碳形态,提升土壤碳汇能力^[24]。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层有机碳均在 <0.25 mm 粒级时有机碳含量达到最大值,这与前人^[25-26]的研究结果相似,可能是因为土壤在微团聚体状态时有机无机结合更加紧密,粒级越小,比表面积越大,有机碳吸收越多,各粒级土壤有机碳含量随着土层深度增加呈逐渐减小趋势。在 0~60 cm 土层化肥有机肥配施显著提升各粒级土壤团聚体有机碳含量,这与臧逸飞等^[27]的研究结果一致。0~40 cm 土层土壤各粒级有机碳在 N_2+M 处理达到最大值,说明使用有机肥可以在一定程度上提升碳源,促进土壤有机碳增加,利于土壤团聚体稳定性及有机碳固存,但提升后有机碳值整体较低,这可能跟土壤本身比较贫瘠以及施肥年限太短有关。在不同土层,单施化肥的不同处理对 GMD、MWD、土壤可侵蚀因子 K 、土壤各粒级有机碳含量差异不显著。施氮量的增加不能提升作为团聚体胶结剂的土壤有机质含量,不利于团聚体的形成和稳定^[28]。

土壤有机碳贡献率可以反映土壤有机碳存在状态和转化过程,明确不同粒径团聚体在碳固定、碳储存和释放中的作用,有助于认识土壤碳循环机制。在 0~20 cm、20~40 cm 土层各处理均以 2.00~5.00 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,60~80 cm 土层以 <0.25 mm 粒级大团聚体对有机碳贡献率最大,在 0~20 cm、20~40 cm 土层化肥有机肥配施可以显著提升土壤大团聚体对有机碳贡献率,这与杜少平等^[29]的研究结果一致。说明大团聚体对施用有机肥的玉米土壤有机碳变化较为敏感,施用有机肥可以促进有机碳在土壤浅层大团聚中富集,同时大团聚体对有机碳也有着保护作用。在 60~80 cm 土层施用化肥有机肥与单施化肥之间土壤 GMD、 $R_{m0.25}$ 、土壤可侵蚀因子 K 、有机碳含量、大团聚体对有机碳贡献率差异不显著,可能是因为泾川县窑店镇在 4 月—6 月降雨较少,无法良好帮助有机肥下渗,有机肥无法对 60~80 cm 深度的团聚体产生影响,加上该深度土层土壤本身氧气含量较少、温度较低,微生物活性较弱,土壤碳汇能力以及肥力较差。

4 结论

本研究通过分析泾川县窑店镇玉米土壤 4 个施氮水平(0,100,200 和 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)分别在配施和不施有机肥的情况下,对土壤力稳性团聚体含量分布、团聚体稳定性参数、团聚体有机碳量及有机碳贡献率的影响,得出在 0~60 cm 土层各施肥处理下土壤团聚体均以 2.00~5.00 mm 粒级含量最高,在 60~80 cm 土层以 <0.25 mm 粒级含量占比最高。化肥有机肥配施能显著增加 0~20 cm、20~40 cm 土层土壤 MWD、GMD 和 $R_{m0.25}$,降低分形锥数 D 和可侵蚀因子 K 。在施氮量 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施有机肥下土壤 MWD、GMD、 $R_{m0.25}$ 达到最大,分形锥数 D 和可侵蚀因子 K 达到最低,化肥有机肥配施对陇东黄土丘陵沟壑区种植玉米土壤结构有明显改善作用。

在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层有机碳含量均在粒级 <0.25 mm 达到最大,各粒级土壤有机碳随着土层深度增加而逐渐减少。在 0~20 cm、20~40 cm 土层各处理均以 2.00~5.00 mm 粒级团聚体对有机碳贡献率最大,在 0~20 cm、20~40 cm 土层化肥有机肥配施显著增加土壤各粒级有机碳含量及大团聚体对有机碳贡献率,施氮量在 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 配施有机肥时土

壤各粒级有机碳含量最大,大团聚体对有机碳贡献率提高最大。说明化肥有机肥配施可促进有机碳向大团聚体聚集,有利于促进陇东黄土丘陵沟壑区玉米土壤固碳,提升该区域土壤碳汇能力。

参考文献:

- [1] 黄莎琳,喻武,丁宇浩,等. 高寒区季节性冻土土壤有机碳含量及团聚体分布特征[J]. 农业与技术, 2021, 41(22): 5-7.
- [2] 王丽,李军,李娟,等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.
- [3] 陈昊,马帅,王小治. 土壤团聚体形成和稳定机理研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(2): 150-155.
- [4] 李涵,张鹏,贾志宽,等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33.
- [5] 安婉丽,高灯州,潘婷,等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1833-1840.
- [6] 邢旭明. 长期施肥对土壤团聚体组成及其主要养分赋存特征的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [7] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25.
- [8] 陈洁,梁国庆,周卫,等. 长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 36-44.
- [9] 王成己. 施肥和耕作长期试验下农田土壤有机碳及作物生产力变化的统计研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [10] PANG X, ZHAO Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change and food security[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384-393.
- [11] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 96-99.
- [12] VERCHOT L V, DUTTAUR L, SHEPHERD K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils[J]. Geoderma, 2011, 161(3/4): 182-193.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1564-1576.

- [15] 张天宇,宝音陶格涛,高若凡,等. 长期不同刈割制度对典型草原土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(11): 26-36.
- [16] 李敏,刘亚军,王文静,等. 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 252-260.
- [17] 张玉铭,胡春胜,陈素英,等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1558-1570.
- [18] 隋夕然,吴丽芳,王妍,等. 滇中岩溶高原不同石漠化程度土壤团聚体养分及酶活性特征[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 115-126.
- [19] 张平良,刘晓伟,曾骏,等. 长期施用有机肥对西北半干旱区小麦田土壤团聚体分布及其有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 1-8.
- [20] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [21] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
- [22] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1473-1480.
- [23] 蔡岸冬,张文菊,杨品品,等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
- [24] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 259-266.
- [25] 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.
- [26] 王欣欣,符建荣,邹平,等. 长期植稻年限序列水稻土团聚体有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 719-724.
- [27] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451.
- [28] 李玮,郑子成,李廷轩,等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [29] 杜少平,马忠明,薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1619-1625.

Effects of Fertilization Methods on Soil Aggregate Distribution and Organic Carbon in Maize Fields in Loess Hilly-Gully Region of Eastern Gansu Province

LI Wenwen, WANG Gongzuo, HAN Fen, HE Qian, DUAN Yizi, LIU Jiayi

(Institute of Soil and Water Conservation of Pingliang City, Pingliang 744000, China)

(下转第 66 页)

Effects of Different Soil Types on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Corylus heterophylla* × *Corylus avellana*

XIA Yu¹, LU Mingyan^{2,3}, SONG Fenghui^{1,2}, BAO Junjie¹, SHI Yanjiang^{1,2}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China;

2. Economic Forest Research Institute, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830000, China; 3. Xinjiang

Aksu Forest Ecosystem National Orientation Observation and Research Station, Aksu 843000, China)

Abstract: In order to determine the most suitable soil type for the growth of *Corylus heterophylla* × *Corylus avellana* promote its high quality production, the effects of different types of soil on the growth and development, leaf growth and photosynthetic characteristics of *C. heterophylla* × *C. avellana* were studied. The results showed that : (1) Under the condition of gravelly loam cultivation, the plant height, shoot length and shoot base diameter of *C. heterophylla* × *C. avellana* increased by 141.05% and 187.40%, 172.34% and 139.00%, 157.00% and 123.48%, respectively, compared with those of clay loam and sandy loam. The leaf area of *C. heterophylla* × *C. avellana* planted in gravelly loam was significantly larger than that in clay loam and sandy loam, which increased by 101.13% and 74.05%, respectively. The net photosynthetic rate was significantly positively correlated with soil ammonium nitrogen and pH, and significantly negatively correlated with exchangeable calcium and exchangeable magnesium. It can be seen that soil pH is an important soil factor affecting its photosynthesis, and soil exchangeable magnesium is a limiting factor. (2) According to the entropy weight-TOPSIS comprehensive evaluation of the closeness of the results obtained, the gravel loam is the best Ping-European hybrid hazelnut planting soil. In summary, among the three soil types, gravel loam cultivation is most conducive to the growth and leaf development of *C. heterophylla* × *C. avellana* saplings, which is conducive to the absorption and utilization of light energy and the improvement of leaf photosynthetic capacity, followed by sandy loam.

Keywords: *Corylus heterophylla* × *Corylus avellane*; soil type; photosynthetic characteristics; growth and development

(上接第 58 页)

Abstract: In order to enhance soil fertility in the Loess Plateau and Loess Gully Region of Longdong and promote the green and low-carbon development of agriculture. In this study, four nitrogen levels (N0, N1, N2, N3) were set and nitrogen application rates were 0, 100, 200, 300 kg·ha⁻¹, respectively, based on the maize breeding base of Yaodian Town in Pingliang, Gansu Province. Organic fertilizer was treated in two levels (N0+M, N1+M, N2+M, N3+M) and untreated (N0, N1, N2, N3), to explore the effects of different fertilization methods on the stability of soil aggregates and the carbon sink capacity of the soil in this area. The results showed as follows: (1) Under each fertilization treatment in 0—60 cm soil layer, the soil aggregate content was the highest in 2—5 mm grain grade, and the content in 60—80 cm soil layer was the highest in <0.25 mm grain grade. (2) Combined application of organic fertilizer significantly increased the soil mean mass diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and large aggregate content (R_{m0.25}) in 0—40 cm soil layer, and decreased the fractal cone number *D* and erodible factor *K*. Combined application of fertilizer at 200 kg·ha⁻¹ had the largest effect on soil MWD, GMD and R_{m0.25}. The number of fractal cones *D* and erodibility factor *K* were the lowest. (3) In the 0—60 cm soil layer, the organic carbon content reached the maximum when the grain level was <0.25 mm, and the soil organic carbon of each grain level gradually decreased with the increase of soil depth. In the 0—40 cm soil layer, the contribution rate of organic carbon was the highest in 2.00—5.00 mm granular aggregates, and the combined application of chemical fertilizer significantly increased the organic carbon content of each grain and the contribution rate of large aggregates to organic carbon. (4) There was no significant effect on GMD, MWD, soil erodibility factor *K*, and soil organic carbon content of each particle size in different soil layers. In conclusion, in the Loess Hilly and Gully Region of Eastern Gansu Province, the combined application of organic fertilizer can significantly improve the soil structure of 0—40 cm soil layer, improve soil stability and enhance soil carbon sink capacity, and the best effect is achieved when the nitrogen application rate is 200 kg·ha⁻¹.

Keywords: fertilize; Longdong Loess Hilly and Gully Region; soil aggregate; stability; organic carbon