

间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应

向蕊^{1,2}, 伊文博¹, 赵薇¹, 王顶¹, 赵平^{1,2}, 龙光强^{1,2}, 汤利^{1,2}

(1.云南农业大学资源与环境学院,昆明 650201;2.农业农村部云南耕地保育科学观测实验站,昆明 650201)

摘要: 基于5年的田间小区定位试验,采用干筛法对不同施氮水平下的玉米单作、马铃薯单作和玉米马铃薯间作土壤进行团聚体分级并测定各粒级团聚体有机碳含量,研究间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应。结果表明:92%以上的土壤有机碳储藏在土壤大颗粒团聚体(>2 mm)和小颗粒团聚体($2\sim0.25$ mm)中。间作提高了土壤大颗粒团聚体(>2 mm)和小颗粒团聚体($2\sim0.25$ mm)的比例,但对不同粒级团聚体有机碳含量的影响与施氮量相关。对比2种单作,间作在低氮(N1)和常规施氮(N2)下增加了土壤总有机碳储量,在不施氮(N0)和高氮(N3)下无显著影响或降低有机碳储量。其中,间作通过增加土壤大颗粒团聚体(>2 mm)的比例及其有机碳含量,在低氮(N1)时产生最强的间作固碳优势,土壤总有机碳储量分别较玉米单作和马铃薯单作提高24.8%和5.7%。因此,适量施用氮肥可以充分发挥间作效应,有效提高土壤有机碳储量。

关键词: 间作; 施氮量; 团聚体; 有机碳

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0303-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.044

Effects of Intercropping on Soil Aggregate-associated Organic Carbon Storage and Nitrogen Regulation

XIANG Rui^{1,2}, YI Wenbo¹, ZHAO Wei¹, WANG Ding¹,

ZHAO Ping^{1,2}, LONG Guangqiang^{1,2}, TANG Li^{1,2}

(1.College of Resources and Environment Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

2.Yunnan Scientific Observation Station for Cultivated Land Conservation of the Ministry of Agriculture, Kunming 650201)

Abstract: Aimed to study the effect of intercropping on soil organic carbon storage and its nitrogen regulation effect, soil samples were collected from a 5-year field plot located experiment with maize monoculture, potato monoculture and maize and potato intercropping under different nitrogen application levels. Soil aggregates were graded by dry sieve method, and organic carbon content of aggregate in each size fraction was determined. The results showed that more than 92% of soil organic carbon was reserved in soil macro-aggregates (>2 mm) and small aggregates ($2\sim0.25$ mm). Intercropping increased the mass proportion of soil macro-aggregates (>2 mm) and small aggregates ($2\sim0.25$ mm), but the effect of intercropping on organic carbon contents of soil aggregates was related to nitrogen application. Compared with the two monocultures, intercropping under low nitrogen (N1) and conventional nitrogen (N2) application increased total organic carbon reserves of soil, but did not significantly affect or reduce the organic carbon reserves under no nitrogen (N0) and high nitrogen (N3) application. Among them, intercropping produced the strongest intercropping carbon sequestration advantage at low nitrogen (N1) by increasing the mass proportion of soil macro-aggregates (>2 mm) and their organic carbon contents, where the total organic carbon reserves of soil were 24.8% and 5.7% higher than those of maize monoculture and potato monoculture respectively. Therefore, proper application rates of nitrogen fertilizer could give full play to intercropping effect and effectively increase soil organic carbon reserves.

Keywords: intercropping; nitrogen application level; aggregate; soil organic carbon

收稿日期: 2019-02-28

资助项目: 云南省农业联合专项(2017FG001-027); 云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(2017HB027); 国家自然科学基金项目(41201289, 41361065)

第一作者: 向蕊(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事施肥与环境效应研究。E-mail: 409633887@qq.com

通信作者: 龙光强(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事施肥与环境效应研究。E-mail: ynaulong2316@163.com

土壤是最大的陆地有机碳库,碳储量约为 1 580 Gt,是大气碳库的 3 倍,在全球碳循环中发挥重要作用^[1]。农田土壤固碳不仅有助于稳定大气 CO₂ 含量,同时可提高土壤肥力,改善土壤质量和结构^[2]。已有研究^[3-4]表明,表层土壤中接近 90% 的有机碳储藏在土壤团聚体中,土壤团聚体的物理保护作用是土壤有机碳累积的重要机制之一。因此,通过研究土壤团聚体结合有机碳以阐释土壤固碳机制,对提高土壤有机碳储量有重要意义。

耕作管理、种植模式、施肥农业措施等均影响农田土壤团聚体分布及其有机碳含量,造成土壤有机碳储量的变化^[5]。单作、间作、轮作等不同种植模式下植物残体归还数量和种类不同,同时植被覆盖差异导致土壤环境发生改变,影响了土壤团聚体的形成、稳定性及其有机碳的分解速率^[6]。已有研究^[7-8]报道,间作可显著提高团聚体有机碳含量。氮肥施用显著提高了作物生物量,同时为土壤微生物提供速效氮供应,对土壤有机碳及其在团聚体上的分配产生重要影响。总体上,这些研究对作物间作及氮肥用量的交互作用关注较少。间作是广泛应用的传统农业种植模式,前期研究^[9-10]表明,间作可以提高作物产量和资源利用效率,降低病虫害发生。同时有研究^[11]指出长期间作可以有效增加土壤有机碳储量,但作物间作如何影响有机碳的团聚体分配从而增加有机碳储量的机制,以及施氮量对此的调控作用目前尚不清楚。

在以往的研究中对团聚体的分级大多采用湿筛法,干筛法相较于湿筛法降低了水分张力等因素对土壤结构的干扰,减少了对土壤中某些易变性有机胶结物质的破坏。对于旱地红壤,干筛比湿筛能更好地描述土壤的团聚作用,分离出的团聚体更接近田间实际^[12]。本研究依托多年田间小区试验,分析间作对土壤各粒级团聚体分布及其有机碳储量的影响以及施氮量的调控作用,从团聚体有机碳的物理保护作用探讨间作的固碳机制,为间作土壤有机碳提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间小区定位试验始于 2014 年。研究地区位于昆明市寻甸县(23°32'N, 103°13'E),属北亚热带季风气候,海拔 1 953.5 m,年均气温 14.7 °C,土壤类型为红壤。年均降水量 1 040 mm,集中在 7—9 月。第 1 年开展田间试验前的土壤理化性质:有机质含量为 18.44 g/kg,全氮含量为 0.32 g/kg,碱解氮含量为 87.37 mg/kg,速效磷含量为 2.5 mg/kg,速效钾含量为 117.83 mg/kg, pH 为 7.28,土壤容重为 1.41 g/cm³。

田间试验分 3 种植模式:玉米马铃薯间作(I)、玉

米单作(M)、马铃薯单作(P)。每种种植模式均设 4 个氮水平,以当地玉米和马铃薯生产施氮量(玉米、马铃薯常规施氮(N2), 250, 125 kg/hm²)为基础,分别增施氮 50% (高氮处理(N3), 375, 187.5 kg/hm²)和减量施氮 50% (低氮处理(N1), 125, 62.5 kg/hm²),同时设不施氮(N0)的对照。共计 12 个处理,每个处理 3 次重复,36 个小区随机区组排布。每个小区面积 32.5 m² (5 m×6.5 m),小区周边设置 1 m 的保护行,种植玉米。供试马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)品种为“合作 88 号”,玉米(*Zea mays* L.)品种为“云瑞 88 号”。

单作玉米株距 25 cm,行距 50 cm;单作马铃薯株距 35 cm,行距 50 cm;间作的玉米、马铃薯与单作株行距一致,采用 2 行玉米、2 行马铃薯(即行比 1:1)的替代种植方式。马铃薯氮肥分基肥 60%、现蕾期追肥 40% 两次施入,磷肥(P₂O₅) 75 kg/hm²,钾肥(K₂O) 125 kg/hm²。玉米氮肥施用分 3 次,分别为基肥 40%,小喇叭口期追肥 25% 和大喇叭口期追肥 35%,施磷肥(P₂O₅) 75 kg/hm²、钾肥(K₂O) 75 kg/hm²。单间作玉米和马铃薯磷钾肥均作基肥一次施入。氮肥、磷肥和钾肥分别选用尿素、普钙和硫酸钾。

1.2 测定指标

试验于 2018 年 11 月 1—13 日在云南农业大学实验楼进行,每组试验重复 3 次,分析计算采用 3 次试验数据的平均值。2018 年 10 月玉米收获后,在每个试验小区按对角线取样法采集表层土(0—20 cm),剔除石头和植物残茬,将土样带回。使用干筛法^[13]将土壤团聚体分离,根据干筛法:原状土样用手轻轻掰成的 10 mm 小土块,置于 4 °C 下风干至含水量为 8% 左右;用 GZS-1 高频振荡筛机进行颗粒分级,振动幅度 1.5 mm,振动频率为 500 次/min。每次称取 100 g 的风干土置于套筛中(重复 3 次),振动 2 min,分离出大颗粒团聚体(>2 mm)、小颗粒团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)和粉+黏团聚体(<0.053 mm),共 4 个粒级土壤团聚体。

对各粒级团聚体分别称重并计算各粒级的百分比。同时选取筛分前的土壤和分级后的不同粒级土壤,磨碎过 0.25 mm 筛,用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量^[14]并计算储量。

1.3 指标计算分析

土壤团聚体有机碳储量^[15]的计算公式为:

$$S_i = 10 \times C_i \times R \times D \times P_i$$

式中: S_i 为某粒级土壤团聚体有机碳储量(t/hm²); C_i 为某粒级土壤团聚体有机碳含量(g/kg); R 为土壤容重(g/cm³); D 为土层厚度(0.2 m); P_i 为某粒级土壤团聚体质量百分数(%)。

采用 Excel 2010 软件进行数据处理和绘图,采

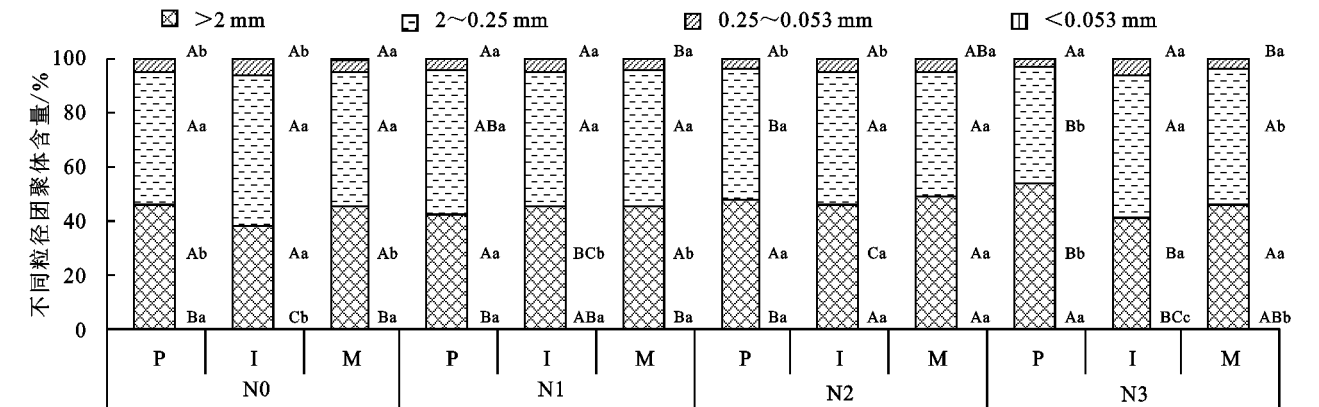
用 SPSS 20.0 软件进行方差分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 间作和施氮量对土壤团聚体分布的影响

土壤团聚体以大颗粒团聚体和小颗粒团聚体为主,在所有处理中其占比均超过 93%(图 1)。总体上,玉米马铃薯间作后,小颗粒团聚体和微团聚体的比例明显增

加。其中间作小颗粒团聚体比例比马铃薯单作增加了 6.8%,比玉米单作增加了 6.4%,微团聚体比例相对于马铃薯单作增加了 47.7%,比玉米单作增加了 26.9%。与 2 种单作相比,间作后土壤大颗粒团聚体数量有所下降,粉+黏团聚体比例较玉米单作下降,与马铃薯单作之间的效应因施氮量不同而增加或降低。



注:图中大写字母表示同一粒径不同施氮处理下土壤团聚体的质量百分含量在 $P<0.05$ 水平上的差异性;小写字母表示同一粒径不同种植模式土壤团聚体的质量百分含量在 $P<0.05$ 水平上的差异性。下同。

图 1 不同施氮量土壤团聚体分布

随施氮量增加,间作、玉米单作和马铃薯单作中大颗粒团聚体比例均增加,且间作后小颗粒团聚体比例减少,玉米单作中粉+黏团聚体比例减少,马铃薯单作中微团聚体减少,其他粒径均无显著变化。

当施氮量不同时,间作对土壤团聚体分布的影响各有差异。与马铃薯单作相比,随施氮量增加,间作使小颗粒团聚体比例先减少后逐渐增加,仅在 N1 水平有所减少,对增加小颗粒团聚体比例的间作效应在 N3 水平最大,增加了 16.4%;间作增加微团聚体比例的效应随施氮量增加而逐渐增大,在 N3 水平有最大增幅 115%。相对于玉米单作,在各个氮水平下间作使小颗粒团聚体和微团聚体比例均增加,在 N0 和 N3 水平分别有最高增量分别为 12.1%和 64.9%(图 1)。

2.2 间作和施氮量对土壤团聚体有机碳含量的影响

由图 2 可知,不同粒径团聚体有机碳含量为大颗粒团聚体>微团聚体>小颗粒团聚体>粉+黏团聚体。玉米马铃薯间作后,对比玉米单作提高了大颗粒团聚体和小颗粒团聚体有机碳含量,减少了<0.25 mm 粒径的有机碳含量,与马铃薯单作相比,减少了各粒级团聚体有机碳含量。各个粒级的团聚体随施氮水平的增加均增加,在 N1 水平小颗粒团聚体和微团聚体有机碳含量高于相同施氮水平的大颗粒团聚体。与玉米单作相比,间作在 N1 和 N2 水平各粒级团聚体有机碳含量均增加,平均增幅为 18.4%,11.9%,且在 N1 处理下大颗粒团聚体有机碳有最大增量(30.6%)。对比马铃薯单作,间作仅在 N1 水平大颗粒团聚体和<0.25 mm 团聚体有机碳含量有增量,大

颗粒团聚体有最大增幅。

2.3 间作对土壤有机碳储量的影响及其氮调控效应

玉米马铃薯间作与 2 种单作相比较,全土有机碳储量随施氮量的改变而增加或减少(表 1)。对比玉米单作,在 N1、N2 处理下间作有机碳储量分别增加了 24.8%,11%,在 N0 水平减少了 12.6%,N3 水平无明显增减变化;相较于马铃薯单作,间作优势效应仅出现在 N1 水平,增幅为 5.7%,在 N0、N2 和 N3 处理下间作减少了 3.2%~17.1%有机碳储量。

从不同团聚体有机碳储量分配来看,有机碳主要储藏在大小颗粒团聚体,占比超过 92%(表 1)。随施氮量增加,间作下大颗粒团聚体有机碳储量先增加后减少,小颗粒团聚体有机碳储量呈增长趋势。对比玉米单作,间作后显著增加小颗粒团聚体和微团聚体的有机碳储量,分别增加了 9.7%,19.5%,降低了粉+黏的团聚体有机碳储量,对大颗粒团聚体无显著影响。与马铃薯单作相比较,间作提高了<0.25 mm 团聚体的有机碳储量,减少了>0.25 mm 团聚体的有机碳储量。

在玉米马铃薯间作、玉米单作和马铃薯单作 3 个种植模式中,施氮量对土壤有机碳储量的影响趋势一致。当施氮不超过 N2 水平时,有机碳储量随施氮量增加而增加,在此基础上进一步增加施氮到 N3,碳储量与 N2 处理没有显著差异(表 1)。对比马铃薯单作有机碳储量,间作在 N0、N2 和 N3 调控下主要由大颗粒团聚体贡献减少量,在 N1 水平增量主要由大颗粒团聚体贡献。对比玉米单作,在 N0 水平下间作后

有机碳储量减少主要由大颗粒团聚体贡献,在 N1、N2 处理下的有机碳储量增加主要由大颗粒团聚体和

小颗粒团聚体贡献,N1 水平下分别贡献了 49.7%,47.2%,N2 分别贡献了 11.9%,83.8%(表 2)。

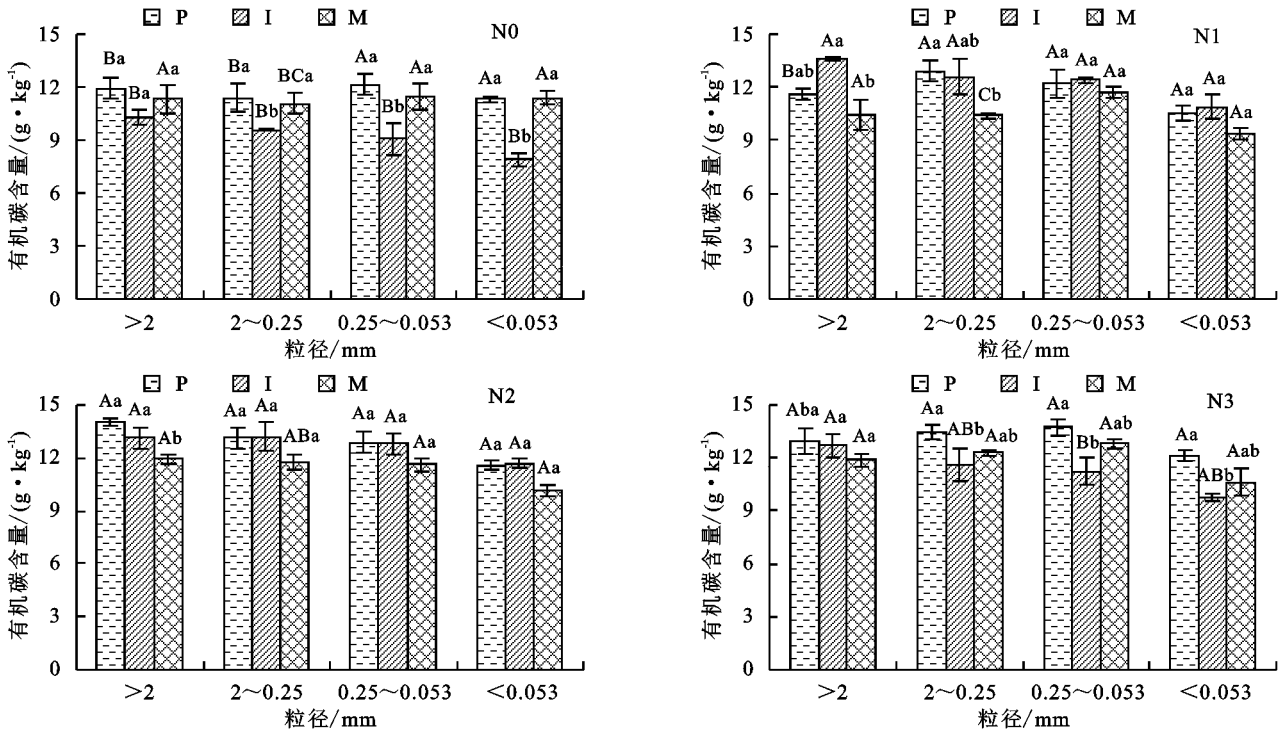


图 2 不同粒径团聚体有机碳含量变化

表 1 不同粒径团聚体有机碳储量及分配比例

种植模式	氮水平	> 2 mm		0.25~2 mm		0.25~0.053 mm		< 0.053 mm		有机碳储量全土	
		储量/	比例/	储量/	比例/	储量/	比例/	储量/	比例/	储量/	比例/
		(t·hm ⁻²)	%	(t·hm ⁻²)	%	(t·hm ⁻²)	%	(t·hm ⁻²)	%	(t·hm ⁻²)	%
间作(I)	N0	11.01±0.48Cb	39.75	15.00±0.44Ba	53.82	1.55±0.26Aa	5.54	0.03±0.02Ab	0.12	27.87±0.68Cc	99.05
	N1	16.97±0.61Aa	45.71	18.14±1.46Aa	48.82	1.63±0.16Aa	4.39	0.02±0.01Aa	0.06	37.14±0.95Aa	98.98
	N2	17.03±0.79Aab	45.50	18.34±1.32Aa	48.98	1.68±0.29Aa	4.48	0.03±0.02Aa	0.09	37.43±0.68Aa	99.04
	N3	14.80±0.94Bb	43.07	17.21±1.32ABa	50.25	1.93±0.21Aa	5.61	0.02±0.00Aa	0.07	34.32±0.97Bb	99.01
马铃薯单作(P)	N0	15.54±0.71Ba	46.16	15.71±0.75Ba	46.73	1.66±0.23Aa	4.94	0.02±0.01Ab	0.07	33.62±0.62Ba	97.90
	N1	13.93±0.52Bb	39.69	19.36±0.86Aa	55.18	1.44±0.15ABa	4.09	0.01±0.01Aa	0.04	35.13±0.66Ba	99.00
	N2	18.97±1.41Aa	48.98	18.12±0.75ABa	46.97	1.19±0.10Ba	3.09	0.04±0.01Aa	0.11	38.69±0.94Aa	99.14
	N3	18.88±0.53Aa	52.36	17.13±1.17ABa	45.68	1.09±0.14Bb	2.90	0.03±0.01Aa	0.08	37.49±0.82Aa	99.03
玉米单作(M)	N0	14.50±1.54ABa	45.45	15.48±0.5Ba	48.52	1.51±0.05Aa	4.73	0.11±0.00Aa	0.36	31.90±0.68Cb	99.06
	N1	13.38±0.94Bb	44.90	14.73±0.81Bb	49.51	1.38±0.21Aa	4.64	0.04±0.02Ba	0.13	29.77±0.95Bb	99.17
	N2	16.59±0.64Ab	44.27	15.25±0.78Ba	50.06	1.49±0.28Aa	4.42	0.06±0.01Ba	0.19	33.72±0.32Ab	98.93
	N3	15.38±0.98ABb	44.48	17.44±0.59Aa	50.45	1.33±0.21Ab	3.87	0.05±0.01Ba	0.15	34.58±0.73Ab	98.96

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一粒径不同种植模式土壤团聚体的质量百分含量在 $P<0.05$ 水平差异显著;不同大写字母表示同一粒径下不同施肥处理土壤团聚体的质量百分含量在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

表 2 各粒级团聚体对总有机碳储量增减量的贡献度

氮水平	种植模式	增减量/%	各粒级团聚体对总有机碳储量增减量的贡献度/%			
			> 2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
N0	I—P	—16.21	—13.75	—2.17	—0.33	0.04
	I—M	—12.66	—11.02	—1.52	0.13	—0.25
N1	I—P	5.82	8.75	—3.52	0.56	0.02
	I—M	24.46	12.15	11.54	0.83	—0.06
N2	I—P	—3.23	—5.06	0.58	1.27	—0.02
	I—M	11.04	1.31	9.25	0.57	—0.09
N3	I—P	—8.53	—11.00	0.22	2.26	—0.02
	I—M	—0.71	—1.71	—0.66	1.74	—0.08

注:表中 I—M、I—P 分别表示间作与玉米单作对比、间作与马铃薯单作对比;增减量表示间作与玉米单作、马铃薯单作各粒级团聚体有机碳

储量累加量差值的百分比。

3 讨论

本研究结果表明,与玉米单作相比,间作玉米在 N1(125 kg/hm²)和 N2(250 kg/hm²)水平使总有机碳增加了 24.8%和 11.0%;与马铃薯单作相比,间作马铃薯总有机碳在 N1(62.5 kg/hm²)增加了 5.7%,在 N2(125 kg/hm²)没有显著差异。当前玉米和马铃薯生产施氮量大多处于本研究中 N1 和 N2 水平范围^[16-17],这暗示玉米马铃薯间作在正常施氮的农业生产中对增强土壤有机碳固定有重要意义。与此相一致,在玉米小麦、玉米蚕豆、小麦蚕豆和苹果三白叶间作体系中也发现间作增加有机碳储量的结论^[7,11]。本研究进一步发现,大颗粒团聚体对增加有机碳储量的贡献度最大。大团聚体(>0.25 mm)中有机碳含量和储量明显高于微团聚体(<0.25 mm),研究结果与前人^[18-20]相符,说明在团聚化过程中有机碳起着极其重要的作用,这与团聚体的胶结物质及周转有关。有研究^[21]发现,南方红壤地区微团聚体的主要胶结物质是铁铝氧化物,而大团聚体的主要胶结物质是有机质。尽管 70%以上的土壤有机碳存在于粉+黏团聚体中^[22-23],但因其后被有机质胶结成了大团聚体,且大颗粒团聚体中处于分解状态的根系和菌丝也可以增加有机碳的浓度^[4],因此一般土壤大团聚体中土壤有机碳浓度较微团聚体高。本研究中,玉米与马铃薯新鲜有机物的输入分别为根茬、秸秆,马铃薯地有机物输入量比玉米多,也因此增加了大团聚体的比例。另一方面,根据 Six 等^[18]提出的“大颗粒团聚体周转”为核心的概念模型,新鲜有机物促进大颗粒团聚体形成,而大颗粒团聚体内的颗粒有机物有助于微团聚体的形成,伴随颗粒有机物的分解及其他干扰过程,大颗粒团聚体破碎后将微团聚体释放出来。而玉米根系丰富对土壤的扰动更大,这会使微团聚体比例增加。间作通过促进玉米根系总糖和总有机酸分泌量,提高根际细菌的活力,促进菌丝生长和多糖分泌,从而增强对微团聚体缠绕作用和胶黏作用,这有利于微团聚体转化为大颗粒团聚体^[24],因此,间作比单作储存碳的优势更大。

土壤有机碳的累积与植被生物量的输入(数量、质量)和降解速率相关^[25]。长期施氮肥可以提高土壤有机碳含量,促进植物生长,而且由于根系和真菌生物量的增加,增加了大团聚体的数量^[8,26],本研究结果与之相同。本研究中当施氮量不高于 N2 水平时,3 种植植模式下的土壤有机碳储量均随施氮量增加而提高,同时施氮增加了大团聚体(>0.25 mm)的

比例。主要原因是通过氮添加使土壤氮元素和较难分解的凋落物残体结合形成了更难降解的有机碳,并通过改变土壤微生物群落结构,提高微生物对碳的利用效率,减弱微生物呼吸作用,从而提高有机碳的稳定性以累积有机碳^[25,27]。

而施氮量的差异会促使间作的效果不同,其中在 N1 水平下有最好的间作效应,在 N0、N3 水平没有间作固碳优势。在前期试验中^[9]当施氮量不高于 N3 水平时,玉米与马铃薯生物量随施氮量增加而增加,当继续增施氮肥并不能再促进植株生物量增加,甚至会降低生物量^[28]。过量的氮肥施用会导致马铃薯净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)的降低,且间作后的减幅随施氮量增加而增大,由此减少有机物的输入量^[29]。本研究证实了有机物的输入是有机碳累积的关键,但对于不同氮水平下间作土壤中各团聚体微生物对有机物的分解情况,还需进一步研究。

4 结论

(1)以多年定位试验为基础,发现不同施氮量和种植模式影响了土壤各粒级团聚体的分布。玉米马铃薯间作后土壤大颗粒团聚体数量有所下降,小颗粒、微团聚体比例有所增加。仅与马铃薯单作相比,在 N1 水平间作大颗粒团聚体增加了 3.7%。

(2)不同粒径团聚体有机碳含量相比较:大颗粒团聚体>微团聚体>小颗粒团聚体>粉+黏团聚体。玉米马铃薯间作后,对比玉米单作提高了大颗粒团聚体和小颗粒团聚体有机碳含量,减少了<0.25 mm 粒径的有机碳含量;与马铃薯单作相比,减少了各粒级团聚体有机碳含量。

(3)对比 2 种单作,在 N1 水平有最好的间作优势。间作在 N1 水平使总有机碳增加了 14.5%,在 N0、N2、N3 水平减少了 4.6%~14.9%。对比马铃薯单作有机碳储量,间作在 N0、N2 和 N3 调控下主要由大颗粒团聚体贡献减少量,在 N1 水平增量主要由大颗粒团聚体贡献。对比玉米单作,在 N0 水平下间作后有机碳储量减少主要由大颗粒团聚体贡献,在 N1、N2 处理下的有机碳储量增加主要由大颗粒团聚体和小颗粒团聚体贡献。

参考文献:

[1] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
[2] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, et al. Carbon se-

- questration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 653-665.
- [3] 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.
- [4] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447-455.
- [5] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [6] Parshotam A, Saggar S, Searle P L, et al. Carbon residence times obtained from labelled ryegrass decomposition in soils under contrasting environmental conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 75-83.
- [7] 王英俊, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 485-493.
- [8] Wang Y, Wang Z L, Zhang Q, et al. Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1131-1139.
- [9] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265-1273.
- [10] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 等. 玉米与马铃薯间作对根际微生物群落结构和多样性的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(6): 919-928.
- [11] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726.
- [12] Zhang S, Li Q, Zhang S X, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of northeast China [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012, 124(4): 196-202.
- [13] Zhang S, Li Q, Lü Y, et al. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147-156.
- [14] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34.
- [15] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 598-604.
- [16] 刘润梅, 范茂攀, 付云章, 等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 753-760.
- [17] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802-817.
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [19] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2): 339-347.
- [20] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 267-273.
- [21] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
- [22] 窦森, 王其存, 代晓燕. 土壤有机培肥对微团聚体组成及其碳、氮分布和活性的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 1991, 13(2): 43-48.
- [23] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [24] 王婷, 李永梅, 王自林, 等. 间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 185-190.
- [25] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 88-94.
- [26] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 675-683.
- [27] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 145-151.
- [28] 朱启林. 不同施氮水平下玉米马铃薯间作对土壤 CO₂ 排放的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2018.
- [29] 朱启林, 向蕊, 龙光强, 等. 间作条件下施氮量对马铃薯光合特性的调控作用[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1391-1397.