

秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响

赵继浩, 李颖, 钱必长, 李金融, 刘兆新,

高芳, 杨坚群, 甄晓宇, 杨东清, 李向东

(山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 小麦—花生一年两熟是解决粮油争地矛盾, 实现粮油自给的重要途径, 小麦收获后直播花生是麦油两熟的主要种植方式。试验在前茬小麦收获后设计秸秆还田与耕作方式 2 种处理因素, 共 6 个处理: 旋耕秸秆不还田(RT)、旋耕秸秆还田(RTS)、免耕秸秆不还田(NT)、免耕秸秆覆盖(NTS)、深耕秸秆不还田(DT)和深耕秸秆还田(DTS)。研究秸秆还田与耕作方式对土壤理化性质以及花生产量的影响。结果表明: 不同耕作方式对土壤理化性质的影响不同, 在 0—10 cm 土层中, 与深耕处理和旋耕处理相比, 免耕处理增加了大粒径团聚体的质量比例, 提高了团聚体的稳定性, 增加了土壤细菌、真菌、放线菌的数量。而深耕处理主要改善了 10—20、20—30 cm 土层土壤理化性质, 深耕处理还增加了干物质积累量, 提高了花生荚果产量和籽仁产量。在相同的耕作方式下, 与秸秆不还田处理相比, 秸秆还田处理降低了土壤容重, 增加了土壤孔隙度, 增加了粗大团聚体的质量比例以及土壤有机碳和全氮含量, 提高了团聚体的稳定性, 增加了土壤细菌、真菌、放线菌的数量, 增加了干物质积累量, 提高了花生荚果产量和籽仁产量。DTS 处理荚果产量和籽仁产量比 DT 处理分别增加了 10.89% 和 14.65%, RTS 处理荚果产量和籽仁产量比 RT 处理分别增加了 10.00% 和 11.77%, NTS 处理荚果产量和籽仁产量比 NT 处理分别增加了 16.31% 和 19.82%。处理间比较, 与其他 5 个处理相比, DTS 处理不仅改良了土壤理化性质, 而且提高了花生荚果产量和籽仁产量。

关键词: 秸秆还田; 耕作方式; 土壤微生物; 团聚体; 产量

中图分类号: S344.1; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0272-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.040

Effects of Straw Return and Tillage on Soil Properties and Yield of Multi-cropping Peanut After Wheat

ZHAO Jihao, LI Ying, QIAN Bichang, LI Jinrong, LIU Zhaoxin, GAO Fang,

YANG Jianqun, ZHEN Xiaoyu, YANG Dongqing, LI Xiangdong

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Wheat-peanuts double cropping system is an important way to solve the contradiction between grain and oil competition and achieve both self-sufficiency. Seeding peanut directly after wheat harvest is the main cultivation method of wheat-peanuts double cropping system. In this experiment, two treatment factors of straw return and tillage were designed after wheat harvesting, and six treatments were conducted rotary tillage with straw remove (RT), rotary tillage with straw return (RTS), no-tillage with straw remove (NT), no-tillage with straw mulch (NTS), deep tillage with straw remove (DT) and deep tillage with straw return (DTS). The effects of straw return and tillage on soil physical and chemical properties and peanut yield were studied. The results showed that different tillage methods had different effects on soil physical and chemical properties. In 0—10 cm soil layer, no-tillage increased the mass ratio of large-size aggregates compared with deep tillage and rotary tillage, improved the stability of aggregates and increased the number of bacteria, fungi, actinomycetes. The deep tillage mainly improved the soil physical and chemical properties of the soil layers of 10—20 and 20—30 cm. Deep tillage increased dry matter accumulation, increased peanut pod yield and seed kernel yield. Under the same tillage, compared with the straw remove, the straw return reduced the soil bulk density, increased soil porosity and the mass ratio of coarse aggregates. Soil organic car-

收稿日期: 2019-04-07

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1000900); 山东省现代农业产业技术体系花生创新团队首席专家专项(SDAIT-04-01); 山东省重大科技创新工程项目(2018YFJH0601)

第一作者: 赵继浩(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事花生生理生态研究。E-mail: WSzjh544@163.com

通信作者: 李向东(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事花生生理生态研究。E-mail: lixdong@sdau.edu.cn

bon and total nitrogen contents were increased, and the aggregates stability and the number of soil bacteria, fungi, actinomycetes were improved. The straw return increased dry matter accumulation, and consequently increased peanut pod yield and seed kernel yield. Compared with DT treatment, DTS treated pod yield and seed kernel yield increased by 10.89% and 14.65% respectively. Compared with RT treatment, RTS pod yield and seed kernel yield increased by 10.00% and 11.77% respectively. Compared with NT treatment, NTS pod yield and seed kernel yield increased by 16.31% and 19.82% respectively. Compared with the other treatments, DTS not only improved soil physical and chemical properties, but also increased peanut pod yield and seed kernel yield.

Keywords: straw return; tillage methods; soil microbes; aggregates; yield

黄淮海地区既是我国小麦、玉米等粮食作物主要产区,又是花生等油料作物的主要产区,随着我国人口数量的增加和人民生活水平的提高,对粮油的需求逐渐增大,粮油供给面临着巨大挑战^[1]。且随着近些年城镇化进程的加快以及建筑用地的不合理利用,我国可用耕地面积逐渐减少,导致黄淮海地区粮油争地矛盾进一步加大^[2],因此通过小麦—花生一年两熟种植,来缓解争地矛盾,对实现粮油自给具有极其重要的意义。在小麦—花生一年两熟制中,前茬小麦收获后对小麦秸秆进行还田处理,一方面解决了农民焚烧秸秆造成的环境污染问题^[3],另一方面秸秆中含有丰富的碳、氮、磷、钾等大量元素以及中微量元素^[4],因此秸秆还田还可以提高土壤养分含量,减少化学肥料的投入^[5]。前人^[6]研究表明,秸秆还田可以增加大粒径团聚体数量,保持土壤结构的稳定性;增加土壤微生物的数量,丰富土壤微生物群落结构^[7]。同时秸秆还田还能促进根系对土壤养分的吸收,增加作物的干物质积累量,提高产量^[8]。耕作方式是调控土壤理化性质的主要农艺措施,不同的土壤耕作方式对土壤水、肥、气、热的影响不同,免耕对土壤结构扰动较小,在表层土壤的保水、保墒、保肥等方面具有积极作用^[9];但长期免耕会增加土壤容重,增大土壤紧实度^[10],不利于养分到达下层,影响作物根系的生长发育和对土壤养分的吸收,减少作物产量^[11]。深耕有利于打破犁底层,减小土壤紧实度,促进作物根系的生长发育和对土壤养分的吸收,从而能够增加作物产量^[12]。旋耕秸秆还田是黄淮海地区夏花生生产普遍采用的耕作模式,前人围绕旋耕秸秆还田已经做了大量研究,但关于麦收后深耕和免耕对夏花生土壤质量和荚果产量的报道较少。

因此,本试验通过研究秸秆还田与耕作方式对土壤容重、孔隙度,各粒径团聚体质量分布,土壤有机碳、全氮含量,土壤微生物以及花生干物质积累量和花生产量形成的影响,以期改善该地区冬小麦—夏花生生产技术提供一定的理论参考和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 6—10 月在山东省泰安市山东农业大学农学实验站(116°20'E, 35°38'N)进行,属温带季风性气候。试验开始时耕层(0—20 cm)土壤有机质含量 13.18 g/kg,全氮含量 1.03 g/kg,速效磷含量 32.69 mg/kg,速效钾含量 81.80 mg/kg,土壤为沙壤土。

试验地采用冬小麦—夏花生一年两熟制,试验采用裂区设计,主区为耕作方式,设置深耕(DT)、旋耕(RT)、免耕(NT)3 个处理;副区为秸秆还田,设置秸秆全量还田和秸秆不还田 2 个处理,每个处理 3 次重复,小区面积 20 m×6 m=120 m²,其中深耕作业深度为 30 cm,旋耕作业深度为 15 cm;具体试验设计见表 1。供试花生品种为大花生品种“山花 108”,采用畦种,畦的一边开沟,一边筑埂;畦宽 1.5 m,沟宽 30 cm;免耕处理是在 3 m 小麦畦中间开沟分为 2 个 1.5 m 的花生畦,所有小区整好畦后用划行器划行,然后用开沟器开沟播种,每畦种 5 行,种植密度为 15 万穴/hm²(行距 30 cm,株距 20 cm),每穴播 2 粒,花生播种前基施化肥纯 N 总量 110 kg/hm²,P₂O₅ 总量 110 kg/hm²、K₂O 总量 110 kg/hm²,其他管理措施同一般高产田。小麦品种为“山农 20”,机械播种,种植密度为 2.25×10⁶株/hm²,小麦种植前基施化肥纯 N 总量 110 kg/hm²,P₂O₅ 总量 120 kg/hm²,K₂O 总量 120 kg/hm²,于拔节期追施纯 N 总量 110 kg/hm²,其他管理措施同一般高产田。

花生生长发育阶段的划分标准参考 Boote^[13]的方法,按照植株及荚果的发育形态学特征将花生生长期分为:R1(苗期)、R3(花针期)、R5(结荚期)、R7(饱果期)和 R8(成熟期)等阶段。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤容重、孔隙度的测定 于花生生长季 R8 时期取样,采用“S”形取样法随机选取每小区 5 个样点,采用环刀法每层 10 cm,取 0—10,10—20,20—30 cm 土样,去除秸秆、石块等杂物,充分混匀土壤,测定

土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度。

土壤容重^[14] $\rho_b(\text{g}/\text{cm}^3)=(W_1-W_0)/V$
土壤总孔隙度^[15] $(\%)=(1-\rho_b/\rho)\times 100\%$
土壤毛管孔隙度^[15] $(\%)=(W_c-\rho_b/V)\times 100\%$
式中: W_1 为烘干土重和环刀重(g); W_0 环刀重(g); ρ 为土壤密度 $2.65\text{ g}/\text{cm}^3$; W_c 为土壤毛管含水量(%); V 为环刀体积(cm^3)。

表 1 试验设计	
处理	耕作模式
DTS	前茬小麦收获后秸秆还田和深耕处理后播种花生
RTS	前茬小麦收获后秸秆还田和旋耕处理后播种花生
NTS	前茬小麦收获后先将秸秆移除,免耕播种花生后再将秸秆均匀的撒在土壤表面
DT	前茬小麦收获后移除秸秆和深耕处理后播种花生
RT	前茬小麦收获后移除秸秆和旋耕处理后播种花生
NT	前茬小麦收获后移除秸秆,免耕播种花生

1.2.2 土壤团聚体测定及计算方法 水稳性团聚体的质量含量采用湿筛法。各处理取 50 g 的土样,湿筛分析在团聚体分析仪上进行,套筛孔径依次为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm。其中 $>2\text{ mm}$ 的团聚体为粗大团聚体,0.25~2 mm 团聚体为细大团聚体,二者合称为大团聚体; $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体为微团聚体^[16]。有机碳的测定采用重铬酸钾氧化法,全氮的测定采用浓硫酸—过氧化氢消煮后,经凯氏定氮仪(FOSS)测定^[17]。

(1)不同粒级水稳性团聚体的质量比例计算公式^[17]为:

$$w_i=\frac{Ww_i}{50}$$

式中: w_i 为第*i*级团聚体的质量比例(%); Ww_i 为该级团聚体的风干质量(g)。

(2)平均重量直径(MWD,mm)和几何平均直径(GMD,mm)计算公式^[18]为:

$$\text{MWD}=\left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right]$$
$$\text{GMD}=\text{e}^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right]}$$

式中: $\bar{x}_i$ 为第*i*级团聚体的平均直径(mm); w_i 为第*i*级团聚体的质量比例(%)。

(3)团聚体分形维数(*D*)的计算采用杨培岭等^[19]推导的公式:

$$M_{(r<\bar{x}_i)}/M_T=(\bar{x}_i/x_{\max})^{3-D}, \text{对公式两边取对数,可得:} \lg[M_{(r<\bar{x}_i)}/M_T]=(3-D)\lg(\bar{x}_i/x_{\max}) \text{通过数据拟合,可求得 } D。$$

式中: $\bar{x}_i$ 为第*i*级团聚体的平均直径(mm); $M_{(r<\bar{x}_i)}$ 为粒径小于 $\bar{x}_i$ 的团聚体的质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); $x_{\max}$ 为团聚体的最大粒径(mm)。

1.2.3 土壤微生物数量的测定 于花生生长季 R8 时期取样,采用“S”形取样法随机选取每小区 5 个样点,用土钻取 0—10,10—20,20—30 cm 土样,去除秸秆、石块等杂物,充分混匀土壤,采用平板计数法测定土壤微生物数量^[20]。

1.2.4 干物质积累量的测定 分别在 R1、R3、R5、R7 和 R8 时期,各处理选取 5 株代表性植株装袋后,于 80 ℃下烘干至恒重称重,即为植株干物质积累量。

1.2.5 考种及测产 采用小区测产(6.67 m^2),避开边行,重复 3 次。选取代表性植株 10 株,调查植株性状和单株结果数,荚果晒干后称重计产。荚果放入室内平衡 10 天后,各小区随机称取 500 g 荚果考种,计算荚果产量、籽仁产量、单位质量果数和出仁率。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件整理数据和作图,用 DPS 7.05 软件进行统计分析,LSD 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与耕作方式对土壤容重的影响

由图 1 可知,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 RTS 处理和 NTS 处理相比,DTS 处理土壤容重分别减小了 1.03%,1.88%,0.19% 和 2.20%,1.49%,0.77%,与 RT 处理和 NT 处理相比,DT 处理同样减小了土壤容重,这说明与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理减小了土壤容重。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理土壤容重分别减少了 2.79%,2.28%,3.50%,与 RT 处理相比,RTS 处理减小了土壤容重,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也减小了土壤容重,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理减小了土壤容重。处理间比较,在 3 个土层中 DTS 处理的土壤容重均小于其他处理。

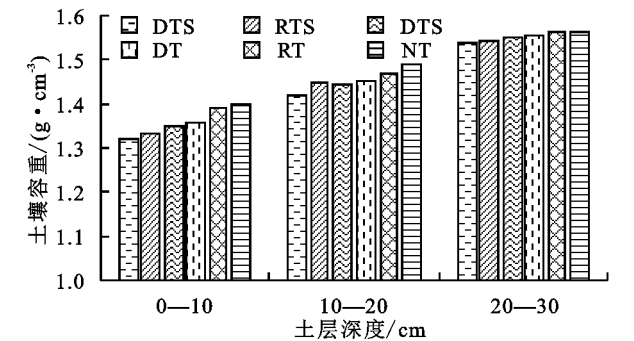


图 1 秸秆还田与耕作方式对土壤容重的影响

2.2 秸秆还田与耕作方式对土壤孔隙度的影响

由表 2 可知,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层

中,与 RTS 处理和 NTS 处理相比,DTS 处理土壤总孔隙度分别增加了 0.11%,1.02%,0.11%和 1.02%,0.81%,0.45%,与 RT 处理和 NT 处理相比,DT 处理同样增加了土壤总孔隙度,这说明与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了土壤总孔隙度。在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了土壤毛管孔隙度,但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了土壤毛管孔隙度。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理土壤总孔隙度分别增加了 1.43%,1.25%,0.64%,与 RT 处理相比,RTS 处理增加了土壤总孔隙度,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了土壤总孔隙度;土壤毛管孔隙度的变化规律与土壤总孔隙度基本一致,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了土壤总孔隙度和毛管孔隙度。处理间比较,在 3 个土层中 DTS 处理的土壤总孔隙度均高于其他处理。

表 2 秸秆还田与耕作方式对土壤孔隙度的影响
单位: %

土层 深度/cm	处理	单位: %	
		总孔隙度	毛管孔隙度
0—10	DTS	50.41a	45.33a
	RTS	50.30a	43.88b
	NTS	49.39b	45.87a
	DT	48.98b	41.72c
	RT	47.81c	41.32c
	NT	46.56d	43.07b
10—20	DTS	46.39a	40.52a
	RTS	45.37b	38.82b
	NTS	45.58b	37.79c
	DT	45.14b	37.22cd
	RT	44.56c	36.68d
	NT	43.82d	36.45d
20—30	DTS	41.90a	35.12a
	RTS	41.79ab	34.85a
	NTS	41.45ab	34.36ab
	DT	41.26ab	34.27ab
	RT	41.09b	33.30b
	NT	41.03b	33.01b

注:同列不同字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著, LSD 数据统计。下同。

2.3 秸秆还田与耕作方式对不同粒径团聚体质量比例的影响

由图 2 可知,在 0—10 cm 土层中,与 DTS 处理和 RTS 处理相比,NTS 处理增加了粗大团聚体(>2 mm)和细大团聚体(0.25~2 mm)的质量比例,与 DT 处理和 RT 处理相比,NT 处理同样增加了粗大团聚体(>2 mm)和细大团聚体(0.25~2 mm)的质量比例,这说明与

深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了大粒径团聚体的质量比例;但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了大粒径团聚体的质量比例。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理粗大团聚体(>2 mm)的质量比例分别增加了 4.44%,4.69%,2.55%,与 RT 处理相比,RTS 处理增加了粗大团聚体(>2 mm)的质量比例,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了粗大团聚体(>2 mm)的质量,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理都增加了粗大团聚体(>2 mm)的质量比例。

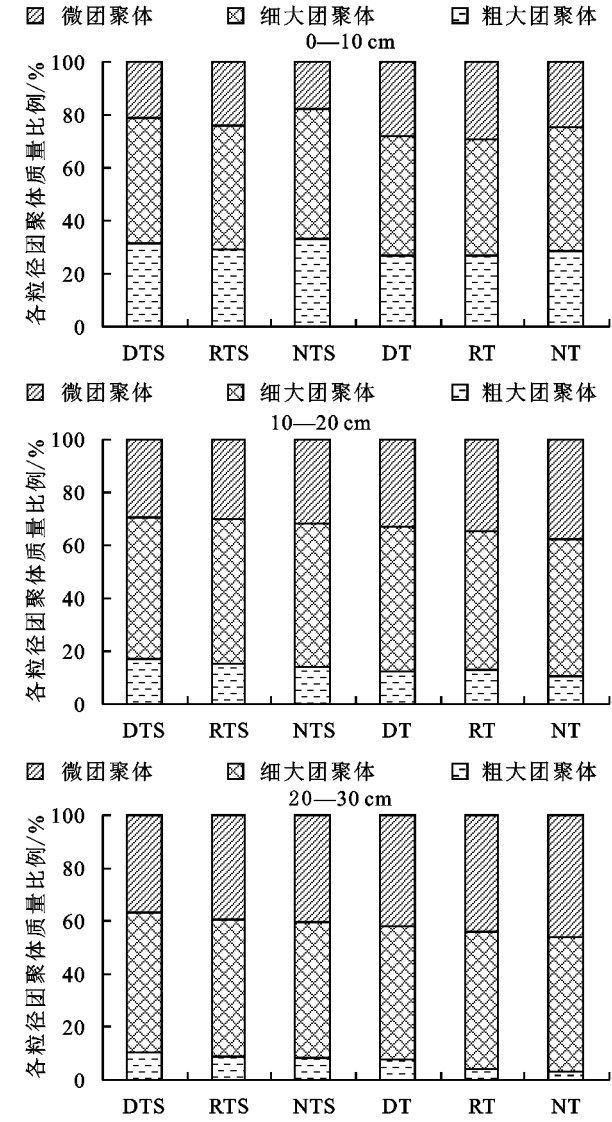


图 2 秸秆还田与耕作方式对不同粒径团聚体质量比例的影响

2.4 秸秆还田与耕作方式对土壤有机碳(SOC)含量的影响

由表 3 可知,在同一土层中,各粒径团聚体有机碳含量具有相似的趋势,表现为在大团聚体中随着团聚体粒径的降低有机碳含量逐渐降低,即 $SOC_{>5\text{ mm}}$ 含量最高,然后依次是 $SOC_{2\sim5\text{ mm}}$ 、 $SOC_{1\sim2\text{ mm}}$ 、 $SOC_{0.5\sim1\text{ mm}}$ 、 $SOC_{0.25\sim0.5\text{ mm}}$ 含量最低;但是微团聚体有

机碳含量 $\text{SOC}_{<0.25\text{ mm}}$ 却有着明显的升高,这说明团聚体有机碳随着粒径的降低呈现一种“V”形的变化趋势。在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理显著增加了土壤总有机碳和各粒径团聚体有机碳含量;但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋

耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了土壤总有机碳和各粒径团聚体有机碳含量。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20 cm 土层中,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理都增加了土壤总有机碳和各粒径团聚体有机碳含量。

表 3 秸秆还田与耕作方式对土壤有机碳含量的影响 单位:g/kg

土层 深度/cm	处理	总有机碳 含量	各粒径团聚体有机碳含量					
			>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0—10	DTS	8.65b	7.78b	7.47b	7.14b	6.16b	5.48b	7.73b
	RTS	8.30c	7.69bc	7.41b	6.93bc	6.01bc	5.18b	7.49c
	NTS	9.07a	8.05a	7.84a	7.52a	6.69a	5.98a	7.87a
	DT	7.63d	6.93d	6.86c	6.14d	5.24d	4.30c	6.73d
	RT	7.63d	6.88d	6.42d	5.92d	5.17d	4.28c	6.55e
	NT	8.20c	7.62c	7.47b	6.64c	5.96c	5.11b	7.47c
10—20	DTS	7.34a	6.74a	6.58a	6.34a	5.81a	4.59a	6.36a
	RTS	7.21a	6.64ab	6.34ab	6.20a	5.72a	4.56a	6.10ab
	NTS	7.15ab	6.58b	6.16b	5.96ab	5.42b	4.34ab	5.79b
	DT	6.86bc	5.81c	5.74c	5.68bc	5.20bc	4.15bc	5.40c
	RT	6.68cd	5.81c	5.70cd	5.48cd	5.09c	4.02bc	5.29c
	NT	6.49d	5.72c	5.42d	5.20d	4.93c	3.88c	5.20c
20—30	DTS	5.22a	5.35a	5.11a	4.72a	4.26a	3.51a	5.05a
	RTS	5.13b	5.11b	4.94a	4.56b	4.06a	3.32b	5.04a
	NTS	5.13b	4.61c	4.47b	3.89c	3.82b	3.31b	4.82b
	DT	5.09bc	4.59c	4.30b	3.84c	3.69b	3.27b	4.79b
	RT	5.09bc	4.50c	4.06c	3.80c	3.29c	3.19b	4.74b
	NT	5.05c	4.45c	3.84d	3.78c	3.27c	3.19b	4.74b

2.5 秸秆还田与耕作方式对土壤全氮(TN)含量的影响

由表 4 可知,在同一土层中,各粒径团聚体全氮含量具有相似的趋势,表现为在大团聚体中随着团聚体粒径的降低全氮含量逐渐降低,即 $\text{TN}_{>5\text{ mm}}$ 含量最高,然后依次是 $\text{TN}_{2\sim5\text{ mm}}$ 、 $\text{TN}_{1\sim2\text{ mm}}$ 、 $\text{TN}_{0.5\sim1\text{ mm}}$ 、 $\text{TN}_{0.25\sim0.5\text{ mm}}$ 含量最低;但是微团聚体全氮含量 $\text{TN}_{<0.25\text{ mm}}$ 却有着明显的升高,这说明团聚体全氮含量随着粒径的降低呈现一种“V”形的变化趋势。在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理显著增加了土壤全氮和各粒径团聚体全氮含量;但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了土壤全氮和各粒径团聚体全氮含量。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20 cm 土层中,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理都增加了土壤全氮和各粒径团聚体全氮含量。

2.6 秸秆还田与耕作方式对土壤团聚体稳定性的影响

由图 3 可知,在 0—10 cm 土层中,与 DTS 处理和 RTS 处理相比,NTS 处理团聚体 MWD 值分别增加了 6.74%和 12.38%,与 DT 处理和 RT 处理相比,NT 处理团聚体 MWD 值分别增加了 3.63%和 4.83%,团聚体 GMD 值的变化规律与团聚体 MWD 值基本

一致;这说明与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了团聚体的 MWD 和 GMD 值;但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了团聚体的 MWD 和 GMD 值。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理的团聚体 MWD 值分别增加了 10.60%,21.58%,14.82%;与 RT 处理相比,RTS 处理增加了团聚体的 MWD 值,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了团聚体的 MWD 值,团聚体 GMD 值与团聚体 MWD 值的变化规律基本一致;这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了团聚体 MWD 和 GMD 值;处理间比较,在 3 个土层中 DTS 处理的 MWD 和 GMD 值均高于其他处理。

由图 4 可知,在 0—10 cm 土层中,与 DTS 处理和 RTS 处理相比,NTS 处理团聚体分形维数分别减少了 3.11%和 5.08%。与 DT 处理和 RT 处理相比,NT 处理团聚体分形维数分别减少了 1.69%和 2.38%,这说明与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理减小了团聚体分形维数;但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理减小了团聚体分形维数。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理团聚体分形维数分别减少了 3.76%,1.49%,

1.46%，与 RT 处理相比，RTS 处理减少了团聚体分形维数，这说明与秸秆不还田处理相比，秸秆还田处理都减小了团聚体分形维数。

表 4 秸秆还田与耕作方式对土壤全氮含量的影响 单位: g/kg

土层深度/cm	处理	全氮含量	各粒径团聚体全氮含量					
			>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0—10	DTS	1.15b	1.13b	1.10b	1.07b	1.01b	0.97b	1.10b
	RTS	1.14b	1.13b	1.09b	1.06c	1.00bc	0.96b	1.10b
	NTS	1.16a	1.15a	1.12a	1.10a	1.06a	1.00a	1.13a
	DT	1.12c	1.11c	1.04c	1.00e	0.96d	0.82d	1.05d
	RT	1.10c	1.09d	1.03d	0.99e	0.96d	0.81d	1.03e
	NT	1.14b	1.13b	1.09b	1.03d	1.00c	0.92c	1.09c
10—20	DTS	0.98a	0.97a	0.91a	0.88a	0.85a	0.84a	0.88a
	RTS	0.97a	0.96b	0.89b	0.86b	0.85a	0.82b	0.88a
	NTS	0.96a	0.95c	0.89b	0.86b	0.85a	0.82b	0.86b
	DT	0.91b	0.89d	0.87c	0.86b	0.83b	0.78c	0.81c
	RT	0.86c	0.85e	0.83d	0.80c	0.78c	0.77cd	0.80c
	NT	0.85c	0.84e	0.83d	0.79c	0.77d	0.76d	0.80c
20—30	DTS	0.81a	0.80a	0.76a	0.71a	0.68a	0.66a	0.75a
	RTS	0.80b	0.78ab	0.74b	0.70a	0.66ab	0.63b	0.74ab
	NTS	0.80b	0.77b	0.73b	0.68b	0.65b	0.63bc	0.72b
	DT	0.80b	0.77b	0.73b	0.67b	0.64b	0.62bc	0.72bc
	RT	0.79b	0.77b	0.73b	0.65c	0.64b	0.62c	0.71bc
	NT	0.79b	0.76b	0.71c	0.64c	0.61c	0.59d	0.69c

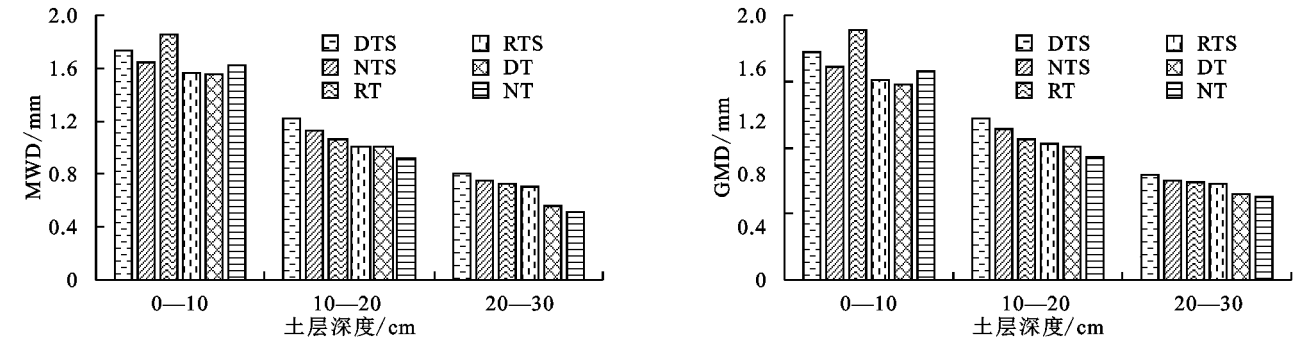


图 3 秸秆还田与耕作方式对团聚体 MWD 和 GMD 的影响

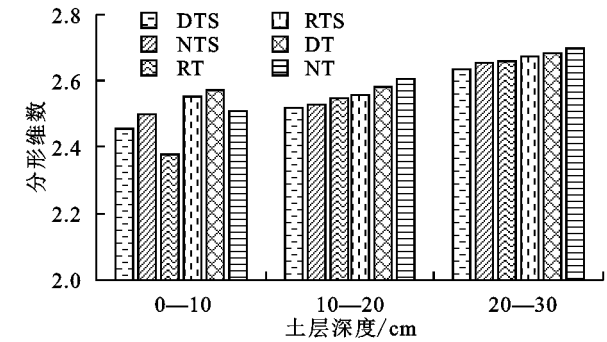


图 4 秸秆还田与耕作方式对团聚体分形维数的影响

2.7 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物的影响

2.7.1 秸秆还田与耕作方式对细菌数量的影响 由图 5 可知,在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了细菌数量,但在 10—20, 20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了细菌数量。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,

DTS 处理细菌数量分别增加了 31.63%,20.60%, 10.45%,与 RT 处理相比,RTS 处理增加了细菌数量,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了细菌数量,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了土壤细菌的数量。

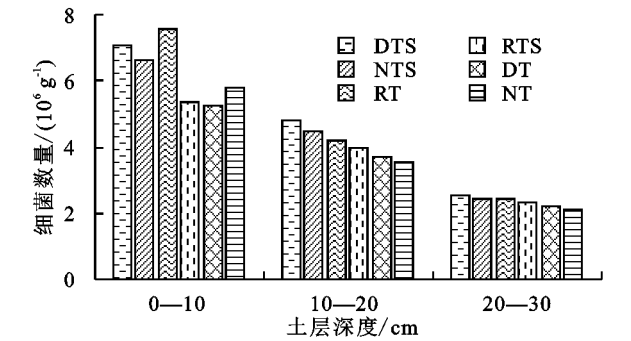


图 5 秸秆还田与耕作方式对细菌数量的影响

2.7.2 秸秆还田与耕作方式对真菌数量的影响 由图 6 可知,在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处

理相比,免耕处理增加了真菌数量,但在 10—20, 20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了真菌数量。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比,DTS 处理真菌数量分别增加了 13.78%,30.57%,17.07%,与 RT 处理相比,RTS 处理增加了真菌数量,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了真菌数量,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了土壤真菌的数量。

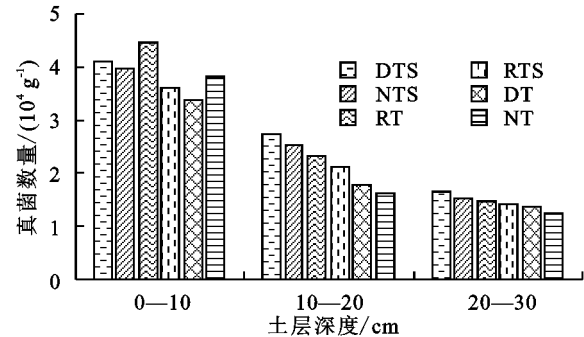


图 6 秸秆还田与耕作方式对真菌数量的影响

2.7.3 秸秆还田与耕作方式对放线菌数量的影响

由图 7 可知,在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了放线菌数量,但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了放线菌数量。在相同的耕作方式下,在 0—10,10—20,20—30 cm 土层中,与 DT 处理相比 DTS 处理放线菌数量增加了 19.16%,31.28%,17.24%,与 RT 处理相比,RTS 处理增加了放线菌数量,与 NT 处理相比,NTS 处理同样也增加了放线菌数量,这说明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了土壤放线菌的数量。

2.8 秸秆还田与耕作方式对花生干物质积累量的影响

由图 8 可知,各处理的干物质积累量变化均呈“S”形趋势,在不同的耕作方式下,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了花生干物质积累量;从 R3 时期开始,在相同的耕作方式下,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理都显著增加了花生的干物质积累量,其中在 R8 时期,与 DT 处理相比,DTS 处理干

物质积累量增加了 13.67%;与 RT 处理相比,RTS 处理干物质积累量增加了 9.20%;与 NT 处理相比,NTS 处理干物质积累量增加了 20.45%;处理间比较,整个生育期内 DTS 处理的花生干物质积累量均高于其他处理。

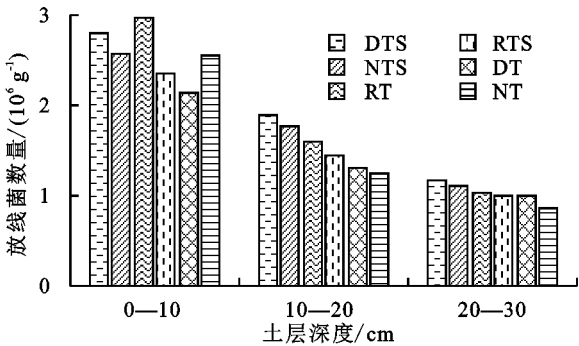


图 7 秸秆还田与耕作方式对放线菌数量的影响

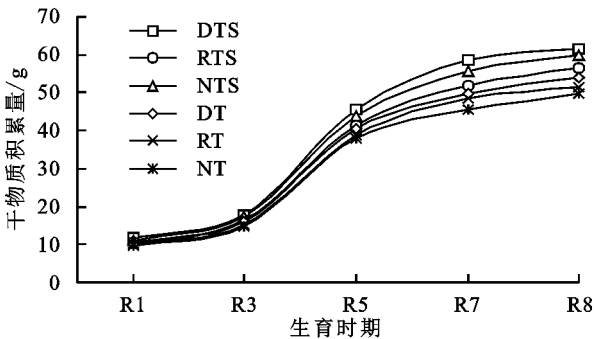


图 8 秸秆还田与耕作方式对花生干物质积累量的影响

2.9 秸秆还田与耕作方式对花生产量的影响

由表 5 可知,与其他 5 个处理相比,DTS 处理增加了荚果产量和籽仁产量,提高了出仁率。在不同的耕作方式下,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理提高了花生荚果产量和籽仁产量,在相同的耕作方式下,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理显著提高了花生荚果产量和籽仁产量,与 DT 处理相比,DTS 处理荚果产量和籽仁产量分别增加了 10.89%和 14.65%,与 RT 处理相比,RTS 处理荚果产量和籽仁产量分别增加了 10.00%和 11.77%,与 NT 处理相比,NTS 处理荚果产量和籽仁产量分别增加了 16.31%和 19.82%;产量提升的主要原因是单株结果数增加和单位质量果数降低,果重增加。

表 5 秸秆还田与耕作方式对花生产量的影响

处理	荚果产量/ (kg · hm ⁻²)	籽仁产量/ (kg · hm ⁻²)	果数/ (个 · kg ⁻¹)	单株结果数/ 个	出仁率/ %
DTS	4457.78±42.43a	2959.11±32.98a	605±3d	12.84±0.28a	66.38±0.25a
RTS	3993.89±43.42c	2531.11±17.92c	612±4c	11.43±0.15c	63.38±0.84b
NTS	4108.63±27.69b	2716.05±35.82b	606±3d	11.81±0.17b	66.10±0.89a
DT	3912.57±41.70c	2446.20±31.69c	615±3c	11.40±0.16c	62.53±1.77bc
RT	3782.16±9.96d	2342.16±27.18d	622±3b	10.97±0.10d	61.92±0.98bc
NT	3742.14±22.71d	2279.03±31.36d	633±3a	10.77±0.12d	60.90±0.67c

注:表中数据为平均值±标准差。

3 讨论

土壤容重是土壤的重要物理性状之一,它可以影响土壤水、肥、气、热的变化。前人^[21]研究表明,秸秆还田可以降低土壤容重,免耕和少耕会减少土壤的入渗量,使土壤表层容重增大^[10]。本研究表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理降低了 0—30 cm 土层的容重,这可能是由于秸秆与土壤颗粒结合后形成稳定疏松的结构,减小了单位体积土壤的质量^[21],与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理降低了 0—30 cm 土层的容重。

孔隙度作为土壤结构的重要组成部分,对土壤中水和空气的传导、运动,植物根系的穿孔和吸水具有积极的作用^[22]。前人^[23-24]研究表明,秸秆还田会增加土壤总孔隙度和毛管孔隙度;免耕会减少土壤总孔隙度,但会增加表层土壤的毛管孔隙度,且随着免耕年限的增加效果更加明显。本研究表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理提高了 0—30 cm 土层的总孔隙度和毛管孔隙度,同时与免耕处理相比,深耕处理增加了 0—30 cm 土层的总孔隙度,但在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了土壤的毛管孔隙度,这可能是因为免耕没有破坏表层土壤的毛管结构。

土壤团聚体的形成过程是一个复杂的过程。首先是通过各种物理作用挤压相互聚集,凝聚成复粒或团聚体;然后是复粒或团聚体再经过胶结物质、微生物、菌丝体等对土粒的缠绕固定形成团聚体^[25]。土壤团聚体的稳定性对土壤理化性质以及植物的生长发育具有很大的影响,团聚体稳定性常用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及分形维数表示,MWD 和 GMD 值越大,分形维数越小表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[26]。

前人^[27]研究表明,秸秆腐解不仅会增加土壤中有机碳含量和全氮含量,而且秸秆腐解产生的有机物质如多糖等,可以为微生物的生存提供更多的环境,同时促进土壤微团聚体、土壤矿物质和粗颗粒有机物胶结为大团聚体,提高大团聚体的含量以及提高团聚体的稳定性。本试验表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了 0—30 cm 土层粗大团聚体(>2 mm)的质量比例以及土壤和团聚体有机碳、全氮含量,增加了团聚体的 MWD 和 GMD 值,降低了团聚体分形维数,提高了团聚体的稳定性。李玮等^[28]研究表明,大团聚体比小团聚体含有更多的碳、氮,He 等^[29]研究表明,有机碳和全氮主要分布于小粒径微团聚体中。本试验表明,微团聚体中的有机碳和全氮含量高于大团聚体中的有机碳和全氮含量,这可能是因为大团聚体中的有机碳和全氮比微团聚体中的有

机碳更容易矿化,而微团聚体中的有机碳和全氮则大多是高度腐殖化的惰性组分。

前人^[30]研究表明,耕作活动对土壤团聚体的形成具有显著的影响,增加耕作强度可促进表层和底层土壤的周转,同时减少土壤团聚作用的发生。于爱忠等^[31]研究表明,长期保护性耕作可显著提高表层土壤大团聚体含量,提高团聚体的稳定性,同时可增加土壤团聚体有机碳含量。本研究表明,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了 0—10 cm 土层的大团聚体的质量比例以及土壤和团聚体有机碳、全氮含量,提高了团聚体的 MWD 和 GMD,降低了团聚体分形维数,提高了团聚体稳定性。这是因为免耕增加了土壤表面动植物残体数量,可促进土壤表层的真菌生长和土壤动物活动等,有助于大团聚体的形成,增加其稳定性。

前人^[32]研究表明,土壤微生物在土壤中主要起分解动植物残体的作用,秸秆还田可以增加土壤微生物的数量,丰富土壤微生物群落结构。本研究表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理增加了 0—30 cm 土层的细菌、真菌、放线菌数量。这是因为秸秆中含有丰富的碳、氮、磷、钾等大量元素以及中微量元素,也含有蛋白质和糖类等有机能源,秸秆还田可以为微生物提供新的能源物质,而且还田的秸秆本身也带入大量的微生物。不同的耕作方式对土壤微环境以及微生物数量的影响很大,耕作措施可以通过调节土壤温度、水分和孔隙状况的变化,为土壤微生物的生长与繁殖提供适宜的环境^[33]。徐阳春等^[34]研究表明,保护性耕作下表层土(0—7.5 cm)的微生物数量增加;李景等^[35]研究表明,两茬耕作、深松覆盖和免耕可以提高土壤细菌、古菌和真菌的多样性、丰富度和均匀度指数,尤其对古菌和真菌的影响较大。本研究表明,在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了细菌、真菌、放线菌的数量,但在 10—20, 20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理增加了细菌、真菌、放线菌的数量。

花生作为地上开花地下结果的作物,土壤质量会对花生产量产生很大的影响。本研究表明,与其他 5 个处理相比,DTS 处理增加了单株结果数,降低了单位质量果数,提高了花生荚果产量和籽仁产量,主要原因是秸秆还田和土壤深耕可以提高土壤的有效养分含量,均衡了耕层土壤养分分布,改善了下层土壤理化性质,促进根系的下扎^[36],有利于提高花生对土壤养分的吸收与积累,从而提高了花生植株的干物质积累量,较高的生物量积累是产量形成的基础^[37]。

4 结论

(1)与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度和毛管孔隙度,增加了

大粒径团聚体的质量比例以及土壤和团聚体有机碳、全氮含量,增加了团聚体的 MWD 和 GMD,提高了团聚体的稳定性,丰富了土壤微生物种群结构,增加了干物质的积累量,提高了花生荚果产量和籽仁产量。

(2)在 0—10 cm 土层中,与深耕处理和旋耕处理相比,免耕处理增加了大粒径团聚体的质量比例以及土壤和团聚体有机碳、全氮含量,提高了团聚体的稳定性,增加了细菌、真菌、放线菌的数量。但在 10—20,20—30 cm 土层中,与旋耕处理和免耕处理相比,深耕处理降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度和毛管孔隙度,提高了团聚体的稳定性,增加了细菌、真菌、放线菌的数量,深耕处理还增加了干物质的积累量,提高了花生荚果产量和籽仁产量。

(3)在小麦—花生两熟制下,前茬小麦收获后进行深耕还田不仅可以提高花生的产量,而且还可以实现耕地资源的用养结合,促进耕地资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等.耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1785-1792.
- [2] 孙秀山,王才斌,吴正锋.山东省麦后夏直播花生生产发展潜力与对策[J].山东农业科学,2015(6):134-136.
- [3] Guo L J, Zhang Z S, Wang D D, et al. Effects of short-term conservation management practices on soil organic carbon fractions and microbial community composition under a rice-wheat rotation system [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2015,51(1):65-75.
- [4] 李逢雨,孙锡发,冯文强,等.麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):374-380.
- [5] Xu X, Pang D, Chen J, et al. Straw return accompany with low nitrogen moderately promoted deep root [J]. *Field Crops Research*, 2018,221:71-80.
- [6] Wang Y, Xu J, Shen J, et al. Tillage, residue burning and crop rotation alter soil fungal community and water-stable aggregation in arable fields[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010,107(2):71-79.
- [7] Lian T, Jin J, Wang G, et al. The fate of soybean residue-carbon links to changes of bacterial community composition in Mollisols differing in soil organic carbon [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017,109:50-58.
- [8] 赵亚丽,郭海斌,李潮海,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J].作物学报,2014,40:1797-1807.
- [9] 高焕文,李问盈,李洪文.中国特色保护性耕作技术[J].农业工程学报,2003,19(3):1-4.
- [10] 陈学文,张晓平,梁爱珍,等.耕作方式对黑土硬度和容

重的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):439-444.

- [11] 柏炜霞,李军,王玉玲,等.渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):880-894.
- [12] Ji B, Zhao Y, Mu X, et al. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China[J]. *Plant Soil & Environment*, 2013,59(7):295-302.
- [13] Boote K J. Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Peanut Science*, 2010,9(1):35-40.
- [14] 孙国峰,张海林,徐尚起,等.轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):66-71.
- [15] 刘小宁,蔡立群,黄益宗,等.生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):112-117.
- [16] 庞党伟.耕作和氮肥互作对耕层土壤理化性质及冬小麦产量的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 程乙,任昊,刘鹏,等.不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3521-3528.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [20] 许光辉.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.
- [21] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等.秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J].中国农业科学,2014,47(2):366-373.
- [22] 罗俊,林兆里,阙友雄,等.耕作深度对蔗地土壤物理性状及甘蔗产量的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):405-412.
- [23] Tangyuan N, Bin H, Nianyuan J, et al. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system[J]. *Plant Soil and Environment*, 2009,55(8):327-333.
- [24] 聂良鹏,郭利伟,宁堂原,等.轮耕对小麦—玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响[J].作物学报,2015,41(3):468-478.
- [25] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [26] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [27] Decaëns T. Degradation dynamics of surface earthworm casts in grasslands of the eastern plains of Colombia[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000,32(2):149-156.
- [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.

[8] 傅伟,刘坤平,陈洪松,等.等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):812-820.

[9] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China [J]. *Geoderma*,2010,158(3/4):173-180.

[10] Liu P, Zhao H J, Li Y, et al. Corn yields with organic and inorganic amendments under changing climate [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2018,111(2/3):1-13.

[11] 袁丽峰,黄腾跃,王改玲,等.腐殖酸及腐殖酸有机肥对玉米养分吸收及肥料利用率的影响[J].中国农学通报,2014,30(36):98-102.

[12] 何威明,保万魁,王旭.氮肥增效剂及其效果评价的研究进展[J].中国土壤与肥料,2011(3):1-7.

[13] 王士坤,唐振海,董彦琪,等.肥料增效剂与氮肥配施对夏玉米生长发育和产量的影响[J].河南农业科学,2015,44(12):53-56.

[14] 林海涛,李慧,余晔,等.氮肥与新型增效剂配施对夏玉米生长及产量的影响[J].山东农业科学,2015(11):68-71.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999.

[16] 邬梦成,李鹏,张欣,等.不同有机物施用对油菜—红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):320-326.

[17] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.

[18] 刘威,熊又升,徐祥玉,等.减量施肥模式对稻麦轮作体系作物产量和养分利用效率的影响[J].中国农业科技导报,2018,20(5):91-99.

[19] 徐娜,党廷辉,刘文兆.黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1240-1248.

[20] 朱金龙.膜下滴灌春玉米营养规律与施肥技术研究[D].新疆 石河子:石河子大学,2014.

[21] 姜佰文,谢晓伟,王春宏,等.应用腐殖酸减肥对玉米产量及氮效率的影响[J].东北农业大学学报,2018,49(3):21-29.

[22] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.

[23] 王兴龙,朱敏,杨帆,等.配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):271-276.

[24] 胡娟,吴景贵,孙继梅,等.氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):116-120.

[25] 何欣,荣湘民,谢勇,等.化肥减量与有机肥替代对水稻产量与养分利用率的影响[J].湖南农业科学,2017(3):31-34.

(上接第 280 页)

[29] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2015,532:635-644.

[30] 李景,吴会军,刘志平.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.

[31] 于爱忠,黄高宝,柴强,等.耕作措施对冬小麦农田土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):119-123.

[32] 慕平,张恩和,王汉宁,等.连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J].水土保持学报,2011,25(5):81-85.

[33] 高明,周保同,魏朝富,等.不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J].应用生态学报,2004,15(7):1177-1181.

[34] 徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):89-96.

[35] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2341-2348.

[36] Luo Z, Wang E, Sun O J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*,2010,139(1/2):224-231.

[37] 胡旦旦,张吉旺,刘鹏,等.密植条件下玉米品种混播对夏玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,2018,44(6):920-930.