

黑土区短期免耕对大豆田土壤水分物理性质的影响

江 恒^{1,2}, 韩晓增¹, 邹文秀¹, 杨春葆¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态重点实验室, 海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 耕作和施肥是影响土壤水分物理性质的2个重要因素, 为探讨免耕和长期单施化肥对土壤水分物理性质的影响及它们之间的交互作用, 以海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站内的长期定位试验为基础, 研究了施用化肥+传统耕作(NP+CT), 施用化肥+免耕(NP+NT), 无肥+传统耕作(CK+CT), 无肥+免耕(CK+NT)对土壤水分物理性质的影响。短期免耕(3 a)后显著地增加黑土水稳性团聚体的稳定性, 表现在与传统耕作相比水稳定性大团聚体(>0.25 mm)的含量、平均重量直径和平均几何直径分别提高9.03%, 10.90%和20.39%。耕作和施肥对土壤水稳性团聚体稳定性的影响没有显著的交互作用, 但是与施肥相比, 耕作方式能够解释更多的土壤水稳性团聚体稳定性的变异。免耕显著增加了0~10 cm土层土壤的容重, 减少了土壤总孔隙度、饱和含水量、毛管含水量和田间持水量, 施肥仅对0~10 cm土层土壤毛管含水量产生了显著的影响。耕作和施肥对0~10 cm土层土壤的容重具有显著的交互作用, 同时与施肥相比, 耕作能够解释更多的0~10 cm土层土壤的容重、总孔隙度、饱和含水量、毛管含水量和田间持水量的变异。耕作和施肥对10~20 cm土层土壤的水分物理性质影响不显著。因此, 在研究区域内耕作是影响土壤水分物理性质的一个重要措施。

关键词: 免耕; 传统耕作; 水稳性团聚体; 土壤水分物理性质

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-9841(2012)03-0374-07

Effect of Short-term No-tillage on Soil Water Physical Property of Soybean Field in Black Soil Zone

JIANG Heng^{1,2}, HAN Xiao-zeng¹, ZOU Wen-xiu¹, YANG Chun-bao¹

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, Heilongjiang; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Tillage and fertilization are two important factors impacting soil water physical properties. For finding out the effect of tillage and fertilization on soil water physical properties and their interactions, we researched the influence of four treatments, including chemical fertilizer plus traditional tillage(NP+CT), chemical fertilizer plus no-tillage(NP+NT), no-fertilizer plus traditional tillage(CK+CT) and no-fertilizer plus no-tillage(CK+NT), on soil water physical properties based on long-term field experiments located in Hailun Agricultural Ecology Station of Chinese Academy of Sciences. Compared to traditional tillage, short-term(three years) no-tillage significantly increased the stability of water stable aggregates with increased water stable aggregates contents (>0.25 mm) by 9.03%, and also increased mean weight diameter and geometric weight diameter by 10.90% and 20.39%. There were no interactions within tillage and fertilization, but tillage practices could account for more variations of water stable aggregates' stabilities, compared with fertilization. No-tillage significantly increased soil bulk density, and decreased soil total porosity, capillary water content, saturated water content and field capacity that in 0-10 cm soil profile. Fertilization could only explain the variations of capillary water content in 0-10 cm soil profile significantly, and it had significant interaction effect on soil bulk density with tillage methods. Considering tillage practices and fertilization, tillage practices could explain more variation of soil bulk density, soil total porosity, capillary water content, saturated water content and field capacity. Tillage practices and fertilization had no significant effect on soil water physical properties in 10-20 cm soil profile. So, tillage practices are one important factor influencing soil water physical properties in study site.

Key words: No-tillage; Traditional tillage; Soil water aggregate; Soil physical properties

收稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(40971152, 41101208); 国家重点基础研究发展计划(2011CB100506)。

第一作者简介: 江恒(1989-), 男, 在读硕士, 研究方向为农田土壤水分。E-mail: jiang1989heng@yahoo.cn。

通讯作者: 韩晓增(1957-), 男, 研究员, 主要从事土壤生态方面的研究工作。E-mail: xzhan@neigaeherb.ac.cn。

基于增加土壤水分含量,提高水分利用效率和减少土壤侵蚀的目的,免耕作为一种保护性耕作方式已经被国内外的学者广泛报道^[1-4]。余海英等^[5]研究发现与传统耕作相比免耕3 a后土壤水分利用率和春玉米产量分别较传统翻耕提高13.3%和16.4%。高旺盛等^[6]认为免耕能够明显减少农田土壤的风蚀。免耕虽然是一种有效的水土保持措施,但它同时也对土壤产生一定的负面影响,例如增加了表层土壤容重,减少作物产量等,谢瑞芝等^[3]对免耕减产效应做了详细的报道。自19世纪中期以后,由于植物生理学和农业化学的发展,人们认识到化肥在粮食增产中占有巨大作用^[7]。但是我国从20世纪1901年(台湾)~1906年(上海)引进和使用化肥开始,就有“化肥破坏土质”之说,如胡雪峰等^[8]指出氮肥及一些磷肥如过磷酸钙等的过多施用会导致农田的加速酸化。郑子成等^[9]指出在保护地中长期施入磷酸二铵、尿素、硫酸铵,加之用水不合理,灌水次数频繁,引起地下水位进一步上升,矿化度增大,土壤团粒结构被破坏,大孔隙减少,通透性变差,毛管作用增强,盐分表积逐渐加剧,造成不同程度的土壤板结。也有学者反对这一观点,如杨果等^[10]认为长期施用化肥并未显著提高土壤容重,而能提高土壤孔隙度,因此长期单独施用化肥并非造成土壤板结的主要原因。但关于长期施用化肥对黑土区土壤水分物理性质的影响还有鲜有报道。

东北黑土区土壤肥沃,有机质含量高,增施化肥是该地区提高作物产量的农业措施之一。另外东北黑土区属于旱作农业,大气降水是土壤水分的主要来源,水分是该地区农业生产的主要限制因子^[11]。如何提高土壤库容和增加土壤的保水能力已经成为该地区土壤水分研究和管理的重点,邹文秀等^[12]研究得出与不施肥相比单施化肥能够减少土壤蒸发,提高大豆土壤水分利用效率。关于免耕对土壤水分的影响,在东北黑土区也有相关报道^[13-14],免耕能够增加播种前玉米地和大豆地土壤的含水量,在一定程度上缓解春季黑土墒情差的问题,是研究区域内抵御春旱的有效耕作措施。由此可见免耕和施化肥都是该地区重要的农业措施,并且这两种措施对土壤的水分物理性质都有一定的影响。为了探讨免耕和施用化肥对研究区域土壤水分物理性质的影响,该文利用海伦试验站的长期定位试验研究平台,研究了长期单施化肥的土地免耕3 a后土壤水分-物理性质的变化,为该地区选择合理的耕作和施肥措施提供一定的理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站水肥耦合试验场进行,海伦站地处黑土区中部,地势平坦,属于温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季,年平均气温1.5℃,极端最高温度37℃,极端最低温度-39.5℃,年降水量500~600 mm,主要集中在7、8、9月份,年均有效积温2 450℃,年均日照时数2 600~2 800 h,无霜期125 d。土壤类型为中厚层黑土,是在第四纪形成的黄土状母质上发育起来的地带性土壤,质地以粘性土为主,土壤物理性粘粒大于60%,土壤固相比大于50%,土壤膨胀性大于25%,土体结构致密,渗透能力弱,毛管水运移速率较慢,土壤持水能力和保水能力较强,储水库容较大。地下水埋深20~30 m。

1.2 试验设计

试验小区选自水肥耦合长期定位试验观测场内的2个肥料试验小区,分别是无肥区(CK)和单施化肥区(NP)(N:150 kg·hm⁻²,P₂O₅:75 kg·hm⁻²),该试验始于1993年。在2007年将每个肥料试验小区做裂区处理,即一半设为免耕试验区(NT),一半为传统耕作(秋翻垄作)试验(CT)区。所以试验共设有4个处理即施用化肥+传统耕作处理(NP+CT),施用化肥+免耕处理(NP+NT),无肥+传统耕作(CK+CT),无肥+免耕(CK+NT),4次重复,随机排列。作物的种植方式为每年一季,大豆-玉米轮作。样品于2010年8月份采集,当季指示作物为大豆。分别在0~10 cm和10~20 cm土层用环刀取样测定土壤的水分物理性质,同时采集0~20 cm土层的土壤样品,室内风干后用于水稳性团聚体的测定。秋季作物收获后用土钻采集土壤样品测定土壤含水量,采样深度为0~70 cm,采样间隔为10 cm。

1.3 测定项目与方法

土壤容重、毛管持水量、饱和含水量和田间持水量采用环刀法测定,土壤的孔隙度采用算法,即:土壤孔隙度=(1-容重/土粒密度)×100%。团聚体分级采用约得筛分仪,根据王风等和Li等提供的方法进行筛分^[15-16]。平均重量直径由公式[1]计算^[17]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad [1]$$

几何平均直径由公式[2]计算^[18]:

$$GWD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i \right) / \sum_{i=1}^n W_i \right] \quad [2]$$

式中 W_i 代表团聚体第 i 个组分平均直径,代表团聚体第 i 个组分占土样总质量的比例。

1.4 数据分析

采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析和相关分析,用 Duncan (SSR) 法进行多重比较。用 Excel 2007 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对土壤水稳性团聚体的影响

土壤水稳性团聚体对评价土壤侵蚀和土壤肥力,保护土壤有机碳具有重要意义^[19]。耕作和施肥都是影响土壤水稳性团聚体的重要因素。由图 1 可知,与传统耕作相比,免耕显著增加了 >0.5 mm 各级土壤水稳性团聚体含量 ($P < 0.05$), 平均增加

了 13.81%。虽然 0.5 ~ 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量表现为 CK + NT < CK + CT < NP + NT < NP + CT,但是 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体的含量仍然表现为 NT (CK + NT, NP + NT) 显著大于 CT (CK + CT, NP + CT), 平均增加了 5.40%, 说明在研究区域短期的免耕已经起到了增加土壤水稳性团聚体,改善土壤结构的作用。相应的传统耕作增加了小粒径土壤水稳性团聚体的含量,相似的报告为在东北黑土区保护性耕作能够显著增加 0 ~ 30 cm 土层 > 0.25 mm 团聚体含量^[3]。施肥对水稳性团聚体含量的影响因耕作方式不同而表现出一定的差异,主要表现在免耕试验中 CK 与 NP 的各级水稳性团聚体含量间差异不显著,但在传统耕作试验中 NP 显著减少了 >0.25 mm 团聚体含量,说明单施化肥不利于水稳性大团聚体的形成,同时相对于单施化肥,耕作措施对土壤团聚体含量的影响更大。

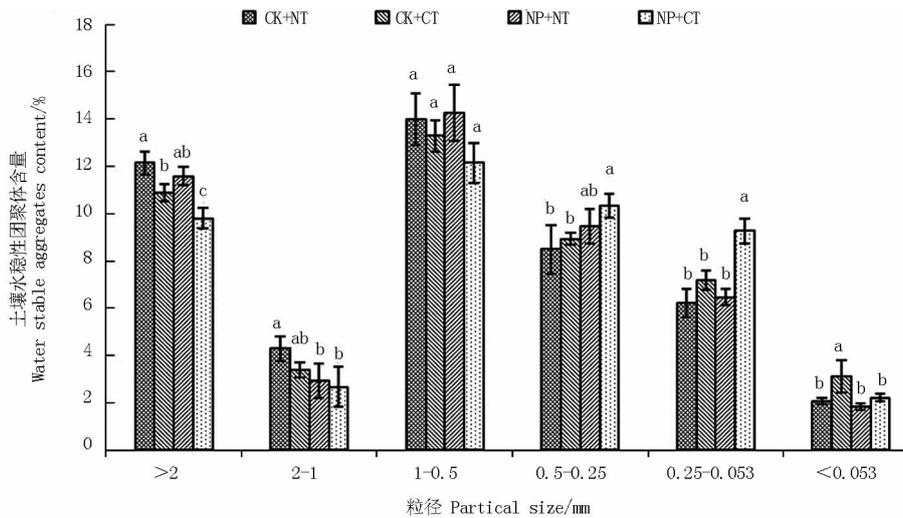


图 1 免耕和传统耕作下土壤水稳性团聚体含量的变化

Fig. 1 Water stable aggregates content under no-tillage and traditional tillage systems

MWD 和 GMD 是评价土壤团聚体稳定性的指标。MWD 和 GMD 值越大表明土壤水稳性团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[20]。如表 1 所示,2 种施肥处理下 MWD 和 GMD 值均表现为免耕显著高于传统耕作,说明免耕有助于提高土壤水稳性团聚体的稳定性。而在不同耕作措施下,施肥对 MWD 和 GMD 值的影响存在差异。在免耕试验中施肥对 MWD 和 GMD 均无显著影响,但在传统耕作试验中 MWD 和 GMD 值均表现为 CK 显著高于 NP,说明单施化肥不利于水稳定性土壤团聚体的稳定性。综合施肥和耕作对土壤水稳性团聚体的影响,可以归纳为土壤水稳性团聚体的稳定性表现为 CK + NT > NP + NT > CK + CT > NP + CT。

方差分析结果显示,耕作和施肥对评价土壤水稳性团聚体稳定性的 3 个指标均具有显著的影响

($P < 0.05$), 其中耕作对 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量、MWD 和 GWD 变异的贡献要大于施肥,即与施肥相比,耕作是影响土壤水稳性团聚体稳定性的一个重要因素。耕作和施肥对上述 3 个指标均没有表现出显著的交互作用(表 2)。

表 1 耕作和施肥对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

Table 1 Effects of tillage practices and fertilization on the stability of water stable aggregates

处理 Treatments	>0.25mm /%	MWD /mm	GWD /mm
CK + NT	38.91a	0.900a	0.654a
NP + NT	38.23ab	0.848ab	0.627a
CK + CT	36.48b	0.819b	0.569b
NP + CT	34.27c	0.708c	0.495c

表 2 耕作和施肥对土壤水稳性团聚体稳定性影响的方差分析

Table 2 Anova test to effect of tillage practices and fertilization on stability of water stable aggregates

项目 Items	误差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F	Sig.
>0.25 mm	施肥	6.992	1	6.992	7.295	0.027
	耕作	32.21	1	32.21	33.605	0.000
	施肥×耕作	2.151	1	2.151	2.244	0.173
WMD	施肥	0.020	1	0.020	25.034	0.001
	耕作	0.037	1	0.037	45.803	0.000
	施肥×耕作	0.003	1	0.003	3.193	0.112
GWD	施肥	0.008	1	0.008	11.274	0.010
	耕作	0.035	1	0.035	50.913	0.000
	施肥×耕作	0.002	1	0.002	2.377	0.162

2.2 对土壤容重和总孔隙度的影响

耕作和施肥对土壤的容重和孔隙度具有一定影响(表3)。免耕处理下土壤的容重有随土层深度增加而逐渐降低的趋势,这主要是由于免耕试验表层土壤扰动少,加上土粒自身的沉实作用所致^[14];而传统耕作下容重则表现为随着土层深度的增加而增加,说明耕作是减小土壤容重的一项重要措施。不同耕作方式下表层(0~10 cm)土壤差异较大,与传统耕作相比,免耕0~10 cm 土层土壤容重增加了10.32%。而10~20 cm 土层土壤容重差异较小,在0.92~0.95 g·cm⁻³之间波动,各处理间差异不显著。化肥的施用显著增加了免耕表层土壤的容重,平均增加了8.63%。方差分析结果显示耕作和施肥对0~10 cm 土层土壤容重的影响均达到了显著性差异($P < 0.05$),同时耕作和施肥的交互作用也达到了显著性差异(表4)。均方差值的大小表示了各因素引起的变异程度,所以由表4可知,耕作和施肥对0~10 cm 土层土壤容重变异影响的顺序为:耕作>耕作与施肥的交互作用>施肥。耕作和施肥对0~20 cm 土层土壤容重的影响没有达到 $P < 0.05$ 的显著水平,同时二者的交互作用也不显著。

土壤总孔隙度是反映土壤紧实状况的一个重要指标。免耕土壤总孔隙度有随土层深度增加而增加的变化趋势,而传统耕作的土壤总孔隙度则表现为随土层深度的增加而减小,化肥的施用显著减少了免耕表层土壤总孔隙度,但对传统耕作表层土壤总孔隙度无显著影响(表3)。耕作措施对0~

10 cm 土层土壤总孔隙度影响较大,与传统耕作相比,免耕减少了5.6%,而对10~20 cm 土层土壤的总孔隙度影响较小,不同处理土壤总孔隙度在64.04%~65.11%之间波动。方差分析结果显示免耕显著地减小了0~10 cm 土层土壤的总孔隙度($P < 0.05$),而施肥对0~10 cm 土层土壤总孔隙度影响的差异不显著,耕作和施肥的交互作用没有达到显著性差异($P = 0.107$),对0~10 cm 土层总孔隙度变异影响的顺序为:耕作>耕作与施肥的交互作用=施肥。耕作和施肥对10~20 cm 土层土壤总孔隙度的影响没有达到 $P < 0.05$ 的显著水平,同时二者的交互作用也不显著。

表 3 耕作和施肥对土壤容重和总孔隙度的影响

Table 3 Effects of tillage practices and fertilization on soil bulk density and total porosity

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatments	容重 Bulk density/g·cm ⁻³	总孔隙度 Total porosity/%
0-10	CK + NT	0.9550b	63.96b
	CK + CT	0.9128c	65.55a
	NP + NT	1.0374a	60.85c
	NP + CT	0.8933c	66.29a
10-20	CK + NT	0.9246a	65.11a
	CK + CT	0.9523a	64.06a
	NP + NT	0.9439a	64.38a
	NP + CT	0.9439a	64.38a

表4 耕作和施肥对0~10 cm 土层土壤容重和孔隙度影响的方差分析

Table 4 Anova test to the effects of tillage practice and fertilization on soil bulk density and total porosity in 0-10 cm soil depth

项目	误差来源	平方和	自由度	均方	F	Sig.
Items	Source	Sum of squares	DF	Mean square		
容重 Bulkdensity	施肥	0.003	1	0.003	6.79	0.035
	耕作	0.023	1	0.023	59.567	0.000
	施肥×耕作	0.007	1	0.007	17.828	0.004
总孔隙度 Total porosity	施肥	0.001	1	0.001	3.923	0.088
	耕作	0.002	1	0.002	15.178	0.006
	施肥×耕作	0.001	1	0.001	3.428	0.107

2.3 对土壤水分特征常数的影响

不同的耕作方式和施肥管理对土壤的毛管含水量具有不同的影响(表5)。免耕处理下土壤的毛管含水量有随土层深度增加而增加的趋势,与0~10 cm土层相比,10~20 cm 土层土壤的毛管含水量增加了5.94%,同时化肥的施入显著减少了其0~10 cm 的毛管含水量。在传统耕作方式中毛管含水量表现出相似的变化趋势。10~20 cm 土层中,各处理间毛管含水量差异较小,其值在42.01%~43.10%之间波动。方差分析结果显示施肥对0~10 cm 土层毛管含水量的影响达到了显著性差异($P=0.03$),而耕作和二者之间的交互作用不明显($P=0.743$, $P=0.390$)(表6),耕作和施肥对0~10 cm土层土壤毛管含水量变异影响的顺序为:施肥>耕作与施肥的交互作用>耕作。耕作和施肥对10~20 cm土层土壤毛管含水量的影响均没有达到显著性差异,同时二者之间的交互作用也不显著。

土壤的饱和含水量反映了土壤的最大持水能力,耕作对土壤的饱和含水量产生了一定的影响。在免耕条件下饱和含水量有随着土壤深度增加而增加的趋势,而传统耕作条件下则表现为随土层深度的增加而减小。0~10 cm 土层的土壤饱和含水量

受耕作措施的影响较大,与免耕相比,传统耕作的饱和含水量增加了9.72%,而10~20 cm 土层土壤的饱和含水量则变化相对较小。方差分析结果显示耕作措施显著地影响了0~10 cm 土层土壤的饱和含水量($P=0.006$)(表5),而施肥和耕作之间的交互作用的影响则不显著(表6)。耕作和施肥对0~10 cm 土层土壤饱和含水量变异影响的顺序为:耕作>耕作与施肥的交互作用>施肥,而它们对10~20 cm 土层土壤饱和含水量的影响均没有达到显著性的差异,同时二者之间的交互作用也不显著。

免耕处理下土壤田间持水量有随土层深度增加而降低的趋势,传统耕作土壤田间持水量则有随土层深度增加而增加的趋势(表5)。不同耕作措施对0~10 cm 土层土壤田间持水量影响较大,与传统耕作相比,免耕提高了12.64%。10~20 cm 土层中,各处理间的田间持水量差异较小,在26.89%~27.56%之间波动。方差分析结果显示耕作对0~10 cm 土层土壤田间持水量的影响达到显著性差异($P=0.001$),而施肥和耕作之间的交互作用的影响则不显著(表6),耕作和施肥对0~10 cm 土层土壤毛管含水量影响的顺序为:耕作>耕作与施肥的交互作用>施肥。耕作和施肥对10~20 cm 土层土壤

表5 耕作和施肥对土壤水分特征常数的影响

Table 5 Effects of tillage practices and fertilization on soil moisture characteristic constants

土层深度	处理	毛管含水量	饱和含水量	田间持水量
Soil depth/cm	Treatments	Capillary water content/%	Saturated water content/%	Field capacity/%
0-10	CK + NT	41.75a	48.67bc	28.78a
	CK + CT	41.15ab	52.91a	26.35b
	NP + NT	37.96b	47.04c	30.50a
	NP + CT	39.27ab	52.18ab	26.28b
10-20	CK + NT	42.43a	50.70a	26.89a
	CK + CT	43.10a	51.02a	26.52a
	NP + NT	42.01a	49.89a	27.56a
	NP + CT	42.15a	52.15a	27.24a

表 6 耕作和施肥对 0~10 cm 土层土壤水分特征常数影响的方差分析

Table 6 Anova test to effects of tillage practices and fertilization on soil moisture characteristic constants

项目 Items	误差来源 Source	平方和 Sum of Squares	自由度 DF	均方 Mean Square	F	Sig.
毛管含水量 Capillary water content	施肥	21.508	1	21.508	7.402	0.03
	耕作	0.339	1	0.339	0.117	0.743
	施肥 × 耕作	2.441	1	2.441	0.84	0.39
饱和含水量 Saturated water content	施肥	3.656	1	3.656	0.972	0.357
	耕作	58.761	1	58.761	15.625	0.006
	施肥 × 耕作	0.534	1	0.534	0.142	0.717
田间持水量 Field capacity	施肥	1.797	1	1.797	1.564	0.251
	耕作	29.408	1	29.408	25.598	0.001
	施肥 × 耕作	2.132	1	2.132	1.856	0.215

田间持水量的影响均没有达到显著性的差异,同时二者之间的交互作用也不显著。

2.4 对大豆收获后土壤剖面含水量的影响

试验各处理土壤含水量均表现出随着土层深度的增加而增加的趋势,但是由于耕作和施肥的影响,各处理间表现出一定的差异。免耕减小了大豆收获以后 0~10 cm 土层土壤的含水量,与传统耕作相比减小了 31.00%。但是 20~70 cm 土层则表现为免耕处理的土壤含水量要高于传统耕作的土壤含水量,20~70 cm 总的土壤含水量增加了 7.40%,说明在研究区域无论是否施肥,短期的免耕处理均能够增加较深层土体的土壤含水量。

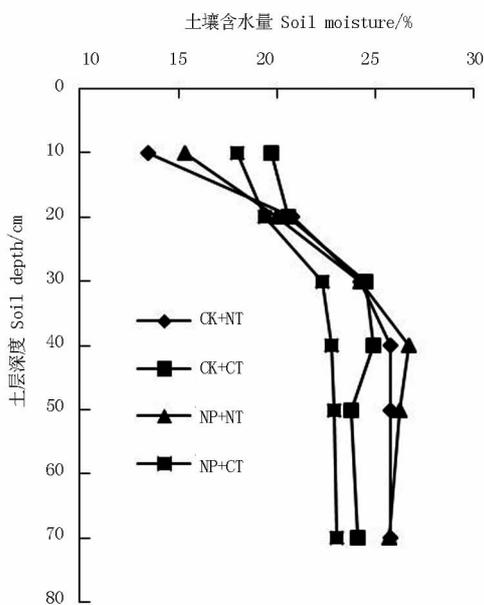


图 2 免耕和传统耕作对剖面土壤含水量的影响

Fig. 2 Effect of no-tillage and traditional tillage on water content in soil profile

3 结论与讨论

免耕虽然能够增加 0~10 cm 土层土壤容重、降低土壤总孔隙度、饱和含水量和毛管含水量等,但是其能够有效地提高 0~20 cm 土壤水稳定性大团聚体的含量及其稳定性,对维持良好的土壤水肥气热状态,改善土壤结构,提高土壤质量有重要的作用。对于整个土壤剖面而言,免耕能够提高秋季收获后深层土壤含水量,有效的提高土壤的保水蓄水能力。一直以来关于单施化肥对土壤物理、生物和化学性质的负面报道较多,该文也有类似结果。如在传统耕作试验中,化肥的施用减少了 >0.25 mm 水稳定性大团聚体含量,同时 MWD 和 GMD 值均表现为施用化肥的处理显著低于无肥处理,这可能与长期单施化肥导致土壤物理性质恶化,不利于土壤形成稳定的大团聚体有关。在免耕的情况下表现出了相似的变化趋势。

耕作和施肥是影响土壤水分物理性质的 2 个重要因素,方差分析结果得到耕作对土壤水稳性团聚体稳定性的影响要大于施肥,同时二者之间的交互作用不明显。而分析 0~10 cm 土层土壤容重显示耕作和施肥对该层土壤容重的交互作用明显。除了 0~10 cm 土层土壤毛管含水量以外,耕作对土壤水分物理性质的影响要大于施肥。因此,在研究区内耕作是调控土壤水分物理性质的一项重要措施。

参考文献

- [1] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708. (Gao W S. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702-2708.)
- [2] Zhou H, Lv Y Z, Y Z C, et al. Influence of conservation tillage on

- soil aggregates features in north China plain[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1099-1106.
- [3] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析—保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1914-1924. (Xie R Z, Li S K, Li X J, et al. The analysis of conservation tillage in China—Conservation tillage and crop production: Reviewing the evidence[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1914-1924.)
- [4] 汤秋香, 谢瑞芝, 章建新, 等. 典型生态区保护性耕作主体模式及影响农户采用的因子分析[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 469-477. (Tang Q X, Xie R Z, Zhang J X, et al. Analysis of conservation tillage pattern and the factors influencing farmers adoption in typical ecological region in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 469-477.)
- [5] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99-104. (Yu H Y, Peng W Y, Ma X, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99-104.)
- [6] 高旺盛, 秦红灵, 赵沛义. 内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 122-125. (Gao W S, Qin H L, Zhao P Y. The effects of different planting modes on wind erosion from cropland in arid region of north of Yin Mountain of Inner Mongolia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 122-125.)
- [7] 奚振邦. 化肥与农业—简析化肥对现代农业的作用[J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(2): 5-10. (Xi Z B. Fertilizer and agriculture—a brief review on the effect of fertilizer on modern agriculture[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(2): 5-10.)
- [8] 胡雪峰, 王效举. 农业生产与土壤变化[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1998, 7(1): 64-67. (Hu X F, Wang X J. Agriculture and soil changes[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, 7(1): 64-67.)
- [9] 郑子成, 李廷轩, 何淑勤, 等. 保护地土壤生态问题及其防治措施的研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 18-20. (Zheng Z C, Li T X, He S Q, et al. Research of ecological problems and countermeasures on the soil of greenhouse[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 18-20.)
- [10] 杨果, 张英鹏, 魏建林, 等. 长期施用化肥对山东三大土类土壤物理性质的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(12): 244-250. (Yang G, Zhang Y P, Wei J L, et al. Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of three soils in Shandong province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 244-250.)
- [11] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态平衡特征研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(4): 252-255. (Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Research of feature of the dynamic balance on the soil moisture in farmland of black soil in Hailun district[J]. *System Science and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(4): 252-255.)
- [12] 邹文秀, 韩晓增, 王守宇, 等. 长期施肥对大豆地土壤蒸发和水分利用效率的影响[J]. *大豆科学*, 2009, 23(3): 487-490, 494. (Zou W X, Han X Z, Wang S Y, et al. Effect of long-term fertilization on soil evaporation and water use efficiency in soybean field [J]. *Soybean Science*, 2009, 23(3): 487-490, 494.)
- [13] 张晓平, 方华军, 杨学明, 等. 免耕对黑土春夏季节温度和水分的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 313-316. (Zhang X P, Fang H J, Yang X M, et al. Effects of no-tillage practices on temperature and moisture of a black soil in the spring and early summer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 313-316.)
- [14] 于同艳, 张兴义. 耕作措施对黑土农田耕层水分的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(3): 121-124. (Yu T Y, Zhang X Y. Effects of different soil tillage systems on soil water in the black farmland [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(3): 121-124.)
- [15] 王凤, 李海波, 韩晓增, 等. 黑土水稳性团聚体测定方法研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(2): 138-140, 145. (Wang F, Li H B, Han X Z, et al. Study on the method of measuring wet aggregate in black soil [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23(2): 138-140, 145.)
- [16] Li H B, Han X Z, Wang F, et al. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38: 1673-1690.
- [17] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [18] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution [J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1956, 20: 151-153.
- [19] Six J, Paustian K, Elliot E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689.
- [20] 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. (Zhou H, Lv Y Z, Yang Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979.)