

长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响

杨颖楠^{1,2}, 黄明斌²

(1.西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学
水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探讨不同施肥处理对土壤主要水力性质的影响及随深度的变化,为制定科学的施肥方案提供理论依据,进而促进农业的可持续发展。[方法] 以黄土高原地区 36 a 的长期施肥定位试验为依据,选取 4 个施肥处理:不施肥对照处理、单施化肥(氮磷配施)、单施有机肥和化肥有机肥配施,通过测定土壤有机质含量、容重、孔隙度、水分参数等来评价土壤性质的变化。[结果] ① 与不施肥和单施化肥相比,化肥有机肥配施和单施有机肥显著提高了表层(0—20 cm)土壤有机质含量,30—40 cm 土层各处理间无显著差异。② 与不施肥、单施有机肥和化肥有机肥配施相比,单施化肥显著降低了表层(0—20 cm)土壤孔隙度;③ 各施肥处理均对土壤持水性能有所改善,其中化肥有机肥配施效果最佳;④ 化肥有机肥配施显著提高了 0—10、10—20、20—30 cm 土层土壤饱和导水率。[结论] 化肥有机肥配施可以改善表层土壤物理性质,提高表层土壤持水性能,增强土壤结构的稳定性,而长期单施化肥会导致表层土壤板结,不利于作物生长。

关键词: 黄土高原; 长期施肥; 土壤水力性质; 土壤持水性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0056-07

中图分类号: S157.4⁺1, S152

文献参数: 杨颖楠, 黄明斌.长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(1):56-62.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.008; Yang Yingnan, Huang Mingbin. Effects of different long-term fertilization treatments on soil hydraulic properties and their changes with depth [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):56-62.

Effects of Different Long-term Fertilization Treatments on Soil Hydraulic Properties and Their Changes with Depth

Yang Yingnan^{1,2}, Huang Mingbin²

(1.College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of different fertilization treatments on soil hydraulic properties and their changes with depth were analyzed in order to provide a theoretical basis for formulating scientific fertilization programs, and to promote the sustainable development of agriculture. [Methods] Based on a 36-year long-term fertilization experiment in the Loess Plateau, four fertilization treatments were selected, including no fertilization (CK), fertilization with nitrogen and phosphorus (NP), fertilization with manure (M), and fertilization with nitrogen, phosphorus, and manure (NPM). Changes in soil properties were evaluated by measuring soil organic matter content, bulk density, porosity, and moisture parameters. [Results] ① NPM and M significantly increased organic matter content in the 0—20 cm soil layer compared with CK and NP, but there were no significant differences in the 30—40 cm soil layer; ② NP significantly reduced soil porosity of the 0—20 cm soil layer compared with CK, M, and NPM; ③ All fertilization treatments significantly increased field capacity and available water holding in the 0—20 cm soil layer compared with CK, and NPM had the greatest effect; ④ NPM significantly increased the saturated hydraulic conductivity of the 0—10, 10—20, and 20—30 cm soil layers. [Conclusion] The combined application of organic and chemical fertilizers

收稿日期:2021-08-19

修回日期:2021-10-19

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题“黄土高原植被—水相互关系及对气候变化响应过程”(XDB40020202)

第一作者:杨颖楠(1997—),女(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,主要研究方向为土壤物理。Email:18821670730@163.com。

通信作者:黄明斌(1968—),男(汉族),湖北省荆门市人,博士,研究员,主要从事生态水文和土壤物理研究。Email:hmbd@nwsuaf.edu.cn。

can improve physical properties and increase available water holding capacity of the surface soil, while the application of chemical fertilizers will cause the surface soil to compact, resulting in unfavorable conditions for crop growth.

Keywords: Loess Plateau; long-term fertilizer test; soil hydraulic property; soil water retention

土壤质量是农业生产的物质基础,土壤水力性质是土壤质量的重要组成部分^[1]。土壤水力学性质决定了土壤保持水分和传导水分的能力,是维持农业可持续发展的关键因素。肥料的使用可以改善土壤的某些理化性质,提高水分利用效率,但长期不合理的化肥施用会导致区域土壤质量明显退化,严重影响农作物产量。近年来,有机肥与化肥配施是农业研究的主要方向,配施有机肥能够提高土壤贮水能力和水分利用效率,促进作物生长发育、增加了有机物的归还量,进而改善了土壤物理性质^[2-3]。但过量的化肥使用会导致土壤板结^[4]、破坏土壤结构的稳定性^[5],同时过量的氮、磷肥会随地表径流、地下径流和深层渗漏污染地表水和地下水^[6]。

由于施肥试验时间长短不一样、施肥水平不同、试验条件和研究作物差异,以及气候和土壤不同,不同研究者取得试验结果不完全一致。对栗褐土^[1]、潮土^[7]、红壤^[5]的研究发现,长期施用化肥破坏了土壤结构的稳定性,土壤孔隙度降低,导致土壤物理性质恶化;与单施化肥相比,施有机肥能改善土壤总孔隙度、土壤有效水含量、透水性、饱和导水率,同时提高土壤持水性。马俊永等^[8]的施肥试验表明,有机肥和无机肥混合施用可以使土壤的容重得到明显的降低,不仅提高了土壤孔隙度和毛管孔隙的数量,还改善了土壤的物理环境,土壤有效持水容量和田间最大持水量也得到了提高。但也有不同研究发现,长期单独施用化肥并非造成土壤板结的主要原因^[9],而施有机肥没有提高甚至会降低土壤饱和导水率^[10]。另外,不同深度土壤水力性质受施肥影响存在差异,目前这方面的研究报道还很少。

为此,本研究以黄土高原地区 1984—2020 年的长期施肥定位试验为依据,探讨不同施肥处理对土壤主要水力性质的影响及其随深度的变化,以期制定科学的施肥方案提供科学依据,进而促进农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省长武县十里铺塬面旱地(35°14'N,107°40'E),该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,是典型的渭北旱塬旱作农业区,农作物以一年

一熟小麦和玉米为主^[11]。试验区平均海拔 1 200 m,日照时数 2 226 h,年均气温 9.1 °C,1 月平均气温 -4.7 °C,7 月平均气温 22.1 °C。年均降雨量 578.5 mm,年际变异较大,季节性分布不均,7—9 月降水量占全年降水总量的 55% 以上。长期定位施肥试验于 1984 年开始,试验地土壤属黄盖粘黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松。土壤容重 1.23~1.44 g/cm³,孔隙度 50% 左右,通透性好,肥力中等^[12-13]。耕层土壤的平均有机质含量为 6.89 g/kg,平均全氮含量为 0.99 g/kg,全磷含量为 1.01 mg/kg^[14-15]。

1.2 试验设计

通过试验区多年田间定位试验,试验选取 4 个施肥处理,分别为:CK(不施肥对照处理),NP(氮磷配施, N 120 kg/hm², P 26.4 kg/hm²),M(单施有机肥,有机肥 75 t/hm²),NPM(氮磷有机肥配施, N 120 kg/hm², P 26.4 kg/hm²,有机肥 75 t/hm²)。氮素化肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,有机肥为厩肥,有机质含量 106 g/kg,全氮含量 2.65 g/kg,速效磷含量 0.11 g/kg。所有肥料于作物播种前一次撒施地表,翻入土中,田间管理同大田。

1.3 样品采集与测定

试验样品采集于 2020 年 11 月,试验采用随机区组设计,每个处理设 3 次重复,共 12 个小区。由于施肥仅影响耕层土壤物理性质^[16],每个小区采样深度仅限于耕层和犁底层深度。每个小区随机选一点用土钻取 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 的扰动土样,装入自封袋,填写标签,带回室内处理,用于测定土壤机械组成和有机质含量。同时,各土层容重、田间持水量和水分特征曲线采用原状土壤样品测定^[17]。

土壤容重采用环刀法测定^[18]。土壤总孔隙度由公式 $p = 1 - (\text{土壤容重} / \text{土壤密度})$ 计算得出,土壤密度取 2.65 g/cm³^[19]。田间持水量(FC)用沙吸法测定^[20]。土壤水分特征曲线用离心法^[21],取 1 500 kPa 水吸力值下的土壤含水量作为土壤凋萎系数。有效持水容量(AWHC)为田间持水量与凋萎系数的差值^[22]。土壤颗粒组成采用吸管法测定^[23],各层砂粒(粒径 0.02~2 mm)、粉粒(粒径 0.02~0.002 mm)、黏粒(粒径 < 0.002 mm)含量见表 1。

表 1 黄土高原地区不同施肥处理各土层土壤颗粒组成

%

处理	0—10 cm 土层土壤颗粒组成			10—20 cm 土层土壤颗粒组成			20—30 cm 土层土壤颗粒组成			30—40 cm 土层土壤颗粒组成		
	黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒
CK	23.94	32.58	43.48	23.03	32.57	44.40	25.34	33.28	41.38	31.33	23.17	45.50
NP	23.01	33.63	43.36	24.26	29.67	46.07	22.83	32.74	44.43	26.63	26.06	47.31
M	23.45	34.06	42.49	23.56	34.45	41.99	20.45	35.82	43.73	25.56	36.73	37.71
NPM	22.01	33.86	44.13	22.96	30.68	46.36	22.92	31.69	45.39	24.56	30.36	45.08

注:CK, NP, M, NPM 为不同处理,具体含义见 1.2 试验设计部分。下同。

1.4 饱和导水率计算

2001 年, Suleiman 等^[24]提出了使用土壤有效孔隙度估算饱和导水率(K_s)的相对有效孔隙度模型(REPM)。经过多个经验模型比较结果表明^[25-26], REPM 是估算 K_s 的简单可靠经验方法,因此本研究借助该模型对土壤饱和导水率进行估算。其表达式如下:

$$K_s = 75 \times \varphi_{er}^2 \quad (1)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率(cm/d); φ_{er} 为相对有效孔隙度,可以通过有效孔隙度(φ_e)与 FC(田间持水量)的比值计算:

$$\varphi_{er} = \frac{\varphi_e}{FC} = \frac{P - FC}{FC} \quad (2)$$

式中: P 为总孔隙度。

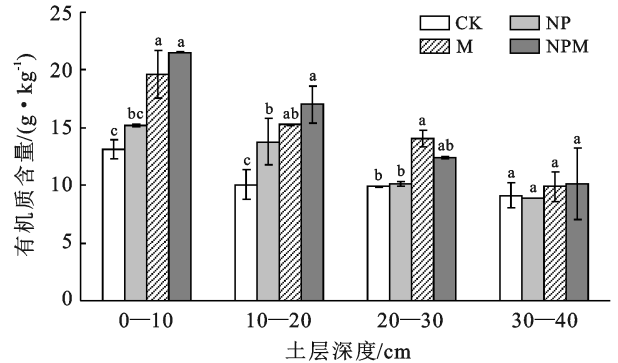
1.5 数据分析

采用 Excel 2018 及 SPSS(24.0)软件对数据进行统计分析,采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较,检验不同处理间在 $p < 0.05$ 的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤有机质的影响

不同施肥处理表层土壤有机质含量的差异及其随深度的变化如图 1 所示。由图 1 可知,不同施肥处理会影响到表层 0—30 cm 有机质含量。在 0—10 cm 土层, M 和 NPM 处理显著提高了土壤有机质含量,而 NP 和 CK 处理之间的土壤有机质含量无显著差异;相对于 CK 和 NP 处理, M 处理的土壤有机质含量分别提高了 50.1% 和 29.3%, NPM 处理有机质含量分别提高了 64.3% 和 41.63%。在 10—20 cm 土层, NP, M 和 NPM 处理均显著提高了土壤有机质含量,较 CK 处理分别提高了 36.8%, 51.7% 和 68.9%;其中, NPM 处理土壤有机质含量显著高于 NP 处理,提高了 23.5%。在 20—30 cm 土层,仅 M 处理显著提高了土壤有机质含量,CK 和 NP, NPM 处理间无显著差异。



注:不同小写字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平差异显著。下同。

图 1 黄土高原地区不同施肥处理各层土壤有机质含量

2.2 不同施肥处理对土壤容重和总孔隙度的影响

由图 2 可知,各处理的土壤容重均随着土层深度增加而增加。在 0—10 cm 土层,较 NP 处理, NPM 处理的土壤容重显著降低了 7.2%。在 10—20 cm 土层, NP 处理土壤容重显著增加,较 CK, M, NPM 处理分别增加了 4.4%, 7.4%, 8.2%。在 20—40 cm 土层,各处理间无显著差异。

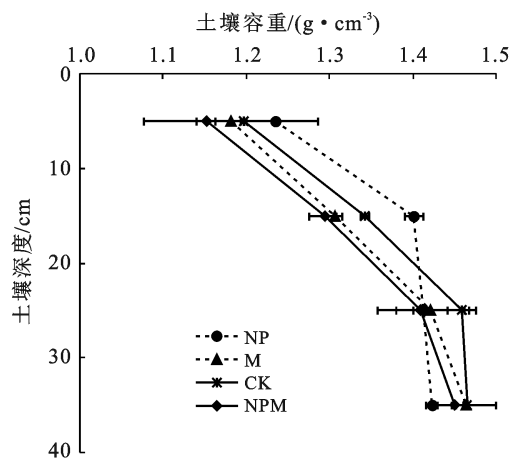


图 2 黄土高原地区不同施肥处理下各土层土壤容重

不同施肥处理表层土壤总孔隙度的差异及其随深度的变化如图 3 所示。由图 3 可知,不同施肥处理仅影响到表层 0—20 cm 总孔隙度,不同施肥处理 20—40 cm 土层土壤总孔隙度无显著差异。在 0—10 cm 土层, NPM 处理显著提高了土壤总孔隙度,相对于 CK, NP

和 M 处理,土壤总孔隙度分别提高了 2.7%,5.1% 和 1.8%;而 CK,NP 和 M 处理之间土壤总孔隙度差异不显著。在 10—20 cm 土层,NP 处理显著降低了土壤总孔隙度,而 CK,M 和 NPM 处理间土壤总孔隙度无显著差异,相对于 CK,M 和 NPM 处理,NP 处理导致土壤总孔隙度分别降低了 3.9%,6.2% 和 6.9%。通过相关性分析表明,土壤孔隙度大小和有机质含量呈极显著正相关关系(图 4),随着土壤有机质含量的增加,土壤总孔隙度线性增加。

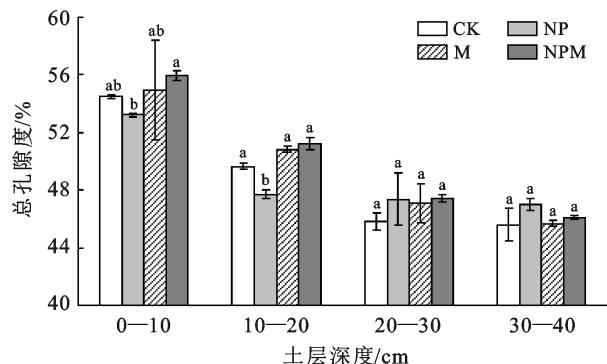


图 3 黄土高原地区不同施肥处理下各土层土壤总孔隙度

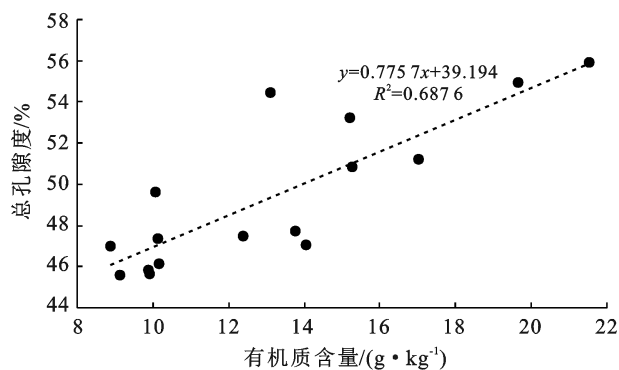


图 4 黄土高原地区土壤有机质含量与土壤孔隙度的相关性

2.3 不同施肥处理对表层土壤田间持水量和有效持水容量的影响

图 5 为不同施肥处理表层土壤田间持水量的差异及其随深度的变化。由图 5 可知,不同施肥处理会影响表层 0—30 cm 田间持水量,30—40 cm 土层土壤田间持水量无显著差异。在 0—10 cm 土层,NPM 处理显著提高了土壤田间持水量,相对于 CK,NP 和 M 处理,土壤田间持水量分别提高了 22.4%,21.3%,17.2%;CK,NP 和 M 处理之间土壤田间持水量无显著差异。在 10—20 cm 土层,NPM 处理较 CK,NP,M 处理田间持水量分别显著提高了 24.4%,23.0%,23.8%,CK,NP 和 M 处理之间田间持水量仍无显著差异。而在 20—30 cm 土层,相对于 CK 处理,NPM

处理显著提高了田间持水量,NP,M 和 CK 处理之间土壤田间持水量差异不显著。

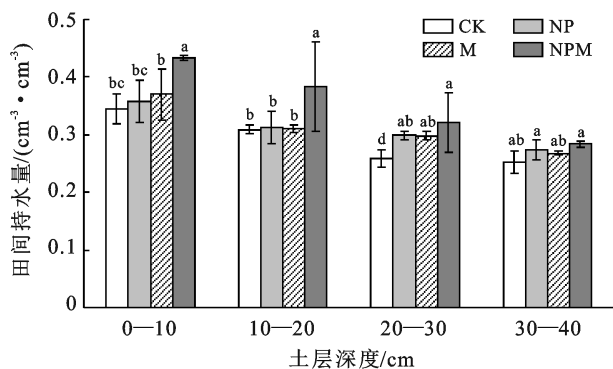


图 5 黄土高原地区不同施肥处理各土层土壤田间持水量

CK,NP,M,NPM 4 种处理在土壤表层 0—40 cm 的有效持水容量分别为 16.7,19.4,21.2,23.9 mm,相对于 CK 处理,NP,M 和 NPM 处理都显著提高了表层土壤有效持水容量。图 6 为不同施肥处理表层土壤有效持水容量的差异及其随深度的变化,不同施肥处理对表层 0—30 cm 土层土壤有效持水容量有显著影响,30—40 cm 土层各处理间无显著差异。在 0—10 cm 土层,CK,NP 和 M 处理间土壤有效持水容量无显著差异,而 NPM 处理显著提高了土壤有效持水容量,较 CK,NP 和 M 处理分别提高了 37.1%,25.2% 和 17.0%。类似于 0—10 cm 土层,在 10—20 cm 土层也只有 NPM 处理显著提高了土壤有效持水容量,相对于 CK,NP 和 M 处理,NPM 处理土壤有效持水容量分别提高了 46.5%,42.6%,34.6%。在 20—30 cm 土层,NP,M 与 NPM 处理之间土壤有效持水容量无显著差异,但较 CK 处理分别显著提高了土壤有效持水容量 36.8%,47.3% 和 50.2%。

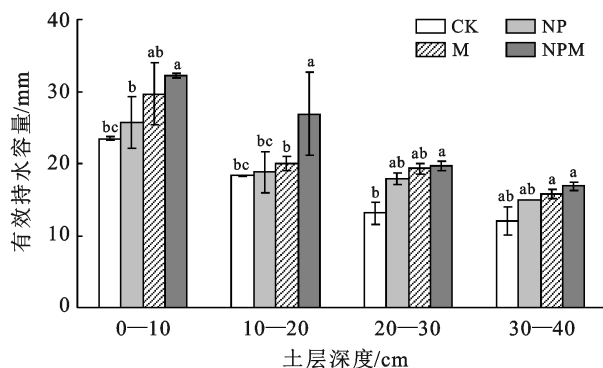


图 6 黄土高原地区不同施肥处理各土层土壤有效持水容量

2.4 不同施肥处理对土壤饱和和导水率的影响

由表 2 可知,不同施肥处理对各土层土壤饱和和导水率有显著影响。在整个土壤剖面(0—40 cm),NPM 处理较 CK 和 M 处理显著提高了土壤饱和和

水率。在 0—10 cm 土层, NPM 处理显著提高了土壤饱和导水率, 相对于 CK, NP 和 M 处理, 土壤饱和导水率分别提高了 8.7%, 7.1%, 6.6%; CK, NP 和 M 处理之间土壤饱和导水率无显著差异。在 10—20 cm 土层, 相对于 CK 处理, NPM 处理的土壤饱和导水率显著提高了 6.6%, M 处理显著降低了 7.1%; NP 和 CK 处理间的饱和导水率无显著差异。在 20—30 cm

土层, NP 和 NPM 处理显著提高了土壤饱和导水率, 相对于 CK 处理分别提高了 17.7% 和 21.3%; 而 M 和 CK 处理间的土壤饱和导水率无显著差异。在 30—40 cm 土层, NP 处理显著提高了土壤饱和导水率, 相对于 CK 和 M 处理, 土壤饱和导水率分别提高了 12.4% 和 9.2%; CK, M 和 NPM 处理之间土壤饱和导水率差异不显著。

表 2 黄土高原地区不同施肥处理各土层土壤饱和导水率

处理	不同施肥处理各土层土壤饱和导水率/(cm · h ⁻¹)				
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	均值
CK	2.08±0.01 ^b	1.98±0.07 ^b	1.64±0.08 ^b	1.69±0.09 ^b	1.85±0.20 ^b
NP	2.11±0.06 ^b	1.91±0.06 ^{bc}	1.93±0.03 ^a	1.90±0.03 ^a	1.96±0.10 ^{ab}
M	2.12±0.10 ^b	1.84±0.08 ^c	1.74±0.06 ^b	1.74±0.02 ^b	1.86±0.17 ^b
NPM	2.26±0.02 ^a	2.11±0.11 ^a	1.99±0.07 ^a	1.81±0.03 ^{ab}	2.04±0.18 ^a

注: 同列数据后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

长期不同施肥措施影响土壤性质, 本研究选取有机质含量、土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分参数等来评价土壤性质的变化。

有机质是改善土壤结构的主要物质, 它通过降低土壤容重和提升土壤孔隙度显著改变土壤功能^[19]。目前, 国内学者已有不少关于施肥对土壤有机质含量影响的研究。对黑土^[27]、红壤、灰漠土、垆土、潮土、褐土^[28]长期耕作施肥后研究发现, 施用有机肥或有机肥配施化肥, 土壤有机质含量显著增加, 而长期施用化肥的土壤有机质含量与供试前相比差异不显著。本研究结果表明, M 和 NPM 处理均能显著提高表层土壤有机质含量, NP 与 CK 处理之间差异不显著, 这与柳影等^[29]报道土壤有机质含量主要受施用有机肥数量和质量的影响的结论相一致。

土壤容重是反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力高低的重要指标, 对土壤水、气、热状况和作物根系生长有着直接的影响。土壤容重与土壤孔隙度呈显著负相关, 土壤容重越小, 土壤孔隙度越大, 说明土壤结构、透气透水性能越好。大量研究结果表明, 长期不施肥的土壤, 耕层结构致密, 孔隙发育很少, 土壤微结构较差; 单施化肥, 土壤颗粒未形成结构体, 孔隙少; 施用有机肥或有机无机肥配施, 土壤粗颗粒数量显著增加, 结构疏松, 而且孔隙量大^[30]。本研究结果表明, M 和 NPM 处理均在一定程度上降低了表层土壤容重, 提高了表层土壤孔隙度; 同时, 土壤孔隙度与有机质含量呈显著正相关, 这与施肥对壤土^[31]、潮土^[8]和砂姜黑土^[32]的影响研究结果一致。说明施加有机肥分解形成的有机质可以疏松土壤、增

大孔隙度, 降低土壤容重, 有效改善表层土壤物理结构, 提高土壤有效养分, 有利于土壤保水保肥^[33]。而 NP 处理增加了表层土壤容重, 10—20 cm 土层较 CK 处理显著增加 4.4%, 土壤孔隙度显著降低 6.9%, 土壤有硬化趋向, 可能是由于长期偏施无机肥, 农田土壤磷素过高, 破坏了土壤结构的稳定性, 致使土壤板结, 影响冬小麦根系生长和水分和养分吸收。这与王改兰等^[1]长期不施肥或单独施用化肥, 土壤容重趋劣的结论相一致, 但部分研究发现长期施用化肥会降低表层土壤容重、增加土壤孔隙度^[10], 这可能与研究区地形、土壤性质和施肥水平等不同有关, 具体机理需要进一步的研究。不同施肥处理对 20—40 cm 土壤的孔隙度无显著影响, 可能是有机肥分解形成的有机质只对表层土壤产生了一定的影响, 而对下层土壤影响不显著的缘故^[9]。

土壤田间持水量和土壤有效持水容量与土壤质地、结构有关, 可以反映土壤蓄水、保水和供水性能的优劣, 也能间接地反映出土壤中孔隙的分布。一般来说, 土壤有机质含量越高^[34], 土壤孔隙度越大, 土壤通气透水性越好, 土壤涵养水源能力和保持水土的功能就越好。本研究发现, 长期施肥后表层土壤的田间持水量和有效持水容量均有提高, 其中 NPM 处理效果最佳。在 0—30 cm 土层, NPM 处理的田间持水量较 CK 显著提高了 23.5%, 有效持水容量显著提高了 40.1%; 30—40 cm 土层各处理间均无显著差异, 表明化肥有机肥配施对提高 0—30 cm 土层土壤持水性能有明显作用, 可以有效改善表层土壤透水和持水状况。M 处理显著提高了 0—10 cm 和 20—30 cm 土层的土壤有效持水容量, 说明有机物的良好亲水特性可以增强土壤保水能力^[8]。NP 和 CK 处理之间的持水

性能差异较小,且均低于 M 和 NPM 处理,可能是由于大量 N 肥的使用导致土壤结构的破坏从而降低了土壤的持水特性^[19]。

此外,土壤饱和导水率也是研究土壤水分运动的重要参数,它与土壤孔隙数量、土壤质地、结构、含水量等有关,是土壤重要的物理特性之一。研究表明,MNP 处理较 CK 显著提高了整个剖面(0—40 cm)土壤饱和导水率;较 CK,NP,M 处理,显著提高了表层(0—20 cm)土壤饱和导水率,这与 Shi 等^[35]对壤土的研究结果相一致,化肥有机肥配施可以增加土壤孔隙度,进而改善表层土壤的透水状况,提高土壤水分入渗能力^[36-38]。M 和 NP 处理降低了 10—20 cm 的土壤饱和导水率,可能是由于长期施单肥,耕层的粉粒、黏粒和肥料堵塞了部分大孔隙,导致土壤大孔隙数量减少,中小孔隙数量增加,土壤逐渐紧实,从而降低了土壤水分传导能力^[13]。

长期不同施肥处理改变了土壤肥力状况和土壤理化性质,最终影响冬小麦产量。经过 36 a,NP,M,NPM 处理对应的平均产量分别为 3 895.3,3 438.0,4 494.9 kg/hm²,分别比对照增产 161.7%,130.9%,201.9%,差异显著($p < 0.05$)。本研究发现 NPM 处理相对 NP 和 M 能增大土壤孔隙度,降低土壤容重,提高土壤持水性能,因而 NPM 处理具有最大增产优势,是旱地农业最佳施肥方式。

4 结论

通过分析 36 a 不同施肥处理土壤水力性质发现,与不施肥相比,化肥有机肥配施和单施有机肥显著提高了表层(0—20 cm)土壤有机质含量,化肥有机肥配施效果更优;长期单施化肥则显著增加了表层(0—20 cm)土壤容重,降低了表层土壤孔隙度,导致土壤紧实、破坏土壤结构;各施肥处理都有效改善了土壤持水性能,其中,化肥有机肥配施显著提高了 0—20 cm 土层土壤田间持水量和有效持水容量以及 0—30 cm 土层土壤饱和导水率。不同施肥处理对深层(30—40 cm)土壤的物理性质无显著影响。

[参 考 文 献]

- 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):82-85.
- 庄季屏.土壤物理与农业持续发展[M].北京:科学出版社,1995:158-164.
- Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005,124(1/2):3-22.
- 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):196-200.
- 赖庆旺,李茶苟,黄庆海.红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究[J].土壤学报,1992,29(2):168-174.
- 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000,32(4):188-193.
- 王慎强,李欣,徐富安,等.长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J].中国生态农业学报,2001,9(2):77-78.
- 马俊永,李科江,曹彩云,等.有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):236-241.
- 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.
- 郭慧超,邵明安,樊军.有机肥质量分数对土壤导水率稳定性的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(6):7-14.
- 鲍艳杰,郝明德,杨小敏.不同耕作覆盖措施下延收对春玉米产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):79-84.
- 潘雅文,樊军,郝明德,陈旭.黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1558-1567.
- 王欢,付威,胡锦涛,等.渭北旱塬管理措施对冬小麦地土壤剖面物理性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1097-1106.
- 赵晓芳,黄明斌.黄土高原王东沟小流域土壤表层全磷空间变异性[J].水土保持通报,2019,39(1):61-64.
- 赵晓芳,黄明斌.黄土高原王东沟小流域土壤表层氮的空间分布[J].水土保持研究,2019,26(4):62-67.
- 付威,樊军,胡雨彤,等.施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1158-1167.
- 樊军,郝明德.长期不同施肥对土壤剖面中有效硫累积与分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5):971-973.
- 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:84-85.
- 兰志龙, Muhammad N K, Tanveer A S,等.25 年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):100-106.
- 中国林业科学研究院 LY/T 1218-1999.森林土壤水分:物理性质的测定[S].北京:1999.
- 李玉山.测定土壤水势的离心机法[J].土壤,1981,13(4):143-146.
- Huang mingbin, Zettl J D, Barbour S L, et al. The impact of soil moisture availability on forest growth indices for variably layered coarse-textured soils [J]. Ecohydrology, 2013,6(2):214-227.
- 中国科学院南京土壤研究所.土壤物理分析[M].北京:科学出版社,1978.

- [24] Suleiman A A, Ritchie J T. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(2):235-239.
- [25] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [26] Fredlund D G, Xing Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521-532.
- [27] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):65-71.
- [28] Guo Shengli, Dang Tinghui, Hao mingde. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2):248-256.
- [29] 柳影, 彭畅, 张会民, 等. 长期不同施肥条件下黑土的有机质含量变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5):7-11.
- [30] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期定位施肥对土壤效应的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(2):188-196.
- [31] 侯会静, 韩正砥, 杨雅琴, 等. 生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(14):82-88.
- [32] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4781-4789.
- [33] 潘金华, 庄舜尧, 史学正, 等. 土壤结构改良剂对皖南旱地红壤水分特征的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):40-45.
- [34] 史银光, 李花, 李平儒, 等. 长期施用化肥或不同有机物料对塿土土壤物理性质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9):124-130.
- [35] Shi Yinguang, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. The effects of long-term fertiliser applications on soil organic carbon and hydraulic properties of a loess soil in China [J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(1):60-67.
- [36] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):443-449.
- [37] Eastman C M. Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqulf amended with biochar [D]. Ohio State, USA: Ms Thesis of the Ohio State University, 2011.
- [38] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):107-112.

(上接第 55 页)

- [19] Guo Weichao, Liu Hongyan, Anenkhonov O A, et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252:10-17.
- [20] 赵亚茹. 牡丹岭地区不同土地利用类型下土壤冻融变化特征分析[D]. 吉林 长春: 东北师范大学, 2014.
- [21] Shur Y L, Jorgenson M T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(1):7-19.
- [22] Chasmer L, Quinton W, Hopkinson C, et al. Vegetation canopy and radiation controls on permafrost plateau evolution within the discontinuous permafrost zone, northwest territories, Canada [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2011, 22(3):199-213.
- [23] Lu Jie, Wang Tiehuang, Cheng Wenchieh, et al. Permeability anisotropy of loess under the influence of dry density and freeze-thaw cycles [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(9):4-19.
- [24] Li Zhenwei, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2015, 124:9-17.
- [25] 高双, 贾燕锋, 范昊明, 等. 冻融作用下东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):70-75.
- [26] 白云. 祁连山不同植被类型覆盖下冻土水热特征变化研究[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [27] Zhang G H, Liu Baoyuan, Nearing M A, et al. Soil Detachment by Shallow Flow [J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45:351-357.
- [28] Wu Daoyong, Zhou Xiangyang, Jiang Xingyuan. Water and salt migration with phase change in saline soil during freezing and thawing processes [J]. Groundwater, 2018, 56(5):742-752.
- [29] Mohammed G A, Hayashi M, Farrow C R, et al. Improved characterization of frozen soil processes in the versatile soil moisture budget model [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(4):511-531.