不同耕法及秸秆还田对土壤水分运移变化的影响

李玉梅[1]，王晓轶[2]，王根林[3]，王 伟[1]，刘峥宇[4]，孟祥海[5]

(1.黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所，黑龙江 哈尔滨 150086；
2.燕山大学 环境与化学工程学院，河北 秦皇岛 066000；3.黑龙江省农业科学院 畜牧研究所，黑龙江 哈尔滨 150086；4.黑龙江省绥滨农场，黑龙江 绥滨 154213；5.黑龙江省农业科学院 牡丹江分院，黑龙江 牡丹江 157000)

摘 要：[目的] 探讨不同耕法与秸秆还田方式下，旱地草甸土土壤水分随深度运移的变化，为今后生产中因地制宜制定科学合理的耕作与培肥技术提供理论依据。[方法] 采用田间定位试验，研究 3 种耕法免耕、浅翻、深翻与 3 种秸秆还田方式覆盖还田、浅翻还田、深翻还田条件下，作物生长不同时期、不同深度土层土壤含水量、田间持水量和容重的变化。[结果] 土壤水分的年际间变化与降水量和降水变率有一定的关系。秸秆不还田条件下，连续 2 a 免耕，年际间土壤含水量随深度变化的特征曲线基本一致，0—20 cm 耕层田间持水量降低 13.62%，而浅翻与深翻分别增加 11.32%和 27.98 %；耕翻深度对 20—30 cm 土层水分的影响较大，随作物生长和地表覆盖度增加，40 cm 以下土层含水量的变化减弱。秸秆还田条件下，0—20 cm 耕层浅翻还田与深翻还田田间持水量分别增加 16.24%，5.08%，而土壤容重降低 0.12，0.09 g/cm^3。[结论] 同一耕法有秸秆还田处理土壤水分含量高于无秸秆还田，降水量越少，差异越明显。与免耕和免耕覆盖比较，翻耕与翻耕还田均增加了作物生长期间土壤含水量，提高了作物抗旱能力，产量有增加趋势。

关键词：草甸土；秸秆还田；耕法；土壤水分

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)05-0040-06 **中图分类号**：S157.4$^+$2，S3

文献参数：李玉梅，王晓轶，王根林，等.不同耕法及秸秆还田对土壤水分运移变化的影响[J].水土保持通报，2019，39(5)：40-45. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.006；Li Yumei，Wang Xiaoyi，Wang Genlin，et al. Effects of straw returning method partnered with different tillage methods on migration of soil water[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：40-45.

Effects of Straw Returning Method Partnered with Different Tillage Methods on Migration of Soil Water

Li Yumei[1]，Wang Xiaoyi[2]，Wang Genlin[3]，Wang Wei[1]，Liu Zhengyu[4]，Meng Xianghai[5]

(1. *Institute of Soil Fertility and Environmental Resources，Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences，Harbin，Heilongjiang* 150086，*China*；2. *School Environmental and Chemical Engineering，Yanshan University，Qinhuangdao，Hebei* 066000，*China*；3. *Institute of Animal Sciences，Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences，Harbin，Heilongjiang* 150086，*China*；4. *Heilongjiang Suibin Farm，Suibin，Heilongjiang* 154213，*China*；5. *Mudanjiang Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences，Mudanjiang，Heilongjiang* 157041，*China*)

Abstract：[Objective] The change in the water content of meadow soils at different depths with different plow and straw returning methods was studied to provide a theoretical basis for formulating scientific/reasonable tillage and fertilizer technology according to local conditions during future production. [Methods] Based on field experiments，the soil water content，field water holding capacity，and bulk density of crop growth different stages and different soil depths were studied using three tillage and straw returning methods，which were no-tillage，shallow plow，and deep plow，each partnered with no straw and straw returning. [Results] The inter-annual variation in the soil water content had relationships with the annual precipitation and precipitation variability. In two consecutive years of no-tillage，the soil water curves were basically the same，the field

收稿日期：2019-03-27 **修回日期**：2019-04-15

资助项目：国家重点研发项目“东北平原东北旱地丰产增效耕作培肥技术模式与示范”(2016YFD0300806)；黑龙江省资助项目(GX18B013)；黑龙江省重点基金(ZD2016008，LBH-Q14148)

第一作者：李玉梅(1971—)，女(汉族)，四川省射洪县人，博士，研究员，主要从事土壤培肥研究。E-mail：liyumeiwxyl@126.com。

通讯作者：王根林(1970—)，男(汉族)，河北省迁安市人，研究员，主要从事作物耕作与栽培。E-mail：wanggenlin2005@163.com。

water holding capacity in the 0—20 cm layer decreased by 13.62%, while the shallow and deep plow increased the field water holding capacity by 11.32% and 27.98%, respectively. The influence of the soil water content at the depth of 20—30 cm was higher than other soil layers, and along with the crop growth and increase of ground cover, the soil water in the three tillage systems decreased under the 40 cm soil layer. With straw shallow and deep returning, the water holding capacity of the 0—20 cm arable layer saw an average increase of 16.24% and 5.08%, respectively, and the soil bulk density decreased by 0.12 g/cm^3 and 0.09 g/cm^3, respectively. [Conclusion] Within the same plow systems, the soil water content with straw returning was higher than that without, and the less precipitation that was present the more obvious this difference was. Compared with no-tillage and straw mulching, the soil water increased with plow and straw returning, which increased the drought resistance of the crops and yields.

Keywords: meadow; straw returning; plow; soil water content

耕作由于改变了表层土壤的结构特性,从而影响土壤水分和养分的迁移[1]。研究发现,秸秆还田的持续时间越长,对土壤理化性状的改善作用越明显[2-7]。土壤水分是影响作物出苗和产量的关键因素,李少昆等[8]研究表明,无论是传统翻耕、秸秆粉碎后翻耕、旋耕还田还是秸秆覆盖,水分不足都是降低作物出苗率的主要因素。不同区域、不同土壤类型,不同耕作措施对土壤水分的影响不同[4,9]。武际等[10-11]研究表明,与传统耕翻比较,免耕提高了表层 0—20 cm 土壤的含水量,小麦地 0—10 cm 土层土壤容重增加 1.15%～3.88%,10—20 cm 土层增加 1.93%～3.08%。干旱年份,免耕覆盖更有利于作物苗期土壤水分的保持,随玉米生长,覆盖度增加,耕作措施对砂土、砂质壤土、砂质黏壤土 3 种质地土壤含水量的影响逐渐减小,免耕覆盖与传统翻耕的水分含量差异逐渐变小[12]。农业措施可导致土壤性状季节性变化的时空差异[13-14],关于秸秆连续、全量、不同还田深度下,土壤水分随深度运移的时空变化研究较少,尤其是针对旱地草甸土,通过秸秆还田打破犁底层,增厚耕层的研究更是鲜有报道。本研究通过田间定位试验,从时间和空间尺度上,探讨耕法与秸秆还田方式对典型旱地草甸土水分运移的影响,以期为今后生产中因地制宜制定科学合理的耕作与培肥技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本研究于 2016 年 9 月至 2018 年 10 月在牡丹江市温春镇(44°60′N;129°58′E)碳酸盐性草甸土上进行,土壤基础理化指标:全氮 1.12 g/kg,全磷 0.55 g/kg,全钾 2.53 g/kg,碱解氮 101.55 g/kg,速效磷 26.50 g/kg,有效钾 130.28 g/kg,有机质 16.50 g/kg,pH 值 7.93。

1.2　试验设计

设计 3 种耕法:免耕、浅翻 20 cm 和深翻 35 cm,3 种秸秆还田方式:免耕覆盖、浅翻还田 20 cm 和深翻还田 35 cm。每小区面积 234 m^2,3 次重复。玉米施纯 N 160.0 kg/hm^2,P_2O_5 110.0 kg/hm^2,K_2O 75.0 kg/hm^2。秸秆还田处理为每年秋季玉米收获后,将秸秆粉碎至长度小于 10 cm,覆盖地表或翻埋于 20 cm 和 35 cm 土层。免耕与免耕覆盖在作物整个生长期间均不进行中耕等扰动土壤处理。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*样品采集*　供试玉米品种益农玉 10 号,在玉米生长不同时期(播期、苗期、喇叭口期、抽穗期),分层采集 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm 土层土样,测定土壤含水量,成熟期分层采集 0—40 cm 土样测定土壤含水量、田间持水量和容重。

1.3.2　*测定方法*　土壤含水量、田间持水量、容重测定均采用环刀法。

1.3.3　*数据处理*　试验数据用 Excel 2013 进行处理,SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同年份自然降水量的变化

自然降水量的变化对土壤蓄水、持水量有一定的影响。2017 年、2018 年总降水量分别为 561.9 mm 和 604.9 mm(见表 1),其中,2017 年 1—7 月总降水量为 320.1 mm,5—7 月占总降水量的 47.96%。2018 年 1—7 月总降水量仅为 259.6 mm,1—4 月降水量为 80.8mm,降水绝对变率和相对变率分别 3.77 mm 和 22.95%,表明该时期降水量比往年同期平均降水量略有增加,而降雨集中的 5—7 月仅占全年总降水量的 29.55%,降水绝对和相对变率分别为 −20.36 mm和 −45.16%,表明该时间段较往年同期平均降水降低幅度较大。因此,2018 年 1—4 月降水量高于 2017 年,而 5—7 月降雨量低于 2017 年。

表 1 2017—2018 年研究区自然降水量变化

年 份	总降水量/mm			降水绝对变率/mm		降水相对变率/%	
	1—10 月	1—4 月	5—7 月	1—4 月	5—7 月	1—4 月	5—7 月
2017	561.9	50.6	269.5	−3.78	9.91	−0.23	21.99
2018	604.9	80.8	178.8	3.77	−20.36	22.95	−45.16

2.2 不同耕法对作物生长期土壤水分变化的影响

3 种耕法对 0—50 cm 土层水分变化的影响均随年份和作物生长期发生波动性变化(见图 1)。由图 1 可知,除播种期外,相同耕法同一深度土层土壤含水量 2018 年明显低于 2017 年,与年际间降水量和降水变率有一定的关系。2018 年 1—4 月降水量高于 2017 年(见表 1),而 5—7 月降雨量低于 2017 年,是导致本年度播期土壤水分含量高于 2017 年,而苗期至抽穗期低于 2017 年的主要原因。

连续免耕 2 a,土壤水分变化特征曲线年际间相近,表明免耕耕法能够代表原位土壤水分变化的基本趋势。连续 2 a 浅翻和深翻对 0—20 cm 土层含水量影响不大,分别为 14.72%和 14.81%;20—30 cm 土层,在 5—7 月降水相对变率分别为 21.99%和−45.16%的 2017 年与 2018 年,深翻处理土壤含水量均高于 ST 处理,增幅分别为 11.10%和 6.89%,说明耕作深度的变化,对 20—30 cm 土层土壤水分的影响高于其它土层。作物生长至抽穗期,随地表覆盖度增加,耕作措施对 40 cm 以下土层土壤含水量的影响逐渐减少,3 种耕法土壤含水率变化无差异,与刘连华等[12]研究一致。

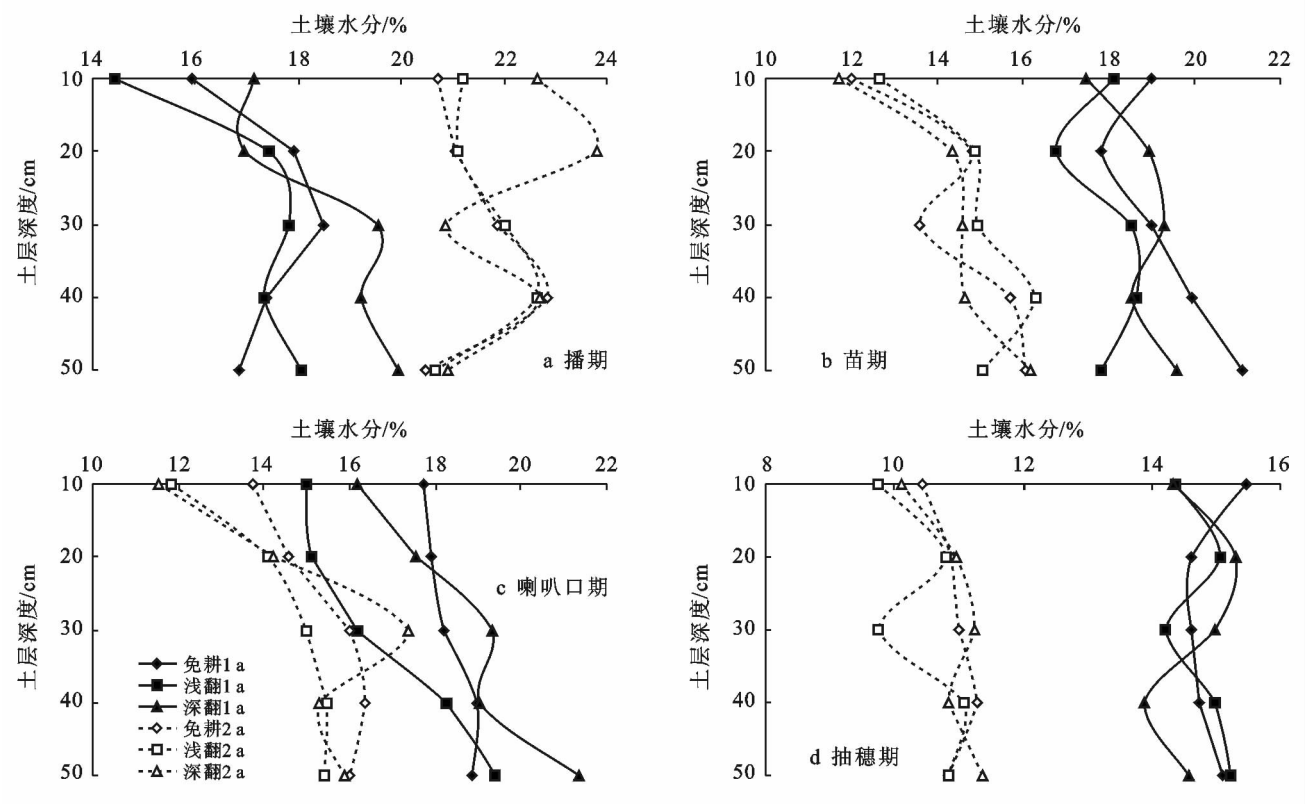


图 1 作物生长期不同耕法下土壤水分的运移

2.3 不同秸秆还田方式对作物生长期土壤水分变化的影响

秸秆不同还田方式对土壤水分变化的影响趋势与耕法基本一致,除播种期外,相同处理同一深度土层的土壤含水量 2018 年均低于 2017 年。有研究发现,免耕覆盖对作物苗期不同质地土壤水分的保持效果,砂质壤土好于黏壤土和砂土[12]。由图 2 可见,连续 2 a 免耕覆盖,玉米播期、苗期和喇叭口期 0—10 cm 表土层水分含量增加,尤其在降雨量很少的 5—6 月期间(苗期和喇叭口期),免耕覆盖>浅翻还田>深翻还田,平均含水量分别为 16.29%,14.37%和 13.45%,差异显著。苗期至抽穗期,深翻还田增加了 20—30 cm 土层水分含量,土壤平均含水量为 15.24%,比浅翻还田提高 7.4%。该年度 8 月份降雨量虽达到 231.9 mm,但降雨主要集中在 8 月下旬,前期降雨量较少,仅占本月降雨量的 38.1%,而此期又是作物需水关键时

期,因此,导致该时间段内土壤水分总体降幅较大,0—40 cm 土层土壤平均含水量免耕覆盖<浅翻还田<深翻还田,这与免耕覆盖不动土,干旱少雨条件下土壤硬度增大,蓄水能力减弱有关[11,14]。

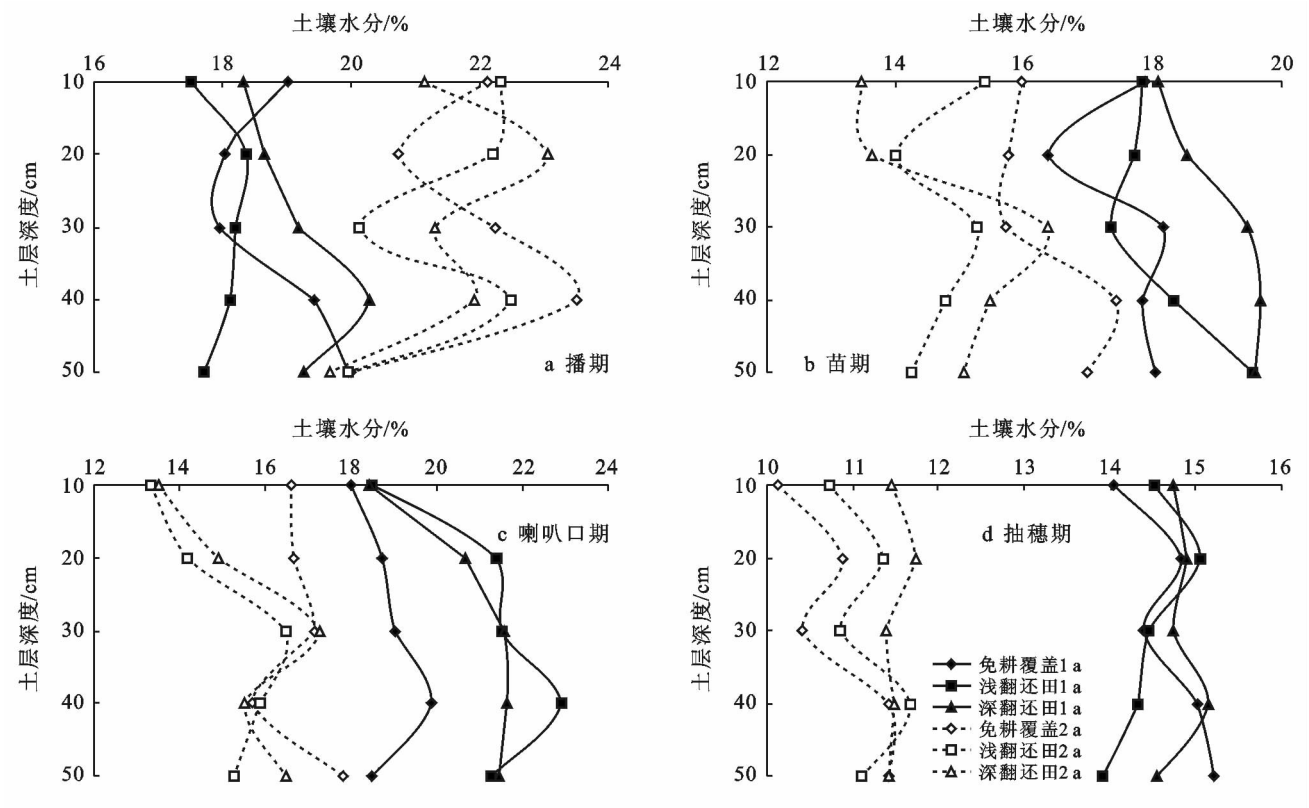


图 2　作物生长期不同秸秆还田方式下土壤水分的运移

2.4　不同耕法与秸秆还田方式对土壤水分变化的影响

作物成熟期相同处理同一深度土层 2018 年土壤含水量均低于 2017 年(见图 3—4);连续免耕和免耕覆盖对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层水分影响不大,但同一土层有秸秆覆盖处理土壤含水量高于无秸秆覆盖处理;免耕 1 a 和免耕 2 a 的 0—20 cm 土层平均含水量为 21.24%和 18.55%,20 cm 以下土层平均为 22.81%和 21.05%(见图 3);免耕覆盖 1 a 和免耕覆盖 2 a 的 0—20 cm 土层平均含水量为 21.97%和 19.11%,20 cm 以下土层为 23.8%和 21.58%(见图 4)。连续 2 a 免耕与免耕覆盖 1 a 的土壤水分随深度变化趋势一致,随土层深度增加(>20 cm)呈平行增加趋势。

秸秆不还田条件下,连续耕翻 0—10 cm 表土层水分降低较明显(见图 3),浅翻与深翻处理接近,分别为 16.7%和 16.34%,均低于免耕处理;0—40 cm 土层平均土壤含水量深翻处理略低于浅翻,但差异不大。秸秆还田条件下,连续翻耕后 0—10 cm 表土层水分含量增加(见图 4),浅翻还田与深翻还田处理比同一耕法无秸秆还田的浅翻、深翻处理分别增加了 12.8%和 4.5%,0—40 cm 土层深翻还田处理高于浅翻还田,差异不显著;同一耕法有秸秆还田高于无秸秆还田处理,降水量越少,这种差异越明显[15]。

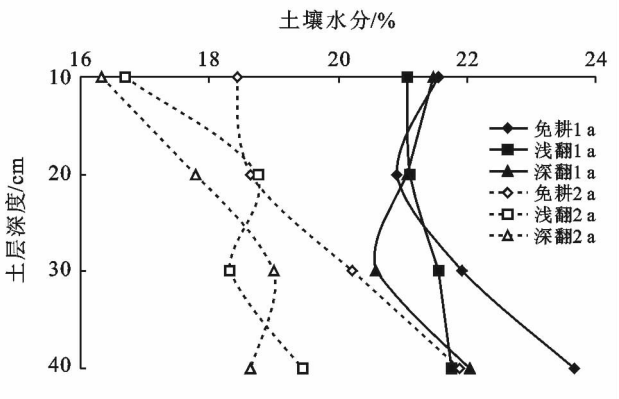


图 3　不同耕法下土壤水分的变化特征

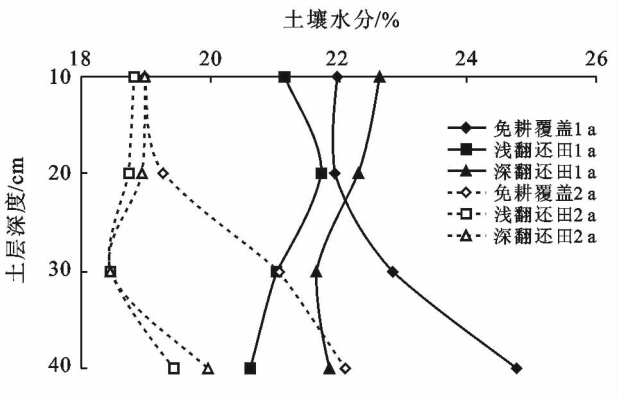


图 4　不同秸秆还田方式下土壤水分的变化特征

田间持水量是表征土壤保持水分能力的重要指标，不同质地、不同深度，田间持水量发生变化。连续 2 a免耕后，0—20 cm 土层田间持水量减少 13.62%（见图 5），浅翻与深翻处理则分别由 32.13%和31.70%提高至 35.77%和 40.57%，增加了 11.32%和 27.98%，差异显著，这与翻耕能够不同程度打破犁底层，增强土壤的持水能力有关；20—30 cm 土层，各处理田间持水量均表现为增加趋势，以深翻处理增加较大；连续 2 a 浅翻还田与深翻还田（见图 6），0—30 cm 土层田间持水量增加，平均增幅 16.24%和 5.08%，而连续免耕覆盖，田间持水量减少，降幅达 25.27%。

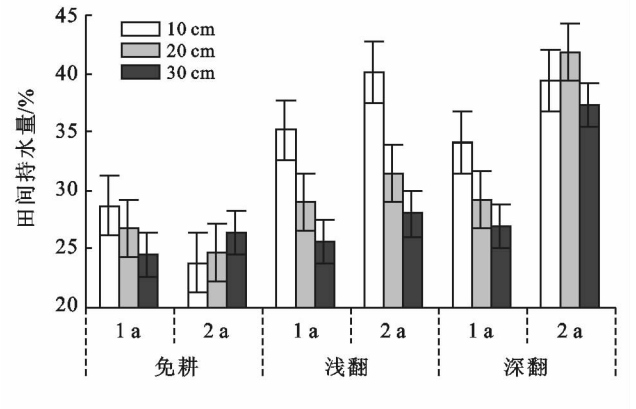


图 5 不同耕法下田间持水量的变化特征

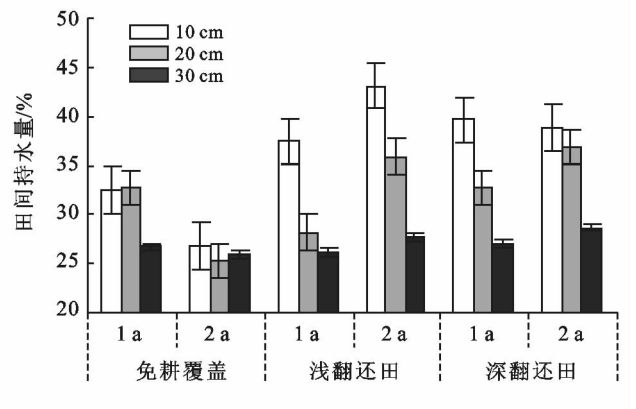


图 6 不同秸秆还田方式下田间持水量的变化特征

2.5 不同耕法与秸秆还田方式对土壤容重的影响

由图 7 可见，不同耕法 0—30 cm 土层土壤容重免耕＞浅翻＞深翻；免耕不动土，土壤容重呈增加趋势，尤以 20—30 cm 土层明显；翻耕可不同程度的降低土壤容重，以深翻 10—30 cm 土层容重降低幅度较大，比免耕和浅翻分别降低 31.0%和 19.3%，差异显著。秸秆还田条件下，连续 2 a 免耕覆盖土壤容重增加（见图 8），平均由 1.42 g/cm^3 增加到 1.52 g/cm^3，以 10—20 cm 土层容重增加较大，达 1.57 g/cm^3，比浅翻还田和深翻还田平均增加 0.29 g/cm^3，差异显著；而连续浅翻还田和深翻还田土壤容重减小，降低幅度为 0.09～0.12 g/cm^3。

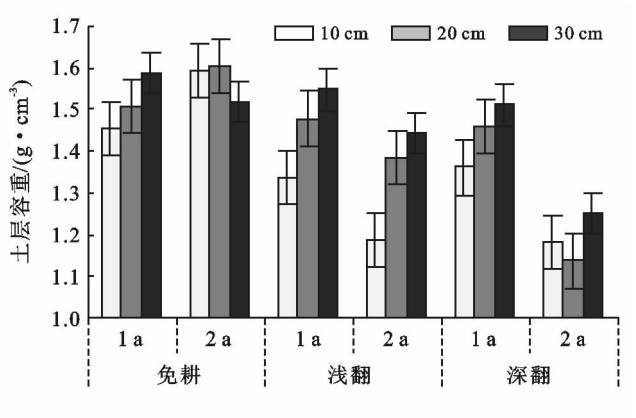


图 7 不同耕法土壤下容重的变化特征

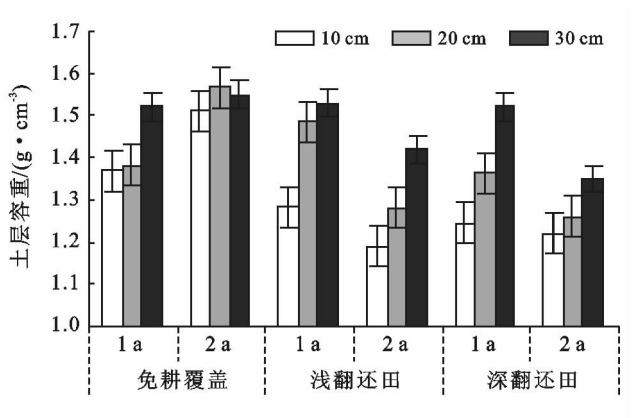


图 8 不同秸秆还田方式下土壤容重的变化特征

2.6 不同耕法与秸秆还田方式对作物产量的影响

不同耕作与秸秆还田方式对作物产量影响不同（见表 2）。连续 2 a 免耕与免耕覆盖由于土壤容重增加等结构特性的变化，玉米产量分别下降 5.78%和 2.69%，而翻耕与翻耕还田由于耕作深度的变化和秸秆的投入，玉米产量表现为增加，浅翻和深翻分别较上一年增加 0.14%，3.32%，浅翻还田与深翻还田分别较上一年增加 12.53%，12.06%，短期内浅翻还田与深翻还田差异不显著，还有待于进一步研究。

表 2 不同处理玉米产量变化 kg/hm^2

处理	2017 年产量	2018 年产量	增产%	处 理	2017 年产量	2018 年产量	增产%
免耕	11 356.05	10 677.44	−5.78%	免耕覆盖	10 983.9	10 688.90	−2.69%
浅翻	10 393.2	10 437.81	0.14%	浅翻还田	10 428.0	11 734.64	12.53%
深翻	11 133.15	11 149.11	3.32%	深翻还田	10 541.7	11 813.43	12.06%

3　讨论与结论

农业措施对土壤理化特性的影响,受土壤质地等立地属性及自然降水等多种因素的影响。因此,研究不同措施下土壤持水、蓄水能力的变化,需同时考虑该区域土壤类型、一定时段内自然降水量的变化等因素,综合评价分析农业措施对土壤理化性状改变的影响。

(1) 不同耕法对土壤水分运移变化的影响。免耕作为一种保护性耕作措施,对土壤含水量和容重的影响说法不一。武际等研究认为,免耕因为土壤不进行耕作处理,土壤比较紧实,土壤体积质量偏大,所以更易导致土壤板结[11]。翻耕前期由于土壤受到耕翻作用,土壤较疏松,因而土壤容重较低[15];也有研究认为,免耕提高了表层土壤的含水量,在干旱地区,更有利用土壤水分的保持[10]。连年翻耕或者深松作业疏松土壤的同时,增加了机具碾压土壤的次数和强度,土壤容重降幅不明显[16]。本研究表明,不同耕法下草甸土水分的年际间变化与降水量和降水变率有一定的关系;连续免耕,土壤水分随深度变化曲线基本能够代表原位土壤的水分变化特征;耕作深度的变化对 20—30 cm 土层土壤水分的影响要高于其它土层,深翻土壤含水量略高于浅翻,但差异不大;随作物生长地表覆盖度增加,耕作措施对 40 cm 以下土层水分含量的影响逐渐减少,3 种耕法土壤含水量无差异[12]。浅翻和深翻由于耕翻深度不同,增强了土壤的通气透水能力,田间持水量增加,而免耕土壤容重随时间有增加的趋势。

(2) 不同秸秆还田方式对土壤水分运移变化的影响。秸秆还田不仅能够增加土壤有机质含量[17-18],改善土壤的养分状况[19],提高土壤肥力,对土壤容重[2,3]、田间持水量[4]等结构特性亦有一定的影响[5]。连续 20 a 玉米秸秆直接还田,降低的土壤容重与增加的土壤孔隙度与秸秆还田量呈显著正相关[6],20—50 cm 土层土壤容重随着秸秆还田年限增加较对照显著下降[20],秸秆还田的持续时间越长,对土壤理化性状的改善作用越明显[7]。本研究表明,同一耕法下有秸秆还田土壤水分含量高于无秸秆还田处理;免耕覆盖由于减少了地表裸露,0—10 cm 表土层水分含量增加,尤其在降雨量很少的 5—6 月,但连续 2 a 免耕覆盖,0—20 cm 土层田间持水量减少,10—20 cm 耕层土壤容重增加,比浅翻还田和深翻还田平均增加 0.29 g/cm^3。

由于长期耕种,东北黑土犁底层上升、耕层变浅、土壤水养库容降低[1],而关于农业耕作措施下,通过翻耕打破坚硬的犁底层,同时将秸秆翻埋入深层土壤,培育深厚耕层的生产技术及机理研究较少,尤其是针对旱地草甸土的研究。因此,以维持作物产量稳定为前提,基于土壤环境及气候的区域性差异,结合农业生产条件进行系统地实践研究,可最大程度地发挥不同农业措施的生产、生态效应,指导建立持续发展的土壤耕作与培肥技术。

[参 考 文 献]

[1] 范如芹,梁爱珍,杨学明,等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(18):3767-3775.

[2] 闫洪奎,王欣然. 长期定位试验下秸秆还田配套深松对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 华北农学报,2017,32(S1):250-255.

[3] 余文良. 腐熟剂作用下的油菜秸秆还田对土壤性状与中稻产量的影响[J]. 作物研究,2013,27(3):246-248.

[4] 李万良,刘武仁. 玉米秸秆还田技术研究现状及发展趋势[J]. 吉林农业科学,2007,32(3):32-34

[5] 张婷,李志宏,赵传拓,等. 秸秆还田对土壤肥力及作物生长的影响研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(21):89-91

[6] 周波,刘登民,劳秀荣,等. 长期秸秆还田及休闲处理对土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(36):16015-16019.

[7] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.

[8] 李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报,2006,32(3):463-465,478.

[9] 付国占,李潮海,王俊忠,等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(1):52-56.

[10] 武际,郭熙盛,张祥明,等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(3):87-93.

[11] Huang Gaobao, Chai Qiang, Feng Fuxue. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum*) in arid Northwest China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012,11(8):1286-1296.

[12] 刘连华,陈源泉,杨静,等. 免耕覆盖对不同质地土壤水分与作物产量的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(2):393-398.

[13] 陈强,耕作方式对黑土理化性状季节变化的影响[D]. 北京:中国科学院大学,2016.

(下转第 53 页)

global patterns of plant biomass allocation[J]. Functional Ecology, 2007,21(4):713-720.

[8] 王百田,王颖,郭江红,等. 黄土高原半干旱地区刺槐人工林密度与地上生物量效应[J]. 中国水土保持科学,2005,3(3):35-39.

[9] Craine J M, Lee W G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal gradient in New Zealand[J]. Oecologia, 2003,134(4):471-478.

[10] 韩蕊莲,侯庆春. 延安试区刺槐林地在不同立地条件下土壤水分变化规律[J]. 西北林学院学报,2003,18(1):74-76.

[11] 李俊辉,李秧秧,赵丽敏,等. 立地条件和树龄对刺槐和小叶杨叶水力性状及抗旱性的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(9):2397-2403.

[12] 史元春,赵成章,宋清华,等. 兰州北山刺槐枝叶性状的坡向差异性[J]. 植物生态学报,2015,39(4):362-370.

[13] 宋光,温仲明,郑颖,等. 陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系[J]. 水土保持研究,2013,20(3):125-130.

[14] 陈晨,刘丹辉,吴键军,等. 东灵山地区辽东栎叶性状与地形因子关系[J]. 生态学杂志,2015,34(8):2131-2139.

[15] Cantón Y, Del Barrio G, Solé-Benet A, et al. Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain[J]. Catena, 2004,55(3):341-365.

[16] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):53-56,60-79.

[17] 王向荣,孙海龙,余鑫,等. 坡向和坡位对水曲柳中龄林生长的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2011,31(1):30-34.

[18] 李超然,温仲明,李鸣雷,等. 黄土丘陵沟壑区地形变化对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报,2017,37(16):5436-5443.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000,30-76.

[20] 单长卷,梁宗锁,韩蕊莲,等. 黄土高原陕北丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性研究[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1205-1212.

[21] 施宇,温仲明,龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化[J]. 生态学报,2011,31(22):6805-6814.

[22] 段媛媛,宋丽娟,牛素旗,等. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报,2017,28(1):28-36.

[23] Craine J M, Froehle J, Tilman D G, et al. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients[J]. Oikos, 2001,93(2):274-285.

[24] Eissenstat D M, Caldwell M M. Competitive ability is linked to rates of water extraction[J]. Oecologia, 1988,75(1):1-7.

[25] Dijkstra P, Lambers H. Analysis of specific leaf area and photosynthesis of two inbred lines of Plantago major differing in relative growth rate[J]. New Phytologist, 1989,113(3):283-290.

[26] Reich P B, Ellsworth D S, Walters M B, et al. Generality of leaf trait relationships: A test across six biomes[J]. Ecology, 1999,80(6):1955.

[27] 龚时慧,温仲明,施宇. 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应[J]. 生态学报,2011,31(20):6088-6097.

[28] 李钰,赵成章,董小刚,等. 高寒草地狼毒枝、叶性状对坡向的响应[J]. 生态学杂志,2013,32(12):3145-3151.

[29] Aerts R, Chapin F S Ⅲ. The mineral nutrition of wild plants revisited: A Re-evaluation of processes and patterns[M]. Advances in Ecological Research: Elsevier, 1999,1-67.

(上接第 45 页)

[14] 郭贤仕,杨如萍,马一凡,等. 保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(4):1-5.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 徐祖祥. 连续秸秆还田对作物产量和土壤养分的影响[J]. 浙江农业科学,2003,44(1):35-36.

[18] 王金洲,卢昌艾,张文菊,等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报,2016,53(1):12-23.

[19] 辛励,刘锦涛,刘树堂,等. 长期定位条件下秸秆还田对土壤有机碳及腐殖质含量的影响[J]. 华北农学报,2016,31(1):218-223.

[20] 慕平,张恩和,王汉宁,等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(3):291-296.