

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.020

秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响*

付强 李铁男 李天霄 崔嵩

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要:以北方高寒区典型城市哈尔滨市为研究区域,通过冬季大田试验(试验周期2013-11-01—2014-04-30),设置自然无覆盖、覆盖秸秆厚度5、10、15 cm 4个处理,分别测定不同处理下20、40、60、100、140、180 cm深度土壤液态含水率以及气象数据,分析季节性冻融期秸秆覆盖对土壤水分变化特征的影响。研究表明:秸秆覆盖使0~60 cm土层内液态含水率增加或减小的时间拐点发生延迟,随着秸秆覆盖厚度的增加其延迟效果越明显,但土壤冻结期的延迟效果比冻土融化期明显;秸秆覆盖阻碍了冻土融化初期融雪水入渗,使自然无覆盖处理液态含水率在20、40、60 cm土壤深度出现短暂的峰值,而在冻土融化末期秸秆覆盖抑制了土壤水蒸发,使各秸秆覆盖处理液态含水率在20、40、60 cm土壤深度又高于自然无覆盖。秸秆覆盖可有效平抑冻融期0~60 cm土层土壤液态含水率的变化幅度,且随着土壤深度的增加其平抑效果具有减弱趋势;积雪融水和秸秆覆盖的双重作用能够有效增加土壤墒情,但其增墒能力随着土壤深度的增加而降低,不同秸秆覆盖处理对0~60 cm土层的平均增墒能力由大到小排序依次为:15、10、5 cm。

关键词: 秸秆覆盖 高寒区 季节性冻融期 水分特征 土壤

中图分类号: S316; S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0141-06

Influence of Straw Mulching on Soil Moisture Characteristics during Seasonal Freeze-thaw Period

Fu Qiang Li Tienan Li Tianxiao Cui Song

(School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to analyze the effect of straw mulching on changing characteristics of soil moisture during seasonal freeze-thaw period, Harbin City was selected as the objective study area, and soil liquid volumetric moisture content at different soil depths (i. e. 20, 40, 60, 100, 140, 180 cm) was measured in the field under straw mulching thicknesses of 5, 10 and 15 cm in winter, and bare soil was taken as control. Meanwhile, the meteorological data was obtained from automatic meteorological station in the study area. The results showed that straw mulching thickness can retard the temporal inflection point of increasing or decreasing of soil volumetric moisture content between 0 cm and 60 cm soil depth, the retard effectiveness was more obvious with thicker straw mulching, and the retard effectiveness was more obvious in freezing period than that in thawing period. The snowmelt infiltration was prevented by the straw mulching at the beginning of thawing period, thus the liquid volumetric moisture content appeared temporary peak value at soil depth of 20, 40 and 60 cm under the condition of bare soil. However, the liquid volumetric moisture content was lower in bare soil treatment than that in other three treatments due to straw mulching at the end of thawing period. The straw mulching could effectively adjust and remain the liquid volumetric moisture content at soil depth of 0~60 cm during freeze-thaw period, meanwhile, the adjustment effectiveness was weakened with the increase of soil depth. Both snowmelt and straw mulching

收稿日期: 2015-03-23 修回日期: 2015-04-30

* 国家自然科学基金资助项目(51279031, 51209039)、黑龙江省基金资助项目(E201241)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0952)和黑龙江省杰出青年基金资助项目(JC201402)

作者简介: 付强, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

can effectively increase soil moisture, but the increasing capability of soil moisture decreased with increasing soil depth. The order of the increasing capability of soil moisture at soil depth of 0 ~ 60 cm was 15, 10 and 5 cm thickness of mulching straw.

Key words: Straw mulching Alpine region Seasonal freeze-thaw period Moisture characteristics Soil

引言

随着对水土资源退化及作物生产力水平低下等相关研究的不断深入^[1-3],人们逐渐意识到农田中水分大量蒸发导致水分有效利用率低下等问题还需要进一步系统研究。许多学者针对此问题,提出了多种考虑生态和经济效益的耕作方式和措施,如:秸秆覆盖^[4]、覆膜^[5-6]、免耕留茬^[7-8]等,以提高土壤水分利用效率,解决因春旱导致的作物受灾和减产。上述措施多是针对非寒冷地区“两年三季”、“一年两季”等种植模式,而对于我国北方高寒区黑龙江省,由于受寒温带-温带、湿润-半湿润季风气候的影响,作物种植则为“一年一季”。早田区多种植玉米,每年作物收获后的秸秆多铺于地表,而土壤10月末初冻,次年4月底耕作层土壤基本融通,整个冬季漫长而寒冷,有稳定的积雪,农田土壤处于休整期,无作物种植。秸秆和自然积雪所形成的覆盖必然使土壤水分在土壤中的传输表现出其独有的特性,进而影响土壤在农田休整期养分和肥力的恢复。因此,如何充分利用北方高寒区季节性变化特征,获取寒地冻融期土壤水分的变化规律并揭示不同覆盖厚度对土壤墒情的影响特征,对于实现季节性冻融期土壤水分的高效利用及促进作物产量的提升具有重要的理论价值和实践意义。

目前,国内外学者已在土壤水分及其运移规律方面取得了一系列的研究成果,如:母彩霞等^[9]针对冬小麦冬季储水问题,通过冬季灌水实验,得出了越冬期不同农田处理措施对土壤水分影响不大的结论;高泽永等^[10]针对青藏高原多年冻土区活动层,基于长江源典型多年冻土区土壤水分观测数据,得出了不同冻融阶段、不同类型草地土壤剖面含水率均存在随深度逐渐增大的一致性趋势;李玲玲等^[11]通过对黄土高原西部旱区5种不同保护性耕作措施对土壤水分影响的分析,得出了冬季稳墒期不同耕作措施对0~200 cm剖面储水量影响不大的结论,这与母彩霞等的研究结果相一致。而Stipesevic等^[12]的研究结论与李玲玲等的有所不同,Stipesevic等认为在一定气候条件下,干燥的冬小麦秸秆覆盖能够保持土壤水分,增加土壤温度,造成上述差别的原因可能与地理位置以及实际的土壤类型等因素有

关;Li等^[13]指出:秋季0~20 cm与20~40 cm土壤水分空间分布具有极高的相似性,0~60 cm土层土壤含水率是影响作物生长的关键因素。然而,上述研究多是针对非寒区的作物种植期,而对于北方高寒区季节性冻融期的土壤水分研究相对较少。本文以北方高寒区代表性城市——哈尔滨市为研究区域,通过冬季大田试验,测定不同厚度秸秆覆盖条件下不同土层深度的液态含水率,进而分析秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响,以期为北方高寒区春季土壤墒情诊断提供理论依据和技术支撑。

1 试验方案

1.1 试验区简介

试验于2013年11月—2014年4月在哈尔滨市东北农业大学节水灌溉试验场进行。哈尔滨市位于黑龙江省南部,东经125°42'~130°10',北纬44°04'~46°40',降水主要集中在6—9月,全年平均降水量569.1 mm。气候属中温带大陆性季风气候,冬长夏短。冬季在干冷的极地大陆气团控制下,最低气温可达-40℃以下,1月份平均气温为-19.6℃,平均降雪量为23.6 mm。全市共有黑土、黑钙土、草甸土、沼泽土、砂土等9个土类,其中主要以黑土为主,分布在中部平川地和岗平地。每年4月末开始种植,9月末或10月初开始收获,整个冬季,无作物种植。本试验区位于哈尔滨市西部,0~40 cm深度土壤为黑土层,平均粘粒(小于0.002 mm)质量分数为33.27%,平均干容重为1.63 g/cm³;40~60 cm深度土壤为粘质黄土层,平均粘粒质量分数36.27%,平均干容重为1.64 g/cm³;60 cm以下为粘质黑土层,平均粘粒质量分数为40%,平均干容重为1.70 g/cm³。

1.2 试验方案

试验共设置4个处理,包括:5 cm厚度秸秆覆盖(6 000 kg/hm²,记为FB5)、10 cm厚度秸秆覆盖(12 000 kg/hm²,记为FB10)、15 cm厚度秸秆覆盖(18 000 kg/hm²,记为FB15),以自然无覆盖处理(记为LD)作为对照。各处理采用2013年秋收获的玉米秸秆均匀覆盖,覆盖时间为2013年10月底,纵横交错摆放。每个试验小区尺寸均为10 m×10 m。试验期内各处理小区降雪均保持自然状态。土壤液

态含水率采用时域反射仪(TDR)测定,测管于 2013 年冬季试验前一次性安装完毕,观测深度分别为 20、40、60、100、140、180 cm,不同深度土壤含水率同一测点观测 3 次取平均值。由于秸秆上覆盖的积雪不易清理,且 4 个处理的自然条件均相同,故 3 种秸秆覆盖处理地块上试验期内的积雪不进行任何处理,保持自然积雪状态。

气象数据采用试验田安装的自动气象站观测,地面温度采用地温计每天 08:00、12:00、18:00 各观测一次,取平均值,冻深采用自然条件地块中安装的冻土器观测。自 2013-11-01 日起对所有观测点进行观测,直至 2014-04-30 日观测结束。另外,入冬前采用土钻在各地块内 20、40、60、100、140、180 cm 深度各取 3 个土样,观测土壤初始质量含水率,并换算为体积含水率,取平均值。从表 1 可以看出,不同小区相同深度土壤体积含水率不尽相同,在空间上具有一定的差异性,其中,60 cm 土壤体积含水率的极差最大,为 3.47%;180 cm 土壤体积含水率极差最小,仅为 1.27%。

表 1 试验区不同深度土壤初始体积含水率

Tab.1 Initial soil volumetric moisture content of different depths in test area %

土壤深度/ cm	处理			
	LD	FB5	FB10	FB15
20	21.53	19.80	18.25	20.83
40	16.47	14.63	14.70	15.07
60	14.03	17.50	16.20	16.60
100	19.07	21.07	20.30	22.53
140	23.73	20.17	19.23	21.43
180	25.24	25.24	25.64	25.51

2 试验结果与分析

2.1 秸秆覆盖对季节性冻融期土壤液态含水率变化规律的影响

利用 TDR 测得的不同秸秆覆盖条件下土壤各深度液态含水率随时间的变化曲线如图 1 所示。通过观测结果对比分析可以看出,不同深度土壤的液态含水率变化在不同秸秆覆盖条件下表现出明显的差异性和规律性。

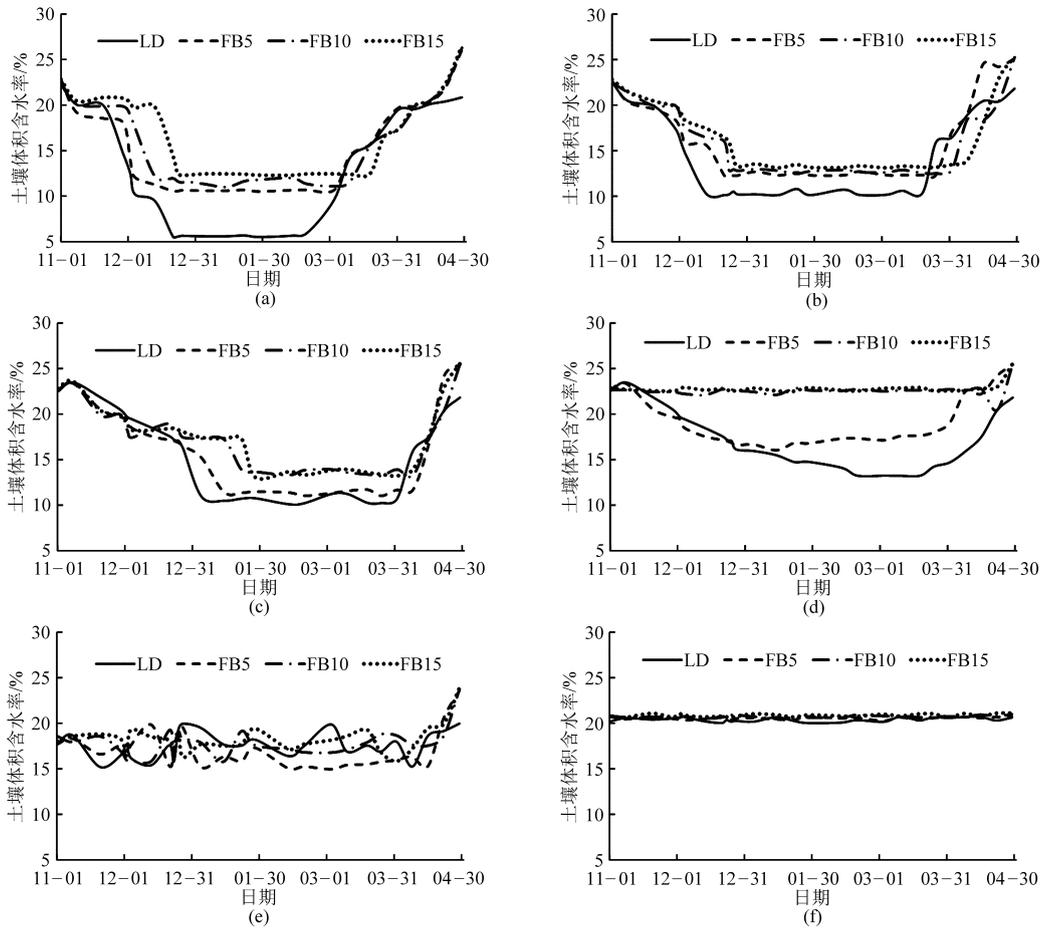


图 1 不同秸秆覆盖处理土壤液态含水率变化曲线

Fig.1 Soil liquid moisture change curve under different straw mulching conditions

(a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm (d) 100 cm (e) 140 cm (f) 180 cm

由图1可知,在试验期内,除100、140、180 cm土壤深度外,不同覆盖处理条件下各深度土壤液态含水率均呈现出先减小后增加的趋势,且液态含水率减小和增大的时间拐点不仅随着土壤深度的增加而延迟,而且随着秸秆覆盖厚度的增加而延迟。产生这种现象的原因主要有两点:一方面与土壤的冻融过程有关,另一方面与秸秆覆盖的保温作用有关。试验初期,随着土壤的冻结,由于受土质、外界条件和冻融历史的影响,相应深度仅部分液态水逐渐冻结为固态冰^[14],从而引起对应深度土壤液态含水率的降低;试验末期,随着气温的升高,已冻结土壤不断融化,土壤中的固态冰再次转化为液态水。因此可以间接的根据土壤中液态含水率减小和增加的时间拐点,判断土壤的冻结和融化深度。

土壤冻结期,由于气温下降较快,在负积温不断增加的影响下,各地块土壤温度开始下降,土壤中的热量以辐射形式散失至空气中。而秸秆覆盖和积雪的存在,阻碍了大气与土壤之间的热交换过程,且秸秆覆盖厚度不同,热量散失的速度也不尽相同,进而会导致相同深度不同厚度秸秆覆盖条件下液态含水率减小的时间拐点呈现出差异性。对于20 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率减小的时间拐点比处理LD分别延迟约3、5、10 d;40 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率减小的时间拐点比处理LD分别延迟约5、8、12 d;60 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率减小的时间拐点比处理LD分别延迟约8、12、16 d。冻土融化期,随着大气温度的升高,各处理地块土壤温度逐步回升,热交换过程主要表现为大气中热量向土壤中扩散,而由于秸秆覆盖的存在再次阻碍了大气与土壤间的热交换,导致液态含水率增加的时间拐点呈现差异性变化。对于20 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率增加的时间拐点比处理LD分别延迟约4、5、10 d;40 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率增加的时间拐点比处理LD分别延迟约4、9、11 d;60 cm深度,处理FB5、FB10、FB15液态含水率增加的时间拐点比处理LD分别延迟约9、1、1 d。可见,秸秆覆盖的存在,使0~60 cm土层内液态含水率增加或减小的时间拐点发生延迟,随着秸秆覆盖厚度的增加其延迟效果更明显,但土壤冻结期的延迟效果比冻土融化期更为明显。这主要是由于土壤冻结期存在稳定积雪覆盖,而冻土融化期融雪水入渗导致边界条件发生改变而引起的。

试验观测得知,自然状态下试验期内土壤的最大冻结深度为110 cm,100 cm深度土壤液态含水率只有LD、FB5处理呈现出先减小后增加的趋势,

FB10、FB15与140、180 cm各覆盖处理下土壤液态含水率波动幅度均不明显,最大波动幅度不超过2%。可见,FB10和FB15处理在100 cm深度处均未发生冻结,且秸秆覆盖对140、180 cm深度土壤液态含水率的影响比较微弱。

另由图1可知,冻土融化初期,20、40、60 cm深度自然无覆盖处理土壤液态含水率均高于其他各秸秆覆盖处理,而融化末期均小于其他各秸秆覆盖处理。产生这一现象的原因主要有两点:一方面,冻土融化初期,秸秆覆盖处理与自然无覆盖处理相比,改变了土壤与大气的界面层状况,在土壤表面设置了一道物理阻隔层^[15],降低了融雪水的入渗速率,增加了融雪水的入渗时间,进而阻碍了融雪水的入渗,导致自然无覆盖处理在20、40、60 cm土壤深度出现了短暂的液态含水率峰值;另一方面,冻土融化后期,积雪融水通过秸秆间的空隙进入土壤中,增加了土壤含水率,而春季试验区风速较大(平均风速4.4 m/s),增大了土壤的蒸发强度,由于春季无作物种植,土壤水分的散失以地表蒸发为主,秸秆覆盖的存在阻碍了大气与土壤间的水热传输与扩散,抑制了土壤水的蒸发,从而使试验末期各处理20、40、60 cm土壤深度液态含水率均高于自然无覆盖处理。由此可知,秸秆覆盖的存在对于土壤墒情的增加具有非常重要的意义。

2.2 秸秆覆盖对季节性冻融期土壤液态含水率统计特征参数的影响

2.2.1 统计特征参数

为了进一步揭示不同覆盖处理土壤液态含水率的差异性,根据数理统计学的知识,可以采用极差 K_a 和变异系数 C_v 来反映土壤液态含水率的变化程度^[16],其计算式为

$$K_a = x_{\max} - x_{\min} \quad (1)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中 x_{\min} ——各处理某一土壤深度液态含水率的最小值,%

x_{\max} ——各处理某一土壤深度液态含水率的最大值,%

\bar{x} ——各处理某一土壤深度液态含水率的平均值,%

σ ——各处理某一土壤深度液态含水率的均方差

从统计学的角度看,极差 K_a 反映了试验数据的变化幅度, K_a 越大表明冻融期土壤液态含水率的变幅越大,反之亦然;变异系数 C_v 由于消除了测量尺度和量纲的影响,可以更加客观地反映一组序列的

离散变异程度, C_v 越大表明冻融期土壤液态含水率的差异性越大, 反之亦然。

2.2.2 冻融期土壤液态含水率的统计学特征

根据式(1)和式(2)分别计算各处理不同土层深度液态含水率的 K_a 和 C_v , 见表2。

表2 不同秸秆覆盖处理土壤液态含水率差异性分析

Tab.2 Variation of soil liquid moisture under different straw mulching conditions

处理	统计特征参数	土壤深度/cm						均值
		20	40	60	100	140	180	
LD	$K_a/\%$	17.01	12.38	11.37	10.24	3.40	0.27	9.11
	C_v	0.52	0.32	0.22	0.18	0.04	0.004	0.21
FB5	$K_a/\%$	15.58	12.87	10.40	9.40	4.12	0.19	8.76
	C_v	0.33	0.28	0.20	0.14	0.04	0.002	0.17
FB10	$K_a/\%$	15.30	12.79	12.26	5.05	5.05	0.20	8.44
	C_v	0.29	0.24	0.19	0.03	0.04	0.002	0.13
FB15	$K_a/\%$	14.26	12.21	12.50	3.04	3.21	0.19	7.57
	C_v	0.27	0.23	0.18	0.03	0.03	0.003	0.12

在土壤垂直剖面上, 随着深度的增加土壤受外界环境影响逐渐减弱^[16], 当有秸秆覆盖时, 可以减弱不同深度土壤水之间的能量交换。已有研究表明, 土壤深度越大, 土层平均含水率的变幅越小^[17]。由表2可知, 随着土壤深度的增加, 各处理的 K_a 和 C_v 均呈现出减小的趋势; 当土壤深度超过 100 cm 时, 各处理条件下土壤液态含水率的 C_v 相差较小 (LD、FB5、FB10、FB15 分别为 0.004 ~ 0.18、0.002 ~ 0.14、0.002 ~ 0.03、0.003 ~ 0.03), 表明土壤深度超过 100 cm 以后, 土壤液态含水率变化甚微; 随着秸秆覆盖厚度的增加, 同一土壤深度处 K_a 和 C_v 也呈现出减小的趋势。当秸秆覆盖为 10、15 cm 时, 各深度土壤液态含水率的 C_v 相差较小, 同一深度最大差值仅为 0.01。表明, FB10 和 FB15 土壤液态含水率变化甚微, 整体上由各处理 C_v 的均值也可以看出。

另由表2可知, 0 ~ 60 cm 深度土壤液态含水率受外界环境干扰比较明显, 各处理的 C_v 均大于 0.18, 尤其是 LD 处理的 20 cm, 其 C_v 达到了 0.52。但秸秆覆盖的存在在较大程度上平抑了土壤液态含水率的变化, 与 LD 处理的 20 cm 相比, FB5、FB10、FB15 处理的 20 cm 分别下降了 36.5%、44.2%、48.1%; 与 LD 处理的 40 cm 相比, FB5、FB10、FB15 处理的 40 cm 分别下降了 12.5%、25.0%、28.1%; 与 LD 处理的 60 cm 相比, FB5、FB10、FB15 处理的 60 cm 分别下降了 9.1%、13.6%、18.2%。

可见, 秸秆覆盖可有效平抑冻融期 0 ~ 60 cm 土层土壤液态含水率的变化幅度, 且随着深度的增加其平抑效果具有减弱趋势。其中, 10 cm 较 5 cm 秸秆覆盖处理平抑效果明显, 10 cm 与 15 cm 秸秆覆盖

处理平抑效果相似。

2.3 秸秆覆盖的蓄水保墒作用

对于北方高寒区, 整个冬季无作物种植, 土壤处于休整期, 翌年 4 月末开始耕种, 且耕种前不灌溉。因此, 此时的土壤墒情对于作物种子的发芽和出苗具有重要的意义。根据试验观察, 2014-04-30 土壤已全部融通, 即土壤冻结过程中的固态冰已全部转化为液态水, 此时的液态含水率可代表土壤墒情。2014-04-30 不同处理下 0 ~ 60 cm 土层土壤液态含水率如表3所示。

表3 不同覆盖处理各深度土壤体积分含水率

Tab.3 Soil volumetric moisture content of different depths under different straw mulching conditions %

土壤深度/cm	LD	FB5	FB10	FB15
20	20.85	26.10	26.30	26.56
40	21.82	25.12	25.26	25.33
60	21.85	25.43	25.52	25.55

由于秸秆覆盖对于土壤含水率的影响具有一定的深度限制, 且 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率对于作物生长发育比较重要, 因此, 此处只对 0 ~ 60 cm 土层土壤液态含水率进行对比分析。由表3可知, 与自然无秸秆覆盖相比, 不同秸秆覆盖处理在试验末期均能有效增加土壤含水率, 其中: FB5 处理可分别增加 20、40、60 cm 土壤含水率 5.25%、3.30%、3.58%; FB10 可分别增加 20、40、60 cm 土壤含水率 5.45%、3.44%、3.67%; FB15 可分别增加 20、40、60 cm 土壤含水率 5.71%、3.51%、3.70%。可见, 秸秆覆盖对 0 ~ 60 cm 土层具有一定的增墒能力。产生这一现象的主要原因为, 每年春季, 研究区风速较大, 经常发生“春旱”, 而秸秆覆盖阻碍了大气与土壤的接触, 减小了春季因土壤蒸发所带走的土壤墒情^[18]。

3 结论

(1) 秸秆覆盖能够延迟 0 ~ 60 cm 土层内液态含水率增加或减小的时间拐点, 随着秸秆覆盖厚度的增加其延迟效果越明显, 但土壤冻结期的延迟效果比冻土融化期明显; 秸秆覆盖能够阻碍冻土融化初期融雪水入渗、抑制冻土融化末期土壤水蒸发, 对于土壤墒情的增加具有非常重要的意义。

(2) 随着土壤深度的增加, 各处理土壤液态含水率的极差 K_a 和变异系数 C_v 均呈现出减小趋势; 当土壤深度超过 100 cm 时, 各处理土壤液态含水率变化甚微; 当秸秆覆盖大于等于 10 cm 时, 各深度土壤液态含水率的变化甚微。秸秆覆盖可有效平抑冻融期 0 ~ 60 cm 土层土壤液态含水率的变化幅度, 且随着深度的增加其平抑效果具有减弱趋势。

(3) 积雪融水和秸秆覆盖的双重作用可有效增加土壤墒情,但其增墒能力随着土壤深度的增加而降低,不同秸秆覆盖厚度对0~60 cm土层的平均增墒能力由大到小排序依次为:15、10、5 cm。

参 考 文 献

- 于爱忠, 黄高宝, 柴强. 不同耕作措施对西北绿洲灌区冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 273-278.
Yu Aizhong, Huang Gaobao, Chai Qiang. Effect of different tillage treatment on soil respiration of winter-wheat farmland in oasis irrigated area Northwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 273-278. (in Chinese)
- 姚付启, 蔡焕杰, 王海江, 等. 基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 173-180.
Yao Fuqi, Cai Huanjie, Wang Haijiang, et al. Monitoring winter wheat percentage vegetation cover based on stationary wavelet transformation derived from hyperspectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 173-180. (in Chinese)
- 赵永来, 陈智, 孙悦超, 等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 38-42, 37.
Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 38-42, 37. (in Chinese)
- 王增丽, 冯浩, 余坤, 等. 轮作条件下秸秆施用方式对农田水分及作物产量的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 114-119.
Wang Zengli, Feng Hao, Yu Kun, et al. Effects of different straw utilization on farmland moisture and crop yield with rotation of summer maize and winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 114-119. (in Chinese)
- David Badia, Clara Marti. Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro valley, NE Spain[J]. Arid Land Research and Management, 2000, 14(3): 219-232.
- Zhang Qingtao, Wang Shiping, Li Li, et al. Effects of mulching and sub-surface irrigation on vine growth, berry sugar content and water use of grapevines[J]. Agricultural Water Management, 2014, 143: 1-8.
- 崔凤娟, 李立军, 刘景辉, 等. 免耕留茬覆盖对土壤呼吸和土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 147-153.
Cui Fengjuan, Li Lijun, Liu Jinghui, et al. No-tillage stubble with residues on soil respiration and the soil enzyme activity and nutrient influence[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 147-153. (in Chinese)
- 秦嘉海. 免耕留茬秸秆覆盖对河西走廊荒漠化土壤改土培肥效应的研究[J]. 土壤, 2005, 37(4): 447-450.
Qin Jiahai. Effects of non-tillage and mulching on soil building of desertified soil in the hexi corridor[J]. Soils, 2005, 37(4): 447-450. (in Chinese)
- 母彩霞, 张维江. 青铜峡灌区冬季储水灌溉越冬期土壤水分变化[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 86-88.
Mu Caixia, Zhang Weijiang. Research on soil moisture variation of winter storage irrigation during winter season in Qingtongxia irrigation area[J]. Yellow River, 2014, 36(4): 86-88. (in Chinese)
- 高泽永, 王一博, 刘国华, 等. 多年冻土区活动层土壤水分对不同高寒生态系统的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1002-1010.
Gao Zeyong, Wang Yibo, Liu Guohua, et al. Response of soil moisture within the permafrost active layer to different alpine ecosystems[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1002-1010. (in Chinese)
- 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2326-2332.
Li Lingling, Huang Gaobao, Zhang Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2326-2332. (in Chinese)
- Stipesevic B, Kladvik E J. Effects of winter wheat cover crop desiccation times on soil moisture, temperature and early maize growth[J]. Plant Soil and Environment, 2005, 51(6): 255-261.
- Li Haidong, Shen Weishou, Zou Changxin, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 479: 215-225.
- 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- 员学锋, 吴普特, 汪有科, 等. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 22-26.
Yuan Xuefeng, Wu Pute, Wang Youke, et al. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 22-26. (in Chinese)
- 陈军锋, 郑秀清, 秦作栋, 等. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 102-110.
Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Qin Zuodong, et al. Effects of maize straw mulch on spatiotemporal variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 102-110. (in Chinese)
- 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱山区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
He Qihua, He Yonghua, Bao Weikai. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 149-156. (in Chinese)
- 吴庆华, 张薇, 蔺文静, 等. 秸秆覆盖条件下土壤水动态演变规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 76-82.
Wu Qinghua, Zhang Wei, Lin Wenjing, et al. Study on soil water dynamics evolution law under straw mulching condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 76-82. (in Chinese)