

秋耕对北疆季节性冻融期土壤热状况的影响

孙开^{1,2}, 王春霞^{1,2}, 蓝明菊¹, 梁飞³

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;

2.石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000;3.新疆农垦科学院,新疆 石河子 832000)

摘要:为明确秋耕对季节性冻融土壤热状况的调控作用,对比分析了翻耕(FG)、免耕(MG)、垄沟(LG)、翻耕活性炭覆盖(FH)和翻耕秸秆覆盖(FJ)5种处理对土壤温度、冻融循环以及土壤温度梯度等影响的差异。结果表明:与传统 FG 处理相比,MG、LG、FH、FJ 处理均减弱了土壤温度与气温的相关性,降低了整个冻融期土壤温度的升、降温幅度和不同冻融阶段土壤温度昼夜变化的变异性程度,维持土壤温度序列稳定的能力 $FJ > FH > LG > MG$ 。FG 处理最先冻结和融化,其余处理延缓土壤冻结和融化速度的效果为 $FJ > FH > LG > MG$,且冻结速度和融化速度越小,冻融交替越频繁,冻融循环次数越大。各处理土壤温度梯度与气温均呈极显著的相关关系($P < 0.01$),相关性程度为 $FG > LG > MG > FH > FJ$,与土壤贮水量均呈极显著的负相关关系($P < 0.01$),相关性程度为 $FJ > FH > LG > MG > FG$,MG、LG、FH、FJ 处理均加强了土壤水热资源的保持,其中翻耕秸秆覆盖和翻耕活性炭覆盖促进了深层土壤热量上移,更有利于改善季节性冻融期间土壤的水热状况,维持北疆春播土壤墒情。

关键词:秋耕;季节性冻融期;热状况;北疆

中图分类号:S152.7;TV93

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0063-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.05.010

Effect of Autumn Tillage on Soil Thermal Conditions During the Seasonal Freeze-thaw Period in the North Xinjiang

SUN Kai^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2}, LAN Mingju¹, LIANG Fei³

(1.College of Water & Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000;

2.Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi

University, Shihezi, Xinjiang 832000; 3.Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to investigate the effect of autumn tillage on the regulation of seasonal freeze-thaw soil thermal conditions, this study compared and analyzed the effects of the five treatments: Traditional tillage (FG), no-tillage (MG), ridge-furrow (LG), tillage followed by activated carbon mulching (FH), and tillage followed by straw mulching (FJ), on soil temperature, freeze-thaw cycles and soil temperature gradients. The results showed that compared with the FG, MG, LG, FH and FJ treatments all weakened the correlation between soil temperature and air temperature, reduced the dynamic magnitude of soil temperature throughout the freeze-thaw period and the degree of diurnal variability of soil temperature at different freeze-thaw stages, and maintained the stability of the soil temperature sequence as $FJ > FH > LG > MG$. The FG was the first to freeze and melt, and the remaining treatments delayed the effect of soil freezing and melting rate as $FJ > FH > LG > MG$. And the smaller the freezing and melting rates, the more frequent the freeze-thaw alternation and the greater the number of freeze-thaw cycles. The soil temperature gradient of all treatments showed a highly significant correlation with air temperature ($P < 0.01$), and the degree of correlation was $FG > LG > MG > FH > FJ$. All treatments showed a highly significantly negative correlation with soil water storage ($P < 0.01$), and the degree of correlation was $FJ > FH > LG > MG > FG$. MG, LG, FH, and FJ treatments all enhanced the retention of soil water and heat resources, in which FJ and FH promoted the upward movement of deep soil

收稿日期:2021-03-23

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404304);国家自然科学基金项目(U1803244)

第一作者:孙开(1996—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:528713423@qq.com

通信作者:王春霞(1979—),女,博士,副教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:410443356@qq.com

heat, which was more conducive to improving soil water and heat conditions during seasonal freezing and thawing and maintaining soil moisture in spring sowing in the north Xinjiang.

Keywords: autumn tillage; seasonal freeze-thaw period; thermal conditions; the north Xinjiang

土壤热状况是土壤墒情的重要表征之一,是作物生长发育不可或缺的重要因子。冻融过程会改变土壤的物理性质和热量分布,并对春播作物的播种、出苗以及产量造成一定影响^[1-3]。此外,秋耕作为冻融期间恢复地力的主要措施,会改变地气之间热量的动态迁移过程^[4]。因此,自然冻融过程和不同秋耕模式联合作用下土壤热状况如何变化,是一个值得深入探讨的科学问题。

目前,国内外学者^[5-6]对不同下垫面条件下冻融土壤的热状况做了大量的试验研究和理论分析,结果表明,土壤耕作和覆盖会改变土壤的地表状况和热流状态,进而对土壤热状况产生一定的影响。在不同土壤耕作方式对冻融土壤热状况影响的研究方面,陈学文等^[7]和 Li 等^[8]研究发现,秋翻通过破坏土壤结构增大孔隙促进融化期土壤升温;陈继康等^[9]研究发现,免耕提高冻结期土壤的平均温度,但不利于融化期土壤升温,推迟冬小麦的出苗和分蘖。在不同覆盖措施对冻融土壤热状况影响的研究方面,付强等^[10]研究发现,冻结期积雪覆盖阻碍土壤热量的双向运动,减小土壤温度的变化幅度,有利于保持地温;马梓晔^[11]和李娜娜等^[12]研究发现,秸秆覆盖等对冻融土壤有较好的“增降温”双重作用,即冻结期起到增温作用,融化期起到降温抑制蒸发作用;侯贤清等^[13]研究发现,耕作方式结合地面覆盖能有效调控土壤水热环境,实现作物增产增效。可见,耕作、地表覆盖等秋耕方式调

控土壤热状况的优势已经被普遍认可。

北疆作为典型的季节性冻土区,冬季漫长,降雪量大,绿洲农田土壤热状况受气候变化影响明显。本文以石河子灌区棉田为研究对象,该灌区常年通过秋季翻耕将棉根旋出以便于春播覆膜和消灭一部分病虫害,但也增加了土壤水热资源流失的风险,不利于农业生产。因此,掌握秋耕模式对季节性冻融期土壤热状况的调控规律,可以为后续研究季节性冻融期土壤水、肥、盐的迁移、转化过程提供前置条件,并为本灌区选择适合的秋耕模式调控冻融土壤墒情提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 11 月 10 日至 2020 年 4 月 10 日在石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室基地(85°57′49″E,44°19′28″N)进行。该地区属温带大陆性干旱气候,夏季短暂少雨而蒸发量大,冬季漫长且降雪丰富,无霜期 170 天,土地均为季节性冻土,11 月中上旬开始冻结,翌年 4 月中上旬土壤完全解冻,最大冻结深度可达 1.5 m。试验期内 11 月开始降雪,最大积雪厚度达 30 cm,翌年 3 月下旬积雪完全融化(图 1)。试验站 0—100 cm 土层平均干容重为 1.67 g/cm³,土壤质地为壤土,土壤砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 48.20%,39.12%,12.68%,土壤饱和含水量(质量含水量)为 28.8%,田间持水量为 21.6%,地下水埋深 9 m 以下。

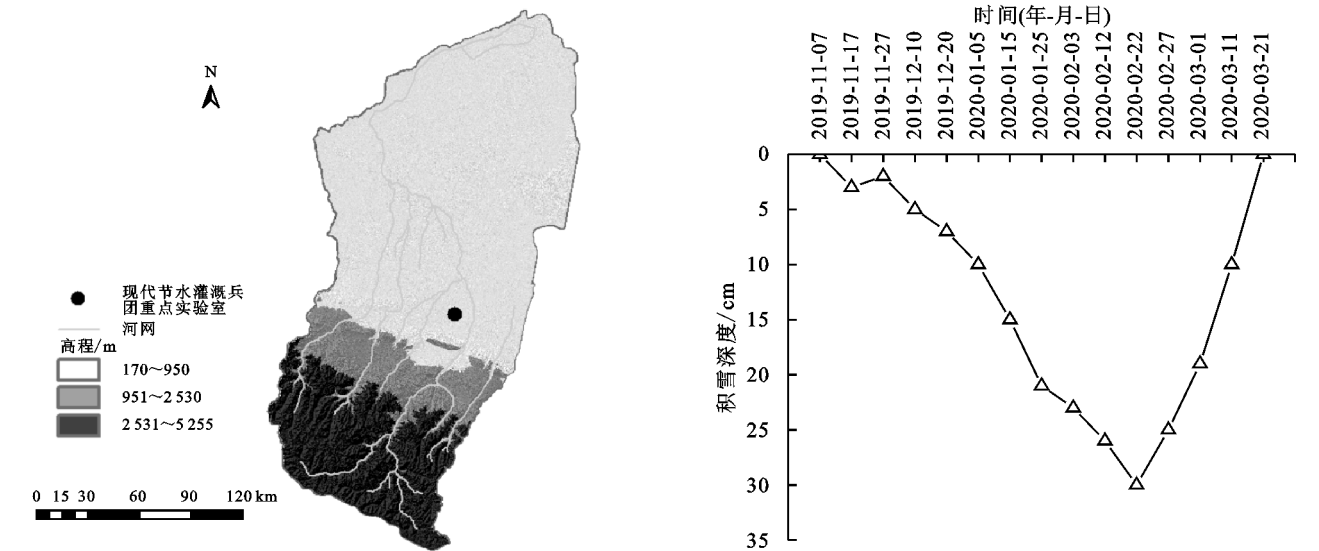


图 1 试验区位置与积雪深度变化

1.2 试验方案

试验分为 15 个 2 m×2 m 的小区,每个小区周

围挖深 60 cm 并用 PVC 板紧贴内壁进行阻隔,相邻小区间距为 40 cm。该试验设置翻耕(FG)、免耕

(MG)、垄沟(LG)、翻耕秸秆覆盖(FJ)、翻耕活性炭覆盖(FH)5 种处理,各重复 3 次。翻耕处理是按照新疆秋耕标准将 0—28 cm 土层铲起、松碎并翻转入坑。免耕处理是将土壤保持原状。垄沟处理通过交替挖沟和起垄达到冬季蓄雪增温,春季汇流保水的作用,沟深 20 cm,宽 40 cm,垄高 20 cm,宽 60 cm。秸秆覆盖是将棉秆切成长度为 3~5 cm 短杆,均匀且密实的铺在试验小区上,覆盖厚度为 15 cm,覆盖量为 2.5 kg/m²。活性炭是棉秆经过不充分燃烧后加水冷却所形成的大孔隙、小颗粒状炭粒,将其均匀铺撒在试验小区,形成 5 cm 的覆盖层,覆盖量为 1.5 kg/m²。秸秆覆盖与活性炭制备所需棉秆均来自当年试验场所种植的棉花。

1.3 测定项目

1.3.1 气象资料的测定 试验过程中的气象资料通过试验站小型气象站台和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取,包含逐小时气温和降雪等气象要素。

1.3.2 积雪深度的测定 降雪前于试验田选择平整地面埋设一量程为 100 cm 的钢尺,自降雪日开始每隔 10 天记录 1 次积雪深度,直至积雪完全融化。

1.3.3 土壤温度的测定 通过埋设纽扣式温度记录仪来自动记录,各处理分别于 10,25,40,60 cm 土层各埋设 1 个纽扣式温度记录仪,每隔 1 h 测定 1 次土壤温度数据,试验结束后取出并导出温度数据。

1.3.4 土壤含水率的测定 在每个小区选取 1 个取样点进行土钻取样,取样深度为 10,25,40,60 cm,用烘干法测定质量含水率,各处理取 3 组数据的平均值为最终含水率。

1.3.5 土壤温度梯度的计算 参照王红丽等^[14]的计算方法,土壤温度梯度计算公式为:

$$\text{Gra} = \frac{\partial T}{\partial Z} \approx \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta Z_1} + \frac{\Delta T_2}{\Delta Z_2} + \frac{\Delta T_3}{\Delta Z_3} \right) / 3 \quad (1)$$

式中:Gra 为土壤温度梯度(°C/m); T 和 Z 分别为 2 个土层之间的温度差(°C)和深度差(m);1~3 为第 1~3 个温度和深度的差值。2 个土层之间的温度差 $\Delta T_1 = T_{25} - T_{10}$, $\Delta T_2 = T_{40} - T_{25}$, $\Delta T_3 = T_{60} - T_{40}$, T_{10} 、 T_{25} 、 T_{40} 、 T_{60} 分别为 10,25,40,60 cm 的土壤温度; $\Delta Z_1 = 0.15$ m, $\Delta Z_2 = 0.15$ m, $\Delta Z_3 = 0.2$ m。

1.3.6 土壤贮水量的计算 参照银敏华等^[15]土壤贮水量的计算公式:

$$W = 10 H_i \rho_i B \quad (2)$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); i 为土层编号; H 为第 i 土层深度(cm); ρ 为第 i 土层土壤干容重(g/cm³); B 为土壤质量含水率(%)。

1.3.7 冻融循环次数的计算 通常根据土壤日最高和日最低温度是否高于 0 °C 来判断土壤是否存在冻

融日循环,土壤从 0 °C 以上降温至 0 °C 以下或者从 0 °C 以下升温至 0 °C 以上即为 1 次冻融循环。

1.4 数据处理与分析

通过 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理,通过 SPSS 26.0 软件进行数据分析,采用 Origin 2018 软件和 ArcGIS 10.2 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同秋耕处理下冻融土壤温度的时间尺度变化特征

2.1.1 土壤温度的月尺度变化特征 土壤温度变化主要受气温变化的影响,当气温低于 0 °C 时,水分开始冻结,同理当土壤温度低于 0 °C 时,土壤发生冻结。气温对土壤温度的影响随土层深度的加深而减小,根据 10 cm 土层的土壤温度将 5 种秋耕处理的土壤冻融阶段分为 3 个时期:冻结前期、稳定冻结期和融化期。由图 2 可知,土壤温度与气温均呈先波动下降后上升的“U”形变化趋势,但随着土层深度的加深,土壤温度的波动幅度越来越小于气温,到达最低温度的时间也越来越滞后。FG 处理 10 cm 土层于 2020 年 1 月 10 日最早到达最低温度(-9.42 °C),而 MG、LG、FH 和 FJ 处理分别延后 2,5,9,13 天到达最低温度-7.40,-6.88,-5.63,-4.88 °C,降温幅度由大到小分别为 FG(10.82 °C)、MG(9.08 °C)、LG(8.03 °C)、FH(6.96 °C)、FJ(6.16 °C)。相比于 FG 处理,其余各处理均不同程度地抑制了土壤的降温过程,起到了保温作用,冻结过程的保温作用 FJ>FH>LG>MG>FG。各处理在达到最低温度之后土壤温度开始波动回升,增温幅度由大到小分别为 FG(22.68 °C)、MG(21.28 °C)、LG(20.14 °C)、FH(19.04 °C)、FJ(15.40 °C),其中 FJ 处理明显抑制了土壤的升温过程,这是由于秸秆覆盖导热率低,阻碍了外界热量向土层传输所致。

2.1.2 土壤温度的日尺度变化特征 为了进一步分析各处理土壤温度的日尺度变化特征以及与气温的响应关系,在 10 cm 土层选择不同的特征日进行分析,不同冻融阶段的气温和各处理 10 cm 土层温度日变化过程见图 3。

结合图 3 和表 1 可知,各处理不同冻融阶段土壤温度的昼夜变化存在较大差异。冻结前期,FG 处理于 9:00 最早到达谷值-1.05 °C,于 16:00 最早到达峰值 1.7 °C。其余各处理均滞后了到达谷值和峰值的时间,于 10:00—12:00 先后达到谷值-0.40,-0.40,-0.15,-0.10 °C,滞后时间 FJ>FH>LG>MG,于 17:00—19:00 先后达到峰值 1.00,0.15,0.45,0.30 °C,滞后时间 FJ>FH>LG>MG;各处理振幅由大到小分别为 FG(1.38 °C)、MG(0.70 °C)、FH(0.30 °C)、LG(0.28 °C)、FJ(0.20 °C),变异系数除 FJ 处理为中

等变异外其余处理均为强变异;FG 和 MG 处理土壤温度与气温的相关性系数较高,而 LG、FH 和 FJ 处理相关性系数较低,均减弱了土壤温度和大气温度之间的响应程度,减弱程度 FJ>FH>LG。

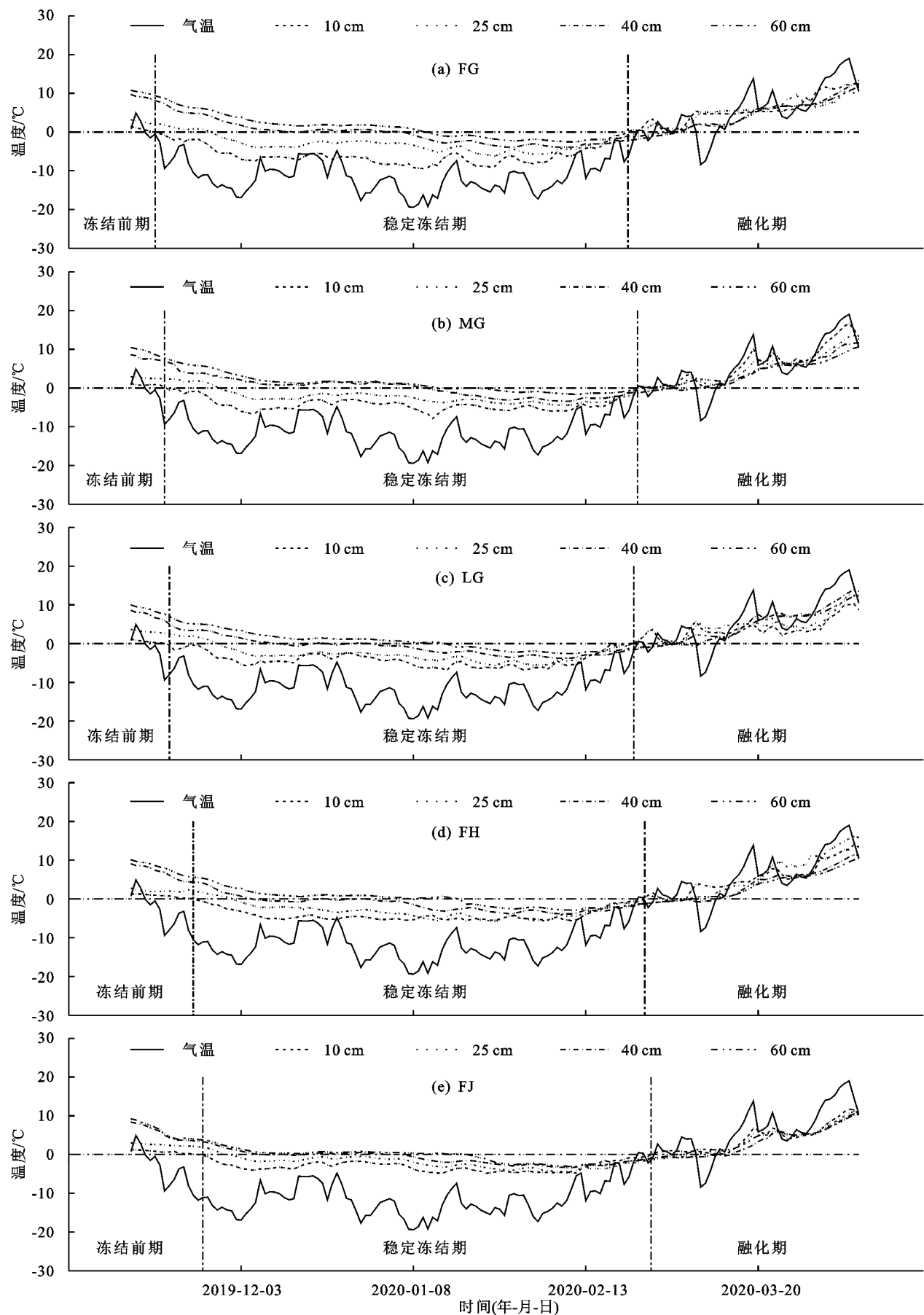


图 2 冻融期各处理不同土层土壤日平均温度变化曲线

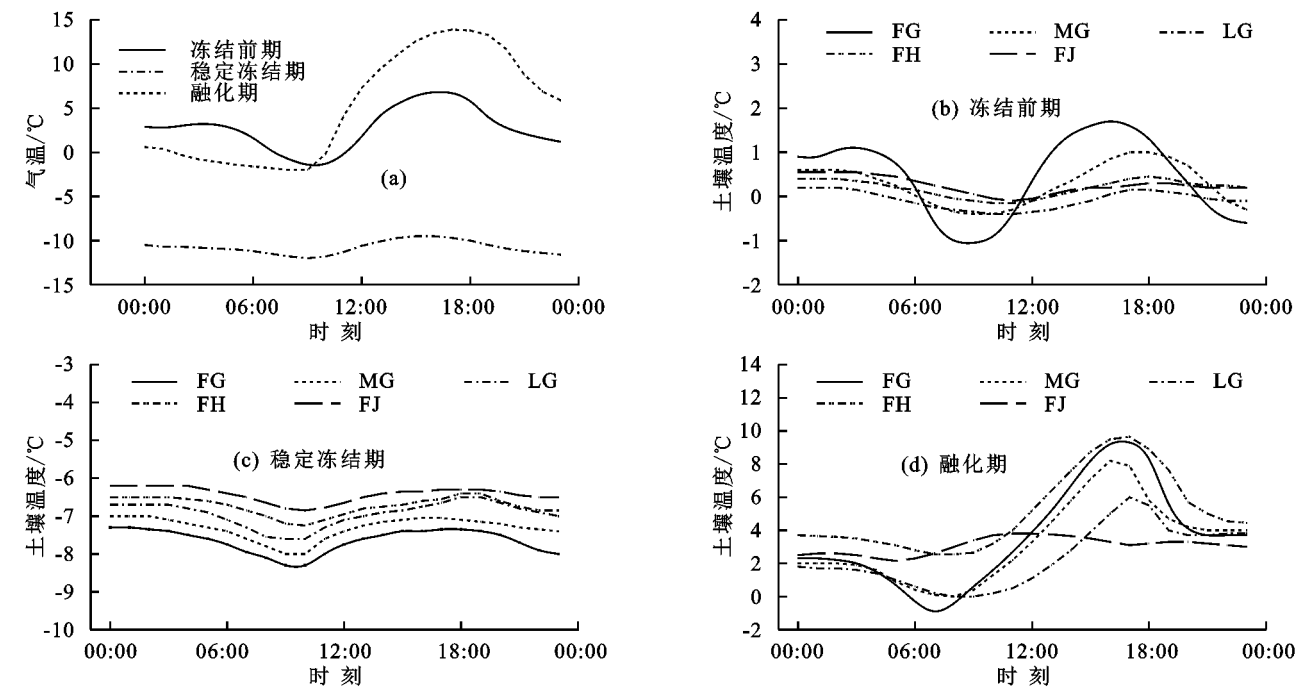


图3 各处理不同冻融阶段土壤温度与气温的日变化曲线

稳定冻结期,全天气温均处于低温状态,因此各处理之间温度变化趋势的差距并不明显;各处理土壤温度的变异系数均为弱变异且与气温的相关性均较高,说明不同秋耕处理对于土壤温度的调控能力逐渐趋于一致。融化期各处理到达谷值和峰值的时间与冻结前期基本一致,振幅由大到小分别为 FG(5.10℃)、MG(4.10℃)、FH(3.22℃)、LG(3.00℃)、FJ(2.60℃),变异系数 FG>MG>LG>FH>FJ 且均为中等变异;FH 和 FJ 处理明显减小了土壤温度与气温的相关性系数,说明地面覆盖减弱了土壤温度与气温之间的响应程度。

2.2 不同秋耕处理对冻融土壤温度梯度的影响

2.2.1 土壤温度梯度变化特征 土壤温度梯度是描述土壤热量传输强度的一个重要指标,它反映了土壤单位垂直距离内的温度变化,且热量传递的方向与土壤温度阶梯的方向相反。由图 4 可知,冻结期,各处理土壤温度梯度均为正值,热量由土壤深层向土壤表层传输,土壤热量向外散失;MG、LG、FH 和 FJ 处理相比于 FG 处理土壤温度梯度由正值变为负值的时间节点分别提前了 1,3,5,8 天,均缩短了土壤热量散失的持续时间;各处理热量散失强度从大到小分别为 FG(15.60℃/m)、MG(12.07℃/m)、LG(11.53℃/m)、FH(9.07℃/m)、FJ(7.54℃/m)。融化期,各处理热量吸收强度由大到小分别为 FG(9.17℃/m)、LG(6.23℃/m)、MG(5.82℃/m)、FH(2.38℃/m)、FJ(0.79℃/m),FH 和 FJ 由于地表覆盖的存在,阻碍了外界热量向土壤内部的传输,但在部分时间 FH 和 FJ 温度梯度为正值,促进了深层热量向上传输,同

样为作物春播提供了良好的热量条件。

表1 各处理不同冻融阶段土壤温度日变化过程的统计特征

处理	冻结前期		稳定冻结期		融化期	
	R^2	CV	R^2	CV	R^2	CV
FG	0.89	200	0.86	8	0.87	84
MG	0.81	167	0.83	7	0.88	75
LG	0.57	125	0.80	4	0.66	58
FH	0.50	103	0.77	3	0.54	36
FJ	0.41	78	0.70	2	0.43	17

注: R^2 为 10 cm 土壤温度与大气温度的相关性系数;CV 为变异系数, $CV \leq 10$ 为弱变异性, $10 \leq CV \leq 100$ 为中等变异性, $CV > 100$ 为强变异性。

2.2.2 土壤温度梯度与气温的响应特征 为了进一步分析不同的秋耕处理对季节性冻融土壤热量传输影响的差异性,以气温为自变量,各处理土壤温度梯度为因变量,将土壤温度梯度与气温进行多项式拟合(图 4)。各处理土壤温度梯度与气温之间相关性呈极显著($P < 0.01$),其中 FG 处理气温对土壤温度梯度的影响程度最大,两者之间的相关性系数(R^2)为 0.65,说明 FG 处理 65% 的土壤温度梯度变化是由于气温变化造成的。MG 处理与 LG 处理相关性系数相差较小,分别为 0.57 和 0.59,两者 57%~59% 土壤温度梯度变化由气温变化产生,气温变化对土壤温度梯度的影响程度基本趋于一致。FH 和 FJ 处理土壤温度梯度与气温的相关性系数较小,分别为 0.46 和 0.37,这是由于地表覆盖的存在,阻碍了地气之间热量传输的双向过程所致。

2.2.3 土壤温度梯度与土壤蓄水量的响应特征 冻融期间,土壤贮水量随时间整体呈“上升—稳定—上

升—降低”的趋势,各处理之间土壤贮水量差异明显(图5)。土壤水分含量的变化影响土壤的热传输过程,进而改变土壤热状况。为了进一步分析不同秋耕处理下土壤水分对土壤热状况的影响,将土壤贮水量和土壤温度梯度进行线性拟合,结果表明,土壤温度梯度与土壤贮水量呈极显著的负相关关系($P<0.01$),相关性程度 $FJ>FH>LG>MG>FG$ 。相比于 FG 处理,其余处理在

冻结期和融化期均增加了土壤贮水量,贮水量的增加提高了土壤热容量,土壤热量散失、吸收强度均减弱;另外,FG 和 FJ 处理由于地表覆盖的存在阻碍了外界热量的吸收,进而促进了深层土壤热量上移,为春播土壤提供了良好的水热条件。整体而言,地表覆盖、免耕等保护性耕作和垄沟措施对改善土壤水热状况、指导北疆农业生产具有实践意义。

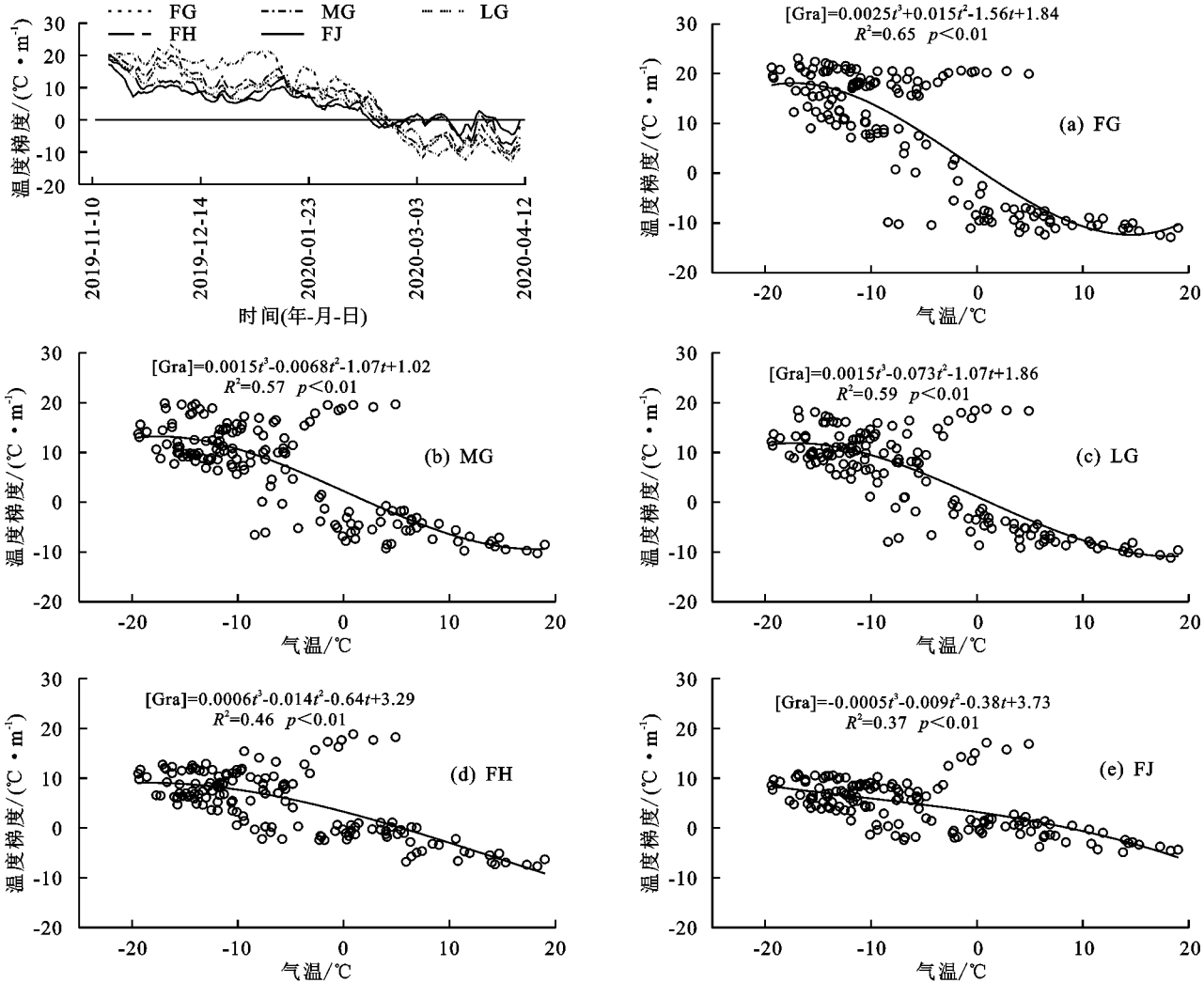


图 4 不同秋耕处理气温对土壤温度梯度的影响

2.3 不同秋耕处理对冻融土壤冻融交替过程的影响

2.3.1 土壤冻结、融化特征 不同秋耕处理作为不同的下垫面条件,改变了地气之间的热交换过程,进而导致土壤的冻融交替过程存在差异。由图 2 可知,各处理 0—60 cm 土层均出现负温,说明 0—60 cm 土层均发生冻结。各处理随着土层深度的加深,土壤进入冻结期的时间逐层滞后。FG 处理 60 cm 土层于 2020 年 1 月 11 日发生冻结,0—60 cm 土层完全冻结历时 60 天,冻结速度为 1.00 cm/d, MG、LG、FH 和 FJ 处理 60 cm 土层冻结的日期分别延后了 2, 4, 9, 11 天,冻结速度分别为 0.97, 0.94, 0.90, 0.84 cm/d。随气温回升,土壤进入融化期,5 种处理下 10, 60 cm 土层要优先于 25, 40 cm 土层开始融化,说明土壤融化

是由两端向中间同时进行的双向过程,直至到达融通面而完全通融。FG 处理土壤最早通融,融化历时为 12 天,融化速率为 5.00 cm/d, MG、LG、FH 和 FJ 处理通融历时分别延长了 2, 3, 5, 7 天,融化速率分别为 4.28, 4.00, 3.53, 3.16 cm/d。

2.3.2 冻融循环特征 由表 2 可知,冻融循环主要发生在融化期。冻结期,各处理冻融循环主要发生在 10 cm 土层, FG 处理和 MG 处理不存在冻融循环过程,这是因为气温骤降使土壤快速进入了冻结期,而 LG 处理因为蓄积了较厚的积雪、FH 和 FJ 处理因为地面覆盖的存在,均起到了保温作用,延缓了土壤的降温冻结过程,从而增加了土壤的冻融循环次数。融化期,各处理冻融循环过程主要发生在 10, 25 cm 土层,且冻融循环

次数随土层加深而减小,各处理两土层冻融循环次数的大小均为 FJ>FH>LG>MG>FG,FJ、FH 和 LG

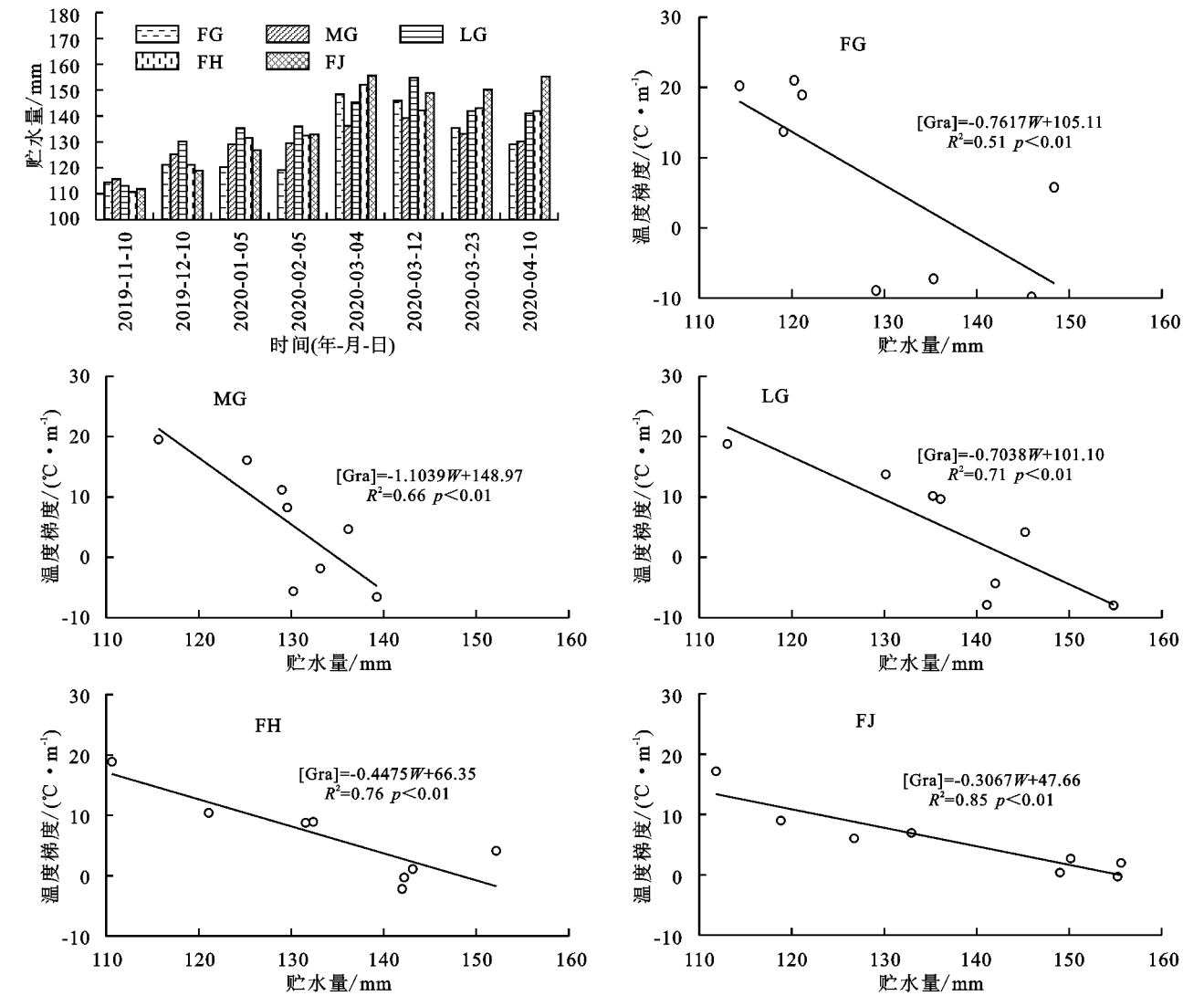


图 5 不同秋耕处理土壤贮水量对土壤温度梯度的影响

表 2 各处理下不同土层的冻融循环次数

单位:次

处理	冻结期				融化期			
	10 cm	25 cm	40 cm	60 cm	10 cm	25 cm	40 cm	60 cm
FG	0	1	0	1	3	1	1	1
MG	0	1	1	1	5	2	1	1
LG	2	1	1	1	9	5	1	1
FH	3	1	1	1	11	7	1	1
FJ	5	2	1	1	16	10	2	1

3 讨论

3.1 不同秋耕处理对季节性冻融土壤温度变化和冻融交替的调控

不同秋耕处理对季节性冻融土壤的温度变化和冻融特性产生了不同程度的影响,进而改变了土壤的热状况。本研究发现,翻耕处理加剧了土壤温度对气温的响应程度,增加了土壤升、降温幅度,同时加快了土壤的冻结和融化速度;其余处理由于免耕和地表覆

处理同样因为地面覆盖等的影响,延缓了土壤的升温解冻过程,增加了土壤的冻融循环次数。

盖等措施阻碍了地气之间的热交换过程,降低了冻融过程中土壤温度与气温的相关性,平抑了土壤温度变化幅度,延缓了土壤的冻结和融化速度,这与前人^[16-18]的研究结果相同。但本研究发现,各处理不同冻融阶段温度变化的变异系数强弱程度均为冻结前期>融化期>稳定冻结期,这与张音等^[19]所提出的融化期是土壤温度变异性最强的阶段存在差异,这可能是北疆受地表积雪的影响,使春季升温速度比冬季降温速度慢的原因所致。另外,本试验条件下,融化期发生冻融循环的土层深度和冻融循环次数均大于冻结期,土壤融化速度大于解冻速度,且冻结速度和融化速度的减小会增加土壤冻融循环的次数,这与刘帅等^[20]的研究结果相符。唐文政等^[21]研究发现,免耕秸秆覆盖和免耕活性炭覆盖对土壤热状况的调控能力优于无覆盖,本试验条件下翻耕秸秆覆盖和翻耕活性炭覆盖在调控土壤温度变化和冻融特性方面同样也表现出了较大的优势,证明了通过地面覆盖缓解

长期翻耕弊端的可行性。

3.2 不同秋耕处理对季节性冻融土壤热量传输的调控

土壤热量传输是土壤热状况的重要影响因素,受多种因素共同影响。气温是引起土壤热量传输变化的重要因子,本文重点研究了不同秋耕处理下季节性冻融土壤温度梯度与气温之间的响应关系发现,翻耕活性炭覆盖和翻耕秸秆覆盖的秋耕方式在冻结期减小了土壤热量散失,在融化期阻碍了外界热量向土壤输入,明显减弱了土壤温度梯度与气温之间的响应程度,这与付强等^[22]的研究结果一致。土壤水分同样对土壤热量传输产生了重要影响,吴芹芹等^[23]研究表明,坡耕地、草地和林地 3 种地类下土壤水分与土壤温度均呈二次函数关系;王红丽等^[14]研究指出,覆膜条件下,土壤温度梯度与土壤湿度梯度在整个冻融期均呈显著的正相关关系。本文研究了 5 种秋耕处理下冻融期土壤贮水量与土壤温度梯度的响应关系发现,二者之间呈极显著的负相关关系,土壤热量散失、吸收强度随贮水量的增加而减小。另外,翻耕活性炭覆盖和翻耕秸秆覆盖的秋耕方式促进了深层土壤热量上移,有效增加了土壤贮水量,更加有利于北疆冻融期土壤水热资源的保持。

4 结论

(1)整个冻融期,土壤温度的变化幅度随土层深度的增加逐渐降低,各处理对 10 cm 土层土壤温度的调控能力最为显著;冻结期,MG、LG、FH 和 FJ 处理的降温幅度相比于 FG 处理分别减小了 4.66,3.86,2.79,1.74 °C,保持地温的能力 $FJ > FH > LG > MG > FG$;融化期,FJ 处理明显降低了土壤的升温幅度。

(2)各处理不同冻融阶段 10 cm 土层土壤温度日变化的统计特征不同。冻结前期和融化期,各处理土壤温度均呈正弦曲线变化,振幅和变异系数大小均为 $FJ < FH < LG < MG < FG$,FJ 处理降低土壤温度离散程度的效果最好;FG 和 MG 处理土壤温度 81%~89% 的变化可归因于气温,土壤温度与气温的相关性较好,LG、FH、FJ 处理减弱了土壤温度与气温之间的相关性,减弱程度为 $FJ > FH > LG$ 。稳定冻结期,各处理土壤温度与气温的相关性均较高,土壤温度的变异程度均为弱变异性,各处理对土壤热状况的调控能力趋于一致。

(3)土壤温度梯度与气温呈极显著的相关性,相关性系数 $FG > LG > MG > FH > FJ$,与土壤贮水量呈极显著的负相关性,相关性系数 $FJ > FH > LG > MG > FG$;冻结期,免耕、地面覆盖以及垄沟措施在减弱土壤温度梯度与气温的响应程度、增加土壤贮水量的同时,减弱了土壤热量的散失强度,有利于土壤水

热资源保持;融化期,翻耕活性炭覆盖和翻耕秸秆覆盖,促进了深层土壤热量向上传输,更有利于改善北疆春播土壤的水热条件。

(4)不同秋耕处理下土壤的冻融交替过程存在差异。相比于 FG 处理,MG、LG、FH 和 FJ 处理延长了 0—60 cm 土层完全冻结和完全融化的时长,冻结速度和融化速度的大小均为 $FJ < FH < LG < MG < FG$;各处理在延缓土壤冻结、融化速度的同时增加土壤的冻融循环次数,土壤冻结、融化速度越小,冻融循环次数越多。

参考文献:

- [1] 李玉洁,王慧,赵建宁,等.耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(3):939-948.
- [2] 常龙艳,戴长雷,商允虎,等.冻融和非冻融条件下包气带土壤墒情垂向变化的试验与分析[J].冰川冻土,2014,36(4):1031-1041.
- [3] 付强,侯仁杰,李天霄,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J].农业机械学报,2016,47(12):99-110.
- [4] 普雪可,吴春花,勉有明,等.不同覆盖方式对旱作马铃薯生长及土壤水热特征的影响[J].中国农业科学,2020,53(4):734-747.
- [5] Liu Q Y, Kan Z G, He C, et al. Effects of strategic tillage on soil physicochemical properties and grain yield in the North China Plain[J].Agronomy,2020,10(8):1-14.
- [6] 梁建财,史海滨,李瑞平,等.秸秆覆盖秋浇后盐渍土壤冻融过程及水盐运移特征[J].水土保持学报,2017,31(5):145-151.
- [7] 陈学文,王农,刘亚军,等.不同耕作处理下冻融对农田黑土硬度的影响[J].水土保持通报,2012,32(6):55-60.
- [8] Li Z, Zhang Q, Yang Q, et al. Yield, water productivity and economic return of dryland wheat in the Loess Plateau in response to conservation tillage practices[J].The Journal of Agricultural Science,2017,155(8):1-15.
- [9] 陈继康,张宇,陈军胜,等.不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征:土壤温度特征及热特性[J].中国农业科学,2009,42(8):2747-2753.
- [10] 付强,侯仁杰,王子龙,等.冻融期积雪覆盖条件下土壤水热交互效应[J].农业工程学报,2015,31(15):101-107.
- [11] 马梓昇.大气—覆被—冻融土壤系统水热能量变化规律及传递机制研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [12] 李娜娜,池宝亮,梁改梅.旱地玉米秸秆地膜二元覆盖的土壤水热效应研究[J].水土保持学报,2017,31(4):248-253.
- [13] 侯贤清,李荣.秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J].农业机械学报,2020,51(12):262-275.
- [14] 王红丽,张绪成,于显枫,等.半干旱区周年全膜覆盖对

- 玉米田土壤冻融特性和水热分布的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1146-1154.
- [15] 银敏华,李援农,张天乐,等.集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2015,46(12):194-203,211.
- [16] 付强,侯仁杰,王子龙,等.积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究[J].农业机械学报,2015,46(7):154-161.
- [17] Lu H D, Xia Z Q, Fu Y F, et al. Response of soil temperature, moisture, and spring maize (*Zea mays* L.) root/shoot growth to different mulching materials in semi-arid areas of Northwest China[J].Agronomy, 2020,10(4):453-468.
- [18] Wu Y, Huang F Y, Zhang C, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, temperature, and maize yield in a semi-arid region of the Loess Plateau, China[J].Arid Land Research and Management, 2016,30(4):490-504.
- [19] 张音,海米旦·贺力力,古力米热·哈那提,等.天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响[J].生态学报,2020,40(5):1602-1609.
- [20] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等.蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.
- [21] 唐文政,王春霞,范文波,等.积雪与地表联合覆盖条件下冻融土壤水盐运移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):337-343.
- [22] 付强,颜培儒,李天霄,等.冻融期不同覆盖和气象因子对土壤导热率和热通量的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):98-105.
- [23] 吴芹芹,莫淑红,程圣东,等.黄土区冻融期不同土地利用土壤水分与温度的关系[J].干旱区研究,2020,37(3):627-635.
- (上接第 62 页)
- [10] Ghestem M, Veylon G, Bemard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J].Plant and Soil,2014,377(1/2):43-61.
- [11] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J].Soils and Foundations,2019,59(2):500-516.
- [12] 肖宏彬,赵亮,李珍玉,等.香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(3):6-10.
- [13] 李珍玉,王丽锋,肖宏彬,等.香根草根系在公路边坡土体中的分布特征[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(1):102-112.
- [14] 王磊,杨松.土壤吸力测试方法对土壤水分特征曲线的影响[J].节水灌溉,2018(8):5-8.
- [15] 蔡国庆,张策,李舰,等.考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊 2):27-31.
- [16] 刘小文,叶云雪.不同影响因素下非饱和红土土—水特征曲线的试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(2):97-104.
- [17] 陈卫金,程东会,陶伟.van Genuchten 模型参数的物理意义[J].水文地质工程地质,2017,44(6):147-153.
- [18] 何秋奇.基于土水特征曲线的非饱和橡胶颗粒改良粉煤灰土强度研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [19] 陶高梁,孔令伟.不同初始孔隙比土体进气值及土—水特征曲线预测[J].岩土工程学报,2018,40(增刊 1):34-38.
- [20] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [21] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3 种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.
- [22] 林嘉辉,黄梦元,张莉婷,等.芒萁根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):159-165.
- [23] 刘春红,韦杰,史炳林,等.加筋材料对紫色土坡耕地埂坝土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):103-109,175.
- [24] 宋会娟,李建中,葛延明.基质吸力对非饱和网纹红土抗剪强度影响研究[J].工业建筑,2017,47(12):7-10,16.
- [25] 郑文晓,甘建军,李荐华.基质吸力对灰岩区滑带土强度影响的试验分析[J].长江科学院院报,2020,37(7):120-124,129.