

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0071

ZHAO Qiang, WU Conglin, LUO Ping'an, et al. Variation and influencing factors of soil temperature and moisture during freezing and thawing period in a seasonal freezing agricultural area in Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):986-995. [赵强, 吴从林, 罗平安, 等. 冻融期东北农田土壤温度和水分变化规律及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):986-995.]

冻融期东北农田土壤温度和水分变化规律 及影响因素分析

赵 强^{1,2}, 吴从林², 罗平安³, 王 康¹, 李红珍⁴, 黄介生¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010;
3. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 4. 哈达河水库管理处, 黑龙江 鸡西 158100)

摘 要:为了更好地认识季节性冻融区冻融过程对农田土壤温度和水分的影响,以吉林省长春市黑顶子河流域为研究对象,监测了冻融期流域内玉米田和水稻田土壤温度和水分的变化过程。结果表明:冻融期表层土壤温度主要受积雪厚度影响,深层土壤温度主要受土壤初始含水率影响。冻结期,冻结层含水率几乎都呈增加趋势,其中浅层土壤增幅最大;冻结速度慢、初始含水量低、相邻土层含水量高的土层冻结过程水分增加量更大,反之则小。融化期,各下垫面、土层土壤含水率基本呈下降趋势,且主要集中在表层0~30 cm,水分损失以蒸发为主,冻结层对土壤蒸发有抑制作用;冻结层的融化是造成各下垫面不同土层土壤含水率差异,以及各土层在不同融化阶段土壤含水率差异的主要原因。

关键词:冻融过程;土壤温度;土壤水分;东北

中图分类号: S152; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0986-10

0 引言

土壤冻融作用是高纬度和高海拔地带性土壤热量动态变化的一种表现形式,是土壤与大气季节或昼夜温差所致的反复“冻结-融化”过程^[1-2]。该过程中土壤水分和温度的变化和分布特征对土壤水资源的有效利用有着重要的意义。

冻融期土壤温度主要受气象条件、土壤性质和地表覆盖条件的综合影响。崔乐乐等^[3]对黑河中游农田荒漠过渡带土壤冻融过程水热动态研究发现,冻融期土壤温度随气温剧烈变化,变幅随土壤深度的增加而减小,3种土壤温度变幅由剧烈到平缓的顺序为:荒漠>农田>防护林。胡伟等^[4]对东北典型黑土冻融期水热过程研究发现,土壤温度在各冻融阶段均表现为裸地>草地>传统耕地,解冻期>始冻期>完全冻结期。边晴云等^[5]、姚闯等^[6]对黄河源冻土水热变化过程研究发现,积雪可减少土壤吸收辐

射能量,减少地表感热通量,在土壤完全冻结期与消融期增大地表潜热通量,在完全冻结期,减少土壤向大气的热输送,在消融期,减少大气向土壤的热输送。

在冻结过程中,影响水分迁移的因素主要可以分为两类:(1)影响冻结前土壤含水率的因素,张辉^[7]研究表明冻结过程中未冻土向冻土中水分的迁移量随初始含水率的增加而增加,而郭占荣等^[8]、荆继红等^[9]和吴谋松等^[10]均发现冻结过程中不同潜水埋深条件下土壤水与潜水的转化关系有显著差异。(2)影响冻结锋面推进速率即影响水分补给持续时间的因素^[11],比如,地表积雪、秸秆、地膜等覆盖,均可以减缓土壤冻结速率,进而延长水分补给持续时间,使得土壤冻结后水分增加量显著上升^[12-14]。一般来说,自然状态下土壤冻结过程为单方向冻结,而融化过程则由表层和深层双向融化,因此融化过程中水分迁移也相对复杂^[15-16],表

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379152; 51179203); “十二五”国家重大科技专项(2012ZX07201-006)资助

作者简介: 赵强(1988-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 2018年在武汉大学获博士学位, 从事农业面源污染研究. E-mail: zhaoliangw@163.com

通信作者: 黄介生, 教授, 从事农田排水与水环境、节水灌溉理论与技术研究. E-mail: 410998129@qq.com.

层冻土融化层接收融雪和降雨水分,在冻土层的顶托下形成饱和或过饱和含水层^[17];而底层冻土的融化则可以补给地下水^[18]。此外,冻融作用还通过对土壤蒸发能力^[19-20]、入渗能力^[21-22]、地表水和地下水水力联系的影响^[23],进一步影响冻融期农田的土壤水分状况^[24-25]。因此,研究冻融过程对农田土壤水分迁移过程的影响,对于指导农业区耕作及水肥管理有着重要的意义。

目前对冻土水分、温度变化规律的研究多集中在室内,采用均质土及指定的冻融温度、频率开展^[26],或针对高山、高寒、荒漠等区域积雪覆盖影响以及水热耦合关系进行研究^[3,5-6],所得规律是否适用于中纬度农田土壤还有待于进一步研究。为此,本文选取受季节性冻融影响显著的东北农业区——黑顶子河流域,对其气象条件以及冻融期玉米田和水稻田土壤水分和温度进行观测,研究冻融期农田土壤水分和温度的变化规律及影响因素。本文所关注的问题主要有以下几个:(1)冻融过程中影响土壤温度的主要因素;(2)冻融过程中土壤水分的主要变化区域;(3)冻融过程中冻土层在土壤水分迁移中的作用;(4)冻融过程中水分迁移的主要影响因素。研究结果可为东北季节性冻融农田春季合理安排播种期,预测作物生长发育,调整农业生产结构提供理论指导和科学依据。

1 研究区概况和观测方法

1.1 研究区概况

黑顶子河流域位于吉林省长春市双阳区(125°34'27"~125°42'22" E, 43°22'48"~43°29'37" N),是松花江的三级支流,流域面积为 75.25 km²(图 1),属于温带半湿润大陆性季风区气候,年平均气温 4.8℃,最高 22℃,最低气温-17℃,多年平均降水量 624.7 mm,多年平均水面蒸发量 1 381.4 mm。封冻期一般为 11 月中旬至次年 3 月上旬,期间平均温度和降水量分别为-10.5℃和 31.8 mm,历史最大冻土深度为 158 cm;融化期一般从 3 月上旬至 4 月底,平均气温和降水量分别为 5.25℃和 40.7 mm。研究区域内土地利用类型主要分为四种,玉米田、水稻田、林地和农村居住区,分别占流域面积的 69.1%、12.5%、14.0%和 4.4%。根据双阳县土壤普查数据,流域内土壤主要为黑钙土、草甸土、白浆土和暗棕土等。研究区域内,冬季无作物种植及耕作措施,水稻田在作物生长期有长时

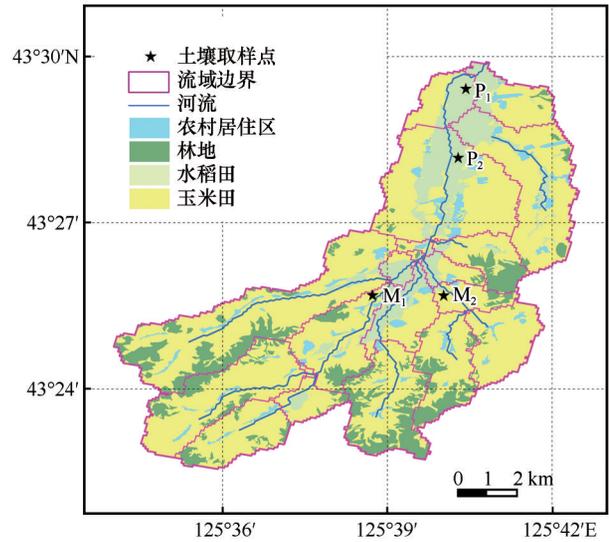


图 1 土壤监测点布置

Fig. 1 Arrangement of the points for monitoring soil temperature and moisture

间的灌溉。

1.2 田间观测方法

2014 - 2015 年冻融期,分别在土壤冻结前(2014 年 11 月 11 - 12 日)、冻结期(2015 年 3 月 3 - 4 日,2015 年 3 月 16 - 17 日)和融化期(2015 年 3 月 26 - 27 日,2015 年 4 月 6 - 7 日,2015 年 4 月 17 - 18 日)在水稻田(P₁和 P₂)和玉米田(M₁和 M₂)用洛阳铲进行了 6 次取样。为增加取样的代表性,其中 P₁和 P₂分别位于中游和下游主河道附近水稻田内,M₁和 M₂分别位于两条支流河道旁玉米田内,其中 M₁位于坡上,M₂位于坡脚,在取样过程中观测其冻结和融化深度,所取土样编号放入自封袋内,运回实验室后用烘干法测量其土壤含水率。在 P₂和 M₂取样点附近埋入温度探头,监测土壤温度的变化,探头所在土层分别为 5、10、15、20、30、40、50、70、90 和 110 cm,观测频率为每小时 1 次,取样点如图 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 冻融期土壤温度的变化规律及影响因素分析

图 2 为 2014 - 2015 年冻结-融化期玉米田(M₂)和水稻田(P₂)不同土层温度随时间变化的趋势图,我们近似的认为当土壤温度稳定处于 0℃以下时,土壤进入冻结状态,表 1 为不同土层进入冻结阶段(温度降到 0℃以下)和融化阶段(温度升到 0℃以上)的时间统计表。由图 2 和表 1 可知,玉米田和水稻田 0 ~ 5 cm 土壤温度在 11 月 14 日均已降到

0 °C 以下, 玉米田 15 cm 以上土层进入冻结期时间略提前于水稻田, 这主要是因为刚进入冻结期时, 地表积雪层较薄(图 3), 玉米田和水稻田受大气温度影响程度相近, 玉米田土壤初始含水率小于水稻田, 土体容积热容量小, 相同的负积温下, 土壤温度降低更多; 12 月 4 日之后, 冻结深度达到 20 cm(表 1), 相应的累积降水量达到了 10 mm, 此后持续增加(图 3), 降水以积雪的形式在地表累积, 且玉米田 M₂ 温度探头设置点位于迎风坡的坡

脚, 玉米田为垄作, 降雪后因风吹雪的原因相较于空旷地带的水稻田会形成更厚的积雪, 较厚的雪层可以起到隔温层的作用, 削弱大气温度对土壤温度的影响, 因此玉米田 20 ~ 50 cm 土壤温度下降速率和幅度逐渐滞后于水稻田, 表层温度只有 -7.8 °C, 高于水稻田(-9.2 °C); 玉米田深层土壤(>70 cm)温度降低幅度比水稻田大, 冻结锋面侵入的土层更深, 超过了 110 cm, 而水稻田则只有 105 cm 左右。

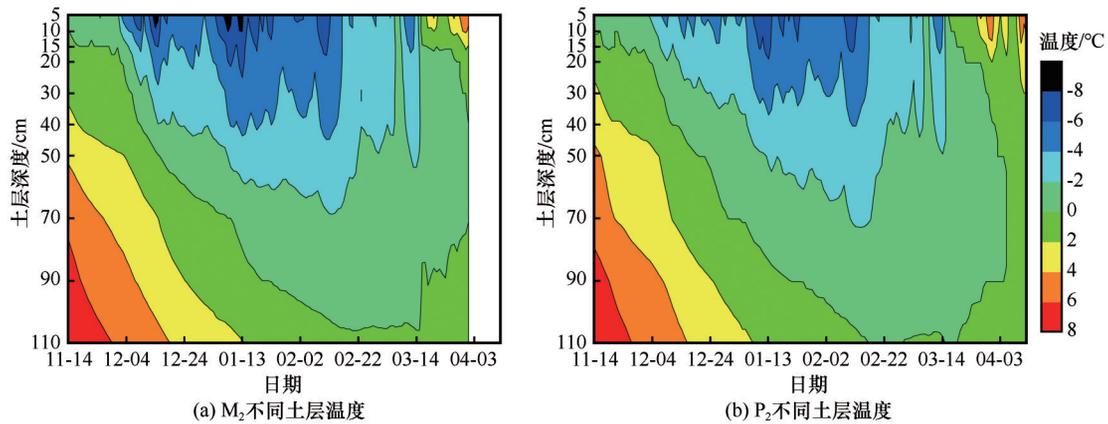


图 2 2014 - 2015 年冻融期 M₂ 和 P₂ 不同土层温度变化

Fig. 2 Temperature variations at different soil layers in M₂ (a) and P₂ (b) fields during the thawing period of 2014 - 2015

表 1 不同土层进入冻结阶段(温度降到 0 °C 以下)和融化阶段(温度升到 0 °C 以上)的时间统计(mm-dd)

Table 1 Time of different soil layers entering the freezing (<0 °C) and thawing (>0 °C) periods (mm-dd)

冻融阶段	取样点	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	70 cm	90 cm	110 cm
冻结阶段	玉米田	11-14	11-14	11-18	12-04	12-08	12-10	12-21	12-31	01-21	02-17
	水稻田	11-14	11-15	11-19	12-03	12-06	12-09	12-17	01-09	01-20	-
融化阶段	玉米田	03-16	03-17	03-19	03-22	03-30	04-01	04-02	04-05	03-29	02-28
	水稻田	03-16	03-16	03-18	03-30	04-01	-	-	-	-	-

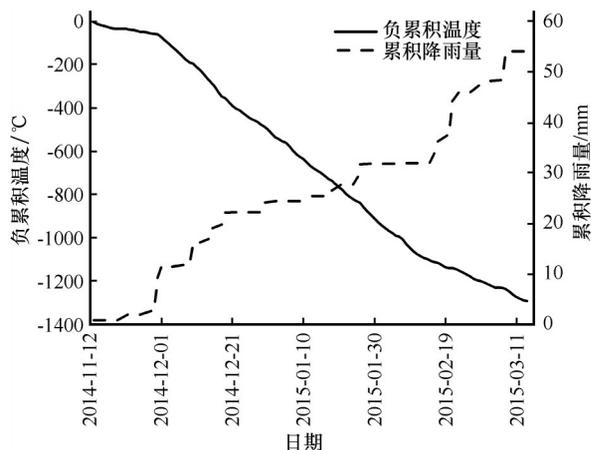


图 3 2014 - 2015 年冻结期负累积温度和累积降雪(雨)量
Fig. 3 Cumulative negative temperature and cumulative precipitation during the freezing period of 2014 - 2015

玉米田和水稻田均在 2015 年 3 月 16 日进入融化期, 由于玉米田表层有积雪, 水稻田则很少, 因此水稻田 0 ~ 15 cm 土层融化速度略快于玉米田, 但是 20 cm 以下土层玉米田融化速度则远大于水稻田; 因水稻温度探头 4 月 3 日被损坏, 未观测到水稻田 40 ~ 70 cm 融化时间, 因此无法对比这些土层二者融化速率。

以上结果表明, 积雪在冻结期有保温作用, 使得土壤温度偏高, 这与边晴云等^[5]在黄河源区的研究结果一致, 但融化期并未观测到边晴云等^[5]发现的“保凉”作用, 这主要是因为一方面本文研究区域积雪厚度较薄, 消融速度较快, 另一方面是因为水稻田和玉米田土壤之间水分差异对温度的影响大

于积雪的影响。此外,玉米田冻结锋面侵入深度较深也说明了深层土壤受地表温度影响较小,受初始含水率的影响更大。

表2为冻融期大气温度与不同土层温度之间采用线性拟合的决定系数和斜率统计表,表中玉米田表层土壤温度与大气温度之间线性拟合决定系数和斜率均小于水稻田,说明水稻田表层土壤温度与大气温度相关性更好,受大气温度影响更大,这主要是因为水稻田积雪厚度比玉米田薄,进一步验证了上述观点。

表2 冻融期大气温度与不同土层温度之间相关性
Table 2 Relationships between air and soil temperature at different layers during the freezing and thawing period

		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm
玉米田	R^2	0.66	0.60	0.53	0.42	0.28
	斜率	0.31	0.27	0.23	0.18	0.13
水稻田	R^2	0.74	0.68	0.53	0.45	0.30
	斜率	0.37	0.31	0.22	0.18	0.14

2.2 冻融期土壤水分迁移规律及影响因素分析

图4为2014-2015年冻结期不同下垫面土壤含水率剖面及不同冻结阶段相对冻结前土壤剖面含水率变化量及变化幅度图。由图4可知,在进入冻结期之前(11月11日或11月12日),各取样点土壤含水率剖面有着显著的差异:其一,总体来说土壤含水率关系为坡上玉米田(M_1)<坡脚玉米田(M_2)<水稻田(P_2);其二,玉米田含水率剖面波动大,表层土壤含水率(0~40 cm)呈现由小到大再减小,从60 cm开始呈现逐渐增加的变化趋势,含水率最大的土层一般出现在1.5 m以下的土层,而水稻田则出现在0~10 cm,且表层土壤含水率(0~40 cm)呈现先减小再增加的趋势,60 cm以下土层含水率基本一致。以上规律主要由不同种植制度和灌溉制度引起,在研究区玉米田集中在坡地(不灌溉),水稻田直至9月下旬都维持灌溉水层存在^[27-28],因而玉米田土壤含水率整体小于水稻田;此外,玉米根系吸水集中在0~50 cm,且整个生育期存在着由浅变深,再由深变浅的规律(拔节期0~20 cm,开花期20~50 cm,成熟期0~20 cm)^[29],加之表层土壤在收获后的蒸发作用,导致玉米田表层土壤含水率剖面变化较大,而水稻田由于其灌溉及淋洗作用,表层土壤含水率高,深层稳定。

3月3日取样已接近冻结期后期,受温度梯度

和积雪融化的影响,与11月11日土壤含水率剖面相比,水稻田水分增加主要集中在表层30 cm土层,其中增幅最大的土层为10~20 cm,达到了60%;玉米田除极少数土层外,几乎整个取样剖面含水率均呈上升趋势,其中0~10 cm土壤含水率增幅最大,超过了20%。3月17日取样土壤含水率增加量与幅度与3月3日类似,只是随着冻结锋面的进一步下侵,使得土壤水分进一步向上迁移。这两次取样之间,有一次温升,导致地表部分积雪融化,使得 M_1 和 M_2 玉米田0~10 cm土层含水率分别增加了40.14%和51.01%,但是10 cm以下土层含水率增幅较小,说明冻结层很好地阻隔了水分的入渗。此外,无论是玉米田还是水稻田,冻结前土壤含水率小,且相邻土层含水率大的土层在冻结过程中水分增加量更多,反之则小。

整体来看,3月3日取样 M_1 、 M_2 玉米田和 P_2 水稻田冻结层含水率比冻结前平均增加量分别为2.01%、1.17%和1.98%,平均增加幅度分别为15.82%、6.96%和6.87%,3月17日取样有类似的关系,三个取样点含水率平均增量分别为2.60%、2.46%和0.88%,增加幅度分别为16.69%、15.32%和3.85%,即: M_1 玉米田冻结前土壤含水率最低,冻结后冻土层水分增加量和增加幅度却均最大,相应的 P_2 水稻田冻结前土壤含水率最高,冻结后冻土层水分增加量幅度却最低,原因可能主要有三个:(1)由图4(a)和4(b)可知, M_1 玉米田3月3日冻深为98 cm,在三个取样点中最低,说明其冻结速率最慢,延长了水分补给持续时间,使得土壤冻结后水分增加量更显著,这与杜琦^[12]、魏丹等^[13]和杨金凤等^[14]的研究结果一致;(2) M_1 玉米田表层土壤初始含水率最小,冻结后土壤内冰晶量相对较少,对土壤的入渗能力影响相对较小,因此可以吸收更多的降雨和融雪水;(3) M_1 玉米田土壤含水率剖面之间差异更大,水势差异更大,因此对温度势引起的水势梯度有加强的作用,使得其表层以下土壤水分迁移速率和迁移量相对其他取样点更大。

2.3 冻土融化期土壤水分迁移规律及影响因素分析

图5为各取样点冻土融化期不同融化阶段土壤含水率剖面及不同融化阶段土壤剖面含水率变化量和变化幅度图,图6为融化期不同阶段各下垫面土壤含水率均值及其差异系数统计图。由图5可知,在融化初始阶段(3月17-27日),玉米田0~

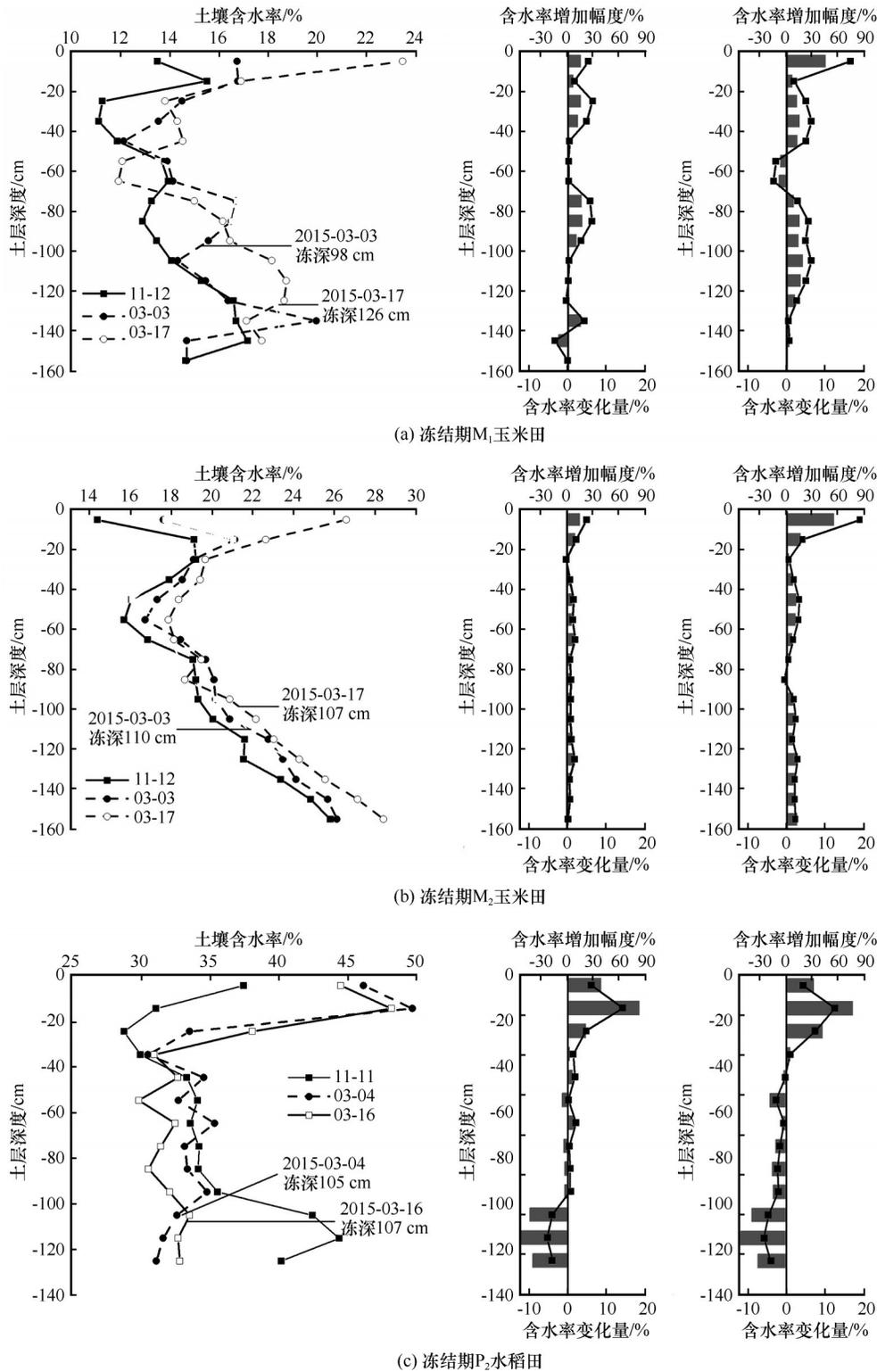


图4 2014 - 2015年冻结期M₁玉米田, M₂玉米田和P₂水稻田土壤含水率剖面图及不同冻结阶段相对冻结前土壤剖面含水率变化量(柱状图)和变化幅度图(线+正方形)

Fig. 4 Water content at different soil layers in M₁, M₂ and P₂ fields during the freezing period of 2014 - 2015; the change of soil water content compared with the soil water content before the freezing period

10 cm 水分急剧减少(28.14% ~ 39.78%), 水稻田的水分损失主要集中在 0 ~ 20 cm (P₁) 和 0~30 cm (P₂), 深层土壤含水率变化幅度较小, 且多为减小

趋势, 损失的水分并未向下迁移, 且各下垫面表层土壤(0 ~ 20 cm)含水率变化量的变异系数较小(图 6), 即影响因素比较单一。

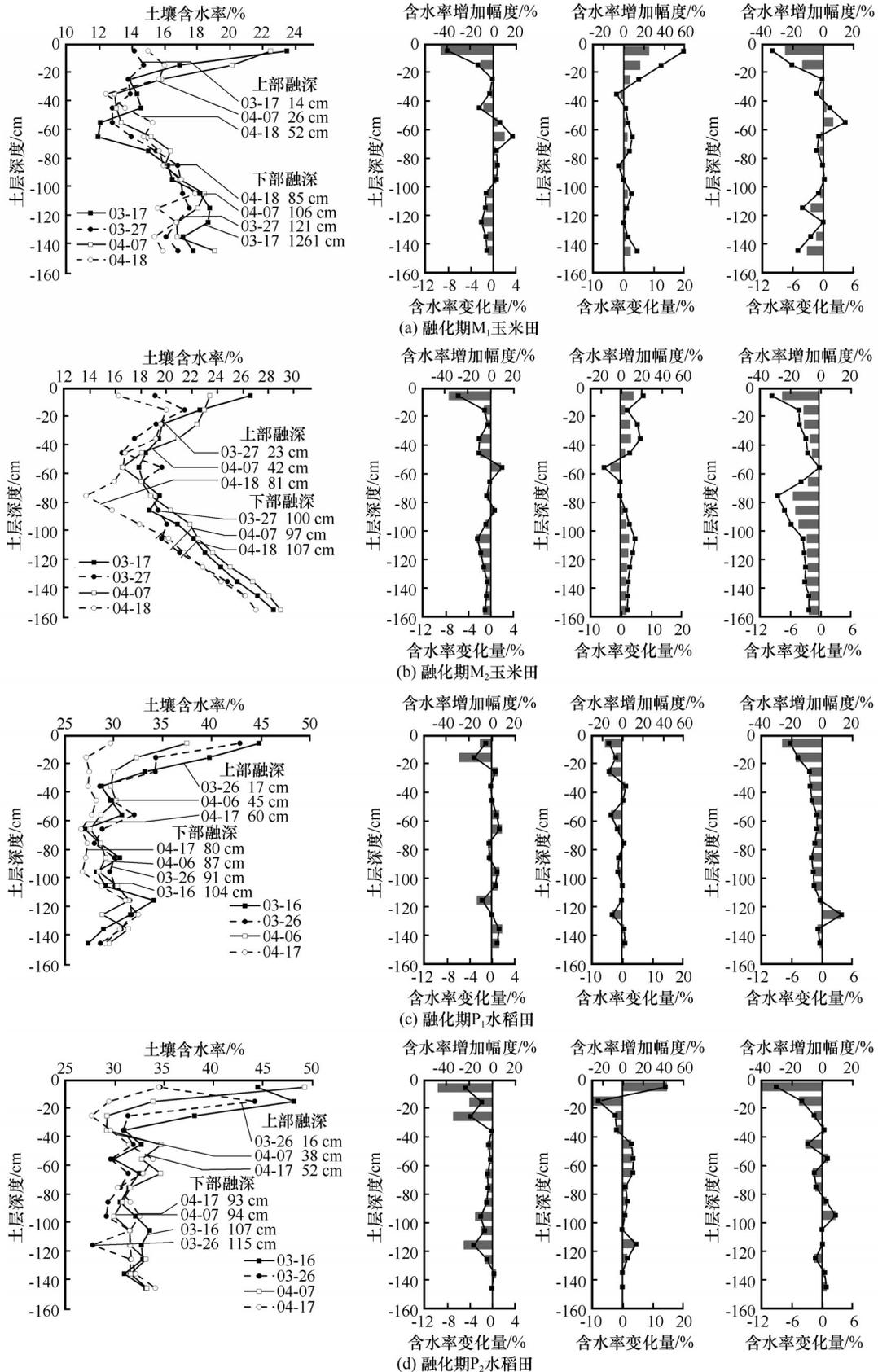


图5 2014 - 2015年融化期不同阶段M₁玉米田、M₂玉米田、P₁水稻田、P₂水稻田土壤含水率剖面图及土壤剖面含水率变化量(柱状图)和变化幅度图(线+正方形)

Fig. 5 Water content at different soil layers in M₁, M₂, P₁ and P₂ fields at different thawing stages of 2014 - 2015; the change of soil water content compared with the soil water content of the prior thawing stage

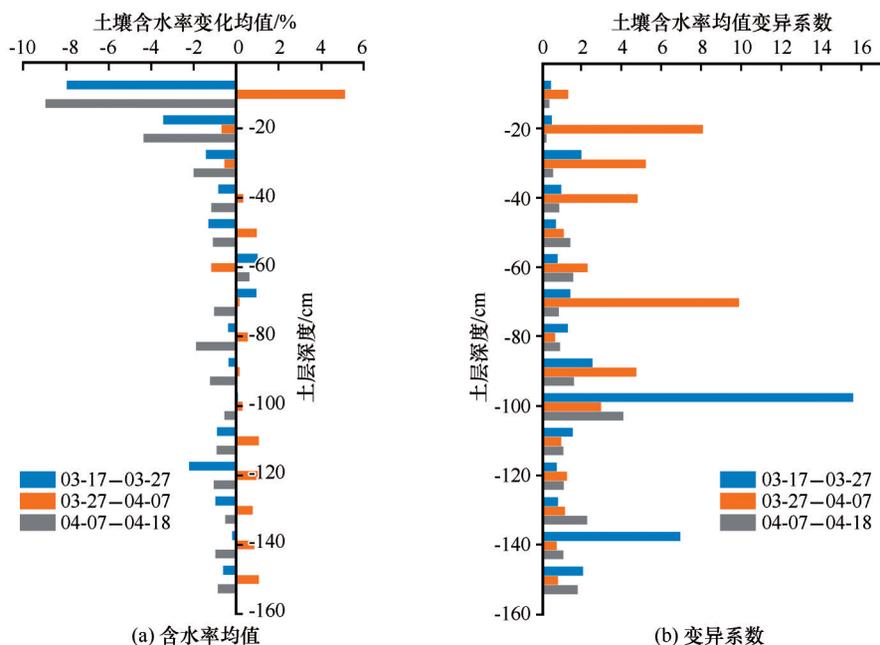


图6 融化期不同阶段各下垫面土壤含水率均值及其变异系数

Fig. 6 Mean values and variable coefficients of soil moisture at different underlying surfaces in each thawing stage

2015年3月27日-4月7日之间有20.8 mm的降雨,占整个融化期降雨量的86%。受降雨影响,大部分取样点冻土融化层含水率均有一定幅度的增加,该阶段20~40 cm土层(表层冻土融化层所在区域)含水率变化量的变异系数较大;4月7-18日期间,土壤含水率变化趋势与融化初期相似,但是随着土壤融化深度的增加,0~40 cm土层蒸发损失量均有一定程度的增加。

图7为不同下垫面融化期各时段土壤含水率均值及其变异系数统计图。由图7可知,整个融化观测期各下垫面、各土层含水率基本上均呈下降趋势,且主要集中在表层0~30 cm。图6和图7中不同阶段各下垫面之间,以及各下垫面在不同阶段之间,土壤含水率变化量差异较大的土层与这些阶段冻土层的上下边界有较好的重合性。

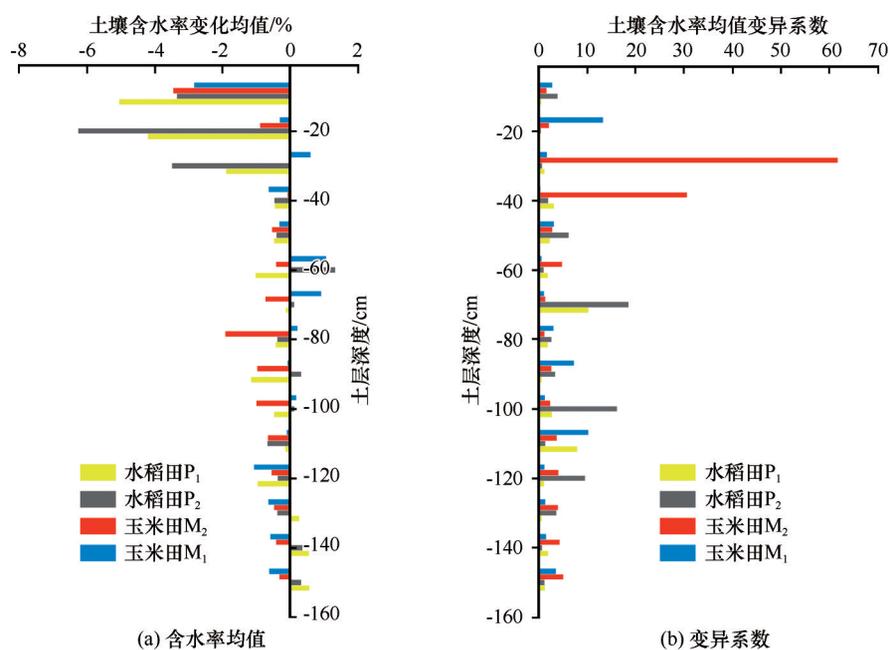


图7 不同下垫面融化期各时段土壤含水率均值及其变异系数

Fig. 7 Mean values and variable coefficients of soil moisture of different thawing stages at each underlying surfaces

根据以上分析可知, 冻土融化初期土壤水分主要受蒸发和降雨入渗影响, 而冻土层是决定表层土壤水分活跃区的主要因素, 它可以抑制冻土层以下土壤的蒸发作用并减少降雨向冻土层以下土壤的入渗, 以上结果与牛春霞等^[30]研究结果一致。

3 结论

(1) 冻融期土壤温度受地表积雪厚度和土壤含水率共同影响。冻结初期积雪较少, 水稻田土壤含水率大, 其冻结锋面迁移速率小于玉米田, 随着降雪的增加, 玉米田积雪更厚, 水稻田冻结锋面迁移速率逐渐领先于玉米田; 深层土壤温度主要受初始含水率的影响, 玉米田深层土壤初始含水率更小, 温度降低幅度更大, 冻结锋面侵入的土层更深。

(2) 土壤冻结期, 农田土壤整个冻土层含水率几乎都呈上升趋势, 但主要集中在表层, 玉米田和水稻田 0 ~ 10 cm 含水率增幅超过 20%, 水稻田增幅最大的土层为 10 ~ 20 cm, 达 60%; 冻结速度慢、初始含水量低、相邻土层含水量高的土层在冻结过程中土壤含水率增加量大, 反之则小; 冻土层可以有有效的阻隔水分的入渗。

(3) 冻土融化期, 各下垫面、各土层土壤含水率基本呈下降趋势, 且主要集中在表层 0 ~ 30 cm, 以蒸发为主, 冻土对土壤蒸发有抑制作用; 冻土层的融化是造成各下垫面之间不同土层土壤含水率差异, 以及各土层在不同融化阶段之间土壤含水率差异的主要原因。

参考文献(References):

- [1] Wang Liqin, Qi Yuchun, Dong Yunshe, et al. Effects and mechanism of freeze-thawing cycles on key processes of nitrogen cycle in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3532 - 3544. [王丽芹, 齐玉春, 董云社, 等. 冻融作用对陆地生态系统氮循环关键过程的影响效应及其机制[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3532 - 3544.]
- [2] Edwards A C, Cresser M S. Freezing and its effect on chemical and biological properties of soil[J]. 1992, 18: 59 - 79.
- [3] Cui Lele, Zhao Ying, Yi Jun, et al. Soil water and heat dynamics in soil freezing-thawing processes of farmland-desert transitional zone in middle reach of Heihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 94 - 100. [崔乐乐, 赵英, 易军, 等. 黑河中游农田荒漠过渡带土壤冻融过程中水热动态[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 94 - 100.]
- [4] Hu Wei, Zhang Xingyi, Yan Yue. Dynamics of soil water and soil temperature during freezing and thawing period under different types of land use in Mollisols[J]. Soil and Crops, 2018, 7(3): 312 - 323. [胡伟, 张兴义, 严月. 不同土地利用方式下冻融期黑土水热过程观测研究[J]. 土壤与作物, 2018, 7(3): 312 - 323.]
- [5] Bian Qingyun, Lü Shihua, Wen Lijuan, et al. Soil freezing-thawing process and its temperature and moisture conditions in high and low snowfall years in headwaters of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 906 - 911. [边晴云, 吕世华, 文莉娟, 等. 黄河源区不同降雪年土壤冻融过程及其水热分布对比分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 906 - 911.]
- [6] Yao Chuang, Lü Shihua, Wang Ting, et al. Analysis on freezing-thawing characteristics of soil in high and low snow fall years in source region of the Yellow River[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(3): 474 - 483. [姚闯, 吕世华, 王婷, 等. 黄河源区多、少雪年土壤冻融特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(3): 474 - 483.]
- [7] Zhang Hui. Study of water migration and strength of the loess under freezing-thawing action[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. [张辉. 冻融作用下黄土水分迁移及强度问题研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.]
- [8] Guo Zhanrong, Jing Enchun, Nie Zhenlong, et al. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period[J]. Advance in Water Science, 2002, 13(3): 298 - 302. [郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 298 - 302.]
- [9] Jing Jihong, Han Shuangping, Wang Xinzong, et al. The mechanism of water movement in the freezing-thawing process[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1): 50 - 54. [荆继红, 韩双平, 王新忠, 等. 冻结-冻融过程中水分运移机理[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 50 - 54.]
- [10] Wu Mousong, Huang Jiasheng, Tan Xiao, et al. A study of freezing process in variably-saturated sandy-loam soil under different water table depths: Experiment and simulation[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 60 - 68. [吴谋松, 黄介生, 谭霄, 等. 不同地下水补给条件下非饱和砂壤土冻结试验及模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 60 - 68.]
- [11] Walker D A. Permafrost: fourth international conference, proceedings[J]. Arctic and Alpine Research, 1984, 16(1): 127.
- [12] Du Qi. Analysis on soil frozen and thawed regulation under different soil surfaces[J]. Groundwater, 2009, 31(4): 27 - 29. [杜琦. 不同地表条件下土壤冻结、融化规律分析[J]. 地下水, 2009, 31(4): 27 - 29.]
- [13] Wei Dan, Chen Xiaofei, Wang Tieliang, et al. Soil freezing condition and water migration regulation under different snow cover conditions[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2007, 35(12): 3570 - 3572. [魏丹, 陈晓飞, 王铁良, 等. 不同积雪覆盖条件下土壤冻结状况及水分的迁移规律[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(12): 3570 - 3572.]
- [14] Yang Jinfeng, Zheng Xiuqing, Xing Shuyan. Experimental study of soil moisture regimes during seasonal freezing-thawing period under different surface mulchings[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, 39(3): 303 - 306. [杨金凤, 郑秀清, 邢述彦. 地表覆盖条件下冻融土壤水热动态变化规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(3): 303 - 306.]
- [15] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lu Lanzhi, et al. Spatiotemporal characteristics of freezing and thawing of the active layer in the source areas of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14): 1327 - 1336. [罗栋梁, 金会军, 吕兰芝, 等. 黄河源区多年冻土活动层和季节冻土冻融过程时空特征[J]. 科学通报, 2014, 59(14): 1327 - 1336.]
- [16] Wang Lan. Quantitative study on the process of seasonal frozen

- soil freezing and thawing during snowmelt period [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015. [王岚. 融雪期季节性冻土冻融过程定量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.]
- [17] Bayard Daniel, Stähli Manfred, Parriaux Aurèle, et al. The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1): 66 – 84.
- [18] Sun Zhichao. A study on the regime and budget of groundwater in the discharge area of basins [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. [孙志超. 地下水排泄区潜水动态特征与水均衡研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.]
- [19] Zhang K, Kimball J S, Kim Y, et al. Changing freeze-thaw seasons in northern high latitudes and associated influences on evapotranspiration [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(26): 4142 – 4151.
- [20] Chang Longyan, Dai Changlei, Liao Houchu. Research overview on hydrological effects of frozen soil [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 550: 2459 – 2465.
- [21] Fourie W J, Barnes D L, Shur Y. The formation of ice from the infiltration of water into a frozen coarse grained soil [J]. *Cold regions science and technology*, 2007, 48(2): 118 – 128.
- [22] Zhao L, Gray D M, Toth B. Influence of soil texture on snowmelt infiltration into frozen soils [J]. *Canadian journal of soil science*, 2002, 82(1): 75 – 83.
- [23] Liao Houchu, Zhang Bin, Xiao Difang. Frozen earth hydrology characteristic in the cold area and influence to groundwater supply from frozen earth [J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering*, 2008(3): 123 – 126. [廖厚初, 张滨, 肖迪芳. 寒区冻土水文特性及冻土对地下水补给的影响 [J]. 黑龙江水专学报, 2008(3): 123 – 126.]
- [24] Luo L, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Effects of frozen soil on soil temperature, spring infiltration, and runoff: Results from the PILPS 2 (d) experiment at Valdai, Russia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(2): 334 – 351.
- [25] Chen S, Ouyang W, Hao F, et al. Combined impacts of freeze-thaw processes on paddy land and dry land in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 456: 24 – 33.
- [26] Chang Longyan, Dai Changlei, Shang Yunhu, et al. Analysis of the frozen soil moisture profile changes in aeration zone under the conditions of freezing-thawing and non-freezing-thawing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 1031 – 1041. [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.]
- [27] Wang Xihua. Study on the technology and pattern of water-saving irrigation and water management of rice in Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2012. [王喜华. 吉林省水稻节水灌溉与水分管理的技术与模式研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.]
- [28] Zou Qiaoqiao. Analysis of rice irrigation system in Liaoning Province [J]. *Water Resource & Hydropower of Northeast*, 2013, 31(5): 55 – 56. [邹俏俏. 辽宁省水稻灌溉制度分析 [J]. 东北水利水电, 2013, 31(5): 55 – 56.]
- [29] Wang Peng, Song Xianfang, Yuan Ruiqiang, et al. Study on water consumption law of summer corn in north China using deuterium and oxygen-18 isotopes [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 481 – 491. [王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 等. 基于氢氧稳定同位素的华北农田夏玉米耗水规律研究 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(3): 481 – 491.]
- [30] Niu Chunxia, Yang Jinming, Zhang Bo, et al. Influence of seasonal accumulated snow melting on the moisture and heat of shallow soil layer in northern slope of Tianshan Mountain [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(11): 131 – 136. [牛春霞, 杨金明, 张波, 等. 天山北坡季节性积雪消融对浅层土壤水热变化影响研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 131 – 136.]

Variation and influencing factors of soil temperature and moisture during freezing and thawing period in a seasonal freezing agricultural area in Northeast China

ZHAO Qiang^{1,2}, WU Conglin², LUO Ping'an³, WANG Kang¹,
LI Hongzhen⁴, HUANG Jiasheng¹

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2.Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 3.Changjiang River

Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4.Hada River Reservoir Management Institute,

Jixi 158100, Heilongjiang, China)

Abstract: Northeast China is one of the most important grain producing area in China, which is also the most typical area affected by seasonal freezing and thawing. The freeze-thaw process affects the migration and transformation of water and nutrients in spring farmland by changing the soil evaporation capacity, infiltration capacity and the hydraulic connection between surface water and groundwater. Therefore, studying the variation and influencing factors of soil temperature and moisture during freezing and thawing period is of great significance for guiding water and fertilizer management in seasonal freeze-thaw agriculture areas. However, most of the studies on the effects of freeze-thaw process on soil water migration have just used soil column freezing test, which was carried out using homogeneous soil at the specified freezing and thawing temperature and frequency, and the water migration in the farmland soil could not be well reflected. In order to better understand the effect of freezing-thawing process on soil temperature and moisture variation in a seasonal freezing agricultural areas, six sampling were carried out using soil-drilling method in each sampling location before and during the freezing and thawing period to monitor soil moisture, and temperature probes were pre-embedded to monitor soil temperature. Results show that the surface soil temperature during freezing and thawing period was mainly affected by the thickness of snow, while the deep soil temperature was mainly affected by the initial soil moisture content. During the freezing period, the moisture content of the frozen soil layer almost increased, among which the shallow soil increased the most; and the slower the freezing rate, the lower the initial water content, and the higher the water content of the adjacent soil layer, the more the water content increased of the soil layer. During the thawing period, the soil moisture content of each underlying surface and soil layer was basically decreasing, and this phenomenon mainly occurred in the soil layer of 0 – 30 cm. The water was mainly loss was mainly lost by evaporation, and the frozen soil layer had an inhibitory effect on soil evaporation. The melting of the frozen soil layer was the main reason for the difference in soil moisture content between the underlying surfaces and that between different melting stages.

Key words: freezing-thawing process; soil temperature; soil moisture; Northeast China

(责任编辑: 孟宪红; 编辑: 周成林)