doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.020

不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究*

付 强 蒋睿奇 王子龙 李天霄 马梓奡

(东北农业大学水利与建筑学院,哈尔滨 150030)

摘要:积雪覆盖作为中国北方高寒黑土区土壤冻融期最普遍的上边界条件,直接影响土壤水分分布、迁移过程及土 壤温度、冻结深度、冻结速率等。通过野外试验,对哈尔滨地区的季节性冻融黑土在裸地、自然积雪、压实积雪、加 厚积雪4种不同覆盖条件下的土壤水分迁移规律进行动态观测。从时间、空间角度分析土壤含水率变化,结果表 明:积雪厚度和密度都可以很大程度上影响积雪对土壤的保护作用,在仅考虑积雪自身沉降造成密度增大的情况 下,积雪厚度越大保护效果越好,土壤含水率对气温变化的响应及土壤解冻时间依次延后,延后程度随土壤深度增 加而增大;当人为改变积雪密度时,相较于单纯增加积雪厚度,密度大的积雪可以更好地保护土壤,使气温对土壤 的直接影响更小。当遇到冬季降雪量较小的情况时,可以考虑采用人为压实积雪的方法,加强对土壤的保护作用。 关键词:积雪消融 压实积雪 土壤液态含水率 水分迁移

中图分类号: S152.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0152-08

Soil Moisture Movement during Freezing-thawing Period under Different Snow Covers

Fu Qiang Jiang Ruiqi Wang Zilong Li Tianxiao Ma Ziao

(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Snow cover, as the most common upper boundary condition during freezing and thawing period in the cold region of northern China, directly affected the soil moisture distribution and movement, soil temperature and frozen depth, freezing rate, etc. In order to reveal the influence of snow on soil moisture movement, soil water and heat coupled transfer during freezing and thawing period was studied. Through field experiment, the soil moisture movement patterns of seasonal freezing-thawing black soil in Harbin were dynamically observed under the conditions of four different coverages: bare land, natural snow, compacted snow and thicken snow. The density and liquid water content of snow were measured by the Snow Fork, the liquid water content and total water content of soil were measured by time domain reflector and neutron moisture meter. From the perspectives of temporal and space change of soil moisture content, the results indicated that the thickness and density of snow can largely affect the protection of snow on soil, when only considering the subsidence of increased snow density, the greater the thickness of snow was, the better the protection was. The response of soil moisture content to temperature change and soil thawing time were delayed, the degree of delay was increased with soil depth increasing. Compared with increase of snow thickness, denser snow can protect the soil better, and the influence of temperature on soil was decreased. When winter snow was small, farmers can artificially compact it, which can strengthen the protection of soil.

Key words: Snow melt Compacted snow Liquid soil water content Soil moisture movement

收稿日期: 2014-12-02 修回日期: 2015-01-27

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51279031、51209039)、黑龙江省自然科学基金资助项目(E201241)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助 项目、黑龙江省杰出青年基金资助项目(JC201402)和中国博士后科学基金资助项目(2012T50321、2011M500632)

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分析与冻融土壤水热作用机理研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

引言

东北与内蒙古东部地区作为中国三大主要积雪 区之一,在每年11月至翌年4月的冬半年中皆有稳 定的积雪覆盖,多年平均积雪面积在1月份最高可 达1.18×10⁶km^{2[1]}。大量水分以积雪的形式存在 于土壤表面,对土壤水分的变化起到十分重要的影 响。由于积雪本身具有很强的反射率和较低的导热 率等性质,使其成为良好的隔热层从而影响土壤表 面对辐射能的吸收及大气与地面间的热量交换。同 时,积雪也是重要的水源之一,尤其在北方旱寒区融 雪水入渗补给土壤表层水分,对土壤墒情预测、农业 水资源合理利用、预防春旱有十分重要的意义。

近年来,随着理论的完善及野外低温实验技术 的发展,定量分析冻融期土壤水分变化的相关研究 越来越受到重视,国内外学者对不同覆盖条件下冻 融期土壤水分的动态规律及其影响因素展开了一系 列研究。陈军锋等^[2]、杨金凤^[3]、邢述彦等^[4]、李元 寿等^[5]分别对稻秆、玉米秸秆等作物残茬及植被覆 盖条件下土壤水分迁移特征进行了深入分析; Flerchinger等^[6]利用 SHAW 模型对留有建筑残渣和 作物残余土体的水热状况进行了模拟;樊贵盛等^[7] 分析了季节性冻融土壤的入渗机理;积雪覆盖对土 壤温度、水分运动的影响等相关研究也开始受到重 视^[8-11]。

但是由于不同地区的降雪情况及地形条件、气候特征、土壤类型等因素存在着差异性、随机性,对应的土壤水分分布也不尽相同。针对中国北方季节性冻土区的土壤水尤其是不同积雪覆盖情况下的对比试验国内开展的还较少。因此,本文以哈尔滨地区黑土为研究对象,在野外试验的基础上,深入对比分析不同积雪覆盖情况下冻融期土壤水分时空分布规律及其影响因素,以期为季节性冻融土壤水热运动的数值模拟、地气间能量交换、融雪水资源高效利用等相关研究提供科学依据。

1 试验条件与方法

1.1 试验条件

试验于 2013 年 11 月至 2014 年 5 月在黑龙江 省哈尔滨市东北农业大学水利综合试验场内进行, 试验区布置如图 1 所示。试验区域位于松嫩平原东 部,地理位置为东经 126°45′32″,北纬 45°44′41″,属 中温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,受极地大陆 气团控制,冷气团长期滞留。年平均气温 3.6℃,冬 季多年平均气温为 - 14.2℃。最冷月平均气温 -19.6℃。年积雪覆盖期 110 d,无霜期 140 d,最大 冻结深度约为180 cm,无多年冻土层。土壤表层从 11月中下旬开始稳定冻结,至翌年3月下旬开始逐 渐解冻。历年平均降水(雪)量为23.6 mm。样地设 置在空闲农田,地表平坦,无植被覆盖,土壤黑土层 厚度约为30 cm、机械组成为砂粒(>0.02 mm) 46.32%、粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)20.41%、黏粒 (<0.002 mm)占33.27%,母质层为黄粘土,机械组 成为砂粒38.74%、粉粒24.69%、黏粒36.57%(质 量分数)。



Fig. 1 Layout of study area

试验期内日均气温及日总辐射量见文献[12],从 11月20日开始日均气温稳定在0℃以下,之后逐步 降低,于1月13日达到日均最低气温-23.1℃,随 着日总辐射量开始增加,气温回升并于3月15日首 次突破0℃,一直维持在0℃以上。日总辐射累积量 和日均气温的变化趋势基本一致。

1.2 试验方法

试验设置4块10m×10m的相邻样地,做不同 积雪覆盖处理,分别为:裸地、自然积雪、压实积雪、 加厚积雪。其中裸地采用人工除雪,即每次降雪前 在地面铺设帆布,降雪后将帆布上的积雪均匀抛洒 到加厚积雪的样地上,压实积雪样地采用聚乙烯板 (质量恒定)夯实。为保证相邻样地间水分互不影 响,纵向铺设100 cm 高的聚乙烯隔水膜。使用中子 水分仪测量土壤总含水率,时域反射仪(TDR)测定 土壤液态水含量。无降雪或降雪厚度在 2 cm 以下 时,测量间隔为一周,当降雪厚度超过2 cm 时,在降 雪后的第1、3、5天各测一次。中子仪^[13]和时域反 射仪^[14]事先用原位土壤在实验室内进行标定^[15], 记录数据时,含水率为同一测点测量3次的平均值。 在样地中央呈三角形布置一根铝制中子测管及2根 塑料 TDR 测管,测定剖面深度依次设置为 20、40、 60、100、140、180 cm。积雪厚度用雪尺测量,为在一 定程度上减小由于局部地面不平整造成的积雪分布 不均匀及边缘效应,在样地中央呈三角形树立3根 雪尺,积雪厚度每天上午08:00 整读数记录[16],气 象数据来源于样地西侧气象站。利用 Snow Fork 雪

特性分析仪观测积雪液态含水率及密度,便携式温度计观测雪层内部温度,为尽量减少对雪层的破坏, 在样地中间开挖小道进行掘进式测量。

Snow Fork 雪特性分析仪由芬兰赫尔辛基大学 研制,专用于野外积雪参数的测量,其轻巧便携,最 低工作温度可达 - 40℃。测量时,将其针式探头插 入雪层剖面的不同深度,即可直接获得测量时刻的 瞬时积雪密度、液态含水率。由于其探头体积小,不 会压实自然状态下的积雪,因而对密度和含水率的 测量更为准确可靠,特别适合应用在野外进行原位 积雪的测量。Snow Fork 在使用时直接测量共振频 率、衰减度和 3 dB 带宽这 3 个电参数^[17]。利用这 些直接测量值并结合经验公式可精确得到积雪介电 常数,通过半经验公式计算得到积雪密度和液态含 水率。参数计算公式为

$$\varepsilon' = (890/f)^2 = (f_{air}/f)^2$$
 (1)

$$B_{air} = 0.04(f - 400) \tag{2}$$

$$\varepsilon'' = \frac{B - B_{air}}{f\varepsilon'} \tag{3}$$

$$W_{vol} = -0.06 + \sqrt{0.06^2 + \varepsilon'' / (0.0075f)}$$
(4)
$$\rho = -1.2142857 + W_{vol} +$$

$$\sqrt{1.214\ 285\ 7^2 - (1+8.7\ W_{vol} + 70\ W_{vol}^2 - \varepsilon')/0.7}$$
(5)

$$W_{wgt} = W_{vol}/\rho$$
 (6)
式中 ε' —相对介电常数实部
 ε'' —相对介电常数虚部
 f ——共振频率, MHz
 f_{air} ——大气共振频率, MHz
 B ——3 dB 带宽, MHz
 B_{air} ——大气的 3 dB 带宽, MHz
 ρ ——积雪密度, g/cm³
 W_{vol} ——液态水体积含水率, %
 W_{wgt} ——液态水质量含水率, %

2 结果与分析

2.1 试验期内土壤冻融与积雪消融过程

根据自然状态下冻融期内土壤逐日的冻结深度 变化绘制成土壤冻融变化过程曲线,如图2所示。 根据试验期内积雪深度及降水数据绘制积雪深度及 日雪水当量变化曲线,如图3所示。

由图 3 可知,在自然积雪下的土壤从 11 月初开 始稳定冻结到次年的 4 月末土壤融通,整个过程历 时约 170 d。土壤在 3 月 8 日达到冻结深度下限值, 最大冻深约为 120 cm。冻结深度最大时并不是气 温的最低值,可以看出土壤冻结的延后性。并且可



以更明显的看出冻结是从表层向下的单向过程,而 融化则是表层和底部同时开始的双向过程。

分析图 3 并结合日均温度及日总辐射量变化可 知,在试验初期 11 月 17 日至 11 月 20 日连续 4 d 大 量降雪,降雪后对各类样地作不同处理之后,积雪厚 度达到峰值。12 月初至 2 月中旬,初期积雪由于自 身重力作用发生一定沉降,之后气温保持较低水平, 且仅有 4 次少量降雪,厚度曲线走势平缓,变化均 匀。2 月 15 日开始,气温及累计辐射量明显升高, 积雪融化速度加快,积雪厚度降幅明显,至 3 月 1 日 自然积雪和压实积雪完全融化,日均融雪量分别为 2. 32 cm 和 2. 01 cm,加厚积雪也在 3 月 3 日融完,日 均融雪量为 4. 08 cm。3 种不同处理的积雪厚度变 化曲线趋势上基本一致,完全融化的时间也相近。 说明季节性积雪的消融过程主要受温度及太阳辐射 的影响,积雪自身的厚度、密度等性质对融化过程影 响较弱。

2.2 试验期内不同处理的积雪特性

由图 3 可以看出,自然积雪、压实积雪、加厚积 雪 3 种不同处理样地积雪覆盖时间达到 3 个月以 上,且积雪厚度至少达到了 20 cm,积雪的存在已经 不可忽视。雪层温度、液态含水率以及积雪密度是 描述积雪性质的重要参数。雪层的温度直接影响积

155

雪的融化、冻结等过程,液态含水率直接决定雪层中 水分的迁移,而积雪密度的改变会引起积雪导热率 变化从而影响积雪内部的水热运动。

因积雪厚度较大,将积雪分为上、中、下共3层^[18],测点在每层的中间,以1月8日积雪为例,积雪特性参数值如表1所示。

表 1 不同积雪覆盖条件积雪特性 Tab.1 Snow parameters in different covers

积雪条件	积雪	分层厚	分层温	液态含	积雪密度/
	厚度/cm	度/cm	度/℃	水率/%	$(\mathbf{g} \cdot \mathbf{cm}^{-3})$
		2	- 14.6	0	0.1176
自然积雪	28	18	- 12. 7	0.037	0.2176
		8	- 5.8	0.045	0.2379
压实积雪		2	- 14.4	0	0.1688
	22	18	- 11. 9	0.313	0.3512
		2	- 8.1	0.835	0.3659
		2	- 14. 9	0	0.1076
加厚积雪	64	18	- 12. 7	0.201	0.2615
		44	- 11. 3	0.397	0. 289 6

由表1可以看出,上层积雪温度较低,积雪冻结 成冰晶,液态含水率为0。对比自然积雪和加厚积 雪,随着雪层厚度的增加,积雪的保温作用愈发明 显,雪层内部的温度和液态含水率都有明显提升。 但伴随厚度的增加,由于积雪自身的重力作用,积雪 密度也有一定程度的增大,此时再对比压实积雪和 加厚积雪,从积雪表面到下层积雪的距离皆为 20 cm,压实积雪样地雪层温度更高、液态含水率更 大。根据积雪反照率相关理论和公式^[19]可解释,即

$$A_s = 1.0 - 0.206C_v d_s^{1/2}$$
(7)

$$d_s = G_1 + G_2 \rho^2 + G_3 \rho^4 \tag{8}$$

式中 A_s——积雪对太阳辐射的反照率

d。——雪粒直径

C_v、*G*₁、*G*₂、*G*₃——与试验区域积雪有关的经验参数(皆为正值)

在积雪经验参数及积雪厚度相同的情况下,积 雪密度ρ,正比于雪粒直径 d,雪粒直径 d,反比于积 雪反照率 A,。密度越大,反照率越小,积雪表面接 收的辐射能量更多,温度和液态含水率更高。而加 厚积雪样地可能因为在抛雪过程中扰动过大,密度 不均匀,对比自然积雪样地温度及液态含水率差异 不明显。由上述分析和表1结果可以看出改变积雪 密度比单纯改变积雪厚度所起到的保温作用更加明 显。

2.3 不同积雪覆盖条件下土壤液态含水率的时间 分布

在非冻融期,利用环刀对不同深度的土壤取样, 采用干燥法测定土壤的饱和含水率、自然含水率及 土壤干容重,威尔科克斯法^[20]测定土壤田间持水率。该地区土壤各项参数如表 2(含水率皆为体积 含水率)所示。

表 2 试验区不同深度土壤基本物理参数 Tab. 2 Soil physical parameters of different depths

土层	饱和含水	田间持水	自然含水	土壤干容重/
深度/cm	率/%	率/%	率/%	$(\mathbf{g} \cdot \mathbf{cm}^{-3})$
20	43.30	28.13	33.55	1.46
40	42.50	29.07	35.90	1.50
60	40.11	27.68	34.67	1.52
100	40.85	27.99	35.12	1.57
140	38.13	26.85	33.99	1.65
180	37.23	26.23	34.15	1.70

利用 TDR 测得的液态含水率数据绘制不同积 雪覆盖条件土壤液态含水率随时间变化曲线,如 图 4 所示。通过对比分析可以看出,不同深度土壤的 液态含水率变化在不同积雪覆盖条件下表现出明显 差异和不同规律。

分析图 4 可知,不同积雪覆盖条件下土壤液态 含水率的差异主要体现在冻结时间、融化速度等方 面,但在总体上与试验期内日均气温变化及日辐射 累积量的变化趋势一致。100 cm 土层压实和加厚 积雪覆盖条件下土壤未冻结,140、180 cm 土层由于 超出冻结深度,含水率变化不大。在试验期内,根据 土壤的液态含水率变化及冻结、融化特征可将冻融 期大致划分为:不稳定冻结、稳定冻结和消融解冻 3 个阶段^[21-22]。

不稳定冻结阶段:土壤的冻结从表层开始,冻结 初期日均气温在零摄氏度以上表层土壤会出现昼融 夜冻现象,裸地的 20 cm 土层最先开始冻结,之后气 温骤降、太阳辐射减弱,液态含水率在 7 d 内迅速由 20%以上降至 10%以下,后随气温降低持续下降并 趋于稳定,说明土壤处于完全冻结阶段,并于 1 月 15 日达到液态含水率最低值。而有积雪覆盖的土 壤在冻结速率上小于裸地,表现出了不同的滞后性, 其中压实积雪的滞后性最强,其次是加厚积雪,而自 然积雪的滞后性最弱,说明加大积雪密度和积雪厚 度可以增强积雪对土壤的缓冲作用,且积雪密度的 影响更大。

稳定冻结阶段:此阶段不同积雪覆盖对液态含 水率的影响差异主要体现为冻结持续的时间。积雪 的存在明显影响了土壤的冻结持续时间。不同积雪 覆盖条件下,土壤液态含水率开始增加的时间有所 不同。

消融解冻阶段:相较于其他阶段,在融化期各样 地浅层土壤液态含水率变化尤为剧烈且敏感,总体 上呈上升至不变趋势,在融化后期稳定阶段,浅层土 壤液态含水率仍有小幅波动,但上升速度降低,这是 因为此阶段存在早春降雨,因气温仍然较低会在土 壤浅层再冻结而形成富冰层,阻隔融雪水的入渗。 土壤剖面中液态含水率增加说明该剖面土壤正在融 化,土壤中的水正在发生剧烈相变,积雪覆盖对土壤 中水的相变有重要影响。根据图4中液态含水率变 化趋势及因融化形成的拐点定义土壤融化相关参数 来描述土壤融化期水分的动态变化,如土壤初始融化日期 D,(土壤液态含水率变化曲线由冻结到融化形成的明显拐点对应的日期),液态含水率随融化升高幅度 Δθ,(自初始融化日期至5月1日的液态含水率升高值),具体参数值见表3。在季节性冻土区,地面辐射平衡影响着土壤能量收支和土壤温度变化,随着太阳辐射的减弱,辐射平衡稳定的处于负值,导致土壤出现不同层次的冻结。



	表 3	不同积雪覆盖条件下土壤融化参数
Tab. 3	Soil m	elting parameters under different snow cov

	土层深度/cm						
积雪条件	20		40		60		
	D _r	$\Delta heta_r / \%$	D _r	$\Delta heta_r / \%$	D _r	$\Delta heta_r / \%$	
裸地	01 - 28	15.42	02 - 03	10.77	02 - 08	9.92	
自然积雪	02 - 12	10.61	02 - 16	10.08	02 - 18	9.78	
压实积雪	02 - 23	7.91	02 - 28	6.91	02 - 28	5.18	
加厚积雪	02 - 19	12.18	02 - 21	11.55	02 - 24	10. 37	

结合图 4 及表 3 分析融化期液态含水率变化。 对于裸地,浅层 20 cm 土壤最先受到气温升高的影响,在 1 月 23 日日均气温突然升至 -5℃时,液态含 水率开始快速升高。而另外 3 类积雪覆盖样地,由 于雪被的存在阻碍了气温对土壤的直接影响,土壤 液态含水率开始升高的日期明显推迟,以 20 cm 土 壤为例,裸地早在1月末随气温升高而液态含水率 逐渐增高,自然积雪样地液态含水率则在2月12日 才开始增加,压实积雪样地的液态含水率增高日期 最晚,比裸地的液态含水率增高日期推迟了26d,且 晚于加厚积雪的液态含水率增高日期,可见积雪密 度对积雪的保温性能影响更大。而在融化后期,由 于气温加速升高,积雪快速融化,裸地因没有积雪的 保护,直接受气温及降雨影响含水率上升速度较快, 加厚积雪样地由于雪量大、融雪水多,液态含水率上 升幅度也明显大于自然积雪和压实积雪样地,压实 积雪样地上升幅度最小,说明加大积雪的密度可以 明显增强积雪对土壤的保温、缓冲作用,使土壤液态 含水率在冻结期下降较少,融化期增加适量,整个冻 融期相对稳定。积雪对土地的这种保护作用随深度 增加差异逐渐减小。在4月末冻融期结束时,由于 辐射增强,地面蒸发增大,各样地含水率相近。

利用统计分析方法计算液态含水率的均值、标 准差及变差系数等统计特征值来表征土壤水分在冻 结和融化阶段的运移及变异特征,结果见表4及 表5。

表 4 冻结期液态含水率统计分析 Tab. 4 Statistics of liquid water content in freezing period

	沥亩/		统计参数					
处理	休良/	最小值/	最大值/	均值/	标准差	变差系数		
	cm	%	%	%	S	C_v		
	20	6.03	21.46	9.41	5.27	0.560		
àm bh	40	9.08	21.46	11.49	3.83	0.333		
保地	60	9.58	20.99	11.91	3.73	0.313		
	100	13.21	22.13	16.03	2.66	0.166		
	20	9.83	22.37	12.49	3.81	0.305		
古体和王	40	9.97	21.56	12.55	3.47	0.277		
目然枳雪	60	10.37	20. 23	13.03	3.60	0.276		
	100	18.72	22.34	19.93	1.01	0.051		
压实积雪	20	13.78	21.83	15.57	2.20	0.142		
	40	14.02	21.33	15.82	2.20	0.139		
	60	14.14	21.33	15.88	2.54	0.160		
	100	22.07	22.56	22.40	0.17	0.007		
加厚积雪	20	12.16	22.76	14.69	3.08	0.210		
	40	13.19	20.87	15.21	2.65	0.174		
	60	12.21	21.10	14.78	3.06	0.207		
	100	21.93	22.82	22.36	0.29	0.013		

从表中的统计分析结果可以看出:4种不同覆 盖条件下,变差系数均随土层深度增加呈递减趋势, 说明气温对土壤温度的影响呈向下递减趋势。同处 理同深度土层,冻结期的含水率变差系数 C。值普遍 大于融化期,说明冻结期土壤受气温的影响更大,而 融化期含水率的均值较对应土层冻结期含水率均值 大4%~7%,但最大值相差不大,说明因融雪水的 存在融化期水分变化更剧烈,但由于存在蒸发及入 渗使得差异随积雪消融而逐渐消失。在 100 cm 以 下,除冻结期裸地处理以外,所有其他处理的 C。值 均小于 0.1,根据其范围可定义为弱变异性^[23],说 明 100 cm 以下土层受温度影响很小。而对深度在 100 cm 以上的土层,裸地、自然积雪及加厚积雪样地

表 5 融化期液态含水率统计分析

Tab. 5 Statistics of liquid water content in thawing period

	宓 亩 /	统计参数					
处理	休良/	最小值/	最大值/	均值/	标准差	变差系数	
	cm	%	%	%	S	C_v	
	20	7.30	22.50	16.01	5.19	0.324	
àm 1.1.	40	13.25	21.85	17.98	2.80	0.156	
保地	60	13.47	21.60	18.05	2.77	0.154	
	100	17.19	20.67	18.53	1.36	0.073	
	20	10.44	20.69	15.64	2.68	0.172	
白脉和毒	40	13.94	21.97	17.99	2.37	0.132	
日然积当	60	13.40	20. 29	16.60	2.44	0.147	
	100	19.02	19.35	20.03	0.36	0.019	
	20	14.88	21.81	18.34	2.10	0.115	
民中和美	40	14.76	20.93	18.08	1.27	0.070	
 	60	15.61	19.36	18.47	1.09	0.062	
	100	22.34	22.63	22.46	0.11	0.005	
加厚积雪	20	14.43	24.34	19.42	3.37	0.174	
	40	16.39	23.66	20.26	2.22	0.111	
	60	16.88	23.56	21.06	2.13	0.101	
	100	22.42	22.88	22.57	0.08	0.004	

的 *C*。值范围为[0.1,1]表现为中等变异性,而压实 积雪 *C*。值仍小于 0.1 依旧表现为弱变异性,也说明 了由于积雪密度的增大,使得土壤在该覆盖条件下 受气温影响更小,含水率变化更加稳定。

2.4 不同积雪覆盖条件下土壤总含水率的空间分布

由于在冻融期内土壤水分会以冰的形式存在, 土壤总含水率可以更好地体现土壤水分在季节性冻 融过程中一维垂直空间上的变化,在试验期内挑选 若干时间点,分别代表积雪稳定覆盖、积雪开始融 化、积雪完全融化等土壤冻融的不同时期,利用中子 仪测得的土壤总含水率数据绘制不同时期不同积雪 覆盖样地土壤总含水率随深度的变化曲线,如图 5 所示。

综合对比图 5、图 3 及图 2 各不同处理样地的 水分状况,4 种不同覆盖条件下土壤的初始含水率 相差不大,未冻结土层含水率在整个冻融期变化趋 势不明显、不同冻融时期间的含水率变化幅度在 3%以内,对于冻结层,水分在冻结锋面(冻结缘)处 富集,形成土壤冻结期特殊的水分剖面,同时含水率 的峰值位置随着冻深的发展不断向下推进,裸地的 水分聚集在距地表 120 cm 附近,而有积雪覆盖的样 地水分聚集在 60~80 cm 的土层中,且不同冻融时 期间含水率的变化幅度明显小于裸地,说明积雪覆 盖明显减弱了气温对土壤温度及冻结深度的影响。 对于已经冻结的土层,土壤未冻含水率较小并且冰 的存在阻碍了水分运动,使得冻结区水分迁移几乎 处于停滞状态,含水率在冻结到消融这段时间内变





化很小,也就是说冻土层的水分迁移主要集中在冻 结缘内部。

随着春季气温回升,土壤再次出现昼融夜冻现 象,土壤从地表向下解冻,但深层土壤的冻结锋面仍 然会向下发展一段时间,最后受上部耕作层土壤热 量及下部地热影响,双向融通。融化区的土壤水分 大于其下的冻土层,使得土壤水分由融化区向融化 锋面迁移,造成该处水分富集,这种现象是土壤消融 过程中特有的,伴随着土壤自下而上的消融,冻土层 在冻结期所积聚的水分融化后又逐渐回补地下水。 这种回补一直持续到土壤完全消融土壤水分剖面又 恢复为非冻土的稳定剖面。在积雪完全融化以后, 加厚积雪样地的含水率整体上大于其他样地。有积 雪覆盖的样地,土壤水分变化的幅度和速度都明显 小于裸地。

3 结论

(1)在积雪总量一定的情况下,积雪的消融速 率与气温、太阳辐射量密切相关。不同厚度和密度 的积雪,在消融时间上相差较小,积雪密度和厚度对 消融速率的影响较弱。

(2)由于雪的低热导性,积雪覆盖对土壤具有

良好的缓冲、绝热和保墒作用。在仅存在积雪自身 沉降造成密度增大的情况下,积雪的厚度越大保护 效果越好,土壤含水率对气温变化的响应及土壤解 冻时间依次延后,延后程度随土壤深度增加而增大; 当人为改变积雪密度时,相较于单纯增加积雪厚度, 密度大的积雪可以更好地保护土壤,使气温对土壤 的直接影响更小。当遇到冬季降雪量较小情况时, 可以考虑采用人为压实积雪的方法,加强对土壤的 保护作用。

(3)积雪能够减缓土壤的冻结速度,影响水分 迁移过程。浅层土壤冻结对积雪覆盖的响应程度较 强,接近深层土壤冻结对积雪覆盖的响应程度降低。 在土壤的冻结过程中,水分会向冻结锋面迁移,在稳 定冻结阶段由于冻结面移动较缓慢,冻结锋面处水 分聚集现象明显。土壤完全冻结阶段从12月中旬 直至次年3月中下旬,土壤冻结深度下降至年最低 值,但土壤中的水分并不是全部冻结,还有一部分土 壤未冻水分相对恒定,因积雪覆盖条件及深度不同 保持在6%~16%,随积雪增厚及密度增加,活动层 土壤完全融化期缩短,完全冻结期延长。在融化阶 段,表层土壤水分在太阳辐射影响下增加较快并快 速蒸发,深层土壤融化后水分向下移动补给地下水。

参考文献

- 1 郑照军,刘玉洁.1980—2007 年中国主要积雪区的积雪面积时间特征分析[C]//中国气象学会 2007 年年会气候变化分会 场论文集.广州:中国气象学会,2007:233-241.
- 2 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)

- 3 杨金凤.季节性冻融期不同地表条件下土壤水热动态变化规律的试验研究[D].太原:太原理工大学,2006.
- 4 邢述彦,郑秀清,陈军锋.秸秆覆盖对冻融期土壤墒情影响试验[J].农业工程学报,2012,28(2):90-94. Xing Shuyan, Zheng Xiuqing, Chen Junfeng. Experimental study on effect of corn residue management on soil water content during freezing-thawing period[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(2): 90-94. (in Chinese)
- 5 李元寿,王根绪,赵林,等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土,2010,32(1):157-165. Li Yuanshou, Wang Genxu, Zhao Lin, et al. Response of soil moisture in the permafrost active layer to the change of alpine meadow coverage on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 157-165. (in Chinese)
- 6 Flerchinger G N, Sauer T J, Aiken R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface [J]. Geoderma, 2003, 116(1): 217 233.
- 7 樊贵盛,郑秀清,贾宏骥.季节性冻融土壤的冻融特点和减渗特性的研究[J].土壤学报,2000,37(1):24-32. Fan Guisheng, Zheng Xiuqing, Jia Hongji. Experimental study on the freezing and thawing features and reduction infiltration characteristics of seasonal freezing and thawing soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000,37(1):24-32. (in Chinese)
- 8 张伟,沈永平,贺建桥,等. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积雪特性观测与分析研究[J]. 冰川冻土,2014,36(3):491-499. Zhang Wei, Shen Yongping, He Jianqiao, et al. Snow properties on different underlying surfaces during snow-melting period in the
- altay mountains observation and analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(3):491-499. (in Chinese)
 9 张小磊,周志民,刘继亮.季节性积雪消融对浅层土壤热状况的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):91-95.
 Zhang Xiaolei, Zhou Zhimin, Liu Jiliang. Melting of seasonal snow cover and its influence on soil temperature conditions of shallow layer[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8):91-95. (in Chinese)
- 10 于小舟,袁凤辉,王安志,等.积雪对长白山阔叶红松林土壤温度的影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3015-3020. Yu Xiaozhou, Yuan Fenghui, Wang Anzhi, et al. Effects of snow cover on soil temperature in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3015-3020. (in Chinese)
- 11 杨忠臣,魏丹,陈丹,等.不同积雪覆盖条件下土壤冻结状况及水分迁移规律研究[J].水利科技与经济,2007(6):365-367.
- 12 付强,马梓奡,李天霄,等.北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J].农业机械学报,2014,45(12):152-159.
 Fu Qiang, Ma Ziao, Li Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152-159. (in Chinese)
- 13 陈洪松,邵明安.中子仪的标定及其在坡地土壤水分测量中的应用[J].干旱地区农业研究,2003,21(2):68-71,76.
 Chen Hongsong, Shao Ming'an. Field calibration of neutron probe and its application in measuring soil water content on sloping land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003,21(2):68-71,76. (in Chinese)
- 14 李道西,彭世彰,丁加丽,等.TDR 在测量农田土壤水分中的室内标定[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):249-252. Li Daoxi, Peng Shizhang, Ding Jiali, et al. Laboratory calibration on measurement of field soil moisture using TDR[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008,26(1):249-252. (in Chinese)
- 15 Iwata Y, Nemoto M, Hasegawa S, et al. Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan[J]. Journal of Hydrology, 2011, 401(3): 165 - 176.
- 16 俞卫平,周诗健,王伟.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
- 17 洪雯,魏文寿,刘明哲,等.利用 Snow Fork 测量积雪孔隙率及其应用[C]//第 28 届中国气象学会年会——S6 冰冻圈与极 地气象学,2011:189-197.
- 18 孙菽芬,金继明,吴国雄. 用于 GCM 耦合的积雪模型的设计[J]. 气象学报,1999,57(3):38-45. Sun Shufen, Jin Jiming, Wu Guoxiong. A snow model design for coupling with GCM[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(3):38-45. (in Chinese)
- 19 Anderson E A. A point energy and mass balance model of a snow cover [R]. NOAA Technical Report NWS 19. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1976: 1-150.
- 20 江培福,雷廷武,刘晓辉,等.用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究[J].农业工程学报,2006,22(7):1-5. Jiang Peifu, Lei Tingwu, Liu Xiaohui, et al. Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(7):1-5. (in Chinese)
- 21 陈军锋,郑秀清,臧红飞,等.季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响[J].农业机械学报,2013,44(3):104-109.

Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, Zang Hongfei, et al. Effects of irrigation on soil temperature and soil freeze-thaw characteristics during seasonal freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 104 - 109. (in Chinese)

22 郑秀清,陈军锋,邢述彦,等.季节性冻融期耕作层土壤温度及土壤冻融特性的试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3): 65-68.

Zheng Xiuqing, Chen Junfeng, Xing Shuyan, et al. Soil temperature variation in plough layer and soil freeze-thaw characteristics during seasonal freezing and thawing period[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 65-68. (in Chinese)

23 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.