

东北黑土区垄作农田寒季表土水分垂直变化特征

郑博艺, 范昊明

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 土壤水分变化受地形地貌、土壤质地、土地利用方式等多种因素的影响。在冻结期内, 不同地表环境下土壤水分变化有明显的不同。土壤水分含量的变化又会对冻结和融化过程中土壤物理性质产生影响, 进而影响土壤的抗蚀性。为探究表土水分在冻结期内的变化过程, 采用野外试验方法, 对东北黑土区内四种典型旱地土壤寒季表土水分变化进行研究, 结果表明: 2014—2015年不同地区 0—30 cm 表层土壤水分在冻结初期增加幅度较大, 增加量大小为棕壤(西丰) > 白浆化暗棕壤(梅河口) > 黑土(海伦) > 暗棕壤(扎兰屯), 平均增加了 3.1%, 2.7%, 2.5%, 0.7%。随着土壤冻结过程的持续, 土壤水分增加量减少。垂直方向上, 冻结期内四种土壤在 0—10 cm 土层水分含量平均值为海伦(35.3%)、西丰(27.1%)、梅河口(21.1%)、扎兰屯(24.1%), 均高于其他土层。在坡面尺度上, 由于不同坡位土壤、地形、耕地应用格局空间分布不同, 进而影响水分向表层的迁移量。坡向对寒季表土水分变化的影响在不同地区表现不同。

关键词: 坡位; 坡向; 冻结期; 表层土壤; 水分迁移; 东北黑土区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0028-06

Vertical Variation of Surface Soil Moisture in Ridge Tillage Farmland of Northeast Black Soil Region in China in Cold Season

ZHENG Boyi, FAN Haoming

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Soil moisture is affected by land use type, topography and geomorphology, soil texture and other factors. In the freezing period, soil moisture changes in different earth surface environment are obviously different. The change of soil moisture content will have an impact on the physical properties of the soil in the process of freezing and thawing, thereby affecting the soil anti erosion. For the inquiry of topsoil moisture in the change process of freezing period, we used field experiment method to examine four kinds of typical upland soil surface moisture change in northeast black soil region. The results showed that 0—30 cm surface soil moisture in different areas increased larger a lot at the beginning of the freezing, the increase in contents followed the sequence: Brown soil (Xifeng) > Albic soil (Meihekou) > Black soil (Hailun) > Dark brown soil (Zhalantun), increased by 3.1%, 2.7%, 2.5%, 0.7%. As the soil freezing process continued, the increase in contents reduced. In vertical direction, average soil water contents in 0—10 cm layer of four kinds of soils were 35.3% (Helen), 27.1% (Xifeng), 21.1% (Meihekou), 24.1% (Zalantun) which were higher than other soil layers. On slope scale, the spatial distribution pattern of soil, topography, and cultivated land application affects the amount of moisture migration to the surface. The influence of the slope aspect on surface soil moisture change is different in different areas in cold season.

Keywords: slope position; slope aspect; freezing period; surface soil; moisture migration; northeast black soil region

季节性冻土中的水分迁移作为自然界水循环中的一个重要环节, 在农业、水资源、环境系统中都占有极其重要的地位^[1]。土体的冻结过程往往伴随着水

的过冷现象和水分迁移。由于温度场的改变, 导致土体中相态平衡的破坏, 从而产生了各种驱动力, 形成水分的运动。在土壤冻结过程中, 增长着的冰晶不断

地从邻近的水化膜中夺走水分,造成水化膜的变薄,而相邻厚膜中的水分子又不断地向薄膜补充,这样依次传递形成了季节冻土冻结时水向冻结面的迁移^[2-3]。气温的变化对土壤水分迁移有显著的影响,中国东北黑土区位于中纬度,属寒温带大陆性季风气候,秋冬季节转换过程中气温降低,土壤表层形成低温界面,水汽不断在界面附近凝结,在此期间,土壤水分有明显的迁移进程^[4]。太阳辐射、纬度地带性、土壤含水量、土壤质地和地形等环境条件的变化,使冻结期内的表层土壤水分变化不同^[5]。土壤水分具有明显的时空异质性特征,在不同的时空尺度上,其影响因子存在差异^[6]。大量研究表明,地形是影响土壤水分及其时空变异的一个重要因子^[7-8],影响土壤水分空间分布的地形因子主要包括坡度、坡向、坡位及相对高程。坡面尺度内,坡位和坡向是土壤水分分布的重要影响因素,不同坡向因受到太阳辐射不同,导致各坡面的蒸散发量存在差异,进而影响土壤水分分布;降雨在坡面上的再分配使不同坡面位置土壤含水量不同,上坡位因向坡下排水而不能积蓄土壤水分,下坡位因接受上坡来水而往往具有较高的土壤含水量,故不同坡位的土壤水分变化特征不同。

目前国内外对土壤水分变化的研究多集中于作物生长季节,而非生长季节的研究相对较少。实际上中高纬度地区表土受季节性冻层的影响较大,特别是东北黑土低山丘陵区旱地垄作农田,一方面土壤发生冻结时,土粒间孔隙水形成多种形式的冰侵入体,引起土体体积增加。随着地温的回升,膨胀的土体开始融化并形成较大孔隙,造成土壤的抗剪强度和抗蚀能力降低^[9]。土壤类型^[10]、冻结速率^[11]和土壤含水量^[12]等差异会导致土体抗蚀性变化不同。解冻期内地表积雪融化产生的融雪径流可使表土受到严重的冲刷,增加了农田土壤侵蚀发生的可能性。另一方面,地表土壤在冻结期内由于水分的聚集形成了冻结滞水,冻结滞水的融化水滞留在土壤冻结层之上而形成季节性水资源,而在黑土区内的部分地区春季地表土壤含水量很低,对农业生产带来一定的影响。本文

以黑土区内坡耕地垄作农田为研究对象,通过野外试验方法研究区内不同类型土壤以及坡耕地表土不同坡位、不同坡向在冻结期内土壤水分在垂直方向上的动态变化过程,以探明不同空间尺度内土壤水分向表层累积的特征,为防治融雪侵蚀以及在农业生产过程中对水资源的利用提供一定的指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

东北黑土区现为《全国水土保持区划导则》中划分的一级分区,总面积为 103.02 万 km²^[13],其中典型黑土区面积为 10.84 万 km²。本文在黑土区内选择四个地区作为研究区域,分别为黑龙江省海伦市、吉林省梅河口市、辽宁省西丰县和内蒙古扎兰屯市。根据采样点的经纬度(表 1)和南京土壤研究所 2002 年的分类标准按土壤亚类划分,确定采样点的土壤为黑土、白浆化暗棕壤、棕壤和暗棕壤。这四种土壤由于所处地区的气候、母质、地形、植被不同,因此土壤性质存在较大差异。海伦地区黑土为黑土土类,成土母质为黄土状沉积物,质地为黏壤土至壤质黏土,黑土层厚 30—50 cm,疏松、湿润、土壤通透性差。梅河口地区白浆化暗棕壤为暗棕壤土类,成土母质为砂岩残积物或坡积物,土壤质地为砂质壤土或砂质黏壤土,土壤有机质等养分缺乏,表层土壤持水性差。西丰地区棕壤为棕壤土土类,成土母质为花岗岩、片麻岩风化残积物,土壤质地为壤土到黏壤土,多为团粒结构或粒状结构,土壤持水性较好。扎兰屯地区暗棕壤为暗棕壤土土类,成土母质为红棕色泥质岩风化残积物,土壤质地以黏壤土为主,黏粒下移淀积较为明显,土体中砾石含量较多,持水性较好。不同区域内土壤机械组成存在明显的差异,其中黑土土壤粒径在小于 0.02 mm 范围内所占比例较高,达到了 66.57%,棕壤和暗棕壤土壤粒径在 0.002~0.2 mm 范围内所占比例较高,分别达到了 63.36%和 66.11%,白浆化暗棕壤土壤粒径在 0.02~2 mm 范围内所占比例较高,达到了 61.62%。

表 1 土壤机械组成和田间持水量

土壤(地区)	经度 E	纬度 N	土壤机械组成/%				田间持水量/%
			0.2~2 mm	0.02~0.2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm	
黑土(海伦)	126°50'23"	47°20'57"	3.34	30.08	32.26	34.31	33.2
白浆化暗棕壤(梅河口)	125°28'57"	42°14'21"	28.7	32.92	24.41	13.97	23.2
棕壤(西丰)	124°55'49"	42°42'26"	17.97	25.27	38.09	18.67	28.3
暗棕壤(扎兰屯)	122°43'59"	47°56'11"	19.13	32.14	33.97	14.76	28.9

1.2 研究方法

本研究以耕地坡面为研究对象,在每个地区选择

阴坡和阳坡作为采样坡面(表 2),通过对样点区域调研和 GPS 进行定位确定取土点。四个地区每年表土

侵蚀厚度均不超过 30 cm,因此在各坡面的上部、中部和下部分别选取 0—30 cm 土壤剖面(3 次重复)作为采样剖面,每个取样点按 10 cm 分层取样。在 2014—2015 年期间,11 月到翌年 2 月期间每个月取样一次,取回的土样用烘干法测量土壤重量含水量,土壤含水量计算公式(1)所示。

$$\text{土壤水分} = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_1 ——铝盒的质量; M_2 ——铝盒和湿土的总质量; M_3 ——经过烘干后铝盒和干土的总质量。

表 2 采样点坡度和坡向

地区	坡度	坡向	坡向类型
海伦	1°~10°	7°	阴坡
	2°~10°	193°	阳坡
梅河口	4°~10°	344°	阴坡
	5°~18°	171°	阳坡
西丰	9°~18°	18°	阴坡
	9°~23°	225°	阳坡
扎兰屯	4°~8°	312°	半阴坡
	1°~12°	141°	阳坡

注:315°~45°为阴坡,45°~90°,270°~315°为半阴坡,135°~225°为阳坡,90°~135°,225°~270°为半阳坡。

2 结果与分析

2.1 耕地土壤水分变化特征

土壤质地是影响土壤水分迁移的主要原因之一,土壤质地是土壤固相物质各粒级土粒的配合比例,它通过对土粒的表面能、土壤孔隙尺度和分布的影响,对土壤水分运动的驱动力和水力传导度产生影响^[14]。一般情况下,由于重质土壤孔隙比较轻质土壤细小,相同土壤结构、含水量和水势梯度条件下,其水力传导度小于轻质土壤。因此,重质土壤的土壤水分迁移能力小于轻质土壤。

11 月至翌年 2 月期间不同地区 0—30 cm 土层土壤水分变化如图 1 所示,11—12 月期间,四个地区 0—30 cm 土层土壤由未冻结状态转变为冻结状态,土壤孔隙水按重力水、毛细水、薄膜水顺序依次冻结为冰,由于 0—30 cm 土层土壤处在非饱和层中,所以不考虑重力水的冻结过程。在这一阶段,土壤内迁移水分主要为毛细水,水分迁移量较大,从图 1 中可以看出不同种类土壤水分增加量大小为棕壤(3.1%)>白浆化暗棕壤(2.7%)>黑土(2.5%)>暗棕壤(0.7%)。土壤颗粒组成与孔隙分布不同对土壤水分迁移有显著的影响。棕壤和白浆化暗棕壤土质较为疏松,土壤孔隙联通较好,土壤水分迁移能力较强,但白浆化暗棕壤表土持水性较差,从表 1 中可以

看出,白浆化暗棕壤田间持水量为 23.2%,为四种土壤中最底,因此土壤水分迁移能力受土壤初始含水量影响较大。黑土表层土壤黏粒含量较多,土壤孔隙联通较差,水分迁移能力较弱。暗棕壤土壤中砾石含量较多,影响了土壤导水性,土壤水分迁移能力较弱。从 12 月份至翌年 2 月下旬土壤完全冻结的情况下,不同土壤水分含量变化不大,表明土壤水分扩散到相变凝结后,水分迁移变化缓慢。在这一阶段,土壤毛细水冻结成冰,迁移水分为已冻土中的未冻水,冻结土壤中未冻水含量受土的粒度成分和矿物组成影响较大。表 3 为不同种类土壤相邻土层土壤水分相关性,从中可以看出,在 1—2 月期间,黑土和棕壤相邻土层土壤水分含量显著相关,白浆化暗棕壤和暗棕壤相邻土层土壤水分含量不显著,说明黑土和棕壤相邻土层土壤水分垂向迁移较为明显,主要由于这两种土壤颗粒比表面积大,土壤中未冻水含量较多,因此土壤水分迁移范围大。白浆化暗棕壤中砂粒含量较多,土壤颗粒比表面积小,土壤未冻水含量少,土壤水分迁移范围小。

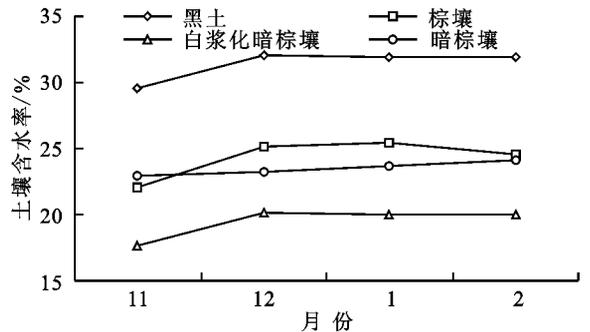


图 1 0—30 cm 土壤水分含量随时间变化

2.2 不同坡位表土水分变化特征

为了反映土壤水分垂直变化情况,用变异系数(C_v)表示其变化情况, C_v 为土壤含水量样本的均方差与样本平均值的比值, C_v 越大表示土壤水分变化越剧烈,反之表示土壤水分差异越小。在整个冬季(11 月至翌年 2 月),不同地区土壤水分平均值与变异系数垂直分布的变化趋势见表 4。在 0—30 cm 土层内,四个地区坡耕地不同层次土壤水分变化较为一致,均表现出 0—10 cm 土层土壤水分含量最高、变异系数最大。不同地区 0—10 cm 土层土壤水分平均值分别为海伦(35.3%)、西丰(27.1%)、梅河口(21.1%)、扎兰屯(24.1%),说明冻结期上层土壤首先冻结并聚集水分,越靠近冻层水分含量越大。在坡面尺度内,由于坡面土壤、地形和耕地应用格局空间分布不同,导致不同坡位表土冻结前水分分布不同,进而影响冻结过程中土壤水分向表层的迁移^[15]。

海伦地处东北漫川漫岗区,土壤剖面分布为黏壤质到黏土类,研究区坡形为凸形坡,坡度较小,坡长较长,坡面土壤有明显的垂直分带性规律^[16]。从表 5 中可以看出,不同坡位在 0—30 cm 土壤毛管孔隙度平均值大小为下坡位(44.1%)>上坡位(43.4%)>中坡位(34.8%),这是由于下坡位表土主要以堆积为主,土层较

厚,细颗粒土壤较多,中坡位表土受径流冲刷影响较大,表层细颗粒土壤被剥蚀,土层较薄,黏粒土壤较多,上坡位表土受径流冲刷的影响较小,土层较厚,细颗粒土壤较多。因此土壤冻结前不同坡位表土孔隙水含量大小为下坡位>上坡位>中坡位,土壤冻结后水分增加量大小为下坡位(5.4%)>上坡位(4.7%)>中坡位(1.2%)。

表 3 相邻土层土壤含水量相关性

土壤(地区)	土壤 层次/cm	1 月			2 月		
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
黑土(海伦)	0—10	1	0.956*	0.900*	1	0.442	0.459
	10—20		1	0.975**		1	0.997**
	20—30			1			1
棕壤(西丰)	0—10	1	0.256	0.467	1	0.930**	0.697
	10—20		1	0.963**		1	0.655
	20—30			1			1
白浆化暗棕壤(梅河口)	0—10	1	0.606	0.428	1	0.876	0.591
	10—20		1	0.978		1	0.907
	20—30			1			1
暗棕壤(扎兰屯)	0—10	1	-0.550	0.859	1	-0.432	-0.002
	10—20		1	-0.171		1	-0.901
	20—30			1			1

注:* 为在 0.05 水平上显著;** 为在 0.01 水平上显著。

西丰、梅河口和扎兰屯地处东北低山丘陵区,西丰地区土壤剖面垂直分布为黏壤土到沙土,研究区坡面坡度较大,坡长较小,上坡位和中坡位布设了坡式梯田,坡面土壤垂直分带与海伦相比有较大差异。从表 5 中可以看出,在研究区内不同坡位在 0—30 cm 土壤毛管孔隙度平均值大小为中坡位(40.9%)>下坡位(38.4%)>上坡位(37.6%),这是由于中坡位布设了梯田后,减弱了水流挟沙能力,导致径流泥沙大多堆积于此,表土以黏壤土为主,上坡位土壤侵蚀最严重,表土多为粉砂土,下坡位地形起伏度较大,土壤水分侧向流动较为明显。不同坡位表土孔隙水含量大小为中坡位>上坡位>下坡位,土壤冻结后水分增加量大小为中坡位(6.6%)>上坡位(2.8%)>下坡位(2.1%)。梅河口和扎兰屯两个研究区内坡面土壤垂直分带性不明显,不同坡位地形和耕地应用结构没有明显的差异,因此前期表土水分分布受坡位的影响较小,在冻结期内水分变化差异较小。

2.3 不同坡向表土水分变化特征

坡向对土壤水分的影响主要体现在光照、温度、雨量、风速、土壤质地等因子的综合作用上,坡向的差异可以最大程度地反映太阳辐射强度的差异,进而反映土壤水分含量的差异。土壤在冻结过程中由于温度、土质和初始含水量不同对水分迁移会产生一定的

影响。

从图 2 中可以看出,在冻结期内,海伦、西丰、梅河口和扎兰屯地区阴坡表土水分高于阳坡($p < 0.05$),海伦和西丰地区不同坡向表土水分含量相差较大,为 5%~10%($p < 0.05$),梅河口和扎兰屯地区相差较小,在 3%以内($p < 0.05$),这一差异可能由于不同地区不同坡向表土水分变化受到的地表气象条件、土质等因素不同所致。西丰地区不同坡向表土水分含量相差最大,阴坡表土水分相比阳坡平均高出 8.6%,这是因为阳坡表层土壤水分在土壤冻结前含量较低,仅有 13.9%,土壤结构松散,吸水能力差,因此土壤完全冻结后水分增加量远远小于阴坡。在土壤剖面变化上,梅河口和扎兰屯地区不同坡向表土在 0—30 cm 土层内土壤水分差异较小($p > 0.05$),海伦地区不同坡向表土在 0—10 cm 土层土壤水分含量差异较大($p < 0.05$),西丰地区不同坡向表土在 0—30 cm 土层土壤水分含量差异较大($p < 0.001$),说明这两个地区坡向对表土水分变化的影响表现不同,海伦地区坡向对表土水分变化的影响主要体现在地表蒸发,西丰地区坡向影响土壤冻结前的水分分布进而影响冻结过程中表土水分变化。从土壤水分随时间变化上来看(图 2),海伦、西丰和梅河口三个地区阴坡和阳坡表土水分变化趋势相反,其中阴坡表土在完全

冻结后水分含量逐渐减少,而阳坡逐渐增加。这一差异受地表积雪融化的影响较大,阴坡积雪融化量少,土壤渗透性差,土壤水分入渗量少,阳坡积雪融化量多,土壤渗透性强,土壤水分入渗量多。

表 4 不同层次土壤水分平均值与变异系数

土壤(地区)	坡位	项目	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
黑土(海伦)	1 下坡位	平均含水量/%	39.62	38.06	39.52
		C_v	0.15	0.12	0.14
	2 中坡位	平均含水量/%	31.28	26.75	28.01
		C_v	0.14	0.02	0.03
	3 上坡位	平均含水量/%	35.27	29.53	28.89
		C_v	0.11	0.07	0.12
棕壤(西丰)	1 下坡位	平均含水量/%	21.30	20.60	18.08
		C_v	0.19	0.07	0.06
	2 中坡位	平均含水量/%	32.87	27.98	26.80
		C_v	0.14	0.1	0.22
	3 上坡位	平均含水量/%	27.37	26.64	19.92
		C_v	0.15	0.12	0.12
白浆化暗棕壤 (梅河口)	1 下坡位	平均含水量/%	22.62	20.67	19.50
		C_v	0.15	0.18	0.18
	2 中坡位	平均含水量/%	21.29	19.07	19.55
		C_v	0.17	0.05	0.13
	3 上坡位	平均含水量/%	19.68	17.74	17.62
		C_v	0.12	0.12	0.25
暗棕壤(扎兰屯)	1 下坡位	平均含水量/%	24.45	22.98	23.13
		C_v	0.08	0.05	0.04
	2 中坡位	平均含水量/%	23.86	22.68	24.50
		C_v	0.13	0.03	0.04
	3 上坡位	平均含水量/%	24.12	22.49	23.46
		C_v	0.11	0.06	0.05

表 5 不同层次土壤毛管孔隙度

土壤(地区)	坡位	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	平均值
黑土(海伦)	1 下坡位	45.26	42.20	42.96	43.47
	2 中坡位	32.97	37.38	34.10	34.82
	3 上坡位	41.11	46.16	45.11	44.13
棕壤(西丰)	1 下坡位	40.24	37.65	37.32	38.40
	2 中坡位	42.31	43.74	36.90	40.98
	3 上坡位	41.59	36.54	34.90	37.68
白浆化暗棕壤 (梅河口)	1 下坡位	38.45	35.46	30.20	34.70
	2 中坡位	36.40	34.69	32.50	34.53
	3 上坡位	33.17	32.67	31.40	32.41
暗棕壤(扎兰屯)	1 下坡位	39.65	39.08	38.27	39.00
	2 中坡位	37.42	37.78	43.00	39.40
	3 上坡位	38.63	39.65	35.72	38.00

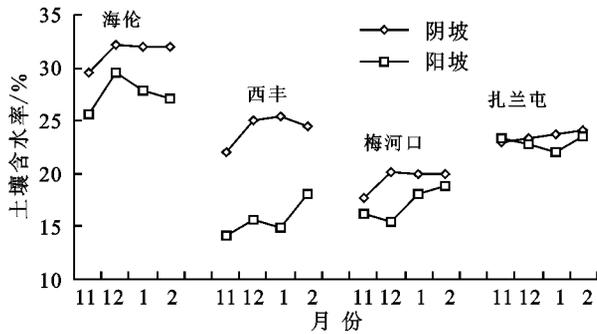


图2 不同坡向0—30 cm 土层土壤水分含量随时间变化

3 结论

(1) 不同地区表土在冻结初期土壤水分迁移量较大,迁移水分为土壤毛细水,土壤水分增加量大小为棕壤(西丰)>白浆化暗棕壤(梅河口)>黑土(海伦)>暗棕壤(扎兰屯),分别增加了3.1%,2.7%,2.5%,0.7%。随着表层土壤冻结过程的持续,土壤水分增加量减小。当表土处于完全冻结状态时,迁移水分为已冻土中的未冻水,黑土和棕壤未冻水迁移明显,白浆化暗棕壤和暗棕壤未冻水迁移不明显。

(2) 在垂直方向上,不同地区表土水分在冻结期内向0—10 cm 土层迁移。在坡面尺度内,坡面土壤侵蚀的结果使土壤在坡面上发生再分配,表土厚度的变化又引起土壤物理性质的变化进而影响冻结期内表土水分的变化。由于坡面土壤、地形和耕地应用格局不同,导致不同坡位表土冻结前水分分布不同,进而影响冻结过程中土壤水分向表层的迁移。

(3) 坡向主要通过影响土壤干湿状态来影响土壤水分传导度,进而影响土壤水分向表层的迁移。坡向对冬季表土水分变化的影响在不同地区表现不同,海伦地区坡向对表土水分的影响主要体现在地表蒸发对表土水分的影响,西丰地区坡向影响表土冻结前土壤水分垂直分布,进而影响土壤水分向表层的迁移,梅河口和扎兰屯地区坡向对表土水分变化影响较小。

参考文献:

[1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2004.
 [2] Hopke S W. A model for frost heave including over-burden [J]. Cold Region Science Technology, 1980,3(2):111-127.

[3] Gilpin R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils [J]. Water Resources Research, 1980,16(5):918-930.
 [4] 景国臣,任宪平,刘绪军,等. 东北黑土区冻融作用与土壤水分的关系[J]. 中国水土保持科学,2008,6(5):32-36.
 [5] 邢述彦. 越冬期土壤温度场及其影响因素初探[J]. 太原理工大学学报,2004,35(2):134-136.
 [6] Baggaley N, Mayr T, Bellamy P. Identification of key soil and terrain properties that influence the spatial variability of soil moisture throughout the growing season [J]. Soil Use and Management,2009,25(3):262-273.
 [7] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments,2001,49(4):723-750.
 [8] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds[J]. Journal of Hydrology,1983,62(1):179-200.
 [9] 李强,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(17):105-111.
 [10] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. Catena,2006,67(3):175-182.
 [11] Xiuqing Z, Van Liew M W, Flerchinger G N. Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period[J]. Soil Science, 2001,166(1):3-10.
 [12] 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.
 [13] 王岩松,王玉玺,李洪兴. 黑土区范围界定及水土保持防治策略[J]. 中国水土保持,2007(12):11-13.
 [14] 解文艳,樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(5):538-540.
 [15] Li R, Shi H, Flerchinger G N, et al. Modeling the effect of antecedent soil water storage on water and heat status in seasonally freezing and thawing agricultural soils [J]. Geoderma,2013,206(9):70-74.
 [16] 范昊明,蔡强国,崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报,2005,21(6):8-11.