
试
验
研
究

冻融作用对黑土区侵蚀沟发育的影响

杨亚娟¹, 景国臣², 刘绪军¹, 杨薇³, 任宪平¹, 王亚娟¹

(1. 黑龙江省水土保持科学研究所 克山实验站, 黑龙江 克山 161600; 2. 黑龙江省水土保持科学研究所 齐齐哈尔实验站, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3. 黑龙江省水土保持科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150070)

摘要: [目的] 冻融作用是黑土区的主要自然现象之一。研究黑土区冻融作用对侵蚀沟发育的影响, 以便防止冻融侵蚀, 保护黑土资源。[方法] 采取室内试验与野外定点定位观测相结合方法, 开展冻融作用对黑土物理性状、冻胀量以及侵蚀沟岸冻裂融塌的试验观测。[结果] 冻融作用使土壤水分增加, 容重减小, 孔隙度增大, 土壤团聚体总量降低, 冻胀量加大。[结论] 冻融作用导致土壤抗蚀能力降低, 是加剧侵蚀沟发育的主要影响因素之一。

关键词: 冻融作用; 侵蚀沟发育; 黑土区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0001-05

中图分类号: S157

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.008

Effects of Freezing and Thawing Cycling on Development of Eroded Gully in Black Soil Area

YANG Yajuan¹, JING Guochen², LIU Xujun¹, YANG Wei³, REN Xianping¹, WANG Yajuan¹

(1. Keshan Experiment Station, Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation, Keshan, Heilongjiang 161600, China; 2. Qiqihar Experiment Station, Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China; 3. Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation, Harbin, Heilongjiang 150070, China)

Abstract: [Objective] Freezing and thawing is one of the major natural phenomena in the black soil area. The effects of freezing and thawing cycling on eroded gully development were studied to prevent freezing and thawing erosion, and then protect the black soil resources. [Methods] The soil physical properties, variation of soil body and gully bank were measured during freezing and thawing process by field measurements and laboratory simulations. [Results] Freezing and thawing cycling increased soil moisture, porosity and frost heaving amount, and the bulk density and the content of soil aggregate were reduced. [Conclusion] Freezing and thawing cycling results in the decrease of soil erosion resistance, it is the main factor leading to an aggravation of erosion gully development.

Keywords: freezing and thawing; erosion gully development; black soil area

冻融作用是指气候的日、年和多年变化导致特定气候区域地球表层一定范围的土冻结和融化作用, 使冻土层中的地下冰和地下水不断发生相变和位移, 产生冻胀、融沉、流变等一系列应力变形^[1]。沟壑冻融侵蚀是侵蚀沟发育的一种特殊形式。当侵蚀沟发展到浅沟、切沟阶段, 冻融作用十分显著^[2]。气温变化时, 地表面和沟壁形成 2 个锋面, 正负温从这 2 个锋面同时向土体侵入, 形成双向冻融区, 造成沟壑土体发生机械破坏, 降低土壤内部的凝聚力和抗剪力, 在水力和重力共同作用下发生土壤侵蚀。沟壑冻融侵蚀以沟头溯源前进和沟壁扩张为主, 表现为沟头沟壁

冻裂、融塌、融滑、融泻等形式。本研究通过野外观测和室内试验, 探讨冻融作用对侵蚀沟发育的影响, 旨在防止冻融侵蚀, 保护珍贵的黑土资源。

1 试验区概况

试验区位于典型黑土区的黑龙江省齐齐哈尔市克山县河北乡新安小流域, 地理坐标为 E125°59′—126°03′, N48°05′—48°07′。多年平均气温 1.1 °C, 1 月份平均气温 -22.9 °C, 7 月份平均气温 21.3 °C, 平均气温年差 44.2 °C, 无霜期 120 d, 土壤冻结深度 2.0~2.5 m, 多年平均降水量 510 mm, 地下水埋深

收稿日期: 2014-04-01

修回日期: 2014-05-06

资助项目: 黑龙江省科技计划管理项目“黑龙江省冻融侵蚀机理研究”(3200632008-01)

第一作者: 杨亚娟(1974—), 女(汉族), 黑龙江省克山县人, 大学本科, 高级工程师。主要从事水土保持科学研究及土壤冻融侵蚀工作。
E-mail: hksyj2004@163.com。

在 20~30 m。试验区流域总面积 14.63 km², 水土流失面积 7.98 km², 占流域总面积的 54.5%, 有大小侵蚀沟 156 条, 沟壑密度为 1.3 km/km², 土壤面蚀和沟蚀均较严重。地貌类型属漫川漫岗台地, 土壤为典型黑土, 成土母质为黄土状亚黏土。

2 试验方法

试验采取野外定点定位观测与室内试验相结合的方法, 在野外定点定位观测的基础上, 通过室内试验补充验证野外观测结果。

2.1 野外试验设计、观测项目及方法

2.1.1 野外试验设计 在黑龙江省克山县新安小流域选择了 3 条发展侵蚀沟作为定位观测点, 在侵蚀沟附近分别布设气温表、分层地温计、冻深器等仪器, 观测气温、不同层次地温及冻深, 同时测定不同冻结深度土壤水分和容重等指标变化, 并对侵蚀沟岸冻裂分别编号, 观测冻裂长度、宽度和深度变化。

2.1.2 观测项目及方法 气温、地温及冻深观测: 采用气温表观测气温, 分层地温表观测不同层次地温, 冻深器测定土壤冻结深度。在选定的 3 条侵蚀沟分别布设气温表, 40, 80, 120, 160 和 200 cm 分层地温计, 2.5 m 冻深器。在土壤表层开始冻结至次年全部融化期内, 每日 8 时和 14 时分别观测气温、地温及土壤冻结深度并记录。

土壤水分测定: 采用冻土钻取土, 室内烘干法测定土壤水分。在试验区布设 2 个取样点, 取样深度 130 cm, 每点按 10 cm 分层 2 次重复取样。在冬季土壤开始冻结前, 先测定未冻土不同层次的水分含量, 土壤开始冻结后直到次年全部融化期间, 每隔 15 d 取样一次, 测定不同层次土壤水分含量。

土壤容重测定: 采取环刀法测定土壤容重。土壤封冻前和次年土壤完全解冻后, 在 0—30 cm 耕作层内, 用环刀在开挖好的剖面上每 10 cm 为一层, 分别取样测定不同层次土壤的容重值。

侵蚀沟岸冻裂观测: 在选定侵蚀沟岸, 按照顺序给每一条冻裂编号, 用钢卷尺结合铁丝探针分别测量冻裂的长度、宽度和深度并记录观测值, 自土壤开始冻结后直到次年全部融化期间每日 8 时观测一次。

2.2 室内试验设计、观测项目及方法

2.2.1 试验设计 根据对黑土区多年冬季土壤含水率测定结果, 土壤含水量多在 20%~40%, 考虑极端土壤水分情况, 试验土壤水分选择 17%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% (重量含水率) 共 7 个处理。其处理制作过程为: 将在选择的观测点取自然状态下的 0—30 cm 原状黑土, 经风干后, 配制成含水率分别为

17%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% (重量含水率) 的均匀土样, 然后分层将其装入试块制作模具中, 制成直径为 10.20 cm, 高度为 15 cm, 密度均匀的圆柱体试块。

将制作好的不同初始含水率试块放入冷冻箱中, 在 24 h 内将冷冻箱内温度由 0 °C 逐渐降低到 -20 °C, 使试块完全冻结, 取出试块, 再经过 24 h 使试块逐渐完全融化 (根据冻融实际测验结果确定为 24 h)。如此往复 5 个冻融循环 (经多年野外实际观察, 每年冻融变化较大的次数一般在 4 到 5 次)。试验采取半封闭半开放环境, 即在试块底部和周围用 10 cm 厚笨板保温防护, 确保冻结和融化过程均由圆柱试块的顶部开始, 逐渐向下冻结和融化, 同时在试块底部放置 2 层 1 cm 厚的泡沫作为缓冲层, 在每次冻结前向底层泡沫内注入 20 ml 清水, 始终保持试块底部有一定的水分供应, 模拟自然状态下土壤水的补给。

2.2.2 观测项目及方法

(1) 土壤水分测定。采取破损性试验终态的土壤含水率方法。在每次试验中每个处理都设 5 个试块, 按循环次数粉碎后, 分别按 0—5 cm, 5—10 cm 和 10—15 cm 3 个层次取样, 用恒温干燥箱烘干测试土样, 用天平称量湿土样和烘干土样重量, 计算不同冻融循环周期试块不同层次的土壤含水率。

(2) 试块冻胀量测定。采取体积测量法。使用卡尺分别在各冻融周期的完全冻结时, 测定试块的 5, 10, 15 cm 处的直径和试块高度值, 计算各冻融循环周期试块体积。

(3) 土壤孔隙度测定。土壤孔隙度采用经验计算公式为:

$$p_i = 93.947 - 32.995\rho_d^{[3]}$$

式中: p_i ——土壤孔隙度 (%); ρ_d ——土壤容重 (g/cm^3)。

(4) 土壤水稳性团聚体测定。采取湿筛法测定土壤各级水稳性团聚体含量, 筛孔直径分别为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm。

3 结果与分析

3.1 冻融作用使土壤水分发生迁移

冻融作用使土壤中的水分发生迁移, 土体含水量增加^[4]。在土壤冻结过程中, 由于温度梯度的变化, 使水分重新分布, 水分从暖端向冷端迁移^[5]。通过野外定点定位观测和不同初始含水率室内模拟试验均表明, 除 17% 和 45% 两个极端初始含水率处理外, 其余处理土壤在冻结过程中, 水分都从下部暖端向上部冻结锋面迁移, 从而增加冻结层的水分 (见图 1 和表 1)。

图 1 是新安小流域野外观测点测定的随冻结深度增大土壤含水率变化曲线。图 1 中 2003 年 10 月 14 日为土壤冻结前不同层次水分情况,其它 3 个时间是土壤不同冻结深度时的水分情况。随着时间的变化和土壤冻结深度增大,冻结层土壤含水量均有增加的趋势,到 2003 年 12 月 1 日冻深 50 cm 时,0—50 cm 各层次土壤的含水量都有不同程度的提高,提高幅度最大的 0—10 cm 土层含水量增加了 2.27 个百分点;到 2003 年 12 月 31 日冻深 100 cm 时,提高幅度最大的 0—10 cm 层次的土壤含水量增加了 3.25 个百分点,可见含水量增加幅度很大。

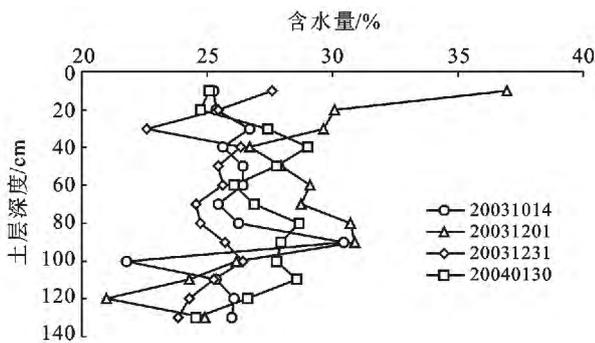


图 1 新安小流域观测点土壤水分曲线

表 1 是室内试验土壤水分测定结果,在 20%~40% 的 5 个处理中,0—5,5—10,10—15 cm 这 3 个层次土壤水分均有所增加,但增加的幅度差异较大,波动范围在 0.06~41.31%;而从整个试块看,土壤水分分别增加了 21.50%,11.75%,9.25%,11.66% 和 2.41%,表现出随土壤初始含水量的增加,土壤水分增加幅度减少的趋势。而两个极端处理情况各有不同,17%土壤初始含水率因含水量过低,土壤结构比较松散,土壤吸收底部水分能力弱,所以在冻融循环过程中水分增加幅度很少;45%土壤初始含水率因含水量远超过土壤田间最大持水量,自由水大量增加,以重力水形式下渗,造成土壤含水率降低。

表 1 冻融作用对新安小流域土壤水分迁移影响

水分处理/ %	土层深度/ cm	土壤含水率/%	
		测定值	变化率
17	0—5	15.58	-8.35
	5—10	16.52	-2.81
	10—15	20.98	23.42
20	0—5	20.55	2.76
	5—10	23.88	19.41
	10—15	28.26	41.31
25	0—5	25.22	0.89
	5—10	26.29	5.18
	10—15	32.29	29.18
30	0—5	29.98	-0.07
	5—10	31.72	5.73
	10—15	36.64	22.12
35	0—5	37.79	7.97
	5—10	38.96	11.33
	10—15	40.48	15.67
40	0—5	40.03	0.06
	5—10	40.80	2.01
	10—15	42.06	5.16
45	0—5	41.03	-8.82
	5—10	41.40	-8.00
	10—15	41.62	-7.50

注:冻融温度范围-20℃~20℃,5个冻融周期平均值

3.2 冻融作用使土壤容重降低

土壤在冻结过程中由于土壤中冰晶体含量增多,土壤颗粒间发生挤胀作用,试块体积增大,土壤容重降低。随着冻融循环次数的进一步增加,土壤密度将降低到一个接近稳定的数值^[6]。表 2 是新安小流域野外观测点两条侵蚀沟附近 0—30 cm 土层土壤冻结前和融化后容重测定结果,可以看出,两点经 1 个冻结融化周期后,0—30 cm 层次土壤容重都有不同程度的降低,且表层的 0—10 cm 降低最大,幅度达到 1.7%~7.1%,说明冻融作用对表层土壤容重影响最大,土壤变得更疏松分散,粘结力降低,抗冲抗蚀能力减弱。

表 2 新安小流域观测点土壤容重测定结果

土层深度/ cm	西侵蚀沟土壤容重/(g·cm ⁻³)		东侵蚀沟土壤容重/(g·cm ⁻³)	
	未冻土(20030927)	冻结融化土(20040416)	未冻土(20030928)	冻结融化土(20040416)
0—10	1.384	1.286	1.123	1.104
10—20	1.401	1.395	1.383	1.335
20—30	1.330	1.292	1.355	1.400
平均	1.372	1.324	1.287	1.280

图 2 是不同初始含水率冻融模拟试验土壤容重变化曲线。随着土壤初始含水率的增大,土壤容重降低幅度逐渐增大,到第 5 冻融循环周期时,初始含水

率 17%,20%,25%,30%,35%,40%,45% 试块土壤容重分别降低了 5.48%,9.83%,10.63%,11.66%,11.98%,12.74%,16.20%,土壤含水量越高,冻融对

土壤的疏松作用愈强。随着冻融周期的增加,土壤容重也逐渐降低,从 7 种土壤水分处理平均值看,冻融作用后,各周期土壤容重平均值从初始的 1.213 g/cm^3 分别降低为 $1.177, 1.150, 1.124, 1.096, 1.077 \text{ g/cm}^3$ 。

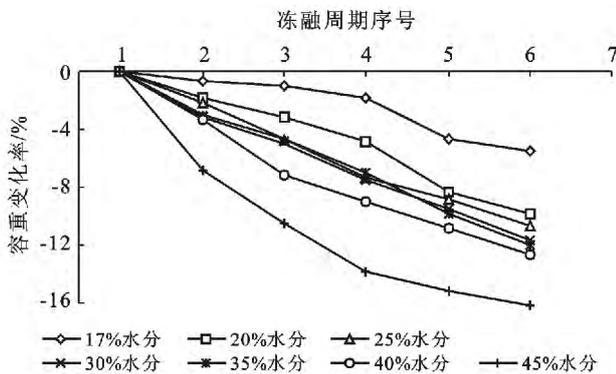


图 2 不同处理各冻融周期土壤容重变化率

3.3 冻融作用使土壤孔隙度增大

在多次冻融循环过程中,黑土的容重和孔隙度都发生变化,且变化的幅度较小^[3]。土壤在冻结过程中水分的迁移变化,使土壤中形成的冰晶体增多,土壤体积膨胀,冰晶体充填土壤孔隙,使得土壤颗粒之间产生挤涨和推压,从而引起土壤颗粒的位移;同时,土壤在融化过程中也存在水分的迁移,相应也会增加土粒之间的推动作用,多次冻融循环迫使土壤孔隙度增大,土壤变得疏松多孔。图 3 是通过冻融试验绘制的土壤孔隙度变化曲线。

随着土壤初始含水量的增多,冻融前后的土壤孔隙度变化增强。在土壤初始含水率为 17%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 和 45% 时,到第 5 冻融周期,土壤孔隙度分别增加 3.91%, 7.62%, 7.94%, 8.58%, 8.85%, 9.41% 和 12.12%。随着冻融循环次数的增加,土壤孔隙度逐步增大,从 7 种土壤水分处理平均值看,冻融作用后,各周期土壤孔隙度由初始的 53.75%

分别增大到 55.12%, 56.00%, 56.86%, 57.76% 和 58.42%, 分别增加了 2.55%, 4.19%, 5.77%, 7.46% 和 8.69%。

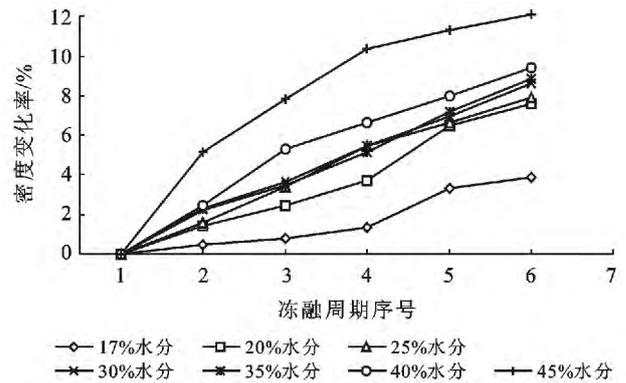


图 3 不同处理各冻融周期土壤孔隙度变化率

3.4 冻融作用影响土壤团聚体稳定性,降低土壤抗蚀抗冲性能

冻融过程中土壤团聚体稳定性受土壤质地、有机质含量、最初团聚体大小、土壤含水量、冻结温度和冻融循环次数的影响^[7-8]。从表 3 可知,除 17% 初始含水量外,冻融作用使不同初始含水量土壤团聚体总量(WAS)降低,平均重量直径(MWD)减小,并且随初始含水量的增加而增大。当土壤初始含水率 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% 时,土壤团聚体总量(WAS)与对照相比,分别降低 5.09%, 5.19%, 8.10%, 8.28%, 9.63%, 12.31%, 而平均重量直径(MWD)分别减小 8.62%, 13.79%, 22.41%, 27.59%, 27.59%, 34.48%, 说明冻融作用破坏了土壤团聚体,使土壤团聚体稳定性降低,进而降低了土壤的抗蚀抗冲性能。目前不少国内外学者研究土壤抗蚀性时发现土壤团聚体(特别是水稳性团聚体)对土壤侵蚀的影响很大,土壤水稳性团聚体数量与稳定性是制约土壤抗蚀性和抗冲性的重要因子^[9]。土壤水稳性团聚体的含量与土壤可蚀性呈显著负相关关系^[10]。

表 3 不同处理冻融作用后土壤团聚体测定结果

初始含水率/%	冻融周期序号	各级团聚体含量/%				团聚体总量 WAS/%	平均重量直径 MWD/mm
		5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm		
17	5	1.26	18.95	42.16	7.71	70.09	0.67
20	5	1.05	14.99	28.24	15.46	59.75	0.53
25	5	0.55	12.74	29.64	16.76	59.69	0.50
30	5	0.24	9.61	30.88	17.14	57.86	0.45
35	5	0.28	7.12	30.53	19.82	57.75	0.42
40	5	0.39	7.91	27.19	21.41	56.90	0.42
45	5	0.65	4.31	27.32	22.93	55.21	0.38
对照		0.93	19.34	26.45	16.24	62.96	0.58

3.5 冻融作用使土体发生冻胀破坏

当温度在 0 °C 上下变化时,岩石孔隙或裂缝中的水在冻结成冰时,体积膨胀(增大 9%左右)^[11]。室内模拟试验表明,随着冻融循环次数的增加,不同初始含水率处理试块的体积均呈增大的趋势。从图 4 可以看出,在初始含水率 17%,20%,25%,30%,35%,40%,45% 情况下,随着冻融循环次数的增加,试块体积逐步增大,当第 5 冻融循环周期结束时,各初始含水率试块体积增大的幅度分别为 5.79%,10.93%,11.91%,13.23%,13.62%,14.60%,19.39%,平均增大幅度 12.78%。说明随着初始含水率的增大,在冻融循环过程中土壤中冰凌数量增加,冻胀力增大,促使土壤发生膨胀,从而导致土壤的结构、质地等性质发生脆变,降低土壤的抗蚀性。

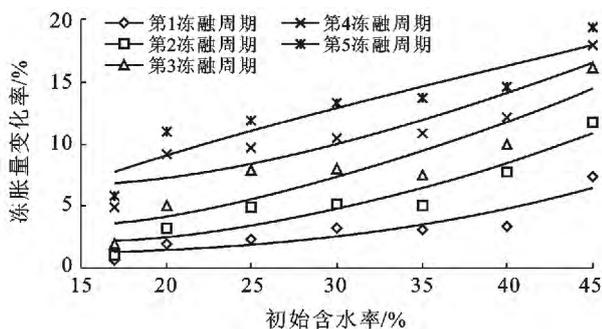


图 4 不同水分处理土壤冻胀量变化率

3.6 侵蚀沟岸冻裂融塌观测结果分析

通过对野外观测点 3 条发展侵蚀沟 13 条冻裂观测结果表明,侵蚀沟岸冻裂宽度随气温的降低呈加大的趋势,最大冻裂宽发生在 1—3 月份,一般当冻裂宽小于 7 cm 左右时,3 月份以后逐步变窄直至完全回复;一般当冻裂宽大于 7 cm 左右时,侵蚀沟岸土体逐渐开始融塌,融塌土方量在 0.1~1.4 m³。总体来说,侵蚀沟岸冻裂融塌主要与冻裂宽度关系密切,即一般当冻裂宽大于 7 cm 左右时,侵蚀沟岸土体发生冻裂融塌。

4 结论

(1) 冻融作用使土壤水分向冻结层迁移,增加了冻结土壤的含水量。通过不同初始含水率冻融试验表明,除 17% 和 45% 两个极端值处理外,其余处理土壤水分都有所增大,平均增加 11.31%。

(2) 冻融作用使土壤物理性状发生改变,降低了土壤抗蚀抗冲性能。冻融作用使土壤容重降低,孔隙度增大,土壤团聚体总量和平均重量直径减小,从而

降低了土壤的粘聚力和剪切力。试验表明,冻融作用使土壤容重平均降低 7.27%;孔隙度平均增大 8.35%;土壤团聚体总量平均减少 6.09%;土壤平均重量直径平均减小 22.41%。

(3) 冻融作用使土壤发生冻胀破坏。在初始含水率 17%~45% 的 7 个处理中,冻融作用使试块体积增大,到第 5 冻融循环周期结束时,各初始含水率试块体积增大的幅度平均为 12.78%。

(4) 冻融作用加剧了侵蚀沟的发育。土壤在冻结过程中发生水分迁移,土壤颗粒吸附水量增多,土壤中的冰晶体增大增多,土壤颗粒发生挤胀作用,土壤结构变得松散,土体膨胀变形,使沟岸土体向沟道一侧倾斜,沟岸出现断裂,多数情况下当冻裂宽度超过 7 cm 时,裂缝不能回复,使沟岸土体与坡面脱离,造成侵蚀沟头溯源侵蚀和沟岸扩张,侵蚀沟不断发育扩大。

[参考文献]

- [1] 李述训,南卓铜,赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土,2002,24(2):109-115.
- [2] 刘绪军,景国臣,齐恒玉. 克拜黑土区沟壑冻融侵蚀主要形态特征初探[J]. 水土保持科技情报,1999(1):28-30.
- [3] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):186-189.
- [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] 毛雪松,胡长顺,窦明健,等. 正冻土中水分场和温度场耦和过程的动态观测与分析[J]. 冰川冻土,2003,25(1):55-56.
- [6] 杨成松. 冻融循环作用对土体结构和性质影响的试验研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2003.
- [7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes soil aggregate stability [J]. Cntena, 2003, 52(1):1-8.
- [8] Mostaghimi S, Young R A, Wilts A R, et. al. Effects of frost action on soil aggregate stability[J]. Transaction of the ASAE, 1988,31(2):435-439.
- [9] 史奕,陈欣,闻大中. 东北黑土团聚体水稳性研究进展. 中国生态农业学报[J]. 2005,13(4):95-98.
- [10] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [11] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京:中国林业出版社,2000.