

草甸土冻融环境与春季解冻期降雨侵蚀模拟研究

杨俊鹏, 周丽丽, 范昊明, 武 敏

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘 要:以我国东北草甸土为研究对象,采用人工模拟降雨方法,分析试验区冻融环境及春季解冻期室外降雨侵蚀过程。结果表明:温度大体经历了降温、稳定和升温 3 个阶段,对应地表土壤经历了冻结、稳定冻结和融化 3 个过程;表层土壤在冻结和融化的两个过程中都经历了冻融作用,其中 10 月末至 12 月初和 2 月中下旬至 3 月上中旬均是地表土壤经受冻融交替作用强烈的时期,特别是融化阶段是控制春季解冻期土壤侵蚀的关键时期;冻融前后土壤含水率减小 19%、土壤容重减小 8.9%;整体土壤侵蚀速率表现为增加趋势;小雨强解冻深度浅的处理,侵蚀速率增加幅度不大,坡面细沟以宽浅型为主;大雨强侵蚀速率波动性增强。

关键词:冻融环境; 土壤侵蚀; 解冻深度

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0026-03

Study on Freezing and Thawing Environment of Meadow Soil and Rainfall Erosion in Spring Thaw Period

YANG Jun-peng, ZHOU Li-li, FAN Hao-ming, WU Min

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

Abstract: Taking meadow soil in northeastern China as research object, freezing and thawing environment in the test region and the outdoor rainfall erosion process in the spring thaw period were analyzed. The results showed that: temperature generally experienced three stages of cooling, stability and warming, corresponding to the surface soil, it experienced three process of freezing, stable freezing and thawing; Surface soil both experienced freeze-thaw role in the process of freezing and thawing. Late October to early December and middle-late February to early-middle March were the strong period of alternate freezing and thawing effects of the surface soil, especially the melting stage was the critical period to control soil erosion in the spring thaw; after freezing and thawing, soil moisture content decreased by 19%, soil bulk density decreased by 8.9%; The overall soil erosion rates showed an increasing trend; when rainfall intensity was small and thaw depth was shallow, erosion rates increased marginally, slope rill mainly was wide-shallow rill; when rainfall intensity strong, rain erosion rate volatility increase.

Key words: freeze-thaw environment; soil erosion; thaw depth

春季解冻期冻土层开始解冻,土壤受到“夜冻昼融”的作用,物理力学性质发生改变,且存在未完全解冻层,一般极易发生侵蚀。已有的研究表明,土壤侵蚀在春季解冻期的表现较为强烈^[1-6],占全年水土流失量的绝大部分^[4,7]。前期研究也表明^[8-10],我国东北地区土壤侵蚀发展速度较快,春季解冻期土壤侵蚀所占比例较大,且有加剧的趋势。对我国东北黑土春季解冻期土壤侵蚀的已有研究认为^[11-12],该时期降雨

侵蚀受未完全解冻层影响较大,降雨的侵蚀能力较强,导致这一时期坡面土壤侵蚀严重。

本研究以我国东北地区草甸土为研究对象,分析试验区的冻融环境,并通过室外人工模拟试验,分析冻融前后土壤含水率以及容重的变化、春季解冻期初始解冻深度和降雨强度对表层土壤降雨侵蚀的影响,为进一步揭示春季解冻期土壤侵蚀机理提供理论依据。

收稿日期:2011-08-28

修回日期:2011-09-14

资助项目:国家自然科学基金项目(41071183);国家自然科学基金青年基金项目(41101256)

作者简介:杨俊鹏(1972—),男,讲师,从事水土保持与水利工程管理研究。E-mail:fanhaoming@163.com

通信作者:周丽丽(1979—),女,讲师,博士,从事土壤侵蚀、流域治理研究。E-mail:zhoulilia@163.com

1 材料与方法

1.1 材料

试验地位于沈阳农业大学水利学院综合实验场。气候类型属于温带大陆性季风气候,全年接近 $1/3$ 的天数在 0°C 以下,多年平均冻土深度 1 m 。年降水量 700 mm 。试验用土取自该实验场满堂河岸边 $0\sim 20\text{ cm}$ 耕作土壤,土壤类型为我国东北草甸土,其分布比较广泛。试验用土取回后风干,过 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的筛,剔除植物根系等杂物。土壤干容重为 1.35 g/cm^3 ,土壤饱和含水率为 35.76% 。为使土壤含水率均匀,不受雨滴击溅及风力侵蚀影响,用不透水材料将过筛后的试验用土盖好。室外试验小区坡长 4 m ,坡宽 1.5 m ,下端连接集流槽,用于收集径流、泥沙样品。降雨试验采用下喷式降雨模拟系统,喷头采用旋转喷射式喷头,喷嘴口径为 3 mm ,有效降雨覆盖面积 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$,降雨高度 6.4 m ,降雨均匀度可达 80% 左右。气象数据来源于国家气象信息中心。

1.2 方法

试验区冻融环境分析资料为 2007 年 10 月初至 2008 年 4 月末的日气温极值资料,重点分析日最高气温、日最低气温变化规律,总结试验区冻融环境特点。利用室外自然的冻融环境,建立室外降雨试验小区。在春季解冻期进行降雨试验,考虑初始解冻深度和降雨强度两个因素。试验设计 3 个初始解冻深度,分别为 $10, 20, 30\text{ mm}$ 。降雨强度设为两个强度,分别为 $50, 60\text{ mm/h}$,试验设计见表 1。

表 1 试验设计

| 试验号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|----|----|----|----|----|----|
| 解冻深度/mm | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| 降雨强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) | 50 | 50 | 50 | 60 | 60 | 60 |

室外试验小区共 6 个,设计坡度为 8° ,2007 年 10 月 6 日前铺设完成,铺土厚度 0.2 m 。经历 1 个冬季之后,2008 年初春,自然条件下,表层土开始融化至满足试验设计解冻深度要求即开始降雨试验。试验前用环刀在坡面上、中、下部取 3 个样测定表层土壤容重、含水率。为避免降雨时间过长,受到风力影响,以及土壤冻结层融化过多会影响试验结果,设计降雨历时 20 min 。试验开始,产流后每 1 min 收集一次径流泥沙样品。试验结束后,测量径流泥沙量,烘干泥沙样品。

2 结果与分析

2.1 试验区冻融环境

试验区 2007 年 10 月 1 日至 2008 年 4 月 30 日

日平均气温、日气温极值波动曲线如图 1 所示。试验区受季节性负气温影响,通过地表热交换,土壤形成季节冻结层;到春季气温回升,在 0°C 上下波动时,土壤开始解冻,形成解冻层。试验区土壤冻结过程是由地表向下单方向进行,土壤融化过程是由地表向下及季节冻结层底面向上双方向进行,而对于表层土壤来说,其冻结和融化主要受地表面向下的热交换影响。一般认为,冻融交替作用使表层土壤发生夜冻昼融现象,其温度条件是日最高气温大于 0°C 、日最低气温小于 0°C 。

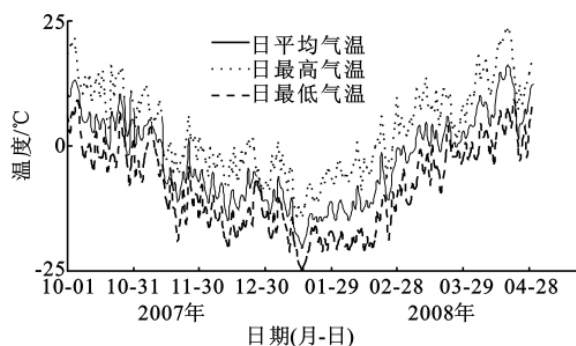


图 1 2007 年 10 月 1 日至 2008 年 4 月 30 日气温变化曲线

由图 1 可见,在 7 个月时间内,温度大体经历了降温(2007 年 10 月 9 日至 2008 年 1 月 7 日)、稳定(2008 年 1 月 8 日至 2008 年 2 月 9 日)和升温(2008 年 2 月 10 日至 2008 年 4 月 27 日)3 个阶段,对应地表土壤经历了冻结、稳定冻结和融化 3 个过程。2007 年 10 月 9 日最低气温第一次出现了负温,表层土壤开始进入冻融循环状态。此后,平均气温、最高气温、最低气温均呈现波动下降趋势,冻深不断增加。表层土壤在降温阶段的 91 d 持续冻结,满足日最高气温 0°C 以上、日最低气温 0°C 以下的天数为 46 d,也就是表层土壤有 50% 时间受到冻融作用影响,其中,10 月 28 日至 12 月 6 日的 40 d 内,有 28 d 表层土壤经历了冻融交替作用,达到总天数的 70%,可见,这一阶段是土壤冻融循环发生较频繁的时段。2008 年 1 月 8 日之后,日气温极值连续 33 d 均为负温,表层土壤处于稳定冻结状态。2008 年 2 月 10 日最高气温升至 0°C 以上,表层土壤进入融化过程,气温开始持续升高,地表土壤受温度日变化影响而处于反复冻融条件中。截至 4 月 27 日,表层土壤在 78 d 的升温过程中逐渐融化,而处于冻融状态的天数为 33 d,其中,2 月 10 日至 3 月 20 日的 40 d 内,有 26 d 表层土壤受冻融交替影响,达到总天数的 65%。分析结果表明,表层土壤在冻结和融化的两个过程中都经历了冻融作用,其中 10 月末至 12 月初和 2 月中下旬至 3 月上中旬均是地表土壤经受冻融交替作用强烈的时期,尤

其是融化过程中的冻融作用,不仅会使土壤性质发生变化,而且在表层融解且存在未完全解冻层的情况下,增加了土壤侵蚀发生的可能,所以,这一时期是控制春季解冻期土壤侵蚀的关键阶段。

2.2 冻融作用对土壤含水率及容重影响

试验坡面在季节冻结层形成之前铺设完成,并用环刀取样测定表层土壤含水率和容重,作为这两项指标冻融前的值。2008 年初春,表土层逐渐融化的过程中,未完全解冻层也开始向下移动。当解冻深度达到降雨设计要求,在进行降雨试验前,同样用环刀取样测定表层土壤含水率和容重,作为这两项指标冻融后的值。通过对试验区冻融环境的分析,表层土壤在冻结过程中有 46 d 受到冻融作用影响,而降雨试验前的融化阶段也有 12~15 d 经历着冻融交替过程。如果 1 d 算做一个冻融循环,降雨试验前,表层土壤已经经历了 58~61 次循环,这期间土壤水经历着复

杂的相变过程和运移过程。因此,在融化阶段,随着土壤温度不断升高,近地表土壤中的冻结水逐渐转化为液态水而蒸发,在得不到及时补充的情况下,致使土壤含水率由冻融前的 16.5% 减小到冻融后的 13.3%,减小幅度达到 19%;同样,由于冻融交替作用影响,土壤结构发生变化、体积膨胀,土壤容重由冻融前的 1.35 g/cm^3 减小到冻融后的 1.23 g/cm^3 ,减小幅度达到 8.9%。可见,试验区土壤在经历了冻结、稳定冻结和融化 3 个过程后,土壤含水率和容重均发生了明显变化,土壤变得更加干燥和疏松,抗蚀能力降低。

2.3 春季解冻期室外降雨侵蚀分析

2008 年 3 月 3 日至 3 月 6 日对满足设计解冻深度、经历了 58~61 次冻融循环的坡面进行降雨试验。试验中将初始解冻深度和降雨强度作为坡面产流的控制因素。侵蚀速率随时间变化曲线如图 2 所示。

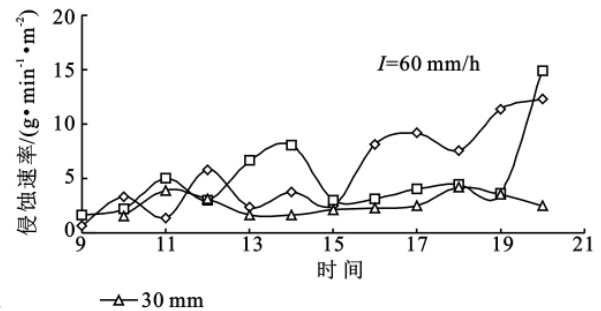
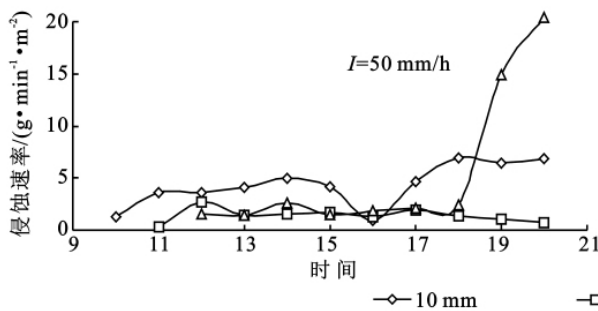


图 2 不同初始解冻深度条件下侵蚀速率变化过程

由图 2 可见,降雨开始后坡面产流时间较晚,推迟到 9 min。坡面产流后,侵蚀速率整体表现为增加趋势。当降雨强度 $I=50 \text{ mm/h}$ 时,在 12~14 min 出现了侵蚀速率的第一个峰值,这主要是因为坡面汇流迅速发展增大了径流侵蚀力;解冻深度 30 mm 时,15~18 min 坡面主要以面蚀为主,没有明显的细沟侵蚀,侵蚀速率相对较小,在 19~20 min 细沟剧烈发育导致侵蚀速率突然增加,可以推断如果继续降雨,侵蚀速率会持续增加;解冻深度 10 mm 和 20 mm 时,土壤解冻深度较浅,从产沙开始到降雨结束,侵蚀速率增加幅度不大,解冻土壤达到饱和的过程短,具有一定侵蚀力的径流也更容易形成,土壤粘聚力降低更易于被侵蚀,坡面侵蚀形态以细沟侵蚀为主,多分布于坡面中下部,宽浅型为主。当降雨强度 $I=60 \text{ mm/h}$ 时,侵蚀速率波动性增强,一方面是因为径流量随降雨强度递增对土壤的侵蚀能力增大;另一方面是因为解冻深度越浅,冻结层就越容易成为细沟侵蚀的控制面,侵蚀量减少,同时又致使细沟横向发展,容易造成沟壁坍塌增加侵蚀量;最后是因为该组试验中解冻深

度 20 mm 处理在 11~12 min 时和解冻深度 30 mm 处理在产流前及 13 min 时均受到了风力影响。

3 结论

温度大体经历了降温、稳定和升温 3 个阶段,对应地表土壤经历了冻结、稳定冻结和融化三个过程。表层土壤在冻结和融化的两个过程中都经历了冻融作用,其中 10 月末至 12 月初和 2 月中下旬至 3 月上中旬均是地表土壤经受冻融交替作用强烈的时期,特别是融化阶段是控制春季解冻期土壤侵蚀的关键时期。

试验区前 1 年 10 月铺设的坡面,第 2 年 3 月降雨试验前共经历了 58~61 次冻融循环,土壤含水率减小 19%,土壤容重减小 8.9%。

对侵蚀速率的分析结果表明,坡面产流后,侵蚀速率表现为增加趋势;降雨强度 $I=50 \text{ mm/h}$ 时,土壤解冻深度较浅的处理,侵蚀速率增加幅度不大,坡面侵蚀形态以宽浅型细沟为主;降雨强度 $I=60 \text{ mm/h}$ 时,侵蚀速率波动性增强。春季解冻期室外降雨试验容易受到风力影响。

(下转第 33 页)

4 结论与讨论

(1)50 a 间,辽宁省出现严重区域性洪涝的年份有 8 a,出现严重区域性干旱的年份有 8 a,年度区域性洪涝指标呈下降趋势,干旱指标呈上升趋势。春旱指标无明显的时间变化趋势特征,夏旱指标呈上升趋势而夏涝指标呈下降,秋旱指标呈上升变化趋势。另外,就辽宁省而言,干旱可以在一年中任何季节都可能发生,而洪涝只可能出现夏季。

(2)从旱涝灾害的空间分布来看,无论是年度干旱还是季节性干旱,发生频率最高的地区都在辽宁省西部及西北部地区;辽宁东北地区的年度干旱、春旱、夏旱出现频率较低,秋旱出现频率最低的地区在辽宁省南部。年度洪涝和夏季洪涝的空间分布特征比较相似,发生频率最高的地区在辽宁省东部及东南部地区,西部地区发生洪涝的频率是最低的。

(3)辽宁省降水集中度最大的西部及西北部地区是辽宁省干旱发生频次最高的地区,东南部地区的降水集中度分布形式与洪涝发生频次最高的地区分布形式非常相似,降水集中度最小的中部地区,干旱和洪涝的发生频次都不是很高,降水集中度的大小与旱涝灾害的严重程度具有一定的相关性。

参考文献:

- [1] 姚玉璧,张存杰,刘振镛. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189.

- [2] 谭桂容,孙照渤,陈海山. 旱涝指数的研究[J]. 南京气象学院学报,2002,25(2):153-158.
- [3] 王玲玲,康玲玲,王云璋. 气象、水文干旱指标计算方法研究概述[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(3):15-18.
- [4] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. 应用气象学报,1997,8(1):26-32.
- [5] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近 50 a 旱涝时空变化及其防御措施研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(6):118-121.
- [6] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区旱涝指标研究[J]. 高原气象,1998,17(4):381-389.
- [7] 刘俊菊,杜国云,孙祝友,等. 德州市近 50 a 来旱涝特征分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):173-175.
- [8] 尉英华,郭品文,刘洪滨. 利用插值法建立历史旱涝格点资料的可行性[J]. 气象与减灾研究,2007,30(3):1-6.
- [9] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):523-529.
- [10] 孙力,安刚,丁立. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究[J]. 地理科学,2002,22(3):311-316.
- [11] 张峰,王秀珍,黄敬峰,等. 基于 GIS 的浙江省旱涝灾害时空分析[J]. 科技通报,2009,25(6):747-752.
- [12] 张录军,钱永甫. 长江流域雨季降水集中度和旱涝关系研究[J]. 地球物理学报,2003,47(4):622-630.
- [13] 张运福,胡春丽,赵春雨,等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. 自然灾害学报,2009,18(2):89-94.
- [14] 杨金虎,王鹏祥,白虎志,等. 中国西北降水年内非均匀性特征分析[J]. 气候变化研究进展,2007,3(5):276-281.

(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] Chow T L, Rees H W, Monteith J. Seasonal distribution of runoff and soil loss under four tillage treatments in the upper St. John River valley New Brunswick, Canada[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(4): 649-660.
- [2] Jane C F, Richard M C, Mohammadreza G. 冻融侵蚀机理[J]. 水土保持科技情报, 2001(3): 26-29.
- [3] Zuzel J F, Allmaras R R, Greenwalt R. Runoff and erosion on frozen soils in northeastern Oregon[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1982, 37(6): 351-354.
- [4] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U. S. Corn Belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487-494.
- [5] Cruse R M, Mier R, Mize C W. Surface residue effects on erosion of thawing soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65(1): 178-184.
- [6] 张永光,伍永秋,刘宝元. 东北漫岗黑土区春季冻融期浅沟侵蚀[J]. 山地学报, 2006, 24(3): 306-311.
- [7] Sharratt B S, Lindstrom M J. Laboratory simulation of erosion from a partially frozen soil[C]// Ascough J C, Flanagan D C. Soil Erosion Research for the 21st Century. St. Joseph, MI: ASAE, 2001: 159-162.
- [8] 范昊明,蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 50-55.
- [9] 张瑞芳,范昊明,王瑄,等. 辽宁省冻融侵蚀发生的气候环境分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 8-12.
- [10] 王飞,范昊明,郭成久,等. 我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 173-177.
- [11] 周丽丽,王铁良,范昊明,等. 未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 1-4, 37.
- [12] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 64-67.