

黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究

陆绍娟^{1,2}, 王占礼^{1,2,3}, 谭贞学⁴

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 钦州市水土保持监测站, 广西 钦州 535000)

摘要: 采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法, 对黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应进行了试验研究。结果表明: (1) 细沟水流切应力随径流历时的变化, 各雨强条件均表现出增大趋势, 可用线性方程很好地描述, 增大速率在产流 6 min 之后略有减小。(2) 细沟水流切应力随径流历时的变化, 不同坡度下也不断增大, 可用直线方程进行描述, 产流过程中变化趋势较为一致, 其中两个大坡度下增加速率较小坡度下稍大, 产流 12 min 以后更大。(3) 坡面细沟水流平均切应力随雨强增大而增大, 可用对数方程描述。随坡度增加而迅速增大, 可用幂函数方程描述。随雨强及坡度的变化可用二元幂函数方程描述。(4) 不同雨强及坡度下, 细沟侵蚀率随细沟水流切应力的增大而增大, 可用线性方程描述。研究表明, 细沟水流剪切力具有显著的侵蚀效应, 是产生细沟侵蚀的重要水力学参数和水动力学根源。

关键词: 黄土坡面; 细沟水流; 切应力; 组合小区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0046-05

中图分类号: S157.1

Shear Stress of Rill Flow and Surface Erosion Effect on Loess Hillslope

LU Shao-juan^{1,2}, WANG Zhan-li^{1,2,3}, TAN Zhen-xue⁵

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi

712100, China; 4. Qinzhou Sub-station of Soil and Water Conservation Monitoring, Qinzhou, Guangxi 535000, China)

Abstract: The flow shear stress involved in rill erosion process on loess hillslope and its effect were studied by multi-plot experiments under simulated rainfall with addition of steady in-flow through the tops of the plot. The results showed that: (1) The rill flow shear stress increased along with time under different rainfall intensities and the relationship could be described well with a linear equation. The rate of increase was a little less in 6 min after than before. (2) Under different slopes, it increased basically in the same trend and an equation of the straight line could be used to describe the change. The rate of increase appeared difference when runoff began after 12 min. (3) The shear stress of average slope rill flow increased with rainfall intensity and rapidly increased with slope. Its relation to rainfall intensity could be described by a logarithmic equation; to slope, by a power function equation; and to both of the two factors, by a dual power function equation. (4) Under different rainfall intensity and slope, the rill erosion rate increased along with the rill flow shear stress and the relationship could be described well with a linear equation. The shear stress of rill flow, that had significant erosion effect, was one of the important hydraulic parameters and hydrodynamic source of rill erosion.

Keywords: loess hillslope; rill flow; shear stress; multi-plot

收稿日期: 2013-04-16

修回日期: 2013-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227); 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 中国科学院重点项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 陆绍娟(1990—), 女(汉族), 云南省陆良县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: shaajuanlu@gmail.com.

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn.

我国黄土高原地形复杂,生态环境脆弱,是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一^[1],而在黄土高原地区坡面各种不同等级阶段的侵蚀形态和侵蚀过程中,细沟侵蚀是该地区坡面极其严重侵蚀的主要方式和强烈侵蚀产沙的重要根源。细沟侵蚀是在细沟水流动力作用下发生发展的,而细沟水流在沿坡向下流动时必然会在其运动方向产生一个作用力,称为水流切应力(水流剪切力)。细沟水流剪切应力是最重要的坡面细沟水流动力学参数,也是应用最为广泛的水力学参数之一,其主要作用是冲刷土壤、破坏土壤原有的结构,使坡面土壤遭受细沟水流侵蚀,造成坡面土壤流失及土地资源破坏切割。细沟侵蚀与细沟水流剪切作用密切相关,细沟水流切应力的大小严重影响着细沟侵蚀强度的变化。因此,阐明细沟水流切应力变化特征及其侵蚀响应可以深入认识坡面细沟侵蚀动力学过程机理,并可为坡面水流动力调控和水土流失治理提供科学依据。

国内外学者对坡面流的水流切应力进行了诸多研究^[2-13],并在对径流剪切力及其与土壤分离、侵蚀的关系研究中使用了不同的方法,得出了丰富的研究成果。本研究采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法,研究黄土坡面细沟水流剪切应力及其侵蚀效应,以深入认识黄土坡面细沟水流水力学性质及细沟侵蚀动力学过程机理。

1 材料与方法

1.1 试验装置与供试土壤

试验装置为自行设计加工的移动式变坡钢质组合小区(图1)。该组合小区由3个小区组成(1,2,3号),小区规格均为:长80 cm×50 cm×35 cm。1号小区用于为2号小区中的细沟小区提供顶部汇流汇沙,置于2号小区上部;2号小区紧接1号小区设置,装土时由两边向中间均匀倾斜10°,中间为10 cm宽度的细沟小区,用于观测具有细沟间区的细沟中的总水沙过程,实现对黄土坡面一段细沟的水沙变化过程观测与模拟。1和2号两个小区之间用钢质封闭导流槽连接。为保证汇入流不造成冲刷,2号小区在加工时长度进行了适当延长,以使上端能有适当宽度的非土面水流缓冲带。3号小区装土与2号小区相同,但中间留出10 cm宽度的钢槽不装土,用于观测坡面细沟两侧的细沟间产流产沙,取得细沟小区两侧细沟间的汇流汇沙数值,置于组合小区的旁边。试验用土取自位于黄土高原腹地的陕西省安塞县(属典型黄土高原丘陵沟壑区),土壤类型为黄绵土,试验前期土壤含水量为14%,容重为1.2 g/cm³。

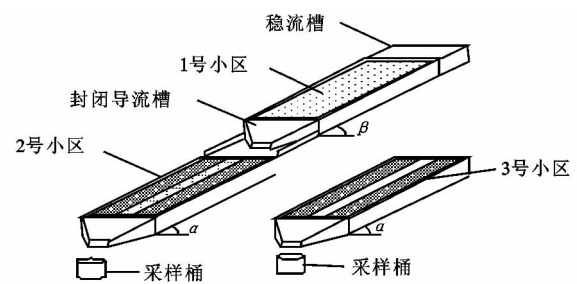


图1 试验装置示意图

1.2 试验设计与观测计算

试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。由于试验小区长度较短,为保证足够的降雨产流汇流流量,降雨产流开始时在1号小区上端同时进行0.12 m³/h的定流量放水,其作用相当于增加小区的坡长,使各场降雨试验的产流汇流流量统一提高同一等级(相当于注入稳定基流),而降雨产流汇流与定流量放水叠加形成的流量,其变化规律依然随降雨强度及坡度的改变而变化。试验设计坡度分别为9°,12°,15°,18°和21°,雨强为2 mm/min的试验5场;雨强分别为1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 mm/min,坡度为15°的试验5场,共进行20场试验(重复一次)。各场降雨在开始产流后统一降雨历时为18.25 min。为消除装土时表面留下的松土对水流的影响,试验在产流0.25 min后开始第一次观测,以后每隔3 min观测一次,直到降雨停止。各坡度雨强组合条件下不同径流时刻细沟小区中的细沟水流流速用高锰酸钾染色法测量,测流长度为整个细沟小区的长度,即80 cm,进一步通过加权平均计算,则可取得一场降雨径流过程的细沟水流平均流速。组合小区各出口各次水沙观测则皆通过与流速观测同步的计时计容取浑水样进行,取样后用量筒精确量取浑水样体积,然后澄清、撇掉清水、烘干称重后计算获得取样含沙量,进一步计算出各时刻相应的细沟侵蚀率及细沟清水径流量,结合细沟水流流速计算出细沟水深。在观测得到细沟水流流速及水深的基础上,计算出不同径流时刻细沟水流的切应力:

$$\tau = \gamma R J$$

式中: τ ——水流切应力(Pa)或(N/m²); γ ——水流容重(N/m³); R ——水力半径(m)[本研究为矩形细沟断面, $R = hb/(2h+b)$, h ——水深(m), b ——水宽(m)]; J ——水力坡度, $J = \sin\theta$, θ ——床面坡度。进一步通过加权平均计算,则可取得一场降雨径流过程中细沟水流的平均水流切应力。细沟侵蚀率为单位时间单位细沟投影面积上的侵蚀量,由2号小区出口取样泥沙量与1号小区出口取样泥沙量及3号小

区出口取样泥沙量之差,除以细沟小区投影面积及取样时间所得。

2 结果与分析

2.1 细沟水流切应力随径流过程的变化

2.1.1 不同雨强下细沟水流切应力随径流过程的变化 图 2 为不同降雨强度下细沟径流切应力随径流过程的变化。从图 2 中可以看出,不同降雨强度条件下,坡面细沟水流切应力随径流过程的变化呈现出随径流历时的增长细沟水流切应力逐渐增大,增大速率在开始产流的 6 min 以后略小于 6 min 以前。开始产流后的 3 min 内,各雨强条件下的细沟水流切应力大小差异较小,3 min 以后差异增大,降雨强度越大,相应的细沟水流切应力越大。对细沟水流切应力随径流过程的变化进行统计分析得出,细沟水流切应力随径流过程的变化可用线性方程描述,各降雨强度条件下相关性均十分显著。

坡面细沟水流切应力变化是水力半径与水力坡度变化的综合表现,其中水力半径的变化又决定于水深变化。同坡度不同雨强条件下的定雨强降雨(研究条件下也包括降雨产流开始后的定流量放水)过程中,坡面细沟水流的水力坡度是定值,而由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流的水深随径流过程的变化表现为随径流历时的增长而逐渐增大,因此,坡面细沟水流切应力随径流过程的变化也就必然表现为随径流历时增长细沟水流切应力逐渐增大。

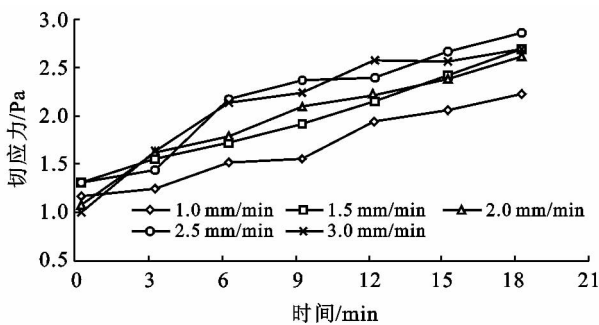


图 2 不同雨强下细沟水流切应力随径流过程的变化

2.1.2 不同坡度下细沟水流切应力随径流过程的变化 图 3 为不同坡度下细沟径流切应力随径流过程的变化过程,从图 3 可以看出,不同坡度条件下,细沟水流切应力随径流过程的变化表现为随径流历时的增长细沟水流切应力呈现为不断增大,产流过程中变化趋势较为一致,其中两个大坡度下的水流切应力增加速率较小坡度下稍大,在产流过程的 12 min 以后更大。对试验数据进行统计分析表明,不同坡度条件

下细沟水流切应力随径流过程变化可用直线方程很好地描述。比较图 3 与图 2 可知,不同坡度条件下坡面细沟水流切应力变化过程与不同降雨强度条件下坡面细沟水流切应力变化过程具有很大的相似性,细沟水流切应力都随径流过程的进行而不断增大。主要差异在于,不同降雨强度条件下细沟水流切应力随径流过程的增大速率在开始产流的 6 min 以后略小于 6 min 以前,而不同坡度条件下坡面细沟水流切应力变化趋势较为一致,其中两个大坡度下的水流切应力增加速率较小坡度下稍大,在产流过程的 12 min 以后更大。

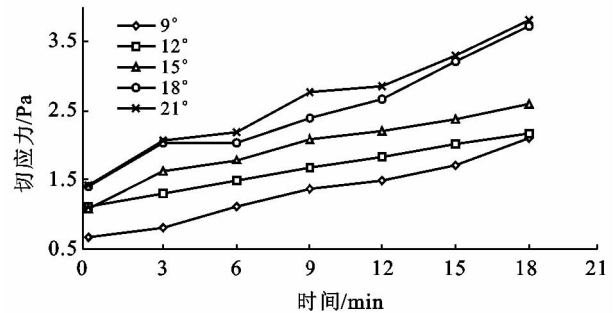


图 3 不同坡度下细沟水流切应力随径流过程的变化

2.2 降雨强度对细沟水流切应力的影响

对相同坡度不同雨强条件下次径流过程的细沟水流平均切应力数据分析可知,相同坡度条件下,坡面细沟水流平均切应力随雨强增大而增大。对坡面细沟水流平均切应力与降雨强度的关系进行相关分析表明,细沟水流平均切应力随降雨强度的变化可用对数方程描述,相关方程及检验结果为:

$$\tau = 0.4237 \ln I + 1.7189$$

$$(R^2 = 0.8835, \text{sig.} = 0.01)$$

式中: τ ——细沟水流平均切应力(Pa); I ——降雨强度(mm/min)。

水流切应力是决定于水深的水力半径与水力坡度的函数,同坡度条件下,其大小变化实际上只取决于水深。同坡度不同雨强条件下,随着降雨强度增大,由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流,其水流平均水深相应增大。因此,随着降雨强度增大,细沟水流平均切应力增大。

2.3 坡度对细沟水流切应力的影响

对相同雨强不同坡度条件下细沟水流平均切应力随坡度变化的试验数据进行分析可知,相同雨强条件下,坡面细沟水流平均切应力随坡度增加而迅速增大。对细沟水流平均切应力与坡度之间的关系进行统计分析得出,同降雨强度下,坡面细沟水流平均切

应力随坡度的变化可用幂函数方程很好地描述, 相关关系十分显著, 经验方程及检验结果为:

$$\tau = 0.2003S^{0.8548} \quad (R^2 = 0.9865, \text{sig.} = 0.01)$$

式中: τ ——细沟水流平均切应力(Pa); S ——坡度($^\circ$)。

由于细沟水流切应力是水力半径与水力坡度的函数, 水力半径是水深的函数, 水力坡度是坡度的函数, 也即细沟水流切应力的大小取决于水深与坡度的组合变化。虽然从切应力表达式中可以看出, 切应力与坡度具有必然的关系, 但由于随坡度变化, 水深也有相应的变化, 无法在实际情景下调节出具有固定水深的变化坡度, 因此, 切应力表达式中反映的切应力与坡度间的必然关系, 在实际中是无法获得的。这样, 只能根据试验数据计算出切应力, 再将已经包含了坡度而计算出的切应力与坡度进行相关分析, 才能真正获得实际水流条件下切应力随坡度的变化规律。因此, 细沟水流切应力的大小取决于水深与坡度的组合变化。虽然随坡度增大, 由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流, 其水流平均水深减小, 但由于水深减小对于水流切应力减小的贡献远小于坡度增大对于水流切应力增大的贡献[如 2.4 所述, 坡度对于细沟水流平均切应力的影响大于雨强(水深)的影响]。因此, 组合影响的结果为随着坡度的增大, 细沟水流平均切应力就必然迅速增大。

2.4 降雨强度及坡度对细沟水流切应力的影响

对不同雨强及坡度条件下所有细沟水流平均切应力试验数据进行统计分析, 结果表明, 细沟水流平均切应力随降雨强度及坡度的变化可用二元幂函数方程很好地描述。相关方程及检验结果为:

$$\tau = 0.172I^{0.23}S^{0.85}$$

[$R^2 = 0.975, F(2, 6) = 117 > F(2, 6)_{0.01} = 10.92$]

式中: τ ——细沟水流切应力(Pa); I ——降雨强度(mm/min); S ——坡度($^\circ$)。

从公式中各因子指数可以看出, 坡度对于细沟水流平均切应力的影响大于雨强的影响, 二者对细沟水流平均切应力的影响表现为随雨强及坡度的增大呈增加的正相关关系。

2.5 细沟水流切应力的侵蚀效应

将不同雨强及不同坡度条件下降雨径流侵蚀过程中的细沟侵蚀率随细沟水流切应力变化的试验结果点绘为图 4。从图 4 可以看出, 不同雨强及不同坡度条件下, 总体上, 细沟侵蚀率随细沟水流切应力的增大而增大。通过对细沟侵蚀率与细沟水流切应力关系的试验结果进行统计分析表明, 不同雨强及不同坡度条件下, 细沟水流切应力对细沟侵蚀率的影

响可用线性方程描述, 相关方程及检验结果为:

$$E = 1.8138\tau - 0.1741 \quad (R^2 = 0.6875, \text{sig.} = 0.01)$$

式中: E ——细沟侵蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$); τ ——细沟水流切应力(Pa)。

借鉴 WEPP 模型等以往研究, 可将上式进一步转变为:

$$E = 1.8138(\tau - 0.096)$$

上式表明, 试验条件下的土壤可蚀性系数为 1.8138 s/m, 细沟水流临界切应力为 0.096 Pa。

上述公式表明, 细沟径流过程中的细沟水流切应力与相应的细沟侵蚀率具有显著的相关性, 表明细沟水流剪切力具有显著的细沟侵蚀效应, 是产生细沟侵蚀的重要水力学参数和水动力学根源。

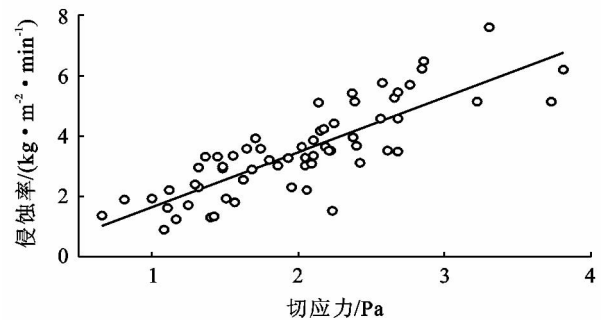


图 4 不同雨强及坡度下细沟侵蚀率与水流切应力关系

3 结论

(1) 不同雨强下, 坡面细沟水流切应力随径流历时的增长逐渐增大, 可用线性方程很好地描述, 增大速率在开始产流的 6 min 之后略小于之前, 各雨强下细沟水流切应力差异在开始产流 3 min 之内较小, 之后增大, 雨强越大, 相应的细沟水流切应力越大;

(2) 不同坡度下, 细沟水流切应力随径流历时的增长不断增大, 可用直线方程很好地描述, 产流过程中变化趋势较为一致, 其中两个大坡度下的增加速率较小坡度下稍大, 产流 12 min 以后更大;

(3) 相同坡度下, 坡面细沟水流平均切应力随雨强增大而增大, 可用对数方程描述。相同雨强下, 坡面细沟水流平均切应力随坡度增加而迅速增大, 可用幂函数方程很好地描述。坡面细沟水流平均切应力随雨强及坡度的变化可用二元幂函数方程很好地描述。

(4) 不同雨强及坡度下, 细沟侵蚀率对细沟水流切应力的响应总体表现为随切应力的增大而增大, 响应关系可用线性方程描述; 细沟径流过程中的水流切应力与相应的细沟侵蚀率具有显著的相关性, 细沟水流剪切力具有显著的侵蚀效应, 是产生细沟侵蚀的重

要水力学参数和水动力学根源。

细沟侵蚀是极其重要的坡面侵蚀过程之一,是国际土壤侵蚀研究的重要对象。细沟侵蚀过程中的水流剪切力在不同坡度与流量条件下的不同是,并且影响调节着细沟侵蚀率。本研究采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法,对黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应进行了试验分析,取得了相应的研究结果。然而,由于试验的坡度、雨强等条件范围所限,其结果还不能代表任何条件下的规律特征,还需进一步研究,以全面揭示汇沙对细沟侵蚀的作用,为进一步全面认识和治理细沟侵蚀提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报,1987,1(1):36-48.
- [2] 郑良勇,李占斌,李鹏. 黄土高原陡坡土壤侵蚀特性试验研究[J]. 水土保持研究,2003,10(2):47-49.
- [3] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法[J]. 中国科学院研究生院学报,2004,21(40):468-474.
- [4] 陈力,刘青泉,李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展. 2005,20(6):761-766.
- [5] 王瑄,李占斌,郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(4):577-580.
- [6] 王瑄,李占斌. 坡面水蚀输沙动力过程实验研究[M]. 北京:科学出版社,2009:48-54.
- [7] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等. 坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J]. 中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
- [8] Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. Trans. of the ASAE, 1965(8):419-422.
- [9] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J]. Trans. of the ASAE, 1972, 15(1):99-102.
- [10] Savat J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall [J]. Earth Surf. Proc., 1977(2):125-140.
- [11] Savat J, Ploey J D. Sheet Wash and Rill Development by Surface Flow[C]// Eryan R B, Yair A. Banland Geomorphology and Piping. Geobooks, Norwich, 1982:113-126.
- [12] Foster G R. Modeling the Erosion Process[C]// Haan C T. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE. Monogr. No. 5. ASAE, St. Joseph M L. 1982:296-380.
- [13] Cantalice J R B, Cassol E A, Reichert J M, et al. Flow hydraulics and sediment transport in rills of a sandy clay loam soil[J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 2005, 29(4):597-607.
- (上接第 45 页)
- [3] 赵军,张久明,孟凯,等. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用:以海伦市为例[J]. 水土保持通报,2004,24(6):53-57.
- [4] 吴晓磊,王大庆,徐博,等. 漫岗丘陵区黑土村级农田土壤养分空间变异研究[J]. 土壤通报 2010,41(4):825-829.
- [5] 孟凯,张兴义. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. 土壤通报,2003,34(1):11-14.
- [6] Pankhurst C E, Hawke B G, McDonald H J. Evaluation of soil biological properties as potential bio-indicators of soil health[J]. Aust. J. Exp. Agri., 1995, 35(7):1015-1028.
- [7] 刘继亮,李锋瑞. 坡向和微地形对大型土壤动物空间分布格局的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1104-1112.
- [8] 郭银宝,许小英. 祁连林区不同植被类型下三种土壤微生物群落的数量分布[J]. 青海农林科技,2005(3):16-18.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [10] 李卓棣,喻子牛. 农业微生物实验技术[M]. 北京:中国农业出版社,1996.
- [11] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 陕西 杨凌:中国科学院水土保持与生态环境研究中心,2012.
- [12] 王禹,杨明义,刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. 核技术,2010,24(1):98-103.
- [13] 安娟,卢嘉,郑粉莉,等. 不同地表处理下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移研究[J]. 水土保持学报,2011,25(6):100-104.