

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

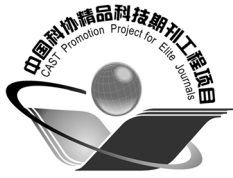


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

目 次

综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵 林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周 俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖 丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林 青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王 曦 曹亚澄 韩 勇等 (558)
- ¹³C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ···· 刘 萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈 恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入¹⁵N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ····· 赵 伟 梁 斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周 兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ····· 曹晨亮 王 卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张 凯 郑 华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡 璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏 昕 石 坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董 智等 (706)

信息

- 2015国际土壤年 ····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像（由张中彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201409140460

东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征*

温磊磊¹ 郑粉莉^{1, 2†} 沈海鸥¹ 胡伟^{2, 3} 杨青森¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院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)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 通过野外原位模拟降雨试验, 研究了东北典型黑土区 3 种降雨强度 (30、60 和 90 mm h⁻¹) 下农耕地坡面侵蚀过程的土壤团聚体流失特征, 分析了流失团聚体特征指标 (平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、分形维数 (D)、平均重量比表面积 (MWSSA)、≥1 mm 粒级团聚体比例 (PA₁)、≥2 mm 粒级团聚体比例 (PA₂)、≥0.25 mm 粒级团聚体比例 (PA_{0.25})) 的变化规律。结果表明: 降雨强度对典型黑土区农耕地坡面侵蚀有显著影响; 次降雨初期侵蚀量占整个降雨过程总侵蚀量的比例随着降雨强度的增加而增大。在 30 mm h⁻¹ 降雨强度下, 团聚体流失以 <0.25 mm 粒级团聚体为主, 其占团聚体流失总量的 90.0%; 在 60 mm h⁻¹ 降雨强度下, 团聚体流失以 <0.25 和 0.5 ~ 1 mm 粒级团聚体为主, 二者占团聚体流失总量的 63.7%; 而 90 mm h⁻¹ 降雨强度下, 团聚体流失以 <0.25 和 2 ~ 5 mm 粒级团聚体为主, 二者分别占团聚体流失总量的 31.7% 和 31.2%。PA_{0.25}、PA₁、PA₂、MWD 和 GMD 与降雨强度和含沙量之间均呈现极显著正相关关系; MWSSA 和 D 与降雨强度和含沙量之间呈现极显著负相关关系。研究结果还表明, PA₁、MWD 和 GMD 皆能较好地表征典型黑土区农耕土壤的团聚体流失特征。

关键词 降雨强度; 侵蚀过程; 团聚体流失; 团聚体特征指标; 典型黑土区

中图分类号 S157 **文献标识码** A

东北黑土区作为我国重要的商品粮生产基地, 其土壤侵蚀发生发展对作物产量具有重要影响, 进而影响我国的粮食安全。但其独特的自然环境和人类活动方式已经使其成为中国土壤侵蚀潜在危险性最大的地区^[1]。该区属于大陆性季风气候, 70% 以上的降水多集中于夏季, 短历时、高强度的暴雨造成该地区水土流失问题十分严重^[2]。降雨强度作为描述降雨特征的重要参数, 对坡面土壤侵蚀过程具有至关重要的影响, 降雨强度一方面通过改变雨滴打击力影响坡面土壤颗粒的分散与击溅; 另一方面通过改变坡面来水量进而控制坡面径流对侵蚀泥沙的分散、搬运和沉积^[3]。

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物在土壤成分的参与下形成的不同尺度大小的多孔结构单元, 土壤侵蚀过程中, 由于雨滴击溅及径流搬运的耦

合作用使土壤团聚体发生迁移^[4]。Martinez-Mena 等^[5]认为, 降雨动能是决定颗粒被作为土壤原始颗粒或团聚体搬运的重要因素。侵蚀泥沙中团聚体粒径分布特征反映了降雨过程中侵蚀力与土壤抗蚀力的作用结果, 对于揭示坡耕地土壤侵蚀机理、侵蚀过程、土壤分散性、坡面动力特征及养分富集特征等具有重要的科学价值^[6]。侵蚀过程中泥沙特性与侵蚀泥沙量同等重要, 泥沙颗粒分布和密度能够显著影响泥沙的搬运和沉积^[7]。有关研究^[4, 8-9]表明, 径流泥沙的流失以粒径 <0.25 mm 的团聚体为主。申艳等^[6]研究表明, 土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大团聚体, 优先迁移微团聚体。郭伟等^[10]通过对 3 种土壤筛分后的团聚体进行室内模拟降雨试验, 结果表明, 在产流初期, 泥沙中 >1 mm 团聚体含量较低, 随着降雨过程的持续, 泥沙中

*国家自然科学基金项目 (41271299) 资助

†通讯作者, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 温磊磊 (1985—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀环境效应评价研究。E-mail: wenleilei1985@163.com

收稿日期: 2014-09-14; 收到修改稿日期: 2015-01-12

>1 mm团聚体含量增加,但泥沙中<0.25 mm团聚体含量始终最高,其值达40%以上。闫峰陵等^[11]研究表明,土壤湿筛后平均重量直径(MWD)与泥沙粒径呈显著的正相关关系。上述结果表明,坡面侵蚀过程中降雨与坡面侵蚀物质之间存在必然联系。但目前多通过室内模拟试验研究降雨强度对坡面侵蚀过程及团聚体流失过程的影响,为避免人工装填试验土槽过程中对土壤性质尤其是团聚体造成影响,本研究在原位土壤上进行不同降雨强度下的人工模拟降雨试验,通过选取不同的团聚体特征指标,监测坡面侵蚀响应过程和土壤团聚体流失特征,为阐明黑土坡面土壤侵蚀机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设在黑龙江省宾州河流域(松花江一级支流)宾县的水土保持研究所科技园内,宾县位于黑龙江省中部,松嫩平原的东部边缘,地理坐标为45°30'37"~46°01'20" N, 126°55'41"~128°19'17" E。试验区平均海拔450 m左右,地面坡度介于1°~8°,坡长400~1 000 m。气候类型属于中温带大陆性季风气候,多年平均降水量548.5 mm,降雨年内分布极不均匀,夏季降水量占全年降水量的64%。试验区的土壤大多为黑土(大于80%),其次沿河流两边还零星分布草甸土等。土壤侵蚀以水蚀为主,侵蚀面积占试验区总面积的33.2%,流域平均侵蚀度为754 t km⁻² a⁻¹。

1.2 试验设计与降雨设备

詹敏等^[12]和张宪奎等^[13]研究表明,导致黑土区土壤流失的主要降雨类型为短历时、高强度降雨,降雨时间多在1 h左右,峰值雨强一般不超过1 h。他们又基于经验频率确定了黑龙江省中度侵蚀的瞬时雨强标准为 $I_{10} \geq 0.71 \text{ mm min}^{-1}$ 。结合此

标准及试验实际情况,本研究共设计3种降雨强度(30、60和90 mm h⁻¹),降雨历时40 min。根据东北典型黑土区长坡长、缓坡度的地形特点,以及试验场地的实际情况,在田间农耕地上布设6个试验径流小区(长10 m,宽1 m),每两个试验小区为一组平行试验,即对于每一种降雨强度,选取两个试验小区进行重复试验,通过对两组重复数据进行方差检验,发现重复性较好,试验结果为两组数据的平均值。由于水土流失严重区的地表坡度一般集中于3°~8°农耕地上,5°是该区侵蚀严重农耕地的代表性坡度(黑龙江省水土保持科学研究所资料),故选择了一块5°农耕地作为试验研究场地。坡向为阳坡,试验小区地表处理为翻耕裸露,土壤为研究区域内的典型黑土,具有很好的代表性。土壤颗粒组成为(美国农业部土壤质地分级制)砂粒占5.8%,粉粒占55.3%,黏粒占38.9%;耕层土壤容重为1.10 g cm⁻³,有机质(重铬酸钾外加热法)含量28.8 g kg⁻¹,pH(水浸提法,水土比:2.5:1)为6.65。

试验采用的降雨设备是黑龙江省水土保持科学研究所自行开发研制的旋转下喷式人工模拟降雨装置^[14-15],降雨强度变化范围为20~150 mm h⁻¹。降雨支架距地面高度为6 m,支架上安装帆布制成风障,试验时通过滑轮将风障升起,避免试验过程中风的干扰。为实际测试降雨设备性能,在试验前期准备阶段进行一系列降雨率定试验,以获取降雨均匀度信息,降雨均匀系数的计算方法为:

$$K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - P|}{nP} \quad (1)$$

式中, K 为降雨均匀系数; P 为平均降雨量(mm); P_i 为第*i*个监测点的降雨量(mm); n 为监测点数($n=10$)。降雨强度率定结果见表1,均匀系数大于0.8,满足试验要求。

表1 试验降雨强度率定表

Table 1 Intensity rating table for simulated rainfalls

| 目标降雨强度 Target rainfall intensity (mm h ⁻¹) | 率定降雨强度 Measured rainfall intensity (mm h ⁻¹) | | | | 均匀系数 Uniformity coefficient | 重复 Repetition |
|--|--|------------|-------------|-----------|-----------------------------------|------------------|
| | 最大值 Max | 最小值 Min | 平均值 Mean | 标准差 SD | | |
| | | | | | | |
| 30 | 35.3 | 32.9 | 33.8 | 1.3 | 0.83~0.90 | 3 |
| 60 | 61.6 | 60.1 | 60.9 | 1.1 | 0.80~0.83 | 3 |
| 90 | 90.0 | 89.5 | 89.8 | 0.4 | 0.88~0.89 | 3 |

1.3 试验步骤

试验开始前，参照研究区农业耕作习惯，对径流小区进行翻耕处理，翻耕深度约为20 cm，翻耕完毕后自沉降2 d。将径流小区表面耙平，采用25 mm h⁻¹的降雨强度进行前期预降雨，至坡面出现径流流路，径流小区出口有连续水流出为止。前期预降雨的目的：一是保持下垫面前期土壤含水量一致；二是通过降雨湿润固结分散孤立的土壤颗粒；三是减少下垫面条件的空间变异性。前期预降雨结束后，用塑料布将试验小区遮盖好，静置24 h后再进行正式降雨，目的是使水分自由下渗以接近自然状态下的土壤水分分布状况，由此使得每次降雨试验时径流小区的土壤水分状况较为一致，前期土壤含水量为28.6%~29.7%。通过对6个试验小区进行相同的翻耕和前期预降雨处理，使正式降雨试验前的地表状况基本一致。为了确保降雨的准确度，每次试验前对降雨强度进行率定，当实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于5%时方可进行正式降雨。坡面开始产流后，记录产流时间，采集径流泥沙样和团聚体分析样。对于径流泥沙样，坡面产流达到稳定前，采集样品的时间间隔为2或3 min；待坡面产流稳定后，采样间隔为3或5 min。对于团聚体分析样，样品采集间隔为6或9 min，并将采集的径流泥沙样依次通过孔径为5、2、1、0.5和0.25 mm的套筛，筛分出的各粒径泥沙转移到饭盒后烘干称重。降雨结束后将未筛分的径流泥沙样称重静置，待泥沙沉淀后倾倒入清液，将泥沙样品烘干称重。

1.4 团聚体特征指标

已有的研究表明，平均重量直径^[16-17]（*MWD*）、几何平均直径^[18]（*GMD*）、分形维数（*D*）（采用杨培玲等^[19]建立的基于不同粒级重量分布的分维模型计算）和团聚体平均重量比表面积^[19]（*MWSSA*）是评价团聚体特征的典型指标，在东北典型黑土区土壤团聚体特征研究中^[20-21]常被选用。利用上述指标对团聚体特征进行综合分析，有利于深入揭示其流失特征。典型指标的计算公式，特别是经验公式均是在前人研究^[16-21]中被广泛认可的，其计算方法如下：

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3)$$

$$MWSSA = \sum_{i=1}^n \frac{6w_i}{\rho_i x_i} \quad (4)$$

$$\frac{M(x < x_i)}{M_t} = \left[\frac{x_i}{x_{\max}} \right]^{3-D} \quad (5)$$

式中， x_i 为某级团聚体的平均直径（mm）； w_i 为某粒级团聚体占总团聚体的流失比例（%）； $\rho_i = \dots \dots \rho_n = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ； i 为团聚体粒级； n 为所分级团聚体粒级总组数； D 为土壤团聚体各粒级分布的分形维数； $M(x < x_i)$ 为粒级直径小于 x_i 的团聚体质量； M_t 为团聚体总质量； x_{\max} 为最大粒级团聚体平均直径。

2 结果与讨论

2.1 农耕地坡面土壤侵蚀特征

由表2可知，农耕地坡面径流量和侵蚀量皆随降雨强度的增加而增大，且通过显著性检验，即各个降雨强度下径流量、侵蚀量之间存在显著性差异。降雨强度为30 mm h⁻¹时，径流系数为19.7%；随着降雨强度增加为60和90 mm h⁻¹时，径流系数分别是30 mm h⁻¹降雨强度下的3.2倍和3.7倍。造成这种现象的原因是试验小区为闭合小区，不存在除降雨以外的其他方式的径流汇入，加之短历时降雨期间土壤蒸发量和土壤水分的深层渗漏皆很小；因此，绝大多数降水转化为坡面径流和入渗。而在3种降雨强度下，入渗量（降雨量与径流量的差值）基本相同，分别为16.1、15.0和16.2 mm；随着降雨强度的增大，由降雨转化成的地表径流量增加，导致径流系数随着降雨强度的增加而增大。与对坡面径流的影响相比，降雨强度对农耕地土壤侵蚀的影响更为显著。与30 mm h⁻¹降雨强度相比，当降雨强度分别增加1倍（由30 mm h⁻¹增加至60 mm h⁻¹）和2倍（由30 mm h⁻¹增加至90 mm h⁻¹）时，坡面侵蚀量分别增加389.3倍和1 367倍，径流含沙量分别增加60.6倍和122.1倍。

表2 不同降雨强度下径流量、侵蚀量、径流系数和含沙量的对比

Table 2 Runoff, soil loss, runoff coefficient and sediment concentration as affected by rainfall intensity

| 降雨强度 Rainfall intensity (mm h ⁻¹) | 降雨历时 Rainfall duration (min) | 坡度 Gradient (°) | 径流量 Runoff (mm) | 径流系数 Runoff coefficient (%) | 侵蚀量 Soil loss (g m ⁻²) | 含沙量 Sediment concentration (g L ⁻¹) |
|---|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|---|
| 30 | 40 | 5 | 3.9a | 19.7a | 1.4a | 0.4a |
| 60 | 40 | 5 | 25.0b | 62.5b | 545.3b | 21.8b |
| 90 | 40 | 5 | 43.8c | 73.1c | 1910.8c | 43.6c |

注：同一列不同字母表示不同降雨强度下各指标在 $p < 0.05$ 水平上差异显著 Note: Different letters in the same column mean difference of significance at $p < 0.05$ level between rainfall intensity treatments

2.2 农耕地土壤团聚体流失

图1为不同降雨强度下径流含沙量和流失团聚体平均重量直径(MWD)随降雨历时的变化。降雨强度为 30 mm h^{-1} 时,含沙量在产流初期即达到峰值,后呈波动下降趋势;降雨强度为 60 和 90 mm h^{-1} 时,含沙量表现为随降雨历时延长而增大,在 $10 \sim 11 \text{ min}$ 达到峰值,最后趋于下降,至降雨中后期达到稳定。径流含沙量变化的原因在于,坡面侵蚀输沙为非饱和和非平衡输沙过程,径流产沙量的大小一方面取决于径流侵蚀能力的强弱,另一方面取决于地面侵蚀物质的补给,两方面因素共同决定了径流产沙量的变化特征^[22]。在中大雨强作用下,降雨初期由于雨滴对表层土壤的击溅分散,使坡面存在大量松散物质,导致坡面径流含沙量随降雨过程的延长而增加。降雨中期,坡面薄层水流的形成减弱了雨滴的击溅分散作用,而径流剥蚀作用提供的搬运物质不足以平衡由雨滴击溅作用提供的搬运物质,因而导致径流含沙量随降雨历时的延长而降低。降雨中后期,在雨滴扰动作用下径流分离能力和坡面土壤抗蚀力达到动态平衡,使径流含沙量变化趋于稳定。研究结果还发现,在 30 、 60 和 90 mm h^{-1} 降雨强度下,前 20 min 降雨过程的侵蚀量分别占整个降雨历时总侵蚀量的 29.1% 、 48.9% 和 63.1% ,表明降雨初期坡面侵蚀量所占的比例随着降雨强度的增加而增大。

流失团聚体的 MWD 随降雨历时的变化基本表现为先减小后增大的趋势。其主要原因为降雨初期坡面存在大量的可被搬运的固体物质,坡面上一些较大土壤团聚体来不及被降雨击溅分散即被径流搬运,造成降雨初期径流泥沙中团聚体 MWD 值较大;随着降雨过程的持续和坡面分散物质的减少,

侵蚀泥沙主要来自降雨径流作用对土壤的剥蚀和分散,雨滴打击对大团聚体的分散和径流对细颗粒的选择搬运造成降雨中期流失团聚体 MWD 值较小;降雨后期,由于前期径流对细颗粒的选择搬运,造成坡面细颗粒缺失,较粗颗粒沉积甚至覆盖在侵蚀表面,引起被选择搬运的侵蚀泥沙变粗^[23]。

2.3 流失团聚体的粒级分布

土壤团聚体在降雨作用下的破碎机制主要包括消散作用(“气爆”现象)、膨胀破坏(主要为黏粒膨胀)和机械破坏作用(多指雨滴打击破坏)。这3种破坏方式一般同时发生,在一定降雨条件下以某一种破坏作用为主^[24-26]。侵蚀过程中泥沙颗粒特性和土壤团聚体破碎情况与侵蚀能量密切相关^[11, 17],可以反映土壤表面结构的变化和径流携带搬运能力以及径流的选择性搬运特征。降雨强度不同,降雨剥离和沉积作用以及径流的选择搬运作用也不相同,导致不同降雨强度下土壤团聚体流失存在差异。不同降雨强度下流失团聚体的粒级分布表明(表3),在 30 mm h^{-1} 降雨强度下,侵蚀泥沙中 $>0.25 \text{ mm}$ (>5 、 $2 \sim 5$ 、 $1 \sim 2$ 、 $0.5 \sim 1$ 和 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$)各粒级团聚体流失比例之间基本未表现出显著性差异,而 $>0.25 \text{ mm}$ 各粒级团聚体流失比例与 $<0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体之间存在显著性差异,侵蚀泥沙中以 $<0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体为主,其占团聚体流失总量的 90.0% ; 60 mm h^{-1} 降雨强度下,侵蚀泥沙中各粒级团聚体流失比例之间均表现出显著性差异,团聚体流失以 <0.25 和 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 粒级团聚体为主,二者占团聚体流失总量的 63.7% ;当降雨强度增加至 90 mm h^{-1} , $>1 \text{ mm}$ (>5 、 $2 \sim 5$ 和 $1 \sim 2 \text{ mm}$)各粒级团聚体流失比例之间表现出显著性差异,团聚

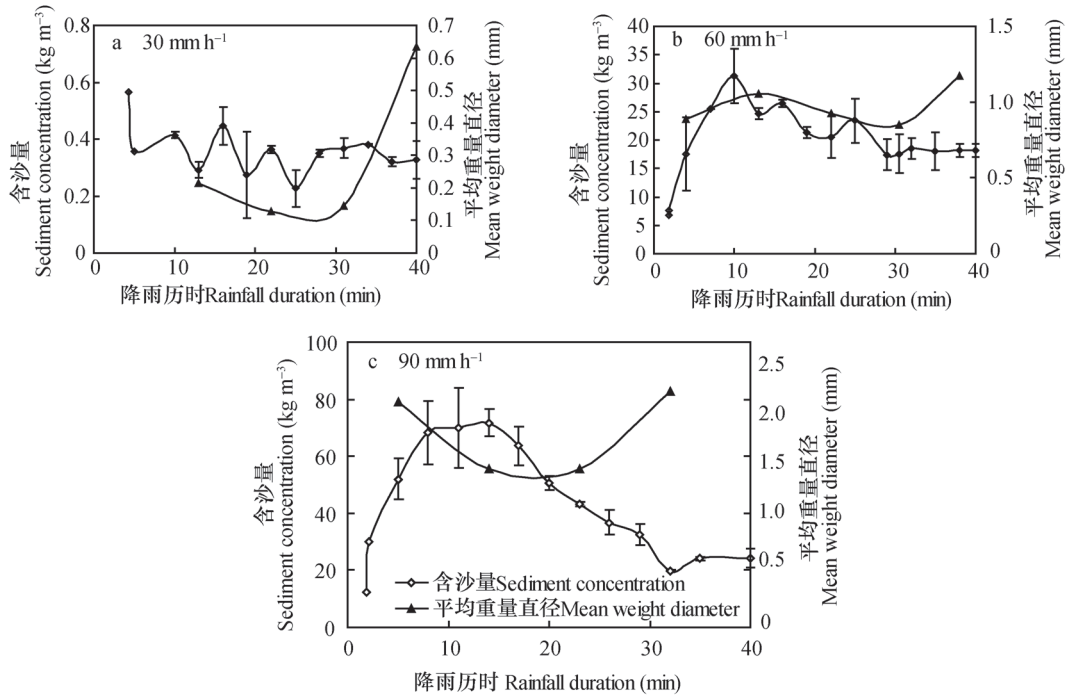


图1 不同降雨强度下流失土壤团聚体平均重量直径和含沙量随降雨历时的变化

Fig. 1 Mean weight diameter of soil aggregates in the sediment and sediment concentration as affected by rainfall duration and rainfall intensity

体流失以2~5和<0.25 mm粒级团聚体为主，二者占团聚体流失总量的62.9%。综上可见，3种降雨强度下，侵蚀泥沙中均以<0.25 mm粒级团聚体为主，这与我国红壤区的研究结果^[27]一致，说明侵蚀过程中，细颗粒泥沙容易被选择搬运，且搬运距离较远。此外，随着降雨强度的增加，侵蚀泥沙各粒级团聚体中，较大粒级团聚体流失比例

增加，这主要是由于降雨侵蚀力和径流侵蚀力增强^[14, 22]，导致大团聚体的破碎作用和被径流搬运的程度增强，因此，0.5~1 mm粒级团聚体在60 mm h⁻¹降雨强度下流失较多，而2~5 mm粒级团聚体在90 mm h⁻¹降雨强度下流失较多。

表3还表明，随着降雨强度的增加，>1 mm的各粒级团聚体流失比例呈增加趋势，<0.25 mm

表3 不同降雨强度下流失土壤团聚体的粒级分布

Table 3 Particle size distribution of lost soil aggregates in the sediment as affected by rainfall intensity

| 降雨强度 Rainfall intensity (mm h ⁻¹) | 各粒级土壤团聚体流失量占土壤团聚体流失总量的比例 Proportion of each particle size fraction of soil aggregates lost to total soil aggregate loss (%) | | | | | |
|---|--|--------|--------|----------|-------------|----------|
| | >5 mm | 2~5 mm | 1~2 mm | 0.5~1 mm | 0.25~0.5 mm | <0.25 mm |
| 30 | 0Aa | 1.4ABa | 4.7Ba | 2.5ABa | 1.4Aa | 90.0Ca |
| 60 | 0.1Ab | 15.6Bb | 12.2Cb | 26.1Db | 8.4Eb | 37.6Fb |
| 90 | 2.4Ac | 31.7Bc | 13.4Cb | 19.8Dc | 4.5Ac | 31.2Bc |
| 供试土壤 ^① | 28.9 | 3.1 | 2.8 | 4.9 | 9.0 | 51.3 |

注：同一行不同大写字母表示不同粒径团聚体在p<0.05水平上差异显著；同一列不同小写字母表示不同降雨强度下相同粒径团聚体在p<0.05水平上差异显著
Note: Different capital letters in the same row indicate difference of significance at p<0.05 level between particle size fractions of soil aggregates lost; different small letters indicate difference of significance at p<0.05 level between rainfall intensity treatments. ①The tested soil

粒级团聚体流失比例呈减少趋势,而0.25~0.5和0.5~1 mm粒级团聚体流失比例随降雨强度的增加呈先增加后减少的变化趋势。周一杨等^[29]研究表明,黑土在溅蚀过程中,粒级>1 mm的团聚体不易发生击溅,雨滴主要对这些粒级的团聚体进行拆分作用。而随着降雨强度的增加,这些不易发生击溅的>1 mm粒级团聚体发生破碎并被径流搬运,相应的<1 mm粒级团聚体的流失比例逐渐减小(表3)。通过显著性分析可知,除1~2 mm粒级团聚体在60和90 mm h⁻¹降雨强度下未表现出显著性差异外,不同降雨强度下,相同粒级团聚体流失比例之间均表现出显著性差异。造成这种现象的原因是雨滴击溅能力、径流搬运能力和团聚体形成机制与稳定性共同作用的结果,大粒级团聚体是微团聚体或土壤单粒通过胶结物质胶结而成,内聚力相对较小,在较强雨滴击溅分散下易破碎为较小粒级团聚体,该结果通过对比供试土壤与各降雨强度下的团聚体粒级分布及稳定性特征可以证实(表3和表4);而<0.25 mm粒级土壤微团聚体形成主要取决于黏粒和三氧化物的黏结作用,团聚体孔隙小,弯曲程度大,内聚力大,不易破碎,团聚体较为稳定^[27]。30 mm h⁻¹降雨强度下,坡面降雨和径流能量相对较小^[14, 22],不足以使坡面大团聚体发生破碎和迁移,因此,侵蚀泥沙中流失团聚体以<0.25 mm粒级土壤微团聚体为主。降雨强度增加至60 mm h⁻¹,坡面雨滴击溅分散和径流搬运能力增强^[22],导致坡面土壤中部分大团聚体被分散为较小粒级团聚体(表3),并开始迁移,从而使>0.25 mm粒级团聚体流失比例增加。降雨强度增加至90 mm h⁻¹,较强的径流搬运能力^[22]导致部分大团聚体尚未破碎为较小粒级团聚体即被搬运,从而使大团聚体流失比例明显增加,相应的0.5~1、0.25~0.5和<0.25 mm粒级土壤微团聚体流失比例减小。综上所述,降雨击溅分散和径流搬运能力对典型黑土区土壤不同粒级团聚体的形成机制和稳定性有显著影响,需要进一步深入研究。

2.4 表征团聚体流失的特征指标

一般认为,0.25 mm粒级团聚体是土壤团聚体中大团聚体和微团聚体的分界,Six等^[28]也提出0.25 mm粒级团聚体是最好的土壤结构体,>0.25 mm粒级团聚体含量可以反映土壤结构的优劣和土壤团聚体数量的变化;周一杨等^[29]研究认为模拟降

雨条件下,溅蚀对典型黑土区大团聚体富集作用与损耗作用的临界团聚体粒级为1 mm;Farres^[30]认为<2 mm粒级团聚体易形成土壤结皮,因此,为综合表征侵蚀泥沙中的团聚体流失特征,本研究除选取平均重量直径(*MWD*)、几何平均直径(*GMD*)、分形维数(*D*)和团聚体平均重量比表面积(*MWSSA*)等典型指标外,还补充选取了≥0.25 mm粒级团聚体所占比例($PA_{0.25}$)、≥1 mm粒级团聚体所占比例(PA_1)和≥2 mm粒级团聚体所占比例(PA_2)作为特征指标。由表4可知,不同降雨强度下,各团聚体特征指标之间均表现出显著性差异。流失团聚体的*MWD*和*GMD*均随降雨强度的增加而增大,且各个降雨强度下表现出显著性差异。与30 mm h⁻¹降雨强度相比,60和90 mm h⁻¹降雨强度下的*MWD*分别增大4.0倍和6.4倍,*GMD*分别增大3.2倍和4.9倍。*MWD*和*GMD*的差异说明,随着降雨强度的增大,流失团聚体粒径团聚程度增大。*MWSSA*和*D*均表现出随降雨强度的增大而减小的趋势。与30 mm h⁻¹降雨强度相比,60和90 mm h⁻¹降雨强度下的*MWSSA*和*D*分别减少了49.3%~58.1%和11.4%~13.4%。*MWSSA*和*D*差异说明侵蚀泥沙中小粒级团聚体含量减少,大团聚体含量增加。 $PA_{0.25}$ 、 PA_1 和 PA_2 均表现为随降雨强度的增加而增大;与30 mm h⁻¹降雨强度相比,60和90 mm h⁻¹降雨强度下的 PA_2 分别增大11.4倍和24.5倍, PA_1 分别增大4.6倍和7.8倍, $PA_{0.25}$ 分别增大6.2倍和7.2倍。通过比较不同降雨强度下 PA_2 、 PA_1 和 $PA_{0.25}$ 的变化量表明,降雨强度对侵蚀泥沙中大粒级团聚体含量的影响更为显著。

土壤侵蚀过程中,在侵蚀驱动力(雨滴打击、径流剪切)的作用下,小粒径团聚体易被搬运,而团聚结构较好的颗粒,对侵蚀驱动力的抵抗作用更强^[11],在侵蚀过程中很难被破碎,造成侵蚀泥沙颗粒较粗(表3)。侵蚀驱动力越大,则侵蚀量越大,且侵蚀泥沙中团聚体粒径也较大;反之亦然。因此,侵蚀泥沙中团聚体粒径分布由侵蚀驱动力和土壤团聚体稳定性大小共同决定^[11]。本研究以降雨强度表征侵蚀过程中的驱动力,分析降雨强度、含沙量与流失团聚体稳定性指标之间的相关关系(表5)。

由表5可知,流失团聚体 $PA_{0.25}$ 、 PA_1 、 PA_2 、*MWD*和*GMD*与降雨强度和含沙量之间均呈现极显著的正相关关系。*MWSSA*和*D*与降雨强度和含沙量

表4 不同降雨强度下流失土壤团聚体特征指标

Table 4 Characteristic indices of the soil aggregates lost as affected by rainfall intensity

| 降雨强度 Rainfall intensity (mm h ⁻¹) | 平均重量直径 <i>MWD</i> (mm) | 几何平均直径 <i>GMD</i> (mm) | 平均重量比表面积 <i>MWSSA</i> (cm ² g ⁻¹) | 分形维数 <i>D</i> | ≥0.25 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> _{0.25} (%) | ≥2 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> ₂ (%) | ≥1 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> ₁ (%) |
|---|------------------------------|------------------------------|--|------------------|--|--|--|
| 30 | 0.3a | 0.2a | 16.5a | 3.0a | 10.0a | 1.4a | 6.1a |
| 60 | 1.0b | 0.5b | 8.4b | 2.6b | 62.4b | 15.8b | 27.3b |
| 90 | 1.6c | 0.8c | 6.9c | 2.6c | 71.7c | 34.0c | 47.4c |
| 供试土壤 ^① | 2.5 | 0.6 | 10.1 | 2.9 | 48.7 | 32.0 | 34.8 |

注：同一列不同字母表示不同降雨强度下各指标在 $p < 0.05$ 水平上差异显著 Note: Different letters indicate difference of significance at $p < 0.05$ level between rainfall intensity treatments. ①The tested soil

表5 流失土壤团聚体特征指标与降雨强度和含沙量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of characteristic indices of lost soil aggregates in the sediment with rainfall intensity and sediment concentration

| | 流失土壤团聚体特征指标 Characteristic indices of soil aggregate in the sediment | | | | | | | 含沙量 Sediment concentration |
|-------------------|--|---|---|----------------------|----------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------|
| | ≥0.25 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> _{0.25} | ≥2 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> ₂ | ≥1 mm 粒级团聚体所占比例 <i>PA</i> ₁ | 平均重量直径 <i>MWD</i> | 几何平均直径 <i>GMD</i> | 平均重量比表面积 <i>MWSSA</i> | 分形维数 <i>D</i> | |
| 降雨强度 ^① | 0.928** | 0.988** | 0.998** | 0.995** | 0.995** | -0.926** | -0.925** | 0.998** |
| 含沙量 ^② | 0.924** | 0.985** | 0.996** | 0.993** | 0.987** | -0.919** | -0.918** | 1.000** |

** $p < 0.01$; $n = 6$. ①Rainfall intensity, ②Sediment concentration

之间呈极显著的负相关关系。降雨强度对 PA_1 的影响最大，相关系数达0.998；其次为 MWD 和 GMD ，二者相关系数相同，均为0.995；各流失团聚体特征指标与含沙量的相关关系中，同样是 PA_1 、 MWD 和 GMD 指标与含沙量相关系数最高，分别为0.996、0.993和0.987，上述结果表明， PA_1 、 MWD 和 GMD 指标能较好地反映典型黑土区农耕地坡面侵蚀过程的团聚体流失特征。 $PA_{0.25}$ 、 PA_1 和 PA_2 与降雨强度的相关系数大小顺序为： $PA_1 > PA_2 > PA_{0.25}$ ，说明随着降雨强度的增大，雨滴侵蚀和径流侵蚀能力皆增加，对大粒级团聚体的影响程度也增加。

3 结论

通过野外原位模拟降雨试验，研究了东北典型

黑土区3种降雨强度下农耕地坡面侵蚀过程的团聚体流失特征，取得了以下研究结论：径流量和侵蚀量均随着降雨强度的增加而增大，且在各个降雨强度下表现出显著性差异。90 mm h⁻¹降雨强度下，径流量分别为30和60 mm h⁻¹的11.1倍和1.8倍，侵蚀量分别为1.365倍和3.5倍。次降雨前20 min的侵蚀量占整个降雨过程总侵蚀量的比例随着降雨强度的增加而增大，30、60和90 mm h⁻¹降雨强度下，其比例分别为29.1%、48.9%和63.1%。30 mm h⁻¹降雨强度下，团聚体流失以<0.25 mm粒级团聚体为主，占团聚体流失总量的90%；60 mm h⁻¹降雨强度下，团聚体流失以<0.25和0.5~1 mm粒级团聚体为主，二者占团聚体流失总量的63.7%；90 mm h⁻¹降雨强度下，团聚体流失以<0.25和2~5 mm粒级团聚体为主，二者占团聚体流失总量的62.9%。随

着降雨强度的增加,各粒级团聚体流失比例变化趋势不同,说明侵蚀过程中团聚体流失是降雨、径流以及团聚体稳定性共同作用的结果,因此,需要对典型黑土区土壤不同粒级团聚体形成机制、稳定性与降雨击溅分散能力、径流搬运能力之间的共同作用机制进行深入研究。流失团聚体 $PA_{0.25}$ 、 PA_1 、 PA_2 、 MWD 和 GMD 与降雨强度和产沙量之间均呈现极显著正相关关系。 $MWSSA$ 和 D 与降雨强度和产沙量之间呈现极显著负相关关系。 PA_1 、 MWD 和 GMD 能更好地表征典型黑土区农耕地坡面侵蚀过程的团聚体流失特征。

致 谢 感谢黑龙江省水土保持科学研究所王玉玺教授级高工、谢运杰高工、陈生永高工和樊华高工等人在试验过程中给予的大力协助!

参 考 文 献

- [1] 范昊明,蔡强国,王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. 水土保持学报, 2004, 18 (2) : 66—70. Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Conditions of soil erosion in Phaeozem region of Northeast China (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (2) : 66—70
- [2] 王玉玺,谢运杰,王萍. 东北黑土区水土流失成因分析. 水土保持科技情报, 2002 (3) : 27—29. Wang Y X, Xie Y J, Wang P. Causes analysis of soil and water loss in the Mollisol region of Northeast China (In Chinese). Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 2002 (3) : 27—29
- [3] 吴冰,朱元骏,邵明安. 降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响. 水土保持学报, 2011, 25 (6) : 87—91. Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Effect of rainfall intensity on sediment yield and infiltration on stony soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (6) : 87—91
- [4] 安娟,卢嘉,郑粉莉,等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移. 水土保持学报, 2011, 25 (6) : 100—104. An J, Lu J, Zheng F L, et al. Soil aggregate transport during soil erosion process under different soil surface conditions on black soil slope farmland (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (6) : 100—104
- [5] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. Geomorphology, 2002, 45 (3/4) : 261—275
- [6] 申艳,张晓平,梁爱珍,等. 黑土坡耕地土壤流失形态分析——以一次降雨为例. 干旱地区农业研究, 2008, 26 (6) : 224—229. Shen Y, Zhang X P, Liang A Z, et al. Study on properties of soil loss from sloping farmland of black soil based on a runoff event (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26 (6) : 224—229
- [7] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 47 (1) : 107—111
- [8] 黄满湘,周成虎,章申,等. 农田暴雨径流侵蚀泥沙流失及其对氮磷的富集. 水土保持学报, 2002, 16 (4) : 13—16, 33. Huang M X, Zhou C H, Zhang S, et al. Sediment transport and enrichment mechanisms of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall condition (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (4) : 13—16, 33
- [9] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等. 东北黑土区土壤团聚体迁移特征的模拟降雨试验研究. 水土保持通报, 2012, 32 (6) : 6—10. Lu J, Zheng F L, An J, et al. Soil aggregate movement in black soil region of Northeast China (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32 (6) : 6—10
- [10] 郭伟,史志华,陈利顶,等. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响. 生态学报, 2007, 27 (6) : 2516—2522. Guo W, Shi Z H, Chen L D, et al. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (6) : 2516—2522
- [11] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, 44 (4) : 577—583. Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on Ultisols (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (4) : 577—583
- [12] 詹敏,厉占才,信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系. 黑龙江水专学报, 1998 (1) : 40—43. Zhan M, Li Z C, Xin Y L. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion (In Chinese). Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1998 (1) : 40—43
- [13] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究. 水土保持通报, 1992, 12 (4) : 1—9. Zhang X K, Xu J H, Lu X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12 (4) : 1—9
- [14] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等. 雨型对东北黑土区坡

- 耕地土壤侵蚀影响的试验研究. 水利学报, 2012, 43 (9): 1084—1091. Wen L L, Zheng F L, Yang Q S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (9): 1084—1091
- [15] 李忠福, 岳鹏, 王岩松, 等. 径流小区内土层厚度变化——降水强度模型研究. 东北水利水电, 2011 (3): 51—53, 72. Li Z F, Yue P, Wang Y S, et al. Model study on soil thickness variation and precipitation intensity in runoff plot (In Chinese). Water Resources & Hydropower of Northeast, 2011 (3): 51—53, 72
- [16] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响. 土壤学报, 2014, 51 (5): 974—982. Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity of particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of benggang (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (5): 974—982
- [17] 吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1223—1233. Wu X L, Wei Y J, Li Z X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (6): 1223—1233
- [18] 李涵, 张鹏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响. 干旱地区农业研究, 2012, 30 (2): 27—33. Li H, Zhang P, Jia Z K, et al. Effects of straw mulching treatment on characteristics of soil aggregate in Weibei dryland (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30 (2): 27—33
- [19] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1899. Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal features characterized by the weight distribution of soil particles (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (20): 1896—1899
- [20] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响. 土壤学报, 2009, 46 (2): 241—247. Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (2): 241—247
- [21] 姜义亮, 郑粉莉, 王彬, 等. 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响. 生态学报, 2013, 33 (24): 7774—7781. Jiang Y L, Zheng F L, Wang B, et al. The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (24): 7774—7781
- [22] 肖培青. 黄土丘陵区坡沟系统侵蚀产沙过程及动力学机理研究. 陕西杨凌: 中国科学院水土保持研究所, 2007. Xiao P Q. Soil erosion process and hydrodynamics mechanism of hillslope-gully system in the Loessial the hilly-gully region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [23] Palis R G, Okwach G, Rose C W, et al. Soil erosion processes and nutrient loss. 1. The interpretation of enrichment ratio and nitrogen loss in runoff sediment. Soil Research, 1990, 28 (4): 623—639
- [24] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils. Geoderma, 2005, 124 (3/4): 279—292
- [25] Young R A, Wiersma J L. The roles of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resources Research, 1973, 9 (6): 1629—1636
- [26] Kinnell P I A. The mechanics of raindrop induced flow transport. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28 (4): 497—516
- [27] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23 (10): 2176—2183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (10): 2176—2183
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. Soil Science Society America Journal, 2000, 64 (3): 1042—1049
- [29] 周一杨, 王恩姮, 陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征. 水土保持学报, 2008, 22 (6): 176—179. Zhou Y Y, Wang E H, Chen X W. Splash erosion and selective characteristics of aggregate for typical black soil under artificial rainfall condition (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (6): 176—179
- [30] Farres P J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. Catena, 1987, 14 (1/3): 119—130

CHARACTERISTICS OF SOIL AGGREGATE LOSS IN CROPLANDS IN THE TYPICAL BLACK SOIL REGION OF NORTHEAST CHINA

Wen Leilei¹ Zheng Fenli^{1, 2†} Shen Haiou¹ Hu Wei^{2, 3} Yang Qingsen¹

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Studies on soil aggregate loss in the process of soil erosion have an important significance in exposing mechanism of soil erosion. Rainfall intensity, as an important parameter in characterizing rainfall events, plays a significant role in soil erosion. A large number of studies have shown that there is a certain relationship between rainfall and composition of erosion sediment. However, most studies on soil aggregate loss in the process of soil erosion were conducted in the laboratory, which might affect some of the soil properties, especially the distribution of soil aggregates, when soil samples were collected and moved from the field to the laboratory. In this study, an in-situ field simulated rainfall experiment was conducted on a cropland in the typical black soil region of Heilongjiang Province to investigate characteristics of soil aggregate loss in the process of soil erosion. The experiment was designed to have three rainfall intensities, i.e., 30, 60 and 90 mm h⁻¹ and a set duration, 40 min, for each simulated rainfall event. Variations of characteristic indices of soil aggregate loss, such as mean weight diameter (*MWD*), geometric mean diameter (*GMD*), fractal dimension (*D*), mean weight soil specific area (*MWSSA*), ≥ 1 mm soil aggregates (*PA*₁), ≥ 2 mm soil aggregates (*PA*₂) and ≥ 0.25 mm soil aggregates (*PA*_{0.25}), as affected by rainfall intensity, were analyzed. The runoff plots (10 × 1 m, each) of the experiment were deployed in a cropland on a sunny slope, 5° in gradient. The soil of the cropland was typical black soil 38.9% in clay, 55.3% in silt, 5.8% in sand and 28.8 g kg⁻¹ in organic matter, 1.10 g cm⁻³ in bulk density and 6.65 in pH. Results show that rainfall intensity had some significant effects on runoff and soil loss. The ratio of soil loss in the first 20 minutes of a rainfall event to total soil loss increased with increasing rainfall intensity. The sediment resulting from a rainfall event, 30 mm h⁻¹ in intensity, was dominated with <0.25 mm soil aggregates, which made up 90.0% of the total soil aggregate loss; the sediment from a rainfall event, 60 mm h⁻¹ in intensity, was mainly composed of <0.25 and 0.5 ~ 1 mm soil aggregates, which accounted for 63.7% of the total soil aggregate loss; and the sediment from a rainfall event, 90 mm h⁻¹ in intensity was mainly of <0.25 and 2 ~ 5 mm soil aggregates, which amounted to 31.7% and 31.2% of the total soil aggregate loss, respectively. Rainfall intensity was found to have very significantly positive relationships with *PA*_{0.25}, *PA*₁, *PA*₂, *MWD* and *GMD*, but very significantly negative ones with *MWSSA* and *D*. It was also found that indices of *PA*₁, *MWD* and *GMD* are all good indicators characterizing soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China.

Key words Rainfall intensity; Soil erosion process; Soil aggregate loss; Characteristic indices of soil aggregate; Typical black soil region

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. (475)
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua (488)

Research Articles

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. (498)
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. (506)
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. (515)
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. (526)
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. (536)
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin (546)
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. (556)
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. (565)
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ¹³C pulse labeling technique Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei (574)
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. (585)
 Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin (595)
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. (605)
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. (618)
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. (527)
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. (635)
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. (645)
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. (653)
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu (663)
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. (671)
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. (681)
- Research Notes**
- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang (689)
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice rootsZheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. (695)
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. (705)
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. (712)
- Cover Picture:** Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field (by Zhang Zhongbin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 丁维新 | 巨晓棠 | 王敬国 | 王朝辉 | 史 舟 | 宇万太 | 朱永官 |
| 李永涛 | 李芳柏 | 李保国 | 李 航 | 吴金水 | 沈其荣 | 张玉龙 |
| 张甘霖 | 张福锁 | 陈德明 | 邵明安 | 杨劲松 | 杨明义 | 杨林章 |
| 林先贵 | 依艳丽 | 周东美 | 周健民 | 金继运 | 逢焕成 | 胡 锋 |
| 施卫明 | 骆永明 | 赵小敏 | 贾仲君 | 徐国华 | 徐明岗 | 徐建明 |
| 崔中利 | 常志州 | 黄巧云 | 章明奎 | 蒋 新 | 彭新华 | 雷 梅 |
| 窦 森 | 廖宗文 | 蔡祖聪 | 蔡崇法 | 潘根兴 | 魏朝富 | |

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址:南京市北京东路71号 邮政编码:210008
电话:025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
电话:010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱 邮政编码:100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号:2-560

国外发行代号:BM45

定价:60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156