

# 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

安娟<sup>1,3</sup>, 卢嘉<sup>2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 李桂芳<sup>1,3</sup>

(1. 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,陕西 杨凌 712100;  
2. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;3. 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘要:** 土壤侵蚀过程中,土壤团聚体的迁移反映了团聚体的破碎程度及径流的搬运能力,直接影响着侵蚀强度。以东北典型薄层黑土区耕层土壤为研究对象,采用模拟降雨试验方法,研究裸露休闲、纱网覆盖与秸秆覆盖 3 种地表条件下不同粒级(>5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm)土壤团聚体的迁移特征。结果表明:(1)纱网覆盖与秸秆覆盖具有削减径流和抑制侵蚀的作用,其中抑制产沙作用更明显,减沙率分别为 75%和 99%以上;(2)3 种地表条件下,<0.25 mm 团聚体是主要的流失粒级,其占到团聚体流失总量的 50%以上;各粒级流失量均表现为:裸露休闲>纱网覆盖>秸秆覆盖;(3)纱网覆盖和秸秆覆盖下的团聚体粒级分布与裸露休闲的相比,差异较为明显的均是<0.25 mm 粒级,该粒级流失量较裸露休闲的分别减少 74.62%和 99%;秸秆覆盖与纱网覆盖之间差异明显的是<0.25 mm 与 1~5 mm 粒级,流失量较纱网覆盖的分别减少 97.81%和 86.03%;(4)秸秆覆盖下团聚体平均重量直径表现为最大;分形维数和平均重量比表面积均表现为:裸露休闲>纱网覆盖>秸秆覆盖。

**关键词:** 地表条件; 土壤侵蚀量; 团聚体迁移; 黑土

中图分类号:S152.4;S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2011)06-0100-05

## Soil Aggregate Transport During Soil Erosion Process Under Different Soil Surface Conditions on Black Soil Slope Farmland

AN Juan<sup>1,3</sup>, LU Jia<sup>2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, LI Gui-fang<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F

University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** During soil erosion process, soil aggregate transport reflects the broken degree of soil aggregate and runoff transport capacity, which directly affects soil erosion degree. A laboratory rainfall simulator study was conducted to determine characteristics of sediment yield and soil aggregate transport of different size fractions (>5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm and <0.25 mm) under different soil surface conditions on typical black soil in the northeast China. Three soil surface conditions were designed: The bare land, nylon net cover and straw cover. Results showed that: (1) Nylon net cover and straw cover not only decreased runoff but also sediment yield, while sediment yield reduction was above 75% and 99%, compared with the bare land, respectively; (2) <0.25 mm soil aggregate was the main lost soil aggregate size fraction for all the treatments, occupying by above 50% of the total sediment yield; the loss of each soil aggregate size fraction ranked in order of the bare land > nylon net cover > straw cover; (3) The most pronounced difference of soil aggregate transport was <0.25 mm between the bare land and nylon net cover or straw cover, the size fraction loss from nylon net cover and straw cover reduced by 74.62% and 99%, compared with the bare land, respectively; there was a large difference of <0.25 mm and 1~5 mm transport between straw cover and nylon net cover, while loss of these soil aggregate from straw cover decreased by 97.81% and 86.03%, relative to that from nylon net cover, respectively; (4) The mean weight diameter of soil aggregate from straw cover treatment showed the greatest value, while fractional dimension and mean

收稿日期:2011-07-11

基金项目:国家“973”计划项目“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201)

作者简介:安娟(1982-),女,山东泰安人,博士生,主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: anjuan\_student@163.com

通讯作者:郑粉莉(1960-),女,陕西蓝田人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程与预报、土壤侵蚀环境效应评价研究。  
E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

weight soil specific area were both in order; The bare land > nylon net cover > straw cover.

**Key words:** soil surface condition; sediment yield; soil aggregate transport; black soil

土壤侵蚀过程中,团聚体的迁移是团聚体的破碎与径流搬运的耦合结果。降雨过程中,土壤团聚体的破碎主要是雨滴打击使团聚体破碎和径流携带搬运使团聚体破坏<sup>[1-2]</sup>。Hairsine等<sup>[3]</sup>认为,在侵蚀区表面存在雨滴剥离分散大团聚体和径流选择搬运细颗粒的现象。大量研究表明,土壤侵蚀优先使表层土壤水稳性大团聚体遭到破坏,相应地增加微团聚体的比例<sup>[4-5]</sup>。郭志民<sup>[6]</sup>研究发现随着土壤侵蚀程度的加剧,>0.25 mm的团聚体有减少趋势,而0.02~0.25 mm的团聚体却有增加趋势。郭伟等<sup>[7]</sup>研究团聚体粒径对侵蚀泥沙颗粒特性的影响时发现,降雨过程中<0.25 mm泥沙含量始终高于其他粒径的,其流失量占总流失量的40%以上。方华军等<sup>[8]</sup>以东北黑土区典型漫岗坡耕地为研究对象,研究不同侵蚀程度地形部位表层土壤水稳性团聚体含量,发现遭受严重侵蚀的坡肩部位表层土壤水稳性大团聚体含量明显减少,而微团聚体含量显著高于坡顶和坡背的,长期处于沉积状态的坡脚部位表层土壤微团聚体明显增加。

湿土中,雨滴打击造成的土壤团聚体破碎占主要地位,它能清楚地反映地表覆盖物的重要作用。东北黑土区由于乱砍乱伐致使很多土地得不到植被的保护,雨滴打击所导致的溅蚀在黑土区普遍存在<sup>[9]</sup>。目前关于黑土区坡面土壤侵蚀过程研究非常薄弱,地表覆盖条件下坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移的研究更是鲜见报道。本文采用人工模拟降雨的方法,研究裸露休闲、纱网覆盖及秸秆覆盖3种地表条件下坡耕地侵蚀过程中不同粒径土壤团聚体的迁移特征,以期为东北黑土区水土保持措施的配置提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

降雨试验于2010年8月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。降雨设备为侧喷式人工降雨装置,采用2组单喷头对喷,降雨高度为16 m,雨滴直径和雨滴分布与天然降雨的相似,降雨均匀度在85%以上<sup>[10]</sup>。试验所用土槽为长×宽×高=800 cm×150 cm×60 cm的坡度可调式钢槽,坡度调节范围为0°~35°,试验土槽下端设集流装置采集试验过程中的径流泥沙样。试验用土为吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯(北纬44°43′28″,东经126°11′47″)的0—20 cm耕层土。试验用土风干后,沿自然节理将其掰成<4 cm的土块以保持原有的土壤结构。

### 1.2 试验设计与方法

试验处理包括:裸露休闲(无纱网)、纱网覆盖和秸秆覆盖。纱网覆盖即在小区上方架设1 mm×1 mm尼龙纱网,纱网距土槽表面10 cm,此处理可消除雨滴动能99.6%<sup>[11]</sup>。秸秆覆盖即在土槽表面均匀铺设长约5 cm的玉米秸秆(干重),覆盖密度为1 kg/m<sup>2</sup>。东北典型薄层黑土区坡耕地的坡度一般为1°~8°,很少有超过10°。因此设计2个试验坡度,分别为5°和7.5°。降雨强度是结合当地侵蚀性降雨标准进行设计,设计次侵蚀性降雨强度为100 mm/h,历时1 h。为保证良好的透水性,在试验土槽底部铺10 cm厚细沙。沙子上部每5 cm一层填装容重为1.30 g/cm<sup>3</sup>的粘黄土用于模拟黑土区农耕地的犁底层,装土厚度为20 cm。粘黄土之上填装容重为1.20 g/cm<sup>3</sup>的黑土,每5 cm一层填装,装土厚度为20 cm。装上层土之前,用1 cm厚的木板抓毛下层土壤表面,以减少土壤分层现象。装完土槽后,利用25 mm/h降雨强度进行前期降雨,以确保每次试验前土壤含水量一致。预降雨过程中将1 mm×1 mm尼龙纱网覆盖在土槽之上以减弱雨滴打击力。前期降雨24 h后,进行人工模拟降雨,持续60 min。产流后,记录初始产流时间,并用15 L的塑料桶接取径流泥沙样,取样间隔时间为2 min。为分析土壤团聚体迁移特征,每隔4~6 min采集一次径流泥沙样,并将该径流泥沙样依次通过孔径5,2,1,0.5,0.25 mm的套筛,筛分的每个粒径的泥沙转移到饭盒中,烘干称重。降雨结束后将未筛分的径流泥沙样称重,待泥沙沉淀倾掉上清液后,将泥沙样烘干称重。

### 1.3 团聚体特征指标

采用平均重量直径(MWD)、分形维数(D)和团聚体平均重量比表面积(MWSSA)<sup>[12]</sup>3个指标来评价不同地表条件下侵蚀过程中土壤团聚体迁移特征。分形维数采用杨培岭等<sup>[13]</sup>建立的基于不同粒级重量分布的分

维模型计算。团聚体平均重量比表面积计算公式为: 
$$MWSSA = \sum_{i=1}^n 6w_i / \rho_s d_i \quad (1)$$

式中: $d_i$ 为两筛分粒级 $d_i$ 和 $d_{i+1}$ 的平均值(mm); $w_i$ 为任意大小范围团聚体的相应重量占流失土壤样品干重的百分数; $\rho_s = \dots \rho_n = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地表条件下坡面径流量和土壤侵蚀量

表 1 列出了不同地表条件下的坡面径流量与泥沙量。从表可看出,径流量的大小顺序为:裸露休闲 > 纱网覆盖 > 秸秆覆盖,其中裸露休闲与纱网覆盖之间径流量的差异不是特别明显。Shainberg 等<sup>[14]</sup>认为在粘粒含量较高且团聚体结构较为稳定的土壤中,雨滴打击对径流的产生作用不

表 1 不同地表条件下的径流量与侵蚀量

处理	径流量/mm		泥沙量/(g·m <sup>-2</sup> )		泥沙浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	
	5°	7.5°	5°	7.5°	5°	7.5°
裸露休闲	66.63	60.66	510	870	7.77	13.12
纱网覆盖	54.78	58.99	130	140	2.19	2.57
秸秆覆盖	31.83	47.38	2.9	6.6	0.049	0.089

明显,这与本文的研究结果一致。另外,由于本试验进行了前期降雨,造成纱网覆盖后的削减径流作用不明显。坡度为 5°和 7.5°时,秸秆覆盖处理较裸露休闲处理的径流量分别减少 52.23%和 21.89%。秸秆覆盖对雨水的吸收和对径流的分散作用,延迟了径流产生时间,增大了土壤入渗。因此,与纱网覆盖相比,秸秆覆盖削减径流作用更明显。与削减径流作用相比,纱网覆盖和秸秆覆盖的减沙效应较明显。与裸露休闲相比,纱网覆盖与秸秆覆盖下的坡面侵蚀量分别减少了 75%与 99%以上。纱网覆盖消除雨滴打击一方面削减了对土壤颗粒的分散;另一方面减弱了径流的搬运能力。与纱网覆盖相比,秸秆覆盖下的径流量与泥沙量分别减少 30.8%和 96.5%。秸秆覆盖增加地表糙率削减雨滴打击,分散径流,消耗径流冲刷力,从而削弱了径流搬运泥沙的能力;同时秸秆可截留雨水形成低洼蓄水使泥沙沉积。可见,在黑土区采取免耕与秸秆还田具有重要意义。

### 2.2 不同地表条件下坡面侵蚀产沙过程

由表 1 得知,裸露休闲下径流泥沙浓度分别是纱网覆盖与秸秆覆盖下的 3~18 倍和 147~215 倍。说明雨滴打击是致使土壤颗粒分散的主要动力。李光录等<sup>[15]</sup>分析了泥沙输移与降雨和径流能的关系,结果表明降雨能是导致泥沙剥离的本质,径流能是泥沙搬运的动力。

图 1 描述了不同地表条件下径流泥沙浓度随降雨历时的变化。从图中看出,径流泥沙浓度的变化趋势可分为两类:一类是裸露休闲下,坡面径流泥沙浓度在降雨初期快速增加,后快速下降,最后又缓慢增加,这是因为降雨初期雨滴打击对颗粒的打击增大了泥沙含量,随泥沙来源的减少径流泥沙浓度降低,而后随径流量的增大,增强了对颗粒的剪切破坏,造成径流泥沙浓度缓慢增加;另一类是覆盖条件下(纱网与秸秆覆盖),坡面径流泥沙浓度在降雨初期急剧下降,后平缓下降,但秸秆覆盖处理下的浓度变化幅度明显低于纱网覆盖下的。纱网覆盖下 96%的雨滴能量被消除,泥沙主要来自土壤表面的松散物质,随物质来源的减少径流泥沙浓度急剧下降。秸秆覆盖下雨滴能量完全被消除,且径流分散,造成径流泥沙浓度减小。降雨 20 min 后,裸露休闲、纱网覆盖和秸秆覆盖下的最大径流泥沙浓度分别为 11.93, 4.20, 0.74 g/L,说明雨滴打击对土壤颗粒的分散主要在降雨初期体现。纱网覆盖下 0~20 min 的产沙量占总产沙量的 20%~31%,秸秆覆盖下的达 27%~34%。这说明覆盖处理初期的产沙主要来源于土壤表面松散物质。

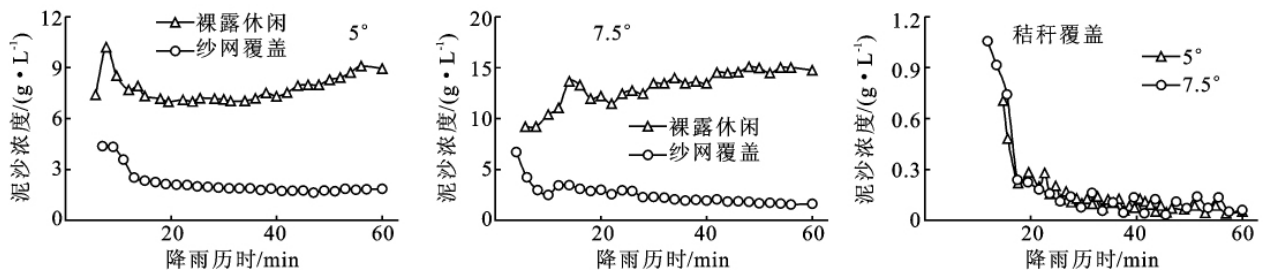


图 1 径流泥沙浓度随降雨历时的变化

### 2.3 不同地表条件下土壤团聚体的迁移

2.3.1 侵蚀过程中土壤团聚体粒级分布 裸露休闲下团聚体的破碎主要是雨滴打击使团聚体破坏、雨水湿润土壤使团聚体破坏和径流携带搬运过程使团聚体破坏;纱网覆盖下主要是雨水湿润土壤和径流携带搬运使团聚体破坏;秸秆覆盖下团聚体的破碎主要是雨水的湿润作用。土壤团聚体破碎机制的不同,必然导致土壤团聚体迁移的差异。表 2 列出了不同地表条件下侵蚀泥沙中团聚体粒级的分布,图 2 描述了各粒级的流失量。3 种地表条件下,<0.25 mm 粒级流失占总流失量的 50%以上,说明径流优先迁移微团聚体,这与黄满湘等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。周一杨等<sup>[17]</sup>利用人工模拟降雨研究了黑土溅蚀与团聚体分选特征,发现典型黑土的溅蚀过

程中粒径 > 1 mm 的团聚体不易发生迁移,雨滴主要对这些粒级的团聚体进行拆分作用。本研究中 3 种地表条件下 > 1 mm 粒级的流失比例低于 14%。进一步分析发现, < 0.25 mm 粒级的流失比例表现为裸露休闲 > 纱网覆盖 > 秸秆覆盖,而 0.25~5 mm 各粒级的流失比例表现为秸秆覆盖 > 纱网覆盖 > 裸露休闲。3 种地表条件下, < 0.25 mm 粒级的流失比例均随着坡度的增加而降低,说明坡度越大越有利于大颗粒的迁移。

由图 2 看出,各粒级土壤团聚体的流失量均表现为:裸露休闲 > 纱网覆盖 > 秸秆覆盖。3 种地表条件之间土壤团聚体流失差异最明显的是 < 0.25 mm 粒级。进一步分析发现,3 种地表条件下各粒级土壤团聚体的流失均随坡度的增加而增大。纱网覆盖后,土壤团聚体流失较裸露休闲发生明显变化的是 < 0.25 mm 与 > 2 mm 粒级, < 0.25 mm 和 > 2 mm 土壤团聚体的流失较裸露休闲的分别减少了 74.62% 和 89.26%。裸露休闲与纱网覆盖之间各粒级的流失比例及流失量的差异表明,雨滴打击对土壤大团聚体具有极大的破坏作用。王彬<sup>[18]</sup>利用 LB 法研究了薄层黑土团聚体的破坏机制,发现快速湿润处理所代表的“气爆”作用对团聚体稳定性的破坏最大,而模拟雨滴击溅作用的机械振荡处理对土壤团聚体的破坏最小。这是因为实际降雨过程中,机械外力对团聚体破坏是持续增加的,是一个能量不断增加的累积过程,而 LB 法中的预湿润振荡测定,机械外力能量只达到了一个可以克服土壤中胶结物质影响的较低值,对土壤团聚体的破坏不大。纱网与裸露休闲处理之间各粒级土壤团聚体的迁移都有较大差异,其中差异最明显的 < 0.25 mm 粒级的流失比例与流失量较裸露休闲的分别减少 41.87% 和 99% 以上。纱网与秸秆覆盖之间各粒级分布仍存在明显差异,其中差异较明显的是 < 0.25 mm 与 > 1mm 粒级。秸秆覆盖下 < 0.25 mm 粒级的流失比例较纱网覆盖的减少 39.0%,流失量减少了 97.81%; > 1 mm 粒级的流失较纱网覆盖的减少了 86.03%; 两者间 0.25~1 mm 粒级的流失差异随坡度的增加而增大。

2.3.2 不同地表条件下迁移土壤团聚体特征指标 各粒级团聚体组成比例和流失量并不能直观地反映出团聚体迁移的综合特征,为此采用平均重量直径(MWD)、分形维数(D)和团聚体平均重量比表面积(MWSSA) 3 个指标进一步分析。土壤团粒结构粒径分布的分形维数反映了土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构粒径分布的分形维数愈小,则土壤的稳定性越高<sup>[19]</sup>。团聚体平均质量比表面积是基于土壤界面过程的思想 and 平均直径的方法构建的<sup>[12]</sup>。从表 3 中看出,3 种处理下土壤团聚体的平均重量直径随着坡度的增加而增大,且秸秆覆盖下土壤团聚体平均重量直径表现为最大,这可能是由于 0.25~1 mm 团聚体的流失比例达到了 35% 以上(表 2)。说明即使在团聚体稳定性较高的黑土中,雨滴打击对土壤颗粒的分散作用仍较为明显。闫峰陵<sup>[20]</sup>研究了红壤表土团聚体稳定性特征及其对坡面侵蚀过程的影响,发现纱网覆盖处理侵蚀泥沙 MWD 为 0.26~0.30 mm,显著高于裸露休闲处理的。分形维数和平均重量比表面积均表现为:裸露休闲 > 纱网覆盖 > 秸秆覆盖。分形维数的差异说明裸露休闲下细颗粒物含量最多;平均重量比表面积差异说明裸露休闲下表现为土壤团聚体外界面的增加,大团聚体被破坏成小团聚体的趋势更明显。纱网覆盖的 MWD 较裸露休闲的减少 33.73%,而 D 和 MWSSA 较裸露休闲的均没有

表 2 不同地表条件下迁移土壤团聚体各个粒级流失占流失总量比例

坡度/ (°)	处理	粒级流失占流失总量比例					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
5	裸露休闲	0.01	0.52	0.44	0.53	0.24	98.34
	纱网覆盖	0.00	0.00	0.80	0.85	0.45	97.90
	秸秆覆盖	0.00	0.72	11.46	16.22	17.38	54.23
7.5	裸露休闲	0.12	3.23	7.11	4.54	2.54	82.46
	纱网覆盖	0.00	4.47	8.70	7.64	4.47	75.59
	秸秆覆盖	0.00	5.86	6.98	8.86	27.96	50.35

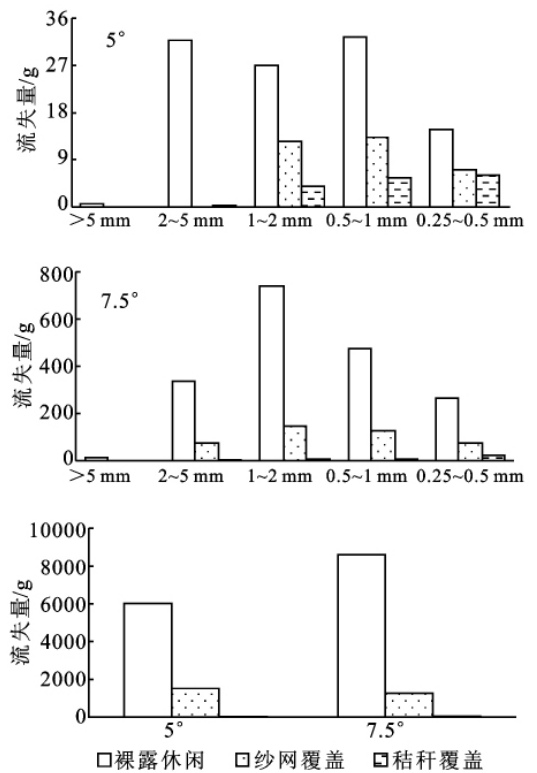


图 2 不同地表条件下各粒级土壤团聚体的流失量

表 3 团聚体特征指标

处理	MWD/mm		D		MWSSA/(cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	
	5°	7.5°	5°	7.5°	5°	7.5°
裸露休闲	0.28	0.48	2.99	2.92	89.47	78.86
纱网覆盖	0.26	0.55	2.99	2.89	89.31	75.05
秸秆覆盖	0.52	0.61	2.77	2.77	66.28	66.56

较大差异,说明应建立广泛认可且能准确反映土壤团聚体迁移特征的指标。秸秆覆盖处理下  $D$  和 MWSSA 较纱网覆盖的分别减少 5.75% 和 18.55%。上述结果表明,地表覆盖可有效防止团聚体的破碎和迁移。

### 3 结论

(1) 纱网覆盖与秸秆覆盖具有削减径流和抑制产沙的作用,二者的坡面侵蚀量分别较裸露休闲的减少 75% 与 99% 以上。不同地表条件下,泥沙浓度随降雨历时呈现不同的变化趋势。

(2) 3 种地表条件下,  $<0.25$  mm 土壤团聚体是主要的流失粒级,其流失量占到流失总量的 50% 以上。各粒级的流失量均表现为:裸露休闲  $>$  纱网覆盖  $>$  秸秆覆盖。

(3) 纱网覆盖下侵蚀泥沙中团聚体粒级分布与裸露休闲差异较为明显的是  $<0.25$  mm 与  $>2$  mm,该粒级的流失量较裸露休闲的分别减少了 74.62% 和 89.26%; 纱网覆盖与裸露休闲处理之间差异最明显的是  $<0.25$  mm,该粒级的流失量较裸露休闲的减少 99% 以上; 纱网覆盖与秸秆覆盖之间迁移土壤团聚体粒级分布差异明显的是  $<0.25$  mm 与 1~5 mm 粒级,流失量较纱网覆盖的分别减少 97.81% 和 86.03%。

(4) 秸秆覆盖下团聚体平均重量直径表现为最大;分形维数和平均重量比表面积均表现为:裸露休闲  $>$  纱网覆盖  $>$  秸秆覆盖。说明地表覆盖可有效防止团聚体的破碎和迁移。

#### 参考文献:

- [1] Madari B, Machado P L O A, Torres E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a hodic Ferralsol from southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80: 185-200.
- [2] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of American Journal, 2004, 68: 1992-1999.
- [3] Hairsine P B, Rose C W. Rainfall detachment and deposition; Sediment transport in the absence of flow-driven processes[J]. Soil Science Society of American Journal, 1991, 55: 320-324.
- [4] Wairiu M, Lal R. Soil organic carbon in relation to cultivation and top soil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70: 19-27.
- [5] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 224-229.
- [6] 郭志民. 土壤侵蚀与恢复重建对土壤性质的影响[J]. 福建水土保持, 1999, 11(2): 49-51.
- [7] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2516-2522.
- [8] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [9] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
- [10] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27-30.
- [11] 郑粉莉, 唐克丽, 张成娥. 降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J]. 人民黄河, 1995, 7: 22-24.
- [12] 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[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 241-247.
- [13] 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[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [14] Shainberg I, Mamedov A I, Levy G J. Role of wetting rate and rain energy in seal formation and erosion[J]. Soil Science, 2003, 168: 54-62.
- [15] 李光录, 吴发启, 庞小明, 等. 泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 868-874.
- [16] 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 306-310.
- [17] 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[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 176-179.
- [18] 王彬. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [19] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚体结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [20] 闫峰陵. 红壤表土团聚体稳定性特征及其对坡面侵蚀过程的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.