

东北黑土区土壤团聚体迁移特征的模拟降雨试验研究

卢嘉¹, 郑粉莉^{1,2}, 安娟^{2,3}, 李桂芳^{2,3}

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

摘要: 坡面侵蚀过程中土壤团聚体迁移反映了团聚体的破碎程度以及雨滴打击和径流搬运之间的相互作用。基于模拟降雨试验, 研究了黑土坡面不同粒级土壤团聚体的迁移特征。研究结果表明, 同干筛处理相比, 湿筛后 ≥ 0.25 mm 粒径的水稳性团聚体含量为 52%, 其较干筛处理减少 24%。湿筛后土壤团聚体的粒级分布以 < 0.25 mm 团聚体居多; 湿筛处理后 > 1 mm 粒级的团聚体含量较干筛处理减少了 83.8%。在 50 和 100 mm/h 两个降雨强度下, 团聚体流失以 < 0.25 mm 的微团聚体为主, 其流失量占团聚体流失总量的 80% 以上, 且不同降雨强度下微团聚体流失量与含沙浓度存在显著正相关关系。50 mm/h 降雨强度下微团聚体流失量随降雨历时的增加呈先快速增加后递减, 最后趋于相对稳定的变化趋势; 而 100 mm/h 降雨强度下, 其变化趋势则表现为先快速增加后缓慢上升趋势。 ≥ 0.25 mm 各粒级团聚体的流失比例和流失团聚体的平均重量直径(MWD)均随降雨强度的增加而减小, 反映了大雨强下雨滴打击对团聚体的分散作用。

关键词: 东北黑土区; 团聚体迁移; 降雨强度; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0006-05

中图分类号: 157.1

Soil Aggregate Movement in Black Soil Region of Northeast China

LU Jia¹, ZHENG Fen-li^{1,2}, AN Juan^{2,3}, LI Gui-fang^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. 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, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The aggregate movement during hillslope erosion process reflects the interaction among the aggregate breakage, raindrop impact and runoff transportation. The simulated rainfall experiment was designed to quantify movement characteristics of variously sized aggregates on hillslope farmlands of the black soil region, Northeast China. The results showed that the content of > 0.25 mm water-stable soil aggregate was about 52%, 24% lower than the contents obtained through dry sieving, while > 1 mm soil aggregates contents was 83.8% lower. The majority of the water-stable soil aggregates was < 0.25 mm aggregates. Under rainfalls of 50 and 100 mm/h intensities, < 0.25 mm aggregates contributed most of the aggregate loss, accounting for more than 80% of the total aggregate loss. The micro-aggregate loss rates were found significantly positively correlated with sediment concentrations under both rainfall intensities. As the rainfall time extended, the loss rate of micro-aggregate rapidly increased from the initial stage and then decreased in a short period of time and reached a relatively stable stage under 50 mm/h rainfall intensity; while under 100 mm/h rainfall intensity, the micro-aggregate loss rate increased quickly and increased slowly after the peak value was reached. The proportion of > 0.25 mm aggregates loss and MWD of aggregates losses decreased with the increase of rainfall intensity, indicating that raindrop impact had played a great role in separating aggregates.

Keywords: black soil region of Northeast China; aggregate movement; rainfall intensity; simulated rainfall

收稿日期: 2012-04-23

修回日期: 2012-07-17

资助项目: 国家基础科学发展(973)计划项目“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中科院知识创新工程前沿领域项目(S-143)

作者简介: 卢嘉(1987—), 女(汉族), 黑龙江省牡丹江市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: lujia1015@163.com。

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和土壤侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

土壤团聚体是土壤结构的基本组成单位,对土壤侵蚀有重要的影响作用^[1-3],土壤团聚体稳定性反映了土壤抵抗侵蚀的能力^[4-5];因而研究土壤侵蚀过程中土壤团聚体迁移特征,对揭示坡面土壤侵蚀机理和防治土壤流失具有重要意义。降雨过程中土壤团聚体破坏机制主要有3种:一是雨滴打击作用,主要表现为雨滴对大团聚体的拆分作用;二是雨水湿润作用;三是径流泥沙搬运过程对团聚体的破坏作用^[6-8]。周一杨等^[9]基于溅蚀试验研究土壤团聚体迁移发现,粒径大于1.0 mm的团聚体不易发生迁移,雨滴击溅主要对大于1.0 mm的团聚体进行拆分;粒径小于1.0 mm的团聚体易发生位移。申艳等^[10]研究发现,水蚀倾向于破坏黑土大团聚体,优先迁移土壤微团聚体。陈晓燕等^[11]研究表明,降雨强度越大,土壤团聚体分散作用越明显。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,在我国的粮食安全生产上占有举足轻重的地位。近年来由于自然因素的影响,加上人类不合理的生产活动,导致该地区土壤侵蚀非常严重,水土流失状况令人担忧^[12-13]。据1999年全国第二次土壤侵蚀遥感调查统计,东北黑土区土壤侵蚀面积为74 326.2 km²,占该区土地总面积的36.7%^[14]。目前关于黑土区坡面土壤侵蚀机理和侵蚀过程中团聚体迁移特征的研究非常薄弱。为此,本研究采用人工模拟降雨的方法,分析黑土区坡面侵蚀过程中土壤团聚体的迁移特征,探讨土壤团聚体对土壤侵蚀的响应,为黑土区土壤退化预警提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

室内模拟降雨试验在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,所有雨滴均可达到终点速度,降雨特性与天然降雨特性相似^[15],降雨均匀度大于85%。试验所用土槽尺寸为:8.0 m×1.5 m×0.6 m的坡度可调式钢槽,坡度调节范围为0°~35°。在试验土槽下端设径流收集装置,用于采集试验过程中的径流泥沙样。

试验用黑土取自吉林省榆树市刘家镇(44°43'N和126°11'E)20 cm的耕层土,质地为粉壤土。供试验土样风干后沿自然节理将其掰成3~4 cm的土块以保持原有的土壤结构。其基本土壤理化性质详见表1。

表1 供试土壤理化性质

土壤颗粒组成/%			容重/ 粉粒	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (g·kg ⁻¹)
黏粒	砂粒	砂粒	(g·cm ⁻³)	值	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)
76.38	20.30	3.32	1.20	5.92	23.81	1.20	20.64

注:土壤颗粒分级划分标准采用美国制(2~0.05 mm砂粒;0.05~0.002 mm粉粒;小于0.002 mm黏粒。)

1.2 试验设计与步骤

试验设计的坡度和降雨强度根据当地实际情况进行设计。东北黑土区的坡度一般为1°~7°,很少达到10°^[16]。詹敏^[17]和张宪奎^[18]等研究表明,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,持续时间多在1 h,且中度侵蚀的瞬时雨强标准为0.71 mm/min。基于此标准及试验实际情况,本研究设计一个5°试验坡度,50和100 mm/h(分别为0.83和1.67 mm/min)两个降雨强度,每个试验处理重复2次。

为保证模拟降雨过程试验土槽有良好的透水性,试验土槽底部均匀打孔,并在底部装10 cm细沙。沙层之上分两层,一层模拟犁底层,深度为20 cm,土壤容重为1.35 g/cm³;在此层以上模拟耕层,深度为20 cm,土壤容重为1.20 g/cm³。为了保证填土的均匀性,采用分层填土法,每5 cm为一层。填装上层土之前,打毛土壤表面防止发生分层现象。装完土槽后,采取25 mm/h降雨强度对坡面进行预降雨至坡面产流为止。预降雨24 h后进行正式降雨。正式降雨之前率定雨强,当率定雨强达到试验雨强要求后开始正式降雨,降雨持续60 min。降雨试验过程中当坡面产流后,记录产流时间,同时接取第一个径流泥沙样,随后每隔4~6 min采集一次径流泥沙样,将接取的径流泥沙样先称重,再将其依次通过孔径为5,2,1,0.5和0.25 mm的套筛。降雨结束后,将径流泥沙样筛分后的各粒级团聚体风干后称重。

1.3 土壤团聚体测定

供试土壤团聚体测定采用干筛法和湿筛法,湿筛法采用修正Yoder法。

1.4 表征团聚体的指标

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)是评价土壤团聚体稳定性的最重要指标,MWD值越大,说明土壤团聚体的稳定性越大,土壤抗侵蚀能力也越强。本研究通过计算降雨过程中流失团聚体的MWD来反映土壤团聚体的破碎情况,同时表征降雨侵蚀过程中团聚体的迁移特征。

2 结果与分析

2.1 供试土壤团聚体组成

土壤团聚体包括水稳性团聚体和非水稳性团聚

体,通过湿筛法测定的土壤团聚体含量可反映土壤潜在抵抗水力侵蚀的能力。土壤水稳性团聚体对保持土壤结构稳定性有重要的贡献,因而比非水稳性团聚体更为重要^[19]。从表 2 看出,干筛法测定的土壤团聚体以 >5 mm 粒级为主;湿筛后 >1 mm 的土壤团聚体较干筛测定的土壤团聚体减少了 83.8%,其中以 >5 mm 的团聚体减少幅度最大,减小率达到 99.3%,说明湿筛处理下 >5 mm 粒级团聚体转化为小粒级团聚体,其反映土壤团聚体的不稳定性和水分湿润对土壤团聚体的拆分作用。湿筛后 ≥ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量为 52%,说明土壤团聚体中大部分为水稳性团聚体,但仍低于干筛处理的 76%。湿筛后 <1 mm 粒级团聚体含量呈增加趋势,其中 <

0.25 mm 的微团聚体含量最高,达到 46%,较干筛处理下增加了 1.94 倍;0.25~1 mm 粒级团聚体也增加 1.5 倍以上。

通过计算不同处理下土壤团聚体的 MWD 发现,干筛处理下土壤团聚体的 MWD 大于湿筛处理,湿筛处理下 MWD 较干筛处理下减小了 82%。造成干筛和湿筛处理下团聚体 MWD 差异较大的原因主要是导致团聚体破碎的方式不同。干筛处理下所得到的团聚体是临时的稳定性团聚体,湿筛处理后团聚体则表现为水稳性团聚体,湿筛处理下团聚体破碎的原因主要是受到团聚体内闭蓄空气爆破所引起的破坏作用(即消散作用)和外力的机械作用的共同作用。

表 2 干筛和湿筛处理下供试土壤团聚体组成

处理	各粒级团聚体组成/%						MWD/mm
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
干筛	30.06	8.77	8.60	14.73	13.64	23.82	2.88
湿筛	0.21	1.79	6.80	22.79	22.17	46.24	0.49
变化率/%	-99.30	-79.64	-20.91	+54.75	+62.47	+94.15	-82.92

注:变化率(%)=(湿筛-干筛)/干筛;“+”表示为增加;“-”表示为减少。

2.2 侵蚀泥沙中团聚体粒级分布

由于土壤团聚体可划分为大团聚体(≥ 0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)两类^[20],因此本研究分别讨论大团聚体和微团聚体的迁移特征。

2.2.1 不同降雨强度下侵蚀泥沙中团聚体粒级分布引起团聚体破碎的原因有以下几种,雨滴打击使团

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。表 3 列出了不同降雨强度下侵蚀泥沙中团聚体粒级的分布。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h,大于 0.25 mm 各粒级(>5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm)团聚体的流失比例呈减小趋势。

表 3 不同降雨强度下侵蚀泥沙中团聚体粒级的分布

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	各粒级流失量占团聚体流失总量比例/%						MWD/mm
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	
50	0.05	1.76	6.66	5.19	3.67	82.69	0.32
100	0.02	0.92	1.00	0.68	0.65	96.73	0.18

50 和 100 mm/h 两个降雨强度下,侵蚀泥沙中 <0.25 mm 微团聚体流失量占团聚体流失总量的 80% 以上,远高于供试土壤的 46.24%,说明侵蚀泥沙中团聚体的流失以微团聚体为主。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h,侵蚀泥沙中 <0.25 mm 微团聚体流失比例由 82.6% 增加到 96.7%,表明随着降雨强度的增加土壤团聚体破碎程度增大。两个降雨强度下,>5 mm 粒级团聚体流失比例均很小,较供试土壤中减小了 70% 以上。当降雨强度为 50 mm/h 时,2~5 mm 和 1~2 mm 两个粒级的团聚体流失比例与供试土壤对应的团聚体所占比例无明显差异;而 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 两个粒级团聚体较供

试土壤对应的团聚体所占比例减小了 77% 以上。50 mm/h 降雨强度下,0.25~2 mm 粒级团聚体流失量占大于 0.25 mm 粒级中的 89.6%。降雨强度为 100 mm/h 时,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 各粒级团聚体流失比例之间差异不明显。随着降雨强度的增加,侵蚀泥沙中各粒级大团聚体流失比例呈减少的趋势。同 50 mm/h 降雨强度相比,100 mm/h 降雨强度下 >5 mm,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 各粒级团聚体流失比例分别减少 47.9%,47.9%,85.0%,86.9% 和 82.3%,其中 0.25~2 mm 粒级团聚体减少幅度最大。造成这种现象的原因主要是随着降雨强度的增加,雨滴动能

增大,雨滴对土壤大团聚体的拆分作用增强所致。

随着降雨强度的增加,流失团聚体平均重量直径(MWD)减小,也反映了降雨强度对土壤团聚体的拆分作用。

2.2.2 侵蚀泥沙中微团聚体迁移过程 图1为微团聚体流失量和坡面径流含沙浓度之间的关系。由图1可以看出,在50 mm/h降雨强度下,坡面侵蚀产沙过程可分为3个阶段。第1阶段从坡面产流到降雨历时10 min期间,此时坡面微团聚体流失量与径流含沙浓度随降雨历时的增加皆呈快速增加的趋势。这主要是因为降雨初期径流主要搬运雨滴打击所分散的土壤物质,由于此时径流搬运能力较小,因此优先迁移微团聚体;另一方面雨滴打击引起团聚体的破碎一般发生在降雨最初几分钟,所以降雨初期侵蚀泥沙中微团聚体流失量与含沙浓度皆随降雨历时的增加呈快速增加。第2阶段发生在降雨历时10~45 min期间,此阶段微团聚体流失量与含沙浓度均随降雨历时的增加呈相对快速的减小趋势。造成这种现象的主要原因一方面是随着降雨的进行,可搬运的分散物质来源的减少;另一方面流失的微团聚体不仅来自于松散物质,还来自破碎的大团聚体。但50 mm/h

降雨强度下,雨滴打击对大团聚体破碎作用较弱,径流搬运能力也相对较弱,所以径流含沙浓度降低和微团聚体流失量减小。第3阶段发生在降雨历时为45 min以后至降雨结束期间,此时微团聚体流失量与含沙浓度随降雨历时的增加呈相对稳定的变化趋势。造成这种现象的主要原因是此时土壤分散物质主要来自径流薄层水流侵蚀,而径流量在这个阶段趋于稳定,使径流分散的物质相对稳定,从而导致微团聚体流失量和径流含沙浓度的变化趋势稳定。在100 mm/h降雨强度下,降雨初期微团聚体流失量与径流含沙浓度随降雨历时的增加均呈快速增加的趋势,这与50 mm/h雨强下第一阶段的变化趋势相同。此后坡面径流含沙浓度随降雨历时的增加呈急速下降后又趋于稳定的变化趋势,而微团聚体流失量随降雨历时的增加呈缓慢增加的趋势。这可能是由于降雨强度的增加,雨滴打击对土壤分离能力和径流搬运能力增加,造成含沙量瞬时增大;同时雨强的增加导致雨滴动能增大和雨滴击溅能力加强,使雨滴对大团聚体的拆分能力增加,团聚体的破碎为微团聚体的迁移提供了物质来源,导致微团聚体流失量随降雨历时的增加而呈增加的趋势。

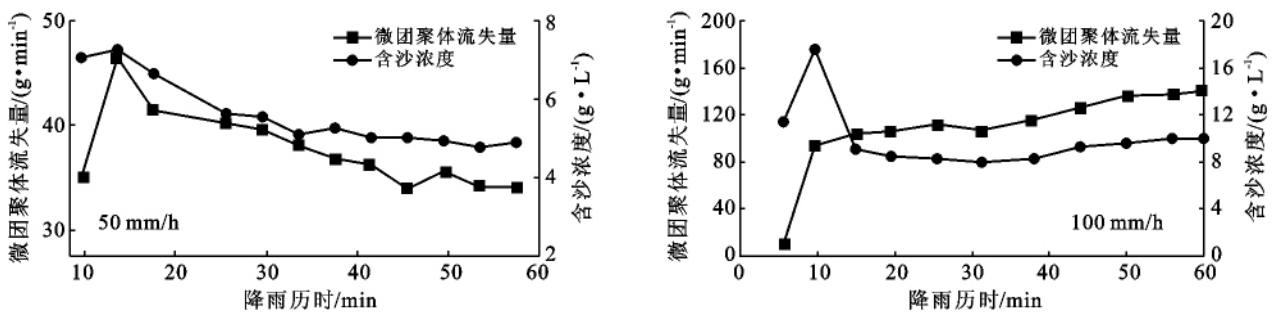


图1 不同降雨强度下微团聚体流失量与含沙浓度关系

3 结论

(1) 供试土壤干筛法测定的土壤团聚体以 >5 mm 粒级为主;湿筛后 >1 mm 的土壤团聚体较干筛测定的土壤团聚体减少了83.8%,其中以 >5 mm 的团聚体减少幅度最大,减小率达到99.3%。说明湿筛处理下 >5 mm 粒级团聚体转化为小粒级团聚体,表现出东北黑土区土壤团聚体的不稳定性特征及水分湿润对土壤团聚体的拆分作用。湿筛后 ≥ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量为52%,说明土壤团聚体中大部分为水稳性团聚体,但仍低于干筛处理的76%。

(2) 在50和100 mm/h两个降雨强度下,土壤团聚体流失以 <0.25 mm 的微团聚体为主,其流失量占

团聚体流失总量的80%以上。 ≥ 0.25 mm 各粒级团聚流失比例皆表现为50 mm/h降雨强度大于100 mm/h,反映了降雨强度对土壤团聚体迁移的影响。50 mm/h雨强下,0.25~2 mm 粒级比例为89.6%;而在100 mm/h雨强下,2~5 mm,1~2 mm,0.5~1 mm 和0.25~0.5 mm 各粒级团聚体流失比例之间无明显差异,且 ≥ 0.25 mm 各粒级团聚体流失比例皆小于50 mm/h雨强下所占比例。表现出雨滴打击对土壤团聚体的破碎作用。

(3) 在50和100 mm/h降雨强度下, <0.25 mm 的微团聚体流失量与含沙浓度存在显著正相关关系。50 mm/h降雨强度下微团聚体流失量随降雨历时的增加呈先快速增加后递减最后趋于相对稳定的变化

趋势,而 100 mm/h 降雨强度下,其变化趋势表现为先快速增加后缓慢上升趋势,也反映了降雨强度和雨滴打击对土壤团聚体破碎的影响。

(4) 流失团聚体平均重量直径(MWD)随降雨强度的增加而减小,反映了雨滴打击对团聚体的拆分作用。

[参 考 文 献]

- [1] 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[J]. 土壤学报, 2007,44(4):577-583.
- [2] Amezketa E, Singer M J, Le Bissonnais Y. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999,14(2/3): 83-151.
- [3] 史奕. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报,2002,11(11):1495-1498.
- [4] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009,25(9): 74-78.
- [5] 张琪,方海兰,史志华,等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(10):77-82.
- [6] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005,124(3/4):279-292.
- [7] Young R A, Wiersma J L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport[J]. Water Resources Research, 1973,9(6):1629-1636.
- [8] Kinnell P I A. The mechanics of raindrop induced flow transport [J]. Australian Journal of Soil Research, 1990,28(4):497-516.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 陈晓燕,牛青霞,周继,等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010,24(5):163-168.
- [12] 黄健,张惠琳,傅文玉,等. 东北黑土区土壤肥力变化特征的分析[J]. 土壤通报, 2005,36(5):659-663.
- [13] 王睿强,张志丹. 东北黑土水土流失研究概述[J]. 农业与技术, 2006,26(6):106-108.
- [14] 王玉玺,解运杰,王萍. 东北黑土区水土流失成因分析[J]. 水土保持科技情报, 2002(3):27-29.
- [15] 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试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000,20(4):27-30.
- [16] 张晓平,梁爱珍,申艳,等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006,26(6):687-692.
- [17] 詹敏,厉占才,信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. 黑龙江水专学报, 1998(1):40-43.
- [18] 张奎奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992,12(4):9-18.
- [19] 史奕,陈欣,闻大中. 东北黑土团聚体水稳性研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2005,13(4):95-98.
- [20] Edwards A P, Bremner J M. Micro-aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1967,18(1):64-73.

(上接第 5 页)

(4) 由于 CM 和 PS 两种有机质添加物对于人工土壤抗蚀性评价指标筛选不同,所以其他种类有机质添加物种类作用效果有待于进一步研究。

(5) 通过各主成分线性函数和综合指标函数分析,CM 组中处理 Y_{10} 抗蚀性能最好,即质量比为原土/CM=2.41 时,人工土壤抗蚀性最好。

[参 考 文 献]

- [1] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 岩石边坡喷播植草护坡工程的抗侵蚀效应[J]. 北京林业大学学报,2006,28(1):43-47.
- [2] 杨晓亮,李杰华,彭婷婷,等. 两种有机添加物对岩石边坡植被恢复人工土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2009,23(1):21-25.
- [3] 阮伏水. 关于土壤可蚀性指标的讨论[J]. 水土保持通报,1996,16(6):68-72.
- [4] 安和平. 北盘江中游地区土壤抗蚀性及预测模型研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):38-42.
- [5] 中国农学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,2000:150-172.
- [6] 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):5-7.
- [7] 胡建忠,张伟华,李文忠,等. 北川河流域退耕地植物群落土壤抗蚀性研究[J]. 土壤学报,2004,41(6):854-863.
- [8] 胡建忠,范小玲,王愿昌,等. 黄土高原沙棘人工林地土壤抗蚀性指标探讨[J]. 水土保持通报,1998,18(2):25-30.
- [9] 史晓梅,史东梅,文卓立. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[J]. 水土保持学报,2007,21(4):63-66.
- [10] 沈慧,姜凤岐. 水土保持林土壤改良效益评价指标体系的研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):96-98.
- [11] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究,2005(12):31-34.