

侵蚀泥沙颗粒特征研究进展

郝燕芳, 佟帆

(黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150070)

摘要: 侵蚀泥沙颗粒对深入理解和模拟泥沙及与之有关的化学污染物质输移至关重要。通过对国内外相关研究归纳整理、总结经验, 重点围绕土壤水蚀的 2 个主要过程(细沟间和细沟侵蚀), 对侵蚀泥沙颗粒输移形式、各级未分散颗粒的机械组成、不同粒径颗粒的富集规律和分选特征以及影响因素等进行综述与评价。纵观国内外的研究进展, 侵蚀泥沙颗粒流失规律的研究已经较为全面和深入, 取得了一些共识性成果: (1) 未分散状态下的泥沙颗粒粒径分布更适合用来描述、模拟泥沙的输移行为和与之相关的营养污染物质迁移; (2) 侵蚀泥沙粒径分布主要受降雨和径流能量的限制, 能量小时, 径流优先输移细颗粒, 泥沙以细颗粒的富集为主; 随着能量的逐渐增大, 泥沙逐渐变粗; 当能量足够大而产生细沟的时候, 泥沙粒径分布趋向于接近原土; (3) 团聚性好的土壤, 其侵蚀泥沙粒径较团聚性差的土壤粗。

关键词: 未分散颗粒; 分散颗粒; 粒径分布; 分选富集; 侵蚀泥沙; 土壤水蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.001

Research Progress of the Particle-Size Characteristics of Eroded Sediments

HAO Yanfang, TONG Fan

(Heilongjiang Institute of Water Sciences, Harbin 150070)

Abstract: The particle-size characteristic of eroded sediments is important in understanding, characterizing and modeling the transport behavior of sediment and sediment-associated chemicals. The objective of this study was to provide references through summary and reorganization of relevant researches at home and abroad. This paper reviewed and evaluated the transport forms of eroded sediments, the primary particle-size composition of sediments undispersed with different size, the enrichment and selectivity of different size-class particles, and factors. Some results reached a consensus: (1) Undispersed sediment-size distribution is required for describing and modeling sediment transport and the associated movement of nutrients and contaminants. (2) This erosion selectivity, in fact, primarily results from the energy limitation of rainfall and runoff. When the energy is small, runoff is preferred to transport fine particles, and sediment is mainly enriched by fine particles. As the energy gradually increases, the sediments gradually thicken. When the energy is large enough to produce rill, the sediments size distribution tends to be close to the original soil. (3) The size distribution of sediments for the well-aggregated soils usually is much coarser than the less-aggregated one.

Keywords: undispersed particles; dispersed particles; particle size distribution; selectivity and enrichment; eroded sediment; soil water erosion

土壤水蚀是降雨和径流对土壤颗粒进行破坏, 并把破坏产物(如土壤团粒和单粒)带走的过程^[1]。土壤颗粒经雨滴打击、径流携带, 离开土体形成泥沙而流失, 直接导致土地质量退化; 同时, 泥沙颗粒离开坡面进入水路网, 不仅造成河湖水库的淤积, 引发洪涝灾害, 而且氮磷等营养物质通过吸附在比表面积大的

细小颗粒表面, 随径流发生迁移, 最终进入水体, 也会导致富营养化等污染问题^[2-3]。泥沙是侵蚀的产物, 其颗粒粒径分布不仅是影响泥沙输移和沉积的主要因素^[4-6], 也是土壤侵蚀预报、泥沙和化学物质输移模型的重要参数^[7-8]。

有关泥沙颗粒特征的研究, 大部分集中于完全分

收稿日期: 2019-06-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0507003)

第一作者: 郝燕芳(1983—), 女, 博士, 工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: haoyanfang@hotmail.com

通信作者: 佟帆(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事土壤肥力、环境生态研究。E-mail: tfonline916@outlook.com

散后的矿物颗粒,即单粒^[9-11]。但事实上,绝大多数泥沙是以团聚体(团粒)的形式被侵蚀^[12-14],未经化学分散的颗粒粒径分布才可以真实地反映泥沙颗粒组成,它是一个表征泥沙输移行为的更好的指标^[15-16]。随着对土壤侵蚀机理和泥沙输移行为认识的不断深入,侵蚀泥沙分散前后的颗粒特征备受关注,已成为国内外研究的热点。早在 19 世纪 30 年代,美国科学家 Yoder^[17]对侵蚀泥沙的物理性质开展了研究,并指出,团聚性好的土壤侵蚀泥沙主要由团粒构成。由此引起了人们对未经化学分散的颗粒在侵蚀过程中所发挥作用的关注。60 年代,Swanson 等^[18]用人工模拟降雨的方法研究了土壤团粒和单粒在侵蚀泥沙中的输移,成为最早将未分散和分散颗粒放在侵蚀过程中对比研究的学者。之后,许多科学家很快意识到泥沙性质研究的重要性,并于 80 年代,将泥沙颗粒粒径分布应用在 CREAMS 模型中^[7],为评价和预报土壤侵蚀和泥沙搬运规律提供了更为详细的资料。在这 50 多年的发展历程中,除了研究细沟间和细沟侵蚀泥沙,还有学者^[19-22]对河流悬浮和沉积泥沙,以及浅沟、切沟侵蚀泥沙颗粒特征也开展了研究;且大部分在室内或野外的人工模拟降雨条件下^[23-25],少数在天然降雨条件下开展^[2,12]。我国在这方面的起步较晚,2000 年之后才有学者开始探索性的研究,以张兴昌等^[26]、Shi 等^[27]、杨帆等^[28]、卢嘉等^[29]的研究团队为代表,其中大部分研究集中在 2009 年以后。尤其 2016 年之后,国内学者从侵蚀输移过程、影响因素、养分迁移转化等角度,对泥沙粒径分布特征开展了较多较为深入的研究。这也在一定程度上说明,目前,我国土壤侵蚀泥沙颗粒特征的研究正处于迅速发展时期,在研究基础比较薄弱的当下,如果能对国内外相关研究归纳整理、总结经验,对我国的科研工作者将是一份宝贵资料。

因此,笔者重点围绕土壤水蚀的 2 个主要过程(细沟间和细沟侵蚀),对国内外有关泥沙颗粒的侵蚀输移形式、不同粒径颗粒的富集规律和分选特征以及影响泥沙颗粒特征的因素等研究进展做一综述与评价,为土壤侵蚀过程和化学物质输移模型的深入研究提供一定参考。

1 基本概念讨论

侵蚀泥沙颗粒由团粒(aggregate)和单粒(primary particle)共同组成^[30],即未经化学分散的颗粒,常被称作未分散颗粒(undispersed particle)或有效颗粒(effective particle)。侵蚀泥沙未分散颗粒粒径分布最常用的分析方法是湿筛法^[17]与吸管法,或与激光

粒度仪法相结合。侵蚀泥沙颗粒特征受多种因素影响^[6,25],如降雨特征、土壤性质、地形条件、土地利用情况以及水土保持措施等。

团粒又被称为团聚体,是由 2 个或 2 个以上的单粒通过比周围土粒强的黏结力而相互凝聚在一起所形成的结构体^[31]。团粒粒径分布最常用的方法是湿筛法^[17],但需要指出的是,由此获得的团粒,实际上是由团聚的颗粒(团粒)和分散的颗粒(单粒)共同组成^[11],也就是未分散颗粒,并非真正的团粒。到目前为止,国内外还没有一种试验方法可以将团粒从未分散颗粒中完全分离出来,为了尽可能分析团粒的粒径分布,美国农业部在其出版的《土壤分析手册》^[31]中指出,通过砂粒矫正得到的各级颗粒即为团粒。然而,由此获得的颗粒仍然不是真正的团粒,只能说更接近团粒。因此,在侵蚀泥沙颗粒特征的研究中,对于泥沙颗粒的说法不一:有的学者将未经化学分散状态下的颗粒近似认为是团聚体,直接称其为团粒(aggregate),相对应的分散状态下的颗粒称为单粒(primary particle)^[25,32-33];而有的学者^[27,34]将未经化学分散的颗粒称为有效颗粒(effective particle),经过化学分散后的颗粒称为最终颗粒(ultimate particle);还有的直接将化学分散前后的颗粒分别称为未分散颗粒(undispersed particle)和分散颗粒(dispersed particle)^[6,15,35]。

本文为了迎合国内外研究现状,并方便读者理解,统一采用未分散颗粒和分散颗粒的说法。未分散颗粒不等同于团粒,是团粒和单粒的混合物;而分散颗粒即为单粒。

2 侵蚀泥沙颗粒的输移形式

侵蚀泥沙颗粒的存在形态以团粒为主还是以单粒为主,是判断泥沙以何种形式侵蚀输移的依据。研究者们^[18,36]普遍认为,大多数土壤的侵蚀泥沙颗粒以团粒的形式输移。杨伟等^[37]在室内人工模拟降雨的条件下,通过对不同母质上发育的 6 种典型红壤(质地为粉质黏土、粉质黏壤土、砂质黏土和砂壤土)研究发现,大部分颗粒以团粒形式输移。本人通过天然降雨条件下的中国 3 种典型土壤侵蚀泥沙颗粒特征研究^[15]也得到了相同的结论。关于如何判断泥沙颗粒的侵蚀输移形式,Martinez 等^[12]提出了一个团聚率(AR)的指标,用未分散和分散颗粒含量的比值表示,描述不同粒级泥沙颗粒的团聚程度。当 $AR > 1$ 或 $AR < 1$ 时,侵蚀泥沙颗粒以团粒的形式输移;当 $AR = 1$ 时,侵蚀泥沙颗粒以单粒的形式输移。Martinez 等^[12]研究指出,天然降雨条件下,绝大部分降雨的侵蚀泥沙 0.002 ~

0.05 mm 颗粒 $AR < 1$, > 0.05 mm 颗粒 $AR > 1$, 说明无论泥沙颗粒的粒径是多少, 均以团粒的形式输移。因此, 团粒比单粒对侵蚀更为敏感, 未经化学分散的颗粒粒径分布更能真实反映泥沙颗粒特征, 它是一个表征泥沙输移行为的更好的指标。

3 侵蚀泥沙各级未分散颗粒的机械组成

许多研究结果已经证明, 未经化学分散的泥沙颗粒比经过化学分散后的单粒更能有效反映侵蚀过程, 并在泥沙输移和化学物质迁移方面具有重要作用, 早在 1980 年, Alberts 等^[38]曾指出, 侵蚀泥沙物理化学输移特性受泥沙各级未分散颗粒的机械组成影响。有关这方面的研究不多, 且集中在国外的早期, 国内只有杨伟等^[37]在 2016 年的研究中略有涉及。综合这些研究成果, 主要包括 2 类: 一类观点认为, 各级未分散颗粒的机械组成与其粒径无关, 不同粒级的未分散颗粒具有与原土相似的砂粒、粉粒和黏粒含量^[19, 39]。Swanson 等^[18]利用野外人工模拟降雨试验发现, 侵蚀泥沙中 0.1~0.25, 0.25~0.5, 0.5~1, 1~2 mm 各级未分散颗粒的机械组成相似(本粒级的单粒除外); 另一类观点认为, 泥沙各级未分散颗粒的机械组成因未分散颗粒的大小而异。有研究^[40]指出, 未分散颗粒越小, 其黏粒含量越高; 但也有学者^[38]认为, 大粒径未分散颗粒的黏粒含量更高, 因为黏粒对团粒的稳定性至关重要^[41]。通过郝燕芳等^[14]对中国 5 种典型土壤(红壤、紫色土、黄土、褐土、黑土)的侵蚀泥沙粒径分布特征研究发现, 对红壤而言, 其侵蚀泥沙粉粒级未分散颗粒(0.002~0.05 mm)中的黏粒含量最多, 更易于携带 N、P、K 等养分, 威胁水体质量^[3, 42]。因此, 在我国红壤地区的水土保持措施制定过程中, 应着重考虑拦截粒径较小的粉粒级未分散颗粒, 防止其流失; 而对其余 4 种土壤而言, 侵蚀泥沙各级未分散颗粒的机械组成均与其原土接近, 可见, 侵蚀泥沙各级未分散颗粒的机械组成有继承原土的性质, 与未分散颗粒粒径无关。

4 侵蚀泥沙颗粒的分选特征和富集规律

土壤侵蚀对不同粒径颗粒分离搬运的难易程度不同: 颗粒越粗, 越容易被分离, 越不容易被搬运; 反之, 颗粒越细, 越不容易被分离, 越容易被搬运。由此说明, 土壤侵蚀对不同粒径的颗粒存在选择性, 即为分选作用。过去 50 多年里, 关于侵蚀过程与颗粒分选性关系的研究呈显著增加趋势, 且大部分研究集中在细沟间和细沟侵蚀过程对农地土壤颗粒的分选作用。这些研究^[5, 43]认为, 细沟间水流输移的泥沙比原土细, 这正是黏粒和粉粒大小的细颗粒被选择性侵

蚀, 而粗颗粒被选择性沉积的结果。Sutherland 等^[43]又进一步指出, 雨滴击溅和径流冲刷作为细沟间侵蚀的 2 个主要组成部分, 均优先输移 < 0.063 mm 颗粒。而关于细沟侵蚀, 有学者^[44]认为其过程不具有选择性, 或者至少没有细沟间侵蚀的分选性明显。原因可能与能量有关, 通常细沟间侵蚀的选择性是由有限的水流功率引起, 而细沟侵蚀的水流功率随着水流的集中不断增大, 从而有足够的能量输移粒径不同的颗粒。细沟间和细沟侵蚀过程的分选性导致不同粒径颗粒在泥沙中的富集规律不同, 大部分研究^[11, 45]表明, 水流功率一定的条件下, 细小颗粒更容易在泥沙中富集。而这种富集规律在水土保持和环境保护中具有重要现实意义。因为黏粒和粉粒大小的细颗粒比表面积小, 与植物生长有关的 N、P 等营养元素和杀虫剂等污染物质很容易吸附在这些细小颗粒表面, 从而使其成为化学物质迁移的主要途径^[3, 46]。由此造成的直接影响是营养物质的流失和土地生产力的下降, 同时, 营养物质在下游河流中富集而发生水质恶化等间接的环境问题。因此, 控制黏粒等细小颗粒的流失是水土保持和环境保护的关键。

侵蚀泥沙颗粒特征的定量描述对于深刻理解侵蚀过程与泥沙颗粒的分选特征具有重要意义。富集率是侵蚀过程对土壤颗粒分选性的一个重要衡量指标, 用来评价某个粒级的颗粒在泥沙中富集或损耗的程度^[6, 12, 47]。它是指侵蚀泥沙的各级颗粒含量与其在土壤中的含量之比, 用 ER 表示, 是 Enrichment Ratio 的缩写。当 $ER > 1$ 时, 表示富集, 即该粒级的颗粒被优先侵蚀或被选择性的输移; 当 $ER < 1$ 时, 表示损耗, 即该粒级的颗粒不容易被侵蚀; 当 $ER = 1$ 时, 则表示泥沙颗粒粒径分布与土壤相似, 侵蚀过程对其没有分选。

许多学者通过不同粒径颗粒的富集率, 研究土壤侵蚀的颗粒分选性, 探讨哪个粒级颗粒更容易被侵蚀, 并在泥沙中富集, 而哪个粒级的颗粒不容易被侵蚀。尽管大部分研究认为, 小颗粒往往优先被侵蚀而在泥沙中富集, 正如本人通过泥沙和原土的对比发现, 中国 5 种典型土壤的粉粒级颗粒(0.002~0.05 mm)和黏粒级颗粒(< 0.002 mm)均在泥沙中明显富集。然而, 也存在诸多不同的结论, Wan 等^[39]研究认为, 当径流流速很大并有细沟产生的时候, 泥沙中则以砂粒级颗粒(> 0.05 mm)富集为主。事实上, 这种侵蚀的分选性主要受降雨和径流能量的限制, 并必然与土壤内在性质有关, 因此, 侵蚀泥沙颗粒分选性是多种因素综合作用的结果^[6, 48-49]。

5 侵蚀泥沙颗粒特征的影响因素

国内外对不同因素影响下的侵蚀泥沙颗粒粒径分布、分选特征和富集规律的研究,主要集中在降雨特征和土壤性质方面,包括雨强、降雨动能、土壤质地、土壤团聚体稳定性等。而有关坡度、坡长、覆盖、侵蚀方式、水保措施,以及侵蚀外营力的影响均略有涉及,但仅限于个别学者的探索性研究,缺乏对比,难以统一认识,因此,这些方面的研究也正是我国在今后需要加强的内容。

降雨是侵蚀发生的动力来源,而土壤是侵蚀的作用对象,因此,最重要的影响因素是降雨和土壤的性质^[50],且这方面的研究也最多。Meyer 等^[51]在 1980 年的研究中指出,与土壤质地相比,雨强的影响非常小。但还有学者^[52-54]认为,雨强与泥沙粗细具有一定关系,在细沟间侵蚀过程中,径流优先选择性输移细颗粒,随雨强增加,泥沙颗粒逐渐变粗。Wan 等^[55]提出,径流侵蚀泥沙的几何平均粒径(GMD)随雨强的增加显著增加。Kiani 等^[5]通过对 3 种不同雨强(30, 60, 90 mm/h)下侵蚀泥沙粒径分布研究指出,当雨强较小时,侵蚀泥沙以黏粒(<0.002 mm)和粉粒(0.002~0.063 mm)级细小颗粒为主,而当雨强增大后,颗粒逐渐变粗,当雨强增大到 90 mm/h 时,细沟产生,此时径流对泥沙颗粒的输移不具有分选性,泥沙粒径分布与原土相似。因此,由于降雨动能的差异,细沟间和细沟侵蚀泥沙分选规律也必然存在差异^[56]。有学者^[47]指出,泥沙粒径随降雨动能的变化具有临界条件,临界动能(KE)为 $105 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,当 $KE < 105 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, <0.002 mm 未分散颗粒含量随 KE 增大而减少;当 $KE > 105 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时则增加。除了降雨对泥沙颗粒特征的影响以外,有学者^[24]提出土壤质地与团聚体稳定性比坡面流的影响更为重要。Meyer 等^[30]采集美国 22 种强度耕作的农田土壤,指出黏土和粉黏壤土主要以团粒形式侵蚀,其侵蚀泥沙最粗;而中等质地的粉壤土则主要以单粒的形式侵蚀^[34],其侵蚀泥沙最细;当然也存在例外,当中等质地的粉壤土具有很强的团聚度时,其侵蚀泥沙并不是最细的。因此,土壤的团聚程度也是影响泥沙颗粒特征的重要因素^[57]。Teixeira 等^[58]分析了 3 种森林土壤的泥沙粒径特征,发现团聚程度越高的土壤,其侵蚀泥沙越粗。

坡度和坡长作为影响侵蚀泥沙数量的重要地形因子,对泥沙性质的作用也不容小觑。Deizman 等^[59]通过对不同耕作方式下的泥沙粒径随坡度的变化研究发现,随坡度增加,免耕小区泥沙未分散颗粒

含量减少,而耕作小区增多。而彭怡等^[52]和张怡等^[60]在免耕条件下的研究均认为,泥沙未分散小颗粒含量随坡度的变化先减少后增加,存在临界坡度,为 20° 。Deizman 等^[59]选择的坡度范围为 $8.5\% \sim 15\%$,大约相当于 $4^\circ \sim 8^\circ$,而彭怡等^[52]和张怡等^[60]所研究的坡度范围较广,分别为 $5^\circ \sim 25^\circ$ 和 $5^\circ \sim 30^\circ$ 。Gilley 等^[61]也指出,细沟和细沟间侵蚀泥沙颗粒特征随坡长变化较大,然而,泥沙粒径随坡长究竟如何变化,并没有详细解释。纵观国内外研究,坡长对泥沙粒径分布影响的详细阐述非常少,今后学者们可考虑在这方面加以深入探讨。我国学者钱婧等^[62]研究指出,植被覆盖的影响明显强于坡长。早在 1983 年,Cogo 等^[63]对粉壤土和壤土进行野外人工模拟降雨,研究作物残茬覆盖对其侵蚀泥沙未分散颗粒粒径分布的影响,结果表明,在光滑的土表,随着残茬覆盖的增加,泥沙颗粒粒径减小,而在粗糙的土表,规律相反。Gilley 等^[61]通过对不同作物残茬覆盖影响下的粉壤土细沟和细沟间侵蚀泥沙颗粒粒径分布研究,得到与 Cogo 等^[63]相似的结论。

我国学者在近些年逐渐开始探索不同因素影响下的侵蚀泥沙颗粒特征,周柱栋等^[64]通过在草地坡面上进行野外放水冲刷试验,定量研究植株密度在不同流量下的坡面径流泥沙粒径分选规律,他们从水动力学和侵蚀方式演变角度分析了植株密度对坡面径流泥沙粒径分选性的影响,指出随植株密度增加, <0.05 mm 细颗粒 ER 增加,而 >0.05 mm 粗颗粒 ER 减少。一些学者也深入探讨了水动力与侵蚀方式的不同对泥沙颗粒特征的影响。吴凤至等^[65]研究发现,溅蚀阶段侵蚀泥沙未分散颗粒中 $0.002 \sim 0.05$ mm 含量最高;细沟间侵蚀阶段的 <0.002 mm 细颗粒增多, >0.002 mm 粗颗粒减少;细沟侵蚀阶段的 $0.002 \sim 0.05$ mm 颗粒含量随细沟的发展逐渐增多。杨帆等^[28]将雨滴击溅和径流冲刷 2 种过程分别进行研究指出,雨滴击溅和径流冲刷 2 种侵蚀方式下的泥沙未分散颗粒粒径分布为:前者以 $0.05 \sim 0.1$ mm 为主,后者以 $0.002 \sim 0.02$ mm 为主。除此之外,还有学者研究水土保持措施对侵蚀泥沙颗粒特征的影响,何丙辉等^[66]利用人工模拟降雨的方法探究在不同坡度、不同土地利用类型坡面上布置汇流型和分流型截排水沟道后,坡面土壤颗粒的流失变化规律,结果指出,在各个坡度和土地利用类型中,布置汇流和分流截排水措施后均出现较小未分散颗粒(<0.005 mm)在侵蚀泥沙中富集的现象。至于侵蚀外营力的影响,冻融作用重叠在水蚀过程之上,对区域水土流失强度

的影响最大,当土壤处于冻结状态时,土壤水因结冰而发生的体积膨胀,破坏土壤颗粒之间的连结性,使土壤颗粒重新排列而改变粒径分布^[67]。Wang 等^[68]研究指出,冻融作用导致土壤颗粒粒径呈减小的趋势;张辉等^[69]通过室内模拟降雨试验对冻土和解冻土 2 种坡面侵蚀过程及泥沙颗粒分选特征研究发现,冻土和解冻土坡面侵蚀泥沙分散颗粒中,溅蚀 MWD>径流冲刷 MWD,且冻土坡面侵蚀泥沙颗粒较解冻土粗;冻土坡面各级颗粒随时间变化相对稳定,而解冻土坡面侵蚀泥沙逐渐变粗。但是作者并没有分析侵蚀泥沙未分散颗粒在冻融作用影响下的特征,这在一定程度上阻碍了深入理解冻融作用的影响机制。

6 结语

细沟间与细沟侵蚀泥沙颗粒特征的研究对于深刻理解土壤侵蚀过程至关重要,未分散状态下的泥沙颗粒粒径分布更适合用来描述、模拟泥沙的输移行为和与之相关的营养污染物质迁移;侵蚀泥沙粒径分布与分选特征是多种因素共同作用的结果,降雨动能和水流功率等能量特征与土壤内在性质是最本质的影响因素。通常情况下,能量小的时候,径流优先输移细颗粒,泥沙以细颗粒的富集为主;随着能量的逐渐增大,泥沙逐渐变粗;当能量足够大而产生细沟的时候,泥沙粒径分布趋向于接近原土。此外,团聚性好的土壤,其侵蚀泥沙颗粒粒径较团聚性差的土壤粗。这是已经达成共识的结论,但是,由于土壤侵蚀过程受多种因素综合影响,因此,不同粒径颗粒的流失特征仍然没有一致的结论,并且不同影响因子的作用机制也需进一步深入探讨。给我国从事该方面研究的学者提供参考,主要总结为:(1)探索测定土壤和泥沙未分散颗粒的有效方法;(2)加强不同粒级未分散颗粒的机械组成研究;(3)将侵蚀过程作为整体,研究击溅侵蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀 3 个侵蚀过程的土壤颗粒输移规律;(4)深入分析侵蚀泥沙颗粒流失特征的影响因素,如地形地貌、植被覆盖、水土保持措施等,以及从水流动力学的角度,研究水力学参数变化对侵蚀过程中泥沙颗粒的分选特征和搬运方式的影响;(5)探讨侵蚀泥沙颗粒的输移与化学物质的迁移分布规律。

参考文献:

[1] 伍永秋,鲁瑞洁,刘宝元,等.自然地理学[M].北京:北京师范大学出版社,2012:455-456.

[2] Pieri L, Bittelli M, Hanuskova M, et al. Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines [J]. *Geoderma*, 2009, 154

(1/2):20-29.

[3] Yang Y, Ye Z H, Liu B Y, et al. Nitrogen enrichment in runoff sediments as affected by soil texture in Beijing mountain area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186:971-978.

[4] Parsons A J, Abrahams A D, Luk S H. Size characteristics of sediment in interrill overland-flow on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16(2):143-152.

[5] Kiani H M, Sadeghi S H, Asadi H. Comparing grain size distribution of sediment and original soil under raindrop detachment and raindrop-induced and flow transport mechanism [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(2):312-323.

[6] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454:123-130.

[7] Knisel W G. CREAMS, a field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [J]. *USDA-SEA Conservation Research Report* 1980, 26:1-12.

[8] Liu G, Dabney S M, Yoder D C, et al. Modeling land management effects on the size distribution of eroded sediment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 192:121-133.

[9] Fullen M A, Yi Z, Brandsma R T. Comparison of soil and sediment properties of a loamy sand soil [J]. *Soil Technology*, 1997, 10(1):35-45.

[10] Basic F, Kisic I, Nestroy O, et al. Particle size distribution (texture) of eroded soil material [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2002, 188(5):311-322.

[11] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(1):84-93.

[12] Martinez M M, Rogel J A, Albaladejo J, et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment [J]. *Catena*, 2000, 38:175-190.

[13] 胡亚鲜, Nikolaus J K. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5):1115-1124.

[14] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等.中国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2):150-159.

[15] Hao Y F, Yang Y, Liu B Y, et al. Size characteristics of sediments eroded from three soils in China under natural rainfall [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(8):2153-2165.

- [16] Yang Y, Wendroth O, Walton R J. Field-scale bromide leaching as affected by land use and rainfall characteristics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77: 1157-1167.
- [17] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 337-351.
- [18] Swanson N P, Dedrick A R, Weakly H E. Soil Particles and Aggregates Transported in runoff from simulated rainfall [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1965, 8: 437-440.
- [19] Beuselinc L, Steegen A, Govers G, et al. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt [J]. *Geomorphology*, 2000, 32(1/2): 69-82.
- [20] Grangeon T, Legout C, Esteves M, et al. Variability of the particle size of suspended sediment during highly concentrated flood events in a small mountainous catchment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(10): 1549-1558.
- [21] Lin J S, Huang Y H, Zhao G, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully [J]. *Catena*, 2017, 157: 47-57.
- [22] Wang W D, Fang N F, Shi Z H, et al. Prevalent sediment source shift after revegetation in the Loess Plateau of China: Implications from sediment fingerprinting in a small catchment [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(11): 3963-3973.
- [23] Issa O M, Le B Y, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(8): 929-939.
- [24] Rienzi E A, Fox J F, Grove J H, et al. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution [J]. *Catena*, 2013, 107: 130-138.
- [25] Deviren S S, Erpul G. Modeling aggregate size distribution of eroded sediment resulting from rain-splash and raindrop impacted flow processes [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(2): 166-177.
- [26] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 541-544.
- [27] Shi Z H, Yue B J, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77: 257-267.
- [28] 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区坡面溅蚀和片蚀泥沙颗粒特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 71-77.
- [29] 卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2264-2273.
- [30] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(1): 107-111.
- [31] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [M]. Klute A. *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Soil Science Society of America, 1986: 425-442.
- [32] 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团聚体流失特征试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 137-145, 215.
- [33] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 406(1/2): 73-81.
- [34] Shi Z L, Wen A B, Walling D E, et al. Exploring particle size selectivity effects during erosion of purple soils in Chongqing municipality, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(4): 1191-1196.
- [35] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. *Catena*, 2010, 81: 240-248.
- [36] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(8): 705-719.
- [37] 杨伟, 张琪, 李朝霞, 等. 几种典型红壤模拟降雨条件下的泥沙特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 439-444.
- [38] Alberts E E, Moldenhauer W C, Foster G R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(3): 590-595.
- [39] Wan Y, Swaify S A. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol [J]. *Geoderma*, 1997, 75(3/4): 251-265.
- [40] Gabriels D, Moldenhauer W C. Size distribution of eroded material from simulated rainfall: Effect over a range of texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(6): 954-958.
- [41] Kristiansen S M, Schjonning P, Thomsen I K, et al. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture [J]. *Geoderma*, 2006, 137

- (1/2):147-154.
- [42] Zhang G H. Characteristics of runoff nutrient loss and particle size distribution of eroded sediment under varied rainfall intensities [C]// Zhu J X, Yao G H. 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. Hangzhou: Advances in Engineering Research, 2016:588-596.
- [43] Sutherland R A, Wan Y, Lee C T, et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol [J]. *Catena*, 1996, 26:187-208.
- [44] Govers G L. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion [J]. *Catena*, 1985, 12:35-49.
- [45] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow [J]. *Catena*, 2019, 173:494-504.
- [46] Koiter A J, Owens P N, Petticrew E L, et al. The role of gravel channel beds on the particle size and organic matter selectivity of transported fine-grained sediment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15:2174-2188.
- [47] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512:168-176.
- [48] Shih H M, Yang C T. Estimating overland flow erosion capacity using unit streampower [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(1):46-62.
- [49] Scherer U, Zehe E. Predicting land use and soil controls on erosion and sediment redistribution in agricultural loess areas: Model development and cross scale verification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, 12(3):3527-3592.
- [50] Wu X L, Wei Z Y, Wei Y J, et al. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621:54-66.
- [51] Meyer L D, Harmon W C, McDowell L L. Sediment sizes eroded from crop row sideslopes [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1980, 23(4):891-898.
- [52] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2):142-144.
- [53] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3):489-498.
- [54] Wu X L, Wu L L, Wei Z Y, et al. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 249:226-236.
- [55] Wan Y, Swaify S A. Characterizing interrill sediment size by partitioning splash and wash processes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62:430-437.
- [56] Zhang G H, Wang L L, Li G, et al. Relationship between sediment particle size and transport coefficient on steep slopes [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2011, 54(3):869-874.
- [57] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3):917-929.
- [58] Teixeira P C, Misra R K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates [J]. *Catena*, 1997, 30:119-134.
- [59] Deizman M M, Mostaghimi S, Shanholtz V O, et al. Size distribution of eroded sediment from 2 tillage systems [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(6):1642-1647.
- [60] 张怡, 丁迎盈, 王大安, 等. 坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6):25-29.
- [61] Gilley J E, Finkner S C, Spomer R G, et al. Size distribution of sediment as affected by corn residue [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1986, 29(5):1273-1277.
- [62] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. *生态学报*, 2018, 38(5):1-10.
- [63] Cogo N P, Moldenhauer W C, Foster G R. Effect of crop residue, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(5):1005-1008.
- [64] 周柱栋, 程金花, 杨帆, 等. 北方土石山区植株密度对坡面流粒径分选的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):96-102.
- [65] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6):1235-1240.
- [66] 何丙辉, 梁艳玲, 黄欢. 坡面不同截一排水沟布置方式下土壤微团聚体流失特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13):151-158.
- [67] Wang T, Li P, Ren Z P. Effects of freeze thaw on soil erosion processes and sediment selectivity under simulated rainfall [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(2):234-243.
- [68] Wang E H, Cruse R M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3):529-536.
- [69] 张辉, 李鹏, 鲁克新, 等. 冻融作用对坡面侵蚀及泥沙颗粒分选的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4):836-843.