

模拟降雨条件下壤土的溅蚀特征试验研究

刘柏玲^{1,2}, 蔡强国¹, 史志华², 孙莉英¹, 盛贺伟³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 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)

摘要: 溅蚀在破坏土壤表层结构的同时为后续侵蚀提供丰富材料, 以黄土高原典型土壤壤土为试验用土, 通过模拟降雨试验, 根据溅蚀速率、溅蚀前后土壤颗粒组成及表面强度变化指标, 系统研究壤土的溅蚀特征。结果表明, 溅蚀速率随降雨历时呈现幂函数变化, 分为迅速降低、缓慢降低、趋于稳定 3 个阶段。土盘表面松散颗粒及利于溅蚀的粒级范围内颗粒的消耗、团聚体破碎及超渗产生的水层消耗雨滴能量、结皮的形成和发育分别是 3 个阶段的主要影响因素。在 90 mm/h 的雨强下, 壤土颗粒富集与耗损的临界粒径是 0.05 mm, 雨滴打击分离粒级 > 0.05 mm 颗粒, 富集迁移粒级 < 0.05 mm 颗粒。当含水率相等时, 降雨历时越长贯入深度越浅。壤土表面强度随降雨历时增加, 0~30 min 是壤土结皮形成的关键时期。壤土溅蚀过程是表土颗粒组成不断变化和表面强度逐渐完善的过程。

关键词: 壤土; 溅蚀速率; 颗粒分选; 表面强度

中图分类号: P331; P334

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0029-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.005

Rain-simulated Experiment Study on the Splash Erosion Characteristics of Lou Soil

LIU Boling^{1,2}, CAI Qiangguo¹, SHI Zhihua², SUN Liying¹, SHENG Hewei³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Research Center for Soil and Water Conservation and Eco-environmental Sciences, CAS, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Splash broke soil surface structure and provided abundant material for subsequent erosion. Rainfall simulation experiments on Lou soil were performed to study its splash erosion characteristics. Using the rate of splash erosion, the soil particle composition before and after rain and the surface intensity to describe the splash erosion characteristics. Results indicated that the splash erosion process could be divided into three stages according to splash erosion rate. First, the splash erosion rate decreased rapidly, splashed out particles were mainly the loose particles on the surface. Second, splash erosion rate decreased slowly, and the rain-drop kinetic energy was mainly used to destroy the soil structure. Finally, the splash erosion rate became constant, the formation of compact layer composed by fine particles formed in aggregate made the splash erosion rate tend to be stable. Under the rainfall intensity of 90 mm/h, the threshold particle size of enrichment and consumption was 0.05 mm. If the particle size was more than 0.05 mm, the function of raindrop was separation. If the particle size was less than 0.05 mm, the function of raindrop was transport. When the moisture content was equal, the longer the rainfall duration the shallower the penetration depth of soil. The surface intensity of Lou soil was continuously increasing. With the rainfall duration, and 0 to 30 min was the critical period of crust formation. Splash erosion process of Lou soil was a process that surface soil particle composition changed constantly and surface strength improved gradually.

Keywords: Lou soil; detachment rate; particle classification; the surface intensity

土壤溅蚀是土壤侵蚀的重要组成部分, 是指雨滴打击土表使得土壤颗粒被分散和迁移的过程。很多学者将溅蚀分为若干个子过程, 分段研究溅蚀发展规

律阐明其机理。Terry 等^[1]在单雨滴条件下将溅蚀分为 5 个子过程, 分别为团聚体崩解、溅蚀坑形成、击溅、击溅跃迁位移、飞溅蠕动, 其中前 2 个过程主要是

收稿日期: 2016-05-07

资助项目: 国家自然科学基金面上基金项目(41471229, 41271304); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1518)

第一作者: 刘柏玲(1991—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liuboling2014@163.com

通信作者: 孙莉英(1978—), 女, 河北灵寿人, 副研究员, 博士, 主要从事水沙环境风险与控制等研究。E-mail: sunliying@igsr.cn

分散作用,后3种过程是搬运迁移作用。单雨滴试验法利于直接研究雨滴溅蚀过程,但自然降雨雨滴大小、直径较单雨滴更为复杂,因此单雨滴条件下界定的溅蚀过程与自然降雨下土壤溅蚀过程存在差异^[2]。吴普特等^[3]从能量角度对溅蚀物理过程进行划分。地表未产生径流时,雨滴动能一部分被土壤颗粒吸收转化为热能,其余能量破坏土壤结构,使一部分土粒跃移转化为重力势能,被溅起的土粒重新落到地表,为径流提供沙源。地表产生径流时,雨滴首先与水层碰撞,一部分动能被水层吸收发热,剩余动能再次传输到土壤。该剩余动能的一部分转化为热量被土壤颗粒吸收,另一部分用于破坏土壤结构。郭耀文^[4]根据土壤溅散形式将土壤溅蚀过程分为3个阶段:干土溅散阶段、泥浆溅散阶段、层状侵蚀阶段。这种方法从表层土壤含水量未饱和、饱和、过饱和角度划分,可以较好地理论上解释溅蚀机理,但实际操作中不容易找到划分节点。

团聚体富集率(ER)是反映溅蚀对土壤团聚体分选作用的重要指标,能够用来描述溅蚀过程中不同粒级团聚体被迁移的难易程度^[5]。ER为某一粒级水稳性团聚体在溅蚀土粒中的质量百分比与这一粒级水稳性团聚体在原土中的质量百分比的比值,是一个无量纲的量。Legout等^[6]认为,雨滴对土壤颗粒的溅蚀作用可分为2个阶段:土壤颗粒破坏阶段,即雨滴对大团聚体进行拆分,使其破裂、分散;土壤颗粒迁移阶段,即当团聚体粒级和重量达到一定的范围时,雨滴的动能将足以使其运动,进而产生迁移。受团聚体的影响侵蚀泥沙颗粒与土壤原始颗粒大小分布会有不同,对侵蚀泥沙颗粒与原始土壤颗粒研究可得出颗粒迁移的难易程度、迁移方式,进而明确侵蚀过程^[7]。

国内外对侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究较多,但这些研究集中在坡面等大尺度上,一般包括整个侵蚀过程,单独针对溅蚀过程的泥沙颗粒特性的报道不多。此外,溅蚀速率和表面强度变化可表征溅蚀发展过程及速度,雨滴对土表颗粒的分散作用及溅蚀前后土壤颗粒组成可用于研究溅蚀过程中团聚体分离和输移能力,二者结合研究有助于深入理解土壤侵蚀过程揭示溅蚀特征。塬土主要分布在关中平原,属人为土土纲,土体剖面大体分为上下两层,上层是人工熟化覆盖层,淡灰棕色,土壤疏松透气性好,微生物数量多而活跃,因此有机质分解快,耕层有机质相对积累少。塬土是黄土高原主要农业土壤,系统研究其溅蚀特征有利于为制定有针对性的水土保持措施提供依据。本文根据不同降雨历时下塬土的溅蚀速率划分溅蚀侵蚀阶段,研究不同阶段土壤颗粒的溅出方式、

雨滴击溅对土壤颗粒的分选以及土壤表面强度的变化情况,以期通过对溅蚀量、溅出土粒及土壤表面强度的变化定量研究塬土溅蚀过程。

1 材料与方法

1.1 试验用土

试验所用塬土取自杨凌(YL, 34°16'N, 108°4'E),野外取样地点为农耕地,取样深度0—20 cm。土壤机械组成采用MS2000型激光粒度分析仪(0.01~2 000 μm)测定,有机质采用重铬酸钾外加热法,容重采用环刀法^[8]。供试土壤粘粒(<0.002 mm)、细粉粒(0.002~0.02 mm)、粗粉粒(0.02~0.05 mm)、细砂粒(0.05~0.25 mm)、粗砂粒(>0.25 mm)含量分别为25.97%, 41.51%, 25.8%, 6.72%, 0.05%,容重为1.18 g/cm³,有机质9.8 g/kg。

1.2 人工模拟降雨

人工模拟降雨试验在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的人工降雨大厅进行,试验采用下喷式降雨系统,降雨覆盖面积为27 m×18 m,降雨高度为18 m。降雨系统可将水喷射至空中,受空气阻力作用破碎成不同大小的雨滴,以保证所有雨滴在落地之前都能达到最大速度,与天然降雨形成的雨滴相似^[9]。试验降雨强度为1.5 mm/min,试验前反复率定降雨系统,使得试验雨强下的均匀度达到90%左右。

1.3 溅蚀试验装置

溅蚀试验装置为改进的摩根溅蚀盘^[10]。溅蚀盘用白铁皮制成,直径30 cm,高10 cm,盘中心为直径10 cm、高3 cm的圆形活动装土盘,盘底部有渗水小孔。圆形活动装土盘与溅蚀盘间存在0.2 cm的间隙,易于溅蚀盘内水流出(图1左)。使用锥体贯入仪(精度0.01 mm,图1右)测定贯入深度。首先把贯入仪锥尖对准土面,记录千分表读数,按下时间按钮,锥体自动落入土中,定时为3 s,记录千分表读数。



图1 改进摩根溅蚀盘(左)和锥体贯入仪(右)

1.4 溅蚀试验设计与样品分析

试验前将土样自然风干并过10 mm铁质网筛,除去杂草和石块。填土时在圆形活动装土盘底部覆盖1层纱布,填土容重1.13 g/cm³,含水量控制在

10%左右,填土完毕将土盘表面刮平。试验降雨历时为5,10,15,20,30,40,50 min,每一降雨历时摆放8个溅蚀盘。试验时待雨强稳定后摆入溅蚀盘,降雨结束后取出活动装土盘,慢慢倾倒溅蚀盘上部清水,将浑浊液无损的转入铁盒内。选择其中4个铁盒用烘干法测定溅蚀量(使用1/100天平)。另外,4个铁盒内的浑浊液采用MS2000型激光粒度分析仪(0.01~2 000 μm)测定溅出土粒的实际泥沙颗粒含量,经过 H_2O_2 分散后测定溅出土粒原始颗粒含量^[11]。

将取出的活动装土盘放在贯入仪上进行贯入试验,每次3个重复,取平均值作为测定结果。每个贯入点做完,立即用小勺在贯入点处取适量土样,烘干法测定含水量。从降雨结束到最后风干,对每个历时的土样取9~12对贯入值-含水量值用来拟合贯入深与含水量的关系,并根据拟合关系式求算水量20%的贯入深(H)。最后根据转换公式 $P_{20\%} = 1/H^2$ (式中: $P_{20\%}$ 为含水量20%时的切变强度; H 为对应含水量时的贯入深)得到某一含水量下的土壤切变强度^[12]。

通过对比溅出土粒实际泥沙颗粒含量(分散前)与原土壤同一粒级颗粒含量可分析颗粒的富集与耗损情况,若溅出土粒实际泥沙颗粒含量大于原土壤同一粒级颗粒的含量,说明该降雨强度对这一粒级颗粒起富集作用,溅蚀过程中这些颗粒在雨滴作用下主要发生迁移。反之,说明该降雨强度对这一粒级颗粒起耗损作用,溅蚀过程中这一粒级颗粒被雨滴拆分^[13]。

2 结果与分析

2.1 壤土溅蚀过程的划分

壤土的溅蚀速率(y)随降雨历时(x)呈幂函数变化(图2),拟合方程 $y=131.28x^{-0.792}$, $R^2=0.98$ 。整体上看,降雨历时内壤土溅蚀经历了3个阶段。

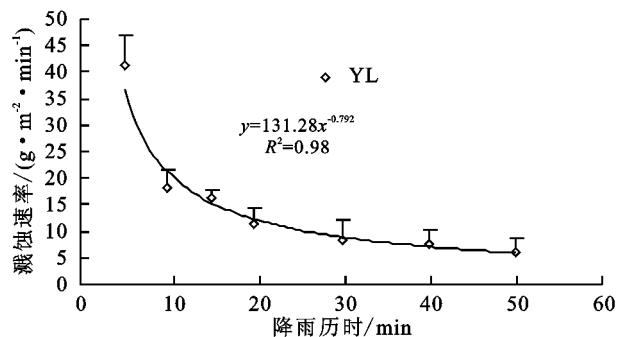


图2 溅蚀速率随时间的变化

0~10 min 溅蚀速率迅速降低,5,10 min 时测得溅蚀率分别为41.18 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,约降低56%。降雨刚开始雨滴大部分与土粒直接接触,溅蚀速率取决于降雨动能,土盘表面的松散颗粒首先发生跃移被溅蚀出去,溅蚀速率非常高,随着松散颗粒的消耗,溅蚀速率迅速降低。

10~30 min 溅蚀速率缓慢降低。20,30 min 溅

蚀速率分别为11.8 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,约降低26.8%。此阶段土壤表层松散颗粒已被溅蚀出去,雨滴能量主要用于破坏土壤结构,随着含水率提高,土壤粘聚力和内摩擦力减小,雨滴打击及快速湿润引起团聚体内部空气爆破使得团聚体破碎,大团聚体破碎形成微团聚体和更细小颗粒^[14],成为可搬运颗粒被溅蚀。另外,随着降雨进行同期降雨量大于同期填洼、下渗量,土盘表面出现积水层,降低了雨滴打击土壤颗粒的能量。以上两个因素使得此阶段溅蚀速率降低幅度减少,溅蚀速率缓慢降低。

30~50 min 溅蚀速率趋于平缓。40 min 时溅蚀速率为7.76 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,较30 min 时降低6.9%。此阶段结皮的形成和发育抑制了溅蚀的发展。吴发启和范文波等^[15]认为,土壤结皮是随着团聚体的分散而形成的。随着降雨进行,表面土壤团聚体不断破碎,形成大量的较细颗粒,堵塞土壤孔隙,细颗粒在土壤表面沉积、压实,形成致密表层即土壤结皮^[16]。土壤结皮能减少入渗,减小地表粗糙度,降低溅蚀速率^[17]。因此,此阶段在结皮的作用下壤土溅蚀速率趋于平缓,2.3节的表面强度测定结果也印证此观点。

2.2 溅蚀对壤土颗粒的分选

溅蚀量、溅蚀速率只能反映溅蚀为径流搬运提供的“物质量”多少和速度,而不能体现出溅蚀过程、团聚体分离及输移能力。通过对收集到的溅蚀颗粒粒径分析,能更有效地阐明溅蚀的过程和特征^[18]。由图3可以看出,壤土颗粒富集与耗损的临界粒径是0.05 mm。溅出土粒级大于0.05 mm 颗粒含量小于原土壤相应颗粒含量,表明壤土在溅蚀过程中,粒级大于0.05 mm 的颗粒不易发生迁移,雨滴主要对这些粒级的颗粒进行拆分作用。溅出土粒级小于0.05 mm 颗粒含量大于原土壤相应颗粒含量,说明该粒级范围的颗粒容易在雨滴作用下发生位移。进一步证明溅蚀过程中对迁移团聚体粒径范围具有优先选择性,对于壤土来说,90 mm/h 的雨强下优先迁移<0.05 mm 的颗粒。

Mermut 等^[19]对土壤微型态研究结果表明,由于降雨和冲刷对土壤表面的破坏、形成作用,使得土壤表面的颗粒组成处于变化状态。图3表明,在0~50 min 降雨历时内溅出土粒中黏粒、细粉粒、粗粉粒颗粒含量百分比随降雨时间延长先减小后增加,呈V趋势,在20 min 左右达到最小值。而粗砂粒(>0.25 mm)随降雨时间延长先增加后减小,呈倒V型,在20 min 左右达到最大值。结合溅蚀率发现,颗粒含量百分比的最大值和最小值出现在壤土溅蚀的缓慢增加阶段,进一步验证此阶段雨滴能量用于拆分团聚体,破坏土壤结构。

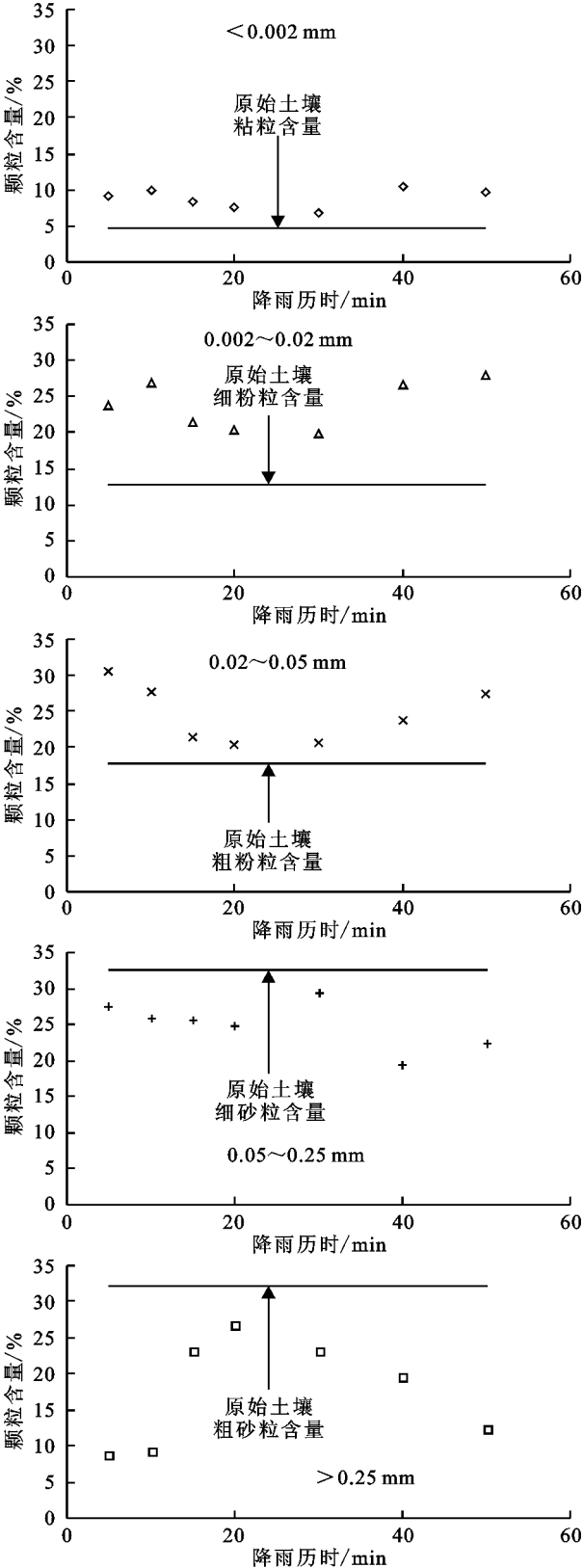


图 3 壤土溅出土粒各粒级颗粒含量

2.3 溅蚀过程中表面强度变化

试验所用壤土含水率同贯入深度之间呈较好的指数关系(图 4 和表 1)。卜崇峰等^[20]通过分析黄土溅蚀过程中不同降雨历时土壤容重,得出表土容重随降雨历时呈增加趋势,即溅蚀过程也是发生层不断致密的过程。因此,当含水率相等时,降雨历时较长即

较密实的土表对应着较浅的贯入深度。

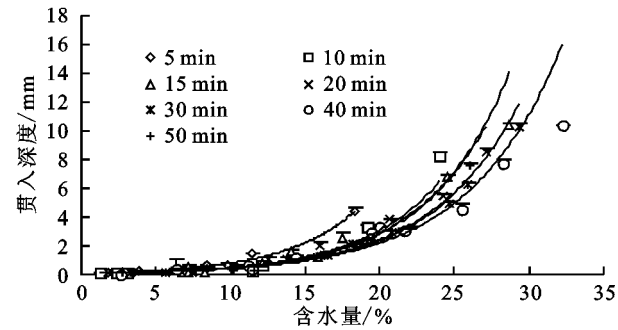


图 4 不同降雨历时下结皮贯入深度与含水量的关系

表 1 不同时段壤土结皮层贯入深度与土壤含水量的拟合关系

时段/min	拟合方程	R^2
5	$y=0.1011\exp(0.2058x)$	0.96
10	$y=0.0777\exp(0.1843x)$	0.94
15	$y=0.0735\exp(0.1832x)$	0.92
20	$y=0.076\exp(0.1812x)$	0.93
30	$y=0.0829\exp(0.1693x)$	0.99
40	$y=0.0859\exp(0.1623x)$	0.92
50	$y=0.0688\exp(0.1763x)$	0.97

含水量为 20%时拟合得到的表面强度(τ)随降雨历时(t)变化曲线拟合方程为: $\tau=0.0711\ln(t)-0.0767,R^2=0.94$ 。壤土的表面强度随降雨历时呈增加趋势,0~10 min 壤土表面强度变化最剧烈,10~30 min 表面强度增加缓慢,30 min 之后呈现稳定趋势。这与根据溅蚀速率划分的壤土溅蚀 3 个过程是吻合的。同时也说明 0~30 min 是壤土结皮形成的关键时期,30 min 之后降雨历时的增加表面强度基本不再增加,雨滴击溅破坏作用同结皮的形成作用处于动态平衡。

3 结论

(1)根据溅蚀速率将壤土的溅蚀过程分为 3 个阶段。溅蚀速率迅速降低阶段主要是土盘表面的松散颗粒被溅蚀,随着松散颗粒的消耗,溅蚀速率迅速降低。溅蚀速率缓慢降低阶段雨滴能量主要用于破坏土壤结构,团聚体破碎及土盘表面形成积水层消耗雨滴动能,使溅蚀速率降低幅度减少。最终团聚体破碎形成的细小颗粒在土表形成致密层抑制溅蚀的发展,溅蚀速率趋于平缓。

(2)在 90 mm/h 雨强下,壤土颗粒富集与耗损的临界粒径是 0.05 mm。雨滴对粒级大于 0.05 mm 的颗粒主要进行拆分作用。而粒级小于 0.05 mm 的颗粒容易在雨滴作用下发生迁移。

(3)当含水率相等时,降雨历时较长的土表对应着较浅的贯入深度。壤土的表面强度随降雨历时的不断增加,0~30 min 是壤土结皮形成的关键时期,30 min 之后随降雨历时增加表面强度基本不再增加。

参考文献:

- [1] Terry J P. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36(3): 525 - 542.
- [2] 罗亲普, 刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 230-235.
- [3] 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J]. 水土保持通报, 1991, 11(8): 34-38.
- [4] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持, 1997(4): 15-17.
- [5] Wan Y E L, Swaify S. Sedimenten richment mechanism of organic carbon and phosphorus in a well-aggregated Oxisol[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 132-138.
- [6] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 124(3): 279-292.
- [7] 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.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [9] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 56-60.
- [10] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 等. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 504-507.
- [11] Wang L. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(3): 917-929.
- [12] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(4): 363-370. [13] 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.
- [14] 范云涛, 雷廷武, 蔡强国. 湿润速度对土壤表面强度和土壤团聚体结构的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 46-50.
- [15] 吴发启, 范文波. 坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 33-36.
- [16] 唐泽军, 雷廷武. 降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 674-681.
- [17] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 马仁明, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 95-103.
- [19] Mermut A R, Luk S H, Romkens M J M, et al. Micro-morphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions[J]. Geoderma, 1995, 66(1): 71-84.
- [20] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 16-23.
- (上接第28页)
- [5] Yang S, Peng S, Xu J, et al. Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(1): 71-80.
- [6] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 445-456.
- [7] Xue L, Yu Y, Yang L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115010-115020.
- [8] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 156(4): 1-11.
- [9] 黄沈发, 陆贻通, 沈根祥, 等. 上海郊区旱作农田氮素流失研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 50-53.
- [10] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-43.
- [11] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 495-500.
- [12] Qiao J, Yang L, Yan T, et al. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 49(4): 93-103.
- [13] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 271-278.
- [14] Trinh T H, Kishaari K, Shuib A S, et al. Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release[J]. Biosystems Engineering, 2015, 130(2): 34-42.
- [15] 张庆利, 张民, 田维彬. 包膜控释和常用氮肥氮素淋溶特征及其对土水质量的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 98-103.