

DOI: 10.11766/trxb202205280284

张紫薇, 赵文俊, 李奇, 马一淳, 田亮, 杨广勇, 李忠武, 刘窑军. 表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 434–444.

ZHANG Ziwei, ZHAO Wenjun, LI Qi, MA Yichun, TIAN Liang, YANG Guangyong, LI Zhongwu, LIU Yaojun. Effects of Top Soil Structure on Runoff and Sediment Yield of Red Soil Slope Cropland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 434–444.

表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响*

张紫薇¹, 赵文俊¹, 李奇¹, 马一淳¹, 田亮¹, 杨广勇², 李忠武¹,
刘窑军^{1†}

(1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

摘要: 针对南方红壤区坡耕地水土流失严重与表层结构退化的现状, 采用室内模拟降雨的方法, 分析表层土壤结构和雨强对降雨再分配、坡面产流及产沙过程的影响。结果表明: (1) 表层土壤结构显著改变降雨的再分配过程, 深耕作层可以降低地表径流比例, 增加壤中流比例, 60 和 90 mm·h⁻¹ 雨强下, 随耕作层深度增加, 地表径流平均比例依次为 70.5%, 62.9% 和 56.8%, 壤中流平均比例依次提升为 7.1%, 12.3% 和 18.1%; (2) 土壤流失率随雨强增加而增大, 90 mm·h⁻¹ 雨强下土壤流失率为 60 mm·h⁻¹ 雨强下的 4.4 倍, 土壤流失率随耕作层深度增加而显著减小, 依次为 36.8、21.1 和 13.1 g·m⁻² min⁻¹; (3) 雨强和表层土壤结构显著影响坡面侵蚀形态的演变, 随耕作深度增加坡面侵蚀由细沟侵蚀逐渐转变为面蚀。表层土壤结构显著改变坡耕地降雨-径流关系和侵蚀过程, 合理增加耕作层深度, 对降低地表侵蚀、促进土壤水分的深层下渗、增加土壤深层持水量具有积极作用。

关键词: 土壤结构; 产流; 产沙; 壤中流; 红壤坡耕地

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Effects of Top Soil Structure on Runoff and Sediment Yield of Red Soil Slope Cropland

ZHANG Ziwei¹, ZHAO Wenjun¹, LI Qi¹, MA Yichun¹, TIAN Liang¹, YANG Guangyong², LI Zhongwu¹,
LIU Yaojun^{1†}

(1. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Research Center for Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: **【Objective】** Based on the current situation and severity of soil and water loss, it is vital to investigate the nature and extent of surface structure degradation of slope farmland and long-duration rainfall characteristics in the red soil region of southern China. **【Method】** The method of long-term rainfall simulation were adopted to test the effects of topsoil structure and

* 国家自然科学基金项目 (41877084, 41501287)、湖南省自然科学基金项目 (2022JJ30389) 和湖南省大学生创新创业训练计划项目 (S202110542121) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41877084, 41501287), and the Natural Science Foundation of Hunan Province (2022JJ30389) and Hunan Students innovation and entrepreneurship training program (No.S202110542121)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyj461@163.com

作者简介: 张紫薇 (2000—), 女, 湖南耒阳人, 主要从事红壤侵蚀及防控研究。E-mail: Zhang_ziwei163@163.com

收稿日期: 2022-05-28; 收到修改稿日期: 2022-11-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-04-12

rainfall intensity on rainfall redistribution, runoff and sediment yield. In this paper, three rainfall intensities, 30 mm·h⁻¹, 60 mm·h⁻¹ and 90 mm·h⁻¹, respectively, and three cultivation depths, 10 cm, 20 cm and 30 cm, respectively, were set to study the effects of tillage layer depth and rainfall intensity on surface flow, subsurface flow, soil loss rate and erosion pattern. 【Result】 The results showed that: (1) The topsoil structure significantly changed the redistribution process of runoff. Higher tillage layer depth can mitigate the effects of rainfall intensity, reduce the surface flow coefficient, and increase subsurface flow. Under the condition of 60 mm·h⁻¹ and 90 mm·h⁻¹ rainfall intensity, the average surface flow coefficient decreased in the sequence of 70.5% (TLD10 cm), 62.9% (TLD20 cm), and 56.8% (TLD30 cm), and the average subsurface flow ratio increased in the sequence of 7.1% (TLD10 cm), 12.3% (TLD20 cm), and 18.1% (TLD30 cm). (2) The soil loss rate was enhanced with the increase in rainfall intensity but decreased with the depth of the tillage layer. Under 60 mm·h⁻¹ rainfall intensity, the peak soil loss rate of 10 cm, 20 cm and 30 cm tillage depth were 35.1, 25.6 and 20.5 g·m⁻² min⁻¹, respectively. For 90 mm·h⁻¹ rainfall intensity, these values were 68.7, 55.8 and 48.4 g·m⁻² min⁻¹, respectively. (3) Rainfall intensity and topsoil structure significantly affect the final slope erosion forms. With the increase of tillage layer depth, the erosion degree decreased significantly. Under the condition of 30 mm·h⁻¹ rainfall intensity, the surface of the soil was relatively intact, and the soil erosion type was splash erosion. Also, under the condition of 60 mm·h⁻¹ rainfall intensity, the soil erosion was all sheet flow erosion, under 10 cm and 20 cm tillage depth, spot erosion appeared in the lower part of the slope, and the soil erosion degree was lower for sheet flow erosion at 30 cm tillage depth. For the 90 mm·h⁻¹ rainfall intensity, rill erosion appeared on the slope while at 10 cm tillage depth, rill erosion was well developed. In addition, at 20 cm tillage layer depth, rill erosion development was significant while at 30 cm tillage depth, slope erosion was mainly sheet flow erosion. 【Conclusion】 The top soil structure can significantly change the relationship between rainfall and runoff. Higher tillage layer depth can reduce surface erosion, promote the deep infiltration of soil moisture, and increase the soil's deep-water holding capacity. Also, this research can serve as a reference for the rational layout of topsoil structure, improvement of rainfall utilization rate and enhancement of soil erosion resistance in the southern red soil area.

Key words: Soil structure; Runoff generation; Sediment yield; Subsurface flow; Red soil sloping land

红壤区坡耕地面积虽占全区水土流失总面积的 10.9%，但水土流失量占全区流失总量的 40%，是水土流失的主要策源地^[1]。坡耕地在自然成土过程和常年耕种等因素影响下，土壤发生分层^[2]，耕作层疏松多孔、渗透性强，而犁底层土壤相对紧实、透水能力差，这种上松-下紧的表层土壤结构特性，显著改变坡耕地降雨径流输出格局^[3-4]。壤中流的存在会改变降雨-径流的耦合关系，并显著改变径流和土壤侵蚀量^[5-6]。随着壤中流的增大，土壤维持较高土壤含水量，径流侵蚀能力增强^[7-8]。土壤侵蚀、浅耕化等是红壤坡耕地耕作层变薄的重要原因，浅薄耕作层导致土壤持水能力及深层入渗能力下降，促进地表产流和产沙，深层耕作层在降雨过程中起到缓冲作用，增加土壤入渗并降低地表产流，耕作层的深浅可以改变表层土壤性质^[9]，影响坡耕地抗侵蚀性能^[10-11]。相关研究表明，紫色土坡耕地土层较浅是导致壤中流增大的主要因素，耕作活动有效改善土壤结构，提高壤中流发生几率^[12]，耕作深度的增加可以引起紫色土耕作侵蚀明显增加^[13]。黑土在

表土流失、土壤侵蚀加剧时，持水能力和有效水含量显著下降^[14]。现有坡面侵蚀研究中，土壤侵蚀对各单因素影响因子的响应机制大多建立在土壤剖面均质的假设基础上，较少考虑土壤剖面结构特征对产流产沙过程的可能影响^[15]。

南方红壤区位于亚热带季风气候区，年降水量大，年内降水分布不均，时间主要集中在 3—7 月，具有范围广、降雨时间长、多暴雨的特点。长历时降雨作为南方红壤区的典型降雨类型，历时长、频率高，如初春的连阴雨以及初夏的梅雨等^[16-18]。土壤侵蚀对土壤类型、降雨条件、地形等的响应机制研究已经较为深入，然而在土层结构和长历时降雨条件双重促进下，南方红壤区坡耕地产流产沙过程显著区别于其他地区，不同表层土壤结构坡面地表径流-壤中流关系及产沙过程有待进一步研究^[19-20]，本试验采用室内模拟降雨方法，通过模拟长历时降雨和不同耕作层深度条件，分析表层土壤结构对降雨再分配、坡面产流及土壤产沙过程的影响，为红壤区合理布局耕层结构，增强土壤抗侵蚀能力提供依据。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

我国红壤主要分布于长江以南的低山丘陵区,江西省是红壤的集中分布区域之一,本文选择位于江西鄱阳湖滨的江西水土保持生态科技园内长期耕作坡耕地土壤为研究对象。园区位于 $29^{\circ}16'—29^{\circ}17'N$ 、 $115^{\circ}42'—115^{\circ}43'E$,海拔分布范围为 $30—90$ m,坡度主要范围集中在 $5^{\circ}—25^{\circ}$,属亚热带湿润季风气候,年平均气温 $17^{\circ}C$,多年平均降水量在 1500 mm,降雨年内分布不均,70%以上降雨集中在3—7月。土壤类型为第四纪沉积物发育红壤,典型土壤剖面结构为 Ah-Bs-Cs,土层深度超过 1.0 m。表层土壤 ($0—20$ cm) 土壤机械组成中黏粒含量 26.83% ,粉粒 61.75% ,砂粒 11.42% ;土壤理化性质中有机质 (OM) 为 11.04 $g\cdot kg^{-1}$,全氮 (TN) 为 0.88 $g\cdot kg^{-1}$,全磷 (TP) 为 0.17 $g\cdot kg^{-1}$,阳离子交换量 (CEC) 为 19.34 $mol\cdot kg^{-1}$,pH 为 4.29 ,游离氧化铁含量为 41.16 $g\cdot kg^{-1}$ 。主要土地利用类型为次生林地、坡耕地、果园等,园区地形地貌及土地利用类型等在南方红壤区具有典型代表性。

1.2 土槽设计及填土

试验用土选自园区耕作 10 年以上坡耕地,采集 $0—20$ cm 层土壤样品,风干过 5 mm 筛后装袋保存,以供模拟降雨试验使用。本文设置 10 cm、 20 cm 和 30 cm 共 3 种耕作层深度,研究 3 种耕作层深度对坡耕地地表径流、耕作层壤中流、犁底层壤中流等影响。

试验所用钢制土壤槽规格为 2.0 m \times 1.0 m \times 0.5 m

(长 \times 宽 \times 高),土槽总填土深度为 45 cm,土面距离土槽顶部 5 cm。自然表层土壤受耕作和降雨的影响,形成不同理化性质和功能的耕作层和犁底层^[19],本文采用不同容重的方式模拟耕作层和犁底层,还原坡耕地表层土壤结构,根据野外坡耕地实地取样调查,耕作层填土容重控制为 1.25 $g\cdot cm^{-3}$,犁底层土壤容重控制为 1.50 $g\cdot cm^{-3}$,以每 5 cm 厚度分层填土。为确保能够收集不同耕作层深度壤中流,分别在土槽的前端挡板距离土表 10 cm、 20 cm 和 30 cm 处分别开孔,并对外焊接一个带阀门的水管导出壤中流,同时在内侧相同距离处安装一个可拆卸的壤中流收集板,收集板呈倒 L 型,收集板的最低点与开孔相平,通过收集板与孔管联合收集相应层次壤中流。在土槽前端挡板的底部开孔,收集犁底层壤中流,在土槽前端挡板的顶端安装地表径流和泥沙收集槽,土槽底部按 5 cm 见方开孔,确保正常向下排水,并安装一个底部收集槽收集底部渗漏水。具体如图 1 所示。

1.3 模拟降雨试验

通过对研究区多年气象资料以及园区自 2000 年以来多年径流小区观测资料进行整理,春夏之际的连阴雨和梅雨常常持续几个小时甚至几天,但对降雨过程仔细分析得出,具备侵蚀能力的降雨时长并不是很长,综合基础资料,本研究模拟降雨历时为 3 h,降雨雨强设计为 30 $mm\cdot h^{-1}$ 、 60 $mm\cdot h^{-1}$ 和 90 $mm\cdot h^{-1}$,模拟南方红壤区常见的降雨,坡度设置为 8° ,模拟缓坡坡耕地。

模拟降雨试验在江西水土保持生态科技园内的人工模拟降雨大厅内进行,降雨设备由水源、管道

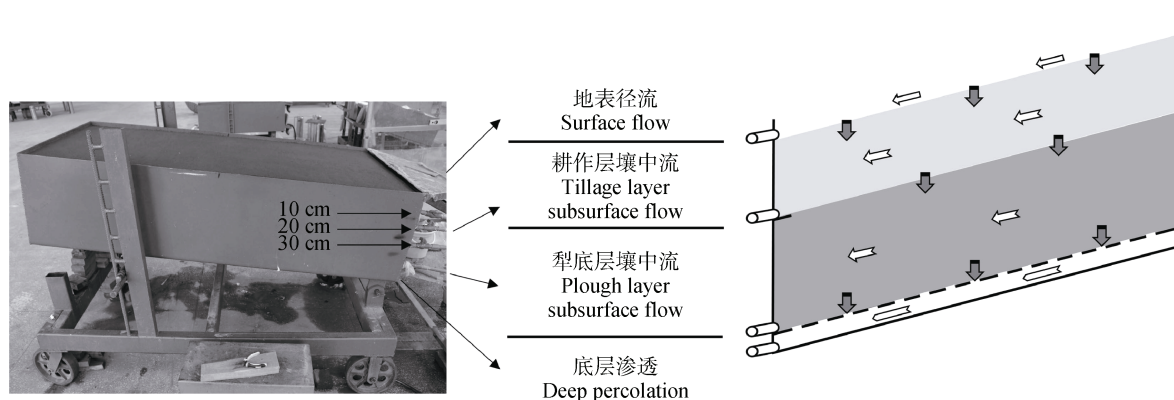


图 1 试验土槽示意图

Fig. 1 Illustration of the soil tank used in this study

泵、降雨控制柜、遮雨槽、旋转下喷式喷头 (FULLJET) 等组成, 利用遮雨槽可等降雨均匀之后再降雨试验, 从而减小试验初期降雨误差。雨强范围为 $10\sim 300\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 有效范围为 $15.6\text{ m}\times 12.6\text{ m}$, 降雨均匀度在 85% 以上, 降雨高度达 18 m, 该降雨高度可使模拟降雨达到雨滴终速。模拟降雨之前, 将 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 尼龙纱网覆盖在土槽之上, 以减弱雨滴打击防止土壤表面结皮, 用雨强为 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降雨进行预湿润, 每次降雨至底层渗透出水, 预降雨结束后室内静置 12 h 后, 调整坡度开始模拟降雨。试验于 2018 年 6 月至 8 月间完成。

1.4 数据收集及分析

降雨过程中, 自地表径流和壤中流开始产流之后, 按 3 min 间隔分别收集地表径流量、地表径流泥量和各层次壤中流产流量。对收集到的地表径流泥沙样带回实验室, 烘箱烘干至恒重计算泥沙浓度和土壤流失速率。由于壤中流存在滞后作用, 降雨结束之后, 持续按 3 min 时间间隔收集壤中流产流量, 若产流量低于 $5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 则将后续产流收集一个总量, 以便计算壤中流总产流量。

降雨过程中, 观察并记录细沟出现的时间, 地

表径流初始时间、各层次壤中流初始产流时间, 并用数码相机记录坡面侵蚀变化过程。

2 结 果

2.1 地表径流过程

$30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 降雨全部入渗, 无地表径流产生。由图 2 可知, $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 地表径流开始产流时间和产流过程大致相似, 12~15 min 之间地表径流开始产流, 产流前期快速升高到峰值, 随着耕作层深度的增加, 地表径流系数初期上升趋势渐缓, 差别的是, $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强在峰值后较长时间维持在稳定情况, 随着耕作层深度增加, 稳定径流系数分别为 62.8%、55.7% 和 47.5%, 而 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强达到峰值后处于较长时间的波动和缓慢下降阶段, 下降时间随耕作层深度增加而推迟。随着耕作层深度的增加, 地表径流逐渐降低, $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 平均地表径流系数由 10 cm 耕作层的 59.5% 降低至 30 cm 耕作层的 47.5%; $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 10 cm、20 cm 和 30 cm 耕作层平均径流系数分别为 81.8%、72.5% 和 65.9%。

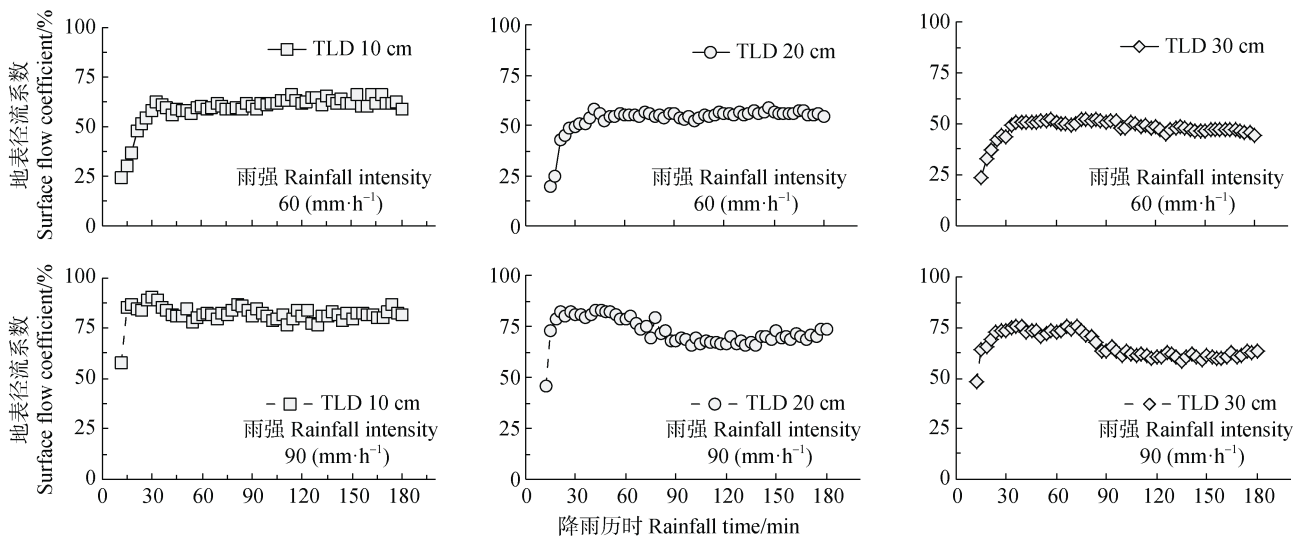


图 2 不同耕作深度及雨强条件下地表径流过程

Fig. 2 Surface runoff process under different tillage layer depths and rainfall intensities

2.2 壤中流过程

由图 3 可知, $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 降雨全部转化为壤中流和深层下渗。10 cm 和 20 cm 耕作条件下, 降雨 30 min 后耕作层壤中流开始产流, 2 h 后逐渐稳定, 30 cm 耕作条件下, 耕作层壤中流在降雨后

60 min 左右开始产流, 且随着降雨持续增加, 至降雨结束仍未达到稳定。耕作层壤中流量随耕作层深度增加而逐渐降低, 犁底层壤中流随耕作层深度增加而显著增加, 且更快的达到稳定阶段, 并持续保持稳定 (图 4)。雨强增加至 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 耕作层

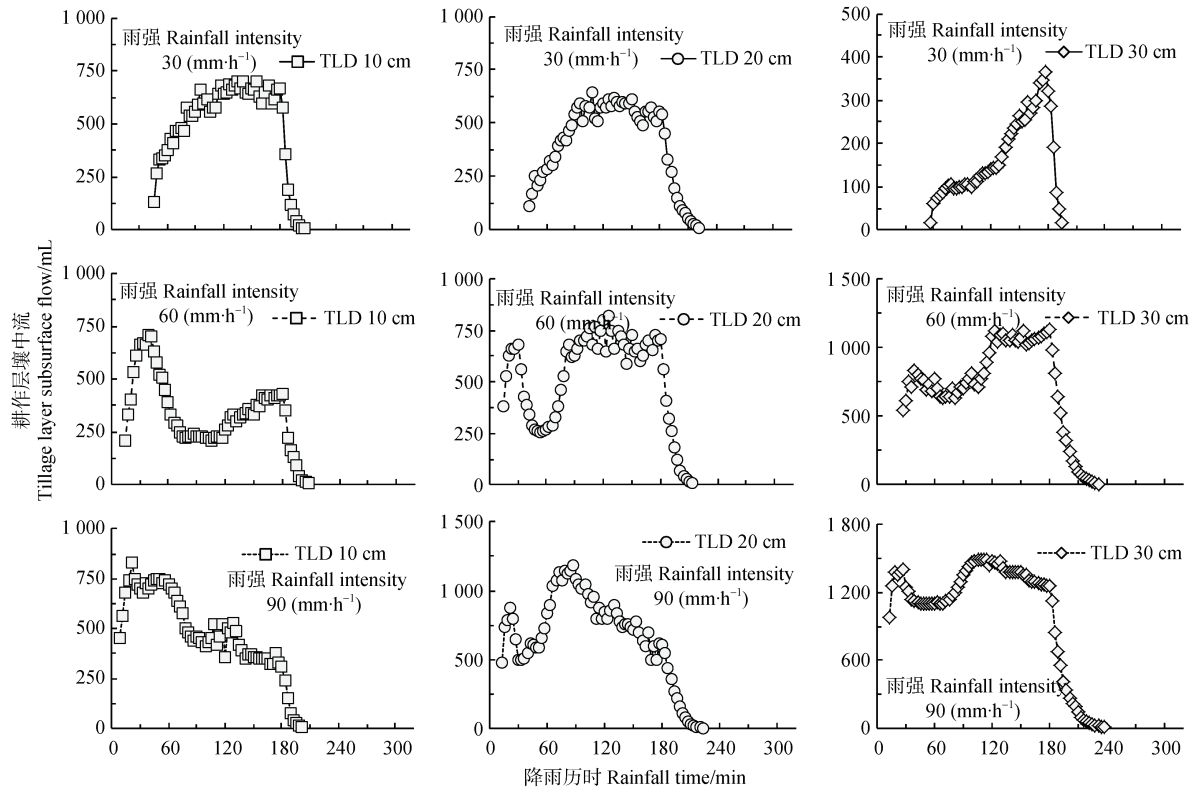


图3 不同雨强及耕作层深度下耕作层壤中流发育过程

Fig. 3 Tillage layer subsurface flow generation processes under different rainfall intensities and tillage layer depths

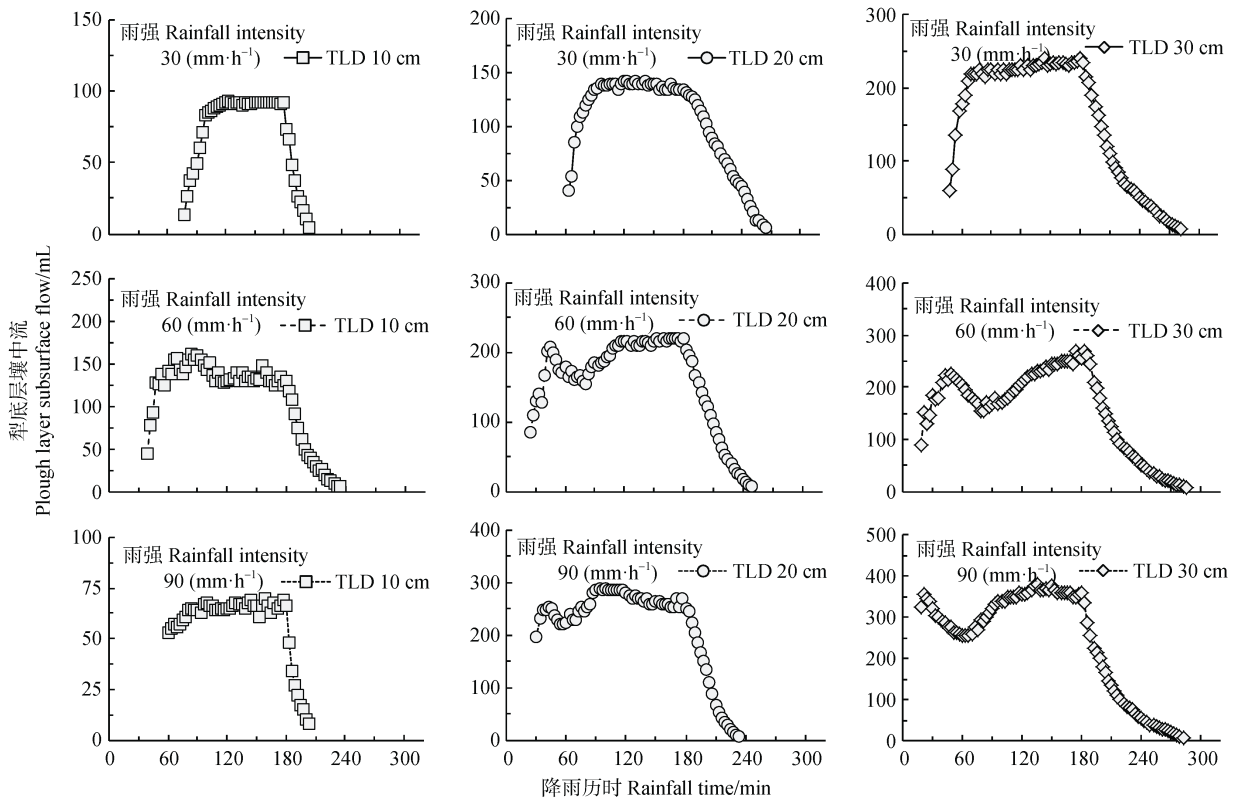


图4 不同雨强及耕作层深度下犁底层壤中流发育过程

Fig. 4 Plough layer subsurface flow generation processes under different rainfall intensities and tillage layer depths

壤中流均在 30 min 之内开始产流, 壤中流发育过程也发生显著变化, 与 $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的单峰型增长不同, $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时耕作层和犁底层壤中流均呈现出双峰型发育特点。在降雨初期耕作层和犁底层壤中流快速增加, 耕作层壤中流在 45 min 左右达到第一个峰值之后快速降低, 随着降雨进行再上升形成第二个峰值并维持相对稳定, 犁底层壤中流的双峰型分布相比耕作层存在滞后性, 第一个峰值的时间要晚于耕作层, 并且峰值和变化幅度都要低。随着雨强增大至 $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 耕作层壤中流在 15 min 左右开始产流, 10 cm 耕作条件下壤中流发育过程呈单峰型, 降雨 30 min 左右耕作层壤中流达到峰值后持续降低, 犁底层则呈增长趋势; 20 cm 和 30 cm 耕作条件下壤中流呈双峰发展, 与 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 相比, 第一个峰值出现时间更早, 且幅度更小。

$30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下, 壤中流产流率随耕作层深度的增加而逐渐降低, 总产流率由 17.01% (耕作层 15.26%) 降低至 11.28% (耕作层 4.36%)。随着雨强增大, 壤中流产流率随着耕作层深度的增加而提

升, $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 下, 总壤中流产流率由 8.05% (耕作层 6.04%) 增加到 17.74% (耕作层 13.78%), $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 下, 总壤中流产流率由 6.25% (耕作层 5.73%) 增加到 18.55% (耕作层 14.59%), 雨强越大, 地表径流和壤中流产流越快, 产流量越大。

2.3 坡面产沙过程

由图 5 所示, 在降雨过程中, 地表径流率在降雨前期短时间内急剧增加后趋于稳定, 而地表土壤流失率前期急剧增加后变化较大。产流前期, 坡面土壤松散, 抗侵蚀能力差, 受径流冲刷易产生侵蚀, 地表土壤流失率随坡面径流的增大急剧增大到峰值, $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件时, 径流含沙量在达到峰值后, 迅速下降到一定范围内缓慢波动, $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件时, 径流含沙量具有双峰特征, 达到峰值下降后在 120~150 min 之间出现第二个峰值。 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件下 10 cm、20 cm 及 30 cm 耕作层深度下的峰值大小分别为 35.1、25.6 和 $20.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件时, 分别为 68.7、55.8 和 $48.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, 随着耕作深度的增加, 地表土壤流失率逐渐降低。

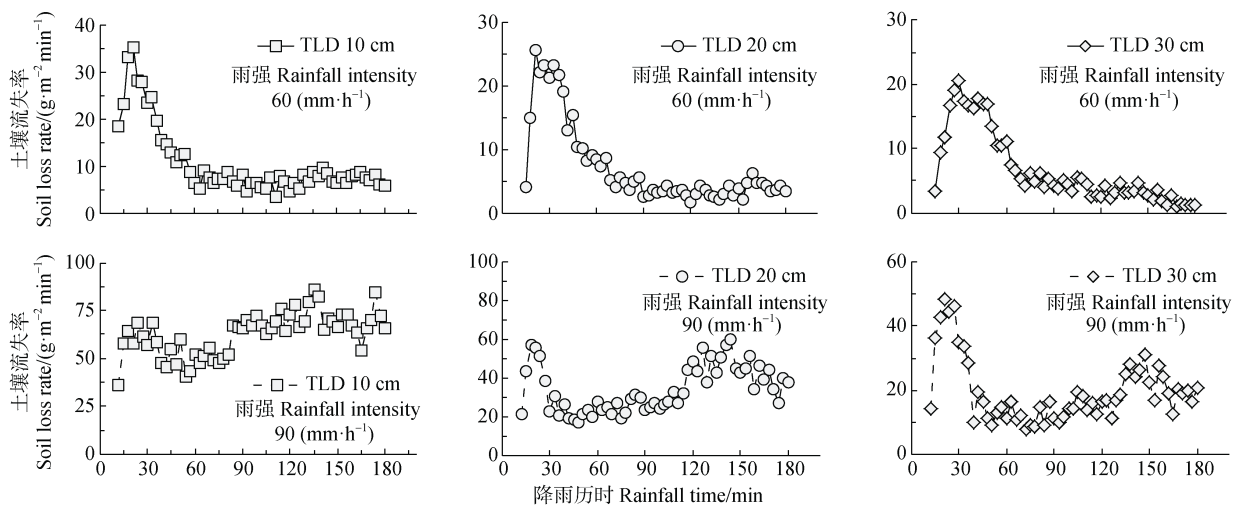


图 5 不同雨强及耕作层深度下土壤流失过程

Fig. 5 Variations of surface soil loss rates under different rainfall intensities and tillage layer depths

为进一步探讨不同降雨条件下累计侵蚀量的变化规律, 将累计侵蚀量与降雨历时进行回归分析。结果显示累计侵蚀量与降雨历时可用线性和对数函数准确描述, 其相关系数高达 0.9。由表 1 可看出, $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件下的三种耕作深度累计侵蚀量与降雨历时呈对数关系, $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨条件下均呈线性关系。从拟合方程式可看出, 累计侵蚀量曲线斜率随着雨强的增大而增大, 随耕作深度的增加而减小, 如 $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$

时, 10 cm 耕作层深度斜率是 20 cm 的 1.32 倍~1.43 倍, 20 cm 是 30 cm 的 1.19 倍~2.02 倍。

3 讨论

3.1 耕作层深度对径流组分及产流过程影响

耕作层深度显著影响降雨的再分布过程。耕作层深度增加能显著降低地表产流能力, 增加壤中流

表 1 累计侵蚀量与时间拟合方程

Table 1 Fitting equations between cumulative soil loss and time			
雨强 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)	耕作层深度 Tillage layer depth/cm	拟合方程/Fitting equations	R ²
60	10	$y=0.560\ln x-1.393$	0.985
	20	$y=0.499\ln x-1.263$	0.991
	30	$y=0.480\ln x-1.427$	0.889
90	10	$y=0.049x-0.038$	0.993
	20	$y=0.034x-0.283$	0.984
	30	$y=0.017x+0.278$	0.975

及土壤持水等(图6)。在60和90 mm·h⁻¹降雨条件下,壤中流平均比例从7.1%(TLD 10 cm)增加至18.1%(TLD 30 cm),地表径流平均比例从70.5%(TLD 10 cm)降低至56.8%(TLD 30 cm)。耕作层较浅(10 cm和20 cm)的条件下,壤中流比例随着雨强的增加而下降,这与徐勤学等^[21]在撂荒地和翻耕地的试验结果一致,耕作层较深时,壤中流比例

随雨强的增大而升高。这是由于浅耕条件下,耕作层与犁底层之间的相对不透水层位置高,土壤入渗能力差,地表径流随雨强增大,形成土壤结皮和破坏地表结构^[21-22],进一步降低土壤入渗,导致壤中流比例下降;深耕层条件下,土壤容重小,入渗能力增强,土壤地表径流减少^[23],抗侵蚀能力随之增强,在强降雨条件下依旧能维持土壤结构,随降雨量增加导致土壤入渗增加,壤中流比例增加。从图6中还可以看出,底层渗透量所占比例随着雨强的增大而迅速降低,但耕作层深度对其影响不显著,比例随耕作层深度增加小幅增长。这是由于土壤入渗能力有限,雨强增大所增加的雨量主要转换为地表径流,耕作深度增加一定程度上可以增加底层渗透。壤中流由耕作层和犁底层两个分量组成,耕作层是壤中流的主要发生层次,尤其体现在10 cm等浅耕作层条件下,85%的壤中流均由耕作层产生,但随着耕作层深度的增加,耕作层壤中流比例逐渐减少,犁底层壤中流占比逐渐增加,进一步说明耕作层深度增加,土壤入渗性能增加。

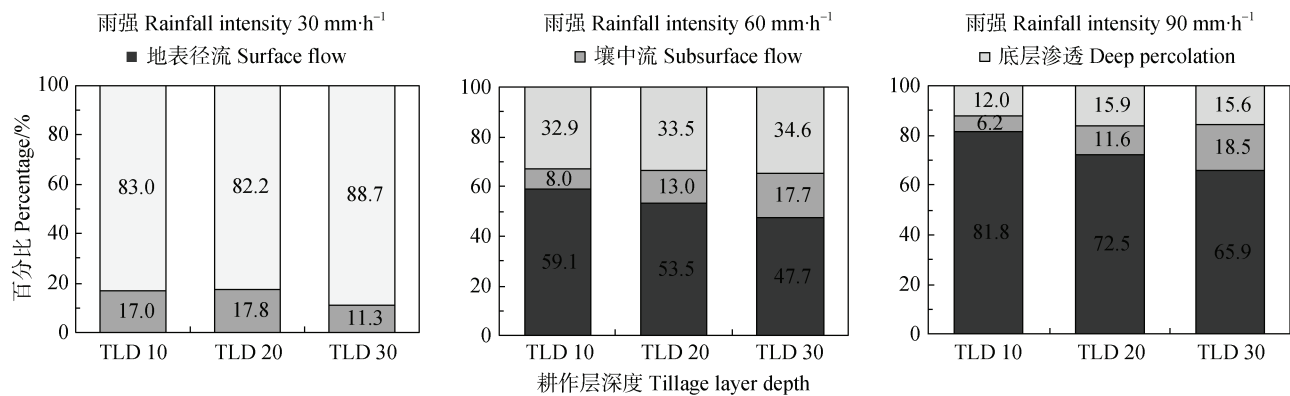


图 6 不同试验条件下降雨径流组分变化

Fig. 6 Variation of rainfall-runoff components under different experimental conditions

3.2 耕作层深度对坡面侵蚀过程的影响

一般而言,随着降雨雨滴对地表的持续打击,土壤粗颗粒破碎成细颗粒,细颗粒在雨滴和入渗作用下,填充表层孔隙,并形成土壤结皮,黏粒含量接近20%时,土壤结皮极易发育^[24]。土壤结皮形成之后,降雨在坡面形成薄层水流,坡面细颗粒在薄层水流作用下迁移,土壤侵蚀处于片蚀阶段^[25]。雨强小以至于坡面薄层水流能量低时,土壤结皮无法快速破坏。但当土壤耕作层比较浅时,土壤水分随着降雨的持续逐渐饱和,坡面发生全面漫流,在高

含水量条件下,土壤颗粒更容易被雨滴破碎并被径流迁移,土壤结皮开始被破坏,造成斑块状或鳞片状侵蚀。随着降雨的进一步进行,结皮破坏处逐渐成为脆弱区,土壤颗粒更容易被搬运逐渐形成低洼地并开始形成一些小的跌坎,溯源侵蚀更快发展,进而演变成细沟侵蚀,细沟发育主要受到降雨径流侵蚀力和土壤抗侵蚀力等多方面的影响^[26]。

从图7能清晰地看出,不同降雨条件及耕作层深度下坡面侵蚀最终侵蚀形态的差异,随耕作层深度增加,土壤侵蚀由细沟侵蚀转变为层状面蚀。在

30 mm·h⁻¹ 雨强下, 地表没有形成径流, 土壤表面比较完整, 土壤侵蚀类型为雨滴击溅侵蚀。郝好鑫等^[27]认为, 即使在有雨滴击溅的情况下, 也不会有较大的坡面侵蚀发生, 径流在土壤侵蚀中起着决定性的作用。在 60 mm·h⁻¹ 雨强下, 土壤表面形成层状水流, 侵蚀类型为面蚀, 在 10 cm 和 20 cm 耕作层深度下, 坡面下部开始出现斑块剥蚀, 随着耕作层深度增加至 30 cm, 斑块状面蚀程度降低, 土壤结皮至降雨结束仍未被破坏。在 90 mm·h⁻¹ 雨强下, 耕作层深度显著改变了坡面侵蚀最终形态, 在 10 cm 耕作层深度下, 坡面细沟发育非常完善, 细沟面积

占土槽总面积的 60%以上, 细沟深度超过 7 cm, 在 20 cm 耕作层深度下, 细沟发育依然明显, 细沟面积占比约为 50%, 细沟深度在 5 cm 以内, 一旦细沟形成, 侵蚀量快速增长(表 2), 这与郝好鑫等^[27]、姜义亮等^[28]的研究结果一致。在 30 cm 耕作层下, 坡面侵蚀主要表现为斑块状面蚀, 但在小区底部开始有细沟初育特征。在浅耕作层条件下(10 cm), 耕作层高土壤含水量降低了土壤抗侵蚀能力, 随着耕作层深度加深, 土壤饱和过程减慢, 且深耕作层更有利于深层下渗, 减弱表层土壤的湿润浸泡作用。

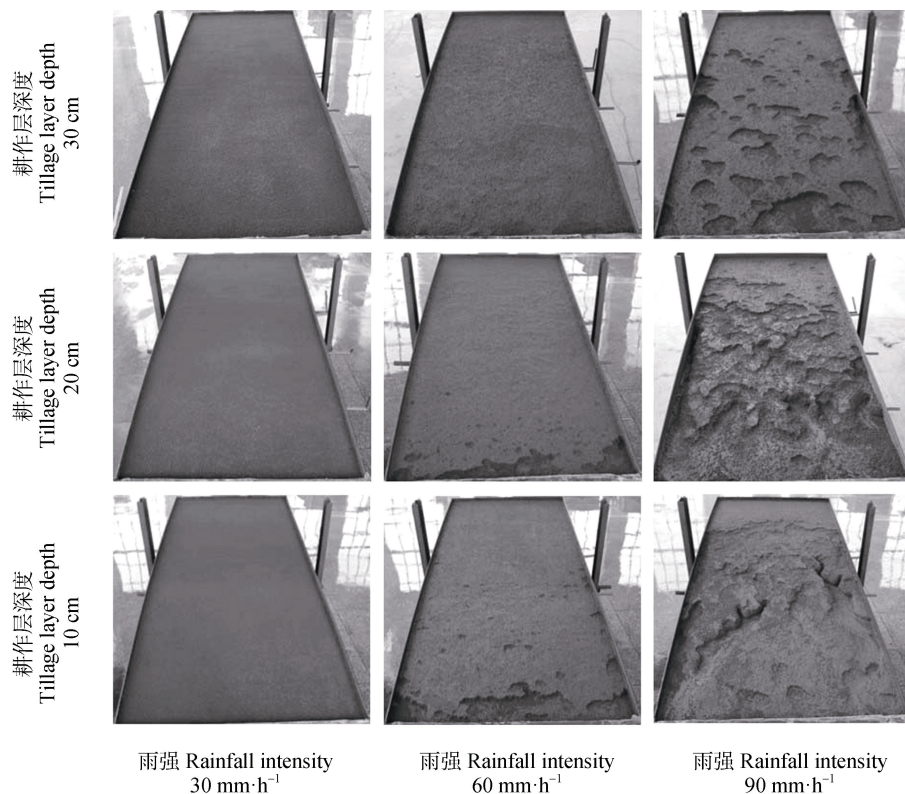


图 7 不同试验条件下坡面侵蚀最终形态

Fig. 7 Final soil erosion patterns under different rainfall conditions

高强度降雨条件下, 坡面侵蚀快速经过溅蚀和层状化面蚀, 在层状化面蚀过程中, 坡面细颗粒的不均匀搬运改变了地表粗糙度, 造成坡面薄层水流往股流方向发育, 侵蚀开始往细沟侵蚀转变。在雨滴及股流共同作用下, 土壤结皮一边形成一边破坏, 坡面股流加快形成。致密的结皮可降低土壤入渗, 增大地表产流量, 有可能导致土壤侵蚀的增加, 相较于前期没有结皮的土壤表面, 其坡面径流系数、累计径流量及累计产沙量增加数倍至十倍^[29]; 另一

方面致密的土壤结皮可增强表层土壤的抗侵蚀能力, 降低侵蚀量^[20]。

不同的耕作层深度显著改变调节坡耕地降雨-径流关系, 合理增加耕作层深度, 降低地表侵蚀, 促进土壤水分的深层下渗, 增加土壤深层持水量, 对缓解坡耕地持续加强的干旱状况、减少水土流失具有积极作用。同时深耕还可以有效改善坡耕地土壤的理化性质, 达到改良土壤的效果^[30], 有利于构建良好的耕层结构^[31]。王秋菊等^[32]研究发现深耕可

以改善黑土的土壤紧实度, 增加土壤孔隙, 提高蓄水能力。童文杰等^[33]研究发现, 深耕可以改良土体结构, 促进土壤蓄水储墒。胡钧铭等^[34]认为合理的

耕作方式可以影响耕作深度, 有利于构建良好的耕层结构, 促进作物生长。苏有健等^[35]研究发现深耕可以改善茶园土壤物理性质, 提高茶叶产量。

表 2 不同侵蚀阶段径流泥沙等特征参数变化

Table 2 Changes of characteristic parameters such as runoff and sediment in different erosion stages

雨强 Rainfall intensity / (mm·h ⁻¹)	耕作层深 度 Tillage layer depth /cm	面蚀阶段 Sheet flow erosion period			沟蚀阶段 Rill erosion period		
		地表径流系数 Surface flow coefficient /%	壤中流系数 Subsurface flow coefficient /%	土壤侵蚀率 Soil loss rate / (g·m ⁻² ·min ⁻¹)	地表径流系数 Surface flow coefficient /%	壤中流系数 Subsurface flow coefficient /%	土壤侵蚀率 Soil loss rate / (g·m ⁻² ·min ⁻¹)
30	10	—	17.01	—	—	—	—
	20	—	17.79	—	—	—	—
	30	—	11.28	—	—	—	—
60	10	59.14	8.05	10.74	—	—	—
	20	53.51	12.98	7.41	—	—	—
	30	47.68	17.74	6.69	—	—	—
90	10	81.30	3.21	53.10	82.50	3.04	69.9
	20	69.20	6.21	28.29	75.18	5.42	43.1
	30	65.86	18.55	19.53	—	—	—

4 结 论

本研究通过室内模拟降雨, 研究坡耕地表层土壤结构(耕作层深度)对地表径流、壤中流及侵蚀过程的影响, 研究结论如下: (1) 雨强和表层土壤结构显著影响红壤区坡耕地的水沙响应, 地表径流系数随雨强增加而增大; 耕作层是壤中流的主要发生层次, 深耕作层能促进壤中流产生, 增加壤中流量。(2) 坡面侵蚀最终形态受雨强及耕作层深度共同影响, 浅耕作层下更容易诱发细沟侵蚀, 随着耕作层深度增加, 逐渐以面蚀和溅蚀为主, 深耕作层可以显著降低土壤侵蚀程度。(3) 增加耕作层深度可以改变降雨的再分配过程、增加红壤坡耕地的土壤持水量和减少土壤流失量, 增强红壤坡耕地土壤抗侵蚀能力。

参考文献 (References)

- [1] National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The "13th Five-Year Plan" special construction plan for the comprehensive treatment of soil erosion on slope arable land in China[Z]. 2017.[国家发展和改革委员会、中华人民共和国水利部. 全国坡耕地水土流失综合治理“十三五”专项建设方案[Z]. 2017.]
- [2] Reganold J P, Elliott L F, Unger Y L. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion[J]. *Nature*, 1987, 330 (6146): 370—372.
- [3] Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (5): 1624—1630. [杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26 (5): 1624—1630.]
- [4] Kasteel R, Pütz T, Vereecken H. An experimental and numerical study on flow and transport in a field soil using zero-tension lysimeters and suction plates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (3): 632—645.
- [5] An J, Yin X L, Li G H, et al. Interactive influence of raindrop impact and seepage on soil erosion process within contour ridge system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (1): 50—55, 64. [安娟, 殷小琳, 李国会, 等. 雨滴打击与壤中流交互作用对横坡垄作坡面侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35 (1): 50—55, 64.]
- [6] Li J Z, Pei T F, Niu L H, et al. Simulation and model of interflow on hillslope of forest catchment[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35 (4): 2—8. [李金中, 裴铁璠,

- 牛丽华, 等. 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究[J]. 林业科学, 1999, 35 (4): 2—8.]
- [7] Xie S H, Tu A G, Mo M H, et al. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26 (4): 526—534. [谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展, 2015, 26 (4): 526—534.]
- [8] Li G F, Yang R X, Xie F Q, et al. Slope soil erosion characteristic of lateritic red soil under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 101—107, 230. [李桂芳, 杨任翔, 谢福倩, 等. 不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (2): 101—107, 230.]
- [9] Pu J, Shi D M, Lou Y B, et al. Effect of different tillage depth on soil properties of ploughing layer in slope cultivated land of red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (5): 8—14. [蒲境, 史东梅, 娄义宝, 等. 不同耕作深度对红壤坡耕地耕层土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (5): 8—14.]
- [10] Song G, Shi D M, Zhu H Y, et al. Effects of tillage measures on quality of cultivated-layer in red soil slope farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 610—622. [宋鸽, 史东梅, 朱红业, 等. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 610—622.]
- [11] Chen P Y, Ma L, Xue M J, et al. Characteristics of soil aggregates with different particle sizes and their quantitative relationship with slope erosion in rocky mountain area of Northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40 (8): 64—71. [陈佩岩, 马岚, 薛孟君, 等. 华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40 (8): 64—71.]
- [12] Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018 (2): 42—47, 69. [苏正安, 熊东红, 张建辉, 等. 紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J]. 中国水土保持, 2018 (2): 42—47, 69.]
- [13] Li F C, Hua X Y, Huang Q. Effects of tillage depth on tillage erosion by rotary cultivator plough on the steep land in purple soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23 (4): 1—5. [李富程, 花小叶, 黄强. 耕作深度对紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (4): 1—5.]
- [14] Zhang R, Gou X M, Zhao Y Z, et al. Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (1): 62—65. [张瑞, 苟晓敏, 赵玉珍, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (1): 62—65.]
- [15] Ji H Y, Shao M A, Jia X X. Impact of layered soil structure on infiltration and erosion processes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49 (2): 441—446. [吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 土壤剖面结构特征对坡面产流产沙过程的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 (2): 441—446.]
- [16] Xu Q. The delimitation of Meiyu period in the lower reaches of Yangtze-Huaihe River and their evolving characteristics for 46 recent years[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 1998, 18 (4): 316—329. [徐群. 近 46 年江淮下游梅雨期的划分和演变特征[J]. 气象科学, 1998, 18 (4): 316—329.]
- [17] Han R Q, Chen L J, Li W J, et al. The spatial and temporal characteristics of China continuous cold rainy weather and south cold damage from February to may[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20 (3): 312—320. [韩荣青, 陈丽娟, 李维京, 等. 2—5 月我国低温连阴雨和南方冷害时空特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20 (3): 312—320.]
- [18] An W T, Song X M, Jiang Q, et al. Research progress on response mechanism of slope soil erosion and its hydrodynamic characteristics[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41 (4): 61—66. [安文涛, 宋晓敏, 蒋谦, 等. 坡面土壤侵蚀响应机制及其水动力学特征研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41 (4): 61—66.]
- [19] Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, et al. Effects of different tillage layer structures on soil compaction and soil water content[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21 (6): 76—80. [刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕层构造对土壤硬度和含水量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21 (6): 76—80.]
- [20] Lu P, Wang L H, Wu F Q. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (8): 141—146. [路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (8): 141—146.]
- [21] Xu Q X, Wang T W, Li Z X, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21 (2): 229—234. [徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. 水科学进展, 2010, 21 (2): 229—234.]
- [22] Xiao X, Wu H W, Li X Y. Research progress and prospects of subsurface flow[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34 (3): 391—402. [肖雄, 吴华武, 李小雁. 壤中流研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34 (3): 391—402.]
- [23] Gao J H, Zhang C Z. The effects of different conservation

- tillage on soil physical structures of dry farmland in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 192—196. [高建华, 张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 192—196.]
- [24] Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 1—12. [张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 1—12.]
- [25] Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 95—103. [郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95—103.]
- [26] Li J L, Cai Q G, Sun L Y, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1319—1325. [李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1319—1325.]
- [27] Hao H X, Guo Z L, Wang X Z, et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 134—140. [郝好鑫, 郭忠录, 王先舟, 等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 134—140.]
- [28] Jiang Y L, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8207—8215. [姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8207—8215.]
- [29] Ma J L, Xu H H, Wang B, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping farmland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 45—49. [马金龙, 许欢欢, 王兵, 等. 黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 45—49.]
- [30] Huang S S, Zhong Y J, Huang Q R, et al. Effects of tillage depths and fertilizing patterns on soil physical-chemical properties and crop yield in red soil slop field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 72—83. [黄尚书, 钟义军, 黄欠如, 等. 耕作深度及培肥方式对红壤坡耕地土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(4): 72—83.]
- [31] Zhang L N, Evans A, Zhang L Y, et al. Effects of tillage methods on the physical characteristics of red soil of upland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 46—50. [张丽娜, Asenso Evans, 张陆勇, 等. 耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 46—50.]
- [32] Wang Q J, Liu F, Jiao F, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4): 942—948. [王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 深耕对黑土水分特征及动态变化影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 942—948.]
- [33] Tong W J, Deng X P, Xu Z L, et al. Effect of plowing depth on soil physical characteristics and spatial distribution of root system of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11): 1464—1472. [董文杰, 邓小鹏, 徐照丽, 等. 不同耕作深度对土壤物理性状及烤烟根系空间分布特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(11): 1464—1472.]
- [34] Hu J M, Chen S N, Wei X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 95—103. [胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(2): 95—103.]
- [35] Su Y J, Wang Y J, Zhang Y L, et al. Effects of different tillage methods on tea garden soil physical characteristics and tea yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3723—3729. [苏有健, 王焯军, 张永利, 等. 不同耕作方式对茶园土壤物理性状及茶叶产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3723—3729.]

(责任编辑: 檀满枝)