

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.015

CSTR: 32310.14.stbxb.2025.02.015

王杰, 郑好, 李梓涵, 等. 土壤质地对有效混合深度及溶质流失的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 65-73, 81.

WANG Jie, ZHENG Hao, LI Zihan, et al. Effects of soil texture on effective mixing depth and solute loss [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 65-73, 81.

土壤质地对有效混合深度及溶质流失的影响

王杰, 郑好, 李梓涵, 任少聪, 王硕果, 连启洁, 魏玉杰, 蔡崇法

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 有效混合深度是量化与预测溶质流失的重要参数, 量化质地差异土壤的有效混合深度, 探究土壤侵蚀产流产沙和溶质流失有效混合深度的响应对农业面源污染模型的研究具有重要意义。[方法] 以丹江口库区 5 个质地差异的旱耕地表土为研究对象, 采用溴离子示踪法, 根据溴不同的施放深度 [0 (表层)、0.5、1、2、5 cm], 通过模拟降雨试验量化质地差异土壤的有效混合深度及其动态变化, 测定土壤侵蚀产流产沙及溶质流失过程, 分析其对有效混合深度的响应。[结果] 在设定的试验条件下, 随着黏粒质量分数的增加, 降雨过程中有效混合深度分别分布在 0.32~0.72、0.11~0.57、0.44~2.41、0.11~1.04、0.13~0.28 cm, 土壤质地显著影响有效混合深度 ($F=39.27, p<0.001$), 但因不同质地土壤入渗及产流过程的差异, 二者并未表现出明显线性关系。有效混合深度在降雨过程中呈动态变化, 随降雨历时呈明显的幂函数关系 ($R^2>0.80$)。不同有效混合深度下的土壤侵蚀产流产沙过程也存在显著差异 ($F>12.068, p<0.001$)。回归分析表明, 平均有效混合深度与土壤累计径流量和累计溴流失量呈显著线性关系 ($R^2>0.92$), 与产沙率、泥沙浓度及累积产沙量呈显著指数函数关系 ($R^2>0.94$)。[结论] 质地差异土壤的有效混合深度存在显著差异, 并且有效混合深度与侵蚀产流产沙和溶质流失指标间存在显著的线性或指数函数关系, 可通过侵蚀产流产沙特征对有效混合深度反演, 以提高溶质流失模型预测精度。

关键词: 土壤质地; 有效混合深度; 土壤侵蚀; 土壤溶质流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0065-09

Effects of Soil Texture on Effective Mixing Depth and Solute Loss

WANG Jie, ZHENG Hao, LI Zihan, REN Shaocong, WANG Shuoguo, LIAN Qijie, WEI Yujie, CAI Chongfa

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The effective mixing depth is an essential parameter for quantifying and predicting solute loss. It is of great significance to quantify the effective mixing depth of texture-differentiated soils and investigate the response of effective mixing depth to soil erosion, and solute loss in the modeling of agricultural non-point source pollution. [Methods] The topsoils of five texturally distinct dry croplands in the Danjiangkou Reservoir Region were selected as the research object. The bromine ion tracer method was employed to quantify the effective mixing depth and its dynamic changes in texturally distinct soils. Simulated rainfall tests were conducted according to different bromine application depths [0 (soil surface), 0.5, 1, 2 and 5 cm] to determine the process of soil erosion and solute loss and analyze their responses to the effective mixing depth. [Results] Under the experimental conditions established in this study, the effective mixing depths during rainfall exhibited a range of 0.32–0.72, 0.11–0.57, 0.44–2.41, 0.11–1.04, and 0.13–0.28 cm. The effective mixing depths were found to be significantly affected by the clay content and soil texture ($F=39.27, p<0.001$). However, the effective mixing depths of different textured soils were significantly affected due to the differences in infiltration and flow production processes of different soil textures. Consequently, a significant linear relationship was not observed between the

收稿日期: 2024-10-07

修回日期: 2024-11-11

录用日期: 2024-11-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42077067); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202410504020)

第一作者: 王杰 (1992—), 男, 博士研究生, 主要从事水土保持及面源污染研究。E-mail: wj6377@163.com

通信作者: 魏玉杰 (1989—), 女, 副教授, 主要从事水土保持与崩岗侵蚀研究。E-mail: wyj@mail.hzau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

two. Furthermore, the effective mixing depth demonstrated a dynamic variation during the rainfall process, and exhibited a pronounced power function relationship with rainfall duration ($R^2 > 0.80$). Furthermore, a notable distinction was observed in the soil erosion and sand production processes across varying effective mixing depths ($F > 12.068$, $p < 0.001$). Regression analysis demonstrated that the mean effective mixing depth exhibited a significant linear correlation with cumulative soil runoff and cumulative bromine loss ($R^2 > 0.92$), as well as a significant exponential function relationship with sand production rate, sediment concentration, and cumulative sand production ($R^2 > 0.94$). [Conclusion] The effective mixing depths of various textured soils exhibit notable disparities. A substantial linear or exponential correlation exists between the effective mixing depth, soil erosion, and solute loss indices. This correlation can be inverted through the runoff generation and sediment yield characteristics of the effective mixing depth, thereby enhancing the precision of the solute loss model.

Keywords: soil texture; effective mixing depth; soil erosion; soil solute loss

Received: 2024-10-07

Revised: 2024-11-11

Accepted: 2024-11-18

Online(www.cnki.net): 2025-01-27

土壤侵蚀是导致土壤溶质流失,造成农业非点源污染的主要原因之一^[1]。研究^[2]发现,在降雨-径流过程中,土壤表层一定深度中的溶质迁移并参与地表水流失,该深度被称为有效混合层(effective mixing layer)。该层的深度(effective mixing depth)决定土壤中参与径流流失的养分所在范围和参与程度,是解释土壤溶质流失的一个重要参数^[3]。因此,混合层深度的研究被广泛应用在溶质迁移模型中。

混合层通常作为化学物质迁移到地表径流的媒介而存在。目前,大多数模型将混合层深度看作 1 个常数。通过试验^[4]发现,土壤溶质从表层土壤转移到径流是一系列物理和化学过程相互作用的结果。这些过程包括孔隙中水的流动条件、液相和固相之间的分子扩散相互作用(吸附、降雨、溶解、离子交换等),以及流体中各种复杂的化学和物理过程引起的流体物质(如密度、黏度等)和浓度的变化^[5-6]。同时,径流和泥沙颗粒作为溶质流失的主要载体,是溶质流失的主要驱动力^[7],溶质流失过程与侵蚀过程密切相关^[8],影响土壤侵蚀的因素,如降雨强度和土壤基本性质,也对溶质流失产生重大影响^[9]。有研究^[10]表明,降雨强度作为侵蚀能量的来源,对溶质流失的特征有深远影响,而土壤质地、土壤过程中起着关键作用^[11],影响土壤的保水性、渗透性、孔隙结构和养分动态^[12-13],还对溶质吸附和解吸过程产生明显影响^[14]。考虑到土壤质地、土壤侵蚀过程及溶质与土壤相互作用过程中的重要作用,探究质地差异土壤有效混合深度的变化及其对溶质流失的影响对于明确土壤溶质流失机制有着显著意义。

丹江口水库是我国南水北调中线工程的重要水源地^[15],是用水安全的重要保障^[16]。目前,库区水质总体呈现良好态势,但随着社会经济的进步与发展,

为提高生产,化学药品的大量投入也导致库区农业面源污染问题^[15]。同时,周边地区地形复杂,低山丘陵众多,坡度大,水土流失问题较为严峻,加剧库区面源污染的发展^[17]。因此,本文选取丹江口水库为研究区,探究质地差异土壤的混合深度变化,为提高坡面径流养分流失预测精度、科学防治农业非点源污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取丹江口水库水源区内的湖北省十堰市丹江口市、湖北省十堰市郧阳区、河南省南阳市淅川县为采样区域(图 1),所有取样点都属于水源地安全保障区。水源区除汉中盆地外,地貌多为山地、丘陵和河谷。研究区属于北亚热带季风区的温暖半湿润气候,水热资源丰富,年平均气温 12.4~15.9℃,降水量 700~1 000 mm。

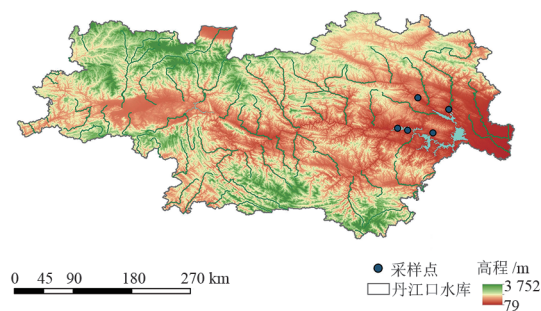


图 1 采样区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling area

选取流域内玉米地(丹江口水库区主要旱地作物类型)下不同质地土壤,实地调查表明,采样点种植作物均为春玉米,播种期为 4 月底至 5 月初,收获期为 8 月底。所有耕地多年种植玉米。在整个播种期间,使用约 640 kg/hm² 氮磷钾复合肥(N-P₂O₅-K₂O

质量分数比 25%-11%-40%)作为种肥,然后用与上述种肥相同的类型和施用量进行追肥。取表层 0~10 cm 土样,部分于塑料盒内密封保存,供土壤性质测定;其余土样采用编织袋及特制木架打包后邮寄回实验室,供模拟降雨试验使用。供试土样自然风干后,分别过 5、2、0.145 mm 筛用于模拟降雨试验及土壤基本理化性质测定。

1.2 土壤基本理化性质测定

土壤理化性质采用常规方法测定^[18]。土壤 pH

采用电极法测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤碳酸钙采用气量法测定;土壤游离氧化铁铝采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(DCB)提取,等离子发射光谱仪(ICP)(VISTA-MPX, Varian, America)测定;土壤颗粒组成采用吸管法测定,根据美国农业部制(USDA)划分;土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮、钼锑抗比色法测定;土壤有效磷采用 NaHCO₃ 浸提、钼锑抗比色法测定。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 试验土样基本理化性质

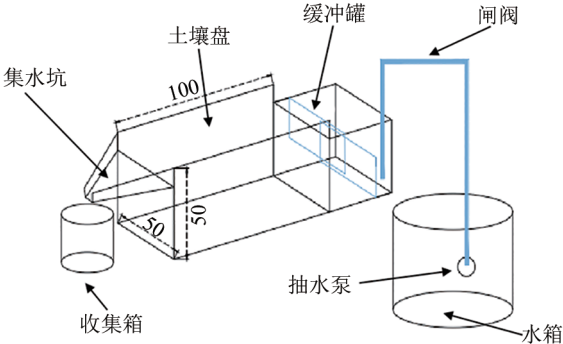
Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soils

土样 编号	纬度 (N)	经度 (E)	作物 类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	土壤 质地	pH	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	碳酸钙/ (g·kg ⁻¹)	游离 氧化铁/ (g·kg ⁻¹)	游离 氧化铝/ (g·kg ⁻¹)
S1	33.24	111.01	玉米	14.21±0.39	15.82±2.91	69.97±0.89	砂质壤土	5.06±0.42	24.76±0.09	3.20±0.06	8.55±0.16	2.69±0.09
S2	32.76	111.22	玉米	25.23±1.34	37.14±0.58	37.63±0.96	壤土	8.47±0.33	4.82±0.27	0.54±0.04	14.81±0.13	5.16±0.11
S3	32.80	110.87	玉米	36.32±0.74	45.96±0.23	17.72±0.57	黏壤土	7.68±0.28	32.34±0.84	0.78±0.04	23.59±0.16	8.12±0.08
S4	33.08	111.44	玉米/小麦	42.75±0.92	37.60±1.07	19.65±0.71	黏土	8.33±0.12	18.09±1.17	0.40±0.02	13.92±0.08	6.50±0.08
S5	32.82	110.73	玉米	52.67±2.16	41.39±0.44	5.94±1.83	粉质黏土	8.06±0.17	17.4±1.91	0.56±0.07	12.99±0.27	2.68±0.14

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 模拟降雨试验

1.3.1 试验设备 模拟降雨试验于 2022 年 7 月通过华中农业大学资源与环境学院水土保持研究中心降雨大厅下喷式模拟降雨系统(西安清远, QYJY-503T)完成。降雨器(图 2)由边长为 12 cm 的等边三角形分布的小、中、大(直径分别为 0.25、0.50、0.75 cm)3 个规格的喷头组成 1 个喷头组,喷头组在空间上重合叠加,形成雨强均匀的降雨区。降雨器通过控制系统调节实现 15~220 mm/h 的降雨强度范围,降雨高度为 10 m,降雨雨滴通过喷头下喷后达到的终点速度满足天然降雨特性^[19]。在试验前,率定降雨系统,使得降雨强度达到试验设计强度,同时降雨均匀度达到 90%。



注:图中数据单位为 cm。

图 2 试验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the simulated rainfall apparatus

1.3.2 试验设置 以 5 种质地差异土壤为研究对象,控制 Br 施用水平为 500 g/m²,分别将配制好的 KBr

施放在表面(0 cm)及距表面 0.5、1、2、5 cm 处。用定量的去离子水将 KBr 配成溶液,在避风处采用喷壶均匀喷施于供试土壤,喷射成雾状(图 2d),避免对坡地表层土壤冲击形成结皮,防止喷施到试验区外,使溴化钾溶液缓慢地充满整个径流土槽中的供试土壤。设置降雨强度为 60 mm/h,固定土槽坡度为 5°,模拟降雨试验过程中放水冲刷装置处于关闭状态,降雨总时长为 60 min。

试验土壤去除石块、植物残体等杂物后风干,过 5、2 mm 孔筛网备用。填土分为上下两部分(图 2c),土槽下层铺设 35 cm 厚的细沙,沙层上部铺 1 层透水粗棉纱布,以确保下垫面土壤性质的变异性达到最小;土槽上层铺设供试土壤,为控制填土过程土壤体积质量保持一致,采取分层填土,边填边压实,下层填 5 cm 厚过 5 mm 筛的土样,表层填 5 cm 厚过 2 mm 筛的土样,共计 10 cm 深供试土样。填装上层土壤前,抓毛下层土壤表层,防止出现分层现象。通过在不同填土深度喷施 KBr 溶液控制 Br 施放深度,例如,Br 施放深度为距表面 5 cm 时,即在填完 5 cm 厚过 5 mm 筛土样后立即喷施 KBr 溶液,完成后填 5 cm 厚、过 2 mm 筛的土样,其他 Br 施放深度同理。试验前测定土壤体积质量分数并采集表层土样,降雨前控制初始含水率保持在一定范围内,土壤体积质量为 1.35 g/cm³,径流土槽的试验温度维持在 20 ℃。各处理设置 2 个重复,取平均值进行后续分析。

1.4 混合层深度的测算

土壤有效混合深度的测算参考 AHUJA 等^[2]研究方法。使用 Br 示踪法,根据 Br 不同的放置深度流失特征,建立任一时刻径流 Br 浓度与放置

深度关系曲线(图 3、表 2),基于质量守恒原理,曲线与坐标轴面积除以 Br 放置在表面(0 cm)条件下的 Br 浓度,即可获得任一时刻的有效混合深度。

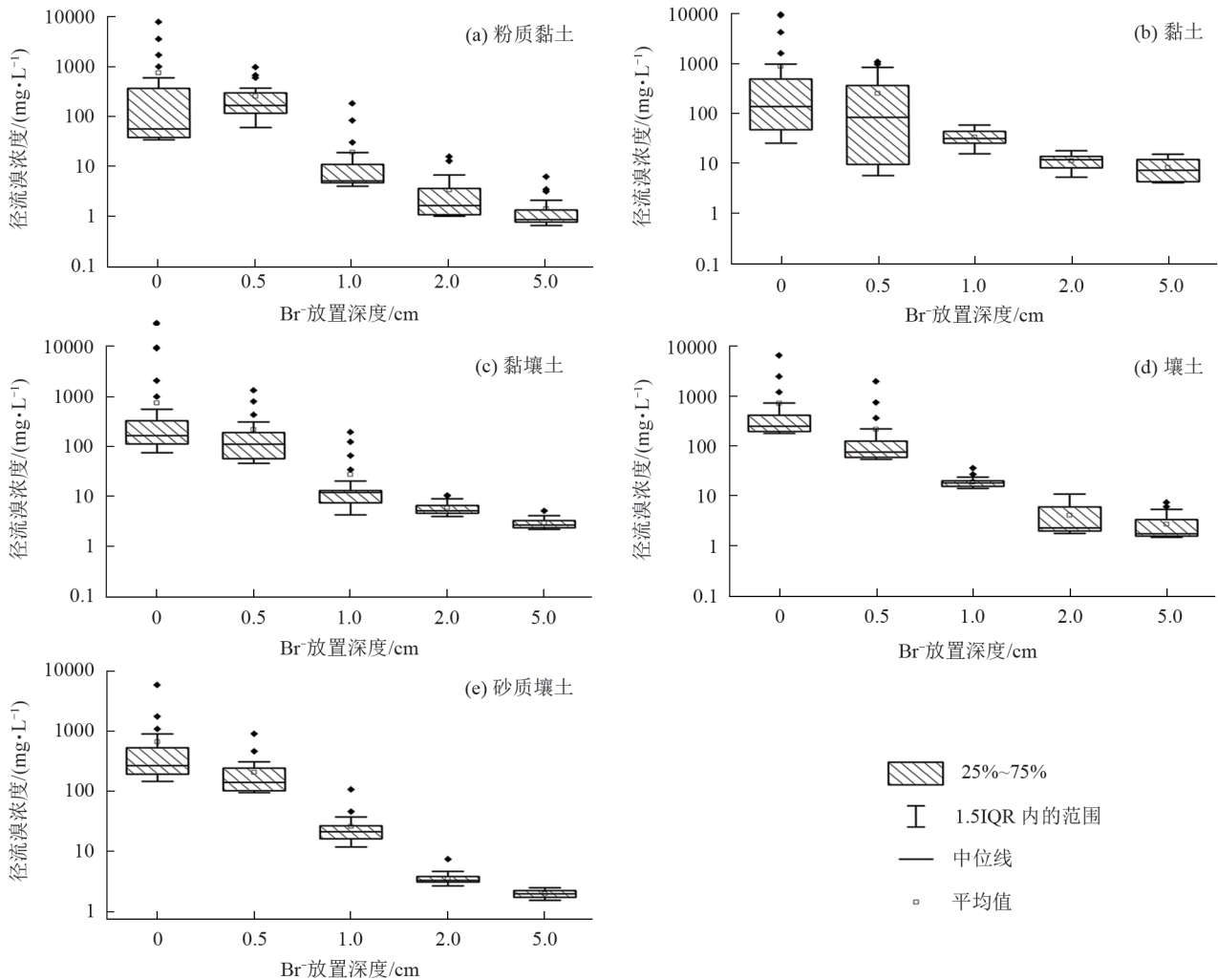


图 3 溴离子不同放置深度下径流溴浓度

Fig. 3 Bromine concentration in runoff at different placement depths for bromide ions

表 2 有效混合深度与降雨历时拟合

Table 2 Relationship between effective mixing depth and rainfall duration

土样编号	多项式函数		幂函数	
	方程式	R^2	方程式	R^2
S1	$y=-0.001x^2-0.003x+0.734$	0.693	$y=0.771x^{-0.043}$	0.812
S2	$y=-0.001x^2+0.058x+0.404$	0.871	$y=0.106x^{0.817}$	0.873
S3	$y=-0.001x^2+0.032x-0.059$	0.845	$y=0.044x^{0.601}$	0.805
S4	$y=-0.001x^2+0.047x+0.043$	0.906	$y=0.058x^{0.938}$	0.916
S5	$y=-0.001x^2+0.006x+0.118$	0.878	$y=0.108x^{0.257}$	0.897

注:y为混合层深度,cm;x为产流后时间,min。

1.5 土壤侵蚀过程及溶质流失的测定

1.5.1 土壤侵蚀产流产沙测定 地表产流后记录初始产流时间。产流后前 12 min 每 2 min 收集 1 个径流样(接样时长为 2 min),12 min 后每 3 min 采集 1 个径流样(接样时长为 1 min),每场试验共收集 22 个径

流泥沙样。降雨停止后,记录坡面继续产流时间,单独采集全部退水样并测定退水样的总体积。称重法记录径流泥沙总质量,烘干法获得泥沙总质量,径流量为径流泥沙总质量与烘干泥沙量差值。烘干前,从径流泥沙样中取出部分澄清好的水样,装入 50 mL

塑料瓶中用于径流 Br 浓度测定。

1.5.2 径流 Br 质量分数测定 澄清水样离心后采用离子计 (PXSJ-227L, INESA) 搭配 Br 选择电极 (REX7103, INESA) 测定径流 Br 浓度。溴离子电极是由特殊电活性物质 (AgBr/Ag₂S) 组成的固态多晶膜电极, 对溶液中的溴离子具有选择性响应。将溴离子电极与双盐桥参比电极同时插入溶液中组成工作电池, 产生的平衡电位 (E) 与溶液中溴离子浓度的关系符合能斯特方程。通过测量平衡电位 (E), 以 E 对 $-\lg C(\text{Br})$ 绘制标准曲线, 即可求出待测溶液中溴离子的浓度。

1.6 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行前处理, 采用 SPSS 16.0 软件对数据进行方差分析和回归分析等, 采用 Cacono 5 软件进行冗余分析 (RDA), 采用 Originpro 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 混合层深度的变化

图 4a 为质地差异土壤降雨侵蚀产流后有效混合

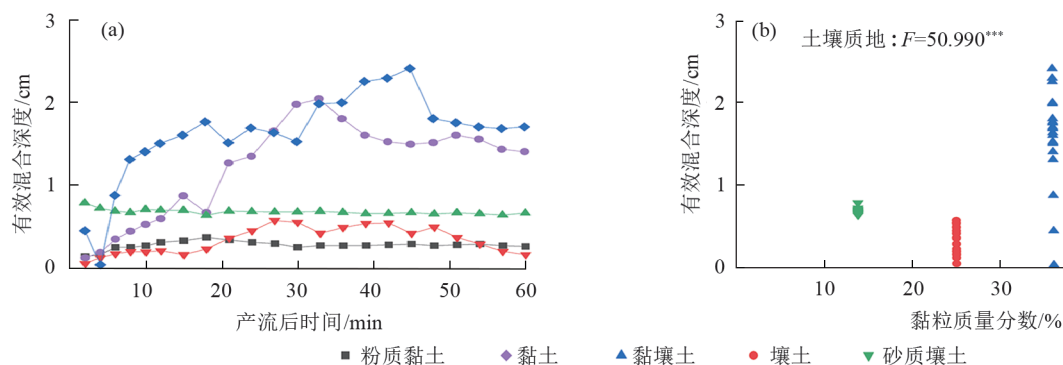


图4 不同质地土壤有效混合深度随降雨历时的变化

Fig. 4 Variation of effective mixing depth with rainfall duration in different textured soils

试验发现, 在降雨过程中, 混合层深度并非 1 个定值, 而是受降雨历时影响不断波动变化的值, 与 YANG 等^[22]的研究结论一致。本试验条件下的有效混合深度与大部分面源污染模型 (non-point source pollution, NPS) 中常用的 1 cm 取值存在较大差异^[23], 表明现有预测模型存在一定程度的预测误差。对 5 种质地差异土壤通过示踪法得到的随降雨历时变化的有效混合深度进行回归分析 (表 2), 幂函数能很好地反映有效混合深度随产流后时间变化过程 ($R^2 > 0.80$)。

2.2 土壤侵蚀产流产沙过程

5 种质地土壤的产流率随着黏粒质量分数分别降低 319.8~553.9、304.7~510.4、241.5~457.6、202.4~488.3、225.4~422.5 mL/min (图 5a)。产流率与土壤质地之间表现出极显著差异 ($F=18.858, p <$

深度的动态变化。随着黏粒质量分数的增加, 降雨过程中有效混合深度分别为 0.32~0.72、0.11~0.57、0.44~2.41、0.11~1.04、0.13~0.28 cm。除砂质壤土外, 其他 4 个质地土壤的有效混合深度随降雨历时的变化基本一致, 均表现为降雨前期增加至峰值后略有下降, 后期处于波动稳定状态, 而砂质壤土则随降雨历时差异不显著。是因为降雨前期随着雨滴对土壤表面的扰动、水分的入渗及地表径流的产生, 大量溶质通过扩散及伯努利效应等作用从土壤浅层向表层移动, 有效混合深度快速增加; 而在短历时降雨的后期, 由于土壤溶质可通过扩散作用由更深层向上运动, 有效混合深度处于波动稳定的状态^[10]。有效混合深度随质地表现出显著差异 ($F=50.990, p < 0.001$) (图 4b), 但并未与黏粒质量分数表现出明显线性关系。在质地较黏重 ($>30\%$) 的土壤, 有效混合深度随着黏粒质量分数的增加而降低, 但质地较轻土壤的有效混合深度也较小, 与其土壤孔隙有关, 本文中设置体积质量为 1.35 g/cm^3 , 因其质地较轻的土壤有更发达的孔隙, 为优先流的产生提供条件^[20-21], 更多的溶质随着入渗土壤深层迁移。

0.001), 整体上, 产流率随着土壤黏粒质量分数的增加而增加。随着降雨历时的增加, 产流率变化趋势基本一致, 具体表现为降雨初期 (0~18 min) 处于快速增长阶段, 18~60 min 阶段缓慢增长, 最终趋于稳定。产沙率随着黏粒质量分数的降低分别为 2.1~3.4、1.5~2.9、1.64~6.65、0.73~3.43、3.6~19.9 g/min。砂质壤土的产沙速率明显大于其他土壤, 其次为黏壤土 ($F=157.037, p < 0.001$), 而其他土壤的产沙率差异不显著。与产流相似, 5 种质地土壤的产沙速率也呈前期快速增加后趋于波动稳定趋势。累积泥沙量与降雨历时时间呈良好的线性关系, 且不同质地土壤的累积产沙量也呈显著差异 ($F=30.977, p < 0.001$)。整体而言, 除累积径流量外, 土壤质地显著影响土壤侵蚀产流、产沙过程 ($F > 18, p < 0.001$)。径流

冲刷力是泥沙分离和输移的主要作用力,而径流也是泥沙输移的主要载体,整体来看,产沙率和产流率表

现出高度的一致性,即径流快速增加阶段也是泥沙快速增加阶段,产流率稳定后,产沙率也基本趋于稳定。

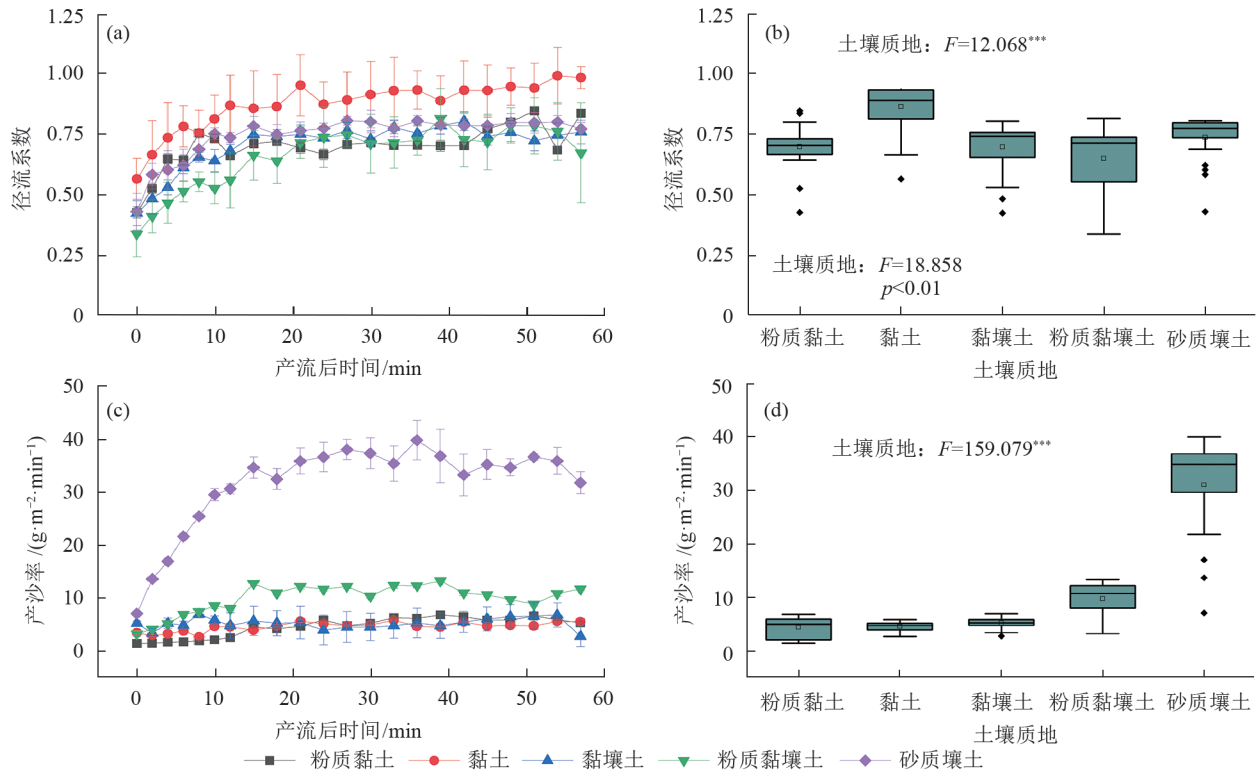


图 5 不同质地土壤侵蚀产流产沙特征

Fig. 5 Runoff coefficient and sediment yield of different texture soils

不同质地土壤的产流产沙过程存在显著差异(图 5)。径流系数的差异(图 6a、图 6b)可能受到土壤有效混合深度和表层土壤渗透的综合影响。最初,土壤的高渗透能力导致砂质壤土和粉质黏壤土初期径流系数显著低于其他土壤(图 5)。一方面,因为有效混合深度越大,降雨和径流对土壤的扰动深度和范围越大,从而导致土壤饱和或渗流速率加快;另一方面,有效混合深度越大,团聚体的破坏程度越大,加速土壤结皮的形成,阻碍土壤入渗并加速径流的形成^[24-25]。产沙的差异主要受团聚体组成及产流特征的影响。砂质壤土土壤颗粒松散,颗粒间的胶结力较弱,在土壤中的分布较分散,通气透水性好^[26],因而砂质壤土的产沙速率在降雨初期处于波动幅度较大的增长阶段,而随着土壤黏粒质量分数的增加,土壤的结构相对更加稳定,不容易随径流流失。因此,黏壤土、粉质黏壤土、黏土和粉质黏土的产沙速率始终低于砂质壤土。随着后期产沙量增长缓慢,因为径流作用使土壤表层形成保护层,产沙量减小^[27]。随着产沙量逐渐增大,最终达到甚至超过径流挟带泥沙最大量,未被带走的泥沙颗粒开始沉积。因此,产流后期产沙速率出现小范围波动并趋于稳定,与张亚丽^[28]对垆土、黄绵土及绵砂土 3 种质地差

异土壤水土流失过程的研究结果一致。

2.3 不同深度 Br 流失过程

5 种质地土壤径流溴离子浓度随产流后时间变化见图 6。径流溴浓度与土壤质地间并未表现出显著差异($F=0.12$ 、 $p>0.05$)。是由于溴作为典型的非吸附性溶质,不与土壤颗粒或吸附性物质作用,通常溶解在土壤溶液中并随径流以坡面或入渗方式流失^[29]。土壤质地对有效混合深度的影响因素可能与入渗能力和养分浓度有关,土壤入渗能力的增强减弱表层土壤物质参与交换的强度,影响有效混合深度;养分浓度的影响同样体现在对入渗能力的改变上,养分施加量越大,浓度越高,则混合层深度减小,由此影响有效混合深度^[30]。

径流溴浓度与溴放置深度间表现出显著差异($F=17.613$ 、 $p<0.001$)。随着溴放置深度的增加,径流溴浓度的变化过程表现出不同的模式:1)在浅层(0、0.5、1 cm)土壤中施用 Br 时,径流 Br 浓度在初期迅速降低,然后接近准稳定状态(图 6a、图 6b);2)在深层(2、5 cm)施用 Br 时,径流 Br 浓度在降雨前期表现为波动降低(降低速率显著小于浅层时)后处于准稳定状态(图 6c、图 6d、图 6e)。因为当 Br 施用深度较浅时,大部分的 Br 溶解在径流中,

并在初始阶段随径流流失,与MCGRATH等^[31]的研究结果一致。扩散是溶质移动的主要机制^[5-6]。随着有效混合深度的增加,扩散效应变得更加明显^[32],导致累积溶质流失量与有效混合深度呈显著线性相关(图7)。非饱和土壤的径流生成延迟导致大量溶质在地表径流发生之前淋溶流失到更深的土壤

中^[3],从而导致地表径流溶质损失的降低。并且径流层的产生可以减少土壤表面直接暴露于雨滴的打击作用之下^[33],减少雨滴对土壤表面的扰动,从而对土壤溶质流失起到一定的保护作用。当Br施用深度较深时,因对流作用及伯努利效应的影响,Br从土壤深层向表层迁移^[20],因此,径流Br浓度处于波动状态。

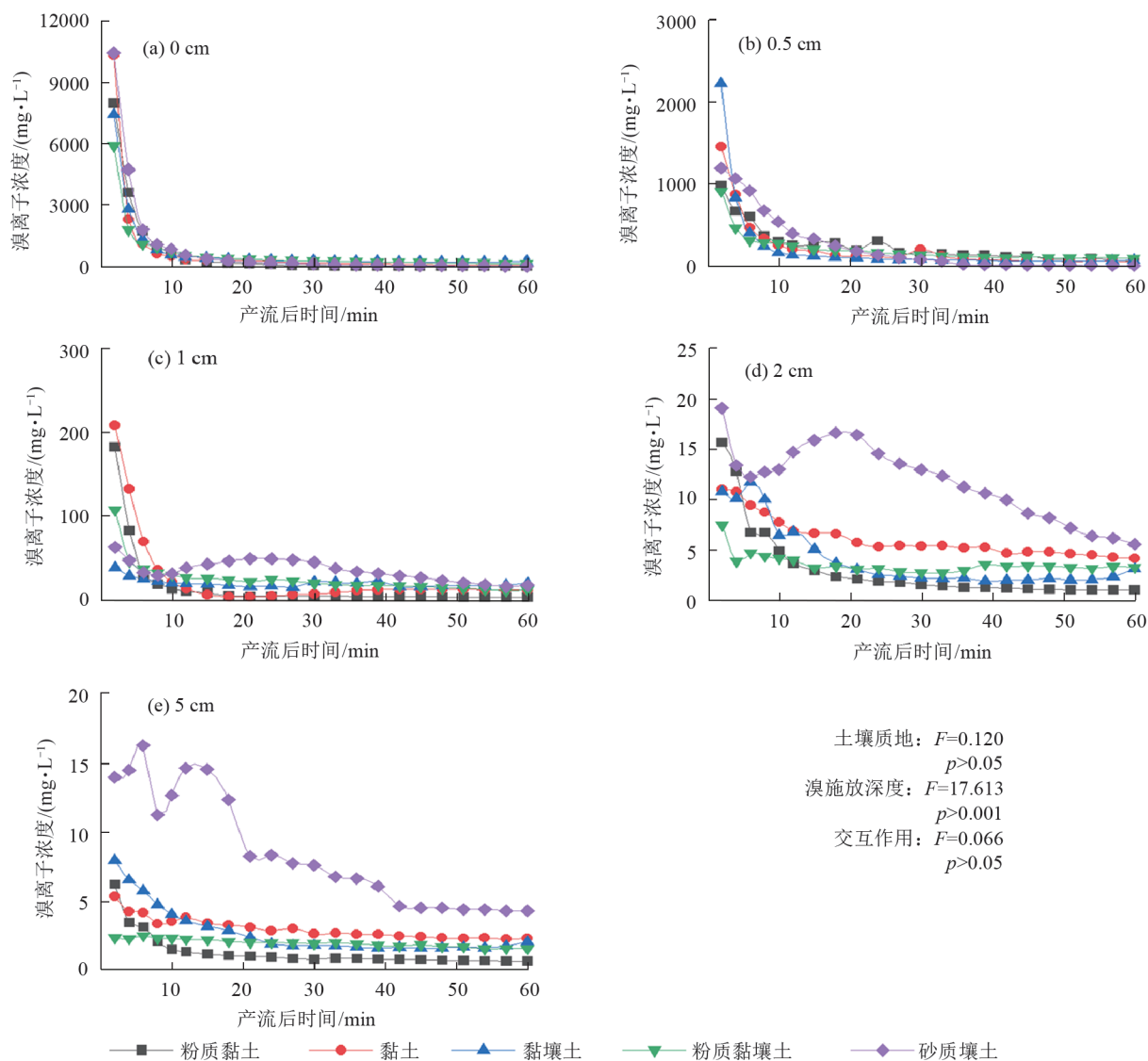


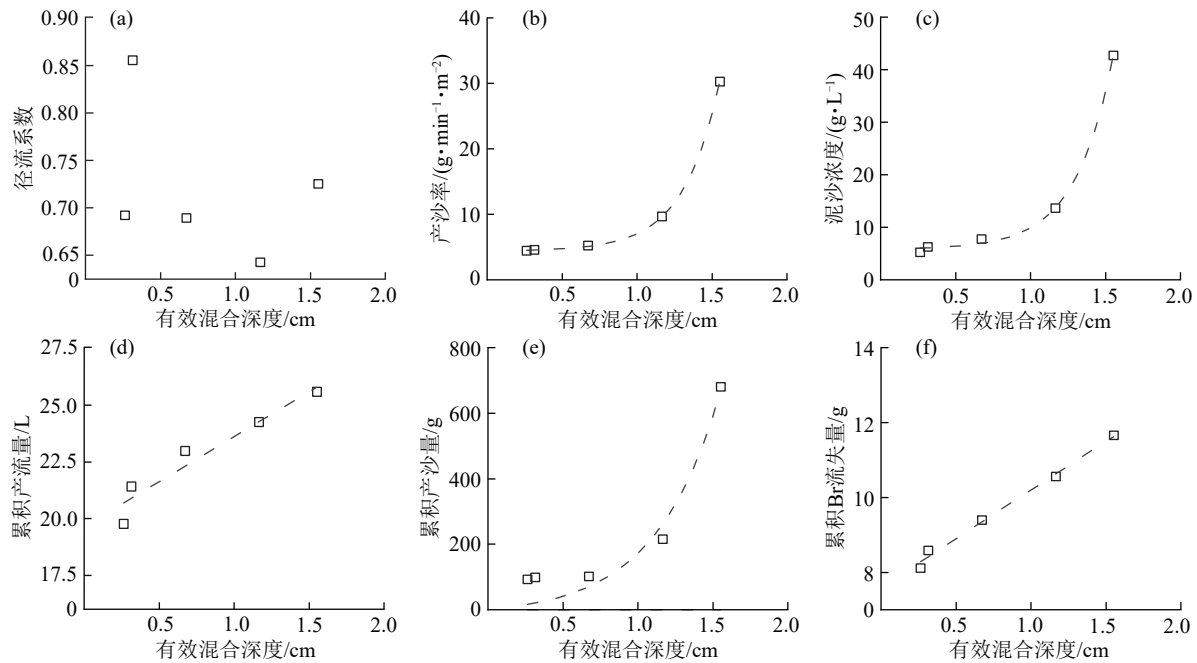
图6 不同放置深度下径流溴浓度随降雨历时变化

Fig. 6 Dynamics of bromine concentration in runoff with rainfall duration at different placement depths of bromine

2.4 土壤侵蚀及溶质流失对有效混合深度的响应

从图7可以看出,平均有效混合深度与土壤累计径流量和累计溴流失量呈显著线性关系($R^2 > 0.92$),与产沙率、泥沙浓度及累积产沙量呈显著指数函数关系($R^2 > 0.94$)。有效混合深度与径流系数间无显著相关性,而与累计径流量呈显著线性关系($R^2 = 0.92$),主要是受土壤孔隙及入渗过程的影响^[10,24]。对侵蚀产沙而言,混合层深度越大,土壤受雨滴击溅和径流冲刷的作用越强,降雨对土

壤表层的扰动强度越强,扰动深度也越深^[3]。随着有效混合深度的增加,坡面侵蚀程度加剧,逐渐发展为细沟侵蚀。与片状侵蚀相比,细沟侵蚀可显著增加泥沙产生^[34]。因此,泥沙量随混合层深度的增加表现为显著的指数函数关系。由于有效混合深度对土壤侵蚀和溶质流失特征的显著影响,可以通过对土壤流失指标的测定来估算有效混合深度,而不是采用固定值1 cm^[23],有助于提高土壤溶质流失模型的预测精度。



注:径流系数、产沙率、泥沙浓度和有效混合深度均为Br喷施在土壤表面(0 cm)条件下整个降雨过程的平均值。

图 7 不同质地土壤侵蚀特征及溶质流失与平均有效混合深度回归分析

Fig. 7 Regression analysis of erosion characteristics and solute loss with mean effective mixing depth in different textured soils

3 结论

1)有效混合深度在降雨过程中处于动态变化,并受土壤质地的显著影响,有效混合深度与降雨历时呈显著幂函数关系。

2)随着有效混合深度的增加,土壤侵蚀及溶质流失指标也逐渐增加,采用线性函数和指数函数可以很好地拟合。

3)由于有效混合深度对土壤侵蚀及溶质流失有显著影响,可以通过土壤侵蚀指标来估算有效混合深度,以提升溶质流失预测模型的准确性。

参考文献:

- [1] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J].农业机械学报,2016,47(6):67-82.
- WANG Q J, YANG T, LIU Y L, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 67-82.
- [2] AHUJA L R, SHARPLEY A N, YAMAMOTO M, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 969-974.
- [3] TONG J X, YE M. A new soil mixing layer model for simulating conservative solute loss from initially saturated soil to surface runoff [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: e125514.
- [4] SUN X M, ZHAO L, HUANG M L, et al. In-situ ther-

mal conductive heating (TCH) for soil remediation: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: e119602.

- [5] CAMPEAU A, VACHON D, BISHOP K, et al. Autumn destabilization of deep porewater CO_2 store in a northern peatland driven by turbulent diffusion [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): e6857.
- [6] MCCARTER C P R, REZANEZHAD F, QUINTON W L, et al. Pore-scale controls on hydrological and geochemical processes in peat: Implications on interacting processes [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 207: e103227.
- [7] CHEN L, ŠIMŮNEK J, BRADFORD S A, et al. Coupling water, solute, and sediment transport into a new computationally efficient hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: e130495.
- [8] AO C, YANG P L, ZENG W Z, et al. Development of an ammonia nitrogen transport model from surface soil to runoff via raindrop splashing [J]. Catena, 2020, 189: e104473.
- [9] AO C, YANG P L, ZENG W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing [J]. Geoderma, 2019, 353: 372-381.
- [10] YANG T, WANG Q J, LIU Y L, et al. A comparison of mathematical models for chemical transfer from soil to surface runoff with the impact of rain [J]. Catena, 2016, 137: 191-202.
- [11] 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.
- [12] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review [J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122-137.
- [13] WANG C, LI S Y, HE X J, et al. Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction [J]. *Geoderma*, 2021, 404: e115293.
- [14] WANG J, WEI Y J, YANG B G, et al. Soil texture as a regulatory pathway for the enrichment of aggregate-associated phosphorus [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(5): 1644-1655.
- [15] 尹伟, 王超, 王立, 等. 丹江口水库总磷时空分布特征及其影响因素 [J]. *人民长江*, 2023, 54(1): 1-7.
- YIN W, WANG C, WANG L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of total phosphorus in Danjiangkou Reservoir [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(1): 1-7.
- [16] 杜映妮, 周怡雯, 李朝霞, 等. 丹江口库区不同降雨类型下典型植被措施的水土保持效应 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 51-57.
- DU Y N, ZHOU Y W, LI Z X, et al. Effects of typical vegetation measures on soil and water conservation under different rainfall regimes in Danjiangkou Reservoir area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 51-57.
- [17] ZHU M Y. Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment: A case study in the Danjiangkou Reservoir region, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7899-7908.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] NI S M, WEN H, WILSON G V, et al. A simulated study of surface morphological evolution on coarse-textured soils under intermittent rainfall events [J]. *Catena*, 2022, 208: e105767.
- [20] 田坤. 土壤溶质迁移与混合层深度模拟研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- TIAN K. Simulation study on soil solute migration and mixed layer depth [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010.
- [21] GHAFOR A, KOESTEL J, LARSBO M, et al. Soil properties and susceptibility to preferential solute transport in tilled topsoil at the catchment scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 190-199.
- [22] YANG T, WANG Q J, WU L S, et al. A mathematical model for the transfer of soil solutes to runoff under water scouring [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 332-341.
- [23] BINGNER R L, THEURER F D, YUAN Y. AnnAGNPS technical processes documentation (Version 5.5) 2018. [EB/OL]. [2024-09-22]. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech_Doc.PDF.
- [24] 张龙齐, 贾国栋, 吕相融, 等. 控制坡度条件下黄土高原不同质地坡面土壤侵蚀研究 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 11-24.
- ZHANG L Q, JIA G D, LYU X R, et al. Research on slope soil erosion of different textures on the Loess Plateau under slope control [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(6): 11-24.
- [25] WU X L, WEI Y J, WANG J G, 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.
- [26] 杨婷. 黄土坡面土壤养分随地表径流流失及动力模型 [D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- YANG T. Loss of soil nutrients with surface runoff on loess slope and its dynamic model [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [27] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 等. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 391-397.
- XIE S Q, GAO L Q, ZHAO Y G, et al. Responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity under simulated rainfall [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 391-397.
- [28] 张亚丽. 黄土坡面土壤氮磷等化学物质径流迁移与混合层深度研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- ZHANG Y L. Study on runoff migration and mixed layer depth of soil nitrogen and phosphorus on loess slope [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [29] ZHANG Y L, ZHANG X C, SHI S J, et al. Determining the depth of mixing layer in which soil solute releasing from soil to surface runoff on the unsaturated loess slope under artificial rainfall condition [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 153-165.
- [30] 邵凡凡. 蚯蚓粪对黄土坡地水土养分流失调控影响及解析模型建立 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- SHAO F F. Influence of earthworm manure on soil and water nutrient loss regulation in loess slope and establishment of analytical model [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

(下转第81页)

- continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291-296.
- [14] 刘军, 景峰, 李同花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤腐殖质组分含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 293-302.
- LIU J, JING F, LI T H, et al. Effects of returning stalks into field on soil humus composition of continuous cropping cotton field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 293-302.
- [15] SONG X Y, LIU S T, LIU Q H, et al. Carbon sequestration in soil humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 562-569.
- [16] 郭金金, 方怒放, 刘前进, 等. 小麦秸秆粉碎还田配施氮肥与多酚对土壤侵蚀阻力的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 122-128.
- GUO J J, FANG N F, LIU Q J, et al. Effects of incorporated wheat straw returning combined application with nitrogen and polyphenols on soil erosion resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 122-128.
- [17] CUI H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Long-term manure fertilization increases rill erosion resistance by improving soil aggregation and polyvalent cations [J]. Catena, 2023, 223: e106909.
- [18] XU X L, WEI W L, ZHANG H Y, et al. A 44-year balanced fertilizer application affected rill erosion resistance by changing humus, aggregates, and polyvalent cation [J]. Catena, 2021, 244: e106272.
- [19] 史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1-10.
- SHI Z H, SONG C Q. Water erosion processes: A historical review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 1-10.
- [20] GHERNAOUT D, GHERNAOUT B. Sweep flocculation as a second form of charge neutralization: A review [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 44(1/2/3): 15-28.
- [21] GALICIA A E, ESCALONA Y, OOSTENBRINK C, et al. Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds [J]. Geoderma, 2021, 401: e115237.
- [22] GENG R, ZHANG G H, MA Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in eastern China [J]. Catena, 2017, 152: 18-28.
- [23] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- LU J W, LI Z B. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [24] KOU B, HUI K, MIAO F, et al. Differential responses of the properties of soil humic acid and fulvic acid to nitrogen addition in the North China Plain [J]. Environmental Research, 2022, 214: e113980.
- [25] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-164.
- [26] 王俊, 李强, 任禾, 等. 吉林省西部不同耕作模式下秸秆还田土壤团聚体特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 603-612.
- WANG J, LI Q, REN H, et al. Soil aggregate characteristics under different tillage and in situ straw returning methods in western Jilin, China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4): 603-612.
- [27] SU Z, XIONG D, ZHANG J, et al. Variation in the vertical zonality of erodibility and critical shear stress of rill erosion in China's Hengduan Mountains [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(1): 88-97.
- [28] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75-109.
- [29] 李敏, 张含玉, 刘前进. 含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 35-40.
- LI M, ZHANG H Y, LIU Q J. Effects of soil moisture content, slope gradient and flow discharge on soil detachment capacity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 35-40.
- [30] ZHANG Y, ZHONG X, LIN J, et al. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China [J]. Geomorphology, 2020, 351: e106956.
- [31] MCGRATH G S, HINZ C, SIVAPALAN M. Modeling the effect of rainfall intermittency on the variability of solute persistence at the soil surface [J]. Water Resources Research, 2008, 44(9): e2007wr006652.
- [32] TIAN K, HUANG C H, WANG G Q, et al. Quantification of chemical transport processes from the soil to surface runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(1): 83-93.
- [33] GAO B, TODD WALTER M, STEENHUIS T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments [J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/2/3/4): 291-304.
- [34] QIAN X H, ZHAO L S, FANG Q, et al. Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: e105868.

(上接第73页)