

# 土壤容重对溶质迁移过程的影响

卢修元<sup>1,2</sup>, 魏新平<sup>2</sup>, 王君勤<sup>3</sup>

(1. 四川农业大学 信息与工程技术学院, 四川 雅安 625014;  
2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 土壤在径流作用下发生流失、土壤溶质迁移等现象, 是一个受径流、土壤性质、下垫面特性、土地利用方式等多种因素综合影响的复杂过程。利用斜坡土槽, 采用一定的坡度和实验流量, 对不同容重的土样进行了室内放水实验, 研究了在土壤饱和条件下, 土壤容重对土壤溶质迁移过程的影响。实验结果表明: (1) 随径流作用时间的增加, 单位时间内土壤溶质迁移量逐渐减少, 其关系可用幂函数来描述; (2) 土壤溶质发生迁移是受地表径流和壤中流共同作用的结果; (3) 土壤容重对土壤溶质迁移过程影响总体表现为土壤容重越大, 随径流迁移的土壤溶质量越少; (4) 土壤容重增加相同幅度, 但同时刻随径流迁移的土壤溶质递减量逐渐减少。

**关键词:** 土壤容重; 土壤溶质; 径流; 迁移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0026-04

中图分类号: S157.1

## Effect of Soil Bulk Density on Process of Soil Solute Transport

LU Xiu-yuan<sup>1,2</sup>, WEI Xin-ping<sup>2</sup>, WANG Jun-qin<sup>3</sup>

(1. College of Information and Engineering Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. Water Conservancy Science Research Institute of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** Loss of surface soil and soil solute transport induced by soil water erosion are parts of the complex process that is controlled by runoff, soil properties, land surface characteristics, land use and many other factors. In this study, a soil trench with a certain degree of slope and a certain rate of surface flow was setup in a laboratory to study the effects of different soil bulk densities on solute migration. The results showed that during the soil erosion process, the rate of solute transport gradually reduced with time, which can be well described by a power function. The migration of soil solute was affected by both runoff and subsurface flow at the same time. Less soil solute was migrated from the soil with greater soil density as described in a power function.

**Keywords:** soil bulk density; soil solute; runoff; transport

土壤溶质随径流迁移的外在表现土壤养分流失、土壤肥力衰减、水土流失及水环境问题, 其内在变化过程十分复杂, 是土壤质地、土壤结构、溶质类型、水分含量、下垫面特性、地形、土地利用方式等众多因素共同作用的结果<sup>[1]</sup>, 但对溶质流失影响最大的因素是流失的主体(溶质本身)、溶质的存储地(土壤)和为溶质流失提供驱动力的水这 3 大要素<sup>[2-3]</sup>。研究者们对溶质随径流迁移的过程进行了深入的研究, 提出了该过程的水膜理论<sup>[4-7]</sup>、混合层理论<sup>[8-10]</sup>, 并将对混合层的研究成果应用到相关模型中, 比如 CREAMS 模型<sup>[8]</sup>。王辉<sup>[11]</sup>、张亚丽<sup>[12]</sup>、王全九<sup>[13]</sup>等结合降雨、坡

度等因素, 对径流引起黄土坡面的矿物质、氮、磷等营养物质的流失进行了深入研究。众多研究者对土壤溶质随径流流失过程的研究结果表明, 该过程表现为土壤溶质的初始径流浓度较大, 随后浓度逐渐降低。但对这浓度递减过程, 研究者提出了两大类不同的模型来描述该递减规律: 一类是指数函数形式的模型, 另一类是幂函数形式的模型。Ahuja<sup>[14]</sup>针对饱和土壤研究了土壤溶质在降雨情况下流失规律, 提出了有效混合深度的概念, 并建立了以指数函数形式为特征的模拟模型来描述径流溶质的流失规律。Bailey<sup>[15]</sup>也认为该过程适合用指数函数来描述; 王全九

收稿日期: 2011-10-02

修回日期: 2012-05-09

资助项目: 水利部公益性行业科研项目“四川震区灾后重建饮用水安全保障技术研究”(200901069); 四川农业大学双支项目(00570905)

作者简介: 卢修元(1973—), 男(汉族), 重庆市人, 讲师, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: xiuyuan\_lu@163.com

等<sup>[3,16-17]</sup>经过对土壤溶质的流失研究认为在土壤饱和并不考虑水土流失情形下适用利用指数函数来描述土壤受径流作用下溶质的流失过程,但在土壤非饱和、水土流失严重的黄土地区,幂函数更适合描述径流溶质浓度变化过程。这些研究多侧重于土壤溶质的迁移过程,而对下垫面因素对迁移过程的影响考虑较少。

影响土壤溶质迁移过程的下垫面因素包括土壤容重,土壤结构,土壤的初始含水率,坡度,植被,耕作方式等。土壤溶质迁移过程发生于土壤表面及一定厚度的土壤层内。土壤容重是表征下垫面的重要指标之一,其大小直接影响土壤受径流的冲刷破坏程度,也决定土壤溶质的迁移过程及迁移量。本研究利用室内实验,分析土壤溶质在受径流作用下,土壤容重对溶质迁移过程的影响。研究结果可对更全面认识土壤溶质的迁移、土壤养分流失具有积极作用,也对农业生产中不同耕作方式的选择具有一定的借鉴意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本研究在室内进行土槽实验,对土槽装土、饱和并斜放模拟野外斜坡地,采用人工供水来模拟地表径流流过饱和斜坡地,通过不同的土壤容重、地表坡度、径流流量组合,探寻土壤容重对土壤受径流作用发生溶质迁移过程的影响。室内实验采用可调坡度有机玻璃土槽装土模拟野外斜坡地,土槽长 2.0 m,宽 0.1 m,高 0.3 m。在土槽高端设置一个与自来水管连接

的水槽来供水,用直角堰来初步保证设计流量,实验前进行实际流量的校准,用人工直接供水模拟坡面上已经形成的径流,不考虑由人工降雨来提供径流,即只考虑坡面径流的冲刷破坏、径流对溶质的浸提作用下土壤中的溶质流失过程,不考虑径流形成过程中降雨雨滴对坡面、径流水层的击溅、破坏和扰动对土壤溶质流失过程的影响。

### 1.2 实验方法

1.2.1 供试土壤及溶质 将供试土壤风干、碾碎、过 5 mm 标准筛(表 1)。选用 KBr 作为研究溶质,这是由于 Br<sup>-</sup> 在土壤中背景值低而且化学性质稳定,受土壤颗粒吸附作用的影响较小,在水的作用下,其移动性很强。若地表有水体流动,添加了 Br<sup>-</sup> 的土壤在受水的作用下,Br<sup>-</sup> 受浸提、冲刷作用易释放出来进入地表径流而流失。

实验土槽装土总高度确定为 4 cm,装土过程及实验前土槽水平放置,土壤按照 0.02 mol/kg(KBr/干土)的比例施加 KBr;装土时按照每层 1 cm 分层装土,装土前先计算 1 cm 厚土层重量,称取相应量土壤装入土槽并压实到该层高度处以控制土壤容重;按照装土容重计算每层土对应的 KBr 含量,计算出土壤饱和条件下所需水量,将计算所得 KBr 量溶解到对应水量中,施加到土壤层内,待土壤饱和后刮毛表层,再进行上 1 层的装土工作。在进行最上面 1 cm 厚土层装土时,先放入塑料草坪,然后再装土、加 KBr 水溶液,塑料草坪部分埋在表土层内、部分出露在表土层外,近似模拟野外植被及其根系。装土完后用薄膜覆盖,避免蒸发,以保证土槽中土壤饱和状态。

表 1 供试土壤粒径组成

粒径/mm	<0.002	0.002~0.02	0.02~0.075	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0
组成/%	31.0	52.6	1.1	13.0	1.1	0.9	0.3	0

1.2.2 实验处理 坡面的坡度越大,水流的流速越快,对表层土壤冲刷就越严重,从而导致更严重水土流失及相应土壤溶质流失的情形发生。实验水流为土壤溶质的流失提供启动条件和驱动力、载体,坡度是为水流的流动提供能量。因此,坡度和流量,是本实验中影响土壤溶质流失的最关键两个因素。

实验采用可调坡度的土槽来实现不同坡度的坡面、采用不同大小的上方自来水流量模拟降雨形成的径流。为避免过大的实验流量和土槽坡度组合导致实验过程中出现严重土壤流失,实验中采用实验坡度最大 15°,流量最大为 0.05 L/s。实验采用的流量  $Q$  分别为 0.02 和 0.05 L/s,坡度  $S$  分别为 5°和 15°,装

土容重  $\gamma$  为 1.20,1.35 和 1.50 g/cm<sup>3</sup>。各实验处理的流量,坡度,装土容重处理组合情况详见表 2。

表 2 不同流量、坡度和装土容重组合

流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	坡度 $S/(^\circ)$	装土容重 $\gamma/(g \cdot cm^{-3})$
0.05	5	1.20
0.05	5	1.35
0.05	5	1.50
0.02	15	1.20
0.02	15	1.35
0.02	15	1.50

1.2.3 实验指标测定 实验时,当水流到达土槽尾部出口,立即进行计时,分别在 5,10,20,30,40,50

和 60 min 时刻取水样约 200 ml。测定指标确定为  $\text{Br}^-$  浓度,采用 PXSJ-216 型离子分析仪及相应电极进行测定。取样后待水样澄清,取上部澄清液过滤后测定  $\text{Br}^-$  浓度。对试验用自来水的  $\text{Br}^-$  背景值进行测定,测得背景值非常小,即可将水样中的  $\text{Br}^-$  全部看作为实验饱和土壤中的  $\text{Br}^-$  受径流作用而发生迁移的量。

## 2 结果分析

对取得的水样测定结果,按照相同坡度、流量、不同装土容重的实验分组进行分析。 $\text{Br}^-$  的流失变化规律总体呈现出随时间增加,水样浓度逐渐降低的趋势,对实验过程分别采用幂函数和指数函数进行回归分析(表 3—4 及图 1—2)。

表 3 坡度为  $5^\circ$ ,流量为 0.05 L/s 时各装土容重的  $\text{Br}^-$  流失浓度拟合

容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	幂函数 $c(t) = at^b$			指数函数 $c(t) = ae^{bt}$		
	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
1.20	170.230	-0.621 1	0.991 9	54.997	-0.026 8	0.941 0
1.35	45.308	-0.448 2	0.997 5	19.659	-0.018 7	0.884 6
1.50	58.412	-0.513 0	0.976 1	22.757	-0.0218	0.900 5

表 4 坡度为  $15^\circ$ ,流量为 0.02 L/s 时各装土容重的  $\text{Br}^-$  流失浓度拟合

容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	幂函数 $c(t) = at^b$			指数函数 $c(t) = ae^{bt}$		
	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
1.20	668.94	-0.686 8	0.994 3	190.99	-0.029 5	0.935 0
1.35	583.44	-0.750 8	0.974 0	151.34	-0.032 9	0.954 7
1.50	423.47	-0.765 7	0.994 6	104.26	-0.032 7	0.927 6

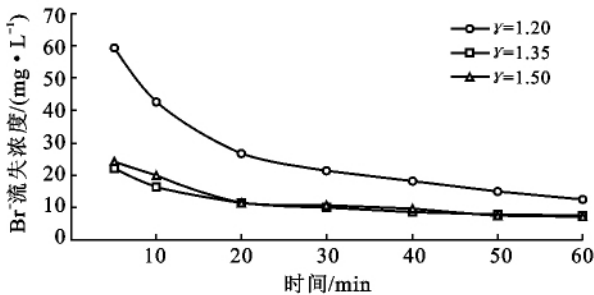


图 1 坡度为  $5^\circ$ ,流量为 0.05 L/s 时各装土容重的  $\text{Br}^-$  流失浓度变化

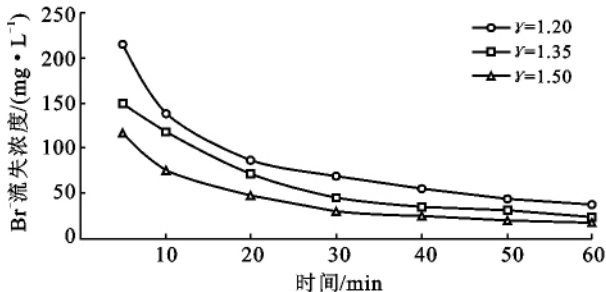


图 2 坡度为  $15^\circ$ ,流量为 0.02 L/s 时各装土容重的  $\text{Br}^-$  流失浓度变化

由表 3—4 可见,不同土壤容重下土壤受径流作用导致土壤溶质流失的过程适合用幂函数来描述,而且在本实验的坡度、流量情况下,土壤容重越小,同时刻的水样  $\text{Br}^-$  浓度反而更高。

从图 1—2 可以看出,装土容重为  $1.20 \text{ g/cm}^3$  的

$\text{Br}^-$  流失浓度比相同时刻其他两组的  $\text{Br}^-$  流失浓度高。在土槽出口处的水量,来自于两部分,一部分是表面径流,这在总水量中占很大比重;另一部分是土壤内部的壤中流。后部分流量是对实验流量的分流,其大小对溶质的流失有直接的影响。水样中的土壤溶质主要来源于径流对表层土壤的冲刷、浸提及土壤内部的壤中流带走的土壤溶质两部分。

在土槽长度方向上不同横剖面位置的过水流量是一致的,但在不同位置处的横断面上,过槽水量的分布是不同的,其总量包括土壤表层以上径流及土壤内部壤中流两部分。壤中流的存在及对土壤的作用,从实验后土层表面受冲蚀破坏的现象就可以看出。在所有实验中,受溯源侵蚀的作用,沿土槽坡面长度方向,土层表面冲蚀破坏的情况基本是土槽前端冲蚀较轻,而后端冲蚀较严重。这主要是在土槽前端有部分水入渗到土壤中形成壤中流而在一定厚度的土壤中流动,其到达土槽末端部分,由于其通道受隔断,壤中流向上流出到土壤层表面,进入到径流中,进而加剧土槽末端范围内水流对土壤表层的冲蚀破坏。

坡度、流量及植被情况决定了地表径流的流速,影响到地表径流对表层土壤的冲刷破坏程度,也就决定了土壤溶质在土壤受冲蚀作用下进入地表径流而随径流迁移的数量。在实验所采用的坡度、流量及容重等条件下,通过地表径流冲蚀表层土壤而带走部分土壤溶质。容重较小的实验土层中,土壤颗粒间孔隙

较多、较大,这些颗粒孔隙就形成曲折、相互连通的水流通道,为壤中流的形成、流动创造了空间。进入土槽的水,在进口前端,部分水入渗,进入到土壤颗粒间孔隙中,在由孔隙形成的通道中向下坡流动,期间就可以对通道周边的土壤溶质进行溶解、浸提。 $\text{Br}^-$  受土壤的吸附作用很弱,很容易进入壤中流并发生对流运动。而土壤容重大,土壤颗粒比较致密,孔隙度小,为水进入土壤内部流动留存的通道就更为曲折、更小,导致溶质溶液的土壤孔隙平均流速降低,这种情况下土壤溶质通过对流、机械弥散运动而迁移的量大为减少。

各组中容重为  $1.35 \text{ g/cm}^3$  的实验径流  $\text{Br}^-$  浓度比容重为  $1.50 \text{ g/cm}^3$  的径流溶质浓度高,但差别不显著。经分析认为,虽然容重为  $1.35 \text{ g/cm}^3$  的土壤孔隙状况比容重为  $1.50 \text{ g/cm}^3$  好一些,但两者的土壤颗粒已经相当紧密,颗粒间的孔隙形成的通道非常曲折、断面小,相对应的壤中流孔隙平均流速非常小,而且并无太大差别,因此通过对流、机械弥散运动而发生迁移的土壤溶质量相差不大,水样中的  $\text{Br}^-$  主要来源于土槽表层土壤受径流冲刷而流失的量,通过壤中流迁移的  $\text{Br}^-$  所占比例较小。

### 3 结论

饱和土壤受径流的作用,土壤溶质发生迁移是土壤溶质受地表径流和壤中流共同作用的结果;随径流作用时间的增加,单位时间内土壤溶质迁移的数量逐渐减少,此过程适合用幂函数来描述;土壤容重对土壤溶质受径流作用而迁移的过程影响较大,总体表现为土壤容重越大,同时刻随径流迁移的土壤溶质量越少;土壤容重增加相同幅度,但同时刻随径流迁移的土壤溶质递减量逐渐减少。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吕殿青,王宏,潘云,等. 容重变化对土壤溶质运移特征的影响[J]. 湖南师范大学学报:自然科学版,2011,33(1):75-79.
- [2] 黄虹,邹长伟,陈新庚. 中国面源污染研究评述[J]. 生态环境,2004,13(2):255-257.
- [3] 王全九,邵明安,李占斌,等. 黄土区农田溶质径流过程模拟方法分析[J]. 水土保持研究,1999,6(2):67-71,104.
- [4] 张玉斌,郑粉莉,武敏. 土壤侵蚀引起的农业面源污染研究进展[J]. 水科学进展,2007,18(1):123-132.
- [5] Wallach R, Jury W A, Spencer W F. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: A diffusion based soil model[J]. Soil Science A M. J., 1988,52(3):612-618.
- [6] Wallach R, Grigorina G, Rivlin J. A comprehensive mathematical model for transport of soil-dissolved chemicals by overland flow[J]. Hydrology, 2001,247(1):85-99.
- [7] Wallach R, Van Genuchten M T. A physically based model for predicting solute transfer from soil solution to rainfall-induced runoff water[J]. Water Resour Res., 1990,26(9):2119-2126.
- [8] Frere M H, Ross J D, Lane L J. The nutrient submodel in CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems[R]. Kniesel W G. Washington: Dep., Agric., 1980,26:65-87.
- [9] Ahuja L R, Sharpley A N. The depth of rainfall-runoff-soil interactions as determined by  $^{32}\text{P}$ [J]. Water Resour Res, 1981,17(4):969-974.
- [10] Donigan A S, Beyerlein D C. Agricultural runoff management (ARM) model version: II. Refinement and testing[R]. Athens G A. EPA 600/3-77-098. US Environ Protection Agency, 1977.
- [11] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报,2008,28(8):1571-1578.
- [12] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等. 降雨—径流—土壤混合层深度研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(9):283-290.
- [13] 王全九,王文焰,沈晋. 黄土坡面溶质随径流迁移相应函数模型[J]. 水利学报,1994,25(11):18-21,36.
- [14] Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rain-fall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. Environmental Quality, 1983, 12(17):34-40.
- [15] Bailey G W, Swank Jr R R, Nicholson H P. Predicting pesticide runoff from agricultural land: A conceptual model[J]. Environ. Qual., 1974,3(2):95-102.
- [16] 王全九,王文焰,沈冰,等. 降雨—地表径流—土壤溶质相互作用深度[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):41-46.
- [17] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):10-13,18.