

土壤溶质随径流迁移基本特征分析^{*}

王全九^{1,2}, 穆天亮¹, 王 辉², 孔刚¹

(1. 西安理工大学, 西安 710048; 2. 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 杨陵 712100)

摘 要: 土壤溶质随地表径流迁移是一个复杂的过程, 受到多种因素的影响。在总结国内外相关研究成果的基础上, 分析了土壤溶质随地表径流迁移的主要物理过程, 以及各个物理过程的具体特征。同时分析了影响土壤溶质随地表径流迁移的主要因素的影响程度和特点, 为建立描述土壤溶质随地表径流迁移过程的数学模型, 以及发展控制措施提供参考。

关键词: 土壤溶质; 径流迁移; 地表径流

中图分类号: S153.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)06-0038-04

Features Analysis of Solute in Soils Transfer with Surface Runoff

WANG Quanjiu^{1,2}, MU Tianliang¹, WANG Hui², KONG Gang¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Solute in soils transferring with runoff is a complex processes, and it is affected by many factors. The physical processes of soil solute transfer with runoff and their features were analyzed based on the summation of research results at home and abroad. The effects of main factors on soil solute transfer with surface runoff were analyzed in order to provide some guidance for establishing related mathematical models and controlling measures.

Key words: soil solute; runoff transfer; surface runoff

降雨条件下土壤溶质迁移包括两个过程: 一是在降雨过程中, 土壤溶质随下渗水分向深层迁移; 另一是当降雨强度大于土壤入渗能力时产生地表径流, 土壤表层的溶质在雨滴打击及径流冲刷作用下, 向地表径流传递, 并随地表径流迁移。土壤内部的溶质迁移过程涉及了土壤养分的滞留及有效性、土壤环境及地下水污染问题; 而土壤溶质随径流迁移过程涉及了土壤养分流失和土壤肥力减退, 以及水环境污染问题。土壤溶质随地表径流迁移受到众多因素的影响, 如降雨特性、下垫面条件及所涉及化学物质特性等。降雨不仅为整个土-水体系输入水量, 而且也输入能量, 因此它是土壤体系中水分和溶质运移的能量; 下垫面是降雨及径流溶质迁移的基础, 也是径流溶质的供给源; 化学物质是整个研究的对象, 它的物理化学特性同样影响其本身的运移特性。为了揭示土壤溶质随地表径流的迁移机制, 以及有效控制和预测土壤溶质随地表径流迁移的过程, 国内外学者对此进行了大量研究^[1-9], 为认识其内在机制奠定了基础。本文根据国内外研究成果分析了主要因素对土壤溶质随径流迁移特性的影响, 为进一步探讨土壤溶质随地表径流迁移控制措施提供参考。

1 土壤溶质随地表径流迁移的主要物理过程

在一次降雨过程中, 降雨初期的雨滴打击作用使土壤表层溶质与雨水混合, 当土壤入渗能力大于雨强时, 雨水全部入渗, 土壤表层一部分溶质随入渗水分向下层迁移, 表层土壤溶质含量逐渐减少。随着降雨量增多, 土壤表层含水量逐渐增大, 土壤入渗能力逐步小于雨强, 地表开始积水, 并随之产生地表径流, 同时也产生土壤侵蚀与水土流失。在雨滴击溅、径流冲刷、紊动扩散及土壤侵蚀作用下, 土壤溶质进入径流。土壤溶质一般以两种形式进入径流: 一是溶解态形式, 一般认为其存在于土壤溶液中, 并随着溶液间的交换进入地表径流; 另一是吸附态形式, 这部分溶质被吸附在土壤颗粒上, 并通过解吸和随侵蚀泥沙进入地表径流。这些溶质向地表径流传递主要受以下几方面作用的影响。

溶解与解吸作用是决定土壤溶质存在状态的作用过程。土壤中的化合物有的以溶解态形式存在于土壤溶液中; 有的以吸附态形式被吸附在土壤颗粒上; 有的未溶解以固态形式存在于土壤中。降雨-入渗过程补充了土壤水分, 同时也改

^{*} 收稿日期: 2008-08-19

基金项目: 中科院“百人计划”优先资助项目; 国家自然科学基金项目(90502006); 中国科学院“百人计划”资助项目

作者简介: 王全九(1964-), 男, 内蒙古人, 教授, 博导, 主要从事农业水土工程方面研究工作。E-mail: wquanjiu@163.com

变了土壤溶液的浓度。这样一部分未溶解的固态物质可能溶解;一些溶质离子可能从土壤颗粒上解吸,也可能在土壤颗粒表层发生交换反应;由于同离子效应和盐基效应的作用,有些溶质的溶解度和电离度增加,有的可能减小。由于土壤是多种元素组成的复合体,因此无法用简单的公式描述这些复杂过程,一般只能根据具体溶质进行特殊处理。这一过程主要与土壤质地、土壤化学组成及其各组分含量、化学成分的溶解度和电离度、离子与土壤颗粒作用关系、离子的吸附与解吸特性、土壤水分特性及环境温度有关。

雨滴击溅作用在土壤溶质向地表径流迁移过程中起着至关重要的作用。一方面将表层土壤溶质与雨水混合,若土壤表面积水,击溅作用将使土壤表层溶质与表面积水及雨水混合,以供径流冲刷,起到掺和搅拌作用。同时它对下层土壤溶质起到扰动作用,加速了土壤溶质的化学物理过程进行;另一方面雨滴击溅作用增加了土壤侵蚀,使吸附在土壤颗粒上的溶质随流失的土壤颗粒进入径流。此外,雨滴击溅作用改变了土壤表面特性,减少土壤入渗能力,使混合层土壤溶质随径流迁移的几率增加。雨滴的击溅作用表现为多种方面,因此也很难利用简单的模式进行描述。雨滴击溅作用主要与雨强、雨滴谱、雨滴动能、土壤质地、土壤容重、土壤覆盖、土壤前期含水量等因素有关。

径流冲刷是土壤溶质损失的一个重要因素。首先它起到搬运作用,一方面将土壤表层溶解态溶质带走;另一方面径流冲刷加剧土壤侵蚀。吸附着土壤颗粒上的溶质随着侵蚀泥沙迁移而流失,增加了土壤溶质的损失;其次它起到了“催化剂”作用,由于径流冲刷使表土流失,下层土壤溶质失去了保护层,因而下层土壤溶质直接受到径流和雨滴作用,加剧了下层土壤溶质向地表径流的迁移。径流冲刷也是灌溉条件下土壤溶质随地表径流迁移的主要因素。研究径流冲刷作用是研究土壤溶质向地表径流迁移的一个重要方面。特别对于水土流失比较严重的西北黄土地区更是如此。径流冲刷作用主要与降雨特性、土壤特性、土壤坡面特性及植被条件有关。

坡面水流在雨滴扰动及径流紊动作用下,加速了下层土壤溶质向径流传递的过程,溶质紊动扩散作用远大于分子扩散作用。国外一些学者将坡面流分成层流和紊流,而层流和紊流间的溶质传递主要是在紊动扩散和雨滴扰动作用下进行的。这种作用主要与溶质种类、土壤表面的物理特性和表面糙率、坡面特性、径流排放情况、土壤特性及降雨特性等因素有关。

土壤入渗能力不仅影响土壤水分运移特性和表面径流特性,而且影响土壤溶质运移特性及径流溶质运移特性。由于只有表层一定深度的土壤溶质参与径流迁移,而此深度以下的溶质不参与径流迁移,故此深度内溶质数量与土壤溶质随径流迁移量紧密相关。土壤溶质主要以对流形式随入渗水分在土壤中迁移,而表层土壤溶质的数量与土壤入渗能力密切相关,如入渗能力大,则表层土壤所含有的溶质数量减少。同时土壤表面混合层的溶质随径流迁移的几率随土壤

深度的增加呈指数递减,这样入渗水量愈多,土壤溶质参与径流迁移的几率愈小,因此土壤入渗特性对于土壤溶质随径流的迁移过程是十分关键的因素。

2 土壤溶质随地表径流迁移的主要影响因素

土壤溶质随地表径流迁移受到多种因素的影响,各种因素的影响程度和方式不尽相同,但主要通过改变水、土、溶质三者相互关系来发挥作用。降雨补充的水分不仅作为溶质迁移的载体,携带溶质向土壤深层和地表径流迁移,而且降雨雨滴具有能量,直接改变土壤表面特征,以及土壤溶质与径流溶质混合程度,同时形成的地表径流大小直接影响土壤溶质向地表径流的传递程度和数量。土壤作为溶质存在的场所,也是地表径流溶质的补给源,土壤基本特征直接影响向地表径流传递溶质的能力。溶质物理化学特征不同直接决定着其在土壤中的存在状态,对于吸附能力较强的溶质,其与土壤颗粒作用的能力强,在土壤内迁移速度相对较慢,直接参与径流迁移的几率大,但由于其与土壤颗粒间具有较强作用,因此随侵蚀泥沙进入径流的可能性愈强,对于吸附性较弱的溶质,在土壤内迁移速度快,进入地表径流迁移的几率相对降低。由于土壤溶质随地表径流迁移的复杂性,需要通过分析其内在机制,确定主要影响因素来进一步分析其控制因子,从而为发展相关数学模型提供指导。

2.1 溶质特征对土壤溶质随地表径流迁移的影响

土壤中溶质的存在方式及运动特点是多种多样的,而且受到许多因素的影响,如土壤质地、土壤溶质含量、土壤结构、土壤水分状况、溶质种类及其物理、化学特性、环境温度、下垫面条件及降雨或灌溉特性等。由于土壤溶质是径流溶质的供给源,溶质在土壤中的存在方式和迁移特性,直接影响着径流溶质的变化过程。从一场降雨过程来看,降雨初期在雨滴打击作用下,土壤表层溶质与雨水混和,如土壤入渗能力小于雨强时产生地表径流。在雨滴击溅、径流冲刷及溶质紊动扩散作用下,土壤溶液中溶质进入径流。随着径流的发展,土壤侵蚀加剧,吸附在土壤颗粒上的离子,随着流失的土壤颗粒而进入径流。同时表层土壤的流失,使下层土壤也受到雨滴和径流的作用,使下层土壤中一部分溶质也进入径流。总之,径流溶质可分为两大类,一类是以溶解态进入径流的溶质;另一类是以吸附态进入径流的溶质。但由于溶质离子化学特性及与土壤颗粒作用程度的不同,两类溶质在不同降雨时期所起的作用不同。对于易移动和与土壤颗粒作用较小的离子,径流溶质浓度变化过程是由大逐渐变小,反之由大变小,然后又逐渐增大。图1-3显示了人工模拟降雨条件下不同离子径流浓度的变化过程。由图示结果可以看出,不同特性的离子具有不同的径流离子变化过程。根据离子径流浓度变化特性可知,对于不同的土壤离子应采用不同的控制方法,则可有效控制其径流流失量,对于易迁移而受土壤颗粒作用力小的离子,应尽力控制其产流初期的流失量,而对于其它离子,应尽力控制降雨后期的消失量,有效控制土壤流失是控制此类溶质流失的主要手段。

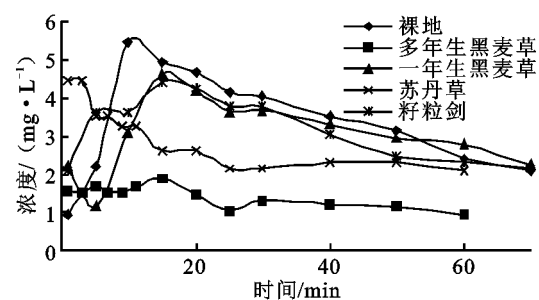


图 1 径流溶解态磷的浓度变化过程

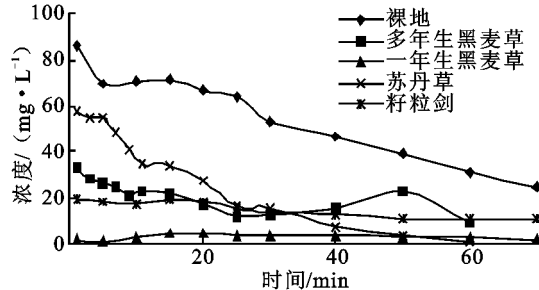


图 2 径流钾离子浓度的变化过程

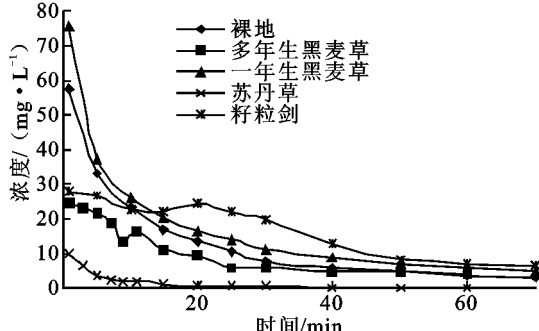


图 3 径流溴离子浓度变化过程

2.2 土壤物理特性对土壤溶质随径流迁移的影响

土壤基本特征中影响土壤溶质随地表径流迁移的主要物理特征包括土壤质地、容重和土壤含水量。随着土壤质地

由粗变细,土壤导水能力逐渐增加。对于一定雨强条件下,随着土壤入渗能力增加,混合层内溶质向深层土壤迁移的数量愈多,而参与径流迁移的数量也就愈少。同时随着土壤入渗能力增加,雨水转化为土壤水的数量愈多,因而产生的地表径流愈少,径流对土壤侵蚀能力和土壤溶质向地表径流迁移能力也就愈小,因此,土壤溶质向地表径流迁移的数量也就愈少。当然仅依据土壤质地也不能完全确定土壤溶质向地表径流迁移的数量大小,由于土壤入渗能力与土壤容重、含水量和土壤结构有关,需要综合考虑各种因素的影响程度。土壤容重是影响土壤入渗能力的另一个主要因素,一般随着土壤容重增加,土壤入渗能力减小,必然导致径流量增加和土壤溶质向地表径流的传递能力。但在降雨条件下,雨滴对土壤表面具有击实作用,在容重比较小的情况下一般容易发生土壤被击实,这样表面土壤容重发生变化,难以说明土壤容重对土壤溶质随地表径流迁移特征的影响。因此容重对土壤溶质随地表径流迁移影响,需要根据具体情况进行分析。土壤初始含水量是影响土壤水及溶质运移的一个重要物理量,它影响着土壤入渗能力,因而也影响着土壤溶质随土壤溶质径流迁移的全过程。降落在地表的雨水或渗入土壤成为土壤水,或沿坡面流动成为地表径流。形成径流的前提之一是土壤入渗能力小于雨强。一般而言,土壤入渗能力随着土壤初始含水量的增加而减小,但初始含水量同样影响着雨滴对土壤颗粒的击溅和表土的夯实作用。图 4 显示了人工模拟降雨条件下径流溶质浓度的变化过程。结果显示随着土壤初始含水量增加,径流溶质浓度增加,径流流失的溶质量也显著增加。如果以初始土壤含水量 5% 为基础,比较增加土壤含水量对径流溶质流失量的影响,结果显示含水量增加 1, 2, 3 倍,径流溶流失量增加 1. 3, 1. 6, 3. 4 倍,说明土壤初始含水量对土壤溶质随地表径流迁移的影响是非线性的,而且呈现单调增加过程。

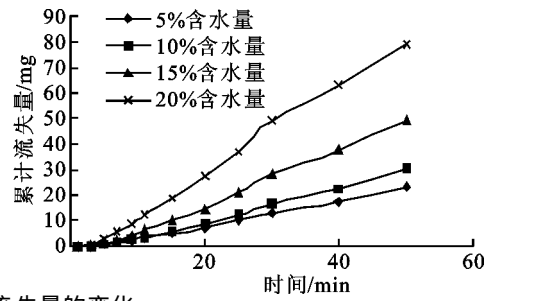
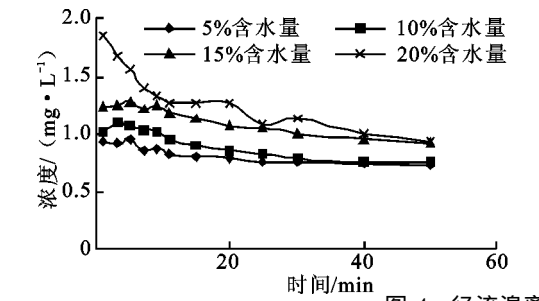


图 4 径流溴离子浓度和累积流失量的变化

2.3 降雨特征对土壤溶质随地表径流迁移的影响

广义上讲,降雨特性包括雨强、雨滴谱、雨滴动能和动量、雨型、降雨历时、暴雨中心以及降雨量等。为了便于揭示降雨特性对径流溶质迁移过程的影响,这里着重就降雨强度和降雨动能这两个重要降雨特性进行分析和讨论。降雨强度本身就包括 2 方面内涵,即单位时间供给土壤表面的水量以及单位时间输给土壤表面的能量。对于水量而言有 2 种途径进行迁移,一是进入土壤成为土壤水;另一是当雨强大于土壤入渗能力的,产生地面积水,形成地表径流。对于赤裸的土壤表

面,输入的能量将转化为冲击力分散土壤颗粒和击实土壤表面。分散的土壤颗粒会随入渗水的迁移而堵塞表面土壤孔隙,减小土壤入渗能力,同样这种击实作用也将减小土壤的入渗能力。因此改变土壤表面的特性,影响土壤溶质随地表径流迁移的全过程。同时雨滴动能本身又是降雨强度的函数。因此雨滴动能和单位时间输入水量都是降雨强度的函数。但是存在植被条件下,土壤表面接受的雨滴动能又是植被的函数。这样对于某一雨强所形成的雨滴动能与土壤表面实际接受的动能不相同。故此我们将土壤表面实际接受的雨滴动能

称之为有效雨滴动能。因此有效雨滴动能既是雨强的函数, 又是植被条件的函数。有效雨滴动能影响土壤表面特性, 使土壤表层孔隙度及密实度发生变化, 致使表层饱和含水量发生改变。对于同一雨强, 降雨后表面土壤饱和含水量随有效雨滴动能的增加而减小。较小的雨滴动能不但没有击实表层土壤, 反而由于水膜的侵入使土壤发生膨胀, 以致引起土壤饱和含水量的增加。同时有效雨滴动能对表层土壤结构破坏作用存在着下限。对于相同的有效雨滴动能, 随着降雨强度的增加, 雨后表面土壤饱和含水量减小。有效雨滴动能改变了土壤表面特性, 进而影响土壤入渗率及土壤水的入渗深度。有效雨滴动能对土壤入渗过程的影响可归结为对土壤水分运动参数的影响。在产流计算中, 最为常用的水分运动参数为土壤饱和导水率。当然有效雨滴动能对土壤饱和导水率的影响与时间有关, 一般随着雨滴动能的增加, 土壤表面饱和导水率会减小, 必然影响整个水分和溶质的迁移过程。在产流计算中, 产流时刻是一个重要的参数。一般随着雨强增加, 产流时刻减小, 混合层土壤溶质向深层土壤迁移的几率降低, 向地

表径流迁移的几率增加。同时雨强增加径流量增加, 增加了土壤侵蚀和径流与混合层溶质混合的能力, 从而增加了土壤溶质随地表径流迁移的数量, 当然这种作用与其他因素相互关联, 互相作用, 难以简单区别开来。

图 5 显示了径流钾离子浓度和随径流累积迁移量变化过程。由图可以看出, 随着雨强增加, 径流溶质浓度随时间变化出现不同的变化过程, 在雨强为 40 mm/h 和 80 mm/h 时, 径流中钾离子浓度表现出随时间增加呈现单调递减的过程。而当雨强为 120 mm/h 时, 浓度变化过程呈现先减少后增加变化过程。为了进一步分析雨强对土壤养分迁移过程的影响, 点绘了累积径流溶质浓度过程。由图可以看出, 随着雨强增加, 径流溶质累积质量呈现单调增加, 而且增加幅度随雨强的增加显著变化。如果按照 1 h 降雨计算, 以 40 mm/h 雨强下土壤钾流失量为基准, 则 80 mm/h 和 120 mm/h 降雨条件下, 土壤钾流失量分别增加 1.9 和 8 倍, 因此雨强对土壤溶质随地表径流迁移量的影响不是线形增加, 而是呈现显著的非线形增加。

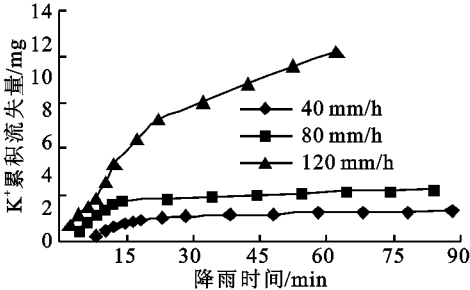
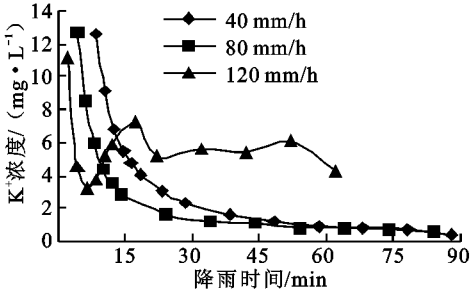


图 5 不同雨强径流钾离子浓度变化及其累积流失过程

3 小 结

土壤溶质随地表径流迁移受到多种因素的影响, 而且各种影响因素间相互作用, 并且各自影响程度也不尽相同。需要系统分析各种因素的作用机制, 阐明各种因素作用间的相互关系, 才能提出合理的模拟土壤溶质随地表径流迁移的数学模型, 发展调控土壤溶质随地表径流迁移的有效方法。本文通过分析与归纳影响土壤溶质随地表径流迁移的主要因素, 进一步探讨和认识土壤溶质随地表径流迁移的内在机制, 为进一步研究提供参考。

参考文献:

[1] 王全九, 沈晋. 降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移试验研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 11-17.

[2] 康玲玲, 朱小勇. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 536-543.

[3] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质

氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55-58.

[4] 王辉, 王全九, 邵明安. 降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 39-44.

[5] 王辉, 王全九, 邵明安. 不同透水状况对坡地土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 21-25.

[6] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61-64.

[7] Ahuja L R, Sharpley A N. The depth of rainfall runoff soil interactions as determined by ³²P[J]. Water Resour. Res., 1981, 11: 967-974.

[8] Ahuja L R. Release of a soluble chemical from soil to runoff[J]. Trans. ASAE, 1982, 25: 948-956.

[9] Ahuja L R. The extent and nature of rainfall soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. J. Environ. Qual., 1983, 12: 34-40.