

降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟

田 坤^{1,2}, Huang Chihua^{3*}, 王光谦¹, 田 鹏⁴, 傅旭东¹, 郭海丹¹

(1. 清华大学水利系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 美国农业部土壤侵蚀试验室, West Lafayette, IN 47907-2077, 美国; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘 要: 通过雨滴的打击加速土壤表面溶质迁移至地表径流过程。通过设计 3 种水文条件即控制排水状态 (-5 cm)、土壤水分饱和状态和土壤渗流状态 (5 cm), 采用人工模拟 3 种降雨强度 (30、60 和 90 mm/h), 及同时外加模拟相对于降雨量的 0、2、4 和 10 倍径流量, 研究土壤溶质迁移到地表径流过程中扩散过程的规律。试验结果表明降雨强度、或地表径流总量、或地表水位线的增加, 均加速土壤溶质的扩散过程。渗流作用下, 对流-扩散作用存在着一种交互作用, 能加速分子扩散过程。土壤溶质迁移过程同降雨强度、地表径流量和地下水位高低有着重要关系。

关键词: 降雨, 径流, 扩散, 土壤溶质迁移

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.014

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0081-07

田 坤, Huang Chihua, 王光谦, 等. 降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 81-87.

Tian Kun, Huang Chihua, Wang Guangqian, et al. Movement of soil solute under simulated rainfall runoff [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 81-87. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

关于污染物从土壤向水体的迁移、转化, 以及土壤农业利用对区域水质的影响, 不仅是土壤学近期的重点研究内容, 也是中国所亟需解决的资源环境问题之一。地表径流或降雨条件下, 化学物质迁移与地表土层扰动有着密切的关系。探明土壤中养分和农药的流失规律对于防止环境污染有着重要的意义^[1-7]。雨滴的打击可加速土壤表面溶质迁移至地表径流过程。1990 年, Ahjua 等^[8]的研究结果表明在无土壤水无渗透的条件下, 分子扩散系数被扩大 2.5~19 倍。该试验研究的内容是: 是土壤中溶于水分的溶质, 如土壤养分, 农药等的迁移流失与降水和径流的关系。降水-径流条件下土壤溶质迁移在垂直方向上有两个过程: 一是在径流过程中, 土壤溶质随下渗的水分向下迁移, 进入深层土层; 二是当地表径流量大于入渗量时, 土壤溶质在雨滴打击及径流冲刷作用下, 垂直向上迁移进入地表径流, 并随地表径流和泥沙产生迁移流失。本文侧重于后者, 研究土壤养分流失、肥力减退和面源污染问题。

对于土壤溶质迁移的研究分为 3 部分, 第一部分为径

流模拟, 田坤等人的研究主要应用地区为坡地底部^[9-11], 降雨影响因素较少, 地表径流量和流量较大, 径流影响土壤溶质迁移为主; 第二部分为降雨-径流模拟, 主要应用地区为坡地中部, 该地区降雨和径流共同作用影响土壤溶质迁移; 第三部分, 坡地上部降雨为主导因素, 现有研究很多。

本文试验通过设计 3 种水文条件即控制排水状态 (-5 cm)、土壤水分饱和状态和土壤渗流状态 (5 cm), 采用人工模拟 3 种降雨强度 (30、60 和 90 mm/h) 及同时外加模拟相对于降雨量的 0、2、4 和 10 倍径流量, 研究土壤溶质迁移到地表径流过程中扩散过程的规律, 为探明土壤溶质迁移的机理, 以及为现有模型奠定一定的理论基础。

1 材料与方 法

1.1 装置与材料

试验在美国农业部国家土壤侵蚀研究实验室人工降雨大厅进行。供试土壤为印第安纳州 Crosby-Miami 土, 其机械组成为黏粒质量分数为 21%, 粉粒 60%, 砂粒 19%, 属于粉砂壤土, 有机质质量分数占 2%, 试验用土为耕作层土壤 (0~20 cm), 土壤体积质量 1.35 g/cm³, 土壤饱和含水率 0.56 m³/m³。试验土槽长 450 mm、宽 200 mm、深 200 mm。在土槽底部均匀分布 10 个排水孔, 排水孔用纤维状材料堵塞保证均匀供水。在土槽底部铺设一层透水布, 防止水洗砂堵塞排水口; 在透水布上铺设 80 mm 厚的水洗砂, 粒径为 0.25~0.75 cm, 保证试验过程中水分自由下渗。在水洗砂层上面另铺一层透水布, 分离砂层和土层。为保证供试土壤的均匀性, 将供

收稿日期: 2010-07-18 修订日期: 2010-10-21

基金项目: 美国农业部项目—土壤水动力及其在土壤侵蚀和水质的有效管理项目 (3602-12220-009-00); “973” 课题 (2011CB409901)。

作者简介: 田 坤 (1977-), 女, 黑龙江佳木斯人, 博士, 主要从事土壤化学物质迁移方面的研究工作。北京 北京清华大学水利系泥沙馆, 100084。Email: annietiankun@163.com

*通信作者: Huang Chihua, 美国农业部国家土壤侵蚀试验室主任, 主要从事土壤侵蚀和土壤溶质迁移的研究工作。ARS-National soil erosion research lab, West Lafayette, IN 47907-2077, USA。Email: chihua@purdue.edu。

试土 10 mm 的间距分层填装在透水布之上, 以保证土壤接近自然体积质量。径流土槽与供水器连接, 从土槽底部由下向上供给土壤水分。土槽其他三边额外增加 10 cm 高度钢板, 其目的是避免因土壤溅蚀引起土壤溶质流失。DI (去离子水) 水通过阀门控制水量, 加入到供水槽中, 供水槽的排水口与土槽的入水口相连接, 坡度为 30°, 其中供水槽排水孔用纱布包裹, 保证模拟的地表径流流速均匀, 并降低土槽入水口处土壤侵蚀, (详见图 1)。

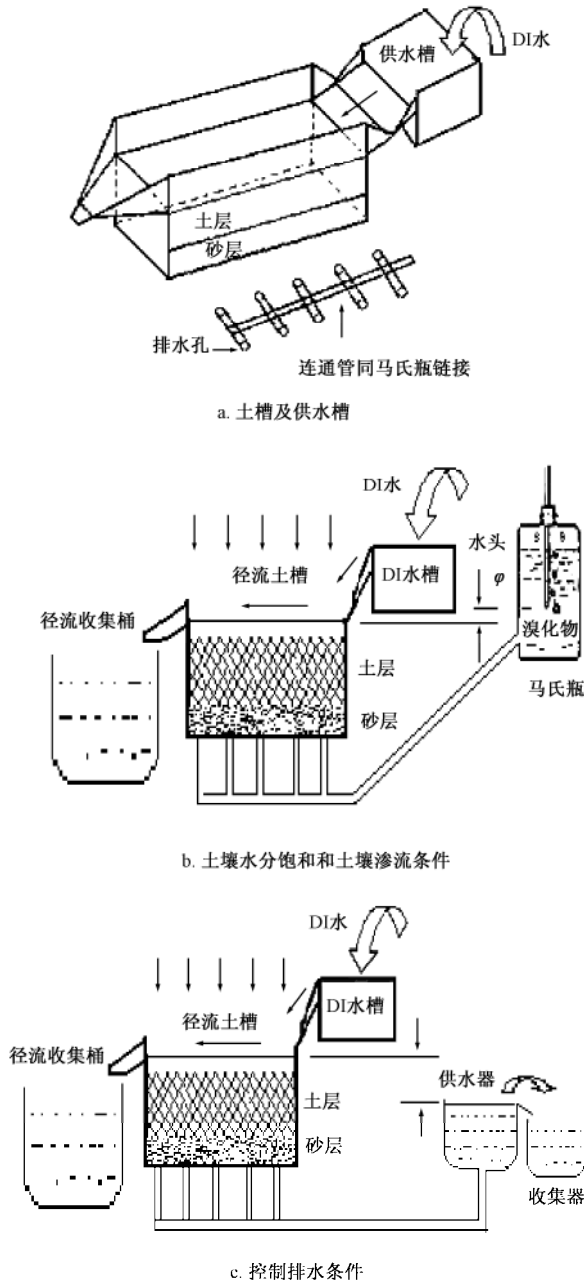


图 1 试验装置示意图
Fig.1 Experimental setup

1.2 试验设计

本文通过试验模拟 3 种地下水位高度即 3 种水文条件: 控制排水状态 (-5 cm)、土壤水分饱和状态和土壤渗流状态 (5 cm); 对于每一个试验条件下均采用 3 种不同降雨强度, 即 30、60、90 mm/h; 同时分别外加模拟

径流, 相当于降雨量的 0、2、4、10 倍径流量, 试验土槽设置坡度为 5°, 重复 3 次。

1.3 试验步骤

首先, 使供试土壤饱和和本试验开始前和试验过程中供试土壤均处于水分饱和状态。配置 1000 g/m³ 的溴化钠溶液, 装入马氏瓶中。将马氏瓶水位线与供试土壤表面持平, 采用缓慢润湿的方法使得供试土壤被溴化钠溶液浸泡成饱和土壤。即用盛有同土壤溶液相同浓度溴化钠溶液的马氏瓶与 10 个排水孔连接, 使溴化钠溶液缓慢的充满整个径流土槽中的供试土壤, 直到径流导流槽流出的溴化钠溶液浓度接近原始浓度。为了使溴化钠溶液均匀分布在土壤中, 土壤要被饱和 24 h。径流土槽的试验温度维持在 20°C。在所有试验之前, 在土壤的表面大约 2 mm 的深度取土壤样品, 测定其水分和溴含量 (土壤湿度 30% 左右), 接近平均值方可试验。因本试验阶段要考虑土壤侵蚀影响, 对出水口处的 1 cm 土壤进行分层填充层夯实 (体积质量为 1.35 g/cm³ ± 10%), 且出口处土壤表面同出水口处持平, 目的是为了减少和避免土壤流失过程使得出水口处土壤表面低于出水口影响试验结果。

然后将土槽与马氏瓶分离, 同供水器连接, 供水器水面同径流水面持平, 分别在不同地表径流流速时, 进行模拟试验, 并采样分析。当径流开始时每 2 min 取样, 并称重, 计算径流流量, 静止放置 10 h 以后, 取上层澄清液用 2.5 μm 滤纸过滤 50 × 10⁻⁶ m³/s 样品, 放入冰箱保鲜层内, 24 h 之后用 Lachat 仪器做溴含量分析, 其余样品用 105°C 烘干, 测量其土壤质量。分析方法见 QuikChem Method 10-135-21-2-B^[12-14]。每次试验均重新更换土壤, 然后分别将供水器水面降低 5 cm 和提高 5 cm, 重复上述试验。在地下水位低于地表状态时, 为了预测土壤表面溴化物随时间的变化, 3 种降雨条件下分别多加一组土壤表面增加覆盖物, 但不外加额外径流的试验, 并重复 3 次。

1.4 土壤饱和和导水系数和扩散系数的确定

1) 饱和和导水系数 根据泊肃叶定律 (Poiseuille's law) 和达西定律 (Darcy's law) 土壤表面水力梯度存在的同时, 加速了土壤中水溶质的对流, 得到式 (1)。在 4 种土壤水分壤中流条件下 (水头 2、5、10、12 cm), 让土壤中溶液从土槽自由排出, 通过 5 组试验可得到土壤饱和和导水系数 K , 均值为 14.5×10^{-6} m/s。

$$K = \frac{J \cdot l}{\Delta h \cdot C_0} \quad (1)$$

式中, J 为土壤溶质流失通量, ; l 为土层厚度, cm; Δh 为水头高度, cm; K 为饱和和导水系数, m/s; C_0 为土壤中原始溴化物质量浓度值, g/m³。

2) 扩散系数 基于质量守恒定律和完全混合原理, 长时间径流后, 径流中的溴化物浓度应该等于混合层中溴化物浓度。首先采用 500 mg/L 溴化钠溶液使土壤饱和, 在土壤表面平铺一层透水性好的黑纱, 在黑纱表面迅速加入去离子水, 恰好是水面同出水口一平, 使去离

子水不外溢。马里奥特瓶供水线同土槽水面一致，然后在其上面设置不动的 0.02 m 水层，马里奥特瓶供水线同土槽水面持平，每 2 min 在水层面取不同位置 6 点混合样品 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 左右，持续 60 min。再分别用 1 000、2 000 和 4 000 g/m^3 溴化钠溶液饱和和土壤，重复上述试验，3 次。根据费克第二定律，得出静止状态下饱和土壤中溴化物扩散系数，其值为 $1.12 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，略小于水中溴化物扩散系数 $1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ [15]。

2 结果与分析

2.1 控制排水条件下预试验

控制排水条件下，由于土壤表层溴化物浓度随降雨时间的增加而降低，很难将土壤侵蚀和扩散作用造成的溴化物流失细化，所以较土壤饱和和状态和土壤渗流状态下，控制排水条件下额外加一组试验，对比研究土壤表面有无覆盖物条件下，溴化物流失量的变化。其中土壤表面有覆盖物的地表径流中溴化物浓度值见图 2a，无覆盖物的地表径流中溴化物浓度值见图 3，（仅降雨无外加模拟径流（R））。即仅降雨无外加径流条件下，土壤表面覆盖一层尼龙纤维网状透水布，消减雨滴动能，避免土壤流失。图 2a 是地表径流中溴化物浓度值，土壤流失量均接近零，该过程中仅有扩散作用造成土壤中溴化物流失。单位时间单位面积上溴化物流失质量称之为溴化物流失通量，见表 1 中对比扩散作用值。分子扩散的速率与浓度梯度成正比，假设土壤表面溴化物浓度均匀，根据 Fick 定律（分子扩散的速率与浓度梯度成正比，其比例系数为分子扩散系数）可以得到土壤表面溴化物浓度变化趋势图（图 2b）。在控制排水状态下，降雨强度 30、60 和 90 mm/h 历时 1 h 降雨后，溴化物流失通量分别为 0.058、0.057 和 0.054 $\text{mg}/\text{m}^2\text{s}$ ；总体上径流中溴化物浓度随着时间的增长逐渐降低。主要原因可能是由于降雨造成的径流量随着降雨强度增加而增加，雨水入渗量也随之增加，土壤表面溴化物随着入渗水渗入深层土壤也增加，减少了土壤表层溴化物进入地表径流中的量。

2.2 土壤侵蚀量

土壤表面发生地表径流，产生土壤侵蚀，携带土壤中溴化物随泥沙流失。从图 3 中 3 种水文条件下土壤流

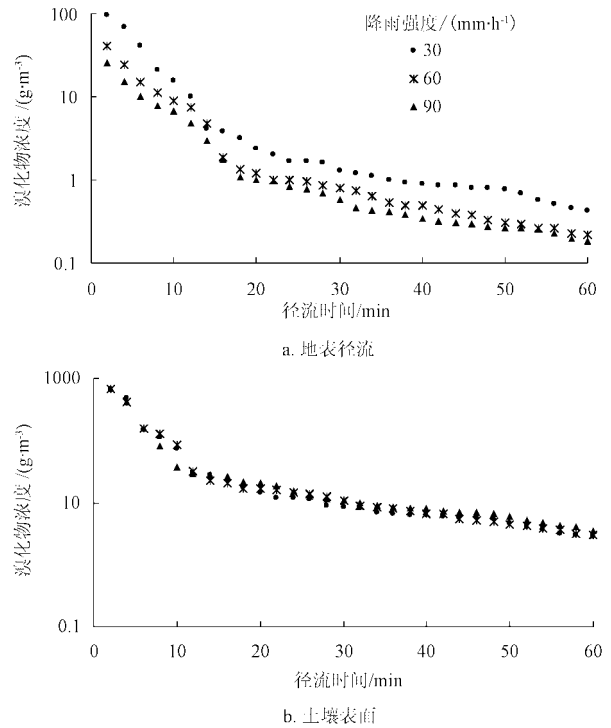
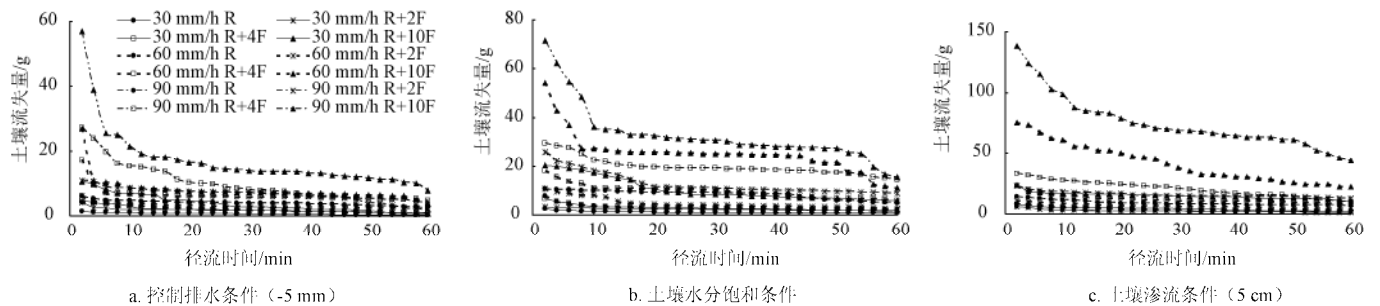


图 2 3 种降雨条件下地表径流和土壤表面溴化物质量浓度
Fig.2 Bromide concentration in runoff and surface soil under three rainfall intensities

失量图可以看出，相同降雨强度下，随着地下水位高度的增加，土壤流失量也增加；相同降雨强度下，随着额外加径流量的增加，土壤流失量增加；相同额外加径流倍数条件下，降雨强度越强，土壤流失量越多；相同水文条件，随着降雨强度的增加或者径流总量的增加，土壤流失均加剧。图 3a，控制排水条件下土壤流失量，在降雨强度为 90 mm/h 时，将额外加径流量从降雨强度的 2 倍增加到 10 倍时，土壤流失量从 7.81 g 增加到 13.86 g，增加了近 2 倍。图 3b 是土壤水分饱和和条件下土壤流失量，在降雨强度为 90 mm/h 时，额外加径流从降雨强度的 2 倍增加到 10 倍时，土壤流失总量从 67.30 g 增加到 132.22 g，也增加了近 2 倍。土壤水分饱和和条件与控制排水条件下相比，相同降雨-径流条件下，土壤流失量增加了 5.3~10.3 倍。



注：R：降雨无外加径流；R+2F：降雨同时外加相当于 2 倍降雨量的模拟径流；R+4F：降雨同时外加相当于 4 倍降雨量的模拟径流；R+10F：降雨同时外加相当于 10 倍降雨量的模拟径流。下同。

图 3 三种水文条件下土壤流失量

Fig.3 Soil loss amount under three hydraulic conditions

图 3c 是土壤渗流条件下土壤流失量, 在降雨强度为 90 mm/h 时, 额外加径流从降雨强度的 2 倍增加到 10 倍时, 土壤流失总量从 74.27 g 增加到 2654.40 g, 增加了 37.8 倍。土壤渗流条件与土壤水分饱和条件下相比, 相同降雨—径流条件下, 土壤流失量增加了 1~20 倍。

2.3 总溴化物流失量

图 4 是 3 种水文状态下, 3 种不同降雨强度与 4 组外加不同倍数径流量条件下, 土壤中养分流失到地表径流过程中, 地表径流中溴化物的浓度值。从图中可以看出, 随着地下水水位的升高, 地表径流中溴化物浓度增加; 随着降雨强度的增加, 溴化物浓度也增加; 相同降雨强度下, 外加径流量倍数越大, 地表径流中溴化物的浓度越低, 但是因径流量增加导致地表径流中溴通量增加; 随着地表径流总量的增加, 溴化物浓度降低, 主要因为稀释作用导致其浓度降低, 但是总的溴化物流失通量增加, 详见表 1。图 4a 是控制排水状态下地表径流中溴化

物浓度值, 从图中可以看出随着径流时间的增加, 地表径流中溴化物的浓度降低。降雨和地表径流时间超过 20 min 以后, 径流中溴化物浓度接近 0, 这意味着土壤表面溴化物质量浓度也基本接近 0。图 4b 是土壤水分饱和状态下地表径流中溴化物浓度值, 随着径流时间的增加, 地表径流中溴化物的浓度和流失通量趋于平稳; 相同降雨强度下, 外加径流量倍数越大, 地表径流中溴化物的浓度越低, 但地表径流中溴化物通量增加。图 4c 是土壤渗流状态下地表径流中溴化物浓度值, 与土壤饱和条件下情况基本相同, 随着径流时间的增加, 地表径流中溴化物的浓度和流失通量趋于平稳; 相同降雨强度下, 外加径流量倍数越大, 地表径流中溴化物的浓度越低, 但地表径流中溴化物通量增加。在土壤渗流状态时, 水头高于地表面造成的对流作用是导致土壤溶质迁移的主要原因, 所以在降雨强度低地表径流量缓慢的条件下, 几乎所有土壤溶质迁移均在对流作用下完成。

表 1 3 种水文条件和 3 种降雨条件下试验数据及对比与拟合扩散参数

Table 1 Experimental data, calculated diffusion parameters, and fitted diffusion parameter under 3 kinds of hydraulic gradients and 3 kinds of rainfall intensity

水文条件	雨强/ (mm·h ⁻¹)	入渗率	承压渗透率	总的溴化物流失通量/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)				土壤中溴化物流失至地表径流的通量/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)			拟合扩散系数 (×10 ⁻⁹ m ² ·s ⁻¹)
				R	R+2F	R+4F	R+10F	对流作用	实测扩散作用	对比扩散作用	
控制排水	30			0.061	0.07	0.081	0.085		0.059~0.065	0.058	1.139~1.255
	60	8.000*	0	0.078	0.082	0.090	0.101	0	0.064~0.071	0.057	1.258~1.395
	90			0.096	0.096	0.101	0.136		0.051~0.085	0.054	1.058~1.763
土壤水分饱和	30			0.277	0.289	0.334	0.627		0.226	0.224	1.130
	60	0	0	0.369	0.439	0.632	1.241	0	0.256	0.224	1.280
	90			0.587	0.754	1.029	1.562		0.267	0.224	1.335
土壤渗流	30			7.642	7.644	7.701	8.118		1.499	0.224	7.495
	60	0	21.750	7.919	7.922	8.147	9.384	6.042	1.729	0.224	8.645
	90			8.901	8.907	9.353	11.471		2.515	0.224	13.473

*注: 原始溴化物浓度 1 g/L; 控制排水条件下渗透率为平均值, 误差为±10%; 平均积水深度为 z=5 mm。控制排水条件下的对比扩散作用值由式 (4) 计算所得

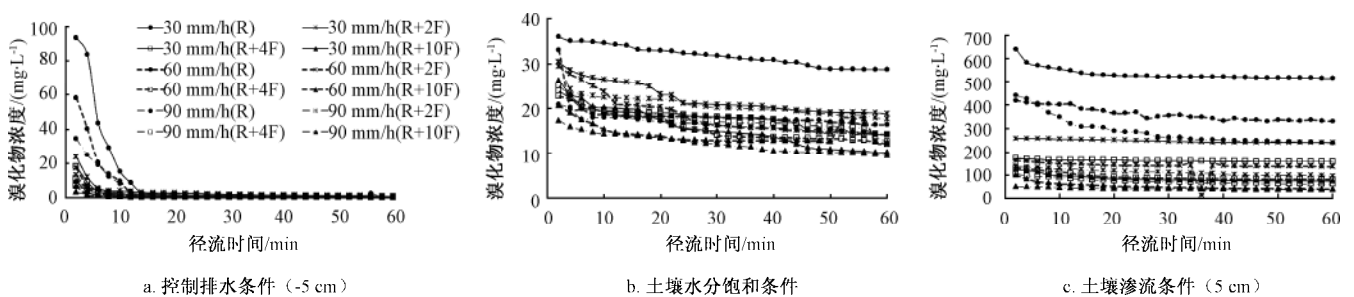


图 4 3 种水文条件地表径流中溴化物质量浓度

Fig.4 Bromide concentration in surface runoff under three hydraulic conditions

2.4 外加径流量对与土壤中溴化物流失量的关系

从图 5 可以看出, 在 3 种水文条件下, 外加水量与土壤中溴化物流失量的关系。在控制排水条件下, 当降雨强度增加时, 尽管外加水量相同, 但是溴化物流失通量降低。在土壤水分饱和条件下, 与控制排水条件下没有明显的区别。在土壤渗流条件下, 与控制排水条件和土壤水分饱和条件下, 总的趋势相同, 即随着总外加水

量的增加, 溴化物流失通量增加。但是在土壤渗流条件下, 在同 3 种不同降雨条件下并没有明显的差别, 维持在一个较为稳定的增加趋势。主要因为在土壤渗流条件下, 对流作用处于主动地位, 降雨对对流作用导致土壤溶质流失的过程影响很小; 同时, 外加水量的稀释作用弱化了降雨强度对土壤溶质迁移的影响。

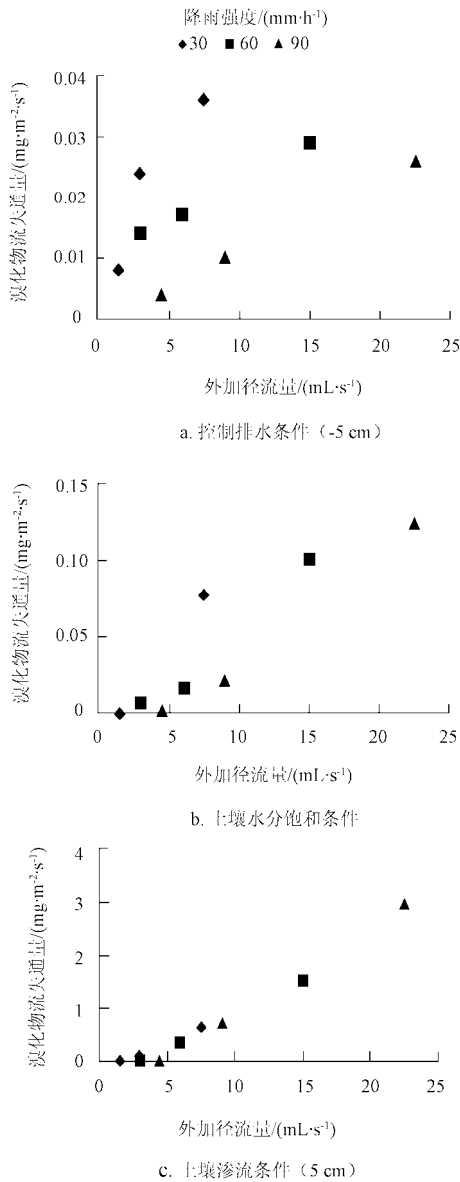


图 5 外加径流引起的溴化物流失通量
Fig.5 Br loss flux by inflow

2.5 土壤溶质迁移模拟

从图 6 可以看出, 3 种水文条件、3 种降雨强度和 12 种外加径流模拟条件下, 单位流量引起的溴化物流失量。这些数据的重合暗示着土壤溶质迁移量同地表径流量之间可以用一定的关系式去模拟。

在模拟降雨-径流过程中, 可以用一个简单的模型去模拟土壤溶质迁移过程的对流-扩散模型。在控制排水条件下, 根据数据模拟值, 土壤溶质迁移至地表径流流失量同地表径流量之间可以用式(2)表示, 可以看出二者之前存在的呈反比例增加关系。

$$J = \alpha Q - \beta J Q \tag{2}$$

根据数据模拟值土壤水分饱和和土壤渗流条件下, 二者之间呈线性关系, 可以用式(3)表示

$$J = \alpha Q + \gamma \tag{3}$$

式中, Q 为地表径流量, $\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; α 为扩散通量系数, mg/m^5 , 与分子扩散系数有关; β 为入渗率系数, s/m^3 ;

γ 为渗出对流量, $\text{mg}/\text{m}^2\text{s}$; β 和 γ 都与地表水位线高度有关。

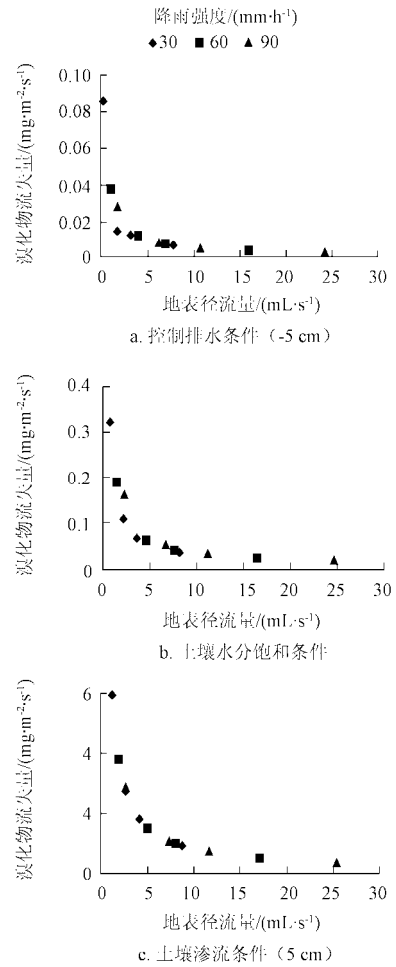


图 6 单位流量引起的溴化物流失量
Fig.6 Br loss flux by unit flow

2.6 土壤溶质迁移对流-扩散过程

根据质量守恒原理, 通过实测地表径流流量和径流中溴化物浓度, 得到溴化物流失量

$$Mass = \sum_{i=0}^n (C_{t_i} \cdot Q_{t_i} \cdot t_i) \tag{4}$$

式中, $Mass$ 为溴化物流失量, g ; t_i 第 i 个实测时间段; C_i 为 t_i 时段的溴化物浓度值实测值, g/m^3 ; Q_i 为 t_i 时段的地表径流量实测值, $\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

根据式(4)和 2.1 预试验结果得到表 1, 3 种水文条件和 3 种降雨条件下试验数据及对比与拟合扩散参数。通过计算从表中可以清楚地看出在同一水文条件下相同降雨强度时, 随着地表径流总量的增加, 溴化物流失量增加。如在控制排水条件下, 扩散作用造成的土壤溴化物流失占据主导地位, 占溴化物流失总量的 93.85% 以上, 土壤流失造成的土壤溴化物流失作用很小, 几乎可以忽略。如在土壤水分饱和条件下, 相同降雨强度 60 mm/h, 额外加径流从降雨量的 2 倍增加到降雨量的 10 倍时, 溴化物流失总量从 0.019 mg 增加到 0.022 mg; 降雨强度为 90 mm/h 时, 额外加径流从降雨量的 2 倍增加到降雨量的

10 倍时, 溴化物流失总量从 0.18 mg 增加到 0.287 mg, 增加了 59.4%。在相同降雨强度下, 随着地下水位的增加, 溴化物流失总量也增加。扩散作用引起土壤中溴化物流失的贡献占据主导作用, 占 57.9%~92.9%; 土壤侵蚀作用在强降雨和额外加径流条件下, 贡献值比较明显, 如在降雨强度 90 mm/h 和额外加 10 倍径流时, 土壤侵蚀作用引起土壤溴化物流失通量占总流失通量的 34.2%。伯努利效应在土壤水分饱和条件下, 贡献值较小^[15]。如在土壤渗流条件下, 对流作用引起的土壤中溴化物流失通量占总流失通量的 54.8%~89.3%; 同土壤水分饱和条件时相同, 土壤侵蚀作用在强降雨和额外加径流条件下, 贡献值比较明显, 如在降雨强度 90 mm/h 和额外加 10 倍径流时, 土壤侵蚀作用引起土壤溴化物流失通量占总流失通量的 32.5%。扩散作用引起溴化物流失通量占总流失通量的 10.0%~18.2%。相同水文条件下, 随着地表径流总量的增加, 溴化物流失量增加, 但是值得指出的是, 在土壤水分饱和条件下, 尽管径流总量 $11.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (降雨强度 90 mm/h) 要小于 $16.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (降雨强度 60 mm/h), 但是前者的溴化物流失总量要大于后者, 原因在于在土壤水分饱和条件下, 扩散作用的贡献对土壤溶质的迁移起着绝对作用; 随着降雨强度的增加扩散系数增大, 这意味着扩散作用引起的土壤溶质迁移加剧。

从表 1 中还可以看出, 拟合扩散系数在土壤水分饱和和控制排水条件下, 溴分子扩散系数是溴分子水中扩散系数 $1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[15] 的 0.94~1.57 倍之间, 变化不大; 但是在土壤渗流状态下, 溴分子扩散系数增加了 5.69~11.03 倍, 与 Ahuja 的研究结果基本相同。这说明, 在渗流作用下, 对流-扩散作用存在着一种交互作用, 能加速分子扩散过程^[8]。

3 结论与讨论

相同降雨条件下, 因土壤水文条件不同, 导致土壤溶质流失量也不同, 即土壤渗流条件下的土壤溶质流失量大于土壤水分饱和条件下的土壤溶质流失量大于控制排水条件下的土壤溶质流失量。在土壤渗流和土壤水分饱和条件下土槽中土壤处于饱和状态, 土壤的抗侵蚀性和抗冲蚀性大大减弱。在强降雨条件下, 表层底下的土壤暴露在雨滴打击下, 不仅容易产生面蚀和沟蚀, 使得土壤粘结力被降低更容易被径流携带导致流失, 而且为地表径流提供了新的土壤溶质源, 所以降雨加剧了土壤侵蚀和土壤养分流失。

通过室内模拟 3 种水文条件下降雨-径流试验, 研究降雨-径流共同作用下溴分子扩散系数, 试验结果表明: 在土壤渗流条件下, 土壤表面在降雨条件下更容易被侵蚀流失, 分子扩散系数扩大倍数要高于其他水文条件下。随着降雨强度的增加, 由扩散作用引起的土壤流失通量增多。特别是在土壤渗流作用下, 对流-扩散作用存在着一种交互作用, 能加速分子扩散过程, 溴分子扩散系数增加了 5.69~11.03 倍, 它随着降雨强度的增加而增加, 且随着地下水水位线的提高而增加。

可以用一个简单的二维模型模拟土壤溶质迁移过程

的对流-扩散模型, 在控制排水条件下, 土壤溶质流失量同地表径流量呈反比例增加函数; 土壤水分饱和和土壤渗流条件下, 土壤溶质流失量同地表径流量呈线性增加。

[参 考 文 献]

- [1] Gao B, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff [J]. *J Hydrol*, 2005, 308(4): 313-320.
- [2] Havis R N, Smith R E and Adrian D D. Partitioning solute transport between infiltration and overland flow under rainfall [J]. *Water Resour Res* 1992, 28(10): 2569-2580.
- [3] Knisel W. CREMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems [R], U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report, 1980, 26: 640-641.
- [4] Wallach R, Galina G, Judith R. A comprehensive mathematical model for transport of soil-dissolved chemicals by overland flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(2): 85-99.
- [5] Walton R S, Volker K L, Bristow K R and et al. 2000. Solute transport by surface runoff from low angle slopes: Theory and application. *Hydrol. Processes* 14: 1139-1158.
- [6] Zheng F, Huang C, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff[J]. *J Environ, Qual*, 2004, 33(6): 2174-2182.
- [7] 王全九, 王辉. 黄土坡面土壤溶质随径流迁移有效混合深度模型特征分析[J]. *水利学报*, 2010, 41(6): 671-676. Wang Quanjiu, Wang Hui. Analysis on the feature of effective mixing depth model for soil solute transporting with surface runoff on loess slope[J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2010, 41(6): 671-676. (in Chinese with English abstract)
- [8] Ahuja L R, Lehmen O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12(1): 34-40.
- [9] 田坤, Huang Chihua, 张广军. 土壤溶质迁移至地表径流过程的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 97-102. Tian Kun, Huang Chihua, Zhang Guangjun. Laboratory simulation experiment on chemical transport from soil to surface runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- [10] 田坤, Huang Chihua, 张广军, 等. 土壤溶质迁移过程的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 1-5. Tian Kun, Huang Chihua, Zhang Guangjun, et al. Chemical transfer from soil into surface runoff[J]. *Journal of soil and water conservation*. 2009, 23(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [11] 田坤, Huang Chihua, 张广军, 等. 不同地下水深度条件下地表径流过程中溶质迁移规律研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 11: 34-41. Tian Kun, Huang Chihua, Zhang Guangjun, et al. Chemical transport from soil into surface runoff under different ground

- water tables[J]. Journal of Northwest Agricultural and Forestry University: Nat Sci Ed, 2009, 11: 34—41. (in Chinese with English abstract)
- [12] APHA (American public health association. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 20th ed; Washington, DC: American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation, 1998.
- [13] Bohren Karin, Smith Parricia. Quik chem method 10-135-21-2-B. Determination of bromide by flow injection analysis [R]. Denver, CO: Application group LLC. 2003.
- [14] Kevin Swittala Application Group. Quik chem method 12-135-21-2-A. Determination of bromide in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis[R]. Denver, CO: Application group LLC. 2003.
- [15] Warrick A W. Soil water dynamics[M]. USA, Oxford: Oxford University Press, 2003.

Movement of soil solute under simulated rainfall runoff

Tian Kun^{1,2}, Huang Chihua^{3*}, Wang Guangqian¹, Tian Peng⁴, Fu Xudong¹, Guo Haidan¹

- (1. Department of Hydraulic Engineering, State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of resources and environment, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China; 3. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-2077, USA; 4. College of water resources and architectural engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Raindrop impact can increase solute transport process from soil into surface runoff. A laboratory flow cell and experimental procedures to study chemical transport from soil to runoff as a diffusion process were developed. Different vertical hydraulic gradients were imposed by setting the flow cell to free drainage condition (-5 cm), saturation condition and artesian seepage conditions (5 cm) under 30, 60 and 90 mm/h simulated rainfall and 2, 4 and 10 times simulated flow rate to rainfall. The experimental data clearly demonstrated that all of rainfall intensity, total flow rate, and water table can accelerate diffusion process. There is an interaction between diffusion and convection to increase chemical loss from soil into runoff under artesian seepage conditions. Chemical transport has a significant relationship to rainfall intensity, surface runoff flow rate and groundwater table.

Key words: rainfall, runoff, diffusion, soil solute transport