

不同地下水位深度条件下地表径流过程中 溶质迁移规律研究

田 坤¹, HUANG Chi-hua², 张广军¹, 郑粉莉¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 美国农业部 国家土壤侵蚀试验室, West Lafayette 47907-2077)

【摘 要】 【目的】探明不同地下水位深度条件下,地表径流过程中溶质的迁移规律。【方法】采用模拟试验,研究 3 种地下水位(地下水位与地表持平、低于地表 5 和 10 cm)及不同地表径流流速下(90, 120, 200, 250 mL/s),土壤溶质迁移到地表径流过程中,其在 3 种途径(土壤侵蚀、伯努利效应、扩散)下的变化规律。【结果】当地表径流流速小于 200 mL/s 时,随着地表径流流速的增加,土壤溶质流失加剧,伯努利效应和扩散作用是引起土壤溶质流失的主导因素;当地表径流流速大于 200 mL/s 时,土壤侵蚀是引起土壤溶质流失的主导因素。径流 60 min 后,当地下水位低于地表 5~10 cm 时,随着土层深度的增加,土壤剖面中溴化物质量浓度则逐渐增大。当地下水位与地表平时,混合层深度为 0.9~4.6 mm;当地下水位低于地表 5 和 10 cm 时,混合层深度均小于 2.5 mm。【结论】土壤溶质迁移过程与地表径流流速和地下水位高低有重要关系。

【关键字】 土壤;地下水位;土壤溶质;地表径流

【中图分类号】 S157

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)11-0193-08

Chemical transport from soil into surface runoff under different ground-water tables

TIAN Kun¹, HUANG Chi-hua², ZHANG Guang-jun¹, ZHENG Fen-li¹

(1 College of Recourses and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab, West Lafayette, IN 47907-2077, USA)

Abstract: 【Objective】 The study was conducted to prove chemical transport processes under different soil hydrologic conditions. 【Method】 We developed a laboratory flow cell and experimental procedure to quantify chemical transport from soil to runoff water by each of the individual process: 1) erosion; 2) Bernoulli effect; and 3) diffusion under groundwater table with the same height, 5 cm, and 10 cm beneath the soil surface by 4-kinds of surface runoff flow rates (90, 120, 200, 250 mL/s). 【Result】 Our data proved that soil chemical loss aggravated as runoff flow rate increased; nevertheless, we had additional quantitative data describing the contribution from each individual chemical loading process under different surface runoffs and soil hydrologic conditions. When surface runoff velocity was less than 200 mL/s, Bernoulli effect and diffusion had a great contribution to chemical loss from soil to runoff. On the contrary, erosion was the dominant factor for chemical loss. After 60-min surface runoff, when groundwater table was 5—10 cm lower than soil surface. Bromide concentration increased in soil profile as soil depth increased. According to our data, the mixing zone depth reached between 0.9—4.6 mm when the under groundwater table was of the same height with soil surface, and less than 2.5 mm when the under groundwater was 5—10 cm lower than

* 【收稿日期】 2009-03-17

【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)

【作者简介】 田 坤(1977—),女,黑龙江佳木斯人,在读博士,主要从事土壤化学物质迁移研究。

【通信作者】 Huang Chi-hua(1951—),男,美国籍中国台湾人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀及水土流失研究。

E-mail: chihua@purdue.edu

soil surface. 【Result】 Chemical transport has a significant relationship with surface runoff flow rate and groundwater table.

Key words: soil; ground-water table; soil chemical; surface runoff

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全国区域水质的影响,不仅是土壤学近期的重点研究内容,也是我国急需解决的资源环境问题之一。在一般地表径流或降雨条件下,地表土层扰动与化学物质迁移有着密切的关系。1983年,Ahjua 等^[1]提出了混合层的概念。Zhang 等^[2]的研究表明,在降雨过程中,土壤在雨滴打击及径流冲刷作用下,形成一定厚度的扰动层,称之为“混合层”;混合层内的溶质参与径流迁移,而该层以下的溶质不参与径流迁移。Wallach 等^[3]提出在土壤表面存在一个完全混合的土层,其在有效深度内溶质浓度均匀,该深度被称为“有效转移深度”。王全九等^[4]提出了等效径流迁移深度的概念(Effective depth of transfer, EDT),认为土壤有效混合深度包括等效入渗深度和等效径流迁移深度 2 部分。近几

年的研究结果表明,混合层深度一般为 0~10 mm^[5-10]。但前人研究的地下水位多低于地表,而对地下水位与地表处于同一水平时的相关研究较少。本试验模拟地下水位高度 3 个水平(地下水位与地表持平、低于地表 5 和 10 cm),研究不同地表径流流速下,土壤溶质迁移到地表径流过程中,其在 3 种途径(扩散、伯努利效应和土壤侵蚀)下的变化规律,并探讨了混合层的深度,以期为探明土壤溶质迁移的机理,以及为校正现有模型奠定一定的理论基础。

1 溶质迁移途径

当地下水位低于地表或与地表持平时,土壤溶质通过扩散、伯努利效应^[11]和土壤侵蚀 3 种途径迁移至地表。理论上,以示踪剂溴化钠在土壤中的迁移为例,总的溴化物流失通量表示为:

$$J=J_E+J_B+J_D=-\frac{\theta_s \cdot \int_0^t C_t \cdot q_t \cdot dt}{\rho_b \cdot A}-K \frac{v^2}{2g} \int_0^t C_t \cdot dt=D \int_0^t \frac{\partial C_t}{\partial Z} dt。 \tag{1}$$

式中: J 为总的溴化物流失通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), J_E 为由土壤侵蚀造成的溴化物流失通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), J_B 为由伯努利效应导致的溴化物流失通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), J_D 为由扩散造成的溴化物流失通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), θ_s 为土壤饱和含水率(m^3/m^3), C_t 为土壤表面溴化物质量浓度(mg/L), q_t 为随时间变化的土壤流失量(g/s), ρ_b 为土壤容重(kg/m^3), v 为地表径流流速(m/s), A 为径流土槽的表面面积(m^2), K 为饱和导水系数, g 为重力加速度(m/s^2), l 为土层深度(m), t 为径流时间(s), D 为扩散系数(m^2/s), Z 为地表径流深度(m)。

当地下水与地表持平时,公式(1)可简化成:

$$J=-\frac{q \cdot \theta_s \cdot C_0}{\rho_b \cdot A}-K \frac{v^2}{2g} C_0-D \frac{\partial C_0}{\partial Z}。 \tag{2}$$

式中: C_0 为土壤溴化物的原始质量浓度(本试验中 $C_0=4 \text{ g}/\text{L}$), q 为土壤流失总量(g)。

2 材料与方法

2.1 供试土壤

试验在美国农业部国家土壤侵蚀试验室人工降雨大厅进行。供试土壤为印第安纳州 Crosby-Miami 黄绵土,其机械组成为:黏粒 21%,粉粒 60%,

砂粒 19%,属于粉砂壤土,有机质含量为 20 g/L,试验用土为耕作层土壤(0~20 cm)。

2.2 试验装置

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填塞保证均匀供水。在土槽底部铺设一层透水布,防止水洗砂堵塞排水口;在透水布上铺设一层 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。在水洗砂上面铺一层透水布,分离砂层和土层。为保证供试土壤的均匀性及土壤容重接近天然土壤的容重,将供试土壤分层填装在透水布之上。每 10 mm 为 1 土层,共 12 层。将土槽与供水槽连接,供水槽从土槽底部由下向上供给水分。土槽其他边额外增加 10 cm 高度钢板,其目的是避免因土壤溅蚀而引起土壤溶质流失(图 1)。将去离子水加入到供水槽中,供水槽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的土壤侵蚀。

2.3 扩散系数的确定

基于质量守恒定律和完全混合原理,长时间径流后,径流中的溴化物质量浓度应该等于混合层中

溴化物的质量浓度。首先采用 500 mg/L 溴化钠使土壤饱和,然后在其上面设置不动的 0.02 m 水层,马里奥特瓶供水线与土槽水面持平,每 2 min 取 5 mL 样品,持续 60 min。可以得到溴化物流失通量先随着时间的增加而增加,后趋于平稳达到固定值

的曲线。再分别用 1,2 和 4 g/L 溴化钠溶液饱和土壤,重复上述试验,均重复 3 次。通过试验计算出饱和土壤中溴化物的扩散系数,其值为 1.2×10^{-9} m²/s,与水中的溴化物扩散系数基本相同^[12]。

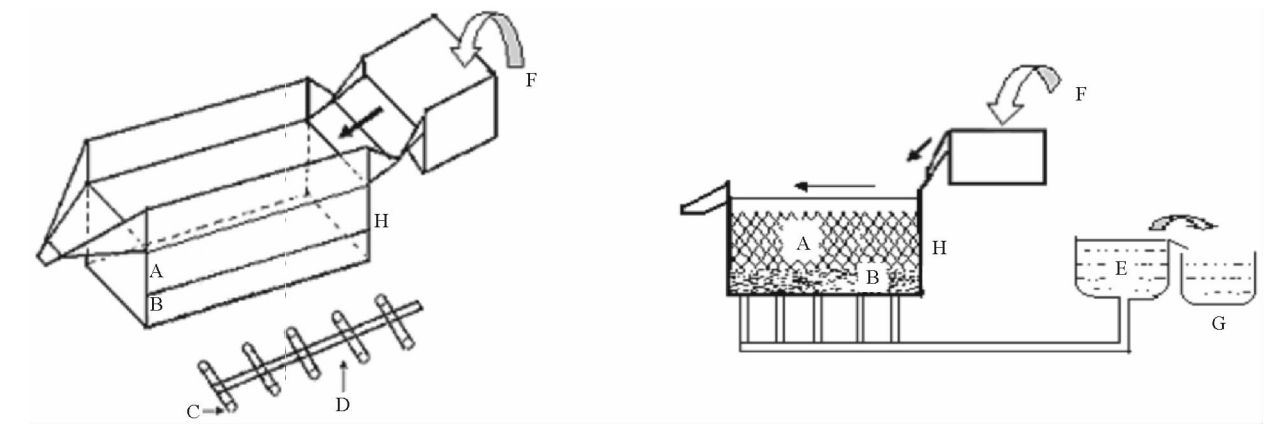


图 1 试验装置示意图

A. 土层;B. 砂层;C. 排水孔;D. 连通管与供水槽连接;E. 供水槽;F. 去离子水;G. 收集槽;H. 土槽

Fig. 1 Experimental setup

A. Soil layer;B. Gravel layer;C. Drainage holes;D. Connect tubing with supply water tank;E. Supply water tank;
F. Deionized water;G. Collect water tank;H. Soil box

2.4 试验设计

本试验模拟 3 个地下水位高度,即地下水与地表持平及低于地表 5 和 10 cm,在不同水位高度下均采用 4 组不同流速径流,试验土槽设置为水平(坡

度为 0°),具体试验处理如表 1 所示。采用小塑料漂浮物测定土槽表面水流流速可知,当地表径流流速分别 90,120,200,250 mL/s 时,对应土槽表面的水流流速为 0.07,0.11,0.15 和 0.24 m/s。

表 1 不同地下水位条件下地表径流试验设计方案

Table 1 List of runoff experimental treatments

地下水位位置 Ground-water table	土壤容重/ (g · cm ⁻³) Soil bulk density	土壤饱和含水率/ (m ³ · m ⁻³) Soil saturation water content	土壤孔隙度/% Soil porosity	径流流速* / (mL · s ⁻¹) Runoff velocity	重复次数 Repetition
与地表持平 Surface	1.35	0.56	49.0	90	3
				120	
				200	
				250	
低于地表 5 cm Subsurface 5 cm	1.35	0.56	49.0	90	3
				120	
				200	
				250	
低于地表 10 cm Subsurface 10 cm	1.35	0.56	49.0	90	3
				120	
				200	
				250	

注:*,每个试验径流流速的变异系数均为 10%。
Note:*. The variation coefficients of simulated runoff flow rate were 10%.

2.5 试验方法

2.5.1 土壤侵蚀引起的溴化物流失模拟试验 在预试验过程中,当土壤径流流速较慢时,土壤侵蚀现象多发生在前 3 min;当地表径流加快时,土壤侵蚀将持续至径流开始 6 min 左右后逐渐消失;当径流

流速过大时,在径流开始前 8 min 内土壤侵蚀从最高值逐渐减低,后趋于平稳,基本不变。所以本试验只研究径流开始 8 min 内土壤侵蚀造成的土壤流失量及溴化物流失通量。

2.5.2 扩散和伯努利效应引起的土壤溴化物流失

模拟试验 首先,使试验开始前和试验过程中的供试土壤均处于水分饱和状态。配置 4 g/L 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,使供试土壤被溴化钠溶液浸泡至饱和状态。即将盛有与土壤溶液相同质量浓度溴化钠溶液的马氏瓶与 10 个排水孔连接,使溴化钠溶液缓慢地浸泡径流土槽中的供试土壤,使流出的溴化钠质量浓度接近其原始质量浓度(4 g/L)。为了溴化钠溶液能均匀分布在土壤中,土壤被饱和 24 h,使土壤中的溴化钠溶液质量浓度接近 4 g/L,径流土槽的温度维持在 20 ℃。在试验开始之前,在土壤表面约 2 mm 深度取样,测定土样水分和溴化物的含量,当其含量接近平均值方可开始试验。因本试验不考虑土壤侵蚀的影响,故在进水入口处和土壤表面铺设透水性较好的纱布,以避免土壤流失及入口处土壤侵蚀过大。然后将土槽与马氏瓶分离,与供水槽连接,当供水槽水面与径流水面持平,分别在不同地表径流流速(90, 120, 200, 250 mL/s)下进行模拟试验,并采样分析。

2.6 样品采集与分析

2.6.1 土壤侵蚀引起的溴化物流失模拟试验 采用 4 种不同的地表径流流速,分别在 3 种不同地下水位高度(即与地表持平、低于地表 5 和 10 cm)下,从径流开始 8 min 内,每 min 收集 1 次径流样品,采集时间为 60 s,连续收集,每一组试验完毕后,于 120 ℃烘干水样,称质量计算径流样中的泥沙含量,重复 3 次。根据公式(2)计算总的溴化物流失通量。

表 2 不同地表径流流速下由土壤侵蚀引起的土壤流失总量和总的溴化物流失通量(初始 8 min)

Table 2 Total soil loss and bromide flux from soil erosion during the initial 8 minutes under different runoff flow rates

指 标 Index	地下水位位置 Groundwater table											
	与地表持平 Surface				低于地表 5 cm Subsurface 5 cm				低于地表 10 cm Subsurface 10 cm			
	90 mL/s	120 mL/s	200 mL/s	250 mL/s	90 mL/s	120 mL/s	200 mL/s	250 mL/s	90 mL/s	120 mL/s	200 mL/s	250 mL/s
土壤流失总量/g Soil erosion	2.91	4.26	25.22	152.60	0.96	1.00	20.45	100.59	0.54	0.59	15.41	89.51
总的溴化物流失 通量/(mg·m ⁻²) Bromide loss flux	0.01	0.02	1.12	5.13	0	0.01	0.52	2.54	0	0	0.25	0.34

注:土壤流失总量为 3 次试验的平均值。
Note:The value of total soil loss was the average of 3-time experimental data.

从图 2 可以看出,当地表径流流速小于 200 mL/s 时,土壤侵蚀及土壤中溴化物流失均发生在地表径流初期 1~2 min;在地表径流后期(2~8 min),土壤溴化物流失通量趋于零。当地表径流流速为 200~250 mL/s 时,土壤中溴化物流失随着时间的延长而减少,在径流初期(0~2 min),土壤溴化

2.6.2 扩散和伯努利效应引起的土壤溴化物流失模拟试验 于径流开始 1 min 之后开始取样,在径流初期(1~30 min)间隔 1~3 min 采样 1 次,径流中期(30~50 min)间隔 5 min 采样 1 次,径流后期(50~60 min)间隔 10 min 采样 1 次,用秒表计时采取持续大约 1 min 的径流流量,并称质量,计算径流流量,用 2.5 μm 滤纸(Whatman)过滤 50 mL 样品,24 h 之后采用文献[13-14]的方法用 Lachat 测定溴化物含量。每次试验均重新更换土壤,然后分别将供水槽水面降低 5 和 10 cm,重复上述试验。当地下水位低于地表时,在地表径流结束后,分别在径流土槽中分层取土样。每层取 6 个均匀分布在土壤表面的土样,采用文献[14-15]的方法测定溴化物含量。将测得的溴化物含量与地表径流流速相乘再除以径流面积,即可得到溴化物流失通量。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀引起土壤溴化物迁移至地表径流中的流失通量

从表 2 可以看出,随着地表径流流速的增加,土壤流失加剧,从而导致土壤中溴化物迁移至地表径流中的流失通量增加。与 90 mL/s 流速相比,250 mL/s 流速条件下,地下水位与地表持平、低于地表 5 和 10 cm 时总的溴化物流失通量分别增加了约 50,100,160 倍。当径流流速相同时,地下水位距地表距离越小,土壤流失总量及总的溴化物流失通量均越大。

物流失通量较大,之后随着土壤侵蚀量的逐渐降低,溴化物流失通量趋于稳定。当径流流速为 250 mL/s 时,地下水位与地表持平条件下的土壤溴化物流失通量分别是地下水位低于地表 5 和 10 cm 条件下的1.2 和1.5 倍。

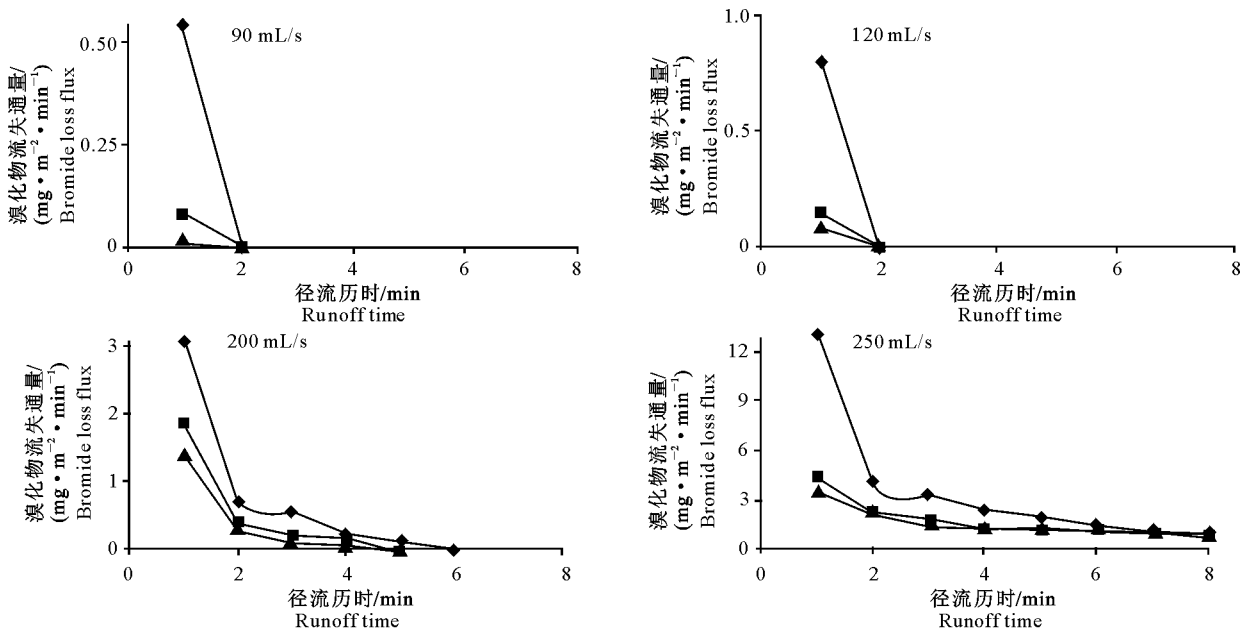


图 2 不同地表径流流速下由土壤侵蚀引起的溴化物流失通量变化

—◆—, 地下水位与地表持平; —■—, 地下水位低于地表 5 cm; —▲—, 地下水位低于地表 10 cm

Fig. 2 Bromide flux from soil erosion per min during the initial 8 minutes under different runoff flow rates

—◆—, Surface; —■—, Subsurface 5 cm; —▲—, Subsurface 10 cm;

3.2 扩散和伯努利效应引起的土壤溴化物流失量
不同径流流速下地表径流中的溴化物质量浓度

及土壤溴化物流失量的变化见图 3。

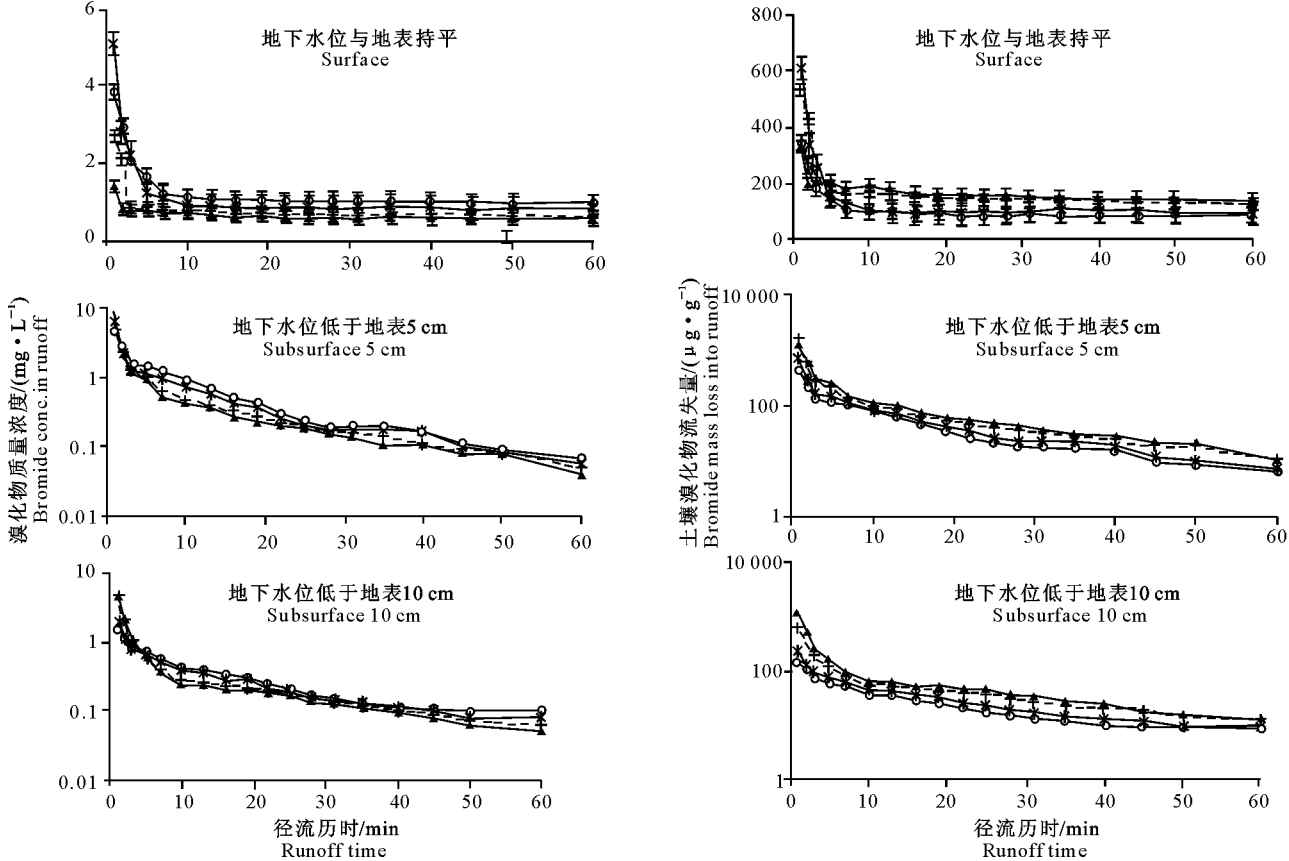


图 3 不同径流流速下地表径流中溴化物质量浓度及土壤溴化物流失量的变化

—○—, 90 mL/s; —*—, 120 mL/s; —+—, 200 mL/s; —▲—, 250 mL/s

Fig. 3 Bromide concentration in surface runoff and bromide mass loss from soil to runoff

图 3 显示,随着径流时间的延长,溴化物质量浓度均降低,其中地表水水位距地表距离越远,溴化物质量浓度降低幅度越大。随着地表径流流速的增加,溴化物质量浓度降低。土壤中的溴化物流失量变化显示出伯努利效应,即地表径流流速越大,溴化物流失量越大。

当地下水位低于地表时,径流期间土壤溴化物的迁移去向有 3 部分:一部分进入地表径流,污染地表水;一部分依然存在于土壤中,向土壤深层移动;另一部分进入地下水,污染深层地下水。本试验测定了地下水位低于地表时土壤剖面中溴化物的质量浓度,研究溴化物在土壤剖面中的分布,结果见图 4。当地下

水与地表持平时,土壤剖面的溴化物质量浓度基本不变,等于原始质量浓度值(4 g/L),故图 4 中未列出。图 4 显示,径流 60 min 后,土壤中的溴化物质量浓度随着土层深度的增加而增大。当地下水位低于地表 5 cm,土层深度为 2~12 cm 时,地表径流流速越大,土壤剖面中的溴化物质量浓度越低;土层深度为 0~1 cm 时,土壤剖面中的溴化物质量浓度基本相同,且变化不大。当地下水位低于地表 10 cm,土层深度为 3~12 cm 时,地表径流流速越大,土壤剖面中的溴化物质量浓度越低;在 0~1 cm 土层,溴化物质量浓度基本相同。当地表径流流速及土层深度相同时,地下水位越高,其溴化物质量浓度也越高。

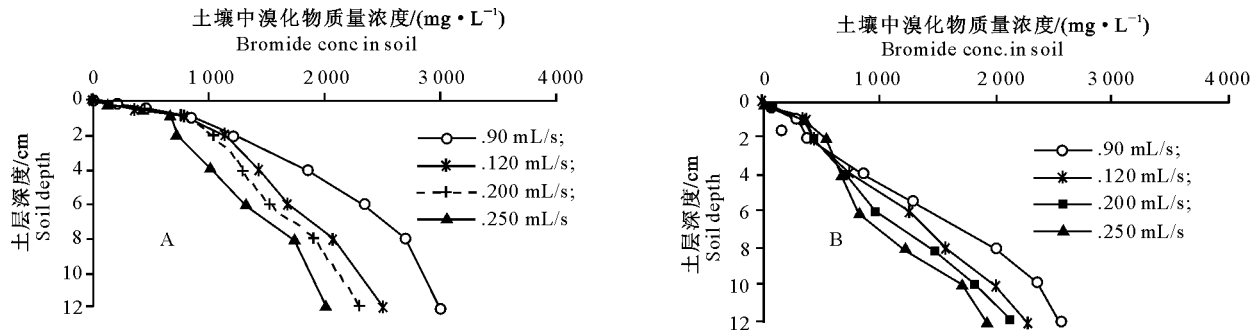


图 4 不同径流流速下溴化物在土壤剖面中的分布
A. 地下水位低于地表 5 cm; B. 地下水位低于地表 10 cm

Fig. 4 Distribution map of bromide concentration in soil depth profile under different runoff flow rates
A. Subsurface 5 cm; B. Subsurface 10 cm

在土壤表面铺设透水布控制土壤侵蚀前提下,模拟地表径流过程时发现,无论是地下水位与地表持平还是地下水位低于地表,当地表径流流速趋近于零时,伯努利效应和对流效应引起的土壤溴化物流失量接近于零,土壤溶质迁移流失量是扩散作用导致的;增加地表径流流速,土壤溶质迁移流失量是伯努利效应和扩散效应共同作用的结果,减去相应的扩散作用导致土壤溶质迁移量,即可得到伯努利效应导致的土壤溶质迁移量。从表 3 可以看出,无论是在地下水位与地表持平,还是在地下水位低于地表的条件下,当流速为 90~120 mL/s,扩散作用对土壤中化学物质

流失起着重要的作用,扩散作用引起的土壤溴化物流失通量占溴化物总流失量的 51.2%~80.6%;随着地表径流流速的增加(120~200 mL/s),伯努利效应比较明显,当地下水位低于地表 5 cm 时,伯努利效应引起的土壤溴化物流失通量占溴化物总流失量的比例从 40.6%升至 47.5%;当地下水位低于地表 10 cm 时,该比例从 48.8%升至 53.0%;在地表径流流速为 90~200 mL/s 时,土壤侵蚀造成的土壤溴化物流失通量较少,可以忽略不计;当地表径流流速达到 250 mL/s 时,土壤侵蚀作用明显,由其引起的土壤溴化物流失通量占总量的 50%以上。

表 3 不同径流流速下不同迁移途径引起的溴化物流失通量

迁移途径 Transport path	地下水位与地表持平 Surface				地下水位低于地表 5 cm Subsurface 5 cm				地下水位低于地表 10 cm Subsurface 10 cm			
	90	120	200	250	90	120	200	250	90	120	200	250
	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s	mL/s
伯努利效应 Bernoulli Effect	0.029	0.073	0.135	0.279	0.025	0.065	0.126	0.227	0.021	0.041	0.087	0.094
扩散 Diffusion	0.117	0.107	0.085	0.080	0.100	0.095	0.089	0.077	0.042	0.043	0.057	0.062
土壤侵蚀 Erosion	0.000	0.000	0.070	0.530	0.000	0.000	0.050	0.460	0.000	0.000	0.020	0.335
合计 Total	0.146	0.180	0.290	0.889	0.124	0.160	0.265	0.764	0.063	0.084	0.164	0.491

3.3 混合层深度的确定

根据质量守恒定量,假定混合层存在,地表径流过后只有混合层处土壤中的化学物质参与地表径流,混合层中溴化物含量与地表径流中溴化物含量相等。混合层深度与土壤的饱和含水率、土壤中化学物质的原始浓度、径流面积和总的化学物质流失通量有关,其可用下式计算:

$$GMD=\frac{\sum BrM}{\theta \cdot C_0 \cdot A}。$$
 (3)

式中: GMD 是混合层深度(m), $\sum BrM$ 是总的化学

物质流失通量(g), θ 是土壤的饱和含水率(m^3/m^3), C_0 是土壤中化学物质的原始质量浓度(mg/L), A 是径流面积(m^2);

根据方程(3),可以得到地下水位低于地表状态下的理论混合层深度(图 5)。从图 5 可以看出,混合层深度随着地表径流流速的增加和地下水位的升高而增大。地下水位低于地表 5~10 cm,混合层深度小于 2.5 mm,这与 Zhang 等^[2]的研究结论一致。

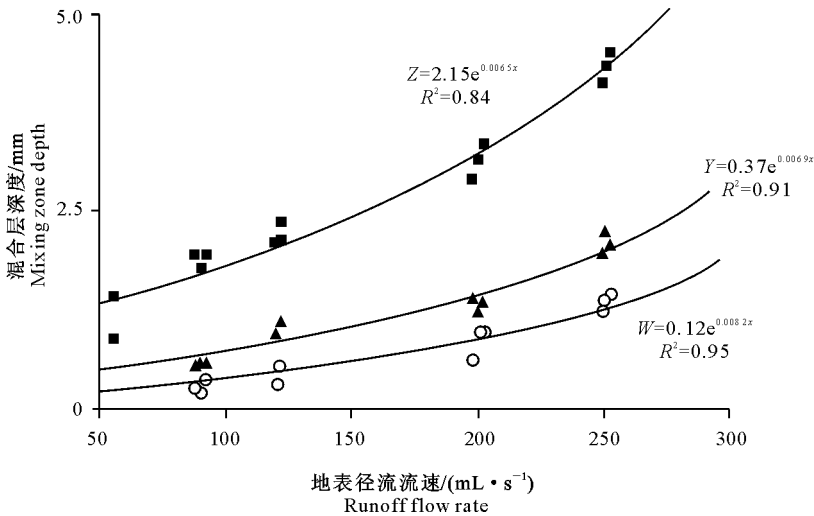


图 5 不同地下水位高度下的混合层深度
■. 地下水位与地表持平(Z);▲. 地下水位低于地表 5 cm(Y);○. 地下水位低于地表 10 cm(W)
Fig. 5 Mixing zone depth when under- groundwater was lower than soil surface
■. Surface (Z);▲. Subsurface 5 cm (Y);○. Subsurface 10 cm (W)

利用指数对混合层深度与地表径流流速的关系进行拟合可知,相关系数均在 0.84 以上,其中在地下水位低于地表条件下,二者的相关系数均大于 0.9,说明混合层深度与地表径流流速具有较好的相关性。

4 结 论

1)地表径流流速较低时(90~200 mL/s),土壤流失总量较小,土壤侵蚀引起的溴化物流失通量较小,可以忽略;但是随着地表径流流速的增加(200~250 mL/s),土壤侵蚀作用明显,其产生的土壤流失总量增大,携带土壤溶质流失加剧。地表径流流速较低时(90~120 mL/s),扩散作用对土壤溶质流失起着主导作用;随着地表径流流速的增加(120~200 mL/s),伯努利效应引起的土壤溶质流失通量增大,伯努利效应对土壤溶质迁移具有重要作用,其中径流流速大于 200 mL/s 时,伯努利效应引起的土壤溶质流失量占总流失量的一半以上。这表明当

土壤表面坡度增加时,土壤溶质流失会随之加剧。

2)当地下水位低于地表 5~10 cm 时,径流 60 min 后,土壤剖面中的溴化物质量浓度随着土层深度的增加而增大;地表径流流速越大,土壤剖面中的溴化物质量浓度越小。

3)当地下水位与地表持平时,混合层深度为 0.9~4.6 mm;地下水位低于地表时,混合层深度小于 2.5 mm,这表明常用的溶质迁移和非点源污染模型中(如 SWAT^[16], AnnAGNPs^[17])的混合层深度值(10 mm)已不能准确预测土壤化学物质的迁移量。本研究中,混合层深度随着地表径流流速的增加而增大,且呈指数关系。

[参考文献]

[1] 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: 34-40.
[2] Zhang X C, Norton L D, Lei T, et al. Coupling mixing zone concept with convection diffusion equation to predict chemical

transfer to surface runoff [J]. Transactions of the ASAE, 1999,42:987-994.

[3] Wallach R. Transfer of chemical from solution to surface runoff: A diffusion-based soil model [J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52:612-618.

[4] 王全九,沈冰,王文焰. 降雨动能对溶质径流过程影响的试验研究 [J]. 西北水资源与水工程, 1998,9(1):17-21.
Wang Q J, Shen B, Wang W Y. Experimental study of effects of rainfall energy on solute runoff process [J]. Water Resources and Water Engineering, 1998,9(1):17-21. (in Chinese)

[5] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Effective raindrop kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff [J]. Soil Science, 2002,167(6):369-376.

[6] Havis R N, Smith R E, Adrian D D. Partitioning solute transport between infiltration and overland flow under rainfall [J]. Water Resour Res, 1992,28(10):2569-2580.

[7] Sharpley A N. An improved soil sampling procedure for the prediction of dissolved inorganic phosphate concentrations in surface runoff from pasture [J]. J Environ Qual, 1978,7:455-456.

[8] Lehman O R, Ahuja L R. Interflow of water and tracer chemical on sloping field plots with exposed seepage faces [J]. Journal of Hydrology, 1985,76: 307-317.

[9] Donigan A S. Simulation of nutrient loading in surface runoff with the NPS model [M]. Athens, GA: US Environmental Protection Agency, 1977.

[10] 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.

[11] Warrick A W. Soil water dynamics [M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.

[12] Wallach R, Van Genuchten M T, Spencer W F. Modeling solute transfer from soil to surface runoff: The concept of effective depth of transfer [J]. J Hydrology, 1989,109:307-317.

[13] American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 20th Ed. Washington, DC: APHA, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation, 1998.

[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]. Loveland: Application group LLC, 2003.

[15] Bohren K, Smith P. Quik chem method 10-135-21-2-B. Determination of bromide by flow injection analysis [R]. Loveland: Application group LLC, 2003.

[16] Neitsch S L, Arnold J R, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation Version 2005 [M]. Texas: Grassland Soil Water Research Laboratory, 2005.

[17] Binger R L, Theurer F D, Yuan Y. AnnAGNPS technical processes documentation. Version 4. 0 [M]. Oxford: USDA-ARC National Sedimentation Laboratory & USDA-NRCS National Water and Climate Center, 2007.

(上接第 192 页)

[15] 宋秋华,李凤民,李世清. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响 [J]. 生态学报, 2002,22(12):2125-2132.
Song Q H, Li F M, Li S Q. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologic Sinica, 2002,22(12):2125-2132. (in Chinese)

[16] Carter M R, Angers D A, Kunelius H T. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994,58:1194-1199.

[17] 刘满强,胡锋,陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展 [J]. 生态学报, 2007,27(6):2642-2650.
Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6):2642-2650. (in Chinese)

[18] Gregorich E G, Gater M R, Angers D A, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils [J]. Can J Soil Sci, 1994,74:367-385.

[19] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, et al. Grassland soil as affected by 27 annual applications of six rates of fertilizer N [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003,66:33-41.

[20] Curtin D, Mccallum F M, Williams P H. Phosphorus in light fraction organic matter separated from soils receiving long-term applications of superphosphate [J]. Biology Fertilizer Soils, 2003,37:280-287.

[21] 徐阳春,沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响 [J]. 土壤学报, 2004,41(1): 87-92.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizer on supplying characteristics of nitrogen in soil and soil particle fractions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(1):87-92. (in Chinese)