

灌水量对土壤中污染物运移规律影响的研究^{*}

曹红霞¹, 康绍忠¹, 何 华²

(1 西北农林科技大学 教育部旱区农业水土工程重点实验室; 2 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 以溴离子(Br^-)为示踪剂, 对不同次灌水量(30, 60, 90 mm)下均质扰动土柱中污染物运移规律进行了研究。结果表明, 每30 mm的有效灌水量使 Br^- 浓度峰下移约10 cm, 即污染物浓度峰的运移深度与有效灌水量成倍比关系, 且可用简化的溶质运移模型估算; 污染物再分布主要取决于灌水量、蒸发量、排水量三者之间的关系。因此, 为了减少土壤中某些污染物(如 NO_3^-)的淋移, 应尽可能适时、适量进行灌溉。

[关键词] 灌水量; 水污染预测; Br^- 浓度峰; 溶质运移

[中图分类号] S274.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-2782(2002)03-0095-04

随着氮肥施用量增加, 氮肥通过渗漏淋失引起的地下水硝酸盐污染问题日益引起人们的关注。近20年间, 我国某些地区地下水(饮用水源)中的 NO_3^- -N含量已远远超过卫生部门规定的安全基准上限(100 mg/L), 有的高达200~1 700 mg/L^[1]。为了防止污染的进一步扩大, 20世纪70年代以来, 国内外学者对土壤中污染物运移问题进行了大量研究, 目的在于试图阐明各种因素作用下土壤中污染物运移规律, 并在此基础上建立能用于进行预测的模型。由于溴离子(Br^-)是非反应性溶质, 其土壤本底值非常低, 大量研究^[2, 3]表明其是较好的阴离子示踪剂, 特别适用于作为 NO_3^- -N, Cl^- 的示踪元素, 因此本研究以 Br^- 为示踪剂针对灌水量这一对污染物运移起决定性作用的因素进行研究, 试图从定性、定量两方面来探明灌水量对土壤中污染物运移的影响。

1 材料与方法

土柱制备 试验在内装扰动土的有机玻璃土柱(内径23.8 cm, 高2.0 m)中进行。土壤为重壤土, 取自西北农林科技大学节水灌溉实验站, 经风干过2 mm筛, 按干容重1.30 g/cm³控制, 每5 cm分层填装。土柱下部有10 cm厚的过滤层。有机玻璃柱四周从上至下每隔10 cm各打有一直径2.0 cm的孔, 底部(过滤层位置处)通过细管嘴用橡皮管与马氏瓶相连, 用来控制水位和排水。

试验处理 从土柱下端通过马氏瓶供水, 控制地下水位为1.5 m。待土壤含水量稳定后, 将23.8 g KBr溶于200 mL蒸馏水中喷洒于土柱表面, 然后灌水。灌水设30, 60, 90 mm/次3个处理, 每处理2个重复。每9 d灌1次, 共灌4次(表1)。第一次灌水入渗完后, 打开各自土柱上部250 W的红外线灯泡进行光照, 模拟蒸发条件, 每天照射8 h。

表1 灌水时间和取样时间

Table 1 Irrigation and sampling time

灌水时间 Irrigation time	取样时间 Sampling time	
	本次灌水后 After the irrigation	下次灌水前 Before next irrigation
09-24	09-26	10-02
10-03	10-05	10-11
10-12	10-14	10-20
10-21	10-23	10-31

采样及测定 试验开始前对土样本底值进行了测定, 其后每次灌水前、后在有机玻璃柱的侧孔中取样(表1)。每深度取2份样, 1份用烘干法测含水量, 另1份用重量比为1:5的0.01 mol/L CaCl_2 溶液浸提, 待测液中 Br^- 的浓度用DX100型离子色谱仪测定。

2 结果与分析

2.1 灌水量对土壤含水量分布的影响

图1a为第3次灌水后土柱含水量的剖面分布

^{*} [收稿日期] 2001-11-05

[基金项目] 国家杰出青年基金资助项目(49725102); 西北农林科技大学青年教师基金资助项目

[作者简介] 曹红霞(1971-), 女, 新疆昌吉人, 讲师, 博士, 主要从事农业水土环境研究。

状况,图 1b 为第 4 次灌水前土柱含水量的剖面分布状况。由图 1a 可以看出,在灌水后 125 cm 土层土壤含水量明显表现为处理 1< 处理 2< 处理 3。随水分进行再分布,在下次灌水前各处理土柱中土壤含水量接近一致且处于稳定状态(图 1b)。比较图 1a, b 可知,刚灌完水土壤的含水量明显高于土壤水分达到稳定状态时的含水量。这说明在再分布期间,土壤中多余的这部分水量将从土柱中排出。根据试验条件可推知,土壤中部分水分除表面蒸发消耗一部分外,其余则从土柱底部排出。因蒸发条件相同,则灌水量越多,排水量亦越多。试验中观测到土柱底部有

排水现象。此外,各处理土柱在每次灌水前后都表现出土表含水量较高的情形。这可能是由于:(1)刚灌完水,土表水分还未充分下渗;(2)由于蒸发作用的进行,导致土壤下层水分向上运移,由于液态水转化为汽态水所需能量较高,水分到达土表后不能立即汽化,从而在土表积聚。第一点可能是造成刚灌完水后土表高含水量的主要原因,而再分布后,下次灌水前土表的高含水量则主要是由第二个原因造成的。本试验中,形成土表高含水量的前提条件是 1.5 m 水位使整个土壤剖面中含水量较高,从而保证有充足的水分在蒸发作用下向上运移。

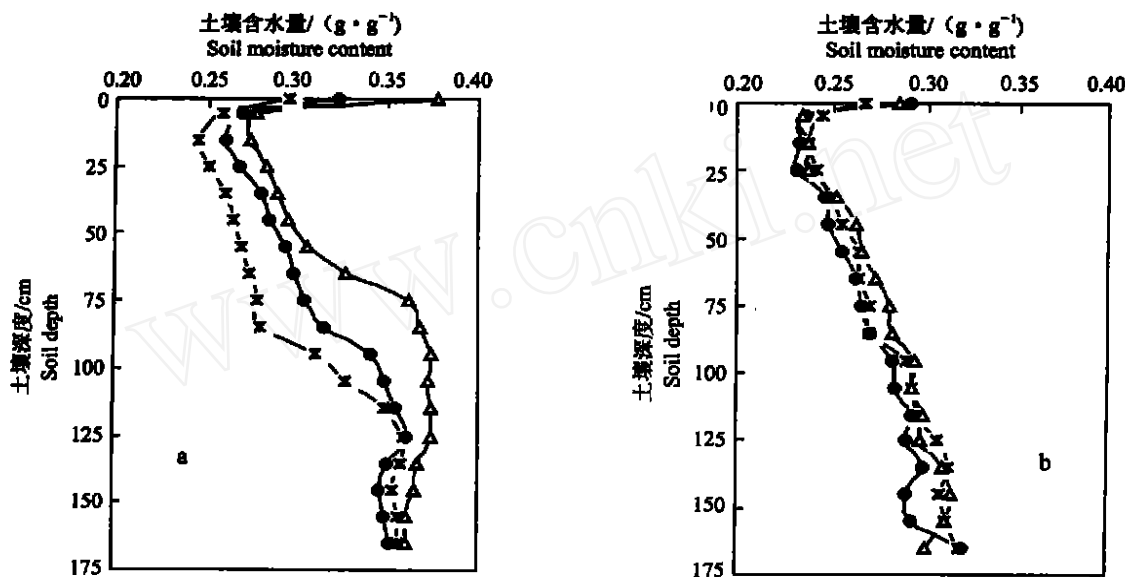


图 1 第 3 次灌水后及第 4 次灌水前土壤含水量分布

a 10-14; b 10-20 - * - 处理 1; - ● - 处理 2; - △ - 处理 3

Fig 1 Distribution of soil moisture content after the third irrigation and before the fourth irrigation

a 10-14; b 10-20 - * - treatment 1; - ● - treatment 2; - △ - treatment 3

2.2 灌水量对示踪剂(Br^-)运移的影响

由于以前的土柱试验,本次试验正式开始前在土表下大约 65 cm 处有一浓度峰(Br^- 第 2 峰)。本次试验是探讨不同灌水量对表施示踪剂 Br^- 的迁移(Br^- 第 1 峰)以及对土柱中原来残留 Br^- 淋洗的影响。图 2a, b, c, d 分别为不同灌水量条件下,相邻 3 次灌水期间土柱中 Br^- 分布状况。由图 2 可以看出,处理 1 (30 mm/次) 由于灌水量少,4 次灌水后, Br^- 第 1 个浓度峰位于土表下 10 cm 处,即每灌 1 次水 Br^- 浓度峰向下运移 2~3 cm; 处理 2 (60 mm/次) 和处理 3 (90 mm/次) 每灌 1 次水浓度峰向下分别约运移 10 和 20 cm, 4 次灌水后 Br^- 第一个浓度峰分别位于土表下 45 和 85 cm 处。由此可看出, Br^- 浓

度峰向下运移的距离与灌水量成正相关,但并不与灌水量成倍比关系,这与 Ghuman 等^[4]的研究结果不同,原因在于 Ghuman 是在无蒸发条件下通过对单次灌水研究得出的结论,而本试验是在蒸发条件下对多次灌水处理进行的研究。

由图 2 还可看出,从第 2 次灌水后,处理 1 土柱中原有的 Br^- 浓度峰一直在 75 cm 附近,几乎没有向上和向下运移。这说明处理 1 每次 30 mm 的灌水或者从未入渗到土表下 75 cm 处,或者经过 75 cm 处的水量等于在灌水间隔期内从 1.5 m 的地下水向上补充的水量,即在灌水间隔期内 75 cm 处的水流通量为零。又由于 1.5 m 水位造成土壤具有较高含水量,且由 2.1 中分析知下次灌水前各处理土

壤含水量接近一致且处于稳定状态, 因而可推断出灌水间隔期内蒸发量大约为 30 mm。因各处理的蒸发条件相同, 处理 1, 2, 3 在除去蒸发量后有效灌水量分别为 0, 30 和 60 mm, 于是存在浓度峰运移深度和有效灌水量成倍比关系。

为了定量描述不同灌水量对 Br^- 迁移的影响, 采用溶质迁移质量平衡模型^[5]对土柱中 Br^- 浓度峰的运移进行了预测, 其表达式为

$$d_{sf} = \frac{I_e}{\theta \times \gamma_d} = \frac{I_n - \sum E - I_{wd}}{\theta \times \gamma_d} \quad (1)$$

式中, d_{sf} 为溶质运移距离 (cm); I_e 为有效灌水量 (cm); θ 为田间持水量 (以占干重百分数计); I_n 为灌水量 (cm); $\sum E$ 为累计蒸发量 (cm); I_{wd} 为溶质峰以上土层中亏缺的水量 (cm); γ_d 为土壤干容重 (g/cm^3)。本试验中 $\theta = 23\%$, $\gamma_d = 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$, $\sum E = 120 \text{ mm}$, 因在下次灌水前土壤含水量将达到稳定状态, 可认为 $I_{wd} = 0$ 。用式(1)对处理 2, 3 进行计算, 可得出与试验结果大致相同的结论 (表 2)。此计算方法对处理 1 土柱中原有的 Br^- 浓度峰的计

算也完全适用, 只有在处理 1 的表施 Br^- 浓度峰处偏差较大。从图 2 可看到, 在处理 1 中每次灌水前表施 Br^- 浓度峰都分化出 2 个峰, 1 个峰值异常高且位于土表, 另 1 个峰值较低, 如将土表处 Br^- 浓度峰视为主峰, 则公式(1)同样适用于处理 1。

2.3 灌水量对示踪剂 (Br^-) 再分布的影响

由图 2a, c 可以看出, 刚灌完水后处理 2, 3 的 Br^- 浓度峰比灌水前分别下移了近 5 和 10 cm, 此值为每次灌水应引起浓度峰下移深度的一半, 这说明入渗过程能引起溶质快速淋移, 此时的淋移速度取决于土表入渗水量和土壤入渗速率。随入渗过程结束, 土壤中 Br^- 的迁移则随着土壤中水分的再分布过程而向下迁移, 土壤中水分的再分布速率与灌水量和土壤含水量有关。由图 2 可见, 在处理 2, 3 中溶质运移主要是由于水的对流引起的。灌水量越多, 土壤中水分再分布速率加快, 从而引起溶质淋移深度就越大。处理 1 土柱中原有的 Br^- 浓度峰虽一直处于 75 cm 处, 但随试验进行, 其前锋在不断下移, 即分布曲线逐渐变缓, 这说明处理 1 中溶质运移主要是由扩散-弥散作用引起的。

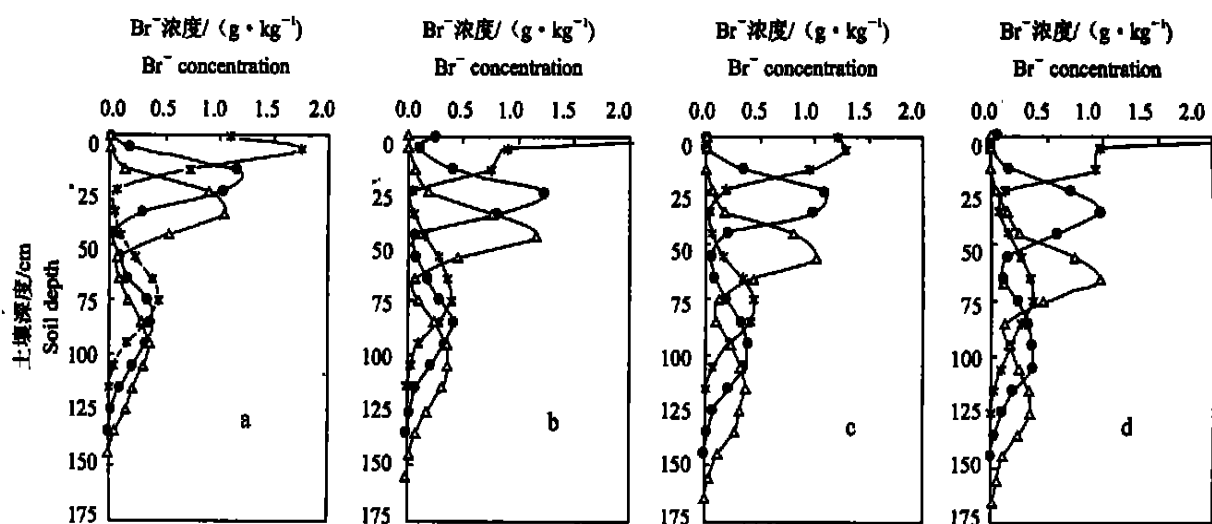


图 2 相邻两灌水间隔期内 Br^- 动态分布

a 10-05; b 10-11; c 10-14; d 10-20 - * - 处理 1; - ● - 处理 2; - △ - 处理 3

Fig 2 Dynamic distribution of Br^- in two adjacent irrigation intervals

a 10-05; b 10-11; c 10-14; d 10-20 - * - treatment 1; - ● - treatment 2; - △ - treatment 3

由以上分析可知, 灌水量、蒸发量和排水量的多少对土壤中污染物运移有很大影响。当灌水量等于蒸发量且无排水时, 污染物运移主要通过扩散-弥散作用进行。当灌水量大于蒸发量且产生排水时, 污

染物运移过程主要通过对流作用进行。因此, 控制灌水量可以调控土壤中污染物迁移深度, 对防止污染物对地下水污染有重要作用。

表 2 Br^- 浓度峰深度的实测值和估算值Table 2 Observed and estimated value of Br^- concentration peak

处理 Treatment	每次灌水量/mm Each irrigation amount	Br^- 浓度峰深度/cm Depth of Br^- concentration peak			
		实测值 Observed value		估算值 Estimated value	
		第 1 峰 First peak	第 2 峰 Second peak	第 1 峰 First peak	第 2 峰 Second peak
1	30	10	75	0	65
2	60	45	105	40	105
3	90	85	145	80	145

3 结论与讨论

1) 污染物运移深度与灌水量成正相关, 与有效灌水量成倍比关系。在本试验条件下, 每灌 30 mm 水浓度峰几乎不下移, 每灌 60 mm 水浓度峰下移 10 cm; 每灌 90 mm 水浓度峰下移 20 cm。2) 用简化的溶质运移模型可估算污染物浓度峰的运移深度。3) 污染物在土壤中的迁移和分布主要由灌水量、蒸发量和排水量的多少决定。当灌水量等于蒸发量且无排水时, 污染物的再分布主要通过扩散-弥散作用进行, 当灌水量大于蒸发量且产生排水时, 污染物再分布主要通过对流作用进行。

4 次灌水后, 处理 3 的 2 个 Br^- 浓度峰分别位于 85 和 145 cm 处, 即本试验中施加的示踪剂离地下水还较远, 而土壤中本身含有示踪剂的前峰已到达并开始污染地下水。由此可知, 在农业生产中, 当季进入土壤中的污染物一般不会很快对地下水构成威胁, 需特别关注的是土壤中残留的污染物在来年灌溉及非生长季节的降水中发生的淋移。

研究表明, 灌水量不超过补充某一土层内亏缺水分所需水量, 就不会使这一土层内的污染物向下淋移。因而从环境角度来说为了减少土壤中污染物(如氮素)的淋移, 应根据各地大气蒸发情况、土壤类型及土壤中的含水量状况进行适时、适量的灌溉。

[参考文献]

- [1] 王家玉, 王胜佳, 陈 义, 等. 稻田土壤中氮素淋失的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 28- 35
- [2] Schoen R, Gaudet J P, Bariac T. Preferential flow and solute transport in large lysimeter under controlled boundary conditions[J]. Journal of Hydrology, 1999, 215: 70- 81.
- [3] Bowman R S. Evaluation of some new tracers for soil water studies[J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, 52: 987- 993
- [4] Ghuman B S, Vemba S M, Prihar S S. Effect of application rate, initial soil wetness, and redistribution time on salt displacement by water[J]. Soil Sci Soc Amer Proc, 1975, 39: 7- 10
- [5] Izadi B, King B, Westermann D, et al. Field scale transport of bromide under variable conditions observed in a furrow-irrigated field[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(6): 1679- 1685
- [6] 郝新梅. 灌水方式与灌溉制度对水氮迁移的影响及其模拟[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 1999

Effect of different irrigation quantity on bromide transport in soil

CAO Hong-xia¹, KANG Shao-zhong¹, HE Hua²

(Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest Sci-Tech University
of Agriculture and Forestry, 2 Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Studies of pollutant transport in disturbed columns were conducted under different irrigation treatments with bromide tracer. The results showed that the transport depth of bromide concentration peak has proportional relation with effective irrigation quantity, and can be estimated with simplified model of solute transport. Solute redistribution depends on the relationship between irrigation, evaporation and drainage amount. In order to reduce leaching of some pollutant (such as NO_3^-) in soil, irrigation water should be applied with proper water amount at right time.

Key words: irrigation quantity; water pollution forecast; Br^- concentration peak; solute transport