

大孔隙分布对坡地产汇流及溶质运移的影响

张小娜¹, 冯杰²

(1. 南京信息工程大学 水文气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 以室内土槽为平台, 采用人工模拟降雨试验, 研究了粉砂壤土中两种不同大孔隙分布情况下, 土槽中土壤含水量、坡面流速、地面径流、地下径流及溶质运移的变化。结果表明, 相对于面大孔隙度为 19%, 容积大孔隙度为 0.095% 的未加密型的土槽, 面大孔隙度为 57%, 容积大孔隙度为 0.285% 的大孔隙加密型土槽中各层土壤含水量增加幅度、平均坡面流速及地面径流量相对偏小, 地下流出现时间较早且径流量较大, 地面径流中溴离子、铵根离子浓度、硝酸根离子浓度偏小。在地下水出流前期, 大孔隙加密型土槽中的铵根离子浓度和浓度变化幅度都偏小, 但溴离子、硝酸根离子浓度则偏大。

关键词: 大孔隙分布; 产汇流; 溶质运移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0022-05

中图分类号: TV122

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.011

Effects of Soil Macropores Distribution on Slope Runoff Yield and Solute Transport

ZHANG Xiao-na¹, FENG Jie²

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

2. Water Resources Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to find the effect of soil macropore distribution on overland flow and solute transport, artificial rainfall experiments were carried out. The results showed that compared to original macropore soil tank, in the increased density macropore soil tank with the surface porosity of 57% and the volume porosity of 0.285%, the increasing extents of the soil water content of every layer were less, the velocity of overland flow was smaller and the runoff amount of surface was less, the runoff amount of underflow appears earlier and was more in increasing-density macropore soil tank. The results also indicated that in increased density macropore soil tank, the concentration of Br^- , NH_4^+ and NO_3^- in surface runoff were lower, the concentrations of Br^- and NO_3^- in the underflow runoff were higher in earlier stage of the groundwater outflow, but the concentration of NH_4^+ was lower and the increasing extend was smaller.

Keywords: soil macropores distribution; runoff yield and concentration; solute transport

由于土壤的收缩和膨胀, 土壤中可溶性物质的溶解, 冻融的循环交替以及耕种等物理过程以及蚯蚓和啮齿动物活动, 植物根系的生长等生物过程的作用导致土壤中普遍存在大孔隙^[1-2]。土壤大孔隙的存在, 使得进入土壤中的水及溶质绕过大部分土壤基质, 经过大孔隙快速达到土壤深处或地下水中。土壤水分及其溶质通过土壤大孔隙的快速非均匀流, 称为大孔隙流。大孔隙及大孔隙流的存在, 增加了土壤的通气性, 改变了坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例, 从而对坡地产汇流产生影响^[3-4]。工业和生活“三

废”若不合理弃置, 将有可能进入土壤中, 经过大孔隙污染地下水。因此开展土壤大孔隙及影响研究有助于判断合理的废物处置方法, 防止造成地下水污染, 危害人类健康^[5-6]。鉴于试验和理论条件限制, 我国对大孔隙的及其影响研究起步较晚, 虽在土壤大孔隙结构、大孔隙流的特征、土壤大孔隙对坡地产汇流及溶质运移的影响、土壤大孔隙对饱和水力传导度的影响、土壤大孔隙对坡面水动力学参数等方面有一定的研究^[7-15], 但尚且还不够深入, 有待进一步研究。譬如大孔隙分布对坡地产汇流和溶质运移影响方面的

收稿日期: 2013-11-28

修回日期: 2013-12-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤大孔隙分形网络空间结构及对坡地产汇流影响机理研究”(41301037); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(11KJB170008)

作者简介: 张小娜(1981—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 讲师, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: nanaxiao86@163.com。

研究还鲜有报道。因此,本文拟通过室内土槽人工降雨试验,分析两种大孔隙分布条件下坡地产汇流和溶质运移的过程。

1 材料和方法

1.1 土样分析

试验土样取自南京郊区栖霞区东阳镇,为准确模拟田间的实际状况,采用分层法取土。采用吸管法测土样中的黏粒、粉粒和砂粒的组成得出土壤颗粒级配(表 1)。按照美国农业部制的土壤质地三级分类法,该试验土样属于粉砂壤土。

表 1 土壤颗粒级配

土层深度/m	2~0.02 mm/%	0.02~0.002 mm/%	<0.02 mm/%	土壤类型
0—0.2	15.24	63.24	21.52	粉砂壤土
0.2—0.4	21.63	59.27	19.10	粉砂壤土
0.4—0.6	23.77	58.82	17.41	粉砂壤土

1.2 试验土槽

试验在河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室降雨试验大厅内进行,试验土槽规格详见表 2,土槽采用分层法填土。在填土过程中,分别在距槽底 10,30,50 cm 深处,距离坡脚 50,95 和 135 cm 处埋入了频域反射测量仪(frequency domain reflectometry,

FDR)探头(共 9 个)测定土壤含水量。土槽开设了地表出流和地下径流的出口,其位置分别在土槽西壁中间位置处距土槽底 60 cm 处,距土槽底 0 cm 处。

1.3 试验方法

地面径流采用三角堰测量法,地下径流采用称重法测流,土壤容积含水量由 FDR 测量,坡面流速的测定采用示踪法,水样中的 Br^- , NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度,测量采用的方法分别为电极法、纳氏试剂光度法和酚二磺酸光度法。

降雨前,由 FDR 先测知土槽中土壤各层容积含水量。然后将 14.88 g KBr,7.334 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 共同溶解于水中,配制成 2 000 ml 溶液,降雨前均匀洒入土槽中。降雨采用人工模拟降雨,在 2007 年 9 月 15 日和 2007 年 10 月 6 日分别对该土槽进行降雨试验,且两次降雨试验前,土槽中土壤各层容积含水量和土壤中溶质浓度相差较小。两次降雨过程相同,历时 90 min,降雨累计量为 223 mm,且两次降雨试验过程中土槽中均设置有人工大孔隙,大孔隙孔径均为 8 mm。人工大孔隙的制作方法是用直径为 8 mm,带有深度刻度的不锈钢杆小心插入已经设定好的位置。插入到设定深度再小心拔出。不同之处在于,两次降雨前,土槽的人工大孔隙密度不同。2007 年 10 月 6 日的试验是在对 2007 年 9 月 15 日土壤中大孔隙加密的基础上进行的。

表 2 试验土槽规格

土槽长/m	土槽宽/m	土深/m	填土干容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			坡度/%
			0—0.2 m	0.2—0.4 m	0.4—0.6 m	
2.48	1.92	0.60	1.21	1.47	1.55	4

注:土槽中大孔隙为人工大孔隙,且孔径均为 8 mm。

2 结果与分析

为了方便起见,将大孔隙未加密型土槽记为槽 1,把大孔隙加密型土槽记为槽 2。计算可知,槽 1 的坡面面大孔隙度为 19%,槽 2 的坡面面大孔隙度为 57%;槽 1 的容积大孔隙度为 0.095%,槽 2 的容积大孔隙度为 0.285%。所有图的时间均以降雨开始时刻为零时刻。

2.1 土壤容积含水量

研究发现,大孔隙的加密,改变了土壤的空间结构,直接影响着土壤水分运动的特征,其中主要表现在以下两个方面:(1)土壤各层含水量的增加幅度相对偏小。表 3 列出了两槽中各层土壤含水量具体增加的幅度值;(2)降雨期间,各层土壤受降雨影响快

慢的先后次序发生改变,其中下层土壤受影响的速度加快。以编号为 1,2,3 的 FDR 探头所埋深的剖面处各层土壤含水量为例,研究两槽在降雨期间的土壤含水量变化,研究结果发现,槽 1 各层土壤受降雨影响快慢的先后次序为:上层>中层>下层,其中土壤含水量开始发生明显变化的时刻分别为 18,60,92 min,而槽 2 中的先后顺序则为:上层>下层>中层,明显变化的时刻分别为 30,66,153 min。说明大孔隙的加密,使得通过大孔隙优先运移到土壤下层的水量相应增大,与土壤基质相互作用的降水相应减少且使得大孔隙流穿过程中机械弥散和分子扩散的作用相对减弱,非平衡管道流的支配的地位相对增强,较多的水流沿土壤大孔隙形成的管道迅速穿透水体,出现优先穿透。

表 3 各层土壤容积含水量幅度变化

土槽	FDR 测点水分增加量/%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
槽 1	10.63	1.40	6.12	21.51	5.41	3.92	16.50	5.44	18.22
槽 2	7.19	0.75	5.32	3.63	2.02	7.7	11.66	3.11	11.44

2.2 坡面流速

两槽的坡面流速过程如图 1 所示。从图 1 可以看出,两槽流速变化形状基本相似,随时间呈波状分布且降雨前期的变化幅度都较后期的变化幅度大,但计算得到,整个降雨过程中,槽 1 的坡面平均流速较槽 2 大,其流速值分别为 6.75 和 6.13 cm/s。两者相差 0.62 cm/s。槽 1 平均坡面流速大于槽 2 是因为一方面降雨首先填满大孔隙,槽 2 中的孔隙度较大,导致槽 2 的地面径流量相对较小,在相同的过水面积下,导致流速偏小^[9];另一方面,大孔隙加密导致槽 2 局部坡度突变,糙率增大,致使流速减小。

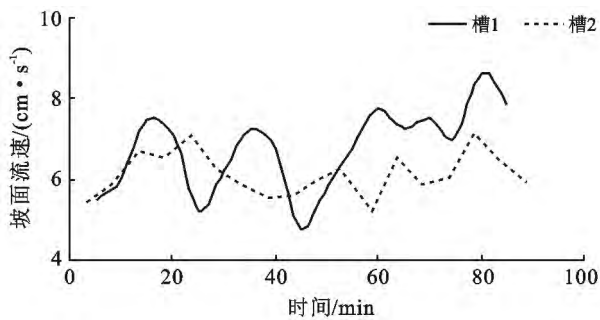


图 1 试验土槽坡面流速变化

2.3 出流过程

2.3.1 地面径流过程 两试验土槽的地面径流过程如图 2 所示。从图 2 可看出,槽 1 略早于槽 2 产生地面径流且槽 1 的地面径流总量大于槽 2 的地面径流量。降雨历时 52 min 前,两槽的地面径流过程相差较大,槽 2 地面径流流量明显小于槽 1。但降雨历时 52 min 后,两者的地面径流过程几乎重合。原因是降雨历时 52 min 之前,槽 2 中存在大孔隙较多,所以降落的雨水被大孔隙拦蓄的量相应较多,所以降雨初期,槽 2 的地面汇流量要小于槽 1。降雨历时 52 min 后,可能槽 1 和槽 2 土壤大孔隙中蓄水量已达到最大,降落的雨水在两槽中的下渗量相差不大,所以地面径流过程几乎重合。

2.3.2 地下径流过程 以降雨开始时刻为零时刻,槽 1 在 125.17 min 观测到地下径流,槽 2 在 109.6 min 观测到地下径流。槽 1 的地下径流总量为 0.117 2 m³,占降雨总量的 11.021%。槽 2 地下径流量为 0.226 9 m³,占降雨总量的 19.16%,两槽的地下径流过程如图 3

所示。由图 3 可以看出,相对槽 1,槽 2 地下水出流总量较大且峰现时刻较早。其中槽 2 的出流量是槽 1 的 1.936 倍。这说明大孔隙加密型土槽的地下水的响应速度较快。大孔隙加密型土槽中孔隙度大,孔隙度的增大增加了降雨的入渗量。

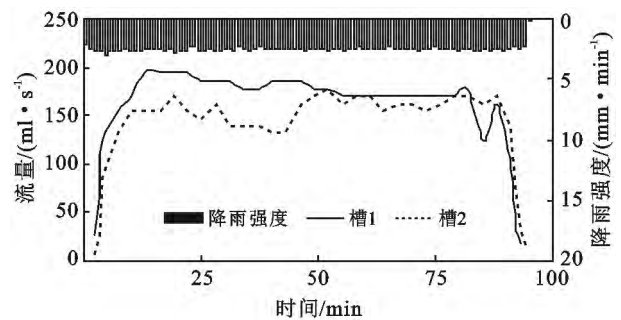


图 2 试验土槽坡面径流过程

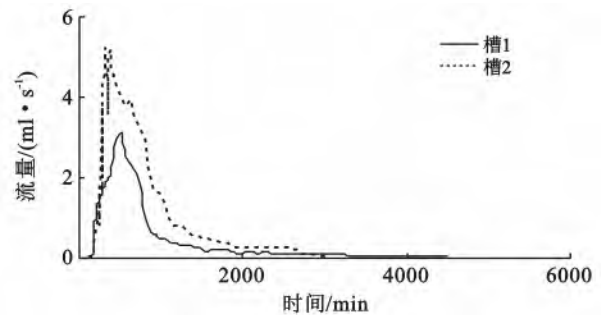


图 3 试验土槽地下径流过程

2.4 溶质运移

2.4.1 溴离子 溴离子为非吸附性离子即保守离子,在土槽中仅作迁移运动,不发生吸附和转化。采用非吸附性离子的主要目的是用来标记土壤大孔隙流产生的过程及其水分运动的规律。从图 4 中可以看出:(1)在地面径流中,两槽的溴离子浓度总体变化趋势一致即离子浓度随时间逐渐减小,不同点是降雨前期,槽 1 地面径流中的溴离子浓度高于槽 2 地面径流的离子浓度,且两者浓度差值随时间逐渐减少;(2)在地下径流初期,槽 2 的离子浓度明显大于槽 1,但两者差值随着时间逐渐减少。地下径流后期,两者的离子浓度相差不大。这是由于槽 2 存在较多的大孔隙快速通道,相对槽 1 来说较多的溴离子在水流的携带下快速穿透土体运移至土壤底层,所以导致地下水出流中溴离子浓度较高,地面径流中的溴离子浓度偏低。

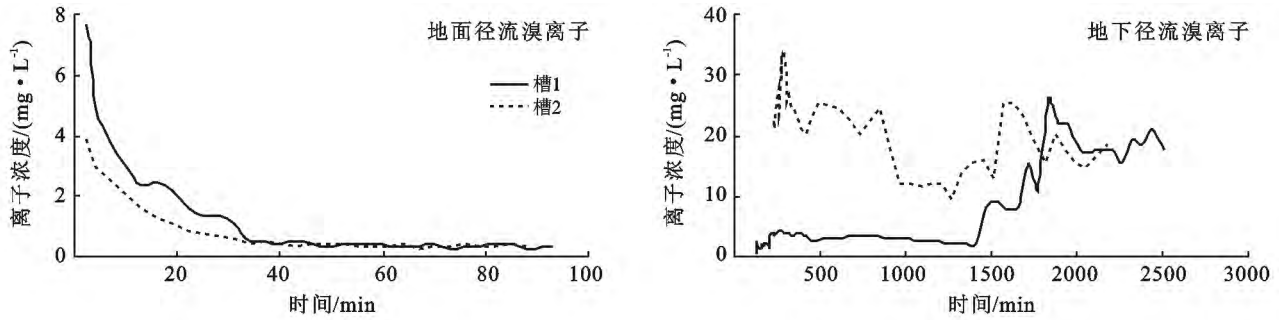


图4 试验土槽坡面溴离子浓度变化

2.4.2 铵根离子和硝酸根离子浓度变化 与溴离子不同,铵根离子在土壤中迁移转化非常复杂,土壤对铵根离子的吸附性很强,铵根离子的转化性亦很强。从图5可知,槽1地面径流中的铵根离子浓度明显高于槽2地面径流中,但两者整体上都呈现递减趋势;槽1地下径流中的铵根离子浓度在出流前期偏高,其值在34~25 mg/L之间,地下水出流80 min后,浓度降至3 mg/L以下,而槽2地下径流中的铵根离子浓

度变化不大,在0~6.9 mg/L之间。这是由于槽2中大孔隙加密使得土壤中孔隙密度增大,土壤空气中含氧量增大,铵根离子硝化作用增强,较多铵根离子在运移到地下中已被转换成亚硝酸根离子或硝酸根离子,所以在地下水出流中,槽2的铵根离子浓度偏低。同时由于槽2中大孔隙加密使得较多的铵根离子可以通过大孔隙快速通道运移到地下中,使得槽2中地面径流中铵根离子浓度偏低。

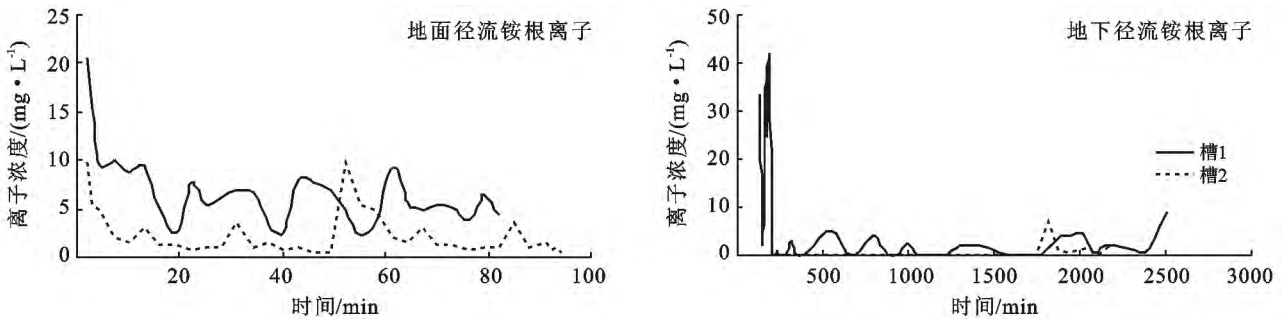


图5 铵根离子浓度变化曲线

比较图5和图6,地下径流中,硝酸根离子的浓度远高于铵根离子浓度。槽1地下径流中的硝酸根离子和铵根离子的最大值分别为476.6和33.6 mg/L,槽2的分别为328.45和6.91 mg/L。说明铵根离子在土槽很难迁移,很快就发生吸附和转化。在降雨过程中,槽1地面径流中硝酸根离子浓度高于槽2地面径流中的离子浓度。原因是在人工降雨作用下,降雨前期施放在土壤表层大孔隙周围的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 会被水体携带直接通过大孔隙快速向土壤中迁移,大孔隙加密型土槽中溶质下渗量大,所以槽1地表出流中所含的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 相对较多,在好氧条件下,转化为硝酸根离子的相应也较多。地下水出流前期,槽2地下径流中的硝酸根离子浓度较槽1大,但前者的离子浓度随时间逐渐减小,后者则随时间呈现逐渐增大的趋势,地下水出流后期槽1地下径流中的硝酸根离子浓度较槽2大。这是由于:(1)槽2中大孔隙的加密,使土壤中孔隙度增大,地下水出流前期较多的

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 绕过土壤基质,沿着这些大孔隙快速运移至地下;(2)槽2深层土壤中存在较多的通气大孔隙,氧气量较多,易于硝化作用的发生;(3)大孔隙的加密,使槽2水分蓄量较大,土壤含水量增大,土壤含水量的增大会导致反硝化作用增强。所以地下水出流前期,槽2地下径流中由 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 消化作用形成的硝酸根离子浓度较大,出流后期浓度较小。

3 结论

(1)降雨期间,土壤中大孔隙密度的增加,改变了各层土壤含水量受降雨影响的快慢的先后次序,其中下层土壤受影响的速度加快。且土壤中大孔隙的加密,使各层的土壤含水量增加幅度相对偏小。

(2)两槽的坡面流速变化形状基本相似,随时间呈波状分布且降雨前期的变化幅度都较后期的变化幅度大。但整个降雨过程中,大孔隙未加密型土槽的坡面平均流速是大孔隙加密型土槽的1.1倍。

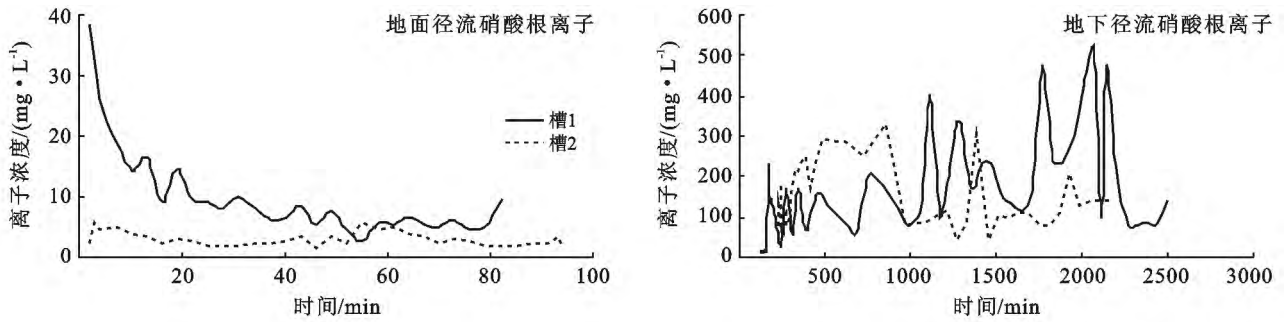


图 6 试验土槽坡面硝酸根离子浓度变化

(3) 降雨历时 52 min 前, 两槽的地面径流过程相差较大, 大孔隙加密型土槽的地面径流流量明显大于大孔隙未加密型土槽。但降雨历时 52 min 后, 两者的地面径流过程几乎重合。大孔隙加密型土槽的地下水出流时间早于大孔隙未加密型地面水出流时间且出流总量是其 1.94 倍。

(4) 相对于大孔隙未加密型土槽, 在地面径流中, 大孔隙加密型土槽中溴离子浓度、铵根离子浓度和硝酸根离子浓度都普遍偏小; 在地下径流前期, 大孔隙加密型土槽中的铵根离子浓度偏小且变化幅度较小, 但溴离子浓度、硝酸根离子浓度偏大。

[参 考 文 献]

- [1] John R N. Preferential flow occurs in unsaturated conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(5): 786-789.
- [2] Kohne J M, Binayak P M. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: Experiment and hierarchical modeling [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(3): 1-17.
- [3] Edvina L, Laurent L, Beatrice B, et al. Modeling the influence of an artificial macropore in sandy columns on flow and solute transfer [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(3/4): 392-402.
- [4] Tiktak A, Hendriks R F A, Boesten J, et al. A spatially distributed model of pesticide movement in Dutch macroporous soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 471(11): 316-327.
- [5] Marcus A H, William E C, Richard B D, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(3/4): 191-201.
- [6] Christine S, Piotr M. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope ^{18}O [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3/4): 407-415.
- [7] 冯杰, 解河海, 黄国如, 等. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-20.
- [8] 张洪江, 程金花, 何凡, 等. 长江三峡花岗岩地区优先流运动及其模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-20.
- [9] 牛健植, 余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 110-116.
- [10] 倪余文, 区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 60-63.
- [11] 李建柱, 冯平. 基于大孔隙下渗理论的产流模型及其应用[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(4): 467-470.
- [12] 周明耀, 余长洪, 钱晓晴. 基于孔隙分形维数的土壤大孔隙水力特征参数研究[J]. *水科学进展*, 2004, 17(4): 466-470.
- [13] 张小娜, 冯杰, 张超, 等. 不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(3): 264-269.
- [14] 张小娜, 冯杰, 绍伟, 等. 土壤大孔隙对坡面溶质流失的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 117-121, 147.
- [15] Feng Sheng, Kang Wang, Zhang Renduo, et al. Characterizing soil preferential flow using iodine-starch staining experiments and the active region model[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(1/2): 115-124.