人工模拟降雨供水水质对坡面产流产沙的影响

谢哲芳[1]，张光辉[1,2]，刘如心[1]，王伦江[1]，马芊红[1]

(1.北京师范大学地理学与遥感科学学院，北京 100875；2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875)

摘要：利用黄土高原 2 种典型的土壤类型(黄土和塿土)，在 2 个降雨强度(45.5，95.5 mm/h)和 2 个坡度(8.7%，25.9%)条件下进行了人工模拟降雨试验，研究了 3 种水质(去离子水、自来水、盐水)对坡面产流、产沙过程的影响。结果表明，2 种土壤类型的产流过程差异显著，黄土条件下去离子水最先产流，但产流速率小于自来水与盐水；而塿土条件下去离子水的产流速率始终最大，自来水与盐水由于离子数量相当，产流速率差异较小。水质主要通过地表结皮的形成与发育影响径流，以总降水量 45.5 mm 为例，径流深随供水电导率的增大而减少，与去离子水相比，黄土条件下自来水和盐水的径流分别减少了 5.7 mm 和 1.5 mm，而塿土条件下分别减少了 7.2 mm 和 9.8 mm。受产流过程的影响，不同供水水质条件下产沙过程不一，产沙速率与产流速率变化同步。2 种土质条件下产沙量均是去离子水最大，与去离子水相比，自来水和盐水分别减少了 45.9%，35.8%(黄土)和 65.6%，68.3%(塿土)，结果显示模拟降雨水质会显著影响坡面产流产沙过程，为保证试验数据的准确性和可对比性，建议在进行人工降雨相关试验时均采用去离子水。

关键词：人工模拟降雨；水质；产流过程；产沙过程；土壤类型

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2016)06-0018-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.004

Effects of Water Quality on Runoff and Sediment Yield in Rainfall Simulation

XIE Zhefang[1], ZHANG Guanghui[1,2], LIU Ruxin[1], WANG Lunjiang[1], MA Qianhong[1]

(1. *School of Geography, Beijing Normal University, Beijing* 100875;

2. *State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing* 100875)

Abstract: 2 typical soil in the Loess Plateau (Loess and Lou soil), 2 different rainfall intensities (45.5 mm/h and 95.5 mm/h) and 2 slope gradients (8.7% and 25.9%) were used to qualify the impact of 3 water quality (deionized, tap and saline water) on runoff and soil erosion in rainfall simulation. The results showed that the runoff rate acted differently between 2 types of soil. Tap water and saline water delayed the time of runoff yielding, but the runoff rate of deionized water grew more slowly than tap water and saline water under Loess. For Lou soil, deionized water always showed the highest runoff rate, while tap water and saline water were similar in salinity, and did not differ in runoff rate. Water quality influenced the runoff indirectly by the formation and development of crust. When precipitation was 45.5 mm, runoff amount significantly decreased with the increasing electrical conductivity, tap and saline rainwater decreased runoff depth by 5.7 mm and 1.5 mm for Loess, and by 7.2 mm and 9.8 mm for Lou soil, compared with deionized rainwater. The sediment yielding rate had significantly difference under different rainwater conditions and it was closely related to the runoff rate. Deionized water had a maximum sediment yield, while tap and saline rainwater decreased runoff depth by 45.9% and 35.8% for Loess, and by 65.6% and 68.3% for Lou. It should be noted that runoff and erosion were significantly affected by the quality of water in simulated rainfall. Therefore, deionized water was recommended for rainfall simulation to improve the accuracy and comparability of results.

Keywords: rainfall simulation; water quality; runoff rate; sediment rate; soil type

产流与产沙过程是坡面侵蚀过程研究的主要内容，是研究土壤侵蚀过程与机理、评价水土保持措施效益的基础。为有效控制试验条件，缩短试验周期，人工降雨技术被广泛应用于土壤侵蚀与水土保持等相关的研究[1]，但绝大部分试验(特别在发展中国家)均采用当地自来水或地下水作为人工模拟降雨的供

收稿日期：2016-06-03

资助项目：国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858)；国家自然科学基金项目“输沙对坡面侵蚀的影响及其动力机理研究”(41271287)；国家自然科学基金创新研究群体项目“地表过程模型与模拟”(41321001)

第一作者：谢哲芳(1994—)，女，湖南娄底人，硕士研究生，主要从事水文与水资源研究。E-mail：xiezhefang@mail.bnu.edu.cn

通信作者：张光辉(1969—)，男，甘肃静宁人，博士，教授，主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail：ghzhang@bnu.edu.cn

水水源,忽略了供水水质对试验结果的潜在影响。

国际上众多研究成果表明,人工模拟降雨供水水质会通过入渗过程改变土壤可交换性钠百分比和电导率,进而影响土壤结皮的形成与发育[2-3],土壤中可交换性钠百分比的增加能促进土壤结皮的形成与发育,而土壤溶液电导率的增加会抑制结皮的形成[4]。土壤结皮作为地表致密层,能够增大土壤容重,降低土壤导水率和提高土壤抗剪强度等[5],从而影响坡面产流产沙过程。Wakindiki 等[6]的研究表明水质对土壤结皮的影响与土壤粘粒含量密切相关,当粘粒含量为 20%时,土壤最易形成结皮;Borselli 等[7]研究发现水质对土壤的作用与土壤类型密切相关,对粉粘土的影响大于粉壤土;栾莉莉等[8]研究发现产流历时随着供水电导率的增大而显著增大,土壤稳渗率随着供水中含盐量的增大而增大。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,采用人工模拟降雨研究黄土坡面的产流产沙过程和水土保持措施的效益,是模拟土壤侵蚀过程、建立土壤侵蚀模型的基础。然而,对于人工模拟降雨供水水质是否影响黄土高原典型土壤的产流和产沙过程,人工模拟降雨供水是否需要采用接近于天然降雨的去离子水或者蒸馏水进行相关试验等基础性问题尚不清楚。因此,本文拟采集黄土高原典型的土壤类型(黄土和塿土)作为供试土壤,采用去离子水、自来水和盐水在不同雨强(45.5,95.5 mm/h)和坡度(8.7%,25.9%)条件下进行人工模拟降雨试验,分析水质对坡面产流和产沙过程的影响,为人工模拟降雨试验供水水质的选择提供理论依据。

1　材料与方法

本试验于 2012 年 6 月采样,2012 年 7—9 月在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人工模拟降雨大厅进行降雨试验,2012 年 10 月进行室内分析。试验供试土壤采用黄土高原典型的黄土(安塞)和塿土(杨凌),其理化性质见表 1。两类土壤采自地表(0—20 cm)耕作层,取回风干后过 1 cm 筛,土壤前期含水量均在 2.5%左右。

表 1　供试土壤理化性质

土壤类型	粘粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002～0.005 mm)	砂粒 (0.005～2 mm)	土壤质地	交换性钠/(mmol·kg^{-1})	ESP/%	电导率/(μS·cm^{-2})
黄土	12.01	50.54	37.45	粉壤土	4.13	10.48	110.01
塿土	33.61	61.15	5.24	粉粘壤土	6.28	6.51	127.55

试验供水水质包括去离子水、自来水和盐水,表 2 为 3 种供水水质的化学性质。将自来水蒸馏,除去其中的大部分离子,获得几乎不含化合物和离子的去离子水。自来水采自杨凌本地,主要包含钠离子(0.14 g/L)、钙离子(0.18 g/L)、镁离子(0.06 g/L)等阳离子以及氯离子等阴离子。通过计算,在每升去离子水中加入 0.52 g NaCl 和 0.47 g $CaCl_2 \cdot H_2O$ 配制出钠吸附比为 5 的盐水。

表 2　试验供水水质

供水类型	盐度/%	电导率/(μS·cm^{-2})	电解质浓度/(mg·L^{-1})	钠吸附比
去离子水	0.00	0.96	0.00	0.00
自来水	0.04	780	390	2.73
盐水	0.11	2180	1093	5.00

试验土槽长 1.0 m,宽 0.6 m,深 0.2 m,为了排水土槽底部均匀分布 60 个小孔,填土时在土槽底部覆盖一层聚酯棉布防止试验过程中土壤的淋失。在棉布上铺 5 cm 透水性极强的细沙,然后上覆一层聚酯棉布便于试验结束后重新装填土壤。为了保证土壤的紧实程度与均匀性,对土壤进行分层填装,每一层填装厚度设定为 5 cm,黄土和塿土容重均控制为 1.3 g/cm^3。

试验采用 3 台 Norton 型人工模拟降雨机,降雨机并排放置,间隔 1 m。降雨机长 5.4 m,均匀分布 4 个间隔为 1.5 m 的喷头,喷头距离土壤表面 2.3 m。降雨强度(45.5,95.5 mm/h)通过人工调节档位和改变喷头摆动的频率来控制。每个喷头的进水管上都安装一个压力标,调节各阀门的供水压力均为 0.04 kPa,保证降雨均匀系数为 0.95 左右。

将土槽调节至设计坡度(8.7%,25.9%)后开始人工模拟降雨试验。自产流开始,每 2 min 收集 1 次水沙全样,至产流速率稳定后结束降雨。将水沙样静止 6 h,测量重量后倒掉上部的清水,将剩余的水沙混合物移入铝盒,在 105 ℃条件下烘 24 h 后称泥沙重,用于相关值的计算。由于不同条件下径流深和产沙量受降雨量的影响,因此,径流深和产沙总量的比较统一在降雨量为 45.5 mm 时进行。具体表达式为:

$$m = m_1 + m_2 + \cdots\cdots + m_n \tag{1}$$

式中:m 为产沙总量(g);m_i 为第 i 个样品烘干后泥沙重(g)。

$$h = \frac{M}{100 \times 60} \times 10 \tag{2}$$

式中:h 为径流深(mm);M 为所有样品的清水总重量(g)。

$$R_i = \frac{M_i}{1000 \times 2} \tag{3}$$

式中:R_i 为产流速率(L/min);M_i 为第 i 个样品中清水重量(g)。

$$S_i=\frac{m_i}{2} \tag{4}$$

式中：S_i 为产沙速率(g/min)。

通过对 2 种土壤(黄土、塿土)，3 种水质(去离子水、自来水、盐水)，2 个降雨强度(45.5，95.5 mm/h)和 2 个坡度(8.7%，25.9%)进行组合，共计 24 个处理，每个处理进行 3 次重复，共进行 72 场人工模拟降雨试验。利用 SPSS 19 软件进行多元方差分析及相关显著性检验、Excel 2010 进行试验数据处理计算和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 水质对产流过程的影响

人工降雨试验开始后，降落到地表的雨滴先入渗，土壤含水量增大，导致土壤入渗速率下降，当降雨强度大于土壤入渗速率时坡面开始产流。图 1 为所有处理下产流速率随降雨历时的变化过程曲线。由于本试验处理下的产流机制为超渗产流，在其他条件相同时，降雨强度越大，产流速率越大。统计检验表明土壤类型与供水水质均显著影响产流速率($P<0.01$)，而坡度对产流速率的影响不显著($P>0.05$)。

如图 1 所示，2 种土壤条件下产流速率均随着时间的增大而增大，最终达到稳定状态，且差异明显。塿土条件下，产流速率在产流初期急剧增大，之后增长速率减缓。3 种水质条件下产流速率始终是去离子水产流速率最大，自来水和盐水的产流速率比较接近，都随降雨历时的增大逐渐增大，并最终趋于稳定。黄土的产流过程比较复杂，去离子水最先产流且在试验前期产流速率最大，随着试验的进行，盐水和自来水条件下产流速率的增长速度远大于去离子水，且先于去离子水达到稳定状态。土壤结构差异可能是造成 2 种土壤产流过程存在差异的主要原因。塿土结构相对稳定，随着降雨的进行，土壤基质势降低导致入渗速率降低，从而产流速率增大。而黄土作为一种结构相对不稳定的土壤，产流过程中伴随着土壤结构的破坏以及结皮的形成，加上水质对土壤性质的影响，产流过程复杂多变[9]。

水质对产流速率影响显著($P<0.01$)。由于黄土条件下产流过程受土壤性质影响显著，故以塿土为例。塿土在大雨强条件下去离子水的产流速率稳定在 0.80 L/min 左右，自来水和盐水的产流速率则稳定在 0.76 L/min 左右。小雨强条件下，去离子水的稳定产流速率约为 0.38 L/min，自来水与盐水的稳定产流速率为 0.31 L/min。相同条件下去离子水产流历时最短、且稳定产流速率最大，这是由于本试验采用的自来水和盐水的电导率(表 2)均大于 2 种土壤的临界絮凝浓度，使得土壤中细小颗粒絮凝，从而阻碍团聚体的分散，抑制结皮的发育[10]，结皮的减少使得土壤入渗速率增大，产流速率相应减少。此外，由于自来水中除含钠离子外还有镁离子、钙离子等其他阳离子，可以弥补其与盐水中可交换性钠离子的差异，使得二者结皮发育并无明显差异，导致自来水和盐水的产流速率差异很小，产流过程相似，这一结果与 Niller 等[11]的研究结果一致。

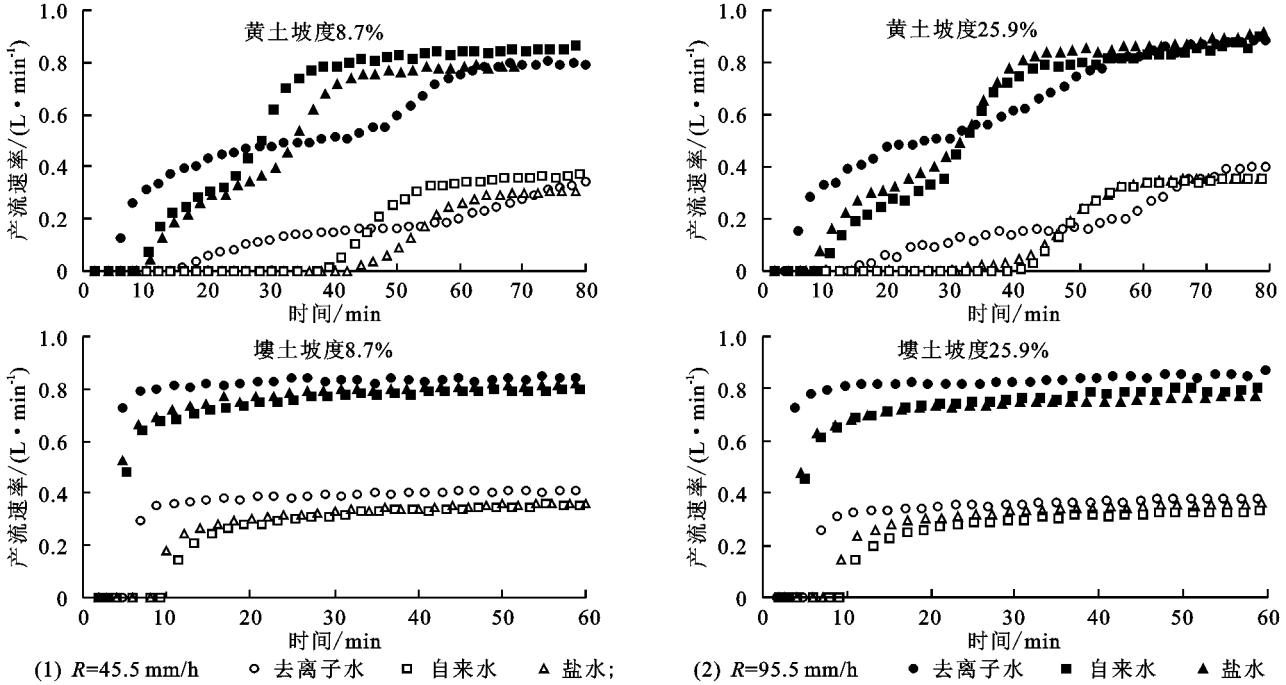

图 1 不同处理下产流速率过程曲线

2.2 水质对径流深的影响

地表产流受到诸多因素的综合影响[12]。统计分析表明土壤类型、供水水质对径流深的影响显著($P<0.01$)，而坡度对径流深的影响并不明显($P>0.05$)。

表 3 为降雨量为 45.5 mm 时不同试验条件下的径流深和径流系数。由表 3 可知,不同土壤类型的径流深差异显著,黄土的径流系数变化在 0.16～0.29 之间,而塿土的径流系数变化在 0.60～0.82 之间。塿土在不同降雨强度和坡度条件下去离子水、自来水和盐水的径量深分别是黄土的 2.83,4.13 和 2.40 倍。二者的差异主要受黄土与塿土机械组成差异的影响。塿土粘粒含量约为黄土的 2.65 倍,粘粒比表面积大,吸附能力强,颗粒之间孔隙小,不易于降雨入下渗,导致地表径流量大。而黄土疏松多孔,保水、持水能力差,入渗速率大从而地表径流深减小。同时不同土壤类型条件下结皮发育的差异对地表径流深也存在一定的影响,但因试验过程中没有测定结皮,因而不展开更为深入的讨论。

水质显著影响坡面径流深($P<0.01$),且去离子水与盐水的径流深在不同雨强、坡度、土壤类型的处理下均差异显著($P<0.05$)。黄土在去离子水条件下的径流深最大,为 13.0 mm,其次为盐水(11.4 mm)和自来水(7.3 mm)。塿土去离子水的径流深也最大,为 37.1 mm,是盐水和自来水的 1.36 倍和 1.26倍。当降雨强度、坡度一定时,径流深随着含盐量的增大而减少。此外,盐水和自来水的电导率大,抑制了结皮发育,入渗量增大,导致径流深减少。

2 种土壤在任意试验组合条件下,去离子水产生的径流深均最大,说明以去离子水作为人工模拟降雨供水水源时,结皮发育较好,有利于坡面产流。

表 3　降雨量为 45.5 mm 时不同试验处理下的径流深　　mm

土壤类型	水质	降雨强度 45.5/(mm·h^{-1})		降雨强度 95.5/(mm·h^{-1})		平均值	径流系数	方差分析水质成对 p 值
		坡度 8.7%	坡度 25.9%	坡度 8.7%	坡度 25.9%			
黄土	去离子水	10.29	9.73	15.68	16.28	13.00	0.29	A=0.01
	自来水	3.98	7.30	8.18	9.74	7.30	0.16	B=0.04
	盐水	8.38	6.57	9.99	20.93	11.47	0.25	C=0.68
塿土	去离子水	35.97	33.73	41.57	37.40	37.17	0.82	A=0.00
	自来水	28.16	29.11	31.54	31.04	29.96	0.66	B=0.07
	盐水	25.75	24.97	28.82	29.86	27.35	0.60	C=0.03

注:A 为去离子水和自来水间进行比较的成对 T 检验 p 值;B 为去自来水和盐水间进行比较的成对 T 检验 p 值;C 为去离子水和盐水间进行比较的成对 T 检验 p 值。

2.3　水质对产沙过程的影响

产沙速率是单位时间内坡面径流输移的泥沙量,反映了一段时间内侵蚀强度的变化情况,图 2 为不同处理条件下产沙速率过程曲线,统计分析结果表明土壤类型、坡度、降雨强度、供水水质均显著影响产沙速率($P<0.01$)。

2 种土壤产沙过程差异显著,在小雨强条件下,黄土各处理的产沙过程差异不明显;在大雨强条件下,不同供水水质下的产沙速率均随时间呈显著增加趋势。对于塿土,试验初期产沙速率最大,随后逐渐降低,不同供水水质的产沙速率大约在 30 min 呈稳定状态。2 种土壤的产沙速率与产流速率变化趋势基本对应,但也存在一定差异,试验初期塿土产沙速率的变化过程与产流过程明显不一致,究其原因可能是在径流产生之前地表积累了大量的、由降雨溅蚀引起的松散土壤颗粒,产流后易被坡面径流输移,导致试验初期产沙速率极高,这部分松散土壤颗粒被输移后,剩下的土壤较难被侵蚀,故产沙速率迅速下降,随着试验的持续,产流过程达到稳定状态,产沙速率也达到稳定状态。同时发现,无论是哪种土壤和供水水质,25.9%陡坡度的产沙速率显著大于缓坡的产沙速率,由于坡度对坡面产流影响不显著,从而表明坡度主要是通过影响坡面流流速增加侵蚀动力,从而间接影响坡面产沙过程。

土壤侵蚀分为土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积 3 个子过程,因此产沙过程受到 2 个条件限制,即分离过程限制和输移过程限制。土壤分离是指在降雨击溅和径流冲刷作用下,土壤颗粒脱离土体的过程[13],是土壤侵蚀发生的初始阶段,是泥沙产生的必然途径[14],这个过程决定了可供径流输移泥沙的量,而坡面径流输移泥沙的大小受控于坡面径流的挟沙力,如可供输移的量大于挟沙力,则部分泥沙必然会沉积在坡面,而产沙速率则是这 2 个过程共同作用的结果。比较图 1 和图 2 可以发现,产沙过程和产流过程间存在着明显的差异,特别是降雨初期的塿土更是如此,从而说明在本试验条件下产沙过程主要受控于土壤分离过程。但需要指出的是,本试验土槽坡长仅 1 m,随着坡长增加,细沟开始形成并发育,坡面流的动力条件会发生显著变化,侵蚀过程的动力机制是否发生变化尚需进一步研究。

2.4　水质对产沙量的影响

泥沙是被分离和输移的松散的土壤颗粒。泥沙量的多少在一定程度上反应了侵蚀程度的强弱。本试验泥沙量是在总降雨量为 45.5 mm 时对应的总泥沙量(表 4)。统计分析表明土壤类型、坡度、降雨强度、供水水质均显著影响产沙量($P<0.01$)。

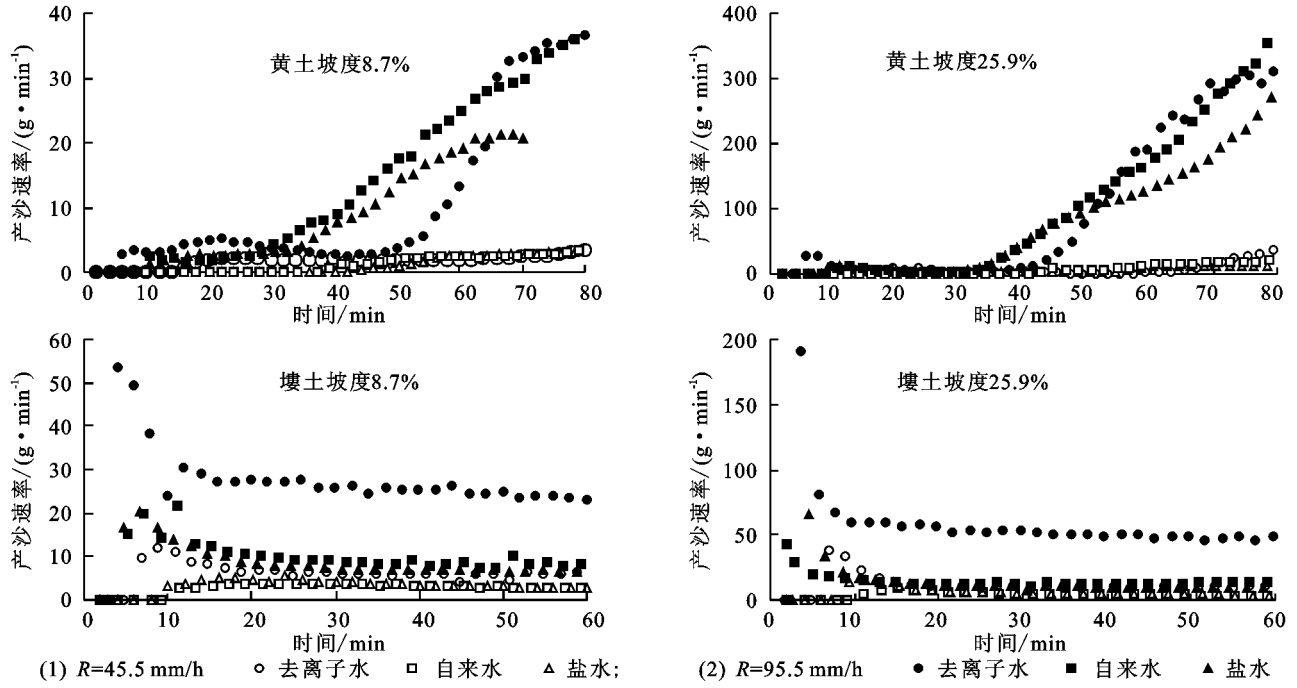

图 2 不同处理下产沙速率过程曲线

表 4 降雨量为 45.5 mm 时不同试验条件下的产沙总量 g

土壤类型	水质	降雨强度 45.5/(mm·h⁻¹)		降雨强度 95.5/(mm·h⁻¹)		均值	方差分析
		坡度 8.7%	坡度 25.9%	坡度 8.7%	坡度 25.9%		水质成对 p 值
黄土	去离子水	85.21	122.73	96.43	204.81	127.30	A=0.00
	自来水	23.71	102.73	47.93	101.89	68.93	B=0.48
	盐水	39.99	138.00	45.25	103.91	81.79	C=0.00
壤土	去离子水	371.37	711.89	847.85	1847.19	944.58	A=0.00
	自来水	192.53	321.74	295.74	488.75	324.58	B=0.67
	盐水	166.05	252.63	326.80	451.45	299.23	C=0.00

注:A 为去离子水和自来水间进行比较的成对 T 检验 p 值;B 为去自来水和盐水间进行比较的成对 T 检验 p 值;C 为去离子水和盐水间进行比较的成对 T 检验 p 值。

由表 4 可知,2 种土壤类型的产沙量差异显著($P<0.01$),相同试验条件下壤土的产沙量远大于黄土,壤土在不同雨强和坡度条件下去离子水、自来水和盐水的产沙量分别是黄土的 7.42,4.70 和 3.66 倍。由于试验处理相同,所以这一差异主要是由壤土与黄土的产流量不同引起。由上文可知,壤土条件下的产流量远大于黄土,随着径流深的增大,土壤分离能力迅速增大[14],从而导致产沙量增大。坡度对产沙量影响也十分显著($P<0.01$),陡坡(25.9%)的产沙量远大于缓坡(8.7%)的产沙量,相同试验条件下前者为后者的 1.38~4.33 倍。

当雨强和坡度相同时,自来水与盐水的产沙量差异并不显著($P>0.05$),而去离子水的产沙量显著大于自来水与盐水($P<0.05$)。就黄土而言,去离子水的产沙量为 127.30 g,而自来水和盐水的产沙量分别减少了 45.9%和 35.8%。壤土也有相似的结果,去离子水的产沙量最大,高达 944.58 g,自来水和盐水的产沙量分别减少了 65.6%和 68.3%。表明如若采用杨凌本地的自来水或者盐水进行人工模拟降雨试验,会导致产沙量显著偏小,产沙量仅为去离子水(类似于天然降雨)产沙量的 50%,这一结果和 Borselli 等[7]的结论相似。

3 结 论

利用黄土高原 2 种典型的土壤类型(黄土和壤土),在不同降雨强度和坡度组合条件下进行了人工模拟降雨试验,研究了去离子水、自来水、盐水对坡面产流、产沙过程及径流深和产沙量的影响。结果表明,土壤类型、降雨强度和水质类型均显著影响径流深、产流速率、产沙量和产沙速率($P<0.01$),坡度只对产沙量和产沙速率影响显著($P<0.01$)。以壤土为例,去离子水的产流速率最大,而自来水与盐水的产流速率相当,且明显小于去离子水。当总降水量为 45.5 mm 时,与去离子水相比,黄土条件下自来水和盐水径流深减少了 5.7,1.5 mm,而在壤土条件下自来水和盐水的径流深分别减少了 7.2,9.8 mm。径流深随供水水质电导率的增大而减小。壤土去离子水的产流速率最大,而自来水与盐水的产流速率相当,且明显小于去离子水。不同供水水质条件下的产

沙过程也存在差异,去离子水的产沙速率显著大于自来水和盐水。2 种土壤去离子水的产沙量均最大,与去离子水相比,黄土自来水和盐水的产沙量分别减少了 45.9%,35.8%,而塿土自来水和盐水的产沙量分别减少了 65.6%,68.3%。就平均水平而言,去离子水的产沙量是自来水和盐水的 2 倍左右,也就是说当采用自来水进行人工模拟降雨试验时,所得产沙量仅为去离子水(与天然降雨比较接近)的 1/2 左右,会显著低估黄土高原坡面侵蚀的强度。因此,为了确保试验数据的准确性和可比性,建议采用去离子水作为人工模拟降雨试验的供水水源。

参考文献:

[1] 赵玉丽,牛健植. 人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析[J]. 水土保持研究,2012,19(4):278-283.

[2] Yu J,Lei T W,Shainberg I,et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum [J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(2):630-636.

[3] Emdad M R,Raine S R,Smith R J,et al. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation[J]. Irrigation Science,2004,23(2):55-60.

[4] 胡霞,严平,李顺江,等. 人工降雨条件下土壤结皮的形成以及与土壤溅蚀的关系[J]. 水土保持学报,2005,19(2):13-16.

[5] 吴秋菊,吴发启,王林华. 土壤结皮坡面流水动力学特征[J]. 农业工程学报,2014,30(1):73-80.

[6] Wakindiki I,Ben-Hur M. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66(3):897-905.

[7] Borselli L,Torri D,Poesen J,et al. Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2001,26(3):329-342.

[8] 栾莉莉,张光辉,刘如心,等. 人工模拟降雨水质对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):122-127.

[9] 程琴娟,蔡强国,郑明国. 黄土土壤结皮对产流临界雨强的影响分析[J]. 地理科学,2007,27(5):678-682.

[10] Frekel H,Fe M V,Levy G. Organic and inorganic anion effects on reference and soil clay critical flocculation concentration[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(6):1762-1766.

[11] Niller W P,Frenkel H,Newman K D. Effects of sodium adsorption ratio PH on dispersion and Na/Ca exchange of kaolinitic soil clays[J]. Soil Science Society of America Journal,1990,54:346-351.

[12] 吴伟,王雄宾,武会,等. 坡面产流机制研究刍议[J]. 水土保持研究,2006,13(4):84-86.

[13] 张光辉,刘宝元,何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):48-52.

[14] 柳玉梅,张光辉,韩艳峰. 坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):24-28.

(上接第 17 页)

[17] Fox D M,Bryan R B,Price A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions [J]. Geoderma,1997,80(1/2):181-194.

[18] 黄俊,吴普特,赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(10):29-37.

[19] Mahmoodabadi M,Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. Geomorphology,2016,253(1):159-167.

[20] Zhang X C,Nearing M A,Miller W P,et al. Modeling interrill sediment delivery[J]. Soil Science Society of America,1998,62(2):438-444.

[21] Zheng F L, Huang C H,Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(1):4-11.

[22] Guy B T,Dickinson W T,Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow[J]. Transactions of the ASABE,1987,30(5):1378-1386.

[23] Kinnell P I A. The impact of slope length on the discharge of sediment by rain impact induced saltation and suspension[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(10):1393-1407.

[24] 程金花,秦越,张洪江,等. 华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J]. 农业机械学报,2015,46(2):153-161.

[25] Fu S H,Liu B Y,Liu H P,et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes[J]. Catena, 2011, 84(1):29-34.