

# 两种初始土壤含水量对浑水入渗影响的试验研究

孙存喜<sup>1,2</sup>, 吴发启<sup>1</sup>, 颜秉龙<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 浑水入渗是黄土高原地区普遍存在的现象, 不同土壤初始含水量对入渗结果有着显著影响。以清水入渗为对照, 研究了不同含水量条件下浑水入渗实验特征以及减渗率等内容。分析结果表明, 第 1 min 未入渗速率、稳定入渗速率和累积入渗量均随浑水浓度增加呈指数函数关系递减, 均表现出随着浓度增加呈稳定趋势。清水的累积入渗量在相同时段内始终最大, 随着泥沙浓度增加, 累积入渗量减小。本研究结果对土壤侵蚀机理研究具有应用价值。

**关键词:** 浑水入渗; 土壤含水量; 特征值; 减渗率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0032-04

中图分类号: S152.7+2

## Effects of Two Different Initial Soil Water Contents on Muddy Water Infiltration

SUN Cun-xi<sup>1,2</sup>, WU Fa-qi<sup>1</sup>, YAN Bing-long<sup>2</sup>

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

2. Lianyungang Water Resources Planning and Designing Institute Co. Ltd, Lianyungang, Jiangsu 222000, China)

**Abstract:** Muddy water infiltration is a common phenomenon in the Loess Plateau. The difference between infiltration processes of muddy water at different initial soil water contents is significant. Taking clear water as the control, we investigated the infiltration characteristics and infiltration decline rates of muddy water at different initial soil water contents. The results showed that the initial (at the end of first minute) and final stable infiltration rates as well as the cumulative infiltration volumes decreased exponentially as the turbidity increased. Those relationships appeared less variable with an increase in turbidity. For the same time duration, the cumulative infiltration volumes were always the greatest with clear water, and increasingly smaller as suspended solid concentration increased. The results of this study may be helpful to study soil erosion mechanism.

**Keywords:** muddy water infiltration; soil moisture; threshold value; infiltration reduction rate

土壤初始含水量对入渗有很大的影响<sup>[1]</sup>。在其它条件相同时, 土壤湿度越高, 土壤吸水能力越小, 土壤的渗透能力随土壤含水量的增加而减小<sup>[2]</sup>。土壤越干燥, 初始入渗速率越大。初始含水量越低, 基质势梯度量值越大, 需要较多水分进入较大充气空隙以接近饱和。土壤含水量主要从入渗水流湿润区的平均势梯度方面影响土壤水分入渗能力。含水量越高, 水分入渗锋面的土水势越高, 则水分入渗锋面与地面间的平均水势梯度越小, 土壤的入渗能力越低。目前关于土壤初始含水量对入渗影响的研究, 大多是在含水量分布均匀的前提下进行试验研究, 有关土壤初始含水量对入渗影响报道比较少。为了深入研究土壤初始含水量对入渗的影响因素, 探讨浑水入渗机制等问题, 本文以清水入渗作为对照, 测定 2 种含土壤初

始含水量条件下, 不同浓度浑水入渗的特征值和减渗率等指标, 进一步探讨了含水量对浑水入渗的影响, 为深入探讨黄土高原地区土壤侵蚀发生机理及生态环境建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试区概况

供试区位于陕西省合阳县甘井镇大田内, 海拔 800~1 543.2 m, 地理坐标为 34°59′—35°26′N, 109°58′—110°27′E, 地势西北高东南低。年平均气温 10.5℃, 年平均降水 596.3 mm, 全年降水的 54.7% 集中在 7—9 月, 属暖温带半干旱型大陆性季风气候。土壤侵蚀模数为 800~1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

### 1.2 供试区土壤基本物理性质

试验土壤耕层深度一般为 20—25 cm, 质地为半

垆土, 平均容重  $1.29 \text{ g/cm}^3$ , 有机质平均含量  $8.39 \text{ g/kg}$ 。采集的土样经自然风干后, 过  $1 \text{ mm}$  孔径的土筛后利用沉降法对土壤进行颗粒分析<sup>[3]</sup>(表 1)。

表 1 供试区土壤粒径组成

范围/mm	0 < 0.002	< 0.02	< 0.2	< 2	> 2
体积含量/%	3.96	47.21	44.19	4.64	0.00

### 1.3 供试水样

入渗水样分清水和浑水 2 种, 清水作为对照 (CK); 浑水具体配置方法为: 采集试验区耕层内 (0~20 cm) 的土壤样品, 混合均匀风干, 过直径  $1 \text{ mm}$  的土筛过筛, 在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘干 8~10 h, 用来配置浑水溶液。

浑水溶液配置: 试验浓度用体积含量计, 即每  $1 \text{ m}^3$  浑水中含有多少公斤泥沙。试验设计 13 种浓度, 分别为 0 (清水), 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 300, 400 和  $500 \text{ kg/m}^3$ , 2 个重复。

### 1.4 测试方法

入渗试验仪器采用双环入渗仪, 双环高  $35 \text{ cm}$ , 内环直径  $30 \text{ cm}$ , 外环直径  $60 \text{ cm}$ 。内环为入渗环, 外环为保护环。配置溶液装入  $100 \text{ L}$  塑料大桶, 人工搅动。

供试大田是夏季休闲农田经过整地, 休闲 2 个月以上, 经过几场降雨, 土壤容重基本达到稳定之后开始试验。整平地面, 去除杂物, 然后将双环平稳打入土中, 下环深度  $20 \text{ cm}$  (到达犁底层)。为保证试验在等同条件下进行, 采用人工灌水的方式, 保持 2 个水平的土壤含水量, 即  $9.5\%$  (含水量 I) 和  $22\%$  (含水量 II)。对于含水 I 的控制, 预先在计划做试验的大田持续测定含水量, 当土壤含水量达到设计含水量时, 立即采用塑料薄膜覆盖, 并加盖柴草, 以保持土壤含水量的稳定。对于含水 II 的控制, 试验前, 采用人工洒水的形式, 预先进行洒水, 然后持续测定土壤含水量, 当土壤含水量达到设计含水量时, 开始做试验。烘干法实地测得平均含水量为  $22\%$ , 各个试验含水量的平行误差均在  $5\%$  以内, 消除水分差异对入渗的影响, 提高试验准确性。

为了防止添加浑水时击溅打击环内土壤而引起浓度变化, 在实验开始前, 在环内平铺 1 层  $2 \text{ cm}$  厚, 直径  $2\sim 5 \text{ mm}$  的粗沙, 同时在沙层上铺设孔径  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的钢制沙网, 保护沙层免受扰动。采用定量加水计时测量法。在整个试验过程中不停地人工搅动内环中的入渗水样, 以免水样中泥沙的大量沉淀而影响实验效果<sup>[4]</sup>, 3 次重复, 取平均值。

## 2 结果分析

### 2.1 初始含水量与累积入渗量关系

$100 \text{ min}$  内的入渗量是反映土壤入渗能力的重要参数, 故试验选择  $100 \text{ min}$  内的入渗量作为反映土壤浑水入渗能力的参数进行分析<sup>[5]</sup>。实测数据列表如表 2。为了方便研究, 将所记录测定的累积入渗量值和浓度进行对数转换, 而含水量用原始值 (本表无清水转换值, 清水时浓度数值为 0, 不能进行对数转换)。

表 2 两种土壤含水量的入渗量测定值

浓度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	浓度 转换值	含水量 I		含水量 II	
		入渗量/ mm	转换值	入渗量/ mm	转换值
0	—	241.92	—	174.01	—
10	2.30	226.35	5.42	166.94	5.10
20	3.00	207.96	5.34	135.81	4.99
30	3.40	176.84	5.18	134.40	4.85
40	3.69	149.96	5.01	118.84	4.68
50	3.91	135.10	4.91	110.35	4.60
60	4.09	128.03	4.85	101.86	4.52
80	4.38	106.10	4.66	96.91	4.42
100	4.61	91.96	4.52	75.69	4.32
200	5.30	60.13	4.10	50.93	3.93
300	5.70	39.33	3.67	31.97	3.46
400	5.99	26.88	3.29	23.34	3.12
500	6.22	21.93	3.09	19.81	2.99

将含水量对入渗的影响进行单因子研究, 采用 SPSS 进行线性拟合, 得出拟合方程。SPSS 拟合如下式:

$$\ln y = 7.299 - 0.599 \ln m - 0.018 \alpha \quad (1)$$

$$y = e^{(7.299 - 0.599 \ln m - 0.018 \alpha)} \quad (2)$$

累积入渗量与含水量、浓度的关系式

$$y = \frac{1478.813}{m^{0.599} \times 1.018^\alpha}$$

式中:  $y$ ——入累积入渗量 (mm);  $m$ ——浑水浓度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $\alpha$ ——土壤含水量 (%)。

其中,  $m$  达到了极显著水平 ( $p < 0.001$ );  $\alpha$  达到了显著水平 ( $p < 0.05$ )。复相关系数  $r^2 = 0.931$ , 说明该方程很好地表达了累积入渗量与浓度、含水量之间的关系, 同时浓度和含水量与累积入渗量的关系极为显著。关系式表明, 浓度和含水量均与入渗量呈负相关。

含水量 I 和含水量 II 的累积入渗量随浓度的变化关系如图 1 所示。

由图 1 可见, 无论含水量大小如何, 随浑水浓度的增加, 累积入渗量均呈递减趋势。清水时的累积入渗量最大 (分别为  $241.92$  和  $174.01 \text{ mm}$ ), 并且差值

较大。当入渗水体中有泥沙后, 累积入渗量迅速减小。刚开始时减小幅度最快, 从清水到  $20 \text{ kg/m}^3$ , 含水量 I 的入渗量由  $241.92 \text{ mm}$  减小到  $207.96 \text{ mm}$ , 减小了  $33.96 \text{ mm}$ , 减少的比率为  $14.04\%$ 。含水量 II 的入渗量由  $174.01 \text{ mm}$  减小到  $135.81 \text{ mm}$ , 减小了  $38.2 \text{ mm}$ , 减少的比率为  $21.95\%$ 。随浓度的增加, 减小幅度逐渐减小, 趋于平稳。大约从浓度  $300 \text{ kg/m}^3$  开始, 2 种含水量的累积入渗量已经很接近, 随浓度的增加, 2 条曲线几乎重合。

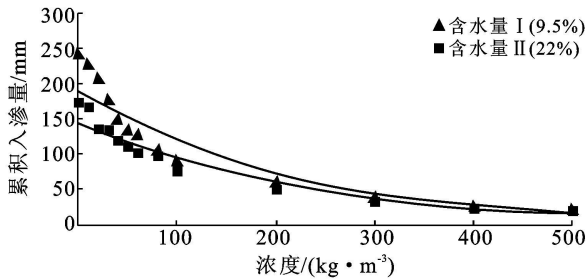


图 1 两种土壤含水量的土壤浓度—入渗量关系式

可见, 含水量小的曲线位于含水量大的曲线之上。相同浓度的浑水在不同含水量时, 入渗量不同, 含水量小的入渗量始终较大。当浓度超过大约  $300 \text{ kg/m}^3$  后, 不同含水量的入渗量接近相等。这是因为此时入渗过程已经进行了一段时间, 大量的水分已进入土体, 土壤含水量也发生了变化。

累积入渗量与浓度拟合关系式为:

$$\text{含水量 I: } y = 189.0496e^{-0.0480x} \quad (3)$$

式中:  $x$  ——浑水浓度;  $y$  ——累积入渗量。复相关系数  $r^2 = 0.9506$ 。

$$\text{含水量 II: } y = 143.8128e^{-0.0044x} \quad (4)$$

式中:  $x$  ——浑水浓度;  $y$  ——累积入渗量。复相关系数  $r^2 = 0.9637$ 。

## 2.2 入渗初期特征分析

无论土壤含水量大小, 入渗初期入渗速率较大, 随后逐渐减慢, 最后趋于稳定。李发文等<sup>[6-7]</sup>研究点源入渗后认为, 初始含水量对入渗的影响主要反映在入渗初期。在相同的入渗时间内, 累积入渗量随着土壤初始含水量的增大而减小。解文艳等<sup>[8]</sup>认为, 入渗率随时间逐渐减小, 最后趋于一个稳定的数值。

含水量 I, 含水量 II 的第 1 min 末入渗速率与浓度关系见图 2。

第 1 min 末入渗速率与浓度拟合关系式为:

$$\text{含水量 I: } y = 10.04e^{-0.0045x} \quad (r^2 = 0.9417) \quad (5)$$

$$\text{含水量 II: } y = 6.1572e^{-0.0032x} \quad (r^2 = 0.9422) \quad (6)$$

清水的 1 min 末入渗率最大, 分别达到  $13.50$  和  $7.94 \text{ mm/min}$ , 并随着浑水浓度的增加呈递减趋势。

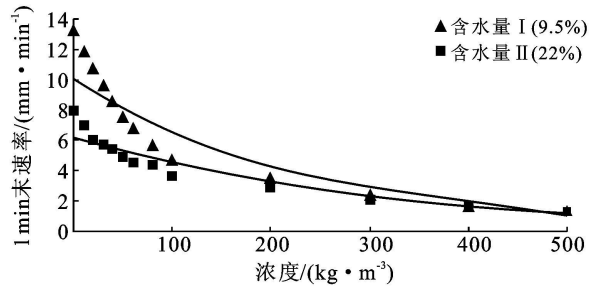


图 2 不同含水量土壤入渗第 1 min 末速率—浓度关系

最初浑水浓度较小时, 第 1 min 末入渗率递减较快, 随着浑水浓度增大, 第 1 min 末入渗率递减减慢, 在达到某一值之后逐步趋于稳定值。稳定值分别为  $1.80$  和  $1.74 \text{ mm/min}$ 。

## 2.3 初始含水量对稳定入渗特征影响的分析

图 3 中稳定入渗率与浓度拟合关系式为:

$$\text{含水量 I: } y = 0.9680e^{-0.0043x} \quad (r^2 = 0.9888) \quad (7)$$

$$\text{含水量 II: } y = 0.8051e^{-0.0044x} \quad (r^2 = 0.9396) \quad (8)$$

由图 3 可以看出, 不论含水量大小如何, 稳定入渗速率均随浓度的增大而减小。清水的稳定入渗速率最大, 分别达到  $1.12$  和  $1.11 \text{ mm/min}$ 。随浓度的增加, 稳渗率不断减小, 大约在  $300 \text{ kg/m}^3$  后, 2 个稳渗率数值几乎无多大差别, 分别为  $0.18$  和  $0.13 \text{ mm/min}$ 。此时, 含水量对入渗的影响已经很小了。含水 I 稳渗速率曲线图的中间几个数值比较接近, 这可能是由于实验过程中的系统误差造成的。

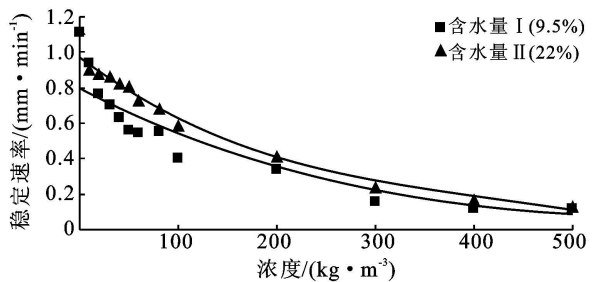


图 3 不同含水量的土壤浓度—稳定速率关系

## 2.4 初始含水量对平均入渗特征的影响研究

平均入渗速率是指累积入渗量与所用时间的比值, 平均入渗速率也是入渗过程的特征值之一<sup>[5]</sup>。本实验的平均入渗数值如表 3。

含水量 I, 含水量 II 的平均入渗速率与浓度关系如图 4 所示。从图 4 可以看出, 无论含水量大小, 平均入渗速率均随浓度的增大而减小。清水时的平均入渗速率最大, 分别达到  $2.42$  和  $1.74 \text{ mm/min}$  (表 3), 以后逐渐减小, 大约在  $300 \text{ kg/m}^3$  以后基本趋于稳定值, 分别为  $0.29$  和  $0.25 \text{ mm/min}$ 。

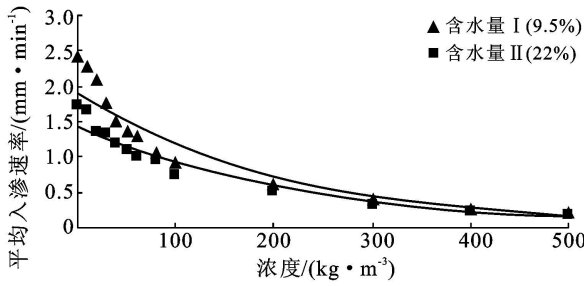


图 4 不同含水量土壤的浓度—平均入渗速率关系

平均入渗速率与浓度拟合关系式为:

$$\text{含水量 I: } y = 1.8905e^{-0.0048x} \quad (r^2 = 0.9506) \quad (9)$$

$$\text{含水量 II: } y = 1.4381e^{-0.0044x} \quad (r^2 = 0.9637) \quad (10)$$

表 3 不同含水量的土壤平均入渗速率

浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0	10	20	30	40	50	60	80	100	200	300	400	500
含水量 I	2.42	2.26	2.08	1.77	1.50	1.35	1.28	1.06	0.92	0.60	0.39	0.27	0.22
含水量 II	1.74	1.67	1.36	1.34	1.19	1.10	1.02	0.97	0.76	0.51	0.32	0.23	0.20

表 4 不同含水量的土壤入渗量比较

浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0	10	20	30	40	50	60	80	100	200	300	400	500
含水量 I	241.9	226.4	207.9	176.8	149.9	135.1	128.0	106.1	92.0	60.1	39.3	26.9	21.9
含水量 II	174.0	166.9	135.8	134.4	118.8	110.4	101.9	96.9	75.7	50.9	32.0	23.3	19.8
差值	67.9	59.4	72.2	42.4	31.1	24.8	26.2	9.2	16.3	9.2	7.4	3.5	2.1

### 3 结论

本文针对黄土高原暴雨径流中的高含沙水流现象,以清水入渗为对照,采用自制双环入渗仪,设计 2 个不同的含水量进行入渗试验,主要探讨土壤含水量对浑水入渗的影响。

(1) 无论土壤含水量大小,随着浑水浓度的增加,累积入渗量均呈递减趋势,清水时的累积入渗量最大。当入渗水体中有泥沙后累积入渗量迅速减小。浑水浓度较低时减小幅度最快,随浓度的增加,减小幅度逐渐减慢,并趋于平稳。当浑水浓度超过约 300 kg/m<sup>3</sup> 后,不同土壤含水量处理下的入渗量几乎接近相等。

(2) 无论土壤含水量大小,入渗初期入渗速率较大,随后逐渐减慢。清水的 1 min 末入渗率最大,并随着浑水浓度的增加呈递减趋势。在浑水浓度达到某一值之后逐步趋于稳定。

(3) 无论土壤含水量大小,稳定入渗速率随浓度的增大而减小。清水的稳定入渗速率最大,分别达到 1.12 和 1.11 mm/min。随浑水浓度的增加,稳渗率不断减小,大约在 300 kg/m<sup>3</sup> 后,2 个土壤含水量处理下的稳渗率数值接近相等。

### 2.5 不同含水量条件下减渗效果分析

为了更好地分析含水量对入渗的影响,现将含水量 I、含水量 II 在相同浓度时的入渗量之差与浓度的关系列表进行研究分析(表 4)。

由表 4 可见,在清水时不同含水量的累积入渗量数值最大,并且两者的差值较大,为 67.9 mm。随浓度的增加,差值逐渐减小。由于浓度和含水量的共同作用,在小浓度情况下,含水量对入渗量的影响较大。浓度小于 60 kg/m<sup>3</sup> 时,两者的差值都在 20 mm 以上,以后逐渐减小。表中 20, 60, 100 kg/m<sup>3</sup> 时的数值出现反常现象是由于偶然误差引起的,对总体结论影响不大。

(4) 平均入渗速率均随浑水浓度的增大而减小。清水时的平均入渗速率最大,以后逐渐减小,大约在 300 kg/m<sup>3</sup> 以后基本趋于稳定值。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Grissinger E H. Resistance of selected clay systems to erosion by water[J]. Water Resources Research, 1966, 2: 131-138.

[2] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 40-42.

[3] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.

[4] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 3(2): 188-190.

[5] 孙存喜, 吴发启, 王健. 不同浓度浑水入渗试验研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 57-60.

[6] 李发文, 费良军. 膜孔多向交汇入渗特性及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 105-109.

[7] 费良军, 谭奇林, 王文焰. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 70-74.

[8] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 5(3): 272-275.