

泥沙粒度组成对浑水间歇入渗特性的影响研究*

费良军 王文焰

(西安理工大学)

摘 要 利用大田浑水间歇入渗试验资料,探讨了浑水间歇入渗特性及其减渗效果;研究了不同泥沙粒度组成对浑水连续和间歇入渗规律的影响;在此基础上,提出了泥沙粒度组成对浑水入渗的影响主要取决于小于 0.01 mm 的物理性粘粒含量,且用物理性粘粒含量能较好反映浑水泥沙粒度组成对浑水入渗的影响。

关键词 浑水 波涌灌溉 间歇入渗 泥沙粒度组成

波涌灌溉(surge flow irrigation)是美国于 70 年代末提出的一种节水型地面灌溉新技术。直至目前,国内外在波涌灌方面的研究基本上都是针对清水条件开展工作的,很少有人开展有关浑水波涌灌方面的试验研究^[1~3],而我国黄河流域灌区大多是以多泥沙河流为水源的浑水灌区,为充分利用浑水资源发展节水灌溉,急待结合我国北方浑水灌溉实际,开展浑水波涌灌溉理论与技术试验研究。浑水波涌畦灌条件下的土壤入渗为一维垂直浑水间歇入渗,目前很少见到国内外开展浑水间歇入渗方面的研究报道^[4]。浑水间歇入渗较清水间歇入渗的最大差别在于浑水中含有泥沙,浑水含沙率大小和泥沙粒度组成等对浑水间歇入渗特性及减渗效果影响很大,从而影响浑水波涌灌的节水效果和灌水质量。

1 大田试验

1997 年 7 月,利用自动供水双套环入渗仪^[5]在陕西洛惠渠灌区进行了大田浑水间歇入渗试验。试验田土壤基本物理参数见表 1,试验采用的 4 种不同粒度组成的泥沙见表 2,分别以质量百分比人工配制成含沙率为 16 % 的浑水进行试验。

表 1 试验田土壤基本物理参数

Tab 1 The basic soil physical parameters of experimental field

土壤 种类	平均干容重 /g · cm ⁻³	密度 /g · cm ⁻³	孔隙率 /%	田间持水率 /%
粘壤土	1.401	2.658	47.3	27.8

表 2 不同浑水泥沙的粒度组成

Tab 2 The clay and sand grade of different muddy water

%

浑水泥沙种类	泥沙粒径/mm					
	< 0.1	< 0.05	< 0.01	< 0.005	< 0.002	< 0.001
A	99.90	84.00	54.40	43.91	30.22	23.97
B	99.85	83.75	47.89	36.71	25.47	18.87
C	98.64	94.25	42.79	29.18	17.79	10.32
D	95.44	88.37	35.89	21.15	10.25	2.39

收稿日期: 1998-04-27

1999-01-14 修订

* 国家自然科学基金资助项目(59479023)

费良军, 博士, 副教授, 西安市金花南路 西安理工大学水资源研究所, 710048

2 泥沙粒度组成对浑水间歇入渗的影响

2.1 泥沙粒度组成对浑水入渗特性的影响

图 1 表示含沙率为 16 % 的 4 种不同泥沙粒度组成的浑水间歇入渗和连续入渗试验结果, 其浑水间歇入渗的周期数为 4, 周期供水时间为 15 min, 循环率为 1/3。为分析比较, 图 1 又给出了相同条件下的清水连续入渗试验结果。

为表述浑水间歇入渗的减渗效果和入渗特性, 定义浑水间歇入渗减渗率指标如下: 以 $Z_{清Si}$ 、 $Z_{清C}$ 分别表示清水间歇入渗前 i 周期入渗量和相同净入渗历时的清水连续入渗量, $Z_{浑Si}$ 、 $Z_{浑C}$ 分别表示浑水间歇入渗前 i 周期入渗量和相同净入渗历时的浑水连续入渗量, 则

$$\eta_i = \frac{Z_{清C} - Z_{浑Si}}{Z_{清C}} \times 100\% \tag{1}$$

η_i 表示浑水间歇入渗前 i 周期相对同条件下清水连续入渗的减渗率, 它体现了浑水泥沙和间歇阶段共同作用下的减渗效果。

$$\eta_{bi} = \frac{Z_{浑C} - Z_{浑Si}}{Z_{浑C}} \times 100\% \tag{2}$$

η_{bi} 表示浑水间歇入渗相对同条件下浑水连续入渗的减渗率, 它体现了浑水条件下间歇阶段作用的减渗效果。

由图 1 资料计算得含沙率为 16 % 的浑水间歇入渗的减渗率 η_i 、 η_{bi} (表 3), 表中 $d_{0.01}$ 表示浑水泥沙中粒径小于 0.01 mm 的物理性粘粒含量占泥沙总量的质量百分数, Z_i 表示浑水间歇入渗前 i 周期的入渗量。

表 3 不同泥沙粒度组成的浑水间歇入渗的减渗率

Tab 3 Reduced infiltration rate of muddy water intermittent infiltration

$d_{0.01}/\%$	入渗方式	Z_i/mm				η_i				η_{bi}			
		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	η_1	η_2	η_3	η_4	η_{b1}	η_{b2}	η_{b3}	η_{b4}
35.89 (D)	清水	连续	36.0	47.0	55.0	61.5							
	连续	31.0	41.5	48.0	53.0								
42.79 (C)	连续	31.0	37.0	41.5	44.5	13.89	21.28	24.55	27.64	0	10.84	13.54	16.04
	间歇	20.5	27.0	31.5	35.5	43.06	51.06	52.73	55.28	0	14.81	17.46	20.85
47.89 (B)	连续	20.5	23.0	26.0	28.1								
	间歇	17.0	24.7	28.5	33.0	52.78	56.38	58.01	59.39	0	17.10	19.32	22.39
54.40 (A)	连续	17.0	20.5	23.1	25.7								
	间歇	15.5	21.0	24.5	27.0	56.94	63.83	65.45	67.48	0	19.05	22.45	25.93
	连续	15.5	17.0	19.0	20.1								
	间歇												

由图 1 和表 3 可以看出: 不同泥沙级配组成的浑水连续入渗和间歇入渗均小于相同条件下的清水连续入渗能力; 对于含沙率相同, 而泥沙粒度组成不同的浑水, 则入渗能力和减渗效果不同, 随着浑水泥沙中小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量的增大, 其浑水连续和间歇入渗能力减小, 说明浑水泥沙粒度组成直接影响浑水的入渗特性, 从而影响浑水波涌灌田面水流运动特性和灌水质量。

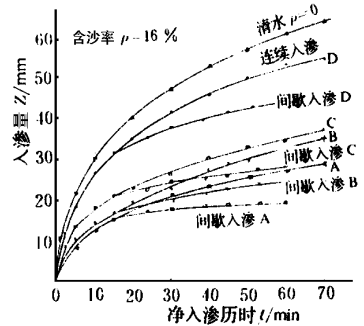


图 1 不同泥沙粒度组成的浑水入渗曲线
Fig 1 Muddy water infiltration curve under different clay and sand grade

2.2 物理性粘粒含量对浑水入渗的影响

浑水泥沙粒度组成反映了各级粒径泥沙的相对含量, 而这一相对含量直接影响浑水泥沙的沉降规律和田面致密层的形成。粗颗粒在浑水中极易下沉, 在浑水中分布不均匀, 使浑水的稳定性差; 而细颗粒则情况相反, 泥沙颗粒愈细, 其比表面积愈大, 当泥沙粒径 $d < 0.01$ mm 时, 颗粒表面的物理化学作用使颗粒间产生微观结构, 随着这种细颗粒泥沙含量的增加, 相邻的若干带有吸附水膜的细颗粒便彼此连结在一起形成絮粒、絮团和絮网结构, 即发生絮凝现象。粘性颗粒的絮凝, 不但会影响水的物理特性, 如粘滞性、挟沙能力等, 还会改变浑水流变特性, 使从牛顿体转变为非牛顿体。

根据粗、细泥沙颗粒在浑水中的界面性质、受力状态以及是否发生絮凝现象, 可以将其分为两类。一类是粒径 $d \leq 0.01$ mm 的物理性粘性颗粒; 另一类是 $d > 0.01$ mm 的非粘性颗粒。粘性与非粘性颗粒因受力性质的不同, 使它们从微观和宏观两方面对浑水产生影响, 其中粘性颗粒是最活跃的成份, 它的含量多少是影响浑水特性的主要因素^[6]。大量文献资料表明, 在一定土壤含水量条件下, 土壤的可塑性、胀缩性、吸湿性及最大分子持水量等, 随土壤粒径变小而增大, 通常是以 0.01 mm 的粒径为明显分界限^[7]。因此, 小于 0.01mm 粒径的物理性粘粒含量是土壤粒度组成中的一个重要指标。

综上所述, 浑水泥沙粒度组成对浑水理化性质、泥沙沉降规律、浑水粘滞性、挟沙能力、絮凝现象和沉积层土壤性质等的影响主要是由小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量所决定, 则不同泥沙粒度组成对浑水入渗特性的影响主要由物理性粘粒含量的多少所反映。因此, 可以用小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 来表征不同泥沙粒度的特性。

由表 3 可以看出: 在泥沙粒度组成一定情况下, 减渗率 η_k 、 η_i 随浑水间歇入渗周期数的增大而增大, 说明浑水泥沙和间歇阶段对浑水间歇入渗具有减渗作用, 在第一入渗周期减渗作用最大, 以后逐渐减小; 在同一入渗周期内, 浑水间歇入渗的减渗率随着泥沙中物理性粘粒含量的增大而增大。对表 3 中不同周期的 η_k 、 η_i 与 $d_{0.01}$ 关系回归拟合得

$$\begin{aligned} i = 2 \qquad \eta_2 &= 1.543d_{0.01}^{0.931} & \eta_2 &= 0.296d_{0.01}^{1.144} \\ i = 3 \qquad \eta_3 &= 1.829d_{0.01}^{0.894} & \eta_3 &= 0.336d_{0.01}^{1.050} \\ i = 4 \qquad \eta_4 &= 2.347d_{0.01}^{0.837} & \eta_4 &= 0.667d_{0.01}^{0.914} \end{aligned}$$

上式拟合的相关系数均大于 0.95, 说明 η_k 、 η_i 与 $d_{0.01}$ 的相关性很好。式中 η_k 、 η_i 和 $d_{0.01}$ 均以百分数计。从 η_k 、 η_i 与 $d_{0.01}$ 的拟合结果均可以看出: 拟合的系数随周期数 i 的增大而增大, 而指数随周期数的增大而减小。

2.3 泥沙粒度组成对浑水入渗规律的影响

试验研究表明: 不同泥沙粒度组成的浑水连续入渗量 Z 与入渗历时 t 的关系仍符合 Kostikov 入渗模型, 设

$$Z = K t^\alpha \qquad (3)$$

式中 K 、 α ——分别为入渗系数和指数, 由试验资料确定。对图 1 中清水和浑水连续入渗资料拟合 K 、 α 结果见表 4, 可以看出: K 随物理性粘性含量 $d_{0.01}$ 的增大而减小, α 随 $d_{0.01}$ 的增大而增大, 说明在浑水泥沙矿物

表 4 浑水连续入渗的 K 、 α 参数表

Tab 4 K and α parameters table of muddy water continuous infiltration

$d_{0.01}/\%$	K	α	K/K_0	α/α_0
清水	11.912	0.386	1	1
35.89	9.162	0.436	0.769	1.130
42.79	6.823	0.453	0.573	1.174
47.89	4.955	0.463	0.416	1.199
54.40	3.819	0.490	0.321	1.269

组成和含沙率一定条件下,浑水泥沙 $d_{0.01}$ 的增大使浑水入渗能力降低,使浑水入渗率随时间的变化率变大。

对表 4 含沙率为 16 % 的浑水连续入渗参数 K 、 α 与 $d_{0.01}$ 关系拟合得

$$K = 11.912 - 2.271 \times 10^{-4} d_{0.01}^{2.647} \quad r = 0.979 \quad (4)$$

$$\alpha = 0.386 + 1.071 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.713} \quad r = 0.993 \quad (5)$$

式中, $d_{0.01}$ 以百分数计, 相关系数 $r > 0.97$, 说明 K 、 α 与 $d_{0.01}$ 相关性很好。

若以 K_0 、 α_0 表示相应的清水连续入渗系数和指数, 则得不同 $d_{0.01}$ 的浑水连续入渗相对系数 K/K_0 和相对指数 α/α_0 (表 4)。随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大, K/K_0 减小, 而 α/α_0 增大。

$$Y_1 = K/K_0 = 1 - a d_{0.01}^b \quad (6)$$

$$Y_2 = \alpha/\alpha_0 = 1 - c d_{0.01}^d \quad (7)$$

对表 4 资料拟合得

$$Y_1 = K/K_0 = 1 - 1.891 \times 10^{-5} d_{0.01}^{2.550} \quad r = 0.979 \quad (8)$$

$$Y_2 = \alpha/\alpha_0 = 1 + 2.936 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.688} \quad r = 0.993 \quad (9)$$

$$\text{推导得} \quad Z = K t^\alpha = Y_1 K_0 t^{Y_2 \alpha_0} \quad (10)$$

$$\text{入渗率 } i = \frac{dZ}{dt} = Y_1 Y_2 K_0 \alpha_0 t^{Y_2 \alpha_0 - 1} \quad (11)$$

以上拟合的相关系数 r 均大于 0.97, 说明 K/K_0 、 α/α_0 与 $d_{0.01}$ 的相关性很好。

3 结 语

1) 不同泥沙粒度组成的浑水间歇入渗均小于同条件下的浑水连续入渗能力, 且减渗率随入渗周期数的增加而增大;

2) 对于同一含沙率的浑水, 随着浑水泥沙中小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量的增大, 其浑水连续和间歇入渗能力减小;

3) 浑水连续入渗仍符合 Kostiakov 入渗规律, 其入渗系数随泥沙中物理性粘粒含量的增大而减小, 而指数却增大;

4) 泥沙粒度组成对浑水入渗的影响可以用泥沙中小于 0.01 mm 粒径的物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 来表征。

参 考 文 献

- Westesen G L and Biglen D K. Surge flow border irrigation trials. Papers of the ASAE, 1986(86-2082)
- 费良军, 王云涛. 涌流畦灌合理畦长研究. 农业工程学报, 1994, 10(增): 122~127
- 费良军. 波涌畦灌技术要素优化组合研究. 水利学报, 1996(12): 16~22
- 费良军. 浑水间歇入渗特性研究. 西安理工大学学报, 1995(4): 280~288
- 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究. 水土保持学报, 1991(4): 20~25
- 杨美卿. 细泥沙絮凝的微观结构. 泥沙研究, 1996(3): 32~37
- 王文焰, 张建丰. 黄土的粒度组成与水分运动参数的相关性. 水利学报, 1991(1): 13~17

Effect of Clay and Sand Grade of Muddy-Water on Its Characteristics of Intermittent Infiltration

Fei Liangjun Wang Wenyan

(Xi'an University of Technology, Xi'an)

Abstract This paper studied the characteristics of muddy water intermittent infiltration based on the field experiment data. The reducing infiltration effects of the different clay and sand grade were studied further. The results showed that the 0.01 mm physical clay particle contents of clay and sand are the main affecting factors of muddy water infiltration, and using the physical clay content instead of the clay and sand grade as the influencing factor of muddy-water infiltration is better.

Key words muddy water, surge flow irrigation, intermittent infiltration, clay and sand grade