

土石混合介质入渗模型及其参数影响因素研究

杨艳芬¹, 王全九^{1,2}, 曾 辰², 刘建军¹, 李 涛¹

(1. 西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院水利部 西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 选取 4 种碎石含量、5 种碎石粒径, 将纯土作为对照, 共进行 20 组一维积水入渗试验和 20 组实测饱和导水率试验, 分析了碎石含量对土石混合介质水分运动参数的影响以及水分运动模型的适用性。结果表明: Green-Ampt 入渗公式、Philip 入渗公式、垂直一维代数模型中个别参数随碎石含量的增加呈先减小、再增大、后减小的趋势; 模型的适用性因碎石粒径而异, 粒径在 0.5~3 cm 时, 垂直一维代数模型可以相对准确地描述土石混合介质的饱和导水率, 粒径为 3~5 cm 时, Green-Ampt 公式所描述的饱和导水率精度较高。

关键词: 土石混合介质; 碎石含量; 水分运动参数; 水分运动模型; 模型适用性

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)01-0006-05

因成土过程和人类活动的影响, 许多土壤中含有一定量的碎石 (2 mm < 土壤颗粒 < 76 mm 的组分)^[1]。通常由于碎石的情性及碎石对土样处理结果影响很小的考虑, 利用除去碎石的土样研究土壤入渗特征。近年来, 一些学者指出, 土壤水分入渗是相当复杂的过程, 镶嵌在地表和土壤剖面中的碎石能够改变土壤持水特性, 影响土壤水分入渗以及耕作土壤的水分含量和植物生长, 有助于提高干旱和半干旱地区的土壤生产力^[2-4]。因此, 国内外学者对含碎石土壤的水分运动特性进行了大量研究。鉴于饱和导水率是反应土壤水力特性的一个重要参数, 许多学者对土石混合介质的饱和导水率进行了研究, Peck-Watson^[5]和 Barkensiek^[6]分别给出了纯土和含碎石土壤饱和导水率的关系式, 这样用纯土的饱和导水率就可以推求出土石混合介质的饱和导水率, 但其精确性仍需验证; Green-Ampt 入渗公式、Philip 入渗公式、垂直一维代数模型通常用于描述均质土壤入渗过程, 对土石混合介质是否适用以及其中的参数与碎石特性的关系仍值得研究。

1 试验内容与方法

为研究碎石特性与水分运动模型中参数的关系及水分运动模型对土石混合介质的适用性, 本文以碎石含量和碎石粒径为研究对象, 进行土石混合介质垂直一维土柱定水头积水入渗试验, 并测定土石混合介质的饱和导水率, 分析碎石特性对模型参数

的影响, 并分析模型的适用性。

1.1 试验内容

试验选取 4 种碎石粒径 (0.5~1 cm, 1~2 cm, 2~3 cm, 3~5 cm), 5 种碎石含量 (质量含量分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%)。每种粒径下, 进行 5 个不同含石量的积水入渗试验和实测饱和导水率试验, 将均质土作为对照, 共 20 组试验 (粒径为 3~5 cm, 含石量为 50% 时, 碎石与细土难以混合均匀, 故取消该组试验)。每组试验均设三个重复。

1.2 试验材料

试验地点位于新疆鄯善葡萄瓜果开发研究中心 1 号地, 该试验地土质属于典型的土石混合介质, 试验土样和碎石均取自 1 号地, 样品风干后过 2 mm 筛, 用马尔文激光法测定细土的颗粒组成, 划分标准采用美国农业部制的分级标准, 最终确定细土土壤质地为砂壤土 (土壤质地分析见表 1)。试验时, 将细土容重控制为 1.5 g/cm³。碎石用自制的筛子筛选出所需粒径, 碎石的基本物理参数的测定结果显示, 碎石容重介于 2.66~2.71 g/cm³ 之间, 其初始含水量和饱和含水量均非常小。细土和碎石的基本物理参数详见表 2。

表 1 土壤质地分析

Table 1 Analysis of soil texture

有效直径 (mm) Effective diameter	< 0.002	0.002~0.05	0.05~2
含量 Content (%)	8.464	31.753	59.783

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家科技支撑项目 (2007BAD38B03); 新疆自治区重大专项 (200731136-5); 国家自然科学基金项目 (50879067)

作者简介: 杨艳芬 (1984—), 女, 宁夏银川人, 硕士, 主要从事土壤物理研究。E-mail: yyf-884@163.com。

通讯作者: 王全九 (1964—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 从事土壤物理与溶质运移研究。E-mail: wquanjiu@163.com。

表 2 细土和碎石基本物理参数
Table 2 Basic physical parameters of fine earth and rock fragment

试验材料 Experimental material	粒径 Particle size (cm)	基本物理参数 Basic physical parameter		
		初始含水量 Initial water content $\theta_i(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	饱和含水量 Saturated water content $\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	容重 Bulk density (g/cm^3)
碎石 Rock fragment	0.5~1	0.0103	0.0252	2.71
	1~2	0.0096	0.0197	2.73
	2~3	0.0068	0.0131	2.72
	3~5	0.0021	0.0093	2.66
细土 Fine soil	<0.2	0.0194	0.4290	1.50

土石混合介质的容重、初始含水量、饱和含水量分别依据 Russo^[7]和 Sharma^[8]提出的公式计算,具体表示为:

$$\rho_r = \frac{\rho_f \rho_{fe}}{(1 - R_m) \rho_f + R_m \rho_{fe}} \quad (1)$$

$$\theta_{mT} = (1 - R_m) \theta_{mfe} + R_m \theta_{mf} \quad (2)$$

$$\theta_r = \rho_r \times \theta_{mT} \quad (3)$$

式中, ρ_r 为土石混合介质总容重(g/cm^3); ρ_f 为碎石容重(g/cm^3); ρ_{fe} 为细土容重(g/cm^3); R_m 为碎石的质量含量(%); θ_{mT} 、 θ_{mfe} 、 θ_{mf} 分别为土石混合介质质量含水量、细土质量含水量、碎石质量含水量(g/g); θ_r 为土石混合介质体积含水量(cm^3/cm^3)。

1.3 试验装置

垂直一维土柱积水入渗试验采用马氏瓶供水,内表面积 30 cm^2 ; 试验土柱长 100 cm , 内径 8 cm , 取样孔间隔 2.5 cm , 试验时, 水头均为 3 cm 。饱和导水率的测定采用定水头法, 采用简易马氏瓶供水, 容量 20 L , 装土容器为 PVC 管, 内径 110 cm , 高 20 cm , 底面带有均匀的出水孔。

1.4 试验过程

对于垂直一维土柱积水入渗试验, 试验前, 先计算每层(5 cm)所需的细土重量和碎石重量, 再将称量好的细土和碎石人工搅拌均匀, 填入土柱, 直至装满, 静置 24 h ; 供水前, 将水头调整为 3 cm (即马氏瓶进气口与土柱进水口距离 3 cm), 开始供水后, 连续记录马氏瓶水位值和土柱湿润锋深度, 待入渗深度达 65 cm 时停止供水, 并取土测定含水量剖面。

对于饱和导水率的测定, 装土方法同上, 装土完毕后, 将 PVC 管竖直放入水盆中, 使管内的土石混合介质由下而上湿润, 待其饱和后, 开始定水头测定饱和导水率试验, 供水前, 将水头调整为 5 cm , 待水从 PVC 管底部流出时, 用烧杯承接出流液, 过滤后称重, 连续记录相同时间内出流液的重, 待相同时间内出流液的重相等时, 结束试验。

2 结果与分析

2.1 碎石对入渗模型参数的影响

2.1.1 基本原理 Green - Ampt 入渗公式、Philip 入渗公式、垂直一维代数模型^[9]是常用的描述土壤水分运动特性的模型, 下面将利用垂直一维入渗资料推求这三个模型中的参数。

(1) Green - Ampt 入渗公式

Green - Ampt 公式假设土壤湿润锋面是水平的, 在湿润锋面存在一个固定不变的吸力, 而且湿润锋面以上的土壤处于饱和状态, 根据这一假定, 达西定理可表示为:

$$i = K_s \left(1 + \frac{h_f + H}{z_f} \right) \quad (4)$$

根据水量平衡原理, 累积入渗量表示为:

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f \quad (5)$$

式中, i 为入渗率(cm/min); I 为累积入渗量(cm); z_f 为概化湿润锋深度(cm); h_f 为湿润锋处的吸力(cm); H 为表面积水深度(cm); K_s 为饱和导水率(cm/min); θ_s 、 θ_i 分别为饱和含水量(cm^3/cm^3) 和初始含水量(cm^3/cm^3)。

(2) Philip 入渗公式

Philip 认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数关系, 具体入渗公式为:

$$i = \frac{1}{2} S t^{-0.5} + A \quad (6)$$

式中, S 为土壤吸湿率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); t 为入渗时间(min); A 为常数(cm/min), 对于长历时入渗而言, A 与饱和导水率是相同的。

(3) 垂直一维代数模型

该模型从达西定理及一维垂直水分运动基本方程出发, 利用 Parlange 假定及 Brooks - Corey 模式所描述的土壤水分特征曲线和非饱和导水率, 得到

$$i = \frac{K'_s}{\beta \times z_f'} + K_s \quad (7)$$

$$I = z'_f(\theta_s - \theta_i)/(1 + \alpha) + z'_f(\theta_r - \theta_i) \quad (8)$$

式中, K_s 为饱和导水率 (cm/min); θ_r 为滞留含水量 (cm³/cm³); β 为非饱和土壤吸力分配系数 (1/cm); α 为土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数; z'_f 为实测湿润锋深度 (cm)。

以上 3 个入渗模型形式简单, 仅需一维垂直土柱入渗资料即可推求模型参数。对于 Green - Ampt 入渗公式, 用入渗率与湿润深度倒数之间的关系 ($i \sim 1/z_f$) 可以求出饱和导水率 (K_s) 和湿润锋处的吸力 (h_f); 对于 Philip 入渗公式, 用入渗率与时间 ($i \sim t^{-0.5}$) 的关系可以求出参数 A 和土壤吸湿率 (S); 对于垂直一维代数模型, 用入渗率与湿润深度倒数之间的关系 ($i \sim 1/z'_f$) 可以求出饱和导水率 (K'_s) 和非饱和土壤吸力分配系数 (β), 用累积入渗量和湿润深度之间的关系 ($I \sim z'_f$) 可以求出参数 α 。值得注意的是, Green - Ampt 公式中的 z_f 是概化湿润锋深度, 而垂直一维代数模型中的 z'_f 是实测湿润锋深度, 二者并不等同。

2.1.2 模型参数的推求 垂直一维积水入渗试验结果显示, 土石混合介质的累积入渗量和湿润锋距离均小于细土, 相同时刻, 累积入渗量和湿润锋先随含石量的增加而减小, 在某一含量突然增大, 之后又随着含石量的增加而减小, 转折点因粒级不同而不同, 粒级为 0.5 ~ 1 cm 时, 转折点出现于 40%, 粒级为 1 ~ 2 cm 和 2 ~ 3 cm 时, 转折点出现于 30%, 粒级为 3 ~ 5 cm 时, 转折点出现于 20%。出现这种结果的原因是: 土壤中碎石的存在一方面减小了过水断面, 直接减小土壤的累积入渗量和湿润锋推进速度; 另一方面增加了土壤中的大孔隙, 大孔隙增加到一定数量后, 在土壤中产生优势流, 对土壤的入渗产生促进作用。碎石含量较小时, 大孔隙的数量还不足以产生优势流, 或产生优势流较少, 使其促进作用小于过水断面阻碍作用, 因此, 累积入渗量和湿润锋随含石量的增加而减少; 随着碎石含量的增加, 大孔隙数量的增加所产生的促进作用大于过水断面减小所产生的阻碍作用, 累积入渗量和湿润锋随含石量的增加而增加; 随着碎石含量的继续增加, 大孔隙的数量继续增加所产生的促进作用渐渐小于过水断面减小产生的阻碍作用, 累积入渗量和湿润锋随含石量的增加而减小。粒径越大, 越容易产生联通的大孔隙, 所以累积入渗量和湿润锋发生转折的碎石含量随粒径增大而减小。

利用积水入渗试验资料推求出的三个模型的参数列于表 3 中, 从表中可以看出, 无论是 Green -

Ampt 入渗公式, 还是垂直一维代数模型, 所求土石混合介质的饱和导水率均小于细土, 混合介质 Philip 入渗公式中的参数 A 和 S 均小于细土。碎石含量对 Philip 公式中的参数 A 、 S , 以及 Green - Ampt 入渗公式中的饱和导水率 K_s 、垂直一维代数模型中的 K'_s 的影响与对累积入渗量的影响类似, 说明这几个参数与碎石含量、累积入渗量及湿润锋有着密切关系。但对 Green - Ampt 入渗公式中的 h_f 、垂直一维代数模型中的参数 α 、 β 的影响没有明显规律。其中, 土石混合介质的 K_s 介于 0.002 ~ 0.02 cm/min 之间, A 介于 0.005 ~ 0.02 cm/min 之间, S 介于 0.19 ~ 0.56 cm/min^{0.5} 之间。

为进一步说明碎石含量与模型参数的关系, 在各个粒级下, 分别将 Green - Ampt 入渗公式中的 K_s 、Philip 公式中的 A 和 S 、垂直一维代数模型中的 K'_s 与碎石含量点汇成图, 发现在前三种粒径下, 参数与碎石含量之间可以用四次多项式拟合, 粒径为 3 ~ 5 cm 时, 参数与碎石含量之间可用三次多项式拟合, 相关系数均在 0.99 以上, 拟合公式见式 (9), 拟合系数见表 4。经显著性分析 (取显著水平为 0.05), 发现粒径为 0.5 ~ 1 cm 时, 碎石含量对 K_s 、 A 、 S 、 K'_s 影响显著; 粒径为 1 ~ 2 cm、3 ~ 5 cm 时, 碎石含量只对 S 影响显著; 粒径为 2 ~ 3 cm 时, 碎石含量只对 K_s 影响显著, 可见, 碎石含量对模型参数的影响因碎石粒径不同而不同。

$$Y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$$

$$R^2 = 0.9999 \quad (9)$$

2.2 不同方法计算所得饱和导水率比较

Peck - waston^[5] 提出土石混合介质与纯土之间饱和导水率的转换关系:

$$\frac{K_n}{K_s} = \frac{2(1 - R_v)}{2 + R_v} \quad (10)$$

式中, K_n 为混合介质的饱和导水率 (cm/min); K_s 为细土的饱和导水率 (cm/min); R_v 为碎石的体积含量 (g/cm³)。

Barkensiek^[6] 对上式进行简化, 得到:

$$\frac{K_n}{K_s} = \frac{1 - R_m}{1 - R_m/4} \quad (11)$$

式中, R_m 为碎石的质量含量。

鉴于 Green - Ampt 入渗公式、Philip 入渗公式、垂直一维代数模型、Barkensiek 公式均可计算出饱和导水率 K_s , 本文将这 4 种方法推求出来的饱和导水率与实测值进行比较, 结果详见表 3 中 [3]、[5]、[8]、[10]、[11] 列。从表中可以看出, 无论是计算值还是实测值, 混合介质的饱和导水率均小于细土; 在

表 3 模型参数
Table 3 Parameters of the model

粒径 (cm) Particle size	碎石含量 (%) Rock fragment content	Green - Ampt		Philip		垂直一维代数模型 One dimensional vertical algebraic model			Barkensiek K_s (cm/min)	实测值 Measured value K_s (cm/min)
		K_s (cm/min)	h_f (cm)	A (cm/min)	S (cm/min ^{0.5})	α	K'_s (cm/min)	β (1/cm)		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
细土 Fine soil		0.0226	14.19	0.0200	0.5709	0.1188	0.0243	0.0627	0.0120	0.0236
	10	0.0182	7.40	0.0135	0.4464	0.3311	0.0141	0.0343	0.0111	0.0155
	20	0.0135	5.23	0.0110	0.3445	0.3512	0.0123	0.0660	0.0101	0.0127
	30	0.0114	7.41	0.0095	0.3056	0.2567	0.0107	0.0650	0.0091	0.0108
	40	0.0142	6.77	0.0100	0.3636	0.1609	0.0111	0.0430	0.0080	0.0120
	50	0.0029	7.79	0.0032	0.1926	0.2177	0.0043	0.0274	0.0069	0.0040
0.5 ~ 1	10	0.0187	5.56	0.0141	0.3292	0.3791	0.0160	0.1290	0.0111	0.0166
	20	0.0120	4.17	0.0089	0.3028	0.3475	0.0099	0.0508	0.0101	0.0100
	30	0.0193	3.17	0.0141	0.3663	0.2538	0.0157	0.0727	0.0091	0.0172
	40	0.0103	4.65	0.0071	0.2733	0.2683	0.0097	0.0894	0.0080	0.0093
	50	0.0079	5.14	0.0055	0.2269	0.2606	0.0068	0.1100	0.0069	0.0064
1 ~ 2	10	0.0197	10.67	0.0141	0.5552	0.1650	0.0155	0.0326	0.0111	0.0169
	20	0.0152	11.80	0.0100	0.5071	0.1232	0.0104	0.0230	0.0101	0.0105
	30	0.0159	21.96	0.0141	0.5202	0.1469	0.0169	0.0412	0.0091	0.0164
	40	0.0136	6.59	0.0100	0.3251	0.1266	0.0123	0.0667	0.0080	0.0089
	50	0.0061	24.30	0.0055	0.3003	0.2260	0.0085	0.0657	0.0069	0.0067
2 ~ 3	10	0.0160	12.86	0.0141	0.4472	0.2863	0.0176	0.0603	0.0111	0.0157
	20	0.0198	11.70	0.0173	0.4519	0.2129	0.0204	0.0631	0.0101	0.0190
	30	0.0160	13.94	0.0141	0.4261	0.1519	0.0176	0.0686	0.0091	0.0153
	40	0.0114	19.61	0.0100	0.4004	0.1443	0.0118	0.0418	0.0080	0.0115

表 4 模型参数与碎石含量的拟合参数
Table 4 Fitting parameters between rock fragment content and parameters of the model

粒径 (cm) Particle size	模型参数 Model parameter	拟合系数 Fitting coefficient				
		a	b	c	d	e
0.5 ~ 1	K_s	- 8.8750	9.2583	- 3.2063	0.3999	0.0019
	A	- 4.2917	4.4583	- 1.5521	0.1929	0.0057
	S	- 149.92	155.57	- 52.711	6.1533	0.2176
	K'_s	- 4.5833	4.8833	- 1.7742	0.2412	0.0033
1 ~ 2	K_s	22.167	- 27.217	11.488	- 1.9408	0.1229
	A	16.750	- 20.517	8.6425	- 1.4598	0.0925
	S	187.29	- 228.36	94.687	- 15.494	1.1414
	K'_s	16.083	- 20.033	8.5942	- 1.4782	0.0963
2 ~ 3	K_s	2.5000	- 3.8667	1.9550	- 0.3983	0.0436
	A	10.083	- 12.817	5.5792	- 0.9688	0.0670
	S	269.96	- 314.86	124.49	- 19.836	1.5818
	K'_s	14.417	- 18.200	7.8958	- 1.3620	0.0895
3 ~ 5	K_s	—	1.1333	- 1.0600	0.2767	- 0.0022
	A	—	0.9167	- 0.8700	0.2288	- 0.0010
	S	—	5.1000	- 4.5850	1.0655	0.3814
	K'_s	—	0.4333	- 0.5400	0.1597	0.0066

各个粒级下,随着碎石含量的增加,实测值和前三种方法的计算值均有“转折点”存在,Barkensiek 公式计算的混合介质的饱和导水率始终呈减小趋势,并未出现“转折点”,这可能是由于该公式并未考虑过水断面与大孔隙之间的相互作用所致。另外,将 4 种方法计算出的饱和导水率与实测值比较,发现在前三种粒径下,相对于另外三种方法,垂直一维代数模型计算所得的饱和导水率与实测值较为接近,其相对误差最小;粒径为 3~5 cm 时,Green-Ampt 入渗公式计算所得的饱和导水率与实测值较为接近,其相对误差最小,由此可知,在前三种粒径下,垂直一维代数模型可以相对准确地描述土石混合介质饱和导水率的变化规律,其他 3 种方法的准确性较差;粒径为 3~5 cm 时,相对于另外 3 种方法,Green-Ampt 入渗公式可以相对准确地描述饱和导水率的变化规律。

此外,马东豪^[10]的试验结果表明,土石混合介质的饱和导水率随碎石含量的增加呈现先增加后减小的趋势,碎石含量为 10% 时,混合介质的饱和导水率最大;周蓓蓓^[11]的试验结果表明,混合介质的饱和导水率随碎石含量增加先减小后增大,当碎石直径介于 0.2~1.0 cm 时,碎石含量为 50% 时饱和导水率达到最低;碎石直径介于 1.0~5.0 cm 时,碎石含量达到 40% 时饱和导水率达到最低。而本文通过试验资料计算出的模型中的饱和导水率变化趋势与上述两者不同,这由两方面原因所致,一是所选碎石及细土本身的特性与上述文章之间存在差异,试验结果因碎石和土质的不同而不同;二是本文运用三种模型计算饱和导水率,而结果均由积水入渗试验资料求得,积水入渗试验结果显示累积入渗量、湿润锋深度随碎石含量增加呈先减小、再增加、后减小的趋势,故推算出的饱和导水率也存在该趋势。

3 结 论

本文通过一维垂直土柱定水头积水入渗试验和不同方法饱和导水率的计算,分析了碎石含量对土石混合介质水分模型参数影响及模型的适用性,得出以下几点结论:

1) 碎石对 Green-Ampt 公式中的饱和导水率 K_s 、Philip 公式中的参数 A 和 S 、垂直一维代数模型中的 K' , 这 4 个参数有影响,土石混合介质的 K_s 、

A 、 S 、 K' , 均小于细土,4 个参数并非随着含石量的增加而一味减小,而是存在一个“转折点”,即参数先随含石量的增加而减小,在某一含量突然增大,之后又随着含石量的增加而减小,该“转折点”因粒级不同而不同,粒级为 0.5~1 cm 时,转折点出现于 40%,粒级为 1~2 cm 和 2~3 cm 时,转折点出现于 30%,粒级为 3~5 cm 时,转折点出现于 20%。

2) 经显著性分析,发现粒径为 0.5~1 cm 时,碎石含量对 K_s 、 A 、 S 、 K' 影响显著;粒径为 1~2 cm、3~5 cm 时,碎石含量只对 S 影响显著;粒径为 2~3 cm 时,碎石含量只对 K_s 影响显著,可见,碎石含量对模型参数的影响因碎石粒径不同而不同。

3) 粒径为 0.5~3 cm 时,垂直一维代数模型可以相对准确地描述土石混合介质的饱和导水率,粒径为 3~5 cm 时,Green-Ampt 公式所描述的饱和导水率精度较高。

参 考 文 献:

- [1] 朱元骏,邵明安.不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J].农业工程学报,2006,22(2):64—66.
- [2] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration[J]. CATENA, 1994, 23(1-2):99—110.
- [3] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. CATENA, 1999, 36(4):315—329.
- [4] Jean W P, Basvan W, Kristin B, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case - study from southeast Spain[J]. Geomorphology, 1998, 23(2-4):323—335.
- [5] Peck A J, Watson J D. Hydraulic conductivity and flow in non - uniform soil[C]// Workshop on soil physics and field heterogeneity. Canberra: CSIRO Division of Environmental Mechanics, 1979:31—39.
- [6] Barkensiek D L, Rawls W J, Stephenson G R. Determining the saturated hydraulic conductivity of a soil containing rock fragments[J]. Soil Science of America Journal, 1986, 50(3):834—835.
- [7] Russo D. Leaching characteristics of a stony desert soil[J]. Soil Science of America Journal, 1983, 47(3):431—438.
- [8] Sharma P P, Carter F S, Halvorson G A. Water retention by soils containing coal[J]. Soil Science of America Journal, 1993, 57(2):311—316.
- [9] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤中水分运动与溶质迁移[M].北京:中国水利水电出版社,2007:24—28.
- [10] 马东豪.黄土区土石混合介质水分运动实验研究及数值模拟[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2008.
- [11] 周蓓蓓,邵明安.土石混合介质饱和导水率的研究[J].水土保持学报,2006,20(6):64.

(英文摘要下转第 26 页)

- [24] 马永亮, 邹春静, 孙 卿, 等. 基于系统动力学的崇明岛生态需水量预测[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 140—144.
- [25] 王开运, 邹春静, 张桂莲, 等. 生态上海建设的理论与实践——生态承载力符合模型系统与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 64.
- [26] 陕西省发展和改革委员会. 陕西省“十一五”水利发展专项规划[EB/OL]. [2006-09-30]. <http://www.sndrc.gov.cn/view.jsp? ID = 3881>.
- [27] 陕西省发展和改革委员会. 陕西省“十一五”生态建设专项规划[EB/OL]. [2006-09-30]. <http://www.sndrc.gov.cn/view.jsp? ID = 3884>.

Study on water requirement for eco-environment in the northern large-scale irrigation districts based on system dynamics

LIU Zhan-bao¹, WEI Xiao-mei¹, ZHANG Yan-ni¹, BAI Jing²

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

Abstract: Based on the theory of ecological irrigation district, this paper discussed the contents of the northern large-scale irrigation districts' water requirement for eco-environment, and defined it for the maintenance of healthy water requirement for irrigation districts' ecosystem. Using the system dynamics approach, it constructed a system dynamics (SD) model of water requirement for eco-environment of irrigation districts. Taking Baojixia Irrigation District in Shaanxi Province as an example, it also simulated the water demand for its eco-environment from 2005 to 2030. The results show that the water demand for ecological environment in Baojixia irrigation district increases at the rate of 6.08‰ per year. And this irrigated area is developing in the same direction as an eco-irrigation district.

Keywords: ecological irrigation district; water requirement for eco-environment; system dynamics (SD);

(上接第 10 页)

Study on the infiltration model and factors affecting the parameters of stony-soil

YANG Yan-fen¹, WANG Quan-jiu^{1,2}, ZENG Chen², LIU Jian-jun¹, LI Tao¹

(1. Water Resources Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: Four kinds of rock fragment content and five kinds of particle size were chosen and pure soil was used as control, and 20 groups of one dimensional vertical ponding infiltration experiments and 20 groups of measured saturated hydraulic conductivity experiments were conducted to analyze the effect of rock fragment content on water movement parameters of stony-soil media and the applicability of water movement model. The major findings are as follows: some parameters in Green-Ampt formula, Philip formula and one dimensional vertical algebraic model decrease with the increase of rock fragment content at first, and then increase, and decrease again at last. The applicability of the model is different from rock fragment particle size. When the particle size is between 0.5 ~ 3 cm, one dimensional vertical algebraic model could describe with relative accuracy of the saturated hydraulic conductivity of stony-soil media, and the saturated hydraulic conductivity of stony-soil media described by Green-Ampt formula has higher precision when the particle size is 3 ~ 5 cm.

Keywords: stony-soil media; rock fragment content; water movement parameters; water movement model; applicability of the model