

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0039

司曼菲,甘永德,刘欢,等.土石混合介质碎石性质对土壤入渗和产流过程影响[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):59-63,107. SIM F, GAN Y G, LIU H, et al. Effects of gravel properties on soil infiltration and runoff in soil rock medium[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 59-63, 107. (in Chinese)

土石混合介质碎石性质对土壤入渗和产流过程影响

司曼菲^{1,2}, 甘永德², 刘欢², 苏辉东², 仇亚琴², 牛存稳², 李海明¹

(1. 天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300450;

2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为了研究土石介质中碎石性质对土壤入渗和产流过程的影响, 本试验采用室内土柱试验, 分析了两种不同岩性碎石(片麻岩和石灰岩)分别在碎石质量比例(土石介质比例)为15%、45%、65%和90%的条件下, 对土壤入渗和产流的影响, 并用 Philip 模型和 Horton 模型进行了拟合分析。其结果如下: (1) 在同一种岩石, 相同时间内, 土壤累积入渗量随碎石含量的增多而减小, 产流量随碎石含量的增多而增加; (2) 在相同碎石比例条件下, 相同时间内, 片麻岩的累计入渗量大于石灰岩, 而产流量小于石灰岩; (3) Philip 模型、Horton 模型均可拟合土石介质土壤累积入渗量随时间变化关系, 稳定入渗率 $A(i_f)$ 随碎石含量呈减小趋势, 土壤吸渗率 S 随碎石含量呈减小趋势, 而初始入渗率 i_i 呈增加趋势。

关键词: 土石混合介质; 石灰岩; 片麻岩; 土壤累积入渗量; 径流强度

中图分类号: TV 139.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0059-05

Effects of gravel properties on soil infiltration and runoff in soil-rock medium

SI Manfei^{1,2}, GAN Yongde², LIU Huan², SU Huidong², QIU Yaqin², NIU Cunwen², LI Haimin¹

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300450, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to study the effects of gravel properties on soil infiltration and runoff process in soil-rock medium, we conducted laboratory soil column experiments. We mixed two different rock fragments (gneiss and limestone) with the same soil. The gravel mass proportions (of the soil-rock medium) were 15%, 45%, 65%, and 90% respectively. Then, the relationship between cumulative infiltration and time were fitted with the Horton model and the Philip model. The results showed that: (1) For the same rock within the same amount of time, the cumulative infiltration of soil would decrease with the increase of gravel content, and the runoff would increase with the increase of gravel content. (2) With the same gravel proportion, within the same amount of time, the cumulative infiltration of gneiss was greater than that of limestone, and the runoff was less than that of limestone. (3) The Philip model and the Horton model can be used to fit the relationship between cumulative infiltration and time. As the gravel content increased, the infiltration rate $A(i_f)$ tended to decrease, the soil infiltration rate S tended to decrease, and the initial infiltration rate i_i tended to increase.

Key words: soil-rock medium; limestone; gneiss; soil cumulative infiltration; runoff intensity

收稿日期: 2017-09-28 修回日期: 2018-01-05 网络出版时间: 2018-01-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180115.1204.006.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701); 国家自然科学基金(51379215; 50939006); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(2016ZY03)

Funds: National Key Basic Research Development Plan (2015CB452701); National Natural Science Foundation of China (51379215; 50939006); The Autonomous Research Project of the State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin (2016ZY03)

作者简介: 司曼菲(1993-), 女, 河北张家口人, 主要从事水文模型方面研究。E-mail: 135762143@qq.com

通讯作者: 甘永德(1985-), 男, 青海民和人, 博士, 主要从事水文模型方面研究。E-mail: bjganyd@163.com

土壤水分入渗过程复杂,是“四水”转化的重要环节,准确认识该过程对开展流域水文模拟和水文预报具有重要意义。自然条件下,因成土过程和人类活动的影响,山地土壤内广泛分布着大量碎石^[1]。一方面,碎石会增加土壤孔隙的弯曲程度,限制水分入渗^[2]。另一方面,碎石会促进土壤中孔隙地形成,为水分运动提供优先流通道^[3]。因此,土石二元介质中的水分入渗特性比均质土壤较为复杂,再加上土壤中碎石类型、粒径、含量及空间分布等的变异性的影响^[4-8],使得研究入渗与产流更为复杂。为了解碎石对土壤水文过程的影响,近 20 年来,国内外学者^[9-22]从碎石含量、大小、形状、岩性及与土壤的结合方式、分布状况等方面考虑碎石对土壤水分、溶质运移的影响展开研究,并采用了一些数学模型对此进行拟合^[23-24],来观测土壤水分的运动特征。根据以往的研究结果表明碎石能对土壤的产流和入渗产生影响,其既能增加土壤水分的入渗,产流的减少,也能减少水分的入渗,产流的增加。但因取样的空间变异性及碎石含量、物理性质的差异,研究结果并不一致,甚至相互矛盾^[25-26]。在以往碎石性质的研究中,常忽略了某些碎石具有一定的透水性和持水性,如本研究中的片麻岩具有一定的透水性和持水性,而石灰岩不具有或很小。而片麻岩介质和石灰岩介质混合壤土常分布于山地土壤中,对入渗、产流和汇流等水文过程产生不同的影响。基于此,本文采用室内试验针对两种不同岩性碎石,分析其不同比例组合的混合土体中对入渗产流等水文过程的影响,研究了不同岩性性质碎石在不同碎石(简称土石二元混合介质)比例下对土壤入渗产流影响,并用 Philip 模型和 Horton 模型对试验结果进行了拟合,研究将为水分在土石二元混合介质中运动规律研究提供参考。

1 试验材料与试验设计

1.1 试验材料

供试土样取自河北易县崇岭流域典型山坡(中科院地理所野外实验站),包括片麻岩碎石(2~40 mm)、石灰岩碎石(2~40 mm)和壤土。土壤经风干、碾压、过 2 mm 筛备用。用烘干法测其初始含水量,用环刀法测其干容重和饱和体积含水量,用吸管法测其颗粒组成(表 1,表 2),采用离心机法(SS600)测定土壤水分特征曲线,并用 Van Genuchten 模型进行拟合,拟合结果如表 3 所示。Van Genuchte 模型是用来描述压力水头(h)与含水量(θ)的关系,来表达包气带水分特征曲线。方程形式为:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \cdot h)^n]^m$$

式中: θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); h 为负压水头($-\text{cmH}_2\text{O}$); θ_s, θ_r 分别为土壤饱和含水量和残余含水量(cm^3/cm^3); α 为土壤平均空隙半径有关的参数($1/\text{cm}$), n 为曲线形状参数, $m = 1 - 1/n$ 。

表 1 试验土样的粒级分布

Tab. 1 The particle size distribution of the tested soil samples (%)

土壤种类	粒级/mm			
	黏粒 (< 0.002)	粉粒 ($0.002 \sim < 0.02$)	砂细 ($0.02 \sim < 0.2$)	粗砂 ($0.2 \sim 2$)
壤土	14.378	22.151	62.695	0.776
片麻岩	0.000	0.000	0.000	100.00
石灰岩	0.000	0.000	0.000	100.00

表 2 试验土样的物理性质

Tab. 2 The physical properties of the tested soil samples

土壤种类	密度 $/(g \cdot \text{cm}^3)$	饱和体积含水量 $/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	初始含水量 $/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和导水系数 $/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$
壤土	1.40	0.39	0.07	0.032
片麻岩	1.91	0.24	0.03	0.002
石灰岩	2.60	0.00	0.00	0.000

表 3 土壤水分特征曲线拟合结果

Tab. 3 Fitting results of soil water characteristic curve

土壤种类	土壤残余含水量(θ_r)	土壤饱和含水量(θ_s)	土壤平均空隙半径有关的参数(α)	形状参数(n)	相关系数(R^2)
均质土壤	0.09	0.39	0.066	1.39	0.998
片麻岩	0.05	0.24	0.070	1.53	0.997
石灰岩	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1.2 试验装置与方法

不同碎石比例土壤降雨入渗试验采用如图 1 所示的垂直土柱法进行。试验装置主要由土柱、积水杯、降雨器及数据采集器构成。土柱上部有出水口,出水口处放置具有称重功能的积水杯,用于测量积水。试验在中国水利水电科学研究院延庆基地“水资源与水土保持工程技术中和试验大厅”开展,降雨过程由人工降雨系统控制。试验考虑两种性质不同碎石:片麻岩(具有持水性和导水性)和石灰岩(无导水性和持水性);每个碎石设置 4 个不同比例处理,为了控制装填土样的一致性,混合所用的土壤均为壤土,土壤经风干、碾压、过筛后,与碎石按不同质量比进行均匀混合,得到不同比例的土石二元混合介质。碎石质量比例(碎石比土壤)分别 15%、45%、60% 和 90%,分别标记为土石比 15%、土石比 45%、土石比 60% 和土石比 90%,每个处理三个重复,并且三个重复同时开展试验。

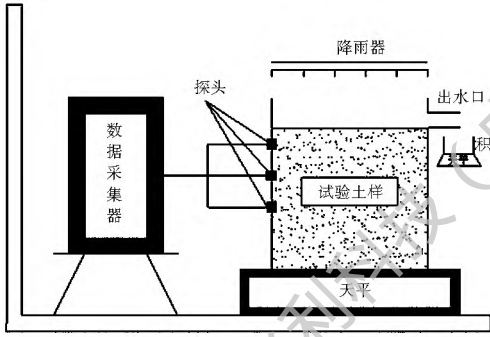


图1 降雨入渗试验土柱

Fig. 1 Soil column in rainfall infiltration test

土壤装填时,首先在土槽底部铺设反滤作用的石子,厚 10 cm;再在石子的上面铺设纱布,然后将均匀混合的土石混合介质按一定容重(均质土壤为 1.40 g/cm³;片麻岩土石混合介质密度分别为 1.47 g/cm³、1.57 g/cm³、1.59 g/cm³ 和 1.64 g/cm³(质量比自小到大);石灰岩土石混合介质密度分别为 1.55 g/cm³、1.77 g/cm³、1.85 g/cm³ 和 1.96 g/cm³(质量比自小到大)分层将土石混合介质分层(10 cm/层)装入土柱(直径 29 cm;高 50 cm),并在土柱 5、15、25 cm 处埋设 EM-5C 土壤水分传感器测定土壤含水量,分别记为 EM-5、EM-15 和 EM-25。土柱设置两个出水口,分别为壤中流和地表径流。试验降雨过程由降雨大厅人工降雨系统控制,雨强为 50 mm/h。试验过程中测定时段降雨量、时段径流量、湿润锋距离、土壤含水量等

试验观测值。当湿润锋穿透土柱后,停止试验,并迅速采用铝盒在土柱 0、5、10、15、20、25、30 cm 处取土,用烘干法测定土壤质量含水量。

2 结果与分析

2.1 降雨条件下土壤累积入渗量随入渗时间的变化关系

降雨条件下,不同碎石比例片麻岩和石灰岩累积入渗量随时间的变化关系见图 2,可以看出,土壤累积入渗量随时间的增大而单调增加。同一岩性的土石介质在不同比例的土石比例条件下,土壤累积入渗量随时间呈上升趋势,其中土壤累积入渗量在前 50 min 内有明显增加的趋势,随后,土壤累积入渗量随时间的变化趋于平稳。相同入渗时间内,均质土壤 > 土石比 15% > 土石比 45% > 土石比 90%。这说明土壤累积入渗量随碎石含量的增大而减小。

不同岩性相同碎石比例条件下,土壤累计入渗量随入渗时间的变化关系见图 3,可以看出,当土石比例一致时,不同岩性的土石二元介质土壤,累计入渗量随入渗时间的变化趋势一致,出现这种情况的原因主要是,随着降雨入渗地进行,入渗量逐步累积,土壤含水量随之增加,水势梯度减小,入渗速率减缓。相同的入渗时间内,相同土石比例条件下,片

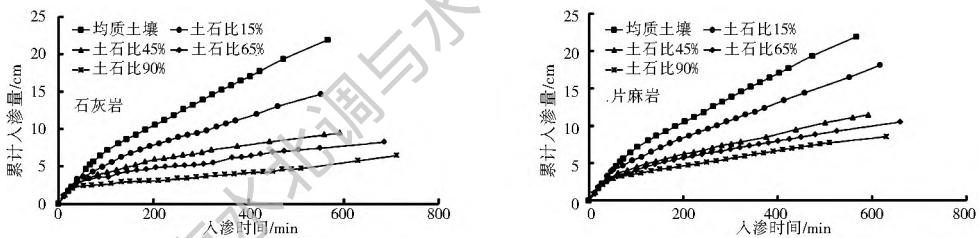


图2 不同碎石比例岩石累积入渗量随入渗时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of cumulative infiltration of rocks with different gravel proportions over infiltration time

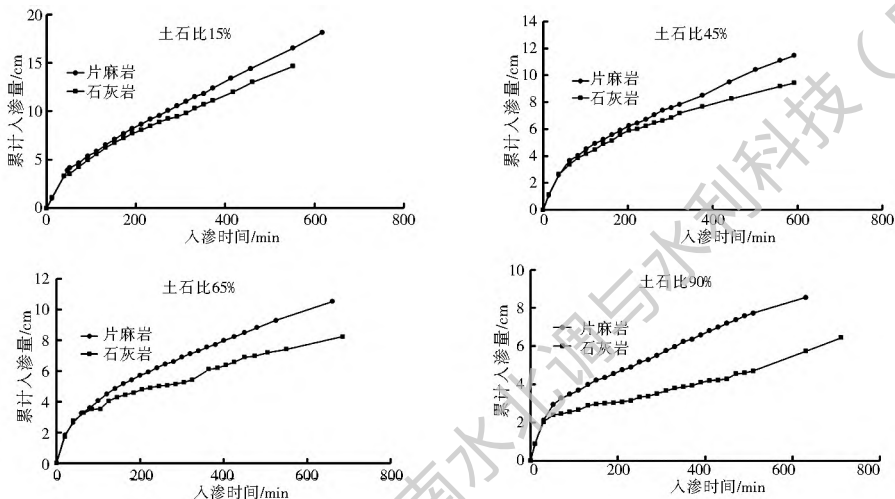


图3 片麻岩与石灰岩在不同比例土石比条件下累积入渗量对比

Fig. 3 Comparison of cumulative infiltration of gneiss and limestone in different gravel proportions

麻岩由于本身质软,所以片麻岩的入渗性能要远远高于石灰岩。而且,由图中可以看出,随着土石比例地提高,片岩的开口越来越大,故随着土石比例的增加,片麻岩的优势越发明显。出现这种情况的原因可能是,相较于石灰岩,片麻岩的层状结构使得其具有更强的导水性,导致降雨入渗过程中,土壤水分可能穿过碎石,进入土壤。这说明碎石比例相同条件下,土壤累积入渗量是由土壤中碎石的性质决定的。

2.2 降雨条件下土壤累积入渗量随入渗时间的变化关系拟合

采用 Philip 模型分别拟合了片麻岩和石灰岩不同碎石比例土壤累积入渗量随时间变化关系(见表 4 和表 5)。

$$I(t) = St^{0.5} + At$$

式中: $I(t)$ 为土壤累积入渗量; S 为吸渗率; A 为稳渗率。由拟合结果来看,随着土石比例地提高,吸渗率和稳渗率有呈减小的趋势。拟合决定系数均在 0.8 以上,且大部分在 0.96 以上。由此可见,Philip 模型较好的反应了土壤累积入渗量随入渗时间的关系。但值得注意的是,当时间 t 趋于无限大时,计算结果比实际值偏大,因此 Philip 入渗公式只适用于入渗时间不长的情况^[27]。故在入渗后期,特别是土石比例偏大的情况下,可能会出现了一定的偏差。

表 4 片麻岩处理 Philip 模型拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of Philip model for gneiss

处理	S	A	R ² square
均质土壤	0.501 6	0.017 4	0.999 1
土石比 15%	0.424 9	0.011 7	0.998 2
土石比 45%	0.405 2	0.002 4	0.994 8
土石比 65%	0.309 5	0.004 9	0.962 8

表 5 石灰岩 Philip 模型拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of Philip model for limestone

处理	S	A	R ² square
均质土壤	0.501 6	0.017 4	0.999 1
土石比 15%	0.208 7	0.020 6	0.901 9
土石比 45%	0.265 8	0.007 4	0.898 0
土石比 65%	0.346 2	0.007 6	0.978 0
土石比 90%	0.106 9	0.005 2	0.900 8

同样采用 Horton 模型拟合了片麻岩和石灰岩不同碎石比例土壤累积入渗量随时间变化关系(见表 6 和表 7):

$$I(t) = i_f t + (i_i - i_f)(1 - e^{-ct})/c$$

式中: i_f 为稳定入渗率; i_i 为初始入渗率; c 为常数; t 为时间。

土壤的入渗总量大小取决于稳定入渗率 i_f 和初始入渗率 i_i 。由拟合结果来看,随着土石比例地提高,初始入渗率随之提高,而稳定入渗率呈减小的趋势。拟合决定系数均可达到 0.95 以上。较好的反映了土石二元混合介质的运动规律。

在土壤入渗过程中,入渗初期,土壤含水量较小,水势梯度较大,因此土壤入渗较快。但随着时间地推移,水势梯度减小,含水量增加,湿润区变大,湿润锋的吸力变小,入渗减慢,最终趋向于稳定入渗率。Horton 模型在时间变化上,采用时间 t 的指数变化,适合长时间的入渗过程,更接近于实际情况。

表 6 片麻岩 Horton 模型拟合参数

Tab. 6 Fitting parameters of Horton model for gneiss

处理	i_f	i_i	R ² square
均质土壤	0.037 71	132.5	0.984 2
土石比 15%	0.027 89	82.83	0.980 7
土石比 45%	0.015 79	66.39	0.972 3
土石比 65%	0.010 89	54.66	0.997 9
土石比 90%	0.011 47	27.31	0.969 5

表 7 石灰岩 Horton 模型拟合参数

Tab. 7 Fitting parameters of Horton model for limestone

处理	i_f	i_i	R ² square
均质土壤	0.037 7	132.5	0.984 2
土石比 15%	0.018 8	0.099 6	0.998 3
土石比 45%	0.015 4	0.116 0	0.996 9
土石比 65%	0.008 9	0.119 9	0.972 5
土石比 90%	0.005 6	0.147 7	0.986 6

2.3 降雨条件下径流强度随入渗时间的变化关系

不同土石比例条件下径流强度随时间的变化趋势见图 4,可以看出,随着入渗时间增加,土壤开始产流,然后呈上升趋势,随后径流强度随时间增加稳定。不同比例土石介质条件下,径流强度的增加趋势基本一致。片麻岩和石灰岩的混合介质材料在不同土石比例条件下,趋势一致,为土石比 90% > 土石比 65% > 土石比 45% > 土石比 30% > 土石比 15% > 均质土壤。在不同比例的土石介质条件下,随着片麻岩或石灰岩比例的提高,径流强度的峰值也呈逐级升高趋势,且其到达峰值的时间呈负相关的趋势。即岩石含量越高,径流强度峰值越大,但到达峰值所需时间越短。

3 结论

通过降雨条件下的室内土柱试验,对比分析了不同岩性碎石在不同比例条件下对土壤入渗和产流过程

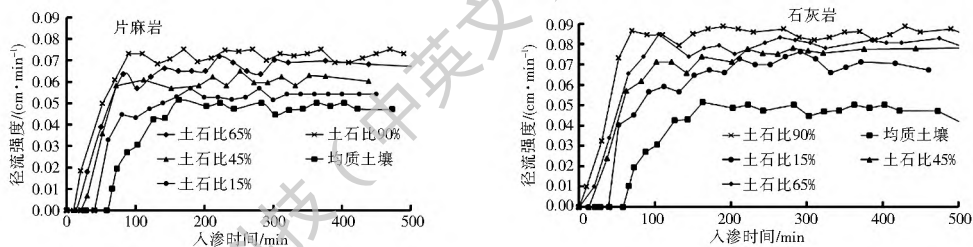


图4 不同比例片麻岩和石灰岩径流强度随入渗时间的变化关系

Fig. 4 Change of runoff intensity of gneiss and limestone of different proportions over infiltration time

影响,分别采用 Philip 模型和 Horton 模型对结果进行了拟合,并得到以下结论:(1)在相同的时间段内,片麻岩和石灰岩的土壤累积入渗量均随碎石含量的增多而减小,说明碎石介质对土壤水分下渗有阻碍作用;(2)当碎石比例一致时,相同时间,片麻岩的累计入渗量大于石灰岩,这与片麻岩本身就有一定的透水性或持水性有关;(3)径流强度与土石比例含量呈现正相关的趋势,土石比例较高时,径流强度也越大;(4) Philip 模型、Horton 模型均可拟合土石介质土壤累计入渗量随时间变化关系,且 Horton 模型拟合效果更好一些,从拟合结果来看,土石混合介质对土壤累积入渗有削减作用,对产流速率反而有加强作用。

参考文献(References):

- [1] 赵梅,汪羽宁,刘和平. 碎石含量和盖度对黄土高原农田土壤水分的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(12): 59-63. (ZHAO M, WANG Y N, LIU H P. Effect of rock fragment coverage and content on soil moisture of farmland in loess plateau[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(12): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2013.12.015.
- [2] POESEN J, LAVEE H. Rock fragments in top soils: significance and processes[J]. Catena, 1994, 23(1-2): 1-28.
- [3] GRANT W J, STRUCHTEMAYER R A. Influence of the coarse fraction in two maine potato soils on infiltration, runoff and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(5).
- [4] BOUSHI I M E, DAVIS S N. Water retention characteristics of coarse rock particles[J]. Journal of Hydrology, 1969, 8(4): 431-441.
- [5] WILCOX B P. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes[J]. Journal of Range Management, 1988, 41(3): 197-206.
- [6] LAVEE H, POESEN J W A. Overland flow generation and continuity on stone covered soil surfaces[J]. Hydrological Processes, 2010, 5(4): 345-360.
- [7] 王清,张民,王通. 不同石砾条件对土壤水分入渗的影响[J]. 湖南农业科学, 2012, (21): 43-47, 50. (WANG Q, ZHANG M, WANG T. Influences of different gravel conditions on soil water infiltration[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012, (21): 43-47, 50. (in Chinese)) DOI:10.16498/j.cnki.hnnykx.2012.21.013.
- [8] 甘永德,贾仰文,王康,等. 考虑空气阻力作用的分层土壤降雨入渗模型[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 164-173. (GAN Y D, JIA Y W, WANG K, et al. Rainfall infiltration model considering gas resistance effect in layered soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(02): 164-173. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.02.005.
- [9] BRAKENSIEK D L, RAWLS W J. Soil Containing rock fragments: effects on infiltration[J]. Catena, 1994, 23(1-2): 99-110.
- [10] WILLIAMS S E, FUNSTON R S, WILLIAMS R D, et al. Reclaiming mine soils and overburden in the western united states. analytic parameters and procedures[J]. 1987, 2(21): 1291-1295.
- [11] CHOW T L, REES H W. Effects of coarse fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(2): 227-232.
- [12] 王慧芳,邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604-609. (WANG H F, SHAO M A. Experiment study on water infiltration of soil containing rock fragments[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 604-609. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.05.004.
- [13] 杨艳芬,王全九,曾辰,等. 土石混合介质水分入渗特性试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(05): 87-90, 132. (YANG Y F, WANG Q J, ZENG C, et al. Experimental Research on Water Infiltration Characteristics of Stony soil Medium[J]. Journal of Soil And Water Conservation, 2009, 23(5): 87-90/132. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2009.05.025.
- [14] 吕刚,黄龙,王洪禄. 排土场边坡土壤抗冲性空间变异性特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(01): 35-42. (LU G, HUANG L, WANG H L. Spatial variability of characteristics of soil antiscour ability on the slope of a dump[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(1): 35-42. (in Chinese)) DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2013.01.021.
- [15] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等. 降雨条件下分层土壤入渗特性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 217-219, 223. (GAN Y D, JIA Y W, QIU Y Q, et al. Characteristics of stratified soil infiltration under rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 217-219, 223. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2012.05.027.
- [16] 李义,程本军. 基于土壤入渗模型的研究[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(3): 13-14. (LI Y, CHENG B J. Research on soil seepage model[J]. Heilongjiang Water Conservancy Technology, 2013, 41(3): 13-14. (in Chinese)) DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2013.03.015.

(下转第 107 页)

- nese))
- [14] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (QU G D. Study on rational regional water resources allocation and its program comprehensive benefits evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [15] 朱成涛. 区域多目标水资源优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHU C T. Study on optimal allocation of regional multi objective Water Resources [D]. Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [16] 宋苏林. 济南市中心城区水资源优化配置及泉流量模拟研究[D]. 山东: 山东大学, 2010. (SONG S L. Water resources optimal allocation and simulation of spring discharge on Jinan Center Urban [D]. Shandong: Shandong University, 2010. (in Chinese))
- [17] 刘淋淋, 曹升乐, 于翠松. 用水总量控制指标的确定方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 1672-1683. (LIU L L, CAO S L, YU C S. Research on determination of the control index of total water use [J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 1672-1683. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.05159.
- [18] 国家统计局. 山东省统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015. (National Bureau of Statistics. Shandong Province statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese))
- [19] 张平, 赵敏, 郑垂勇. 南水北调东线受水区水资源优化配置模型[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 88-94. (ZHANG P, ZHAO M, ZHENG C Y. Optimal allocation of water resources in the water import areas of the East Route of the South to North Water Transfer Region [J]. Resources Science, 2006, 28(5): 88-94. (in Chinese))
- [20] 山东省发展计划委员会. 山东境内黄河及所属支流水量分配暨黄河取水许可总量控制指标细化方案[Z]. 2004. (Shandong Provincial Development Planning Committee. Water distribution of the Yellow River and its tributaries in Shandong Province and the detailed plan for the total amount control index of the Yellow River water intaking license [Z]. 2004. (in Chinese))
-
- (上接第 63 页)
- [17] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69, 75. (WU Z D, WANG Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water [J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2010, 41(7): 64-69, 75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.014.
- [18] 赵小娥, 魏琳, 曹叔尤, 等. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 45-47. ZHAO X E, WEI L, CAO S Y, et al. Study on characteristics of overland flow with higher rain intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 45-47. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2009.06.030.
- [19] 张强, 田风霞, 马春艳. 黄土区土质道路人工降雨及放水试验条件下产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 83-87. (ZHANG Q, ZHENG S Q, TIAN F G, et al. Runoff and sediment yield characteristics of earth road under artificial rainfall and simulated overland flow tests conditions in loess plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 83-87. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.05.014.
- [20] 邓建才, 陈效民, 张佳宝, 等. 黄淮海平原主要土壤水力参数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2002, 21(3): F3. (DENG J C, CHEN X M, ZHANG J B, et al. Saturated Hydraulic Conductivities of three soils in Huang Huai Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(3): F3. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2002.03.001.
- [21] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. 水科学进
- 展, 2010, 21(6): 779-787. (ZHU Y J, SHAO M A. Simulation of Rainfall Infiltration in Stony Soil [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 779-787. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.06.018.
- [22] RIEKE-ZAPP D, et al. 2001. Rocks and Rills: the Impact of Rock Fragments on Soil Loss by Concentration Flow Erosion in Laboratory Experiments. In: D. E. Stott, R. H. Mohtar and B. c. Steinhart (eds). Sustaining the Global Farm. The 10th International Soil Conservation Organization Meeting Held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 796-802, pp.
- [23] BEIBEI Z, MING AN S, MINGXIA W, et al. Effects of coal gangue content on water movement and solute transport in a China loess plateau soil [J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2015, 38(11): 1031-1038.
- [24] BOUWER H, RICE R C. Hydraulic properties of stony vadose zones [J]. Groundwater, 1984, 22(6): 696-705.
- [25] REIGNER I C, PHILLIPS J J. Variations in bulk density and moisture content within two new jersey coastal plain soils, lakeland and lakelhurst sands [J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28(2): 287-289.
- [26] LOGSDON S D, JAYNES D B. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1426-1431.
- [27] 邵明安. 土壤物理学[M]. 高等教育出版社, 2006. (SHAO M A. Soil Physics [M]. Higher Education Press, 2006. (in Chinese))