

人为侵入体对城市绿地土壤水分入渗特征的影响

方政¹, 杜建会^{1,2}, 张思毅^{3,4}, 王晓瑜¹, 耿嘉灵¹, 颜瑞¹, 林志斌⁵

(1.中山大学地理科学与规划学院,广州 510275;2.广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室,广州 510275;3.广东省生态环境技术研究所,广东省农业环境综合治理重点实验室,广州 510650;

4.华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心,广州 510305;5.广州海珠国家湿地科研宣传教育中心,广州 510305)

摘要:在快速城市化过程中,人为侵入体大量混入绿地,改变了土壤的三相组成及孔隙特征,但其对城市绿地土壤的入渗影响仍不清楚。基于一维垂直土柱入渗模拟,以典型人为侵入体砖块和混凝土碎块为例,研究其对城市绿地土壤水分入渗的影响特征。结果表明:(1)人为侵入体的混入均会抑制城市绿地土壤水分下渗,导致其稳定入渗速率降低,累积入渗量、湿润锋距离和土壤体积含水量减小,深层土壤水分变化滞后。同一配比下,以混凝土碎块对土壤水分入渗的抑制作用更为明显($P < 0.1$);(2)随着人为侵入体配比从10%增加到20%,土壤稳定入渗率、累积入渗量、湿润锋距离和土壤体积含水量仍持续减小或略有增加,但差异均不显著($P > 0.1$),其对土壤水分下渗的抑制作用渐趋减弱。(3)不同类型人为侵入体及配比下,城市绿地土壤水分的入渗量随时间变化更加符合 Kostiakov 模型。研究结果可为未来海绵城市的高效建设提供科学依据。

关键词:人为侵入体;城市绿地;入渗速率;累积入渗量;湿润锋距离;体积含水量

中图分类号:S152.7⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)04-0124-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.019

Influence of Anthropogenic Intrusions on the Soil Infiltration Characteristics in Urban Green Land

FANG Zheng¹, DU Jianhui^{1,2}, ZHANG Siyi^{3,4}, WANG Xiaoyu¹,
GENG Jialing¹, YAN Rui¹, LIN Zhibin⁵

(1.School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275; 2.Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510275; 3.Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Institute of Eco-Environmental Science and Technology, Guangzhou 510650; 4.National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangzhou 510305; 5.Public Education and Research Center of Haizhu Wetland in Guangzhou, Guangzhou 510305)

Abstract: Amounts of anthropogenic intrusions are mixed into the urban green land soil with rapid urbanization, which lead to the alteration of solid-liquid-gas composition and porosity characteristics in soil system, but its effect on the infiltration process of soil is still unclear. The influence of typical anthropogenic intrusions (brick and concrete fragments) on soil infiltration characteristics in urban green land was studied according to the simulation experiments by one-dimensional vertical ponding infiltration in soil column. The results showed that: (1) Anthropogenic intrusions decreased the infiltration rate, cumulative infiltration amount, wetting front depth, and soil volumetric water content in urban green land, and more obvious inhibition on infiltration in green land soil was observed in concrete group than bricks group with the equal anthropogenic intrusions ratio ($P < 0.1$). (2) With the anthropogenic intrusions ratios increasing from 10% to 20% in urban green land, the soil infiltration rate, cumulative infiltration amount, wetting front depth, and soil volumetric water content showed a continuous decreasing or slightly increasing trend, but all were not significant ($P > 0.1$), which indicated that the inhibiting effect of anthropogenic intrusions on the soil infiltration was gradually

收稿日期:2019-12-05

资助项目:国家自然科学基金项目(41101011,41801101);国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAK11B02);中山大学实验室开放基金重点项目(201902011);广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515010628)

第一作者:方政(1997—),男,在读本科生,主要从事生态水文过程研究。E-mail: qwe9060@163.com

通信作者:杜建会(1982—),男,副教授,硕士生导师,主要从事生态水文过程研究。E-mail:dujh1982@hotmail.com

weakened. (3) With different types and ratios of anthropogenic intrusions, Kostikov model was mostly fitted to the relationship between cumulative infiltration amount and time. This research will provide scientific basis on the constructive establishment of sponge city in the future.

Keywords: anthropogenic intrusion; urban green land; infiltration rate; cumulative infiltration; wetting front depth; volumetric water content

在快速城市化过程中,大面积的城市土壤被“硬底化”的道路和建筑等不透水面所封闭,使得城市的内涝灾害日趋严重^[1-2]。绿地土壤作为城市中心区最重要的可透水层,在减少城市暴雨径流、削减洪峰和遏制洪涝等方面的作用已得到了国内外的广泛关注^[3-4]。Gill 等^[5]对英国大曼切斯特城区的地表产流模拟表明,高密度住宅区绿地覆盖率增加 10%,地表的径流量可减少 4.9%;Yang 等^[6]对美国纽约州奥农达加河流域的研究也发现,城市绿地通过增加下渗率和地表粗糙度,有效削减了地表径流的流速和峰值;Zhang 等^[7]对北京城市绿地的研究也证实,2009 年北京市绿地对雨水径流的调蓄量达 1.54 亿 m³,单位面积绿地调蓄雨水径流 2 494 m³/hm²,有效缓解了城市洪涝灾害。但其具体缓解程度受很多因素影响,包括降雨特征、土壤特性及城市形态等^[8]。

近年来,我国大力开展海绵城市建设,城市绿地作为海绵城市系统的重要载体,其面积呈逐年增长趋势,但一些城市的内涝问题依然严重,使得绿地土壤的入渗性能得到了越来越多的学者^[4,9]关注。对多个城市的研究^[1,10-14]均表明,尽管不同功能区的绿地土壤入渗速率差异较大,但其土壤含砂量普遍较低,且受机械压实和人为踩踏等影响,绿地土壤容重大,孔隙度小,质地黏重,土壤水分入渗速率小,未能有效起到缓解城市内涝的作用。除机械压实和人为踩踏外,城市绿地在建成过程中,大量与土壤发生过程无关的砖块、混凝土碎块、塑料制品和废旧衣物等人为构筑物和埋埋物,通过反复开掘“硬底化”路面、拆建房屋、生活垃圾堆肥和垃圾填埋等途径以机械作用也会进入绿地,导致土壤埋埋层众多,“渣砾化”特征明显,低效建设现象突出^[10,14-15]。与自然土壤相比,侵入体的进入改变了城市绿地土壤的三相组成及孔隙特征,进而影响到绿地土壤的水分下渗过程^[16]。

侵入体在绿地土壤中的分布位置杂乱无章,使得野外观测存在很大的不确定性^[10],目前尚不清楚其对城市绿地土壤的入渗性能有哪些影响。随着全球气候变化和城市化进程的加快,城市的洪涝灾害将会更加频繁^[4],因此绿地土壤的快速入渗对于海绵城市的高效建设就显得尤为重要。本文依据对广州市典型绿地土壤的实地调查结果,选取 2 种在绿地中最常见但难降解的

人为侵入体砖块和混凝土碎块为研究对象,通过一维垂直土柱模拟入渗试验,测定不同类型人为侵入体及其配比对城市绿地土壤水分入渗的影响特征,以期在城市绿地的高效建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样本制备与测定

2019 年 3—4 月选取海珠国家湿地公园玉龙桥典型绿地(23°04'30"N,113°19'51"E),使用五点取样法采集表层 40 cm 的绿地回填土约 500 kg,同时采用环刀法每 10 cm 逐层采集并测定 0—40 cm 原状土壤容重,发现其随着土层深度增加呈减小趋势,平均土壤容重为(1.26±0.04)g/cm³。所有土样带回实验室风干后过 2 mm 筛,剔除根系及人为侵入体。之后将不同采样点的土样混合均匀备用,使用激光粒径分析仪(Mastersize2000,马尔文公司,英国)分析其土壤粒径发现,城市绿地土壤组成主要以粉粒为主,占质量分数的 71.43%,其次是砂粒和黏粒,分别占质量分数的 22.09%和 4.38%,按美国土壤质地标准可划分为粉壤土。在野外实地土壤容重测定的基础上,采用土壤水分温度传感器(RS-WS-N01-TR,仁科公司,山东,精度为 0.1%)测定风干土的饱和体积含水量,依据土壤容重计算其饱和和吸水率和孔隙度(表 1)。砖块和混凝土碎块样本,分别采自广州鱼珠街道的砖厂地表和建筑工地,用地质锤破碎处理,模拟侵入体进入城市绿地前遭受的人为破碎作用,并挑选粒径在 2~3 cm 的碎块作为入渗试验样本。参照《MT 43—1987 岩石含水率测定方法》^[17]测定饱和吸水率,《GB/T 208—2014 水泥密度测定方法》^[18]测定侵入体样本的容重和孔隙度(表 1)。

表 1 试验样本的物理性质

类型	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和 吸水率/%	孔隙度/ %	形状
风干土	1.30	43.77	56.90	粉末状
砖块	1.73	12.60	21.74	不规则块状
混凝土碎块	2.33	5.14	11.99	不规则块状

1.2 试验装置

试验土柱高 50 cm,内径 20 cm。顶部为可拆卸带均匀开孔的半封闭罩,用于减少水分蒸发损失和空气扰动;0—5 cm 为积水层,使用标有刻度的马氏管供水。马氏管高 80 cm,内径 15 cm,为试验提供 4

cm 的恒压水头,入渗量以马氏管刻度为准。土柱 5~45 cm 为入渗层,用于装填风干土及侵入体混合介质,分别在入渗层 4,12,20,28,36 cm 处水平插有土壤水分温度传感器。外侧粘贴有多条平行对齐的刻度条,利用可旋转移动的玦形卡扣,准确快速地读取湿润锋位置;土柱 45~50 cm 为透气层,下部由带有均匀透气孔的隔板从外部嵌套土柱,透气筛板底部沿着圆周均匀粘有垫片,上部填充粗粒砂石,以减小小钢囚空气对土壤水分运动的阻碍。底部由升降台支撑,调节土柱与马氏管连接处至水平(图 1)。

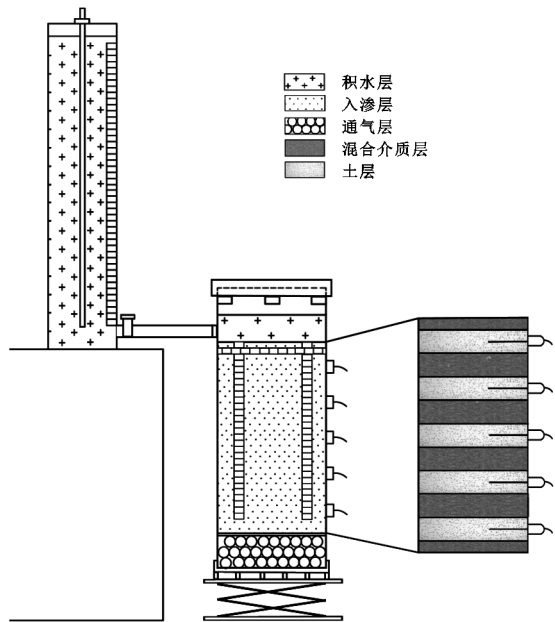


图 1 入渗试验装置示意

1.3 分析测定方法

一维垂直入渗试验于 2019 年 5—6 月在中山大学地理科学与规划学院土壤地理实验室进行。装土前,在土柱内壁涂凡士林,减小壁面优势流影响。探头所在层上下 2 cm 柱体仅装填土样,其余部分填充土壤与侵入体混合介质。层内砖块碎块质量分数设置 0(CK),10%(Z1),20%(Z2)3 种配比,混凝土碎块质量分数设置 0(CK),10%(H1),20%(H2)3 种配比,根据野外实地测定的城市绿地土壤容重,本试验控制各层土壤容重为 1.30 g/cm^3 。每层 2 cm 称取土壤和侵入体样本,混合均匀,使用自制夯土装置装填,层间打毛。实验室遮阴并关闭窗户等通风口,空调控制室温稳定在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。入渗开始后,按前密后疏原则,同步记录马氏管和土柱湿润锋读数,0~10 min 为 2 min/次,10~60 min 为 5 min/次,60~120 min 为 10 min/次,120~180 min 为 20 min/次,180~480 min 为 30 min/次。探头设置为每 1 min 自动记录土壤体积含水量。480 min 时结束试验。2 组平行试验作为重复同步进行。

土壤水分入渗参数计算公式为:

$$I = \frac{(h_t - h_0) \times S_1}{S_2} \quad (1)$$

式中: I 为累积入渗量(mm); h_t 为 t 时刻马氏管水位读数(mm); h_0 为马氏管初始水位读数(mm); S_1 为马氏管内部的横截面积(cm^2); S_2 为土柱内部的横截面积(cm^2)。

$$V = \frac{h_t - h_{t-1} \times S_1}{\Delta t \times S_2} \quad (2)$$

式中: V 为 t 时刻垂直入渗速率(mm/min); h_t 为 t 时刻马氏管水位读数(mm); h_{t-1} 为 $t-1$ 时刻马氏管水位读数(mm); Δt 为观测间隔时间差(min); S_1 为马氏管内部的横截面积(cm^2); S_2 为土柱内部的横截面积(cm^2)。

1.4 入渗过程模拟

参照前人^[19]研究结果,分别选用物理意义明确的 Philip 模型、半经验的 Horton 模型和经验性的 Kostikov 模型对实测数据进行拟合。

Philip 模型:

$$I(t) = St^{0.5} + AT \quad (3)$$

式中: $I(t)$ 为累积入渗量(mm); S 为吸渗率(mm/min); A 是与稳定入渗率(mm/min)有关的参数; t 为时间(min)。

Horton 模型:

$$I(T) = i_f t + (i_i - i_f)(1 - e^{-\alpha})/c \quad (4)$$

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

kostiakov 模型:

$$I(t) = at^{-n} \quad (5)$$

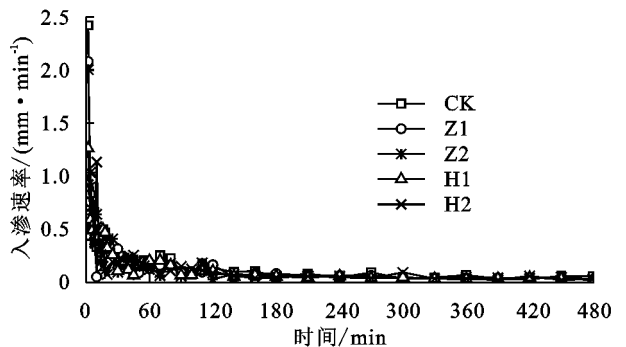
式中: a 和 n 为经验系数; t 为时间(min)。

2 结果与分析

2.1 不同人为侵入体类型及其配比对绿地土壤水分入渗速率的影响

各试验处理下,城市绿地土壤的入渗速率随时间变化的趋势总体较为一致,均表现为前期(0~20 min)入渗速率迅速下降,中期(20~180 min)波动下降,后期(180~480 min)逐渐稳定,但与对照相比,不同侵入体处理下绿地土壤入渗速率的下降幅度有所差异(图 2)。在前期阶段,砖块处理下(Z1、Z2)的土壤入渗速率分别是对照(CK:0.61 mm/min)的 103.2% 和 99.5%,二者差异不大,而混凝土碎块处理下(H1、H2)土壤的入渗速率出现了明显下降,分别是对照的 91.4% 和 86.2%。随着入渗过程的持续,砖块处理下(Z1、Z2)土壤平均入渗速率在中期阶段为 CK(0.14 mm/min)的 88.0%,78.0%,在后期阶段分别为 CK(0.06 mm/min)的 84.6%,82.0%。混凝土碎块处理下(H1、H2)土壤平均入渗速率在中期阶段为 CK(0.14 mm/min)的 74.7%,76.2%,在后期阶段分别为 CK(0.06 mm/min)的 72.2%,81.3%。同一配比

下,以混凝土碎块处理对绿地土壤水分入渗的抑制作用更为明显。随着侵入体配比从10%增加到20%,砖块处理下绿地土壤水分的入渗速率均表现出持续减小的趋势,而混凝土碎块处理下则呈现为前期减小,中后期略有增加。



注:CK为对照;Z1为10%砖块;Z2为20%砖块;H1为10%混凝土碎块;H2为20%混凝土碎块。下同。

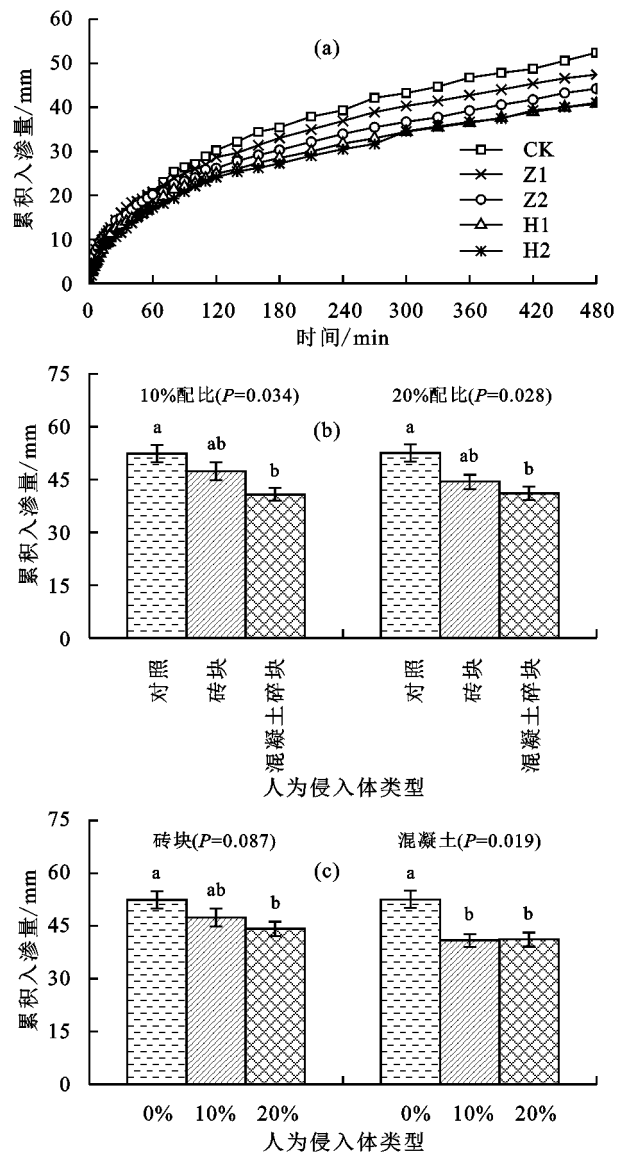
图2 不同人为侵入体及配比下绿地土壤水分入渗速率变化特征

2.2 不同人为侵入体类型及其对比对绿地土壤水分累积入渗量的影响

不同人为侵入体处理下城市绿地土壤的水分累积入渗量随着时间的变化趋势总体较为一致,均表现为初始阶段累积入渗量增加较快,之后增幅减小,并趋于平缓(图3a)。与对照组CK(52.4 mm)相比,试验结束时(480 min),Z1、Z2、H1、H2的累积入渗量分别减少9.5%,15.6%,22.1%,21.7%。同一配比下,以混凝土碎块对绿地土壤水分下渗的抑制作用更为显著($P < 0.1$),而砖块处理下则差异不大($P > 0.1$)(图3b)。随着侵入体配比从10%增加到20%,砖块处理下的绿地土壤的水分累积入渗量持续减小,而混凝土碎块处理下则略有增加,但二者差异均不显著($P > 0.1$)(图3c)。

2.3 不同人为侵入体类型及对比对绿地土壤湿润锋运移的影响

不同侵入体处理下,土壤入渗的湿润锋随着时间的变化趋势较为一致。入渗开始后,土壤湿润锋运移速率较快,之后逐渐降低,180 min后不同处理下的湿润锋运移速率均下降至0.3 mm/min以下,与对照趋于一致,且其随着时间的变化趋于稳定(图4a)。但不同侵入体处理下湿润锋的运移距离存在差异,试验结束时(480 min),与对照CK(140.3 mm)相比,Z1、Z2、H1和H2的湿润锋运移距离分别减少11.9%,15.2%,18.7%和21.6%。与对照相比,同一配比下,以混凝土碎块处理下湿润锋的减少更为显著($P < 0.1$),而砖块处理下其差异不大($P > 0.1$)(图4b)。随着侵入体配比从10%增加到20%,不同处理下绿地土壤入渗的湿润锋运移距离均持续减小,但差异不显著($P > 0.1$)(图4c)。



注:图上不同字母表示在 $P < 0.1$ 下显著。(a)为累积入渗量随时间变化特征;(b)为不同类型侵入体累积入渗量变化特征;(c)为不同配比侵入体累积入渗量变化特征。

2.4 不同侵入体类型及对比对绿地土壤水分剖面的影响

不同侵入体处理下,土壤体积含水量随着时间的变化趋势在入渗表层(4 cm)较为一致,而深层(12 cm)则差异较大。入渗表层土壤的水分含量均在0~60 min内出现快速增加,60~240 min之间增幅逐渐减小,240 min后土壤水分含量达到饱和状态,并趋于稳定(图5a)。深层(12 cm)土壤水分含量在0~240 min之间变化不大,240 min后,对照处理的土壤体积含水量首先增加,砖块处理的土壤体积含水量直到360 min才开始增加,而混凝土碎块处理的土壤体积含水量直至试验快结束时(480 min)才略有增加,其土壤水分变化表现出明显的滞后现象(图5b)。随着侵入体配比从10%增加到20%,入渗表层土壤体积含水量均表现为减小的趋势,且随时间变化差异不大。而深层土壤水分

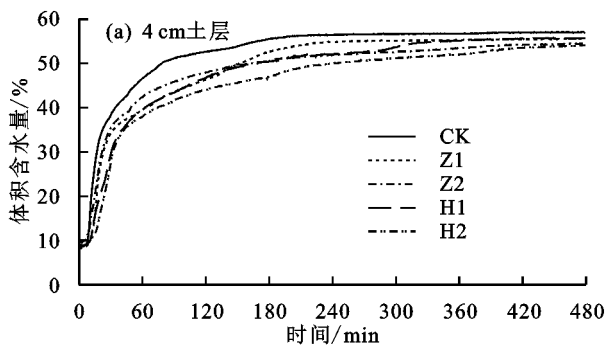
含量陡增的时间持续延迟,但幅度变小。不同侵入体处理也有所差异,砖块处理下其深层土壤水分含量持续减小,而混凝土碎块处理下则略有增加。

2.5 不同侵入体类型及配比下绿地土壤入渗量模拟

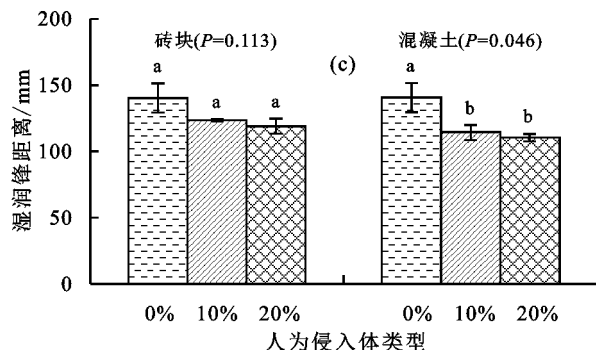
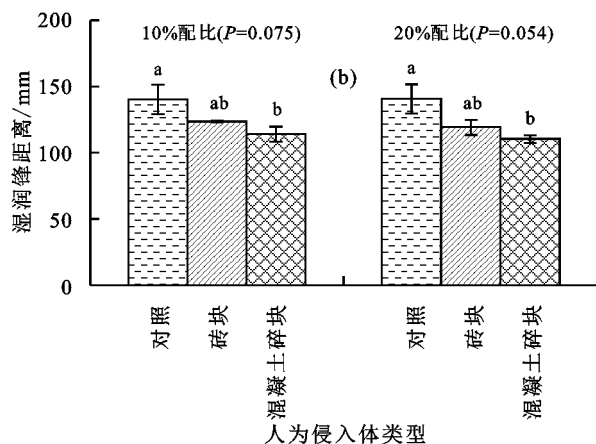
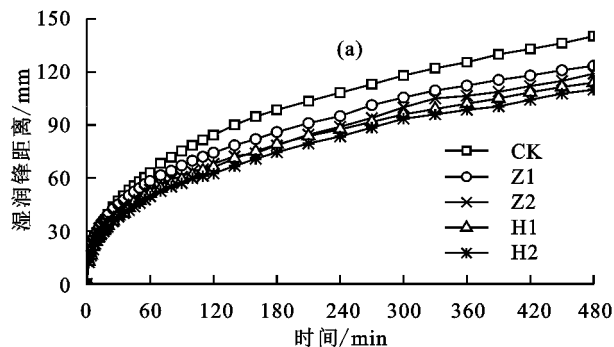
为进一步研究侵入体对绿地土壤水分入渗过程的影响,采用 3 个经典模型对不同人为侵入体及配比下土壤入渗量进行拟合(表 2、表 3)发现,Philip、Horton 和 Kostiakov 模型的 R^2 均值分别为 0.928, 0.990 和 0.996, RMSE 均值分别为 3.020, 1.276 和 0.775;其次,对 3 个模型拟合值与实测值的相对误差分析发现,其对初始入渗率的总体拟合效果较好,而对稳定入渗率的总体拟合效果较差,不同模型拟合的相对误差大小总体表现为 Philip 模型 > Horton 模型 > Kostiakov 模型;最后,从 3 个模型拟合的入渗过程来看,Philip 模型中的 S 值为土壤的吸渗率,与对照相比,除 Z1 处理外,其余处理的 S 值均小于对照,反映了侵入体混入对土壤入渗的抑制作用,但 A 值均为 0,无法反映不同侵入体处理下土壤稳定入渗率的变化,更适合于短时间入渗试验。Horton 模型和 Kostiakov 模型所对应的 i_f 值和 n 值均表现为对照 CK 大于不同类型及配比的侵入体处理值,很好地反映了侵入体混入对绿地土壤水分入渗的抑制作用。且随着侵入体含量的增加,后 2 个模型均能反映出砖块配比增加导致土壤水分累积下渗量减小,而混凝土碎块则呈现出相反的变化趋势。

3 讨论

土壤中砾石的存在会影响其物理特征及水力特性,从而影响到土壤的入渗过程^[16]。本研究表明,与对照相比,侵入体的混入均会抑制城市绿地的土壤水分下渗。这与前人^[16,20]对自然土体中砾石的出现对土壤水分下渗过程的影响研究较为一致。与自然土体相比,砖块和混凝土碎块孔隙度低,饱和吸水率相对较小(表 1)。其混入后可降低土壤总孔隙度,减少水分下渗的过水断面积,增加水分入渗通道的弯曲程度,进而抑制其下渗^[20-23],具体影响程度主要与砾石的含量有关^[14,22]。Urbanek 等^[24]研究发现,当土体中的砾石含量低于 45% 时,砾石和砾石之间很少能够互相连通,形成连



续的水分通道,其对土壤水分的入渗以抑制作用为主。本试验所采用的侵入体配比最大为 20%,远低于这一含量。与砖块相比,混凝土碎块对城市绿地土壤水分下渗的抑制作用更为明显。Ma 等^[22]研究认为,砾石在土石混合介质中的含量相同时,其孔隙度越低,对过水断面积的影响越大。



注:(a)为湿润锋距离随时间变化特征;(b)为不同类型侵入体湿润锋距离变化特征;(c)为不同配比侵入体湿润锋距离变化特征。

图 4 不同人为侵入体及配比下绿地土壤湿润锋运移的变化特征

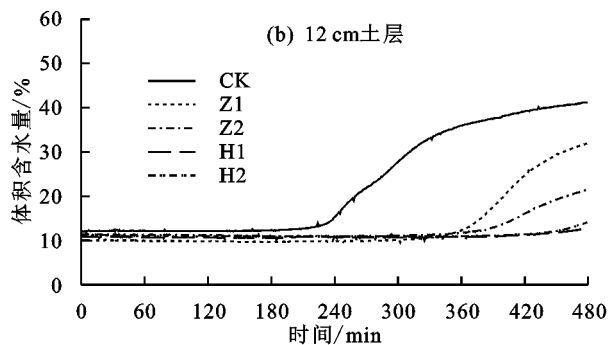


图 5 不同人为侵入体及配比下 4,12 cm 土层绿地土壤的体积含水量变化特征

表 2 Philip、Horton、Kostiakov 模型拟合参数结果

配比	Philip 模型				Horton 模型					Kostiakov 模型			
	S	A	R ²	RMSE	<i>i_i</i>	<i>i_f</i>	<i>c</i>	R ²	RMSE	<i>a</i>	<i>n</i>	R ²	RMSE
CK	2.532	0	0.988	1.629	0.702	0.063	0.027	0.990	1.547	3.340	0.449	0.996	0.977
Z1	2.673	0	0.902	4.203	0.916	0.061	0.042	0.989	1.423	3.911	0.408	0.998	0.605
Z2	2.511	0	0.869	4.400	0.959	0.057	0.048	0.989	1.292	3.911	0.393	0.999	0.447
H1	2.276	0	0.919	3.387	0.655	0.048	0.032	0.991	1.101	3.120	0.421	0.993	1.020
H2	2.026	0	0.985	1.482	0.626	0.052	0.033	0.993	1.018	2.740	0.442	0.995	0.826

表 3 hilip、Horton、Kostiakov 模型拟合结果与实测值的相对误差

配比	单位: %					
	初始入渗率(0~20 min)			稳定入渗率(180~480 min)		
	Philip	Horton	Kostiakov	Philip	Horton	Kostiakov
CK	-7.91	-9.68	4.21	26.59	12.48	11.87
Z1	-5.91	0.99	4.41	57.83	26.97	11.02
Z2	-8.21	4.01	3.88	53.20	22.12	2.06
H1	-9.42	-11.45	-1.89	57.63	18.19	16.13
H2	-5.68	-1.56	7.10	24.60	13.38	6.52

本试验测定(表 1)也表明,与砖块的多孔结构相比,混凝土碎块结构致密,孔隙度更小,因而对土壤水分入渗的抑制作用也更强。其次,混凝土碎块的饱和吸水率更低,其对土壤水分下渗的吸附力相对较弱,也在一定程度上抑制了土壤下渗。

侵入体的混入会直接影响土壤孔隙的大小及分布,进而影响到其水分变化^[25-27]。本研究表明,侵入体混入导致绿地土壤体积含水量下降。Novák 等^[23]对石质土壤的水分模拟也发现,1 m 厚的石质土壤水分储量与对照相比低 16%~31%,且在雨季差异更大。与表层土壤相比,侵入体的混入对深层土壤体含水量的影响更为显著。首先当试验结束时,表层土壤已处于饱和入渗阶段,加上同一含水量侵入体处理下土壤总孔隙度差异不大,因而其体积含水量较为接近;其次,当水分从均质土壤向混合介质层运移时,因下层基质吸附力减弱,锋面下移减缓甚至中止,且随着表层供水的持续进行,界面层土壤含水量持续增加,只有达到某一含水量后,湿润锋才会继续下移至混合介质层,进而导致同一时间内湿润锋的运移距离变小^[27-28],深层土壤水分含量变化出现滞后现象。

砾石含量的增加虽可引起土壤总孔隙度和过水断面面积减小,下渗的路径更加复杂,但也会和相邻土体之间形成更多的非毛管孔隙,促进优势流的形成^[29-31]。本研究发现,人为侵入体在土壤中配比的增加仍以减少水分下渗为主,但其抑制作用已渐趋减弱。这与杨艳芬等^[27]对土石混合介质的水分入渗研究较为一致,其认为累积入渗量随着碎石含量的增加存在一个转折点,具体大小与碎石的粒径有关,当碎石粒径在 2~3 cm 时,其转折点出现于 30%,超过此阈值时,土壤累积入渗量、湿润锋运移距离和土壤含水量均随着砾石含量的增加而增加。Novák 等^[32]采用数值模拟、李雪垠等^[28]通过紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响研究也证实了这一拐点。与砖

块相比,混凝土碎块配比增加对土壤水分入渗的促进作用更为明显。混凝土碎块渗润所需的时间更短,其与相邻土体之间更易形成优势流,而土壤中混凝土碎块配比的增加进一步放大了这一优势,使得其对土壤水分下渗的促进与抑制作用渐趋平衡,甚至随着下渗过程的持续,促进作用开始占据优势,这也与试验结束时混凝土碎块处理下土壤稳定入渗率、累积入渗量和深层土壤体积含水量略有增加比较一致。李雪垠等^[28]研究也发现,紫色土中砾石粒径为 2~7.6 cm 时,20%砾石含量及以上含量对水分入渗的阻碍程度相似。侵入体含量超过某一阈值时,其混入虽有助于促进绿地土壤水分下渗,但因侵入体自身孔隙度低,其含量增加反而导致绿地土壤持水量减小^[33],不利于植物水分利用,且会抑制其根系向下伸展,进而影响到植物的后续生长^[22]。因此,未来的城市绿地建设仍然要减少侵入体的混入,特别是混凝土碎块。

与其他 2 个模型相比,Kostiakov 模型拟合的 R² 最高, RMSE 最低,且对初始入渗率和稳定入渗率拟合的相对误差较小。此外,从对入渗过程的拟合来看, Kostiakov 模型也能够很好地体现侵入体混入对绿地土壤入渗的抑制作用,特别是能反映侵入体配比增加下,不同类型侵入体因孔隙度和饱和吸水率差异,对绿地土壤水分入渗的抑制或促进的渐变过程,因此侵入体影响下绿地土壤水分的累积入渗量随时间变化更加符合 Kostiakov 模型。这与王慧芳等^[34]对黄土、李燕等^[31]对紫色土和党宏宇等^[35]对石灰土中含有砾石时其土壤水分入渗的模拟结果均较为一致。

4 结论

(1)人为侵入体混入会抑制城市绿地土壤水分下渗,导致其入渗速率降低、累积入渗量减小,湿润锋的运移速率减缓,土壤体积含水量降低,且变化延后,以深层土壤体积含水量影响更为显著。与砖块相比,混凝土碎块的抑制作用更为明显。

(2)随着侵入体在土壤中的配比增加,其对土壤水分下渗在某一阈值下仍以抑制为主,但该抑制作用渐趋减弱。

(3)Philip、Horton 和 Kostiakov 模型均能够拟合不同人为侵入体及其配比下城市绿地土壤累积入渗量随时间的变化特征,但以 Kostiakov 模型的拟合效果最佳。

- 参考文献:
- [1] 杨金玲,张甘霖.城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应[J].土壤,2008,40(6):992-996.
 - [2] Wessolek G. Sealing of soils. In: Marzluff J. M. et al. (eds) Urban ecology [M]. Springer, Boston, MA, 2008:161-179.
 - [3] 伍海兵,方海兰,彭红玲.典型新建绿地上海辰山植物园土壤水库特征及其影响因子[J].应用生态学报,2016,27(5):1437-1444.
 - [4] Zhang B, Xie G D, Li N, et al. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2015,140:8-16.
 - [5] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, et al. Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure [J]. Built Environment, 2007,33(1):115-133.
 - [6] Yang Y, Endreny T A, Nowak D J. Simulating the effect of flow path roughness to examine how green infrastructure restores urban runoff timing and magnitude[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2015,14(2):361-367.
 - [7] Zhang B, Xie G, Zhang C, et al. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Management, 2012,100:65-71.
 - [8] Yao L, Chen L D, Wei W, et al. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2015,14(2):300-308.
 - [9] 伍海兵,方海兰.绿地土壤入渗及其对城市生态安全的重要性[J].生态学杂志,2015,34(3):894-900.
 - [10] Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong[J]. Land Scape and Urban Planning, 1998,40:235-249.
 - [11] 伍海兵,方海兰,彭红玲,等.典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J].水土保持学报,2012,26(6):85-90.
 - [12] 杨金玲,张甘霖,袁大刚.南京市城市土壤水分入渗特征[J].应用生态学报,2008,19(2):363-368.
 - [13] 许丽,管瑶,孙海燕,等.极端干旱区小城镇绿地土壤水分入渗性能研究:以阿拉尔市为例[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):240-244.
 - [14] Wang P, Zheng H, Ren Z, et al. Effects of urbanization, soil property and vegetation configuration on soil infiltration of urban forest in Changchun, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2018,28(3):482-494.
 - [15] 马建华,张丽,李亚丽.开封市城区土壤性质与污染的初步研究[J].土壤通报,1999,30(2):46-49.
 - [16] 符素华.土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J].水土保持学报,2005,19(1):171-175.
 - [17] 煤炭科学研究院北京开采研究所.中华人民共和国煤炭工业部部标准 MT 4—87 岩石吸水性测定方法[S].北京:中国标准出版社,1987.
 - [18] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 208—2014 水泥密度测定方法[S].北京:中国标准出版社,2014.
 - [19] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:129-136.
 - [20] Sauer T J, Logsdon S D. Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66:1947-1956.
 - [21] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
 - [22] Ma D H, Shao M A, Zhang J B, et al. Validation of an analytical method for determining soil hydraulic properties of stony soils using experimental data[J]. Geoderma, 2010,159:262-269.
 - [23] Novák V, Hlaváčiková H. Applied soil hydrology [M]. Springer, Cham, Switzerland, 2019.
 - [24] Urbanek E, Shakesby R A. Impact of stone content on water movement in water-repellent sand[J]. European Journal of Soil Science, 2009,60(3):412-419.
 - [25] Baetens J, Verbist K, Cornelis W, et al. On the influence of coarse fragments on soil-water retention[J]. Water Resources Research, 2009,45(7):831-839.
 - [26] Novák V, Kňava K. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: Simulation of water movement in forest stony soil[J]. European Journal of Forest Research, 2012,131(6):1727-1735.
 - [27] 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(5):87-90.
 - [28] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.
 - [29] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. Catena, 2016,147:153-166.
 - [30] Hlaváčiková H, Novák V, Šimůnek J. The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils [J]. Geoderma, 2016,281:39-48.
 - [31] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):435-439.
 - [32] Novák V, Kňava K, Šimůnek J. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method[J]. Geoderma, 2011,161(3/4):177-181.
 - [33] Parajulia K, Sadeghi M, Jones S B. A binary mixing model for characterizing stony-soil water retention[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017,244/245:1-8.
 - [34] 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.
 - [35] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.