

赵亮, 唐泽军, 刘芳. 2009 粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1951-1957

Zhao L, Tang Z J Liu F. 2009. Laboratory tests of fly ash as a sandy soil amendment and its effects on soil water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(9): 1951-1957

粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验

赵亮¹, 唐泽军^{1*}, 刘芳²

1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083

2 甘肃联合大学经济与管理学院, 兰州 730000

收稿日期: 2008-12-17 修回日期: 2009-04-16 录用日期: 2009-07-06

摘要: 通过大量的土柱积水入渗试验, 研究了粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的效果. 同时, 试验还通过在沙土表层不同深度 (10、20、30 cm) 施加不同施用量 (10%、20%、30%、40%) 的粉煤灰, 对比研究了土壤水分物理性质的变化情况. 结果表明, 沙质土壤中施加粉煤灰可以有效地减小土壤入渗能力, 减小湿润锋的下移速率, 增强沙土持水性. 在 0~30 cm 施用深度, 4 种处理条件下湿润锋下移 30 cm 所需的时间分别是对照试验的 7~19 倍. 而且 4 种处理末端推进速率较对照试验均减小了 90% 以上. 粉煤灰土壤改良层中含水率较沙土有明显提高, 有效水分滞留时间显著增加.

关键词: 粉煤灰; 沙质土壤; 土壤改良; 土壤水分物理性质

文章编号: 0253-2468(2009)09-1951-07 中图分类号: X53 文献标识码: A

Laboratory tests of fly ash as a sandy soil amendment and its effects on soil water

ZHAO Liang¹, TANG Zejun^{1*}, LIU Fang²

1 College of Water Conservancy and Civil Engineering China Agricultural University, Beijing 100083

2 College of Economics and Management Gansu Lianhe University, Lanzhou 730000

Received 17 December 2008; received in revised form 16 April 2009; accepted 6 July 2009

Abstract The effects of fly ash as sandy soil amendment on the physical properties of soil water were tested by measuring the accumulated water infiltration in the soil. These treatments involved four different fly ash quantities (10%, 20%, 30%, 40%) and 3 application depths (10 cm, 20 cm, 30 cm). Applying fly ash to sandy soil effectively reduced infiltration and increased soil water retention. Compared to the control experiment, regardless of application depth, the total time of wetting for every treatment increased by 7~19 times, and the final velocity of the wetting front decreased by 90%. In addition, the water content of the soil profile was higher than in the control experiment and the retention time of water in the soil increased significantly.

Keywords fly ash; sandy soil; soil amendment; soil water physical property

1 引言 (Introduction)

长期以来, 黄河内蒙古段两岸由于黄土高原严重的水蚀和河床的迁徙变迁, 淤积了大量的泥沙, 致使黄河两岸耕地严重沙化. 沙化土壤的水力特性十分不利于农业生产和植被生长, 致使该地区土壤生产力低, 农牧民丧失了赖以生存的基本资料. 同时, 该地区土壤风蚀现象也十分严重, 造成土壤表层有限的营养元素流失, 地表结构破坏, 产生了一

系列生产、生活和生态环境问题 (杨根生等, 2004; Zhu *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2005). 黄河内蒙古段两岸沙化区具有分布面积广、厚度大、沙化严重的特点, 因此, 在沙化区寻找省时省工、成本低、有效的沙土改良技术, 对沙化区农业生产和生态环境的改善具有重要意义.

粉煤灰是燃煤排放的废弃物, 其性质因原煤及燃烧工艺不同而略有差别, 总体上表现出粉煤灰颗粒中 70%~90% 是玻璃态球体, 且具有粒径小、活

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2007CB407207)

Supported by the National Basic Research Program of China (No. 2007CB407207)

作者简介: 赵亮 (1983-), 男, 博士研究生, E-mail sunny1983486@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail tangzejun@sina.com

Biography: ZHAO Liang (1983-), male Ph. D. candidate, E-mail sunny1983486@163.com; * **Corresponding author**, E-mail tangzejun@sina.com

性高、吸附能力强、富含微量元素并兼有少量重金属的特点 (Pathan *et al.*, 2003; Kalinski *et al.*, 2006; Adriano *et al.*, 2001; 吴家华等, 1995)。目前, 黄河流域内蒙古段沿岸建有众多燃煤电厂, 粉煤灰年产出量巨大, 且有逐年增加的趋势。除少量粉煤灰应用于建筑和建材外, 大量粉煤灰都以堆放形式存在, 这不仅浪费了土地资源, 而且经过风化及大气降水的淋溶作用, 粉煤灰中的有毒重金属元素会渗入地下, 导致土壤、地表水体及浅层地下水的污染 (Kumpiene *et al.*, 2001; Gupta *et al.*, 2007)。同时, 粉煤灰中的玻璃态微珠极易受到风蚀, 被风扬起的粉煤灰会造成不同程度的大气污染。目前, 有关粉煤灰在农业上的应用研究已有报道 (Pathan *et al.*, 2003; Adriano *et al.*, 2001; 吴家华等, 1995), 主要是利用其具有投资小、施用措施简单、利用量大等特点。研究表明, 利用粉煤灰改良沙质土壤可以有效减小入渗率, 降低水力传导度, 增加土壤含水率。Pathan 等 (2003) 采用两种沙土和 5 种来自不同电厂的粉煤灰进行室内研究, 结果表明, 沙土中添加粉煤灰可使土壤持水能力增加 3 倍, 而土壤导水率较沙土降低 105~248 倍。Gangloff 等 (2000) 研究发现, 在沙土地土壤表层施加粉煤灰可使入渗率减少 80%, 186h 的观察结果表明, 施用粉煤灰的土壤含水率明显高于对照。同时, 该研究还指出, 土壤改良后, 作物产量的提高主要得益于入渗率的减少和有效水含量的增大。Yunusa 等 (2006) 研究发现, 粉煤灰改良沙土可以降低水力传导度 25%, 同时改善土

壤田间持水量。Chang 等 (1977) 在实验室和温室条件下研究了沙质土壤在添加粉煤灰后土壤水分特征、含水率和导水率的变化情况, 结果发现, 粉煤灰和沙土按 1:4 (体积比) 混合可增加土壤持水性 4%, 导水率从 $6\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 减少为 $2\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$, 这表明粉煤灰非常有利于减少作物根层排水。因此, 利用内蒙古境内丰富的粉煤灰资源改良沙土可能是一条有效途径。

基于此, 本研究试图通过室内圆柱模拟试验, 从粉煤灰施用后的土壤湿润锋进展、入渗率及剖面含水率变化情况等方面来探讨粉煤灰改良沙土的效果和粉煤灰改良沙土后水分物理性质的变化情况, 以期为黄河内蒙古段沙化区粉煤灰改良沙土提供技术支撑。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料

试验研究土壤取自内蒙古自治区达拉特旗树林召镇表层 50cm 土壤, 土壤为沙土, 沙粒含量高达 95%, 其余为粉粒。土壤容重较大, 土壤比重为 2.70。营养元素缺乏, 供试土样基本理化性质见表 1。试验前将土样风干后过 2mm 筛, 并剔除植物根系及各种杂物。

粉煤灰取自内蒙古自治区达拉特旗电力实业有限公司粉煤灰场。粉煤灰颗粒以粉粒为主, 占总体积的 72%, 沙粒所占体积比例为 27%, 粘粒含量极少, 平均颗粒粒径为 $42.11\mu\text{m}$ 。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of experimental soil

土壤类型	容重 $/(g\cdot\text{cm}^{-3})$	比重	土壤质地组成			全氮 $/(g\cdot\text{kg}^{-1})$	有机质 $/(g\cdot\text{kg}^{-1})$	有效磷 $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$	有效钾 $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$
			沙粒	粉粒	粘粒				
沙土	1.60	2.70	95.40%	4.60%	0	0.09	2.37	1.68	32.10

2.2 试验设计

入渗试验采用圆柱一维积水入渗试验。试验装置由高 50cm、内径 15cm 的有机玻璃圆柱和高 50cm、内径 10cm 的马氏瓶组成。有机玻璃圆柱侧壁开有小孔, 供入渗试验结束后取土测定含水率之用。土壤含水率测定深度分为 0.5、1.5、2.5、3.5cm 5 个深度。各种处理情况下, 通过马氏瓶向土柱供水总量相同, 从而在水量相同情况下观测各种处理的含水率分布状况。圆柱底部铺放粒径小于 1cm 的砾石, 砾石上方放置带有均匀分布小孔的有机玻璃薄板, 共同组成 3cm 的反滤层, 从而消除气相阻力对

入渗的影响。反滤层上方铺垫纱布, 以防止土粒进入反滤层。纱布上方装填粉煤灰与沙土混合的土样, 土层高总计 40cm。试验通过马氏瓶向土柱表层提供水深为 2.5cm 的稳定水头, 进行积水入渗试验。试验通过定时观测湿润锋和入渗水量了解沙质土壤水分物理性质变化情况。积水入渗开始即观测湿润锋与入渗率变化过程, 初始观测时间间隔较短, 随后根据入渗实际情况逐步增大观测时间间隔。土壤含水率待入渗结束后立即取土测定。

鉴于野外实际调查粉煤灰使用量及沙层深度, 试验设定 4 个粉煤灰施用率 (10%、20%、30%、

40%)及 3个施用深度(10、20、30cm), 这 2个影响因子相互交叉共构成 12组试验. 其中, 施用率指粉煤灰与沙土总质量的比例, 施用深度分别指表层 10、20、30cm的粉煤灰与沙土混合样厚度. 装填沙土质量按照野外测定原状土容重 1.6 g cm^{-3} 计算. 另加一个对照(CK), 总计共 13组试验. 每组试验共进行 2次重复.

入渗试验分为两个阶段, 第 1阶段是将首次使用的沙土与粉煤灰混合后进行入渗试验, 将第 1阶段入渗试验结束后的土样取出重新置放风干后再次装入土柱进行入渗试验作为第 2阶段, 装填方法与第 1阶段相同.

3 结果 (Results)

3.1 粉煤灰施用对沙土渗透性能的影响

3.1.1 粉煤灰施用对湿润锋的影响 沙土表层添加粉煤灰显著地降低了沙土湿润锋的前移速率. 12组处理试验的数据均表明, 粉煤灰的添加有效地减小了湿润锋的前移速率. 图 1结果表明, 对照试验湿润锋推进速率很快, 对照试验湿润锋在土壤剖面推进 40cm的时间约为 17min, 湿润锋前移速率(平均速率, 湿润锋下移距离与相应下移时间的比值)由最初时的 $7.5 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-1} \text{ in}^{-1}$ 减小为到达剖面底端的 $1.25 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-1} \text{ in}^{-1}$, 充分表现出沙土孔隙大, 导水性强的特点. 而粉煤灰不同施用率的处理都显著减小了湿润锋的前移速率, 以第 1阶段土壤表层 30cm 施用深度不同粉煤灰施用率湿润锋推进深度随时间的变化过程为例, 4种处理的湿润锋起始推进速率分别为 3.72520 和 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-1} \text{ in}^{-1}$, 比对照试验分别减少 50.7%、66.7%、73.3% 和 73.3%. 4种处理的湿润锋速度减小到 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-1} \text{ in}^{-1}$ 时, 所用时间分别为 15.5、4 和 4min, 而此时湿润锋推进深度仅分别为 12.5、5.1、4.1 和 4cm. 对照试验湿润锋推进到 30cm 时仅用时 12min, 而 4种处理分别用时为 83、216、228 和 235 min, 是对照试验的 7~19倍. 同时, 4种处理时湿润锋推进至土壤剖面底端时的速率分别为 0.1001 、 0.005 和 $0.002 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-1} \text{ in}^{-1}$, 较对照试验减小了 90% 以上, 还发现 20%、30% 和 40% 3种处理湿润锋末端速率低于 10% 处理 1个数量级. 总体而言, 4种处理都明显地减慢了湿润锋的下移速率, 20%、30% 和 40% 3种施用率对湿润锋影响程度大致相同, 且较 10% 施用率强烈. 4种处理湿润锋的变化过程总体表现出随着粉煤灰施用率的增加,

相同时间下湿润锋推进深度减小.

试验对第 1阶段 30% 施用率不同施用深度湿润锋推进深度随时间变化过程进行了研究. 发现对照试验湿润锋推进速率很快, 明显高于 3种不同深度处理的湿润锋下移速率. 3种施用深度都不同程度地减缓了湿润锋下移速率, 且表现为施用深度越小, 湿润锋推进速率越慢.

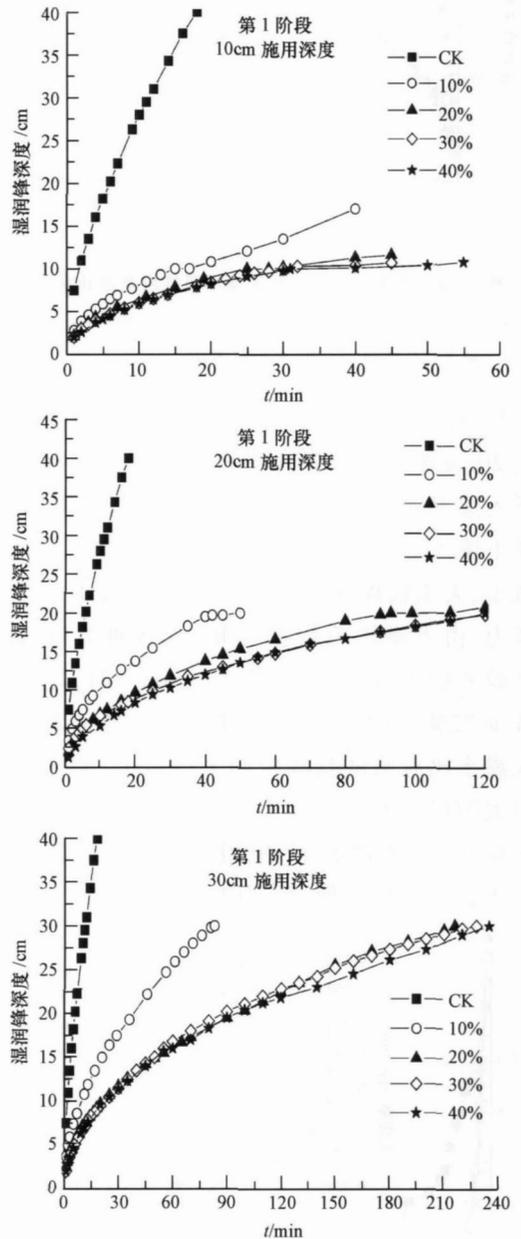


图 1 第 1阶段不同施用率湿润锋对比

Fig. 1 Comparison of wetting fronts at different application rates in the first stage

第 2阶段的试验显示出与第 1阶段试验相似的变化趋势, 以第 2阶段 30cm 施用深度不同施用率

湿润锋推进深度随时间变化过程为例(图 2). 试验结果表明, 粉煤灰仍能有效地减小湿润锋的前移速率, 但减缓的程度同第 1 阶段相比有所下降.

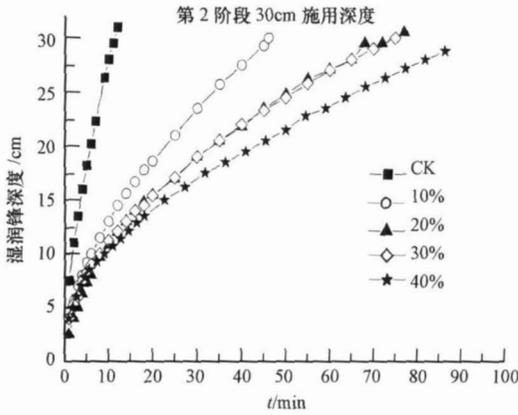


图 2 第 2 阶段 30cm 施用深度不同施用率湿润锋对比
Fig 2 Comparison of wetting fronts for different application amounts at 30 cm depth in the second stage

3.1.2 粉煤灰施用对入渗率的影响 图 3 是土壤表层 20cm 施用深度第 1 阶段不同粉煤灰施用率情况下入渗率随时间变化过程. 由图 3 可以看出, 4 种处理土壤入渗率曲线初期梯度变化很大, 入渗率迅速减小, 表明粉煤灰的添加可以迅速减小土壤的入渗能力. 由入渗试验数据得知, 当各种处理达到对照试验的稳定入渗率 $0.22 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 用时比对照减少 72% ~ 82%; 而当入渗 30min 时, 4 种处理下的入渗率比对照试验减少约 1 倍以上. 图 3 中小图是对大图局部的一个放大, 可以发现同一施用深度 4 种不同施用率情况下, 施用率 10% 的减渗效果明显小于其他 3 种处理, 而 20%、30%、40% 3 种施用

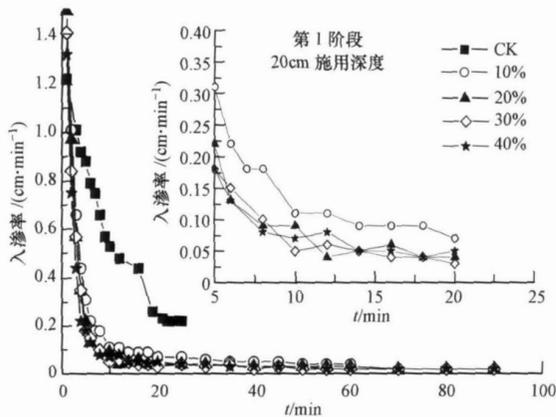


图 3 第 1 阶段表层 20cm 施用深度不同施用率入渗率对比
Fig 3 Comparison of infiltration rates for different application quantities in the 0.20cm application depth

率对于减小入渗的能力大致相同. 第 2 阶段的入渗率曲线与第 1 阶段大致相似, 其区别仅表现在粉煤灰减渗效果较第 1 阶段有所减缓, 但总体趋势仍表现为随粉煤灰施用率的增大入渗率减小的特点, 这同两阶段湿润锋的变化趋势相同.

图 4 是第 1 阶段 30% 施用率不同施用深度入渗率随时间变化过程. 由图 4 可知, 相同施用率处理入渗率变化一致, 且明显小于对照处理入渗过程.

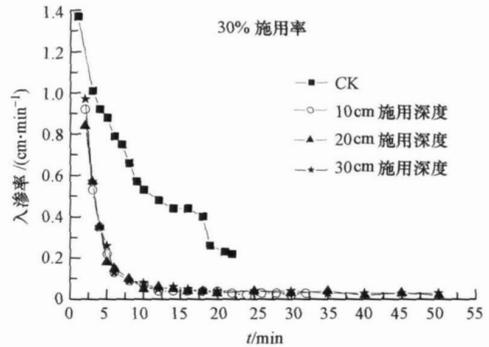


图 4 第 1 阶段 30% 施用率不同施用深度入渗率对比
Fig 4 Comparison of infiltration for different application depths and 30% fly ash application in the first stage

3.2 粉煤灰施用对沙土持水能力的影响

土壤的持水性可以通过土壤水分在土壤中的运动特点反映出来. 试验表明, 粉煤灰的添加可以显著地增强沙土的持水能力. 粉煤灰增强沙土持水性体现在两个方面, 一方面, 粉煤灰施用率相同而施用深度不同时, 土壤累计入渗量有所不同. 以粉煤灰 30% 施用率而不同施用深度 (20, 30cm) 累计入渗量比较为例(图 5), 粉煤灰施用深度小, 则累积入渗量较小. 另一方面, 当湿润锋到达改良土与下部

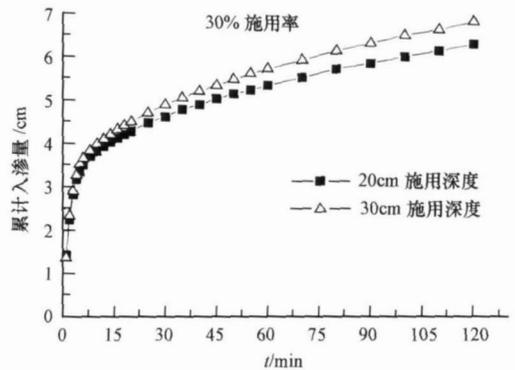


图 5 30% 施用率不同施用深度的累计入渗量对比
Fig 5 Comparison of accumulated infiltration for different application depths with 30% fly ash

沙土交界处时,湿润锋并未迅速通过土壤界面,而表现出暂时停滞的现象.湿润锋在界面停滞程度与粉煤灰施用深度和施用率相关,基本上体现为停滞时间长度随粉煤灰施用率增大而增加的特点.

3.3 粉煤灰施用对土壤含水率的影响

由于第1阶段试验后土壤需要取出自然风干,以备第2阶段的试验,所以采用第2阶段土壤含水率结果来讨论粉煤灰施用效果.图6是第2阶段施用深度为20cm和30cm不同粉煤灰施用率条件下土壤含水率剖面的分布情况.从图6可以看出,对照试验土壤剖面质地均一,土壤含水率沿剖面变化不大,大约在20%左右.粉煤灰的添加显著地影响了土壤水分的分布情况,4种处理上层粉煤灰改良层土壤含水率较对照试验高,且表现出随施用率增大而增大的趋势.以粉煤灰施用深度为20cm为例,10%、20%、30%、40%施用率时,土壤剖面平均含水率较对照试验分别增长39.3%、44.3%、65.3%、76.2%.而改良土层交界面下层沙土层含水率小于对照试验,表现出与上层粉煤灰施用层相反的趋势,并且,土壤交界面上下层土壤含水率变化显著,下层含水率较上层有明显的突降,土壤水分在土壤改良层有效滞留时间显著增加.

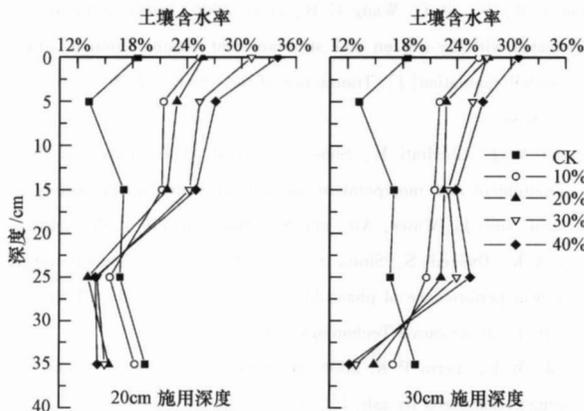


图6 第2阶段不同施用率土壤含水率比较

Fig 6 Comparison of soil moisture content among different application amounts in the second stage

4 讨论 (Discussion)

4.1 粉煤灰施用减弱沙土入渗能力分析

粉煤灰不同施用深度、不同施用率处理时都表现出湿润锋下移速率减慢和入渗率降低的现象,表明粉煤灰改良了沙质土壤的水力运动特性,有效地降低了沙质土壤水力传导能力 (Chang *et al.*, 1977,

Pathan *et al.*, 2003). 沙质土壤中大粒径颗粒所占比例大,形成了土壤中以大通气孔隙为主的孔隙结构,孔隙弯曲少、紧实性差,造成水流运动阻碍小,传导性高.粉煤灰的施用改变了沙土的孔隙结构,细小的粉煤灰颗粒充填到沙土的大孔隙中,有效地减少了通气孔隙的比例,因而改变了沙土水力传导能力,从而有效的减弱了沙土渗透性.李广慧等 (2002)研究认为,粉煤灰的加入使土壤不利的块状结构得到改善,土壤变得疏松多孔,这与本研究结果有所差异的原因是改良土壤质地类型不同,因而产生了改良后不同的土壤孔隙状况.同时,粉煤灰颗粒本身的强吸附能力对于土壤中水分产生吸附效果 (Kalinski *et al.*, 2006),阻碍了水分运动,降低了沙土的渗透水平.上述两种效果皆表现出随粉煤灰施用率增大,减弱效果增强的特点,因而表现出改良后沙土入渗能力随粉煤灰施用量增加而减弱的效应.同时,20%、30%、40% 3种施用率减渗效果略有增强,且明显高于10%施用率.本研究认为,20%施用率可有效地改变沙土水分入渗能力,更高的施用率减渗效果增幅并不明显.两阶段入渗能力变化趋势相同,但程度不同,这主要是因为第2阶段粉煤灰吸附能力较第1阶段降低;另一方面,可能与试验方法有关,第1阶段试验结束后,添加粉煤灰的沙土经过风干后,重新装入圆柱试验桶,土壤结构变得相对松散,土壤孔隙度加大造成土壤入渗能力的变化.

4.2 粉煤灰施用增强土壤持水能力分析

粉煤灰增强沙土持水能力是由于粉煤灰施用改变沙土孔隙组成,因而形成交接面上下土壤结构差异,从而表现出不同的水力特性.粉煤灰施用率相同而施用深度不同时表现出土壤累计入渗量的不同,这是因为粉煤灰添加沙土改变了沙土孔隙分布状况,造成总孔隙度减少和毛管孔隙比例升高,而孔隙分布状况的变化又致使土壤毛管力增强和重力作用减弱,因而造成土壤交界面上下层土壤对水分吸持能力明显不同.土壤水分可以更加有效地贮存在交界面上层的粉煤灰改良层.同时,湿润锋下移深度愈接近土壤界面时,粉煤灰的持水能力愈强,湿润锋的下移速率愈慢.因此,小施用深度时湿润锋更早地受到粉煤灰持水能力的影响,湿润锋下移速率迅速减慢,造成相同时间内土壤累积入渗水量的减少.段喜明等 (2006)研究指出,粉煤灰的利用明显提高了水的蓄存能力,这与本研究结果相

似. 研究表明, 土壤下部沙层的存在增加了上层土体的持水能力, 沙层起到了阻止水流继续向下层渗流的作用 (王文焰等, 1995; 姚贤良, 程云生, 1986). 本研究认为这种变化不是下部沙土层对湿润锋前移能力的阻碍, 而实质上是粉煤灰改良了上层沙土的持水能力的结果.

湿润锋在土壤交界处的停滞现象是由于上层粉煤灰改良层毛管力作用强于下部沙土层, 湿润锋在土壤交界面处吸力大于下层沙土层中粗孔对水的吸力所致. 土壤水分不能立即进入沙土层, 而在上层中积累, 待其土壤水分含量增大至饱和含水率, 湿润锋处吸力与沙土层粗孔吸力平衡时, 水分才可进入下部沙土层. 由此可见, 粉煤灰的添加减小了沙土孔隙, 增强了沙土毛管力的作用, 促使更多水分滞留在改良层, 可有效地增强改良沙土的持水能力.

4.3 粉煤灰施用对土壤水分分布影响分析

土壤剖面含水率分布是粉煤灰改良沙土水分物理性状的综合体现. 粉煤灰的施用降低了沙土的导水能力, 减弱了沙土湿润锋的下移速率, 有效地减小了水分的入渗. 同时, 粉煤灰对沙土持水能力的改善又保证水分可以有效地贮存在粉煤灰改良层. 因而, 粉煤灰改良层含水率表现出随粉煤灰施用率增大而增大的趋势. Pathan 等 (2001) 也得出相似的结论, 认为粉煤灰改良后土壤的有效水含量增大 1.5~1.9 倍. 试验设定为各种处理时土柱内入渗总水量相同, 因此, 上层土壤持水能力愈强、水量越多, 势必造成水分下渗减少, 呈现土壤水分主要积聚在土壤改良层, 而下层含水量愈少的特点.

另外, 粉煤灰改良层对土壤水分吸力大, 土壤持水能力强, 形成了土壤剖面含水率在交界面处的突降现象是粉煤灰改良沙土的重要特点. 粉煤灰的实际农业应用时应当考虑粉煤灰施用深度所带来的交界面处水分含量急剧变化与种植作物根系深度的关系, 以保证植物根系的水分充分供应.

5 结论 (Conclusions)

1) 湿润锋下移深度和入渗率的变化表明, 粉煤灰的施用明显地降低了沙土的渗透性能, 减弱了沙质土壤水力传导能力, 且总体上表现为随着粉煤灰施用率的增大而减弱趋势加强的特点. 试验第 2 阶段入渗能力减小较第 1 阶段有所缓和, 但减渗能力的变化趋势与第 1 阶段一致.

2) 粉煤灰的改良效果与粉煤灰的使用次数有关, 而首次使用的减渗效果又十分明显. 因此, 在田间使用时适当置放或雨水冲刷, 以防止入渗能力过小, 产生地表径流、地表冲刷等现象.

3) 粉煤灰低施用深度会造成土壤水分下移能力减弱迅速, 土壤累计入渗水量较低, 同时, 水分大量积聚在粉煤灰施用层. 因此, 为了确保粉煤灰田间使用效果, 适应田间作物根系吸水要求, 粉煤灰施用深度应当结合不同作物扎根深度具体确定, 从而保证根系层足够的水分含量.

责任作者简介: 唐泽军 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是水土资源与环境.

参考文献 (References):

- Aldriano D C, Weber J T. 2001. Influence of Fly Ash on soil physical properties and turfgrass establishment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 30: 596—601
- Chang A C, Lund L J, Page A L, *et al*. 1977. Physical properties of fly ash amended soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 6: 267—270
- 段喜明, 吴普特, 王春红, 等. 2006. 人工降雨条件下施加粉煤灰对耕作土壤结构和水土流失的影响研究 [J]. *农业工程学报*, 22(8): 50—53
- Duan X M, Wu P T, Wang C H, *et al*. 2006. Effect of farming soil treated with fly-ash on soil structure and erosion through artificial rainfall simulation [J]. *Transaction of the CSAE*, 22(8): 50—53 (in Chinese)
- Gangloff W J, Ghodrati M, Sims J T, *et al*. 2000. Impact of fly ash amendment and incorporation method on hydraulic properties of a sandy soil [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119: 231—245
- Gupta A K, Dwivedi S, Sinha S, *et al*. 2007. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus vulgaris* growth in fly ash amended soil [J]. *Bioresource Technology*, 98: 3404—3407
- Kalinski M E, Yerra P K. 2006. Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash [J]. *Fuel*, 85: 2330—2336
- Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. 2007. Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat [J]. *Environmental Pollution*, 145: 365—373
- 李广慧, 许虹, 邵伟, 等. 2002. 粉煤灰改良栗钙土物理性质的实验研究 [J]. *水土保持学报*, 16(6): 113—115
- Li G H, Xu H, Shao W, *et al*. 2002. Experimental study on improvement of physical properties of chestnut soil using fly ash in Baoku [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(6): 113—115 (in Chinese)
- Pathan S M, Aynore L A G, Colner T D. 2001. Fly ash amendment of sandy soil to improve water and nutrient use efficiency in turf culture [J]. *Int Turfgrass Soc Res J*, 129: 205—211
- Pathan S M, Aynore A G, Colner T D. 2003. Properties of several fly

- ash materials in relation to use as soil amendment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 32: 687—693
- 王文焰, 张建峰, 汪志荣, 等. 1995 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. *农业工程学报*, 11(1): 104—110
- Wang W Y, Zhang J F, Wang Z R, *et al* 1995 Experiment and Study on water-tightness and infiltration reduction of sand layer in loess soils[J]. *Transaction of the CSAE*, 11(1): 104—110(in Chinese)
- 吴家华, 刘宝山, 董云中, 等. 1995 粉煤灰改土效应研究[J]. *土壤学报*, 32(3): 335—340
- Wu J H, Liu B S, Dong Y Z, *et al* 1995 Study on effect of soil amelioration with coal ash[J]. *Acta Pedologica Sinica* 32(3): 335—340(in Chinese)
- 杨根生, 拓万全. 2004 风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J]. *西北水电*, 3: 44—49
- Yang G S, Tuo W Q. 2004 The effect of wind-blown sand on sediment deposition in the channel for inner Mongolia reach of yellow river [J]. *Northwest Hydropower* 3: 44—49(in Chinese)
- 姚贤良, 程云生. 1986 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 290—295
- Yao X L, Cheng Y S. 1986. *Soil Physics*[M]. Beijing: Agricultural Press, 290—295(in Chinese)
- Yunusa I A M, Eamus D, Desilva D L, *et al* 2006. Fly-ash: An exploitable resource for management of Australian agricultural soils [J]. *Fuel* 85(16): 2337—2344
- Zhao H L, Zhao X Y, Zhou R L, *et al* 2005 Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Environments* 62: 309—319
- Zhu Z M, Yang C, Cao M M, *et al* 2007 Analysis on the soil factor and physiological response of the plants in the process of sandy desertification on grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica* 27(1): 48—57