

基于不同湿润速度下 PAM 水解过程对砂壤土入渗的影响

韩冬¹, 魏占民^{1*}, 于健², 宋日权²

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2.内蒙古水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要:为揭示土壤结构改良剂聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)在不同湿润速度下对土壤入渗的影响机制, 通过土槽入渗试验, 研究混施干粉 PAM(0、22.5、45 kg·hm⁻²)的砂壤土在不同湿润速度(2.5 mm·min⁻¹ 和 6.25 mm·min⁻¹)下土壤入渗参数的变化, 通过测定非毛管孔隙率、导气率和团聚体含量来描述土壤结构特征。结果表明:湿润速度显著影响土壤累计入渗量和稳定入渗率, 高速湿润条件下的累计入渗量和稳定入渗率比低速度湿润条件分别降低了 23.75%和 26.70%。在同一湿润速度下, PAM 在不同阶段对土壤入渗的影响截然相反:湿润阶段, 在 PAM 作用下土壤累计入渗量、土壤非毛管孔隙率和导气率等均有不同程度降低, 且 PAM 用量越大降低幅度越大, 此时正处在逐渐水解过程中的 PAM 分子长链堵塞了土壤孔隙, 抑制了土壤水流运动; 连续流阶段, PAM 能够提高土壤稳定入渗率、土壤非毛管孔隙率和导气率, 且 PAM 用量越大提高幅度越大, 此时 PAM 分子已经完全水解, 发挥了稳定土壤结构的作用, 增加了土壤结构中水稳性团聚体含量, 从而促进水流入渗。研究不同湿润速度下 PAM 水解过程对砂壤土入渗性能的影响, 可以为 PAM 在改良土壤结构方面更广泛的应用提供理论依据。

关键词:湿润速度; PAM; 水解过程; 入渗

中图分类号: S152.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)06-1174-07 doi:10.11654/jaes.2015.06.022

Effect of Polyacrylamide Hydrolysis on Sandy Loam Infiltration Under Different Wetting Rates

HAN Dong¹, WEI Zhan-min^{1*}, YU Jian², SONG Ri-quan²

(1. Institute of Water Conservancy and Civil and Architectural Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China; 2. Water Resources Research Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: In order to reveal the influence of polyacrylamide (PAM) on soil infiltration under different wetting rates, 3 PAM amounts (0 kg·hm⁻², 22.5 kg·hm⁻² and 45 kg·hm⁻²) and 2 water inflow rates (2.5 mm·min⁻¹ and 6.25 mm·min⁻¹) were used in soil box to study the variation of soil infiltration parameters and to characterize soil structures by measuring capillary porosity, gas conductivity and aggregate content. Cumulative infiltration amount and stable infiltration rate were significantly influenced by wetting rates, and they were respectively 23.75% and 26.70% lower under high wetting rate than under low wetting rate. Under the same wetting rate, PAM had two quite different effects on soil infiltration over wetting course. At wetting phase, PAM was hydrolyzing and its long-chain molecules clogged soil pores and thus inhibited soil water movement, resulting in decreases in the cumulative soil infiltration, soil non-capillary porosity and conductivity gas rate, with more reduction at higher PAM rate. At continuous flow phase, PAM was completely hydrolyzed and it thus increased soil structure stability and water-stable aggregates, thereby improving soil infiltration rate, soil non-capillary porosity and conductivity gas rate in a dose-effect manner. These results would provide theoretical evidence for PAM application to improvement of soil structure.

Keywords: wetting rate; polyacrylamide; hydrolysis process; infiltration

聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)是一种常见的土壤结构改良剂。前人的研究明确指出 PAM 能够稳定土壤团聚结构、减少表土侵蚀及防治水土流失^[1-4], 但是对于 PAM 对土壤入渗参数的影响却说法不一。

一部分研究人员基于 PAM 能够稳定土壤结构的研究得出 PAM 能够增加土壤入渗: Trout 等研究表明 PAM 能够有效增加土壤入渗, 且增加幅度随着 PAM 施用量的增加而加大^[1]; 于健等通过试验得出 3 种分子量的 PAM 均能显著提高土壤入渗, 稳定入渗率较对照分别增加了 58.9%、92.2%和 83.3%^[5]。还有一部分学者持相反的意见: 张振华等研究表明相对于对照处理(PAM 浓度为 0)的累积入渗量, 10×10⁻⁶、50×10⁻⁶、500×10⁻⁶ 的 PAM 溶液的减渗率分别为 98.51%、79.63%、

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51469024); 国家国际科技合作专项项目(2014DFA71080)

作者简介: 韩冬(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤结构改良方面的研究。E-mail: nuanxiasky@126.com

* 通信作者: 魏占民 E-mail: wei_zhanmin@aliyun.com

60.48%^[6];张春强等通过试验得出 PAM 能够抑制土壤入渗,且随着 PAM 施用量的增加,土壤累积入渗量、入渗率的降低幅度均有所增加^[7];刘东等研究得出施用 PAM 能够显著降低土壤累积入渗量,当 PAM 施用量为 $2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,累积入渗量较对照降低 86.7%^[8]。造成这种结果的原因可能与 PAM 施用浓度有关,如陈渠昌等通过试验得出 PAM 用量为 $0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时能够增加土壤入渗,而当 PAM 用量达到 $3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,将抑制土壤入渗^[9];还有学者认为是由于 PAM 不同的施用方式和不同分子量,于健等研究表明喷洒溶胶和溶液 PAM 可分别提高土壤稳定入渗率 1.0~2.5、1.7~2.8 倍,直接施用干粉 PAM 可提高 0.25~1.8 倍^[10],不同分子量的 PAM 均能显著提高土壤入渗,与对照相比,稳定入渗率分别增加了 58.9%、92.2%和 83.3%^[6]。

在前人的研究过程中入渗参数的测定均在同一个时间范围内(3 d)完成,这样就忽略了 PAM 在土壤中不同水解时间对土壤结构的调节起到的不同作用。为了更好地揭示 PAM 对土壤入渗参数不同阶段的影响机制,本试验将干粉状 PAM 与土壤混施后测定了 PAM 不同水解时间的土壤累积入渗量和稳定入渗率,并且通过测定不同阶段的孔隙率、土壤导气率和团聚体稳定性来验证结论。同时考虑到湿润速度显著影响土壤团聚结构中气体压力作用下不均匀膨胀造成的崩解程度^[11],结合 Le Bissonnais 提出的团聚体崩解理论认为,慢速湿润时主要是黏粒膨胀起作用,而快速湿润时主要是消散作用^[12]。本试验根据试验土样区域的平均灌溉定额设计了两个湿润速度(2.5 、 $6.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),并根据当地 PAM 普遍施用量设定两个水平(22.5 、 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),以不施用 PAM 记为 CK,共 6 个处理。以内蒙古中部察右中旗砂壤土为研究对象,研究不同湿润速度下 PAM 对砂壤土入渗参数的变化规律,为 PAM 在土壤结构改良方面更加广泛的应用提供可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

聚丙烯酰胺(PAM)分子量为 1200 万,由唐山博

雅化工公司生产,水解度 7%,试验土样为察哈尔右翼中旗乌素图镇南部的砂壤土,供试土样基本理化性质如表 1 所示。

1.2 试验装置与设计

试验采用自制土槽(长×宽×高= $80\text{ cm}\times40\text{ cm}\times15\text{ cm}$)完成,如图 1 所示。

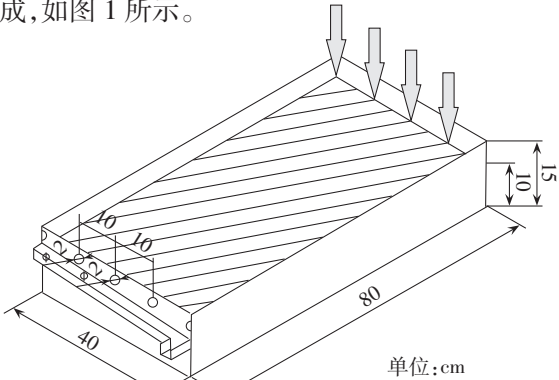


图 1 渗流土槽示意图
Figure 1 Diagram of soil box

根据当地灌水定额 $450\sim750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,畦长 50 m,地面坡度 $1/1000\sim1/2000$ 等条件,推算出单宽流量为 $2\sim5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,试验设定两个湿润速度(2.5 、 $6.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)。湿润速度由型号为 2T600-1J 的蠕动泵控制,以入槽水流的流量($\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$)除以土壤表面积($800\text{ mm}\times400\text{ mm}$)计算。PAM 施用量根据当地普遍施用量设定两个水平,分别为 22.5 、 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,具体见表 2。

1.3 试验方法

1.3.1 土槽入渗试验

入渗试验分为 3 个阶段进行。第一阶段填装土样。铺设直径 $2\sim4\text{ mm}$ 的砂石料作为土槽底部垫层,

表 2 入渗试验处理
Table 2 Infiltration experimental treatments

处理 Treatment	湿润速度 Wetting rates	
	$2.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$	$6.25\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
CK	CK _{2.5}	CK _{6.25}
PAM1	P1 _{2.5}	P1 _{6.25}
PAM2	P2 _{2.5}	P2 _{6.25}

注:PAM1 处理的 PAM 施用量为 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;PAM2 处理的 PAM 施用量为 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 1 供试土样基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

pH 值 pH value	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Bulk density	有机质含量/% Organic matter content	可交换钠百分比/% Exchangeable sodium percentage	颗粒机械组成 Particle mechanical compositions/%		
				粘粒 Clay ($\leq 0.002\text{ mm}$)	粉砂 Silt ($0.002\sim0.02\text{ mm}$)	砂粒 Sand ($\geq 0.02\text{ mm}$)
8.1	1.6	0.9	2.15	15	12.5	72.5

按照容重 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 铺 2 cm 高。将风干土样(含水率 $<5\%$)与干粉 PAM 均匀混合,分层填装土槽,填装高度 8 cm,保持容重 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。第二阶段在填装土样完成后立即进行,为湿润土体。布设连接试验仪器后开始从土壤表层灌水湿润,调节湿润速度,为模拟水流剪切力土槽倾斜 10° ,水流从高的一侧灌入土槽,在重力作用下水流向土槽低的一侧推进同时向下入渗。待土槽表面土壤全部湿润后即径流孔有水流流出时结束湿润,并记录湿润时间,湿润速度 $\times$ 湿润时间即为湿润阶段的土壤累积入渗量(mm)。土壤预湿的目的在于避免土壤表层含水率过低而引起的水流流过时表层土壤结构的塌落和结皮来影响入渗^[13-14]。第三阶段为连续流阶段,在湿润阶段完成后 8~12 d 进行。判定标准为表层土壤含水率 $<5\%$ 时开始连续流灌水,灌水速度与湿润阶段的湿润速度保持一致。开始产流后,每间隔 2 min 记录径流量。当土槽底部的渗流孔有水流流出时,每间隔 2 min 记录渗流量。直至单位时间内流入土槽总水量等于渗流量和径流量之和,则认为入渗达到稳定,此时的渗流量除以时间记为稳定入渗率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。为消除试验误差,每个处理重复 3 次。

1.3.2 孔隙特征测定

非毛管孔隙度又称大孔隙度,是土壤导水导气的主要通道^[15]。所以选取非毛管孔隙度作为土壤孔隙特征参数,计算公式如下:

$$p = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100\% \times \rho_b$$

式中: p 表示土壤非毛管孔隙率,%; m_1 表示土壤饱和质量,g; m_2 表示土壤置滤水砂层 2 h 土壤质量,g; m_3 表示土壤干质量,g; ρ_b 表示环刀法测定土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

环刀取土样分别在两个阶段进行,分别为湿润阶段结束时和连续流阶段完成后 8~12 d。环刀放在土槽正中位置,拨开表层 2 mm 厚土粒打入环刀,取出后立即装入环刀盒带回实验室后测定。试验操作参照《土壤农业化学分析方法》^[16]。为消除试验误差,每种处理重复 3 次,数据结果均为 3 次试验平均值。

1.3.3 土壤导气率测定

土壤导气性的观测仪器为 Umwelt-Gerate-Technik GmbH 公司生产的 PL-300 型土壤空气传导性测量系统,由主机和样本容器两部分组成,试验系统由图 2 所示。在测量过程中,空气自动由环刀流入仪器,并测量环刀内部与外部空气间的压力差,同时直接输出试样导气率数值。

测量原理:依据土壤空气对流通量方程获得^[17-18],

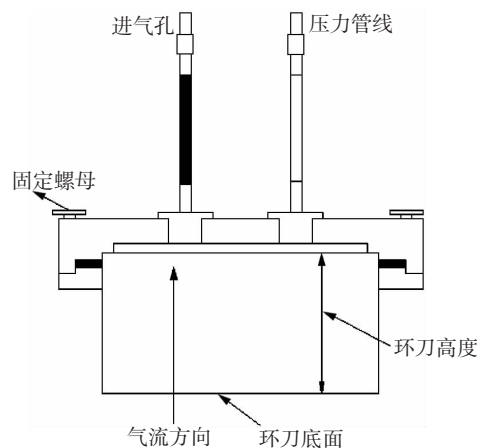


图2 导气率测定样本容器示意图

Figure 2 Schematic description of air permeability specimen containers

即在土体一端施加一定的气压,然后测量通过土体的稳定气体通量。土壤对流方程为:

$$J_c = -K_a \frac{dp}{dz}$$

式中: J_c 为空气通量, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; K_a 为土壤导气率, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; p 为气体压力,Pa; z 代表坐标,cm。

分别在湿润阶段和连续流阶段结束后观测土壤导气性,前者是在湿润阶段结束后立即施测,后者则是在入渗结束后,保持土体自然风干 8~12 d (日平均气温 28°C) 再进行观测。测定参数均为土壤导气率($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.3.4 团聚体试验

依据 Le bissonnais 提出的团聚体破碎理论^[13],采用干筛和湿筛法进行团聚体破碎程度分析,仪器选用土壤团聚体分析仪型号为 XL02-TTF-100。在连续流结束 8~12 d 后取土样进行观测。

干筛:将 50 g 风干土样(含水率 $<5\%$)依次通过孔径为 5、2、1、0.5、0.25、0.106、0.053 mm 的套筛,分别称重计算出各级干筛团聚体占土样总质量的百分比。

湿筛:依次通过孔径为 5、2、1、0.5、0.25、0.106、0.053 mm 的套筛并在水中以 $30 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度上下振动 30 min,烘干称重,计算 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量 $R_{0.25}$ ^[19]、各级团聚体所占比例。为消除试验误差,每种处理重复 3 次,数据结果均为 3 次试验平均值。

1.3.5 数据处理

所有试验数据均采用 Excel2010 和 SPSS17.0 进行统计分析,用 Duncan 多重极差法进行检验,显著水平 P 均为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 不同湿润速度下 PAM 对土壤累计入渗量的影响

图3是不同湿润速度下各处理在湿润阶段的累积入渗量。通过比较不同湿润速度的 PAM0 添加 (CK) 数据可知,湿润速度 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的累积入渗量为 30.29 mm , 而 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的累积入渗量为 23.15 mm , 两者相差 7.14 mm , 累积入渗量随着湿润速度的增加降低了 23.57% 。施用 PAM 后累积入渗量均较 CK 有所降低, 且差异显著。P1_{2.5} 较 CK_{2.5} 降低 8.9% , P2_{2.5} 较 CK_{2.5} 降低 20.31% , 而高速湿润条件下 PAM 处理降低幅度小一些, P1_{6.25} 较 CK_{6.25} 降低 8.58% , P2_{6.25} 较 CK_{6.25} 降低 11.22% 。分析原因可能与 PAM 的水解过程有关^[20]。

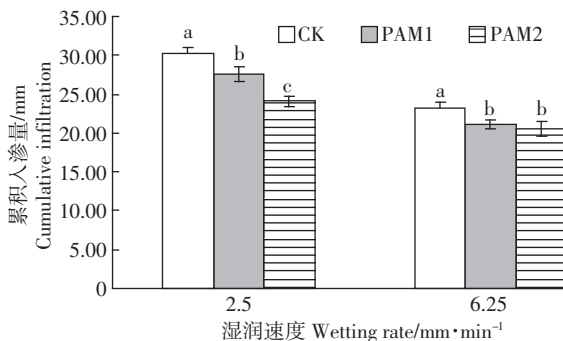


图3 不同湿润速度下土壤累积入渗量

Figure 3 Cumulative infiltration amount of soil under different wetting rates

2.2 不同湿润速度下 PAM 对土壤入渗率的影响

试验过程中连续流初期入渗面积没有覆盖全部土槽 ($80 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$), 故测得的单位时间渗流量称为渗流速率。

试验可以表明施用 PAM 能够有效增加土壤稳定入渗率, 且施用 PAM 的稳定入渗率较对照均表现出显著差异。P1_{2.5} 的稳定入渗率较 CK_{2.5} 提高 8.71% , P2_{2.5} 较 CK_{2.5} 提高 26.28% (图4)。而 P1_{6.25} 的稳定入渗率较 CK_{6.25} 提高 13.09% , P2_{6.25} 较 CK_{6.25} 提升高达 28.36% (图5)。可以看出, PAM 施用量越大, 土壤稳定入渗率提高幅度越大。虽然在预湿过程中 PAM 水解后的长链结构阻碍了土壤中水流的运动, 但是连续流阶段 PAM 已经完全水解, 此时发挥了稳定土壤团聚结构的作用, 保持了良好的入渗条件^[7]。

2.3 基于不同湿润速度施用 PAM 在不同阶段的土壤结构特征变化

2.3.1 土壤孔隙率变化

图6为不同湿润速度施用 PAM 在不同阶段的土

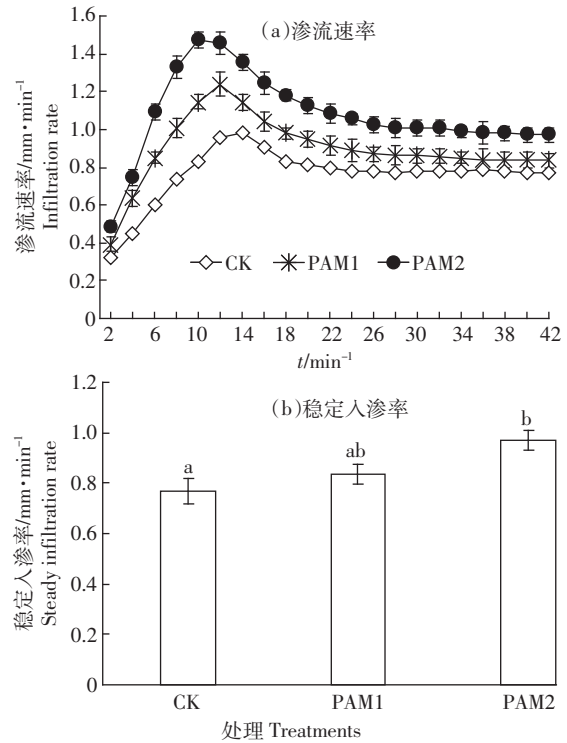


图4 湿润速度 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的土壤渗流速率

Figure 4 Soil infiltration rate under $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ of wetting rate

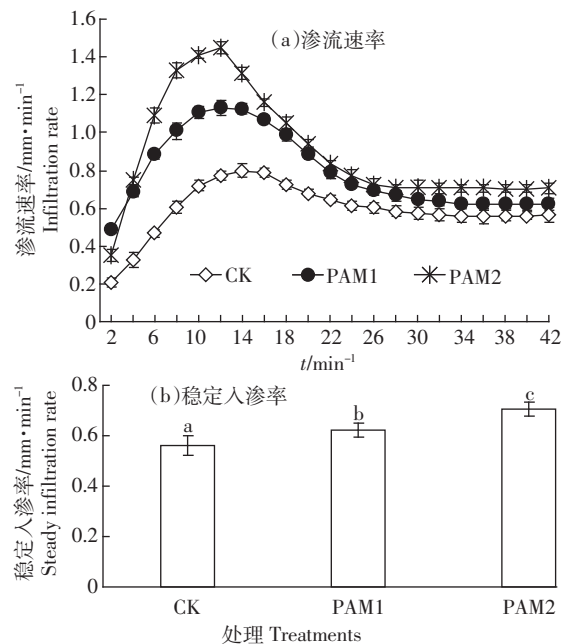


图5 湿润速度 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的土壤渗流速率

Figure 5 Soil infiltration rate under $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ of wetting rate

壤非毛管孔隙率变化情况。

在湿润阶段 (图6a), PAM 处理的非毛管孔隙率较对照有所降低, 且 PAM 施用量越大, 非毛管孔隙率降低程度越大。两者呈现对数负相关, 两个湿润速度下, 相关系数均达到 0.99 以上。比较两个不同湿润速

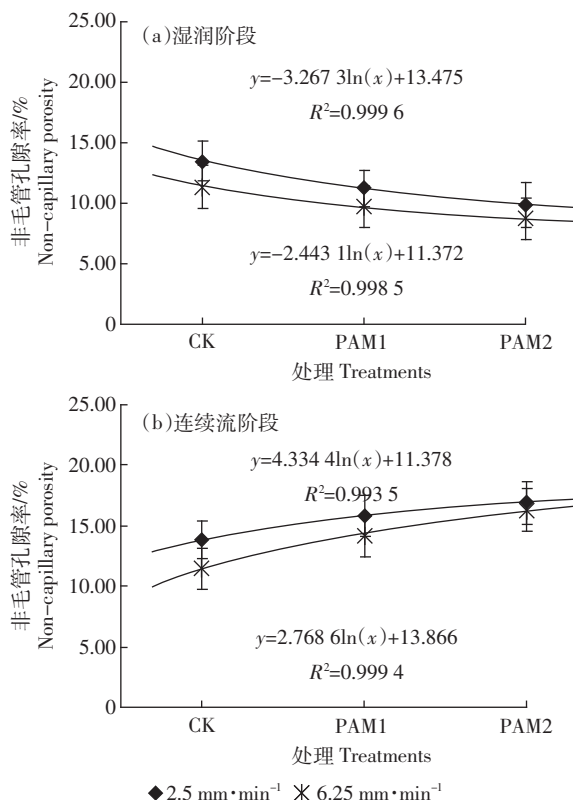


图6 不同阶段土壤非毛管孔隙率

Figure 6 Non-capillary porosity of soil at different wetting phases

度的非毛管孔隙率发现,高速湿润($6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)整体低于低速湿润条件($2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),对应湿润阶段高速湿润的土壤累积入渗量整体低于低速湿润条件。这是由于表层土壤结构在水流冲刷作用下遭到破坏,细颗粒随着水流运移填补土壤孔隙,湿润速度越快,意味着沿坡面方向的水流剪切力越大,表层土壤破坏程度明显,非毛管孔隙率越小,进而降低了水流入渗的能力^[21]。施用PAM后的非毛管孔隙率降低对应湿润阶段施用PAM土壤累积入渗量也低于对照。分析原因是干粉状PAM湿润阶段正是自身水解的过程,其不断聚合的分子链堵塞了土壤孔隙,使水流运动的主要孔隙通道受阻,再加上PAM本身的透水性并不强,所以使用PAM在湿润阶段阻碍了水流运动,降低了土壤累积入渗量。

在连续流阶段(图6b)土壤非毛管孔隙度随着PAM施用量的增加而增加。不同湿润速度的非毛管孔隙度亦表现为低速湿润条件整体大于高速湿润条件,原因与湿润阶段相同。连续流阶段PAM经过湿润后已经完全水解,且与土壤结构胶结在一起,发挥了稳定土壤团聚结构、促进土壤中水流运动,完全对应了连续流阶段施用PAM后土壤稳定入渗率较对照显著提高。

2.3.2 土壤导气性变化

图7反映了不同湿润速度下PAM处理在不同阶段的土壤导气率。

湿润阶段(图7a)施用PAM表层土壤导气率较对照有所降低,且与PAM施用量的增加呈现对数负相关,两个湿润速度下的相关系数均达到0.95以上。湿润速度不同,土壤导气率降低的幅度也不尽相同, $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 湿润速度下PAM施用量由CK_{2.5}增加至P2_{2.5},土壤导气率降低了15.78%,而 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 湿润速度时PAM施用量由CK_{6.25}增加至P2_{6.25},土壤导气率降低了26.68%,较慢速湿润的降低幅度多了10.9%。这是因为PAM能够抑制土壤蒸发,增加土壤含水率^[22],土壤表层孔隙中被更多的水分子填充,从而降低了土壤导气率^[23-24]。

连续流阶段(图7b)施用PAM增加了表层土壤的导气率,土壤导气率与PAM施用量的增加呈对数正相关,相关系数达到0.98以上。连续流阶段施用PAM增加土壤导气性的原因在于,PAM吸附了土壤中的细小颗粒,保证了气流在土壤中运动的通道,进而增加了土壤导气性。PAM在不同阶段对土壤导气性的不同影响也可进一步说明PAM对土壤入渗性的

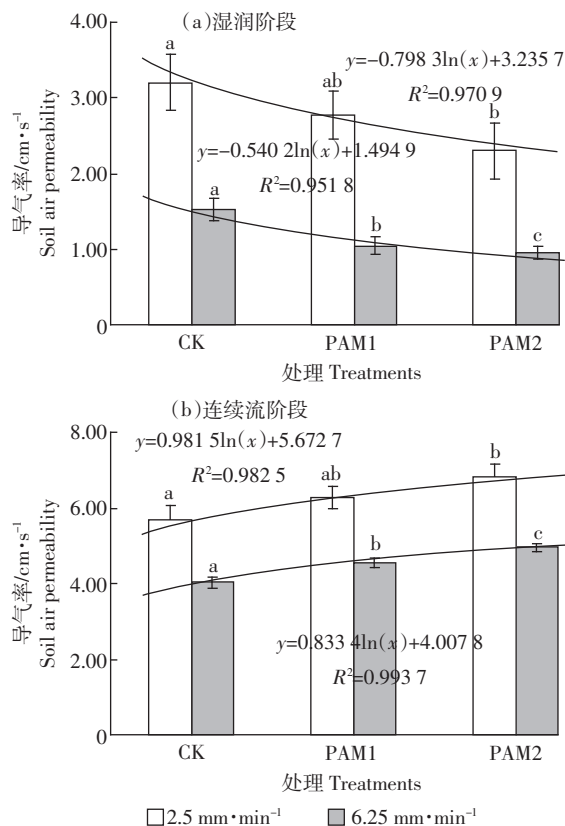


图7 不同阶段土壤导气率

Figure 7 Soil gas conductivity rate at different wetting phases

影响机制。

2.3.3 对土壤团聚体的影响

表 3 $R_{0.25}$ (%) 为不同湿润速度下 >0.25 mm 的团聚体占总团聚体含量的百分比,可以清晰地反映出不同湿润速度间的 $R_{0.25}$ 差异显著。 $R_{0.25}$ 是反映土壤团聚体水稳性的重要指标,高速湿润 ($6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 条件下的 $R_{0.25}$ 显著低于低速湿润条件 ($2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),团聚结构在湿润速度较大时更容易遭到破坏,土壤结构的改变必然引起土壤水流运动,这就从土壤结构的层面说明了为什么湿润速度大的时候土壤入渗能力受到抑制。

表 3 基于不同湿润速度 PAM 各处理 $R_{0.25}$ (%)

Table 3 Effect of PAM application on $R_{0.25}$ values of soil aggregates under different wetting rates

湿润速度 Wetting rate	CK	PAM1	PAM2
$2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	32.88a	59.62a	67.66a
$6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	29.62b	56.72a	65.46a

注:不同小写字母表示不同湿润速度间差异显著 ($P < 0.05$)。

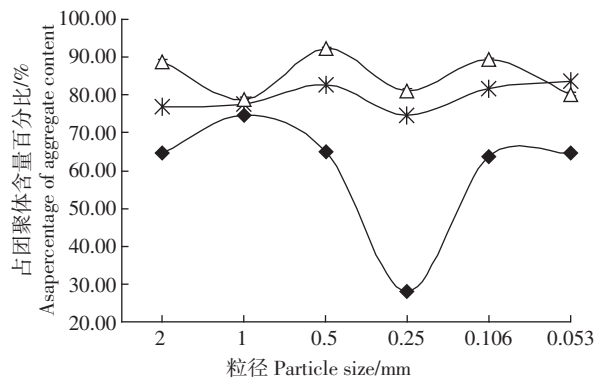
施用 PAM 后的 $R_{0.25}$ 随着湿润速度的增加降低幅度减小,降低幅度依次为 CK (9.92%) > PAM1 (4.86%) > PAM2 (3.25%)。说明在连续流阶段的 PAM 已经全部水解,发挥了稳定土壤结构的作用,增加了土壤团聚体尤其是水稳性团聚体的含量^[3,22,25],进而保证了水流运动的孔隙通道,促进了土壤水流入渗。

图 8 反映施用 PAM 后土壤水稳性团聚体占团聚体总量的百分比。可以清晰地看出施用 PAM 后水稳性团聚体含量明显增加,其中:湿润速度 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时水稳性团聚体百分比在 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径范围内达到峰值,为 92.36%;而当湿润速度提高到 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时水稳性团聚体百分比峰值为 88.17%,同样是在 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径范围出现。

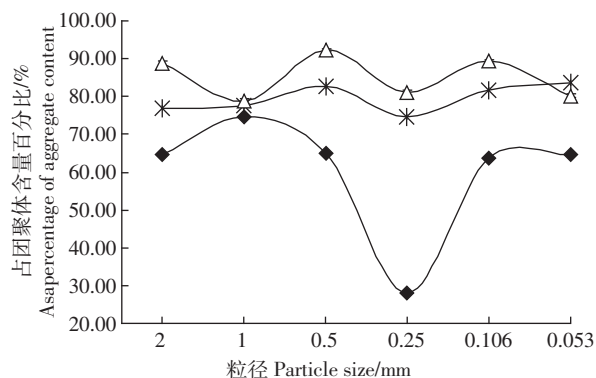
3 结论

(1) 湿润速度显著影响土壤累积入渗量和稳定入渗率,高速湿润条件下的累积入渗量和稳定入渗率整体小于低速湿润条件;湿润速度由 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 升高至 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,累积入渗量减少了 23.57%,稳定入渗率降低 26.70%

(2) 湿润阶段, PAM 处在水解的过程中,逐渐延长的 PAM 分子链堵塞了土壤水流运动的通道。显著降低土壤累积入渗量,且 PAM 施用量越大,降低幅度越大,降幅在 8.58%~20.31% 之间变化; PAM 还降低土壤非毛管孔隙率和导气性,两者降低幅度均随着



(a) 湿润速度 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 水稳性团聚体含量百分比



(b) 湿润速度 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 水稳性团聚体含量百分比

◆ CK * PAM1 △ PAM2

图 8 不同湿润速度水稳性团聚体含量百分比

Figure 8 Percentages of water-stable aggregate content under different wetting rates

PAM 施用量的增加而加大。

(3) 连续流阶段, PAM 已经完全水解,充分发挥了稳定土壤结构的作用。显著提高土壤稳定入渗率,提高幅度最低也达到了 8.71%,且施用量越多,提高幅度越大。对应着 PAM 还提高了土壤非毛管孔隙率和导气性,两者提高幅度同样随着 PAM 施用量的增加而加大。

(4) 施用 PAM 能够显著提高土壤 $R_{0.25}$ 和水稳性团聚体含量: $R_{0.25}$ 提高幅度在 51.40%~54.75% 之间, PAM 处理的水稳性团聚体占总团聚体的百分比最高达到 92.36%。

参考文献:

- [1] Trout T J, Sojka R E, Lentz R D. Polyacrylamide effect on furrow erosion and in filtration[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(3): 761-765.
- [2] Lentz R D, Stieber T D, Sojka R E. Applying polyacrylamide (PAM) to reduce erosion and increase in filtration under furrow irrigation [C]// Robert son L D, Nolte P, Vodraska B, et al. *Proc Winter Commodity Schools-1995*. University of Idaho Cooperative Extension, Moscow, Idaho, 1995: 79-92.

- [3] 曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 45-49.
CAO Li-hua, ZHAO Shi-wei, LIANG Xiang-feng, et al. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 45-49.
- [4] 夏海江, 苏炜煊, 高岩. 聚丙烯酰胺防治土壤侵蚀的持效性研究[J]. 中国水土保持, 2011(1): 49-50, 67.
XIA Hai-jiang, SU Wei-huan, GAO Yan. Lasting effect of polyacrylamide for prevention and control of soil erosion[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(1): 49-50, 67.
- [5] 于健, 雷廷武, I Shainberg, 等. PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 22-27.
YU Jian, LEI Ting-wu, I Shainberg, et al. Effects of molecular weight and degree of hydrolysis of PAM on infiltration and erosion sandy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 48(1): 21-27.
- [6] 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, 3: 75-77.
ZHANG Zhen-hua, XIE Heng-xing, LIU Ji-long, et al. The experimental study on the influences of PAM on one dimensional vertical infiltration[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006, 3: 75-77.
- [7] 张春强, 冯浩. PAM 和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 109-113, 135.
ZHANG Chun-qiang, FENG Hao. Effects of PAM mixed with urea on soil infiltration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 109-113, 135.
- [8] 刘东, 任树梅, 杨培岭, 等. PAM 对土壤饱和和导水率及降雨入渗的影响[C]//国际农业论坛—2005 北京都市农业工程科技创新与发展国际研讨会论文集, 2005: 193.
LIU Dong, REN Shu-mei, YANG Pei-ling, et al. Influence of PAM to saturated hydraulic conductivity of different soil and infiltration of rain-fall[C]//International Agricultural Forums-2005 Beijing International Symposium on Innovation and Development of Urban Agriculture Engineering Technology Proceedings, 2005: 193.
- [9] 陈渠昌, 雷廷武, 李瑞平. PAM 对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1290-1296.
CHEN Qu-chang, LEI Ting-wu, LI Rui-ping. The impacts of PAM on runoff/infiltration and water erosion from slope lands[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(11): 1290-1296.
- [10] 于健, 雷廷武, I Shainberg, 等. 不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 38-44.
YU Jian, LEI Ting-wu, I Shainberg, et al. Effects of different application methods of polyacrylamide(PAM) on soil infiltration and erosion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 38-44.
- [11] Ramos M C, Nacci S, Pla I. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces[J]. *Catena*, 2003, 53(4): 365-376.
- [12] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437.
- [13] Phipp J R. The theory of infiltration; 5. The influence of the initial moisture content[J]. *Soil Science*, 1957, 84(4): 329-339.
- [14] Hillel D. Crust formation in lassies soils[J]. *International Soil Science*, 1960, 29(5): 330-337.
- [15] 张波, 史正军, 张朝, 等. 深圳城市绿地土壤孔隙状况与水分特征研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(4): 299-304.
ZHANG Bo, SHI Zheng-jun, ZHANG Chao, et al. Study on soil porosity and water characteristics of urban green space in Shenzhen City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(4): 299-304.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 270-271.
LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis of the soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 270-271.
- [17] Springer D S, Loaiciga H A, Cullen S J, et al. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions[J]. *Ground Water*, 1998, 36(4): 558-565.
- [18] Tjalfie G Poulsen, Per Moldrup. Air permeability of compost as related to bulk density and volumetric air content[J]. *Waste Management Research*, 2007, 25(4): 343-351.
- [19] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001(1): 51-53.
CHEN En-feng, GUAN Lian-zhu, WANG Jing-kuan, et al. Compositional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001(1): 51-53.
- [20] 闫晓前, 张勋江. 聚丙烯酰胺的理化特征及在黄土区减流减蚀应用前景[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 182-189.
YAN Xiao-qian, ZHANG Xun-jiang. Physical and chemical properties of polyacrylamide and its application to soil amelioration[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(3): 182-189.
- [21] Levy G J, Levin J, Gal M, et al. Polymers' effects on infiltration and erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations[J]. *Soil Sci Soc Am*, 1992, 56(3): 902-907.
- [22] 冯雪, 潘英华, 张振华, 等. PAM 对土壤蒸发的影响分析及其模拟研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(1): 49-52.
FENG Xue, PAN Ying-hua, ZHANG Zhen-hua, et al. Modeling research of the effect of PAM on soil evaporation[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(1): 49-52.
- [23] 王卫华, 王全九, 李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 120-127.
WANG Wei-hua, WANG Quan-jiu, LI Shu-qin. Character of soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu, loess region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11): 120-127.
- [24] 朱敏, 张振华, 潘英华, 等. 土壤质地及容重和含水率对其导气率影响的实验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 116-121.
ZHU Min, ZHANG Zhen-hua, PAN Ying-hua, et al. Effects of soil texture, bulk density and moisture content on soil air permeability[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 116-121.
- [25] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1365-1373.
WANG Yong, JI Qiang, LIU Shuai, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1365-1373.