

施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入参与蒸发特征的影响

哈丽代姆·居麦¹, 宁松瑞¹, 王全九^{1,2}, 张继红¹

(1.西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048;

2.中科院水利部水土保持研究所, 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: 施加化学改良剂是改良土壤和提高农田水分有效性的重要途径, 深入了解化学改良剂对土壤水分运动过程的影响是合理利用化学方法改良土壤的基础。通过开展室内土柱试验研究表施聚丙烯酰胺(PAM)和羧甲基纤维素钠(CMC)2种化学改良剂, 分析不同施量的化学改良剂(PAM和CMC)对土壤水分入渗和蒸发特征的影响。结果表明: 随着PAM和CMC施加量的增加, 不同化学改良剂均降低了土壤水分入渗过程, 抑制了土面蒸发过程。综合考虑不同化学改良剂的保水、抑蒸性能, 施加CMC的减渗、抑蒸作用高于施用PAM, 且CMC施量为0.08%的效果最佳。同等减渗、抑蒸效果下, CMC的施用量相对PAM的施用量更少。

关键词: 聚丙烯酰胺(PAM); 羧甲基纤维素钠(CMC); 一维垂直入渗; 土面蒸发; 化学改良剂; 土壤改良

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0121-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.018

Comparative Analysis of the Effects of PAM and CMC on Soil Infiltration and Evaporation

JUMAI Halidaimu¹, NING Songrui¹, WANG Quanjiu^{1,2}, ZHANG Jihong¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The application of chemical amendments is an important way to improve soil and water availability of farmland. It is the basis for rational use of chemical methods to improve soil by understanding the effects of chemical amendments on soil water movement processes. In this study, the effects of different chemical amendments on soil infiltration and evaporation characteristics were studied by applying different rates of polyacrylamide (PAM) and sodium carboxymethyl cellulose (CMC). The results showed that with the increasing rates of chemical amendments applied, both amendments hindered soil water infiltration and inhibited soil surface evaporation. Considering the performance of water retention and evaporation inhibition for different amendments, the effect of applying CMC was higher than that of PAM, and the CMC application rate of 0.08% was the best. Under the same effect on water retention and evaporation inhibition, the application rate of CMC was less than that of PAM, and thus CMC had a wider application prospect. This study could provide a theoretical reference for rational use of chemical amendments for soil water retention and evaporation inhibition.

Keywords: polyacrylamide (PAM); sodium carboxymethyl cellulose (CMC); one-dimensional vertical infiltration; soil evaporation; chemical amendment, soil improvement

随着城镇化和工业化进程的不断加快, 中国面临着水资源时空分布不均和水污染等问题^[1]。同时, 农业用水占全国总用水量的比重达到70%^[2], 提高农业水资源利用效率成为减缓水资源短缺的重要内容。

通常采用控制土面蒸发方式提高土壤水分利用效率, 有研究^[3]表明, 施加化学改良剂可改变土壤水分运动过程, 控制土壤蒸发有效提高农业水资源的利用效率。聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)是一种水溶

收稿日期: 2019-07-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41830754, 51679190); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2016A03008)

第一作者: 哈丽代姆·居麦(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: 2300572053@qq.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与溶质迁移研究。E-mail: wquanjiu@163.com

性线型高分子聚合物,有阳离子型、阴离子型和非离子型,其中阴离子型常被用作土壤结构调理剂。其通过分子结构中的基键与土壤颗粒间形成吸附力,从而胶结土壤颗粒,形成团粒结构^[4]。张振华等^[5]研究表明,施用 PAM 可显著增加土壤团聚体数量和稳定性;王全九等^[6]研究表明,施用 PAM 能降低土壤入渗速率,增加土壤保水性能,并能够显著提高土层的持水效率;潘英华等^[7]所进行的土面蒸发试验结果表明,施加 PAM 降低了土壤累积蒸发,减少蒸发速率;谢伯承等^[8]将土样和 PAM 混施并进行饱和的土柱试验获得了与潘英华等^[7]类似的结果;于健等^[9]采用不同分子量的 PAM 溶液喷洒在土样表面进行模拟降雨试验发现,施加 PAM 能减少土壤侵蚀发生;Sojka 等^[10]通过综合分析有关 PAM 研究成果,认为不同施量的 PAM 能起到减少地表径流的作用。此外, PAM 的施加方式对土壤的湿润锋运移、入渗速率等水分运动特性有所影响^[11]。

羧甲基纤维素钠(carboxymethylcellulose sodium, CMC)作为一种纤维素衍生物,由于亲水基团羧甲基的存在使得 CMC 非常容易与水结合,在氢键与范德华力的作用下高分子聚合物相互交错形成网状结构,从而可与大量的水结合形成水凝胶^[12]。CMC 来源丰富,易被土壤中微生物所降解,且无毒,因此可以将其作为土壤改良剂^[13-14]。一些学者对 CMC 的土壤改良效应进行了研究,邱朝霞等^[15]发现施加 CMC 可以提高土壤非毛管孔隙度;杨雪芹等^[16]研究结果显示施加 CMC 可显著增加土壤对磷素的吸附;曾晓舵等^[17]将 CMC 作为土壤改良剂进行盆栽水稻试验,结果表明,施用 CMC 对酸性土壤有显著的改良作用,可提高土壤 pH 和有效磷养分含量;吴军虎等^[12]、陈明^[18]研究表明,施加 CMC 可以显著减小土壤入渗能力,随 CMC 含量的增大,累积入渗量、入渗率和稳定入渗率均显著减小。

土壤水分入渗和蒸发过程是土壤水分运动过程及水文循环的重要组成部分,学者们就施加化学改良剂对土壤水分入渗及蒸发特征开展了大量研究。现有研究大多分别考虑单独施用 PAM 或 CMC 对土壤水分入渗及蒸发过程的影响。尚不清楚将 PAM、CMC 分别施用于同一种土壤,对土壤水分入渗及蒸发过程的影响是否存在差异,究竟哪种改良剂对土壤水分入渗及蒸发过程的影响更为显著目前仍不明确。为此,本研究在国内外研究成果的基础上,通过在土壤表面按照不同质量比施加 2 种化学改良剂(PAM、CMC),并在室内开展土壤水分入渗及蒸发试验,对比 PAM、CMC 不同施加量对土壤入渗和蒸发过程的影响,试图从内在机理方面分析,从而为旱作农业生

长中选择适宜的化学改良剂种类及其适宜施量提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所使用的土样来自于陕西杨凌下川口村(34°16'N, 108°07'E)农田的表层土样(0—20 cm),土壤容重为 1.35 g/cm³。土样经过风干(土壤初始体积含水率为 0.032 cm³/cm³)、碾压、去除杂物后,过 2 mm 筛进行各种指标的测定。采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)进行机械组成测定,黏粒、粉粒及砂粒体积分数分别为 7.60%, 30.25%, 62.15%,质地为砂壤土(国际制)。

1.2 试验内容

(1)土壤水分入渗试验。试验于 2018 年 7 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室进行,采用一维积水垂直入渗系统开展入渗试验。主要试验装置包括土柱、马氏瓶和铁架台。土柱采用 5 mm 厚的有机玻璃材料制成,半径为 10 cm,高度为 35 cm(土柱填装高度为 28 cm),土柱外侧贴有 2 条刻度纸,便于湿润锋读数。将土样按容重 1.35 g/cm³分层(每层 5 cm 高,顶层 3 cm 高)装入土柱中,并在层与层之间打毛。装土完毕后,在土体顶部放置滤纸,防止入渗时对土面的冲溅。供水设备为马氏瓶(半径为 8 cm,高 50 cm),用于提供稳定水头。

本次试验分别施用 PAM(阴离子型、2 000 万相对分子量)和 CMC 2 种化学改良剂,其中设 4 个 PAM 施用量梯度,即 PAM 施量与土柱表层 0—3 cm 供试土样按质量比 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% 进行充分混合;此外,设 4 个 CMC 施用量梯度,即 CMC 施量与土柱表层 0—3 cm 供试土样按质量比 0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.08% 进行充分混合;另设 1 个对照(CK),即不添加任何改良剂。本次试验共计 9 个处理,由于此试验为机理性试验,土柱填装前的土壤已均匀过 2 mm 筛,填装时的土壤容重保持均一(1.35 g/cm³)且土壤结构较一致,因此每个处理重复 2 次,共计 18 个试验土柱。

试验过程中马氏瓶水头控制高度为 1~2 cm,按照先密后疏的观测原则分别记录各处理的入渗时间、湿润锋进程和马氏瓶水位的变化。由于入渗试验完成后进行土面蒸发试验,因此每个土柱的入渗量均控制为固定值(马氏瓶水位下降 15.80 cm),入渗量达到固定值时立即停止供水,并迅速吸干上层积水,入渗结束后将土柱的顶部用塑料薄膜封闭起来以避免土面蒸发。

(2)土面蒸发试验。土壤水分入渗试验结束 48 h 后即开展土面蒸发试验。将同一时间入渗结束的土柱 5

个为一组放在对应支撑垫座上面,所有土柱都在同一高度,并用同样高度(土柱顶部与灯泡距离为 50 cm)275 W 的灯泡作为蒸发试验的热源。为了确定热源的水面蒸发能力,增加 2 个直径为 20 cm 的蒸发皿与土柱同高(与灯泡距离为 50 cm),蒸发皿每天早上 8:00 用精度为 1 g 的电子秤称重并及时补充水量。

土面蒸发试验一共持续 14 天。土面蒸发试验进行时,室内的平均温度约为 27 ℃,平均相对湿度 65%。每天早上 8:00 用精度为 1 g 的电子秤来称量土壤水分损失量后开灯,晚上 20:00 关掉灯光。各处理的日蒸发量计算公式为:

$$E_{\pm}=\frac{M_{\text{差}}\times 10}{\pi r^2}\tag{1}$$

式中: $E_{\pm}$ 为土柱的日蒸发量(mm); $M_{\text{差}}$ 为前后 2 天称量土柱的差值,即土柱的日质量变化值(g); r 为土柱的半径(cm)。

1.3 土壤水分入渗公式

选用 2 种入渗公式对累积入渗量和入渗时间的关系进行拟合,分别为:

(1)Philip 公式

$$I(t)=St^{\frac{1}{2}}\tag{2}$$

式中: $I(t)$ 为累积入渗量(cm); S 为吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$)。

(2)Kostiakov 公式

$$I(t)=Kt^n\tag{3}$$

式中: t 为入渗时间(min); K 和 n 为无量纲的经验常数。

1.4 土壤累积蒸发量公式

分别采用 3 种公式对土面累积蒸发量与蒸发时间之间的关系进行分析,具体公式为:

(1)线性函数型公式

$$E(t)=c+mt\tag{4}$$

式中: $E(t)$ 为累积蒸发量(mm); c 为第 1 天蒸发量(mm); m 为经验系数; t 为蒸发时间(d)。

(2)指数函数型公式

$$E(t)=pe^{qt}\tag{5}$$

式中: $E(t)$ 为累积蒸发量(mm); p 为第 1 天蒸发量(mm); q 为蒸发量衰减程度; t 为蒸发时间(d)。

(3)幂函数型公式

$$E(t)=rt^u\tag{6}$$

式中: $E(t)$ 为累积蒸发量(mm); r 为第 1 天蒸发量(mm); u 为蒸发量衰减程度; t 为蒸发时间(d)。

2 结果与分析

2.1 施加化学改良剂对土壤垂直入渗特性的影响

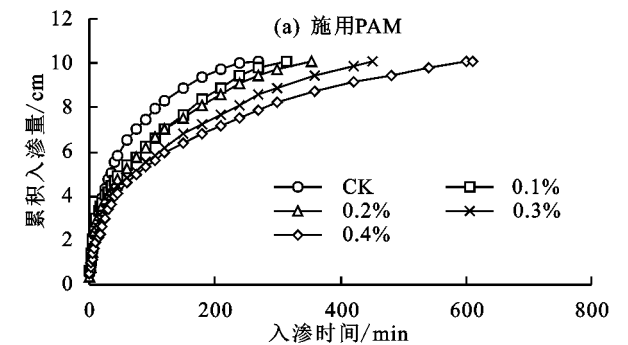
2.1.1 施加化学改良剂对累积入渗量的影响 通常利用土壤累积入渗量描述土壤入渗能力^[19],因此利

用累积入渗量分析化学改良剂的类型和施量对土壤水分入渗特征的影响,图 1 显示了施加化学改良剂的类型和施量对土壤累积入渗量的影响特征。土壤水分入渗试验开始后的前 90 min,随入渗时间的延长,PAM 和 CMC 不同施量的土壤累积入渗量之间的差异不明显。这可能是因为土壤水分入渗试验开始不久,化学改良剂的效果未充分发挥,化学改良剂需要一定的时间与水分子融合,因此入渗试验刚开始累积入渗量差异不大。随着土壤水分入渗时间的推移(入渗试验开始 90 min 后),PAM 和 CMC 不同施加量下的累积入渗量随入渗时间延长其差异逐渐明显。这可能是因为随着入渗时间的增加,施加的化学改良剂与表层土壤发生充分作用,使土壤中分散的大颗粒黏结或者解散成细小颗粒,阻塞土壤孔隙,降低了土壤导水性,致使施加化学改良剂降低土壤入渗能力,且随着化学改良剂施加量的增加,其减渗越明显^[20]。

由图 1 可知,在累积入渗量相同的条件下,不同 PAM 施量的累积入渗量随入渗时间的变化特征不同。CK 的入渗时间最短为 270 min,PAM 施加量为 0.4%的入渗时间最长为 610 min。在相同累积入渗量情况下,PAM 施用量为 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%的土壤水分入渗时间相对于 CK 的入渗时间分别增加了 16.67%,31.48%,66.67%,125.93%。说明施用 PAM 降低了土壤入渗能力,且随着 PAM 施加量的增加,其减渗愈明显;这与王全九等^[6]将 PAM 与土壤混施条件下的一维垂直土壤水分入渗试验的结果类似。这主要由于 PAM 是高分子长链化合物,PAM 的施入影响了土壤水的黏滞性^[21],随 PAM 施量的增加 PAM 黏结土壤水的能力增强,土壤水的黏滞性增加,导致土壤水入渗率降低,入渗时间延长。目前有关 PAM 对土壤入渗过程的影响的研究结论不太一致。部分研究^[9,22]认为施加 PAM 可增加土壤入渗过程,而也有研究^[5,20]认为施用 PAM 降低了土壤入渗过程。有研究^[11,20,23]报道,施用 PAM 降低入渗或增加入渗的效果主要取决于 PAM 的使用方法、分子量、施用量以及土壤类型等。于健等^[22]研究了不同 PAM 施用方法对粉砂壤土入渗过程的影响,发现与对照相比,喷洒 PAM 乳胶(2 g/m²)和 PAM 溶液(2 500 g/m³)的土壤稳定入渗率可分别提高 1.0~2.5,1.7~2.8 倍,施用干粉 PAM(2 g/m²)的土壤稳定入渗率可提高 0.25~1.8 倍。这与本研究中施用 PAM 具有减渗作用的结论不同,可能是因本研究施用 PAM 的方式(与表土混施)、相对分子量(2 000 万)及用量(0.1%~0.4%)等与其不同所致。此外,将 PAM 表施于砂质盐碱土,PAM 施量为 0.04%时的减渗效果明显,施量为 0.08%时的土壤累积入渗量又增加。这与本研究的结论不同,这可能是 PAM 施

量过大以及土壤中存在盐分离子,降低了 PAM 水溶液的黏滞程度,导致土壤累积入渗量有所增加。

随着 CMC 施量的增加,对应处理的入渗时间呈逐渐增加的趋势,0.08%施量下入渗时间达到最大为 1 335 min(图 1)。CMC 施加量为 0.02%,0.04%,0.06%,0.08%下的土壤水分入渗时间比对照(CK)分别延长了 25.93%,83.33%,281.48%,394.44%。这与吴军虎等^[12]在将 CMC 与土样充分混施试验条件



下的观测结果类似。这可能是因为 CMC 在土壤中与水分子相融合形成水凝胶增加了水的黏滞性,阻碍了水分的入渗过程;CMC 施加量越大,其减渗作用越明显^[12]。与 CK 处理的入渗时间相比,施加 CMC(施量为 0.08%)最长的入渗时间是施加 PAM(施量为 0.4%)最长入渗时间的 2.19 倍;此外,CMC 不同施量下平均入渗时间是 PAM 不同施量下平均入渗时间的 1.85 倍,表明施加 CMC 的减渗作用高于施加 PAM。

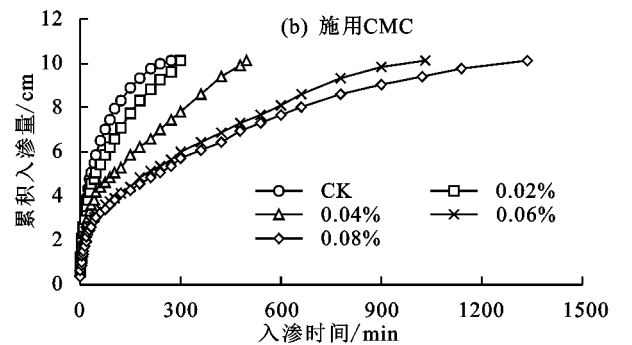


图 1 累积入渗量随入渗时间的变化特征

2.1.2 施加化学改良剂对土壤水分入渗公式参数的影响 国内外学者在土壤水分入渗研究中建立了许多入渗模型,分析土壤水分入渗过程随入渗时间变化特征,但不同入渗模型都具有其适用性^[24]。

为了进一步研究施加 PAM 和 CMC 对土壤水分入渗过程的影响,并评估现有公式在施加改良剂土壤水分入渗特征的适应性,本研究分别采用 Philip 入渗公式和 Kostikov 入渗公式对实测数据进行拟

合分析。

(1)Philip 公式。土壤吸渗率(S)指土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力,是反映土壤入渗能力的一个重要指标,对土壤入渗初期入渗率的大小起主要作用^[25]。采用 Philip 公式将土壤水分入渗实测数据进行拟合,决定系数(R^2)均在 0.97 以上,说明 Philip 公式可以用于描述施加改良剂土壤入渗过程,具体拟合参数和决定系数见表 1。

表 1 2 种入渗公式的参数拟合结果

改良剂	施量/%	Philip 公式		Kostiakov 公式		
		$S/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5})$	R^2	K	n	R^2
PAM	CK	0.9546	0.97	1.1074	0.4106	0.98
	0.1	0.8391	0.98	1.1128	0.3871	0.99
	0.2	0.8074	0.98	1.0413	0.3936	0.99
	0.3	0.7034	0.98	0.9418	0.3922	0.99
	0.4	0.6450	0.97	0.8963	0.3843	0.99
	0.02	0.7391	0.99	0.9146	0.4132	0.98
CMC	0.04	0.5909	0.99	0.8091	0.4015	0.99
	0.06	0.4278	0.99	0.6444	0.3958	0.99
	0.08	0.4060	0.99	0.6297	0.3887	0.99

由表 1 可知,施加 PAM 和 CMC 对土壤吸渗率有较大影响;随着不同化学改良剂施量的增加,土壤吸渗率均呈现逐渐降低的趋势。CK 的吸渗率为 0.954 6 $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$,施加 PAM 的平均吸渗率为 0.748 7 $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$,施加 CMC 的平均吸渗率为 0.540 9 $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$;与 CK 相比,施用 PAM 及 CMC 的平均吸渗率 S 分别下降了 21.56%和 43.33%。说明施加 PAM、CMC 均减少了土壤的吸渗率,而施加 CMC 比施加 PAM 的土壤入渗率减少更加明显。

不同处理土壤水分入渗过程,其决定系数(R^2)都在 0.98 以上,拟合效果较好(表 1),说明 Kostiakov 公式也可以用于分析施加改良剂土壤入渗过程。由表 1 可知,随着不同改良剂施量的增加,Kostiakov 公式中的拟合参数 K 和 n 均逐渐降低。CK 的拟合参数 K 为 1.107 4,施加 PAM 的参数 K 的平均值为 0.998 1;施加 CMC 的参数 K 的平均值为 0.749 5;相比对照处理,施用 PAM 及 CMC 的拟合参数 K 分别下降了 9.87%和 32.32%。此外,CK 的拟合参数 n 为 0.410 6,不同 PAM 施量的拟合参数 n 的平均值为 0.393 6,不同

(2)Kostiakov 公式。利用 Kostiakov 公式拟合

CMC 施量的拟合参数 n 的平均值为 0.399 8; 相比 CK, 施用 PAM 及 CMC 的参数 n 分别降低了 4.14% 和 2.63%。从 Kostiakov 公式中拟合参数 K 和 n 的整体变化程度来看, 施用 CMC 对参数 K 和 n 的影响比施加 PAM 的更为明显。

总体而言, 2 种入渗公式均能较好地对不同改良剂施量的土壤水分入渗过程进行拟合, Philip 公式和 Kostiakov 公式拟合参数的变化趋势均随 PAM 和 CMC 施加量的增加呈现下降趋势。

2.2 施加化学改良剂对土面蒸发特性的影响

2.2.1 施加化学改良剂对日土面蒸发量的影响 土面蒸发是土壤水分散失的主要途径之一, 有效抑制土壤水分的无效蒸发对提高土壤水分的利用效率有重要意义。由图 2 可知, 施加 PAM 和 CMC 土壤日蒸发量都随着时间的推移呈现逐渐降低的趋势; 随着改良剂施加量的增加, 蒸发速率呈逐渐降低的趋势。在土面蒸发试验一开始, CK 的土壤表层含水率在田间

持水率附近, 蒸发能力强(自由水面平均日蒸发量为 6.21 mm), 日蒸发量与大气蒸发能力之比 $E_{\pm}/E_0 > 90\%$, 且一直持续到第 3~5 天; 随着蒸发时间的持续, 表土含水量下降并出现干层, 且干层的厚度随着蒸发日数的延长而逐渐增加, 降低了其以毛管水向上运动为主的土壤蒸发^[26-27], 造成蒸发速率逐渐减慢。

由图 2 可知, 土壤蒸发速率随着 PAM 施加量的增加而减少。以第 3 天的日蒸发量为例, PAM 施加量为 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% 的日蒸发量分别为 3.82, 3.60, 3.47, 3.34 mm, 相对于 CK 的日蒸发量分别减少了 5.45%, 10.89%, 14.12%, 17.33%。蒸发试验 12 天后逐渐接近稳定蒸发状态, 平均日蒸发量为 1.43 mm。说明随着 PAM 施加量的增加, 抑制土壤水分蒸发的能力逐渐增强。土壤中加入 PAM 后, 由于其强吸水性和持水性^[28]使得土壤对水分子的吸着能力加强, 抑制了土壤水分的蒸发速率, 且 PAM 的抑蒸作用随着其施加量的增加而增强。

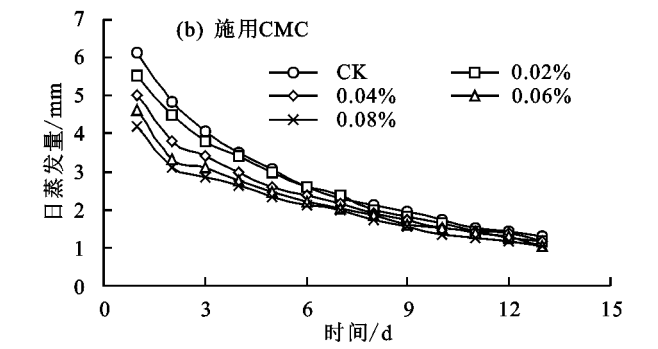
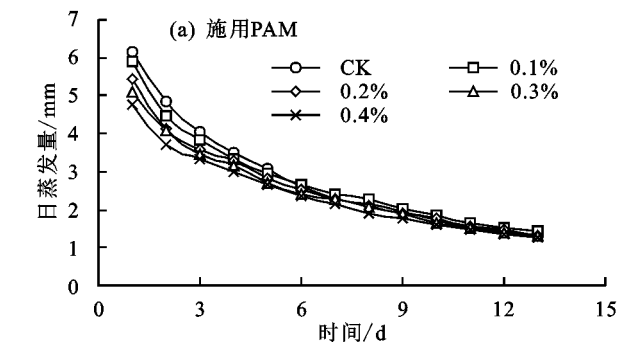


图 2 日土面蒸发量随时间的变化特征

类似地, 施加 CMC 也具有较明显的抑蒸作用。以第 3 天的日蒸发量为例, CMC 施加量为 0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.08% 的日蒸发量分别为 3.79, 3.41, 3.12, 2.96 mm, 相对于 CK 的日蒸发量分别减少了 6.19%, 15.59%, 22.77%, 26.73%。蒸发试验 12 天后开始接近稳定蒸发状态, 平均日蒸发量为 1.28 mm。说明土壤蒸发速率随着 CMC 施加量的增加而减少。这可能是由于 CMC 具有增稠、黏结、成膜、持水等特殊性质^[29], 当 CMC 与土壤水分结合后, 蒸发过程使得 CMC 对水分子起到相互黏结, 这种黏结作用也在水分子和土壤颗粒之间存在, 因此降低水分子运动, 起到抑制蒸发作用, 且 CMC 的抑蒸作用随着其施加量的增加而增强。

蒸发试验期间, 与 CK 的平均日蒸发量 (2.81 mm) 相比, PAM 施量为 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% 下的平均日蒸发量为 2.79, 2.63, 2.54, 2.41 mm, CMC 施量为 0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.08% 下的平均日蒸发量为 2.66, 2.42, 2.25, 2.10 mm。PAM 和 CMC 不同施量下的平均日蒸发量分别为 2.60, 2.36 mm, PAM 不同施量的平均日蒸发量是 CMC 不同施量的

平均日蒸发量的 1.10 倍。这说明施加 CMC 抑制土面蒸发的作用高于施加 PAM。

2.2.2 施加化学改良剂对土面累积蒸发量的影响

(1) 土面累积蒸发量的变化特征。由图 3 可知, 随蒸发时间的推移, 相同改良剂不同施量的累积蒸发量差异较大, 随着改良剂施加量的增加, 累积蒸发量呈现降低的趋势, 这与潘英华等^[7]土壤混施条件下得出来的结论基本一致。不同 PAM 施量的累积蒸发量存在一定差异, 蒸发结束时, CK 的累积蒸发量为 36.57 mm; PAM 施加量为 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% 的累积蒸发量分别为 36.31, 34.24, 33.02, 31.31 mm, 分别占同期大气蒸发能力的 45.00%, 42.44%, 40.93%, 38.82%; CMC 施加量为 0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.08% 的累积蒸发量分别为 34.52, 31.48, 29.19, 27.34 mm, 分别占同期大气蒸发能力的 42.80%, 39.02%, 36.18%, 33.89%。CMC 施加量为 0.08% 的抑制蒸发效果最明显。不同 PAM 和 CMC 施量的平均累积蒸发量分别为 33.72, 30.63 mm, 不同 PAM 施量的平均累积蒸发量是不同 CMC 施量的平均累积蒸发量的 1.10 倍, 表明施加 CMC 对土面水分蒸发的抑制作用高于施加 PAM。

为了定量分析施加化学改良剂条件下的土壤累积蒸发量与蒸发时间变化特征,分别利用线性函数、指数函数和幂函数来拟合累积蒸发量与蒸发时间之间的关系,拟合结果见表 2。由表 2 可知,线性函数、指数函数和幂函数均可较好地拟合累积蒸发量与蒸发时间之间的关系,对应的决定系数分别 ≥ 0.96 ,

$\geq 0.82, \geq 0.99$; 3 种函数中,幂函数的拟合效果最好。此外,随着化学改良剂(PAM 和 CMC)施量的增加,线性函数的拟合参数 c 和 m 呈现降低趋势;指数函数的拟合参数 p 呈现降低趋势,拟合参数 q 呈现增加趋势;幂函数的拟合参数 r 呈现降低趋势,拟合参数 u 呈现增加趋势。

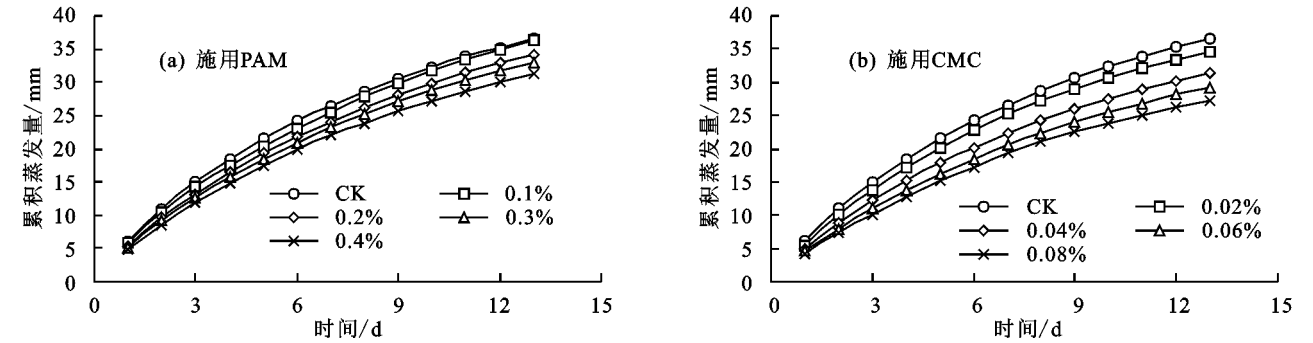


图 3 土面累积蒸发量随时间的变化特征

表 2 拟合累积蒸发量随时间变化的函数及对应的拟合参数值

改良剂	施量/%	$E(t)=c+mt$			$E(t)=pe^{qt}$			$E(t)=rt^u$		
		c	m	R^2	p	q	R^2	r	u	R^2
PAM	CK	2.4337	7.5985	0.96	9.4213	0.1226	0.82	6.7854	0.6838	0.99
	0.1	2.4573	6.7234	0.97	8.8400	0.1267	0.84	6.3668	0.7006	0.99
	0.2	2.3348	6.1771	0.97	8.1878	0.1286	0.84	5.8597	0.7118	0.99
	0.3	2.2614	5.8210	0.97	7.7701	0.1301	0.84	5.5292	0.7211	0.99
	0.4	2.1581	5.3394	0.97	7.2250	0.1319	0.84	5.1196	0.7309	0.99
CMC	0.02	2.3416	6.7908	0.96	8.5670	0.1266	0.82	6.0945	0.7071	0.99
	0.04	2.1436	5.7682	0.97	7.5750	0.1282	0.84	5.4156	0.7109	0.99
	0.06	2.0112	5.0647	0.97	6.8508	0.1305	0.85	4.8931	0.7204	0.99
	0.08	1.8986	4.5920	0.97	6.2868	0.1325	0.84	4.4625	0.7323	0.99

(2)土面蒸发模系数的变化特征。蒸发模系数是土壤蒸发量 and 水面蒸发量二者之比。土壤蒸发模系数随时间变化特征与累积蒸发量随时间变化的特征较为类似(图 4)。采用幂函数 $C=Dt^F$ 对蒸发模系数随时间变化的特征进行分析,式中: C 为蒸发模系数; D 为第 1 天的蒸发模系数; F 为蒸发模经验系数。由表 3 可知,决定系数(R^2)在 0.92 以上,随着化学改

良剂施量的增加,拟合参数 D 呈现降低的趋势,拟合参数 F 呈现逐渐增加的趋势。CK 的拟合参数 D 和 F 为 1.19 和 -0.62 , PAM 各施量的拟合参数 D 和 F 的平均值为 0.98 和 -0.54 ; CMC 各施加量的拟合参数 D 和 F 的平均值为 0.92 和 -0.56 。比较而言,施加 CMC 的 D 和 F 平均值比施加 PAM 的 D 和 F 平均值分别减少了 6.12% 和 3.7%。

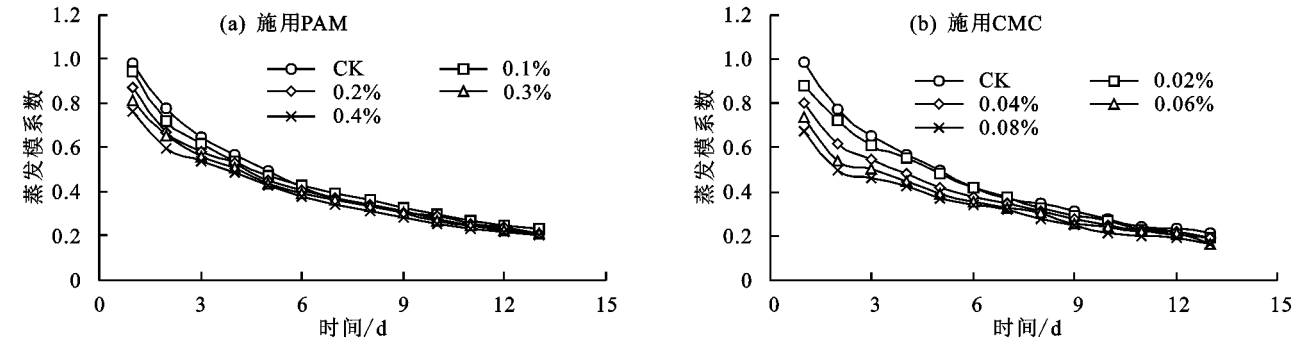


图 4 蒸发模系数随时间的变化特征

2.2.3 减蒸率的变化特征 为了分析不同改良剂对土壤蒸发的影响程度,利用减蒸率来描述施加 PAM、CMC 与对照下的累积蒸发量的差异。由表 4 可知,

随着 PAM 和 CMC 施加量的增加,减蒸率逐渐增加。与 CK 相比,PAM 施加量为 0.4% 的减蒸率最大(14.37%), 0.1% 施量的减蒸率最小(0.72%); CMC 施加量为

0.08%的减蒸率最大(25.24%),0.02%施量的减蒸率最小(5.60%)。与 CK 相比,施加 CMC 的平均减蒸率(16.24%)大于 PAM 的平均减蒸率(7.80%)。施加 CMC 的减蒸效率比施加 PAM 更明显,CMC 施加量为 0.08%的减蒸效率最显著。

表 3 蒸发模系数随时间变化的幂函数($C=Dt^F$)拟合结果

改良剂	施加量/%	D	F	R ²
PAM	CK	1.1887	-0.6210	0.96
	0.1	1.0718	-0.5520	0.97
	0.2	1.0042	-0.5470	0.96
	0.3	0.9552	-0.5380	0.95
	0.4	0.8888	-0.5240	0.95
	0.02	1.1130	-0.6150	0.93
CMC	0.04	0.9363	-0.5570	0.95
	0.06	0.8472	-0.5400	0.93
	0.08	0.7837	-0.5320	0.92

表 4 施加化学改良剂对减蒸率的影响

改良剂种类	改良剂施量/%	减蒸率/%
PAM	0.10	0.72
	0.20	6.38
	0.30	9.71
	0.40	14.37
	0.02	5.60
CMC	0.04	13.92
	0.06	20.19
	0.08	25.24

注:减蒸率(%)=(对照的累积蒸发量-施加改良剂的累积蒸发量)/对照的累积蒸发量×100%。

3 结论

(1)在一维垂直入渗条件下,施加 PAM、CMC 都不同程度上降低了累积入渗量,随着 PAM、CMC 施加量的增加减渗愈明显;施加 CMC 相对 PAM 降低土壤入渗更为显著,其中 CMC 施加量为 0.08%的降低土壤入渗效果最显著。Philip 公式和 Kostikov 公式均可用于分析施加 PAM、CMC 的土壤水分入渗过程,Philip 公式和 Kostikov 公式中拟合参数的变化趋势均随 PAM 和 CMC 施量的增加呈现一致的下降趋势。

(2)施加 PAM、CMC 都不同程度上控制了日蒸发量、累积蒸发量,降低了蒸发模系数,随着改良剂施加量的增加抑制蒸发效果也明显;施加 CMC 相对 PAM 抑制蒸发作用更加显著,尤其 CMC 施加量为 0.08%的减少蒸发作用最显著,减蒸率达到 25.24%。施加 PAM、CMC 的累积蒸发量随时间的变化规律符合幂函数、线性函数关系。

综上所述,表施化学改良剂 PAM 和 CMC 可在一定程度上改善土壤水分运动特征。与施加 PAM 相比,施加 CMC 的减渗和抑蒸作用高于施加 PAM;

同等效果下,CMC 的施用量相对 PAM 的施用量更少,有关施用 CMC 的成本及毒理作用等仍需进一步开展深入研究。

参考文献:

[1] 钱逸颖,董会娟,田旭,等.应对水资源危机的中国水足迹研究综述[J].生态经济,2018,34(7):164-168.

[2] 马颖卓.充分发挥农业节水的战略作用,助力农业绿色发展和乡村振兴:访中国工程院院士康绍忠[J].中国水利,2019,859(1):16-18.

[3] Barvenik F W. Polyacrylamide characteristics related to soil applications [J]. Soil Science, 1994, 158 (4): 235-243.

[4] 陆绍娟,王占礼.土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J].人民黄河,2016,38(7):73-77.

[5] 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.

[6] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.

[7] 潘英华,雷廷武,赵军.PAM 与 PG 对土壤水分蒸发的影响[J].土壤通报,2008,39(5):990-994.

[8] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等.保水剂对土壤持水性状的影响[J].水土保持通报,2003,23(6):44-46.

[9] 于健,雷廷武,Isaac S,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):21-27.

[10] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management [J]. Advances in Agronomy,2007,92:75-162.

[11] 王辉,王全九,姚帮松.PAM 用量及施加方式对积水垂直入渗特征影响[C]//中国农业工程学会.纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会.2009 年学术会(CSAE2009).山西 晋中:山西农业大学,2009.

[12] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.

[13] 张磊,张根林,鲁建江,等.羧甲基纤维素钠-改性膨润土复合凝胶的制备及缓释性能[J].西北农业学报,2012,21(1):161-164.

[14] 张雷波,焦娇,赵雪艳,等.生态友好型抑尘剂的使用及制备及性能[J].农业工程学报,2013,29(18):218-225.

[15] 邱朝霞,张若冰,丘海霞,等.含蒙脱土和多糖的保水剂对土壤物理性质的影响[J].中国土壤肥料,2013(6):11-16.

[16] 杨雪芹,王旭东.结构改良剂对娄土团聚体分布的影响[J].江苏农业科学,2004(1):412-413.

[17] 曾晓舵,梁玉清,林兰稳,等.羧甲基纤维素钠对酸性土壤改良及水稻生长效应[J].广东农业科学,2009(11):69-70.

[18] 陈明.HA、ATP 及 CMC 对坡面水土养分流失及大豆生长性状的影响[D].西安:西安理工大学,2018.

- [6] 肖波,赵允格,许明祥,等.陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J].应用生态学报,2008,19(5):1019-1026.
- [7] Barger N N, Herrick J E, Zee J V, et al. Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion [J]. Biogeochemistry, 2006, 77(2):247-263.
- [8] 李小军,汪君,高永平.荒漠化草原植被斑块分布对地表径流侵蚀及养分流失的影响[J].中国沙漠,2011,31(5):1112-1118.
- [9] 任宗萍,张光辉,王兵,等.双环直径对土壤入渗速率的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):94-97.
- [10] 朱良君,张光辉,任宗萍.4 种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):163-167.
- [11] Fortunato R P, Degrande P E. Simulate rain about action insecticide flonicamid in the control of the cotton aphid [J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2011, 33(4):603-606.
- [12] 孔刚.人工降雨条件下黄土坡面土壤养分流失试验研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [13] 雷廷武,刘汗,潘英华,等.坡地土壤降雨入渗性能的径流—入流—产流测量方法与模型[J].中国科学:地球科学,2005,35(12):1180-1186.
- [14] 石亚芳,赵允格.踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3227-3234.
- [15] Karpf C, Hoeft S, Scheffer C, et al. Groundwater infiltration, surface water inflow and sewerage exfiltration considering hydrodynamic conditions in sewer systems [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2011, 63(9):1841-1848.
- [16] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond [J]. Water Resources Research, 2010, 4(4):1259-1273.
- [17] 肖波,赵允格,邵明安.陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤饱和和导水率的影响[J].农业工程学报,2007,23(12):35-40.
- [18] 韩海燕.陕西省定边县土地开发综合效益评价[J].安徽农业科学,2018,594(17):222-224.
- [19] 杨晓武,李新平.定边县板凳滩移民区土壤发生特性与系统分类研究[J].水土保持通报,2012,32(1):26-32.
- [20] 贾科利,常庆瑞,张俊华.陕北农牧交错带沙漠化土地时空变化特征分析[J].中国沙漠,2009,29(2):223-228.
- [21] 雷廷武,毛丽丽,李鑫,等.土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[J].农业工程学报,2007,23(1):1-5.
- [22] Knight J, Warrick A W. Steady infiltration from line sources into a layered profile [J]. Water Resources Research, 2003, 39(12):1327-1335.
- [23] Communar G, Friedman S P. Unsteady infiltration from point and line Sources in laterally confined domains [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5):1529-1536.
- [24] Zeng C, Wang Q, Fan J. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1):24-30.
- [25] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].应用生态学报,2014,25(3):657-663.
- (上接第 127 页)
- [19] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响的模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [20] 王春霞,王全九,吕廷波,等.添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(1):31-35.
- [21] 张妙,李秧秧,白岗栓.生物炭和 PAM 共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):134-140.
- [22] 于健,雷廷武,Shainberg I, 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.
- [23] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with Polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(5):290-300.
- [24] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [25] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [26] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等.生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):128-134.
- [27] 宋日权,褚贵新,治军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(1):109-114.
- [28] 潘英华,雷廷武,张晴雯,等.土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J].农业工程学报,2003,19(4):37-39.
- [29] 吴淑茗,柯萍萍,黄俊祥,等.羧甲基纤维素钠的研究进展[J].化学工程与装备,2018(10):246-247.