

羟丙甲纤维素对土壤水分入渗特性及水稳性团聚体的影响

吴军虎, 任敏

(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)

摘要: 通过向土壤中施加不同含量的羟丙甲基纤维素(简称 HPMC), 研究了 HPMC 对土壤水分入渗特性及土壤水稳性团聚体的影响。结果表明: (1) 土壤中施加一定量的 HPMC 可以显著降低土壤入渗能力, 在施加量为 0~1.0 g/kg 范围内, 累积入渗量、湿润锋运移距离和入渗率均随施加 HPMC 含量的增加而显著减小; 利用 Philip 方程和 Kostiakov 公式对实测数据进行拟合发现, 两者均能较好模拟施加 HPMC 后土壤的入渗过程, 随 HPMC 施加量的增加, 吸渗率 S 、稳渗率 A 和经验系数 K 明显减小, 经验指数 β 逐渐增大。(2) 随 HPMC 含量的增加, >0.25 mm 的水稳性团聚体百分比明显增大, 供试土壤的分形维数逐渐减小, 其平均重量直径与水稳性团聚体含量间呈显著正相关关系, 表明施加 HPMC 之后, 土壤结构更趋于稳定, 土壤抗破坏和抗侵蚀能力增强。HPMC 加入土壤后具有明显的减渗效果, 一定程度上可以增加水稳性团聚体含量, 改良土壤结构, 并提高土壤的抗侵蚀能力。

关键词: 羟丙甲纤维素; 入渗特性; 团粒结构; 土壤改良

中图分类号: S152.4; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0066-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.011

Effect of Hydroxypropyl Methyl Cellulose on Soil Water Movement and Water Stable Aggregate

WU Junhu, REN Min

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The effect of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) on soil water movement and soil water stability aggregates was studied by applying different content of HPMC into soil. The results showed that: (1) The infiltration capacity of soil was significantly reduced by a certain amount of HPMC in soil, and the cumulative infiltration, wetting front migration distance and infiltration rate decreased significantly with the increase of HPMC in the range of 0~1.0 g/kg. The measured data fitted with the Philip formula and the Kostiakov formula respectively, and two formula could well simulate the infiltration process of the soil after the application of HPMC. With the increase of HPMC content, the infiltration rate S , the stable infiltration rate A and the empirical coefficient K decreased obviously, and the empirical index β gradually increased. (2) With the increase of HPMC content, the percentage of water stable large aggregate of >0.25 mm increased obviously, the fractal dimension of the tested soil decreased gradually, and the average weight diameter of the soil showed a significant positive correlation with the content of water stable. This indicated that after HPMC application, the soil structure was more stable, and its ability of anti-destruction and erosion resistance was enhanced. In conclusion, HPMC has obvious effect on reducing permeability after adding into the soil, and to a certain extent, it can improve soil structure and improve soil erosion resistance.

Keywords: hydroxypropyl methylene cellulose; infiltration characteristics; pellet structure; soil improvement

羟丙甲纤维素(HPMC), 也称羟丙甲基纤维素醚, 是一种非离子型纤维素醚, 有效基团为甲氧基, 其百分比对 HPMC 的水溶解度、凝胶点、表面活性均有较大影响。HPMC 具有热凝胶性质, 其凝胶强度和凝胶温度均受 HPMC 的黏度、浓度和分子量等的

影响, 不同类别的 HPMC 的性质各有差异, 可有效控制水分扩散的速度^[1-3]。HPMC 在冷水中可溶解为透明胶体溶液, 表面活性强, 性质较为稳定^[4-6]。HPMC 现已广泛应用于日常生活和多个领域之中, 用途广泛, 性能优异^[7]。在建筑行业, 由于 HPMC 可

收稿日期: 2018-06-04

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51239009); 西北旱区生态水利工程国家重点实验室科研课题项目(2016ZZKT-9); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS096)

第一作者: 吴军虎(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程与水文水资源研究。E-mail: wujunhu@126.com

以使水泥砂浆稠度、保水率和泵送性增加而常作为保水剂和缓凝剂。另外,HPMC 稳泡剂由于其具有一定的缓凝作用而可以降低泡沫混凝土的失水速率,从而可使新拌泡沫混凝土的泡沫被有效稳定,混凝土保坍性和保水率也可被有效改善^[8]。在塑料产业,HPMC 是 PVC 生产时的主要分散剂之一,其作用方式属于物理分散,利用大分子的吸附、分子链的缠绕及相互阻隔达到分散的效果,可有效提高聚氯乙烯的拉伸和冲击强度,也具有软化、润滑和成形脱模等作用^[9]。HPMC 无毒无害,生物学相容,具有良好的可降解性,由于其溶于水形成的溶液具有一定的黏性,接近于泪液中人体分泌的黏蛋白,因此也运用于滴眼液和眼角膜接触镜护理液的生产当中^[10],另外,由于 HPMC 的含量和黏度可大大影响药物的释放效果,其还可作为制备骨架缓释片的常用材料^[11-12]。HPMC 应用广泛,在纸制品业、纺织业、皮革和果蔬保鲜等方面均有较大用处。

但目前为止,仍然没有 HPMC 在土壤改良方面的研究及应用,因此,本文就 HPMC 对土壤水分运动特性和水稳性团聚体的影响进行初步研究,以期能为田间土壤结构改良和改善水土流失提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土样 试验用土采样时间为 2017 年 9 月,采样地点为中科院武农业生态试验站(35°12'N,107°40'E)空闲农田的耕作表层 0—20 cm 的土壤,用马尔文激光粒度仪对供试土壤做颗粒分析,待测土壤黏粒含量为 6.83%,粉粒含量为 93.08%,砂粒含量为 0.09%。依据国际制土壤质地分类标准,供试土壤属于粉砂质壤土。利用环刀法测容重,测得供试土壤容重为 1.31 g/cm³。将供试土壤碾碎,除去其中的碎石、枯草及根系残留物等杂质,风干而后过 2 mm 筛备用。

1.1.2 HPMC 理化特性 HPMC 是一种半合成的纤维素醚聚合物,可溶于一定浓度的酒精、丙醇、二氯乙烷溶液,性质较为稳定,胶体溶液具有一定黏弹性。HPMC 常温下为固体颗粒或纤维状白色粉末,不相容于强氧化剂,固体易燃。HPMC 的表观密度(也称视密度,指自然条件下单位体积的干质量)通常为 0.5 g/cm³,比重为 1.3,在 180~200 °C 范围内易变色,在 280~300 °C 范围内易炭化,22 °C 条件下浓度为 2% 的水溶液 HPMC 黏度在 5~200 000 MPa/s 范围内,表面张力为 42~56 dyn/cm。HPMC 的甲氧基值和羟丙基值分别为 19%~30% 和 4%~12%。由于 HPMC 黏度不同性质各有差异,为控制变量,本试验用 HPMC 均选用 100 000 MPa/s 黏度。

1.2 试验方法

1.2.1 入渗试验 试验于 2017 年 9 月至 2017 年 11 月在西安理工大学土壤物理实验室进行,为选定适当的 HPMC 添加比例,本试验在正式入渗试验之前,进行了前期的探索预备试验。试验表明,在与未施加 HPMC 的空白组的对照下,当 HPMC 施加量大于 1.0 g/kg 时,供试土壤中水的下渗非常缓慢,而 HPMC 施加量在 0.1 g/kg 以下时,HPMC 对入渗的影响又十分微弱,均不便于试验组之间的观察对比。因此根据 HPMC 的添加比例,本试验分为 0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/kg 6 组。

入渗试验前先将 HPMC 与备用土样按既定比例均匀混合,按每层 5 cm 分层装入高 50 cm,直径 5 cm 的圆柱形有机玻璃土柱,土柱底部平铺一层滤纸,以防装土时土壤颗粒损失造成的装土不匀,累计高度为 40 cm,容重为 1.31 g/cm³,每层装完之后,土表需刮毛。土样装完后在其上表面放一层滤纸,防止供水装置向土柱供水时冲坏土壤表面。试验用高 50 cm,直径 5 cm 的马氏瓶供水,水头高度设为 2 cm,开始入渗后,按设定记录时间分别读出马氏瓶的刻度和湿润锋的运移距离。

1.2.2 水稳性团聚体分析试验 供试土样的水稳性团聚体试验利用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus(湿筛分装置)测定,装置共有 8 个筛罐和 16 个不锈钢水罐。试验前,先取部分入渗结束后的土样,用烘箱烘干处理备用,16 个不锈钢罐编号(1~16)并称其空重后,将等量纯水加入到 1~8 号不锈钢水罐中,再将 2 g/L 的六偏磷酸钠溶液分别加入到 9~16 号不锈钢罐中,为防止试验过程水土混合物溢出,纯水或六偏磷酸钠溶液加到不锈钢罐的 3/4 高度处;依次将 1~8 号不锈钢罐放到湿筛分装置上,再取 4 g 烘干后的土样分别加到各个筛罐中,将筛罐的支架固定到下方轴孔,即湿筛分装置的工作位置;再设置 3 min 档,筛罐上下振荡 3 min 后自动停止,此时将筛罐的支架升高至上方轴孔,静待筛罐中的水不向下滴漏后,取下 1~8 号不锈钢罐;将 9~16 号不锈钢罐依次放到刚才 1~8 号不锈钢罐的位置,持续振荡 8 min 后停止振荡,待筛罐中的水不向下滴漏后,取下 9~16 号不锈钢罐;将 1~16 号盛有土水混合物的不锈钢罐放入烘箱中烘干,再次称出 16 个不锈钢罐的质量,进而便可以分别计算出从各个筛罐漏入不锈钢罐中土粒的质量,即小于筛罐规格对应粒径的土壤质量。试验结束后于 2017 年 12 月份对数据进行了分析。

1.3 基本理论及指标计算

1.3.1 入渗模型 在众多入渗模型中,Philip 方程

和 Kostiakov 公式形式均较简单,参数易于确定,且物理意义较为明确;在生产实际中应用相对比较广泛,因此本文选用 Philip 方程和 Kostiakov 公式对参数进行拟合,并作出一定的分析。

Philip 方程的一阶表达式为:

$$I = St^{0.5} + At \quad (1)$$

式中: I 表示累积入渗量 (cm); S 表示吸渗率 (cm/min^{0.5}); t 为入渗时间 (min)。

Kostiakov 公式的表达式为:

$$I = Kt^{1-\beta} \quad (2)$$

式中: K 为入渗经验系数,表示入渗开始之后,截止到第一个单位时间段结束时的累积入渗量 (cm/min); β 为经验入渗指数。经验系数 K 能较好地反映入渗初始阶段土壤的入渗能力,随着入渗过程的推进,指数 β 成为反映土壤入渗能力的关键参数。

1.3.2 土壤颗粒体积分形维数 分形维数是常见的评价土壤结构的指标之一。根据以下公式可以推出大于某一粒径 d_i 的土壤体积 $V(r>d_i)$:

$$V_{r>d_i} = A \left[1 - \left(\frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \right] \quad (3)$$

式中: d_i 表示某一特征粒径; $V(r>d_i)$ 表示大于某一粒径 d_i 时的土壤体积; A 和 k 是常数; D 则表示分形维数。

当 $d_i=0$ 时易得:

$$A = V_{d>0} \quad (4)$$

当 $d_i=d_{\max}$ 时,可以求出:

$$k = d_{\max} \quad (5)$$

将(2)、(3)两式代入(1)式可得:

$$\frac{V_{d>d_i}}{V_{d>0}} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

易得: $V_{d>d_i}/Cv$ 为土壤颗粒大于粒径 d_i 时的体积含量,因此土壤颗粒小于粒径 d_i 时的体积含量为:

$$\delta_{d<d_i} = 1 - \frac{V_{d>d_i}}{V_{d>0}} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (7)$$

再对两边取对数可得:

$$\ln \delta_{d<d_i} = (3-D) \ln \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right) \quad (8)$$

因此计算出 $\ln \delta_{d<d_i}$ 及 $\ln \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)$,再用回归分析即可拟合出直线的斜率,进而可以求出土壤的分形维数 D 。

1.3.3 团聚体平均重量直径 土壤团聚体平均重量直径(MWD)常用来评价土壤团聚体的数量和质量,能较好地反映土壤团粒结构及其稳定性,其表达式为:

$$MWD = \sum [(d_i + d_{i-1})/2] \times m_i \quad (9)$$

式中: d_i 表示第 i 个筛子的孔径 (mm),其中 $d_0 = d_1$, $d_n = d_{n+1}$; n 表示筛子的数量; m_i 表示粒径介于 d_{i-1}

和 d_i 之间的土壤颗粒百分比。

2 结果与分析

2.1 HPMC 对土壤入渗特征的影响

2.1.1 HPMC 对累积入渗量的影响 累积入渗量是指入渗到单位面积土壤中的水量,由于所用马氏瓶和土柱的横截面积相等,为便于试验观测,一维垂直入渗的累积入渗量用马氏瓶中液面的下降高度来表示^[13]。根据实测数据,将土壤中施加不同量的 HPMC 对土壤累积入渗量的影响绘于图 1。从图 1 可以看出,6 组试验的土壤累积入渗量均随时间的推移呈逐渐增加的趋势,6 条累积入渗量随时间的变化曲线均由陡直渐渐趋于平缓,由此可以表明,HPMC 施加不会改变土壤一维垂直入渗的累积入渗量的变化趋势;入渗的初始阶段,6 组试验的累积入渗量之间的差异不明显;130 min 以后,差异逐渐明晰,同一时刻由上到下,累积入渗量越高土壤中添加的 HPMC 含量越少。这是由于 HPMC 具有良好的热凝胶性质和絮凝作用,遇水迅速溶解形成较为稳定的胶体溶液^[14]。因此在土壤中,当 HPMC 遇到下渗水时呈现出凝胶状态,一定程度上减缓了土壤水的下渗速度,从而降低了土壤的入渗能力。

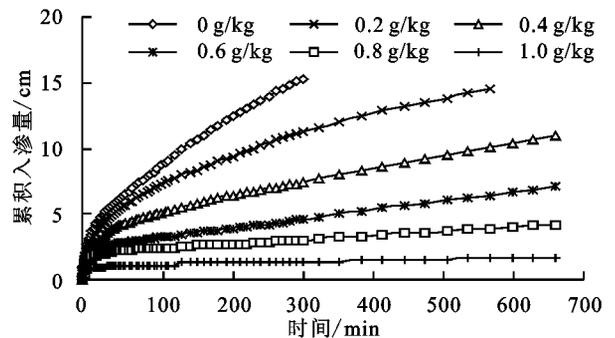


图 1 HPMC 含量对累积入渗量的影响

2.1.2 HPMC 对土壤入渗率的影响 入渗率是常用的衡量土壤入渗速率的指标,指单位时间内入渗到单位面积土壤中的水量^[15]。依据实测数据,将 HPMC 施加量对土壤入渗率影响的试验结果绘于图 2。由图 2 可以看出,入渗初始阶段,6 组处理的入渗率均较快,随时间推移,入渗速率迅速减小,HPMC 对入渗率影响较小;当入渗过程进行至 20 min 时,入渗率逐渐减缓,此时不同处理的入渗率之间产生了较大差距。与空白对照相比,添加 HPMC 的土壤入渗速率显著变小,且随 HPMC 添加量增大,入渗速率随之减小。这主要由于 HPMC 与土壤中下渗的水结合形成水凝胶,减弱水分的入渗能力。进一步分析图 2 可得,HPMC 的施加使得土壤水分入渗过程达到稳定入渗率的速度加快。空白组于 310 min 时入渗结束,入渗率由开始时的 0.902 cm/min 减小为 0.049 cm/min,此时,HPMC 施加量为 0.2, 0.4,

0.6, 0.8, 1.0 g/kg 的各组入渗率分别为 0.036, 0.024, 0.015, 0.010, 0.004 cm/min, 相当于此刻空白组入渗率的 73.47%, 48.97%, 30.61%, 20.41%, 8.16%, 其结果再次表明, HPMC 的施加量越多, 阻碍土壤水入渗的效果越明显。HPMC 溶于水后, 分子上的亲水基团可以与水分子之间形成氢键, 被水分子包围而形成笼状的超分子凝胶网络结构, 常温下性质较为稳定^[16], 而这种凝胶网络结构一定程度上可使土壤大孔隙减少, 小孔隙增加, 减缓土壤的平均孔隙水流速, 因此随着土壤中 HPMC 含量的增加, 土壤水入渗速率降低, 即入渗率逐渐减小。

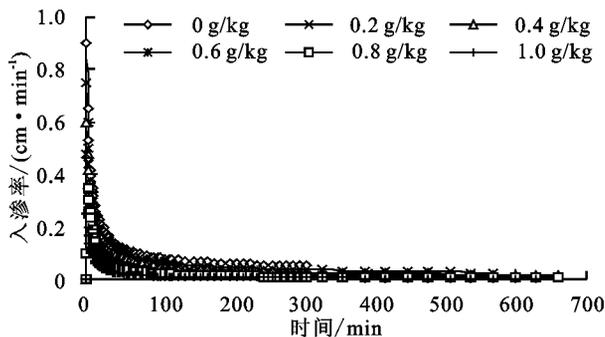


图 2 HPMC 含量对土壤入渗率的影响

2.1.3 HPMC 对入渗模型水分运动参数的影响

为进一步分析研究 HPMC 对土壤水分入渗过程的影响, 利用 Philip 方程和 Kostiakov 公式分别对入渗过程进行拟合, 并将参数列于表 1。由表 1 可以看出, 拟合所得的决定系数 R^2 均大于 0.972, 表明拟合结果均达到显著性水平, 2 种入渗模型均能较好地模拟施加不同 HPMC 量时土壤累积入渗量的变化过程。进一步分析表 1 可以看出, 随 HPMC 施加量的由 0 增加到 1.0 g/kg, 吸渗率 S 由 0.860 减小为 0.158, HPMC 含量与之呈负相关关系, 表明水分在土壤中的入渗能力减弱效果较为显著; 稳渗率 A 随 HPMC 的增加由 0.034 减小至 0.003, 则进一步验证了 HPMC 对土壤的减渗作用; 经验系数 K 随 HPMC 的增加趋于减小, 说明 HPMC 的增加减小了初始阶段的入渗速率; 而经验指数 β 呈增大趋势, 则表明随 HPMC 的增加, 降低了土壤的入渗能力。表 1 中吸渗率 S 、稳渗率 A 、经验系数 K 和经验指数 β 的变化表明, 入渗开始后, 由于均匀施加于土壤中的 HPMC 遇到下渗水快速溶解, 在已被润湿的土壤中, HPMC 与自由水形成的水凝胶结构一定程度堵塞了土壤之间的微小孔隙, 从而增大了土壤上层的水由上往下入渗的难度。

2.1.4 HPMC 对湿润锋运移特性的影响 湿润锋是指土壤被下渗水润湿的最前端与即将被润湿的干土之间形成的明显的干湿土交界面, 是反映土壤入渗的重要特征之一。湿润锋的运移距离是 HPMC 对土

壤入渗影响最直观的体现, 因此将不同含量 HPMC 的湿润锋运移距离绘制于图 3。由图 3 可知, 入渗初始阶段相比于入渗其他时段, 6 条湿润锋运移距离曲线间的重合度处于较高水平; 至入渗中期, 随着各组湿润锋运移距离的显著递增, 6 条曲线之间的差距逐渐拉大, 同一时刻由上到下, 湿润锋运移距离越短, 对应的 HPMC 施加量越高; 空白组于 310 min 时率先完成入渗, 其中, 添加 1 g/kg 的试验组减少幅度最大, 在其入渗结束时 (630 min) 的土壤湿润锋运移距离仅相当于空白组 5 min 时的湿润锋运移距离, 其次按湿润锋运移距离的减少幅度从大到小分别为 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 g/kg。由此可见, HPMC 可以减缓土壤入渗湿润锋的运移, 随 HPMC 的含量增加, 湿润锋运移距离的减缓程度越高。

表 1 不同含量 HPMC 的入渗公式参数拟合

HPMC 含量/ (g · kg ⁻¹)	Philip 方程			Kostiakov 公式		
	吸渗率 S / (cm · min ^{-0.5})	稳渗率 A / (cm · min ⁻¹)	R^2	经验 系数 K	经验 指数 β	R^2
0	0.860	0.016	0.999	0.994	0.531	0.996
0.2	0.782	0.014	0.999	0.950	0.567	0.997
0.4	0.557	0.011	0.996	0.833	0.612	0.991
0.6	0.371	0.008	0.988	0.708	0.666	0.983
0.8	0.318	0.006	0.972	0.673	0.722	0.975
1.0	0.158	0.003	0.974	0.437	0.795	0.996

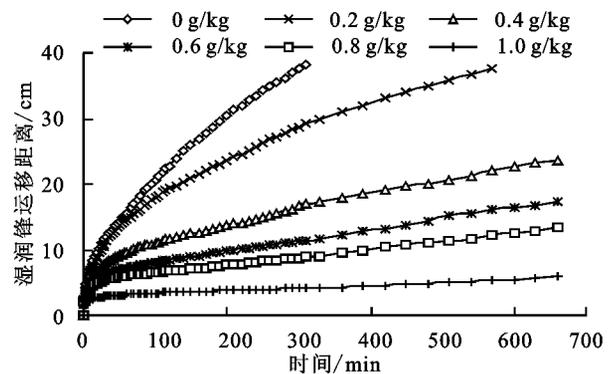


图 3 HPMC 含量对土壤湿润锋运移距离的影响

2.2 HPMC 对水稳性团粒结构的影响

2.2.1 HPMC 对土壤粒径分布的影响 水稳性团聚体是指在水中浸泡或冲洗而不易被分解的 >0.25 mm 的土壤团粒, 一定程度上能够抵抗由土壤水入渗或流动造成的土粒破坏, 是由性质比较稳定的土壤胶体胶结团聚而成的^[17]。由表 2 可知, HPMC 对供试土壤不同粒径范围的土壤颗粒含量有不同的影响, HPMC 的添加使 >0.125 mm 的土壤颗粒含量普遍增加, 其中, 0.25~0.5 mm 粒径范围水稳性团聚体的增加最为显著, 含量由 0.48% 增加到 4.88%。进一步观察表 2 可知, 随 HPMC 含量的增加, 0.125~0.25, 0.5~1, 1~2, ≥ 2 mm 各粒径范围颗粒含量均有不同程度的增加, 与对照组相比分别增加 35.21%, 54.12%, 92%, 89.66%; 另外, ≤ 0.125 mm 粒径范围颗粒含量呈减小趋势, 尤其

在 ≤ 0.045 mm 粒径范围内减少最多,由 13.12%降低为 9.05%。

表 2 HPMC 对各级土壤颗粒百分含量的影响

单位:%

HPMC 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	≥ 2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.125~0.25 mm	0.063~0.125 mm	0.053~0.063 mm	0.045~0.053 mm	≤ 0.045 mm
0	1.38	1.43	4.05	0.48	16.10	43.57	11.76	8.12	13.12
0.2	1.78	2.60	4.12	3.41	17.86	42.86	8.50	8.02	10.86
0.4	2.38	2.38	4.10	3.95	21.38	39.43	8.43	8.52	9.43
0.6	2.44	2.62	4.45	3.97	22.38	36.81	9.24	8.33	9.76
0.8	2.40	2.62	5.00	4.24	21.29	36.05	9.67	8.05	10.69
1.0	2.62	2.74	6.24	4.88	21.76	35.81	9.76	7.14	9.05

2.2.2 HPMC 对水稳性团聚体的影响 水稳性团聚体在土壤中的含量及所占比例影响着土壤的孔隙度、持水能力及抗侵蚀能力,也影响着土壤侵蚀板结等多个物理变化的过程^[18]。将不同含量 HPMC 的土样处理之后,测定每组土样的水稳性团聚体百分比见图 4。从图 4 可以看出,HPMC 对供试土壤水稳性团聚体的形成与增加具有比较明显的积极作用,具体表现为:随 HPMC 施加量的增加, >0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量呈现显著增加的趋势。在 HPMC 施加量为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/kg 的供试土壤中, >0.25 mm 的水稳性团聚体含量分别比未施加 HPMC 的空白组(7.33%)增加 62.34%,74.68%,83.77%,94.48%,124.68%。由此表明,一定量的 HPMC 施加在土壤中可能会改善土壤结构,提高土壤的抗侵蚀能力。

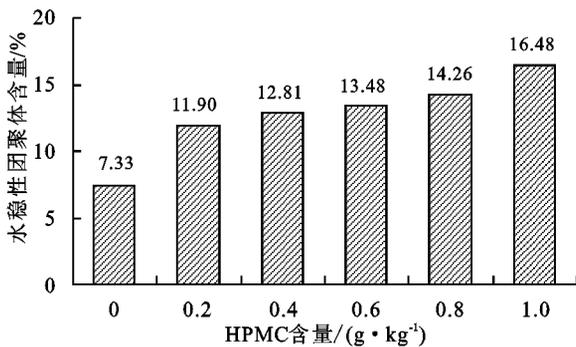


图 4 HPMC 含量对土壤水稳性团聚体含量的影响

2.2.3 HPMC 对土壤分形维数的影响 土壤的分形维数可以反映土壤颗粒大小和质地均匀的程度,土壤分形维数越小,土壤结构越疏松多孔;反之,则土壤的通透性越差,土壤黏度也越大^[19]。土壤中添加 HPMC 后,由于土壤各粒径范围内的颗粒分布会发生变化,因此土壤的分形维数也因此有所改变。由图 5 可知,土壤中施加不同量的 HPMC 之后,土壤的分形维数 D 随 HPMC 的增加而逐渐减小。HPMC 施加量为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/kg 时,土壤分形维数相对对照组(2.7108)分别降低了 2.27%,2.40%,2.88%,3.09%,4.13%。进一步分析可知,在土壤中施加一定量的 HPMC,可以使土壤的分形维数有效降低,从而提高土壤的抗侵蚀能力。

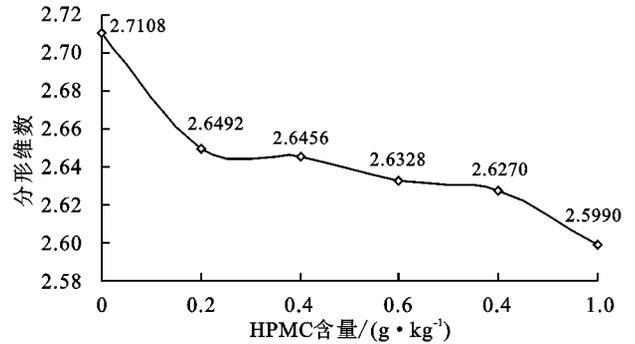


图 5 HPMC 含量对团聚体分形维数的影响

2.2.4 HPMC 对土壤团聚体平均重量直径的影响 平均重量直径(WMD)常被用来反映土壤团聚体的稳定性,平均重量直径越大,表明土壤的水稳性团聚体含量越高,其抗破坏和抗侵蚀的能力也就越强^[20]。图 6 为不同 HPMC 施加量时土壤团聚体的平均重量直径。从图 6 可以看出,HPMC 在土壤中的加入可以明显增加待测土壤团聚体的 WMD,表现为随 HPMC 含量增加,WMD 有明显增加趋势。在施加 HPMC 比例为 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 g/kg 的供试土壤中,WMD 分别比对照(0.25)增加了 0.27,0.49,0.70,0.91,1.14。由此可知,HPMC 加入到土壤中后可以使土壤小颗粒粘聚成粒径更大的颗粒,水稳性团聚体含量增加,土壤结构更趋于稳定,从而进一步提高其抗破坏能力。

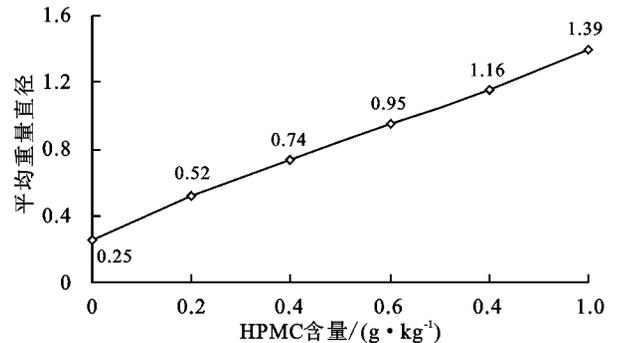


图 6 不同 HPMC 含量的水稳性团聚体平均重量直径

由图 7 可知,WMD 随粒径 >0.25 mm 团聚体含量的增加呈增大趋势,与 <0.053 mm 和 0.053~0.25 mm 粒径范围的土壤质量百分数相关性较差,无明显规律。

为进一步验证其相关性,对不同粒径范围团聚体质量百分数进行相关性分析,结果见表 3。从表 3 可

以看出, MWD 与土壤水稳性团聚体含量之间的正相关关系最为显著, 相关系数 r 为 0.972。对二者关系进行回归分析, 建立回归方程为:

$$y = 0.045x + 0.092$$

式中: y 表示土壤水稳性团聚体的 MWD, 即平均重量直径(mm); x 则表示土壤水稳性团聚体的含量(%)。

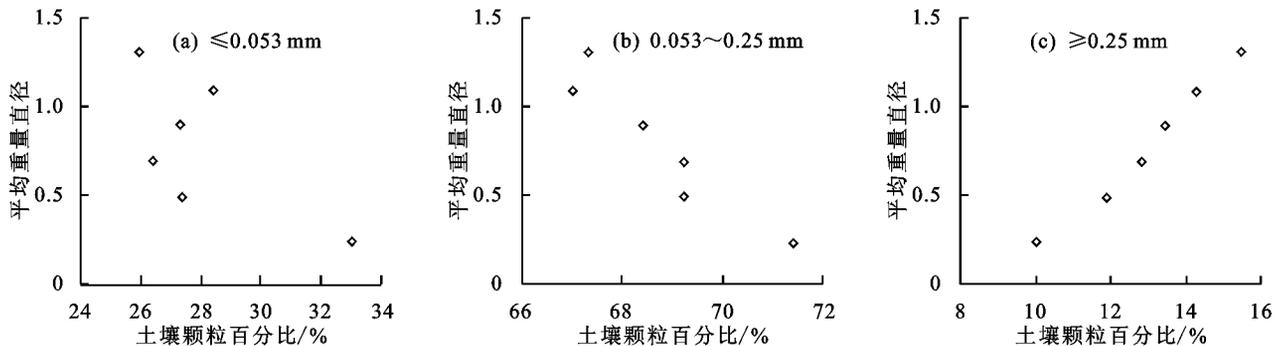


图 7 不同粒径土壤团聚体百分比与平均重量直径的关系

表 3 不同粒径土壤颗粒与平均重量直径的相关性分析

参数	<0.053 mm	0.053~0.25 mm	>0.25 mm	MWD
<0.053 mm	1.000			
0.053~0.25 mm	0.724	1.000		
>0.25 mm	-0.799	-0.897	1.000	
MWD	-0.659	-0.889	0.972**	1.000

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1) 土壤中施加一定量的 HPMC 可以显著降低土壤的入渗能力, 同时减缓土壤中水的运移速度; HPMC 施加量为 0~1.0 g/kg 范围内, 累积入渗量、湿润锋运移距离和入渗率均随 HPMC 的增加而显著减小; 将实测数据分别用 Philip 方程和 Kostiakov 公式 2 个经典入渗模型进行拟合, 可以得出, 吸渗率 S 、稳渗率 A 和经验系数 K 随 HPMC 在土壤中施加量的增加呈明显减小的趋势, 而随 HPMC 的增加, 经验指数 β 逐渐增大, 2 个公式拟合的显著性水平均较高, 均能较好模拟施加 HPMC 的土壤入渗过程。

(2) HPMC 对供试土壤不同粒径范围土壤含量的影响有所不同, HPMC 使 >0.125 mm 范围的土壤颗粒含量普遍增加, 其中, 0.25~0.5 mm 范围内土壤水稳性团聚体的增加最为显著; 在 HPMC 施加量为 0.2~1.0 g/kg 的范围内, 土壤水稳性团聚体百分比随 HPMC 的增加而增大; 供试土壤的分形维数随 HPMC 施加量的增加逐渐减小; 而平均重量直径与 >0.25 mm 粒径的水稳性团聚体含量之间呈显著正相关, 这表明土壤的平均重量直径越大, 土壤结构越稳定, 其抗破坏和抗侵蚀的能力越强。

综上所述, HPMC 加入土壤中后具有明显的减渗效

该回归方程的标准误差为 0.0029, 表明回归极显著, 表明 MWD 与 >0.25 mm 的团聚体含量之间具有更显著的相关性, 也说明土壤中施加的 HPMC 含量越高, 平均重量直径越大, HPMC 的施加一定程度上可以改善土壤结构, 增强土壤抵抗破坏和侵蚀的能力。

果, 且在一定程度上可以改良土壤结构, 提高土壤的抗侵蚀能力。但本试验仅在 HPMC 对土壤水分运动特性及水稳性团聚体的影响上进行的研究, 在 HPMC 对土壤持水性能、溶质迁移及坡面养分流失的影响等方面, 仍有待于在后续的试验中作出进一步的学习和研究。

参考文献:

- [1] 杜聪, 贾晓辉, 沈青. HPMC 水凝胶溶胀性能的影响因素研究[J]. 纤维素科学与技术, 2011, 19(1): 47-51.
- [2] 王文俊, 刘永亮, 王飞俊, 等. 温敏性 PAC/HPMC 水凝胶的制备与性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 826-829.
- [3] Caccavo D, Lamberti G, Barba A A, et al. Effects of HPMC substituent pattern on water up-take, polymer and drug release: An experimental and modelling study[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2017, 528(1/2): 705-713.
- [4] 肖玉良, 段桂运, 李玉琴, 等. HPMC/PNIPAAm 温度敏感性水凝胶的制备及其对 5-氟尿嘧啶的控制释放[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(1): 123-128.
- [5] Wang Q, Li L. Effects of molecular weight on thermoreversible gelation and gel elasticity of methylcellulose in aqueous solution[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(3): 232-238.
- [6] Li L. Thermal gelation of methylcellulose in water: Scaling and thermo reversibility[J]. Macromolecules, 2002, 35(15): 5990-5998.
- [7] 张秋菊. 羟丙基甲基纤维素(HPMC)在 PVC 工业中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2007(5): 22-24.
- [8] 袁伟, 秦岷, 丁来彬, 等. 纤维素醚对泡沫混凝土性能影响研究[J]. 粉煤灰, 2012, 24(5): 34-37.

(下转第 235 页)

- 2015,127:64-71.
- [24] 党廷辉, 戚龙海, 郭胜利, 等. 旱地土壤硝态氮与氮素平衡、氮肥利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3):573-577.
- [25] 杨振兴, 周怀平, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(3):179-182.
- [26] 张艳艳, 唐泽军. PAM 调控土壤养分元素迁移与流失试验研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):33-39.
- [27] 李映廷, 刘双营, 赵秀兰, 等. 秸秆—膨润土—聚丙烯酰胺对砂质土壤吸附氮素的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7):111-116.
- [28] 袁耀, 郭建斌, 尹诗萌, 等. 自制环保型土壤改良剂对一年生黑麦草生长的作用[J]. 草业学报, 2015, 24(10):206-213.
- [29] Paula F S, Tatti E, Abram F, et al. Stabilisation of spent mushroom substrate for application as a plant growth-promoting organic amendment [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 196:476-486.
- [30] 郑亚楠, 赵铭钦, 贺凡, 等. 聚丙烯酸盐类改良剂对土壤理化性状及烤烟根系生长的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(2):39-44.
- [31] 张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12):1770-1778.
- [32] 赵宏魁, 马真, 张春辉, 等. 种植密度和施氮水平对燕麦生物量分配的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(2):249-258.
- (上接第 71 页)
- [9] 邓超月, 胡程耀, 霍冀川. 羟丙基甲基纤维素对碳纤维增强环氧树脂力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2016, 44(3):31-35.
- [10] 齐伟明, 张莉, 王敏珠, 等. 分光光度法测定角膜接触镜护理液中的羟丙甲纤维素[J]. 光谱实验室, 2012, 29(1):206-209.
- [11] 许伯慧, 郭丽慧, 徐洪玲. 氢氯噻嗪 HPMC 骨架片释药机制影响因素研究[J]. 中国现代应用药学, 2010, 27(6):527-531.
- [12] Fan N, He Z, Ma P, et al. Impact of HPMC on inhibiting crystallization and improving permeability of curcumin amorphous solid dispersions [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181(1):543-550.
- [13] 谭帅, 周蓓蓓, 王全九. 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2):263-269.
- [14] Li L, Shan H, Yue C Y, et al. Thermally induced association and dissociation of methylcellulose in aqueous solutions [J]. Langmuir, 2002, 18:7291-7298.
- [15] 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.
- [16] 贾晓辉, 沈青. 羟丙基甲基纤维素的流变性质及热凝胶化行为[J]. 纤维素科学与技术, 2008(3):48-53.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [18] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9):2588-2596.
- [19] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6):877-881.
- [20] Van Bavel C H. Meanweight-diameter of soil aggregates as a statistica lindex of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1949, 14:20-23.
- (上接第 133 页)
- [10] 王文娟, 张树文, 李颖, 等. 基于 GIS 和 USLE 的三江平原土壤侵蚀定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9):112-117.
- [11] 胡云华, 刘斌涛, 宋春风, 等. 基于 USLE 模型的大小凉山地区土壤侵蚀定量研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4):232-236.
- [12] 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. 中国水土保持, 2013(10):35-40.
- [13] 任宗萍. 区域土壤侵蚀动态评价 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] 张鹏宇, 王全九, 周蓓蓓. 陕西省耕地土壤可蚀性因子 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):100-106.
- [15] 邹丛荣. 沂蒙山区沂源县土壤可蚀性因子 (K) 研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [16] 刘文耀. 云南昭通盆地降雨侵蚀性与土壤可蚀性的初步研究[J]. 云南地理环境研究, 1999, 11(2):76-82.
- [17] Don K M, George R F, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32:1571-1576.
- [18] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6):1835-1840.
- [19] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16):4461-4472.
- [20] 吴志杰, 何国金, 黄绍霖, 等. 南方丘陵区植被覆盖度遥感估算的地形效应评估[J]. 遥感学报, 2017, 21(1):159-167.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.
- [22] 钟德燕. 基于 USLE 模型的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.