

凹凸棒土对土壤团粒结构及水力参数的影响

杨 婷, 吴军虎

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘 要: 向粉砂质壤土中均匀添加不同含量(0、10、20、30、40 g·kg⁻¹)凹凸棒土(简称 ATP)进行土壤水分特征曲线试验、土壤颗粒分试验及土壤团聚体试验,研究不同 ATP 施加量对土壤团粒结构及土壤水力参数的影响。结果表明:土壤中的黏粒(<0.002 mm)从 9.28% 减小至 7.06%,粉粒(0.002~0.02 mm)从 50.21% 减小至 26.8%,砂粒(0.02~2 mm)比例从 40.52% 增加至 41.49%;随着 ATP 含量增大,土壤水分特征曲线分形维数从 2.859 增加至 2.876,土壤粒径分形维数从 2.645 减小至 2.628,在 ATP 含量为 30 g·kg⁻¹时两者的分形维数均出现拐点;试验结束自然风干后的土壤大颗粒含量增加,>0.25 mm 的土壤团粒随着 ATP 含量的增加从 0 增加至 2;利用土壤水分特征曲线分形模型对土壤含水率进行模拟后,其模拟计算值与实测值的均方根误差 RMSE 在 10% 以内;利用非饱和土壤水力传导度分形模型对不同含量 ATP 非饱和水力传导度进行预测,其预测值随着 ATP 含量的增加整体呈减小趋势。综合分析可知,加入 ATP 后的土壤持水能力增强,具有改良土壤的作用,且当 ATP 含量为 30 g·kg⁻¹时的改良效果最佳。

关键词: 凹凸棒土;分形维数;土壤团粒结构;水力参数;水稳性团聚体;土壤水分特征曲线

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A

Effect of attapulgite to soil aggregate structure and hydraulic parameters

YANG Ting, WU Jun-hu

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

Abstract: Through adding different amounts (0、10、20、30、40 g·kg⁻¹) of attapulgite (ATP) into the silty loam, carried out the soil moisture characteristic curve test, soil grain size test and soil aggregate structure test, to study the effects of different amounts of ATP to soil aggregate structure and soil hydraulic parameters. The results showed that: The clay particles (<0.002 mm) decreased from 9.28% to 7.06%, silt particle (0.002~0.02 mm) decreased from 50.21% to 26.8%, and the sand particle (0.02~2 mm) increased from 40.52% to 41.49%. With increasing ATP content, the fractal dimension of soil water characteristic curve increased from 2.859 to 2.876, the fractal dimension of soil particle size decreased from 2.645 to 2.628, and when the ATP content was 30 g·kg⁻¹, the two fractal dimensions total appeared the inflection point. When the test over and after the soil natural dry, the big soil particle content was increased. With increasing ATP content, the soil aggregate >0.25 mm was increased from 0 to 2. After using the fractal model of soil moisture characteristic curve to simulate the soil moisture content, the root-mean-square error RMSE between calculated values and measured values was within 10%. Using the unsaturated soil hydraulic conductivity fractal model to predict the unsaturated hydraulic conductivity by different ATP content, its predictive value assumed decrease trend with increasing ATP content. Through comprehensive analysis can be known that: After adding the ATP, the soil water holding capacity was enhanced, has possessed the function to ameliorate the soil, and when the ATP content was 30 g·kg⁻¹, the ameliorated effect will be optimum.

Keywords: attapulgite; fractal dimension; soil aggregate structure; hydraulic parameters; water stable aggregates; soil moisture characteristic curve

收稿日期:2016-07-07 修回日期:2017-10-17

基金项目: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培育基地科研课题(2016ZZKT-9);陕西省教育厅科研计划项目(14JK1518);陕西省优势学科专项资金建设项目

作者简介:杨 婷(1991—),女,硕士,研究方向为农业水土资源与生态环境。E-mail: xiaoyanghoh@163.com。

通信作者: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方面的研究。E-mail: wujunhu@126.com。

凹凸棒土简称凹凸土(attapulgite, ATP), 又被称为坡缕石(palygors—kite), 是一种以含水富镁硅酸盐为主的层链状过渡结构粘土矿, 无毒、无味、无刺激性, 其晶体一般呈现比较直的针状、纤维状, 其内部是排列平行的孔道构造, 丰富的纤维使其具有较多平行的隧道空隙, 因此 ATP 内空隙体积约占总体积的 30%, 拥有巨大的比表面积。天然的 ATP 土质非常细腻, 质地较轻, 吸水性极强, 内表面积大约为 $600 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 外表面积约为 $300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。其广泛的应用以及巨大的潜在应用价值使其在粘土矿物学、物理化学、材料科学、环境工程、土壤科学等受到广泛的重视^[1-5]。

根据 ATP 较强的吸附能力, 好的粘结性以及低密度等特点, 在农业中可以作为农药的造粒剂^[6], 加有 ATP 的农药在土壤中释放缓慢, 药效延长; 经酸处理的 ATP 能有效防止 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、尿素等氮肥中氮的流失, 具有固氮作用, 从而提高肥料利用率。ATP 纤维状的形态及孔道结构使其在改善土壤强度和结块方面有显著作用, 对土壤的物理结构有一定影响; ATP 较大的比表面积及阳离子交换能力使其在土壤中起到保水、改善土壤通气状况、调节土壤酸碱度等作用, 也可以供给植物缺少的微量元素, 促进植株的生长发育^[6-8]。目前对 ATP 的研究, 多出现在制备高分子材料以及水处理中, 将其运用在农业上的研究比较少, 杨红善^[9]等以丙烯酸、丙烯酰胺和 ATP 为原料制备了有机无机复合保水剂, 将其与丙烯酸和丙烯酰胺聚合保水剂作对比, 土壤含水量、pH 值、电导率、团粒结构、土壤容重和土壤孔隙度等的改善效果较纯有机类保水剂明显; 王桂苓^[10]等阐述了施加在土壤中的 ATP 能够增强土壤的保水保肥能力, 且说明了 ATP 在延缓肥料的释放等方面存在很大的潜在应用价值, 是土壤水肥的有效改良剂, 值得深入研究开发; Thabo Falayi 等^[11]将 ATP 施加到含重金属的污水中, 在恒温床中搅动 4 h, 结果污水中的铜、钴、锰等重金属离子含量明显下降。综上所述, ATP 自身的优良特性使其在较多领域都有较好的应用, 且前人的研究发现 ATP 在改良土壤方面有比较大的应用价值和空间。土壤改良措施应用在农业方面是改造中低产田的有效途径, 它可以促进土壤团粒的形成、改良土壤结构、提高肥力、改善土壤保水保肥性、提高粮食产量, ATP 应用于土壤改良是一个比较崭新的领域, 因此, 本文将对 ATP 在土壤团粒结构等基础方面展开研究。

1 材料与方法

1.1 供试土样

试验用土取自中科院长武农业生态试验站, 该试验站位于陕西省长武县西 12 km 的陕甘分界处, 地理坐标为 $107^\circ 41' \text{E}$, $35^\circ 14' \text{N}$, 为典型的黄土高原沟壑地貌, 海拔 1 215 ~ 1 225 m, 日照时数 2 226 h, 年均气温 9.1°C , 1 月份平均气温 -7°C , 7 月份平均气温 22.1°C , 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 多年平均降水量 578.5 mm, 降水年际变异较大, 且降水季节性分布不均, 降水集中在 7—9 月, 占全年降水总量的 55% 以上, 地带性土壤表层为黄绵土, 下层为黑垆土, 质地均匀疏松。本试验所取土壤为表层黄绵土, 其容重为 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 有机质为 $2.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总氮为 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 为 8.3, 根据国际制土壤质地分类标准, 黏粒含量为 8.56%, 粉粒含量为 81.31%, 砂粒含量为 10.13%, 属于粉砂质壤土。试验前将土样过 2 mm 筛后备用。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤水分特征曲线试验 试验采用日本 Kokusan 公司生产的 H-1400pF 土壤水分特征曲线测量系统测定。将 ATP 含量为 0、10、20、30、40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的土样装入高 5 cm, 内径 5 cm 的环刀内, 称其质量并记录。试验前放入蒸馏水中浸泡 48 h 使其饱和, 称其饱和后的质量并记录。将充分饱和后的土样放入离心机中, 设置不同的转速, 每次离心 90 min 后称其环刀内土样的质量, 即可测定不同转速下的土壤含水率。

1.2.2 土壤颗粒分析试验 将测完基础水力参数的不同处理土样经自然风干后研磨过 2 mm 筛。分别取土样 0.5 g 于 100 mL 的烧杯中, 加入 10 mL 浓度为 10% 的双氧水, 在加热板上加热以去除土壤中的有机质, 待其充分反应之后再加入 10 mL 浓度为 10% 的盐酸, 加热煮沸以去除土壤中的碳酸盐, 待其充分反应后在烧杯加满蒸馏水, 静置 12 h 后再用注射器将上清液抽离, 再加入 10 mL 浓度为 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠分散剂, 把土样添加到进样器以后再用超声波分散 10 min, 最后用英国马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定(体积分数)。

1.2.3 土壤水稳性团聚体试验 试验采用由荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus(湿筛分装置)进行测定。将测完基础水力参数晒干并过 2 mm 筛后的不同处理土样装入 8 个筛罐中, 再将这

分解,经过筛罐后集中在筛罐下的水罐中。待筛罐中的液体充分漏出后移走不锈钢罐,重新放上新的装有水并加入 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠溶液的不锈钢罐。将开关开至 continue 处启动马达,筛罐上下运动 8 min 后停止。此时,全部整体被破坏。烘干不锈钢罐后称重,用总质量减去不锈钢罐里的土壤质量即为稳定物质的质量。

1.3 计算方法

1.3.1 土壤粒径分形模型 试验中测得的土壤粒径分数是体积含量,利用 Katz 模型将其转换计算土壤粒径分形模型^[12]:

$$\frac{V_{d>d_i}}{V_{d>0}} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D_1}$$

式中, d_i 为某一粒级的特征粒径, $V_{d>d_i}$ 表示大于粒径 d_i 时的土壤体积; A 、 k 为描述形状和尺度的常数; D_1 为土壤粒径分形维数。

1.3.2 土壤水分特征曲线分形模型 采用 Tyler 和 Wheatcraft 模型与 DeGennes 在两种孔隙表面分形两种模型的基础上推导出的水分特征曲线分形模型^[13]:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_d}\right)^{D_2-3}$$

式中, θ 为体积含水量; θ_s 为饱和含水量; h 为土壤吸力; h_d 为土壤进气吸力; D_2 为土壤水分特征曲线分形维数。

1.3.3 土壤非饱和传导度分形模型 本文采用 Mualem 建立的理论模型,该模型将土壤含水率、土水势及非饱和传导度结合起来推导出土壤非饱和传导度分形模型^[14]:

$$\frac{K}{K_s} = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\frac{5D_3/2-7}{D_3-2}} = \left(\frac{h}{h_d}\right)^{5D_3/2-7}$$

式中, K 、 K_s 分别为非饱和水力传导系数及饱和水力传导系数; θ 为体积含水量; θ_s 为饱和含水量; h 为土壤吸力; h_d 为土壤进气吸力; D_3 为土壤水分特征曲线分形维数。

2 结果与分析

2.1 基于分形维数的 ATP 对土壤团粒结构的影响

2.1.1 ATP 对土壤颗粒分布的影响 将测完基础水力参数的不同 ATP 含量土壤自然风干,过 2 mm 筛后用英国马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定,根据其特征粒径的分级标准划分以下几个级别: <0.001 、 $0.001\sim0.002$ 、 $0.002\sim0.011$ 、 $0.011\sim0.02$ 、 $0.02\sim1.01$ 、 $>1.01\text{ mm}$,测定结果见表 1。从

土壤颗粒含量的分布可以看出在不同粒径范围, ATP 含量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时均出现拐点;当粒级分布在 <0.001 、 $0.001\sim0.002$ 、 $0.002\sim0.011\text{ mm}$ 范围时,土壤颗粒含量在不同级别均随着 ATP 含量的增加呈先减小后增大的趋势;当粒级分布在 $0.011\sim0.02$ 、 $0.02\sim1.01$ 、 $>1.01\text{ mm}$ 范围时,土壤颗粒含量在不同级别均随着 ATP 含量的增加呈先增大后减小的趋势;土壤中的黏粒 ($<0.002\text{ mm}$)、粉粒 ($\geq0.002\sim0.02\text{ mm}$) 比例均在减小,砂粒 ($\geq0.02\sim2\text{ mm}$) 比例增大。ATP 含量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,黏粒含量减小了 0.87%,粉粒含量减小了 2.58%,砂粒含量增加了 3.44%;ATP 含量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,黏粒含量减小了 0.89%,粉粒含量减小了 14.74%,砂粒含量增加了 8.69%;ATP 含量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,黏粒含量减小了 2.22%,粉粒含量减小了 23.41%,砂粒含量增加了 0.97%;ATP 含量为 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,黏粒含量减小了 1.32%,粉粒含量减小了 14.8%,砂粒含量增加了 8.91%,由此可以看出 ATP 施加到土壤中会使土壤中的细小颗粒凝聚变成大颗粒,从而使大粒级土壤颗粒含量增加,小粒级土壤颗粒减小,当 ATP 含量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的大颗粒含量变化值最大,因此,可以说明将 ATP 施加到土壤中可以改变土壤的粒级结构。

表 1 不同 ATP 含量对土壤颗粒分布影响/%

Table 1 Influence of different ATP content to soil particle distribution

粒级 Particle degree /mm	ATP 含量 ATP content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
	0	10	20	30	40
<0.001	3.50	3.27	3.21	2.70	2.97
0.001~0.002	5.78	5.14	5.18	4.36	4.99
0.002~0.011	32.08	29.07	30.29	22.44	30.42
0.011~0.020	18.13	18.56	18.92	19.05	19.01
0.020~1.010	40.52	43.96	42.40	51.39	42.61
>1.01	0	0	0	0.06	0

2.1.2 ATP 对土壤团粒结构的影响 土壤团粒结构直接影响土壤的通气状况,对于土壤的热状况、透水性也有一定影响。图 1 是不同处理土样粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团聚体变化曲线。通常认为粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体对土壤肥力具有重要影响, $>0.25\text{ mm}$ 的团粒含量越高,土壤疏松,土壤容重越小,土壤通气性大,土壤储存与供给作物生长所需水分的能力越好^[15]。从图中可以看出,随着 ATP 含量的增加,水稳性团聚体在 ATP 施加亮为 $0\sim30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 内呈增长趋势,当 ATP 含量大于 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,

水稳性团聚体几乎不再增加。结合 2.1.1 对加入 ATP 的土壤颗粒分级的分析可知,纤维状的 ATP 加入土壤中,破坏了土壤本身的结构,使原本块结的土壤分散,又因 ATP 的胶凝特性,使被打散的细小土壤颗粒重组生成大颗粒土壤,且 ATP 含量越多,其胶凝特性越强,土壤粒径 $> 0.25\text{ mm}$ 的颗粒含量越多,这种特性在 ATP 施加量 $> 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时出现相反现象。

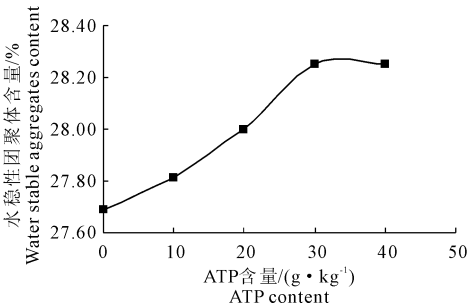


图 1 ATP 含量对土壤水稳性团聚体的影响

Fig.1 Influence of ATP content to soil water stable aggregate

2.1.3 ATP 对土壤水分特征曲线、土壤粒径分形维数的影响 土壤质地与分形维数密切相关,土壤质地越细对应的分形维数越大^[16],图 2 是 ATP 含量对土壤水分特征曲线分形维数、土壤粒径分形维数的影响,从图中可以看出,土壤水分特征曲线分形维数从 2.859 增加至 2.876,与 ATP 施加量呈正相关关系,土壤粒径分形维数从 2.645 减小至 2.628,与 ATP 施加量呈负相关关系,说明当 ATP 含量不超过 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时随着 ATP 含量的增加,土壤含有水分时质地较细,黏粒含量较高,持水性能较高,当土壤中水分蒸发,施加 ATP 的土壤大颗粒含量和砂粒含量增加,土壤通透性增强。

根据 ATP 的性质分析原因,可能是当土壤中充满水的时候,ATP 的吸附性以及保水性使土壤通过水分作为介质将土壤颗粒粘结在一起,待土壤中的水分蒸发结束后,毛发及纤维状的 ATP 穿插在土壤

中,土壤中的大孔隙增加,砂粒含量增加,土壤更加疏松,由此可知 ATP 具有改良土壤的作用。从图中还可以看出加入的 ATP 含量为 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的土壤水分特征曲线分形维数减小,土壤粒径分形维数增大,与整体呈相反趋势发展,因此,可以说明当 ATP 含量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时效果最佳。

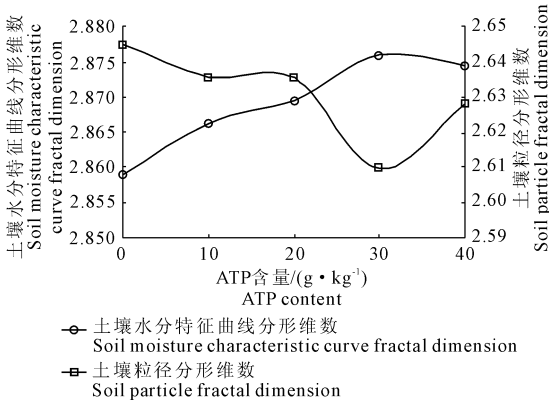


图 2 ATP 含量对土壤水分特征曲线、土壤粒径分形维数的影响

Fig.2 Influence of ATP content to soil moisture characteristic curve and the fractal dimension of soil particle size

2.2 基于分形维数的 ATP 对土壤水力参数的影响

2.2.1 基于分形维数的不同含量 ATP 土壤水分特征曲线模型计算 根据表 1 参数利用土壤水分特征曲线分形模型对土壤水分特征曲线不同吸力对应的土壤含水率进行验证,图 3 是不同含量 ATP 利用土壤水分特征曲线分形模型计算的不同吸力下的土壤含水率,图中将实测土壤水分特征曲线各吸力下的土壤含水率与相应吸力下的土壤含水率计算值相比较,发现两种方式下的含水率与吸力变化趋势相似,各 ATP 含量下不同吸力对应的含水率模拟计算值均大于实测值,利用公式 $RMSE = |1/n \sum (\theta_{\text{实测}} - \theta_{\text{模拟}})|^{1/2}$ 计算其均方根误差,结果表明 ATP 含量在 $0、10、20、30、40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的 RMSE 分别为 0.043、0.049、0.050、0.051、0.045,均在 0.1 以内,因此利用分形维数预测土壤水分特征曲线效果较好。

表 2 土壤基础参数表
Table 2 Soil basal parameters

ATP 含量 ATP content /(g·kg ⁻¹)	分形维数 Dimension D ₂	分形维数 Dimension D ₃	饱和含水率 Saturated moisture content θ _s /(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity K _s (cm·min ⁻¹)	进气值 Intake value H _d
0	2.8590	1.8590	0.4267	0.010	0.0054
10	2.8663	1.8663	0.4353	0.008	0.0056
20	2.8695	1.8695	0.4412	0.007	0.0058
30	2.8759	1.8759	0.4359	0.005	0.0056
40	2.8746	1.8746	0.4357	0.003	0.0057

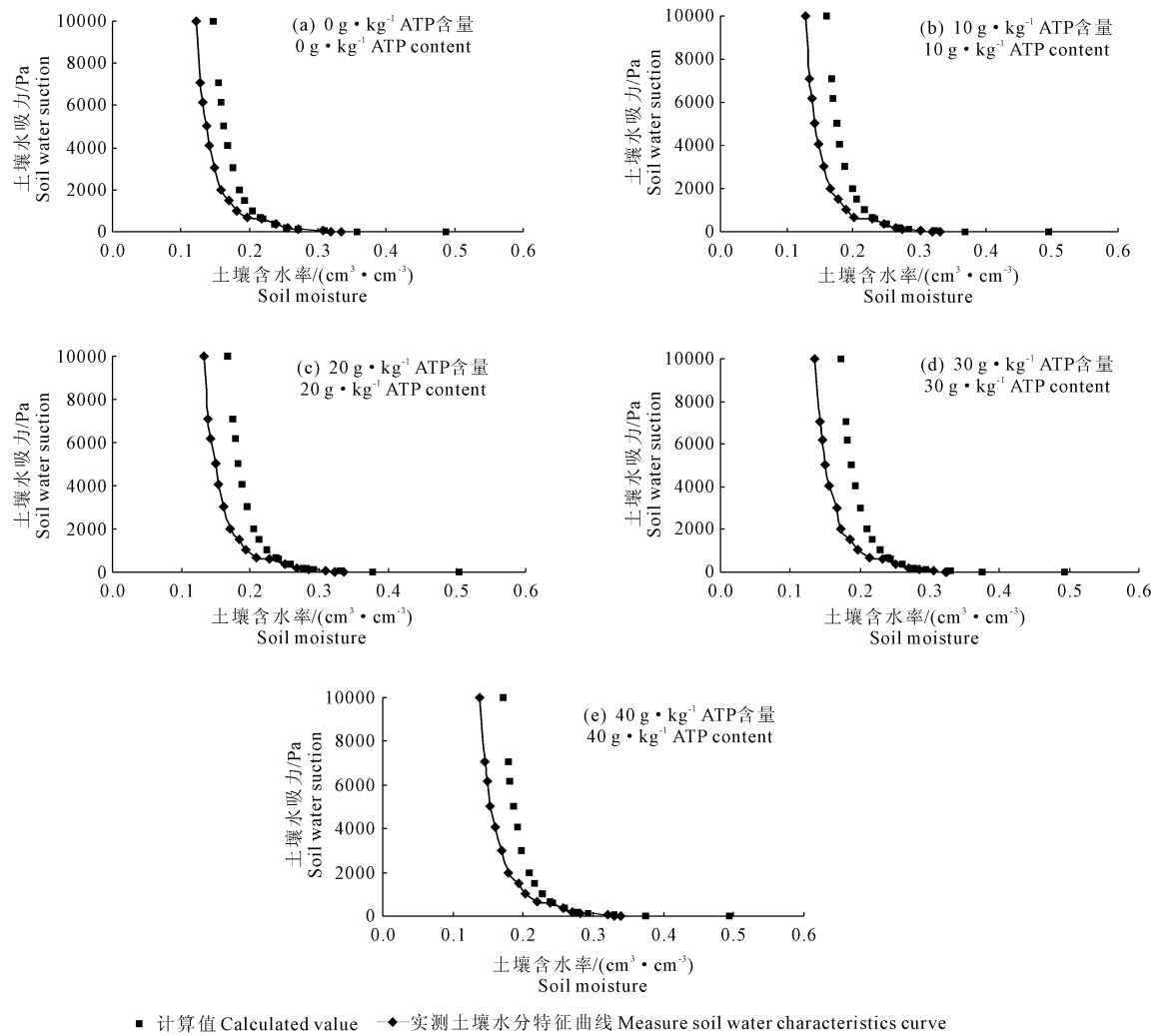


图 3 不同 ATP 含量土壤水分特征曲线实测值与计算值

Fig.3 The measured values and calculated values of the soil moisture characteristic curve with different ATP content

2.2.2.2 不同含量 ATP 对基于分形维数非饱和水力传导度预测值的影响 根据实测的土壤体积含水率,利用非饱和水力传导度分形模型对不同含量 ATP 水力传导度进行预测,结果如图 4。图中可以看出不同含量 ATP 水力传导度的增长趋势不同,ATP 含量为 $10、20、30、40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水力传导度增加量分别是 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 1.90、1.75、2.71、5.04 倍,可以看出未施加 ATP 的土壤水分入渗较快;体积含水率 $< 0.21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时的水力传导度没有明显变化趋势, $> 0.21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 后随 ATP 含量的增加呈增大趋势,且 ATP 含量越小,水力传导度的增长范围越大,同一含水率下的水力传导度随着 ATP 含量的增加而减小。根据 ATP 的特性分析可知当土壤充满水时,ATP 对水的吸附性使 ATP 颗粒粘结,填充土壤中的大孔隙,使土壤中的小孔隙增多,减缓了水流的运动,增加了土壤的持水能力。

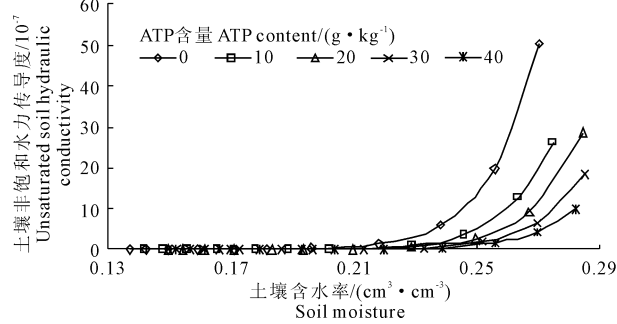


图 4 不同 ATP 含量对土壤非饱和水力传导度预测值的影响
Fig.4 Effects of different ATP content to the predicted values of unsaturated soil hydraulic conductivity

3 结论与讨论

(1) 与对照相比,ATP 的加入使土壤黏粒、粉粒、砂粒比例增大,随着 ATP 含量的增加,黏粒比例从 9.28% 减小至 7.06%,粉粒比例从 50.21% 减小至 26.8%,砂粒比例从 40.52% 增加至 41.49%,黏

粒、粉粒比例与 ATP 含量增加量呈负相关关系,砂粒比例与 ATP 含量呈正相关关系。随着 ATP 含量的增加,>0.25 mm 的团聚体含量增大,土壤水分特征曲线分形维数与 ATP 增加量呈正相关,土壤粒径分形维数与 ATP 增加量呈负相关,两者之间的变化趋势相反。

(2) 利用水分特征曲线分形模型对不同吸力对应的土壤含水率进行模拟,模拟结果与实测相应吸力下的土壤含水率变化趋势相同,两者之间的土壤含水率差值基本在 $0.020 \sim 0.035 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,其均方根误差 RMSE 均在 0.1 以内,模拟效果良好;利用水力传导度分形模型对不同含量 ATP 水力传导度进行计算,未施加 ATP 的土壤水力传导度变化范围最大,> $0.21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 的体积含水率对应的水力传导度与 ATP 含量呈负相关。

(3) 土壤粒径在 ATP 含量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时黏粒、粉粒含量比例最小,砂粒含量比例最大,>0.25 mm 的团聚体在 ATP 含量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时含量比例最大,为 28.25%,土壤水分特征曲线分形维数在 ATP 含量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时最大,为 2.8759,土壤粒径分形维数在 ATP 含量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时最小,为 2.6096,因此,ATP 作为土壤改良剂在施加量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最佳改良效果。

本试验只考虑到土壤团粒结构及水力参数,未涉及到土壤养分方面的研究;根据本试验的结论,ATP 对改良土壤有显著效果,可将 ATP 用于黄土高原等严重水土流失及土壤严重板结的地方。

参 考 文 献:

[1] 马玉恒,方卫民,马小杰.凹凸棒土研究与应用进展[J].材料导

报,2006,20(9):43-46.
[2] 王章凯,熊玉竹,袁 野,等.凹凸棒土与炭黑粉体协同补强天然橡胶的性能[J].中国粉体技术,2015,21(5):40-43.
[3] Serratosa J M. Surface properties of fibrous clay mnerals (palygorskite and sepiolite)[J]. Developments in Sedimentology, 1979,27:99-109.
[4] M Joseyacaman, L Rendon, J Arenas, et al. Maya blue paint:an ancient nanostructured material[J]. Science, 1996,273(5272):223-5.
[5] 曲成东,田 明,冯予星,等.凹凸棒土/聚合物复合材料的研究进展[J].合成橡胶工业,2003,26(1):1-4.
[6] 王以燕,屠豫钦.卫生杀虫剂剂型研究开发的若干问题[J].中华卫生杀虫药械,2004,10(6):341-345.
[7] 赵美芝,邵宗臣,邓友军,等.有机粘土的特性及其对肥料养分的缓释作用[J].矿物学报,2001,21(2):189-195.
[8] 于会娥.凹凸棒土在在肥料中应用的基础研究[D].郑州:郑州大学,2014.
[9] 杨红善,刘瑞凤,张俊平,等.PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):38-41.
[10] 王桂苓,马友华,江 云,等.凹凸棒土在土壤改良和新型肥料开发上的应用[J].磷肥与复肥,2008,23(3):77-78.
[11] Thabo F, Freemman N. Removal of heavy metals and neutralisation of acid mine drainage with un-activated attapulgit[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2014,20(4):1285-1292.
[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] 程冬兵,蔡崇法,彭艳平,等.根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线[J].土壤学报,2009,46(1):30-36.
[14] 周明耀,余长洪,钱晓晴.基于孔隙分形维数的土壤大孔隙流水力特征参数研究[J].水科学进展,2006,17(4):466-470.
[15] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2004,21(6):700-706.
[16] 郑子成,李 卫,李廷轩,等.基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究[J].农业机械学报,2012,43(5):49-54.