

凹凸棒土对土壤水分运动基本参数的影响

吴军虎, 杨婷

(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, 西安 710048)

摘要: 通过向土壤中均匀添加不同含量(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 g/kg)凹凸棒土(ATP)来研究其对土壤水分运动及土壤水动力学参数的影响。结果表明,随着 ATP 含量的增大,土壤入渗速率、累积入渗量减小, Philip 公式中的吸渗率 S 和稳渗率 A 均减小, Kostiakov 公式中入渗系数 K 减小, 经验指数 β 增大; 土壤持水性随着 ATP 含量的增加而增大, van Genuchten 公式中滞留含水率 θ_r 减小, 饱和含水率 θ_s 增大, 进气值的倒数 α 增大, 形状系数 n 减小; 利用 van Genuchten 公式中的相关参数对非饱和土壤导水率、非饱和土壤水扩散率及容水度进行计算, 结果表明随着 ATP 含量的增加, 非饱和土壤导水率、扩散率及容水度都呈减小的趋势, 利用经验公式对非饱和土壤水扩散率进行拟合, 其相关性较高。综合分析可知, 加入 ATP 后的土壤有一定的阻渗作用, 持水能力增强且土壤中的大孔隙减少, 在一定程度上具有改良土壤的作用。

关键词: 凹凸棒土; 入渗; 水动力学参数

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0188-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.032

Influence of Attapulgite on Basic Parameters of Soil Water Movement

WU Junhu, YANG Ting

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

Abstract: In this study, the effects of attapulgite (ATP) on soil water movement and hydrodynamic parameters were investigated by adding different rates, i. e. 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 g/kg, of ATP into the soil uniformly. The results indicated that soil infiltration rate was reduced and cumulative infiltration decreased with increasing ATP content. When the ATP content was increased, residual water content (θ_r) decreased, and saturated water content (θ_s) increased, the reciprocal value of air intake (α) increased, and the form factor (n) decreased. At the same time, soil water holding capacity increased with increasing ATP content. When unsaturated soil hydraulic conductivity, diffusivity and unsaturated soil water retention capacity were calculated according to the relevant parameters of the van Genuchten formula, unsaturated soil hydraulic conductivity, diffusivity and capacity of water all decreased with increasing ATP content. By fitting the unsaturated soil water diffusivity using the empirical formula, relatively high relevance was observed. In summary, adding ATP to the soil has some penetration-retarding effects, it can improve soil water holding capacity and reduce soil macropores, and can improve soil quality to some degree.

Keywords: attapulgite; infiltration; hydrodynamic parameters

凹凸棒土(attapulgite, ATP), 又称坡缕石, 是一种层链状过渡结构的粘土矿, 以含水镁铝硅酸盐为主。理论化学式为 $\text{Si}_8\text{Mg}_5\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。ATP 具有不同寻常的纤维结构、胶体和吸附特点, 在印染、石油、建材、环保、化工、造纸、食品及采矿等领域中有广泛的应用。ATP 形态呈纤维状或毛发状, 其质地比较轻且细腻, 比重约 1.6, 摩氏硬度 2~3 级, PH 值约为 8.5。遇水时黏性和可塑性提高, 可达

到 150% 以上, 不易产生龟裂; 具有较大的比表面积, 因此具有极强的吸附性^[1-7]。

由于 ATP 有较好的阳离子代换性、吸附性、保水性、粘结性、缓释性等特点, 若将其施入土壤中, 可以有效改良土壤的物化性状, 改善土壤的水热条件; ATP 具有特殊的选择性吸附功能作用, 可吸附极性分子, 比如水和氨, 还可吸附土壤中的重金属元素^[8-9], 减轻土壤的污染; 其储量丰富且价格低廉, 本

收稿日期: 2016-07-05

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培育基地科研项目(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

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

身无毒、无味、可再生,是天然纳米材料^[10],因此可作为土壤改良剂。国内外对 ATP 作为土壤改良剂在土壤中的研究应用较少,较多研究出现在工业高分子材料的制备及水处理中对金属离子的吸附。若将其应用于农业土壤环境领域,必然会产生一定影响。胡钟胜等^[11]研究了 ATP、活性炭及骨灰 3 种改良剂对减少烟草吸收土壤重金属的效应,结果表明 3 种改良剂对烟草不同部位重金属(Cd 和 Pb)含量都有不同程度的改善,且 ATP 的改良效果最好;孙楠等^[12]以 ATP 为载体填料通过平行试验对低温(10 ℃)生活污水进行处理,结果表明 ATP—稳定塘工艺对去除寒冷地区生活污水中的有机物及氮磷等污染物效果极佳;Chen 等^[13]将 ATP 和 PBS 通过熔融共混制备成高分子纳米复合材料,该复合材料较单一的 PBS 材料而言杨氏模量更高。目前 ATP 就土壤环境方面研究比较少,本文将从 ATP 对土壤水分运动及水动力学参数的影响展开研究,希望通过改变土壤理化性质,调节其颗粒结构,为改善黄土高原水土流失状况提供理论依据。

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野外试验站的试验农田,利用环刀法测其容重为 1.38 g/cm³,试验前将土样过 2 mm 筛备用。用英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪对其颗粒构成进行测定(体积含量),根据国际制土壤质地分类标准,黏粒含量占 8.56%,粉粒含量占 81.31%,砂粒含量占 10.13%,属于粉砂质壤土。

1.2 试验方法

1.2.1 入渗试验 试验前将 ATP 与备用土样分别按照 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 g/kg 的质量比均匀混合。试验装置选用高 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,以防填装土时土壤颗粒损失。将不同处理的土样以每 5 cm 厚度分层装入土柱内,装土高度为 40 cm。装土完毕后,土层表面放一层滤纸,使土壤表面可以均匀入渗且防止供水装置供水时冲刷破坏土壤表层。供水装置选用高 40 cm, 直径 5 cm 的马氏瓶进行供水,水头控制在 1.5~2 cm 内,试验过程中记录马氏瓶读数及土柱湿润锋的运移距离。

1.2.2 土壤水分特征曲线试验 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 g/kg 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。

1.3 试验原理

1.3.1 入渗模型 采用 Philip 公式和 Kostiakov 公式进行模拟。Philip 公式形式简单,参数容易确定,物理意义明确;Kostiakov 公式在实际工作中应用较为广泛,在生产实际中,该公式较为简便且精确。

Philip 公式的表达式为:

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

式中: I 为累积入渗量(cm); S 为吸渗率(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 为经验入渗系数,表示开始入渗后的第一个单位时段末的累积入渗量(cm/min); β 为经验入渗指数。系数 K 在土壤入渗的起始阶段对土壤入渗能力起主导作用,随着入渗过程的进行,指数 β 是影响入渗能力的关键因素。

1.3.2 土壤水力参数模型 土壤水力参数采用 van Genuchten 模型^[14],其表达式为:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s Se^l (1 - (1 - Se^{1/m})^m)^2 \quad (4)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, m = 1 - \frac{1}{n}$$

式中: θ 为土壤含水率(cm³/cm³); θ_r 为滞留土壤含水率(cm³/cm³); θ_s 为饱和含水率,(cm³/cm³); h 为土壤吸力(cm); α 是进气值的倒数; n 是形状系数; Se 为有效含水率(cm³/cm³); l 为经验拟合参数,此处取 0.5^[15]。

1.3.3 容水度和扩散度模型 将公式(3)进行转换得到以函数形式表示的土壤水分特征曲线: $Se = [1 + (\alpha h)^n]^{-m}$, 给此公式求导与公式(4)结合得到扩散度模型(5)式:

$$D(\theta) = \frac{K_s}{\alpha m n (\theta_s - \theta_r)} Se^{1/2-1/m} [(1 - Se^{1/m})^{-m} + (1 - Se^{1/m})^m - 2] \quad (5)$$

式中: θ 为土壤含水率(cm³/cm³); θ_r 为滞留土壤含水率(cm³/cm³); θ_s 为饱和含水率(cm³/cm³); K_s 为土壤饱和导水率; α 是进气值的倒数; n 是形状系数; Se 为有效含水率(cm³/cm³); l 为经验拟合参数,此处取 0.5。

容水度 $C(\theta)$ 可利用土壤水分特征曲线的斜率求得: $C(\theta) = -dh/d\theta$

式中: θ 为土壤含水率(cm³/cm³); h 为土壤吸力(cm)。

2 结果与分析

2.1 ATP 对土壤入渗量及入渗率的影响

由于 ATP 作为土壤改良剂在研究土壤水分运动方面的资料比较少,因此本文进行入渗试验时将 ATP 的含量最大取到 60 g/kg,入渗过程中 ATP 对土壤入渗影响最直观的体现是湿润锋的推进距离,将不同含量 ATP 土壤湿润锋运移距离绘制图 1。从图 1 可以看出,当 ATP 含量 > 40 g/kg 时,土壤湿润锋运移距离变化甚微,因此,可以说明 ATP 的最大施加量为 40 g/kg。

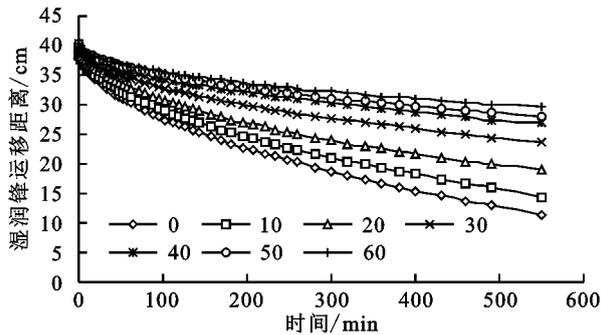


图 1 ATP 含量对土壤湿润锋运移距离的影响

图 2 是不同 ATP 含量土壤累积入渗量曲线。从图 2 可以看出,在相同时间下随着 ATP 含量的增加,土壤累积入渗量呈减小趋势,在入渗时间为 550 min 时,不同处理土壤累积入渗量随着 ATP 含量的增加呈减小趋势,这是由于 ATP 的存在使得土壤中的大孔隙减少,又因为 ATP 自身的吸附性,从而抑制了水分的入渗;且不同处理土壤入渗初期的累积入渗量差距不大,这是由于在土壤入渗初期 ATP 的阻渗效果还没有体现出来,随着 ATP 含量的增加,在 120 min 后累积入渗量逐渐拉开差距。由此可见,ATP 可以减少土壤水分深层渗漏。当 ATP 含量 > 40 g/kg 时累积入渗量的变化甚微,结合不同处理 ATP 含量对土壤湿润锋运移距离的影响,可进一步说明 ATP 的最大施加量为 40 g/kg,因此,在后面的计算分析中,将 ATP 的最大施加量设置为 40 g/kg。

图 3 为不同 ATP 施加量对土壤入渗率的影响。从图 3 可以看出,入渗初期入渗率变化比较大,70 min 后入渗率开始减缓,从 450 min 开始土壤入渗率曲

线皆趋于直线,至 550 min 达到稳渗状态,ATP 含量为 0 g/kg 的入渗率从 0.15 cm/min 减小到 0.01 cm/min,最大 ATP 含量 40 g/kg 的入渗率从 0.1 cm/min 减小到 0.003 cm/min;在相同时间下土壤入渗率随着 ATP 含量的增加而逐渐减小,土壤达到稳渗状态所用的时间越短,说明 ATP 的施加阻碍了水分的流动。进一步分析可以看出,施加在土壤中的 ATP 可以通过减缓水流流动的速度达到保水的效果。

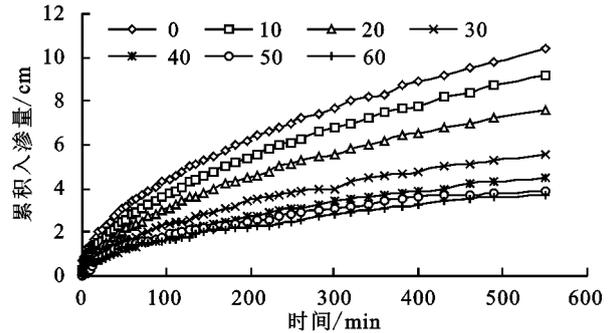


图 2 ATP 含量对土壤累积入渗量曲线的影响

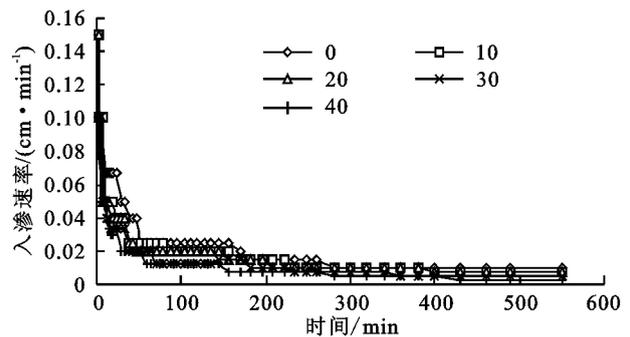


图 3 ATP 含量对土壤入渗率的影响

依据实测数据对 Philip 公式和 Kostiakov 公式进行拟合,拟合结果见表 1。这 2 个公式拟合后的决定系数均达到 0.98,可见其显著性水平比较高,拟合效果比较好。在 Philip 公式中,随着 ATP 含量的增大,吸渗率 S 和稳渗率 A 都呈逐渐减小的趋势,吸渗率 S 反映的是土壤的入渗能力,在入渗初期起到主要作用,可见随着 ATP 含量的增加,毛管力对土壤水分的吸收能力减弱;在 Kostiakov 公式中,随着 ATP 含量的增大,经验指数 K 呈减小趋势,说明土壤第一个单位时段内平均入渗速率减小,经验指数 β 呈增大趋势,说明入渗率随时间减小的程度增大。

表 1 不同 ATP 含量入渗公式参数拟合

ATP 含量/ (g · kg ⁻¹)	Philip 公式			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	0.4432	0.010	0.9994	0.5263	0.4651	0.9952
10	0.1689	0.008	0.9885	0.3032	0.5445	0.9993
20	0.1400	0.007	0.9880	0.2339	0.5572	0.9985
30	0.1041	0.005	0.9894	0.2555	0.4844	0.9959
40	0.0835	0.003	0.9854	0.1281	0.5758	0.9940

2.2 ATP 对土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线是研究土壤水分运动的一项重要内容,从图 4 可以看出,随着 ATP 含量的增加,当土壤水吸力相同时,土壤含水率增大,且在同一含水率下的土壤水吸力也增大。依据毛细管理论,土壤水分特征曲线实际上反映的是土壤空隙状况和含水量之间的关系^[16],所以 ATP 的加入影响了土壤空隙和土壤中的水分状况从而使水分特征曲线产生了变化,依据 ATP 自身的特性分析可知由于其晶体呈棒状,层内贯穿孔道,具有较大的比表面积,大部分的水分子均可直接被吸附进孔道中,持水性较高。综上所述,ATP 可以提高土壤的持水能力。

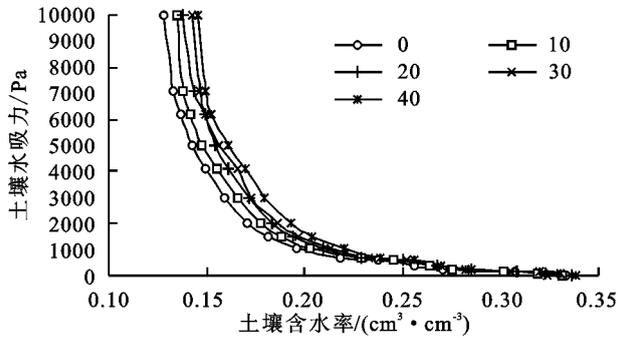


图 4 ATP 含量对土壤水分特征曲线的影响

根据实测数据对 van Genuchten 公式进行数据拟合,结果见表 2。从拟合的结果可以看出,随着 ATP 含量的增加,滞留含水率 θ_r 呈减小趋势,饱和含水率 θ_s 呈增大趋势,说明 ATP 含量增加后土壤可以保留更多的水分;进气值的倒数 α 呈增大趋势,说明水分特征曲线接近饱和时拐点处的负压值减小;形状系数 n 呈减小趋势,说明土壤的吸水能力有所提高。拟合后的残差平方和均 < 0.001 ,其显著性水平较高。

表 2 不同 ATP 含量 van Genuchten 模型参数拟合

ATP 含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	滞留含水率 θ_r / ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	饱和含水率 θ_s / ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	进气值的 倒数 α	形状 系数 n	RSS
0	0.0953	0.312	0.0053	1.492	0.0002
10	0.0945	0.316	0.0053	1.457	0.0002
20	0.0941	0.319	0.0055	1.436	0.0002
30	0.0849	0.324	0.0058	1.388	0.0002
40	0.0715	0.336	0.0089	1.308	0.0004

2.3 ATP 对土壤水动力学参数的影响

2.3.1 ATP 对非饱和水力传导率的影响 土壤非饱和导水率是土壤含水量的函数,可以利用土壤水分特征曲线转换为吸力的函数。土壤非饱和水力传导率可根据实测土壤水分特征曲线进行计算,在土壤吸力相同的情况下不同含量 ATP 对土壤非饱和水力传导率的影响不同。从图 5 可以看出,随着 ATP 含量的增加,土壤非饱和含水率逐渐减小。土壤非饱和含水率与土壤结构有关^[12],土壤密实后,其中的大孔隙数量会随之减少。因此,可以发现土壤中加入的细

小颗粒 ATP 将土壤中的大孔隙填充,使得土壤中的大孔隙减少,小孔隙增加,土壤容重增加,从而使土壤非饱和导水率受到影响。

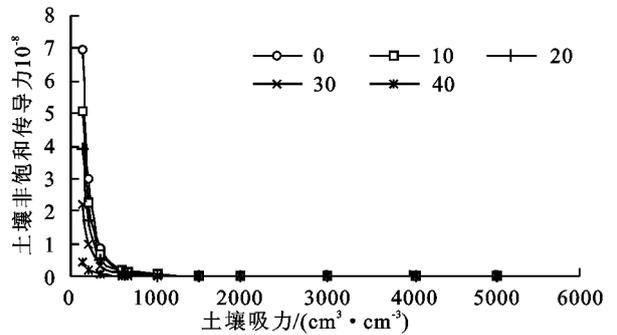


图 5 ATP 含量对土壤非饱和传导率的影响

2.3.2 ATP 对土壤非饱和容水度的影响 根据计算得出的土壤导水率及土壤扩散度即可计算出土壤容水度,土壤容水度是一个与土壤持水性质及对植物有效程度相关的参数,也是分析土壤水分运动的一个重要参数。根据土壤导水率、土壤扩散度以及土壤容水度三者之间的关系计算出土壤容水度值,绘制出不同 ATP 含量非饱和容水度图 6。从图 6 可以看出,不同含量 ATP 在同一吸力情况下的容水度呈下降趋势,说明随着 ATP 含量的增加,土壤的孔隙率减小,土壤容纳水的空间减小。进而可以说明 ATP 的加入使土壤中的大孔隙减少。

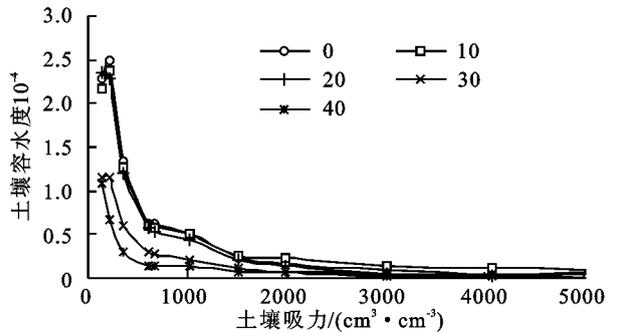


图 6 ATP 含量对土壤非饱和容水度的影响

2.3.3 ATP 对土壤非饱和扩散率的影响 土壤水分扩散率是非饱和导水率和土壤水分特征曲线的函数,根据 van Genuchten 模型拟合的参数值及实测所得的饱和导水率 K_s 值,利用土壤水分扩散率模型进行计算,得出不同含水率对应的水分扩散率,绘制出图 7。从图 7 可以看出,随着 ATP 含量的增加,扩散率随之减小,说明加入的 ATP 有效的阻止了土壤中水分的扩散,且加入的 ATP 含量越高,效果越明显,结合土壤水分特征曲线及 ATP 自身的特性可以看出土壤中施用 ATP 能够增加土壤的持水能力。

将非饱和土壤水扩散率利用其长用经验公式 $D(\theta) = a\theta^b$ 进行数据拟合,拟合结果见表 3。经数据拟合得出土壤的体积含水率和土壤扩散率具有极显著正相关关系,符合其经验公式呈指数曲线变化。

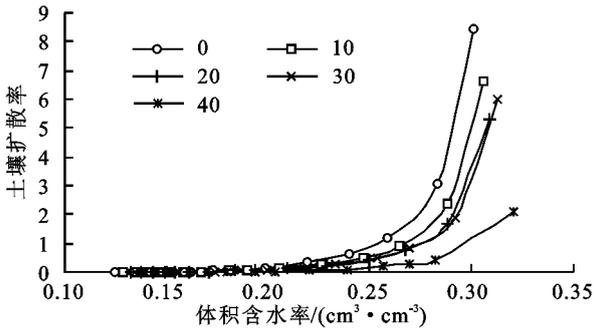


图 7 ATP 含量对土壤非饱和和扩散率的影响

表 3 不同 ATP 含量非饱和和扩散率公式参数拟合

ATP 含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	a	b	相关系数
0	1.50×10^{-5}	44.665	0.929
10	1.20×10^{-5}	43.588	0.967
20	9.50×10^{-6}	43.059	0.977
30	1.60×10^{-5}	40.993	0.986
40	6.90×10^{-6}	39.738	0.983

3 结论

(1) 土壤中加入适量 ATP 具有阻渗效果, 且随着加入的 ATP 含量越高, 阻渗效果越明显; 经过 Philip 公式和 Kostikov 公式拟合可知吸渗率 S 、稳渗率 A 、经验系数 K 均呈增大趋势, 经验指数 β 呈减小趋势, 2 个公式拟合后的显著性水平都比较高。

(2) ATP 的加入使得土壤的持水性增强, 且随着 ATP 含量的增加, 持水性越强; 用 MATLAB 对 van Genuchten 模型拟合后的滞留含水率 θ_r 和饱和含水率 θ_s 均增大。

(3) 利用 van Genuchten 模型拟合后的相关参数对土壤水动力学参数进行计算, 得到的非饱和土壤导水率、扩散率及容水度都随着 ATP 含量的增加而呈减小趋势。

综上所述, 土壤中加入 ATP 在一定程度上可以改良土壤且持水性能增加。

参考文献:

- [1] 黎珊, 戴红旗, 孔泳, 等. 凹凸棒土的应用研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(12): 2934-2939.
- [2] 胡涛, 钱运华, 金叶玲, 等. 凹凸棒土的应用研究[J]. 中

国矿业, 2005, 14(10): 73-76.

- [3] 樊国栋, 沈茂. 凹凸棒黏土的研究及应用进展[J]. 化工进展, 2009, 28(1): 99-105.
- [4] 钱运华, 费泽才. 凹凸棒石粘土填充橡胶研究[J]. 非金属矿, 2000, 23(6): 25-26.
- [5] 薛宏光, 黄滨, 徐文峰, 等. 控失氮肥技术应用及发展总结[J]. 化肥工业, 2013, 40(2): 24-25.
- [6] 刘兴甜, 张桂芳, 赵义平, 等. PVDF/改性凹凸棒土复合膜及其 Ni(II) 吸附性能研究[J]. 功能材料, 2013, 44(24): 3546-3549.
- [7] Falayi T, Ntuli F. Remove of heavy metals and neutralization of acid mine drainage with un-activated attapulgite[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4): 1285-1292.
- [8] Álvarez-Ayuso E, Garcá A. Palygorskite as a feasible amendment to stabilize heavy metal polluted soils[J]. Environmental Pollution, 2003, 125(3): 337-344.
- [9] Fan Q H, Shao D D, Hu J, et al. Comparison of Ni²⁺ sorption to bare and ACT-graft attapulgites; Effect of pH, temperature and foreignions[J]. Surface Science, 2008, 602(3): 778-785.
- [10] 覃崇益, 于金超, 彭志勤, 等. 魔芋葡甘聚糖/凹凸棒土复合膜的制备与表征[J]. 功能材料, 2012, 43(21): 2906-2911.
- [11] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中镉铅影响的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 233-239.
- [12] 孙楠, 田伟伟, 李晨洋. 凹凸棒土—稳定塘工艺提高严寒地区农村生活污水处理效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 209-215.
- [13] Chen C H. Effect of attapulgite on the crystallization behavior and mechanical properties of poly(butylene succinate) nanocomposites[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2008, 69(5/6): 1411-1414.
- [14] 傅淦亮, 费良军, 聂卫波, 等. 波涌灌间歇入渗饱和—非饱和土壤水分运动数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 66-71.
- [15] 吕殿青, 邵明安. 非饱和土壤水力参数的模型及确定方法[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 163-166.
- [16] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] 潘军, 宋乃平, 吴旭东, 等. 荒漠草原不同种植年限人工柠条林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(2): 160-168.
- [18] 曹生奎, 陈克龙, 曹广超, 等. 青海湖流域矮蒿草甸土壤有机碳密度分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 482-490.
- [19] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2013,

(上接第 187 页)

- [20] 潘军, 宋乃平, 吴旭东, 等. 荒漠草原不同种植年限人工柠条林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(2): 160-168.
- [21] 曹生奎, 陈克龙, 曹广超, 等. 青海湖流域矮蒿草甸土壤有机碳密度分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 482-490.
- [22] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2013,

50(4): 818-825.

- [23] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [24] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21.