

纳米碳对黄绵土 Cu(Ⅱ) 迁移影响的研究

刘艳丽¹, 周蓓蓓¹, 王全九^{1,2}, 谭帅¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710000;

2. 西北农林科技大学 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: 重金属污染治理对改善环境污染具有重要意义, 基于室内扰动土柱试验, 以黄绵土为研究对象, 初步研究了在黄绵土中均匀混合及在表层混合不同含量纳米碳材料对土壤中重金属 Cu(Ⅱ) 迁移过程的影响。结果表明: (1) 相同平衡浓度, 随着纳米碳含量的增加, Cu(Ⅱ) 吸附量加大, 采用 Langmuir 方程拟合 Cu(Ⅱ) 等温吸附曲线, 最大吸附量 (S_m) 随着纳米碳含量增加而增大。 (2) 对于均匀混合纳米碳的黄绵土和仅表层混有纳米碳的黄绵土, Philip 方程均能较好地描述 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量变化过程, 湿润锋推进过程遵循幂函数变化。 (3) 随着纳米碳含量增加, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量降低, 纳米碳含量较低时 (0.1%, 0.5%, 1%), 两种纳米碳添加方式对土壤累积入渗量的影响差异不大, 纳米碳含量较高时 (5%), 均匀添加纳米碳土壤的累积入渗量曲线则显著低于表层添加纳米碳的土壤。 (4) 相对于空白对照土壤, 两种施碳方式均提高了土壤表层 Cu(Ⅱ) 含量, 且表层 Cu(Ⅱ) 含量明显高于深层土壤。纳米碳含量为 0.1%, 0.5%, 1% 时, 两种添加纳米碳方式之间表层土壤 Cu(Ⅱ) 含量无明显差异, 当纳米碳含量上升到 5% 时, 均匀添加纳米碳土柱的表层土壤 Cu(Ⅱ) 含量显著高于表层添加纳米碳土柱, 随着土壤剖面加深, 不同处理土壤剖面处 Cu(Ⅱ) 含量无明显差异。因此, 纳米碳对重金属 Cu(Ⅱ) 有很好的吸附作用, 且在土壤表层添加纳米碳是一种经济有效的施碳方式。

关键词: 纳米碳; Cu(Ⅱ); 累积入渗量; 湿润锋; 等温吸附曲线

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0062-05

Effects of Nano-carbon on the Migration of Cu(II) in Loessal Soil

LIU Yanli¹, ZHOU Beibei¹, WANG Quanjiu^{1,2}, TAN Shuai¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Heavy metal pollution management is very important for the environmental improvement. Based on the disturbed one-dimensional soil column experiments, effect of nano-carbon on Cu (Ⅱ) migration process was studied in the lab. The main results showed as follows. (1) At the same equilibrium concentration, with the increase of nano-carbon contents, the Cu(Ⅱ) adsorption quantity increased. The maximum adsorption (S_m) fitted by the Langmuir equation was increased with the increase of nano-carbon contents. (2) Philip Formula could better describe the $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution infiltration process for all the soil columns mixed well with the nano-carbon and nano-carbon applied at the top soil, as well as the wetting front advance curve followed the power function. (3) $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ solution infiltration amount was reduced with the increase of nano-carbon content, while nano-carbon contents were low (0.1%, 0.5%, 1%), little effect on the cumulative infiltration was found between the nano-carbon mixed well with the soil and the nano-carbon applied at the subsurface. But when the nano-carbon content was as high as 5%, the variation was obvious, of which the nano-carbon mixed well with soil was significantly smaller. (4) Compared with the control soil, the nano-

收稿日期: 2015-06-25

修回日期: 2015-08-12

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (51239009); 国家自然科学基金面上项目 (41371239); 陕西省科技支撑项目 (2013KJXX-38); 陕西省水利专项支撑计划 (2012slkj-04; 2013slkj-04)

第一作者: 刘艳丽 (1990—), 女, 陕西西安人, 在读研究生, 主要研究方向: 农业水土资源与生态环境。E-mail: liuyanli0507@163.com

通信作者: 周蓓蓓 (1982—), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 农业水土与生态环境。E-mail: happyangle222@gmail.com

carbon could reduce the soil Cu(Ⅱ) content with these two methods and Cu(Ⅱ) contents in the surface soil were obviously higher than those in the deep soil. While nano-carbon content was low (0.1%, 0.5%, 1%), the difference of surface soil was small and little effect on the Cu(Ⅱ) content was found between the nano-carbon mixed well with the soil and the nano-carbon applied at the subsurface, while nano-carbon content was high (5%), the Cu(Ⅱ) content of surface soil of nano-carbon mixed with soil was significantly higher than that treated with nano-carbon applied at the top soil, but the Cu(Ⅱ) content in deeper soil presented little difference. As a result, nano-carbon has a good adsorption effect to Cu(Ⅱ), furthermore, nano-carbon applied at the top soil is an economic and effective way to absorb more Cu(Ⅱ).

Keywords: nano-carbon; Cu(Ⅱ); the cumulative infiltration; the wetting front; isothermal adsorption curve

土壤重金属污染可导致土壤生产力下降,造成地下水和农作物污染,直接或间接危害人畜健康^[1],因此重金属污染如何治理引起了国内外学者的广泛关注^[2-4]。纳米材料的表面原子可以与金属离子以静电作用等方式相结合,对重金属离子有极强的吸附性,且能够在较短的时间内达到吸附平衡,而且其比表面积非常大,具有比普通吸附材料更大的吸附容量^[5],因此纳米材料在水环境及土壤环境中的重金属污染治理上显示出巨大的潜力^[6]。Liang 等^[7]通过向扰动土柱内添加纳米碳进行研究,结果表明土壤中纳米碳的存在可大大提高土壤的 CEC,且在一定程度上影响土壤对重金属离子的吸附量。Khaydarov 等^[8]研究发现纳米碳高聚合物对水域范围为 1~100 m 和土深范围为 1~100 cm 内的重金属污染有明显的修复效果。施踏青等^[9]研究了纳米二氧化钛对铅的吸附性能,结果表明吸附的最佳 pH 值为 4.0,静态吸附容量为 8.65 mg/g,吸附率可达 90%以上。肖亚兵等^[10]研究结果表明纳米二氧化钛在 pH 值为 1~10 范围内对 As(Ⅲ)和 As(V)的吸附率可达 99%。Yuan 等^[11]认为纳米铁在低 pH 值时,会出现零点电荷,增大其吸附能力,因而能够影响环境对砷的吸收,减轻环境中砷的污染。Liu 等^[12]通过试验研究纳米磷酸铁在土壤中原位固定 Cu(Ⅱ)的可行性,结果表明在低剂量 PO₄³⁻为 0.61,3.01 mg/g 的 3 种土壤(碱性、中性、酸性)中,纳米蓝铁矿颗粒能有效地减少 Cu(Ⅱ)淋溶量和生物可利用度,显著减轻土壤 Cu(Ⅱ)的污染。

纳米材料在重金属污染治理方面的研究对象大部分为金属纳米材料,但随着纳米技术的不断发展及环保意识增强,人们开始意识到金属元素及氧化物加工的纳米材料对于环境造成的潜在危害^[13]。而碳元素在土壤—植被—大气循环体中广泛存在,纳米碳材料较金属纳米材料具有较好的环境友好性^[14]。因此研究纳米碳材料对重金属 Cu(Ⅱ)迁移及吸附的内在机理可为土壤重金属污染治理和改良提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

黄绵土采样地为安塞试验站闲置农田,其基本理化性质见表 1。将待测土样压碎,过 2 mm 筛后风干备用,纳米碳材料平均粒径为 40 nm、纯度为 99%,将纳米材料与黄绵土均匀混合备用,试验共设定 5 个纳米碳含量,质量含量分别为 0,0.001,0.005,0.01,0.05 g/g,装土容重为 1.35 g/cm³。试验共设 9 组处理,其中,0 g/g 为不含纳米碳的对照处理,其余 4 个纳米碳含量共设定 8 个处理,分别为土柱各层土壤均匀添加纳米碳和仅在土壤表层 0—5 cm 添加纳米碳,试验中每个处理均重复 3 次。

表 1 黄绵土的颗粒组成 %

黏粒	粉粒	砂粒
0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~1 mm
5.53	19.32	75.15

1.2 试验方法

试验采用高度为 35 cm,内径为 5 cm 的圆柱型有机玻璃土柱,在土柱底部填放纱布和滤纸,防止土壤颗粒流失堵塞出流孔口。将不同纳米碳含量的土样分四层(每层 5 cm)分别装入不同土柱内,用搅拌棒将每层土样搅拌均匀,并在层与层之间刮毛。土柱填装好后,在土壤顶部放一层滤纸,防止通入溶液时直接冲刷土柱,破坏土柱上表面。采用一维垂直定水头法测定不同土样的 Cu(NO₃)₂ 溶液入渗过程,利用内径为 5 cm,高度为 40 cm 的马氏瓶供水,水头控制在 5 cm。试验过程中,记录马氏瓶中水位高度及土柱中湿润锋随时间的推进距离,直至湿润锋达到柱底。

试验结束后,迅速将土柱分层(每 3 cm 一层),在每层中心部分 5 g 土样取土,以 1:5 土水比混合,震荡 24 h 后,放入离心机以 10 000 rpm 转速离心 10 min,取上层清液,过滤,用原子吸收分光光度计测定上清液中 Cu(Ⅱ)的浓度。

测定 Cu(Ⅱ)等温吸附曲线,在 40 ml 具塞离心

管中加入 1 g 不同处理的土样,然后分别加入浓度为 2,4,8,12,16,20 mmol/L 的 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液 10 ml。加塞密封,在恒温下震荡 2 h,静置平衡 24 h,以 10 000 rpm 的转速离心分离 30 min,收集上清液,用原子吸收分光光度计测定上清液中 $\text{Cu}(\text{II})$ 的浓度。

2 结果与分析

2.1 纳米碳含量对 $\text{Cu}(\text{II})$ 等温吸附曲线的影响

等温吸附曲线是指一定温度下被吸附物质的量(吸附量)与溶液中物质浓度(平衡浓度)之间的关系^[15],根据重金属离子的等温吸附曲线的特征,可以判断出土壤对重金属离子吸附的作用。依据实测结果,将不同处理的土壤 $\text{Cu}(\text{II})$ 等温吸附曲线绘于图 1,可以看出,纳米碳含量对土壤吸附 $\text{Cu}(\text{II})$ 的能力产生显著影响,随着纳米碳含量的增加,吸附能力的差异性愈加明显。进一步分析可以看出,随着 $\text{Cu}(\text{II})$ 平衡浓度的增加,不同处理土壤的 $\text{Cu}(\text{II})$ 吸附量均呈增加的趋势,且均未达到吸附平衡。在相同 $\text{Cu}(\text{II})$ 平衡浓度下,随着纳米碳含量的增加, $\text{Cu}(\text{II})$ 吸附量明显增加。说明纳米碳材料对重金属 $\text{Cu}(\text{II})$ 有很好的吸附作用,这是由于纳米碳颗粒极其细小,土壤中大孔隙被其填充,小孔隙增加,土壤比表面增大,而且纳米碳本身具有极大比表面积、极高表面能和极强吸附性等,对 $\text{Cu}(\text{II})$ 有较高的吸附力;另一方面,细粒径的纳米碳增加了土壤的黏粒含量,改善了土壤质地,研究表明黏粒含量越高越利于 $\text{Cu}(\text{II})$ 的吸附^[16],因此纳米碳可以有效提高土壤吸附重金属 $\text{Cu}(\text{II})$ 能力。

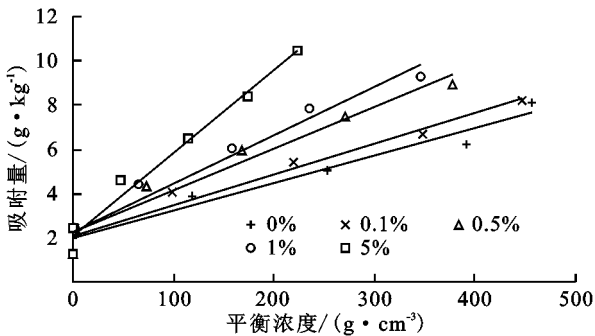


图 1 不同含量纳米碳对 $\text{Cu}(\text{II})$ 等温吸附曲线的影响

Langmuir 等温线形吸附方程可以准确描述铜离子的吸附特性^[17]。为进一步观察纳米碳材料对重金属 $\text{Cu}(\text{II})$ 的吸附作用,本文采用 Langmuir 公式进行定量描述。结果见表 2,拟合参数为三次重复试验的均值,决定系数 R^2 较高,达到显著性水平($p < 0.01$),有较好的相关性,随纳米碳含量增加,分配系数 k 及最大吸附量 S_m 均增大,且 k 值较对照处理增加的幅度呈明显增大的趋势,进一步说明纳米碳材料对重金属 $\text{Cu}(\text{II})$ 有很好的吸附作用。

表 2 Langmuir 等温方程拟合参数

纳米碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	S_m / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	k	k 增大 百分比/%	R^2
0.000	13.04	0.254	0.000	0.896
0.001	13.28	0.33	0.23	0.875
0.005	13.56	0.462	0.45	0.879
0.010	13.87	0.534	0.523	0.881
0.050	14.45	0.798	0.681	0.946

2.2 纳米碳含量对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量及入渗参数的影响

将不同处理的土壤 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量曲线绘于图 2。可以看出,一定入渗历时内,随纳米碳含量的增加,累积入渗量呈减小趋势。在入渗初期,不同处理的土壤累积入渗量差异性较小,曲线重合度较大;入渗时间延长,纳米碳对累积入渗量的影响逐渐明显,随纳米碳含量增加,累积入渗量减小幅度愈加明显。纳米碳含量上升到 5% 时,纳米碳对土壤累积入渗量影响极为显著,即使在入渗初期,一定入渗历时内,累积入渗量亦显著低于对照处理,曲线重合度几乎为零。对比两种纳米碳添加方式可以看出,纳米碳含量为 0.1%,0.5%,1% 时,两种施碳方式的土壤累积入渗量曲线没有很直观的变化;当纳米碳含量上升到 5% 时,均匀添加纳米碳的土壤累积入渗量明显低于表层添加纳米碳土壤。说明纳米碳含量较低时,两种施碳的方式对土壤累积入渗量的影响差异不大,此时选择仅在土壤表层添加纳米碳这种有效节省纳米碳材料使用量的施碳方式更加经济,当纳米碳含量较高时,相对于表层添加纳米碳的土壤,均匀添加纳米碳的土壤更利于减缓 $\text{Cu}(\text{II})$ 在土壤剖面的迁移。纳米碳的存在,使黄绵土中的大孔隙被极其细小的纳米碳颗粒填充为多个小孔隙,大孔隙数量降低,小孔隙数量增加,同时由于纳米碳的存在,改变了原本的水流通道,孔隙弯曲度增加,从而抑制 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液入渗^[18]。

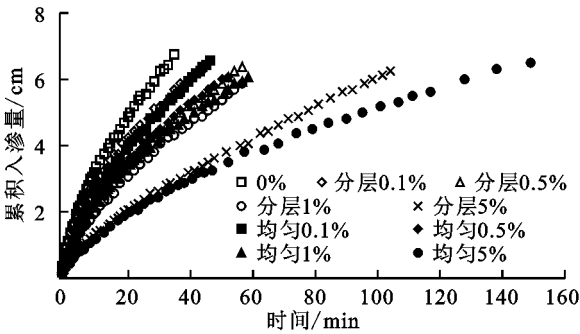


图 2 纳米碳含量对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量随时间变化的影响

为进一步分析纳米碳材料对土壤中 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液入渗过程的影响,采用 Philip 方程对累积入渗量随时间变化过程进行拟合,拟合结果见表 3。拟合参数

为三次重复试验的均值,决定系数 R^2 较高,达到显著性水平($p<0.01$)。Philip 方程中吸渗率 S 是反映土壤入渗能力的指标, A 为近似饱和导水率,对比两种施碳方式的土壤,拟合参数 S 和 A 变化趋势一致,均随纳米碳含量增加呈减小的趋势,表明随纳米碳含量增加, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液入渗能力减小。进一步分析可以看出,纳米碳含量较低时,两种施碳方式的土壤入渗参数间没有明显关系,当纳米碳含量上升到 5% 时,均匀添加纳米碳土壤的入渗参数 S 和 A 显著低于表层添加纳米碳土壤,即 $\text{Cu}(\text{II})$ 在土壤剖面的迁移速率较低。

表 3 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

纳米碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	均匀添加纳米碳			表层添加纳米碳		
	A	S	R^2	A	S	R^2
0	0.077	0.728	0.996	0.077	0.728	0.996
0.001	0.069	0.568	0.996	0.073	0.673	0.997
0.005	0.042	0.55	0.995	0.050	0.516	0.998
0.01	0.037	0.527	0.994	0.049	0.446	0.997
0.05	0.019	0.248	0.996	0.033	0.304	0.999

2.3 纳米碳含量对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液湿润锋推进过程及参数的影响

不同处理土壤中 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的湿润锋推进过程见图 3,可以看出,纳米碳含量对湿润锋推进速率影响逐渐显著,一定入渗历时内,随纳米碳含量的增加,湿润锋推进速率呈减小趋势。在入渗初期,湿润锋推进速率均较大,纳米碳对土壤湿润锋迁移的影响较小,曲线重合度较大。入渗时间延长,湿润锋变化速率减小并趋于稳定,此时随纳米碳含量增加,单位时间内湿润锋推进距离明显减小。纳米碳含量上升到 5% 时,纳米碳对土壤湿润锋推进速率影响极为显著,即使在入渗初期,一定入渗历时内,湿润锋推进距离亦显著低于对照处理。对比两种施碳方式可以看出,纳米碳含量为 0.1%,0.5%,1% 时,两种施碳方式之间的湿润锋推进速率没有很直观的变化,当纳米碳含量上升到 5% 时,均匀添加纳米碳土柱的湿润锋推进速率显著低于表层添加纳米碳土柱。说明纳米碳含量较低时,两种施碳方式对湿润锋推进速率的影响无显著差异,当纳米碳含量较高时,相对于表层添加纳米碳的土壤,均匀添加纳米碳的土壤更利于减缓 $\text{Cu}(\text{II})$ 在土壤剖面的迁移。纳米碳颗粒改变了土壤松散结构,使结构变紧密,土壤中溶液流动路径更加曲折复杂, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液迁移速率减慢,从而湿润锋推进受阻,且仅在表层添加纳米碳的处理效果更加明显。与图 1 相比,不同处理土柱的湿润锋推进过程与累积入渗量随时间变化过程的趋势基本一致。

根据曲线变化趋势,用幂函数对湿润锋推进曲线进行拟合,即 $Z_f = at^b$ 。式中, Z_f 为湿润锋深度(cm), t

为入渗历时(min), a, b 均为拟合参数,拟合结果见表 4,拟合参数为三次重复试验的均值,决定系数 R^2 较高,达到显著性水平($p<0.01$)。对比两种施碳方式的拟合参数,二者拟合参数变化趋势基本一致,随纳米碳含量增加, a 大体符合减小的趋势, b 均无明显变化规律。进一步分析可以看出,均匀添加纳米碳土柱的拟合参数 a 值明显低于表层添加纳米碳的土柱。

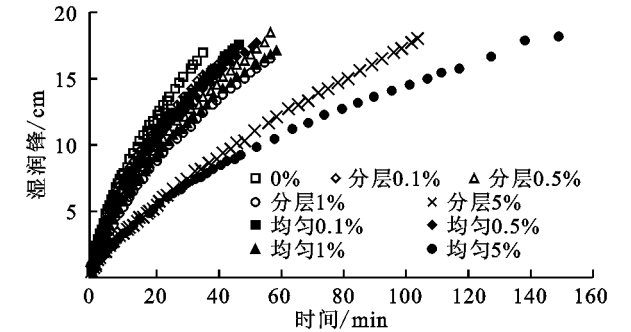


图 3 纳米碳含量对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液湿润锋深度随时间变化的影响

表 4 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液湿润锋推进过程拟合系数

纳米碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	均匀添加纳米碳			表层添加纳米碳		
	A	S	R^2	A	S	R^2
0	1.223	0.722	0.985	1.507	0.704	0.997
0.001	1.222	0.718	0.996	1.494	0.675	0.993
0.005	1.107	0.692	0.996	1.13	0.713	0.997
0.01	1.012	0.727	0.995	0.755	0.803	0.99
0.05	0.629	0.702	0.997	0.666	0.717	0.999

2.4 纳米碳含量对黄绵土不同深度剖面铜离子含量的影响

提取土壤不同深度剖面处 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量,依据实测数据将结果绘于图 4,可以看出,相对于空白对照土壤,两种施碳方式均提高了土壤表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量,随着纳米碳含量的增加,表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量显著增大,且表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量明显高于深层土壤。说明两种施碳方式均可有效地阻碍 $\text{Cu}(\text{II})$ 向深层土壤迁移。对比两种施碳方式可以看出,在土壤表层,纳米碳含量为 0.1%,0.5%,1% 时,两种施碳方式的土壤表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量没有很明显的差异,当纳米碳含量上升到 5% 时,均匀添加纳米碳的土壤表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量明显高于表层添加纳米碳土柱。随着土层加深,不同处理土壤剖面处 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量没有很直观的变化。说明纳米碳含量较低时,两种施碳的方式对 $\text{Cu}(\text{II})$ 吸附效果无显著差异,当纳米碳含量较高时,均匀添加纳米碳的土壤对 $\text{Cu}(\text{II})$ 吸附效果则显著优于在表层添加纳米碳的土壤。这是由于纳米材料具有极大的比表面及强吸附性等特殊性质,对重金属 $\text{Cu}(\text{II})$ 有一定的吸附作用。

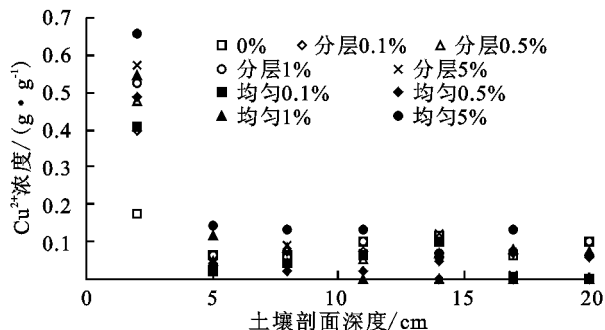


图 4 纳米碳含量对土壤不同深度剖面处 $\text{Cu}(\text{II})$ 浓度的影响

3 结论

(1) $\text{Cu}(\text{II})$ 等温吸附曲线可以用 Langmuir 方程描述,随着纳米碳含量的增加,最大吸附量 S_m 和分配系数 k 均增加,且分配系数 k 增加的幅度呈明显增大的趋势,说明纳米碳对重金属铜离子有很好的吸附作用。

(2) 纳米碳材料对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的入渗过程可以产生阻碍作用,纳米碳含量较低时,两种添加纳米碳的方式对土壤累积入渗量影响不大。纳米碳含量较高时,均匀添加纳米碳土壤的累积入渗量显著低于表层添加纳米碳的土壤。

(3) 相对于空白对照土壤,两种施碳方式均提高了土壤表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量,且表层 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量明显高于深层土壤。纳米碳含量较低时,两种施碳方式之间表层土壤 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量无明显差异,当纳米碳含量较高时,均匀添加纳米碳土柱的表层土壤 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量显著高于表层添加纳米碳土柱,随着土层加深,不同处理土壤剖面处 $\text{Cu}(\text{II})$ 含量无明显差异。

参考文献:

- [1] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [2] 樊婷,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.
- [3] 张溪,周爱国,甘义群,等. 金属矿山土壤重金属污染生物修复研究进展[J]. 环境科学与技术,2010,33(3):106-112.
- [4] 刘胜洪,王桂莹,颜燕如,等. 3 种草本植物的抗旱性及重金属吸附能力研究[J]. 水土保持研究,2015,22(2):284-289.
- [5] 刘艳,梁沛,郭丽,等. 负载型纳米二氧化钛对重金属离子吸附性能的研究[J]. 化学学报,2005,63(4):312-316.
- [6] 方靖,周艳萍,温蓓. 二氧化钛纳米颗粒对铜在土壤中运移的影响[J]. 土壤学报,2011,48(3):549-556.
- [7] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of American Journal,2006,70(5):1719-1730.
- [8] Khaydarov R A, Khaydarov R R, Gapurova O. Water purification from metal ions using carbon nanoparticle-conjugated polymer nanocomposites[J]. Water Research,2010,44(6):1927-1933.
- [9] 施踏青. 纳米二氧化钛材料对金属离子吸附行为的研究及其应用[D]. 武汉:华中师范大学,2003.
- [10] 肖亚兵,钱沙华,黄淦泉,等. 纳米二氧化钛对砷(Ⅲ)和砷(V)吸附性能的研究[J]. 分析科学学报,2003,19(2):172-174.
- [11] Yuan C, Lien H L. Removal of Arsenale from aqueous solution using nanoscale iron particles[J]. Water Quality Research Journal of Canada,2006,41(2):210-215.
- [12] Liu R, Zhao D. Insituimmobilization of $\text{Cu}(\text{II})$ in soils using a new class of iron phosphate nanoparticles[J]. Chemosphere,2007,68(10):1867-1876.
- [13] 林道辉,冀静,田小利等. 纳米材料的环境行为与生物毒性[J]. 科学通报,2009,54(23):3590-3604.
- [14] Cornelissen G, Gustafsson O, Bucheli D, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation and biodegradation[J]. Environmental Science and Technology,2005,39(18):6881-6895.
- [15] 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.
- [16] 胡红青,陈松,李妍,等. 几种土壤的基本理化性质与 Cu^{2+} 吸附的关系[J]. 生态环境,2004,13(4):544-545.
- [17] 刘庆玲,徐绍辉. 不同质地土壤中铜离子运移阻滞因子研究[J]. 土壤学报,2015,24(6):930-935.
- [18] 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.