

两种生物炭对两种质地土壤中阿特拉津淋溶与迁移的影响

曹美珠¹, 张超兰^{1*}, 潘丽萍², 杨惟薇¹, 魏嘉鸣¹, 张飞龙¹, 韦艳红¹

(1.广西大学环境学院, 南宁 530004; 2.广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要:通过室内培养和模拟土柱淋溶实验,研究了在 500 °C 热解温度下制备的甘蔗叶生物炭和蚕沙生物炭对阿特拉津在冲积土(砂土)和潮土(粘土)中淋溶与迁移的影响,两种生物炭的添加比例分别为 0.2% 和 0.5%,污染土中 AT 的浓度为 10 mg·kg⁻¹。结果表明,添加生物炭显著增加了表层土壤的阳离子交换量和有机碳的含量,明显抑制了阿特拉津在土柱中的淋溶与迁移。在同一种土壤中,生物炭添加量相同时,甘蔗叶生物炭对土壤中阿特拉津的淋溶与迁移抑制效果较蚕沙炭明显,并且同一种生物炭添加量越高,抑制作用越明显。对比两种质地土壤中阿特拉津的淋出率发现,生物炭的加入对抑制粘土中阿特拉津的淋溶与迁移作用更明显。相关性分析结果表明,土柱表层土壤的阳离子交换量、有机碳含量与底层土壤阿特拉津含量、淋溶液阿特拉津累积量均呈显著负相关。可见,生物炭的添加可以明显固定土壤中的阿特拉津,减少其淋溶与迁移,有效修复阿特拉津污染的土壤,控制其对地下水的污染。

关键词:阿特拉津;砂土;粘土;生物炭;淋溶

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)01-0065-07 doi:10.11654/jaes.2015.01.010

Effect of Two Biochars on Leaching and Migration of Atrazine in Two Soils

CAO Mei-zhu¹, ZHANG Chao-lan^{1*}, PAN Li-ping², YANG Wei-wei¹, WEI Jia-ming¹, ZHANG Fei-long¹, WEI Yan-hong¹

(1.School of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Herbicides in soils can easily enter the surface water and groundwater through run off and leaching, leading to water pollution. A simulation experiment was performed to study the effects of biochar amendments on the transport of atrazine in soils. Two biochars, sugar-cane top (BCst) and silkworm excrement (BCse), were produced under pyrolysis temperature at 500 °C and limited oxygen. The biochars were added at 0.2% and 0.5% rates to two soils, sandy soil and clay soil, pre-polluted with 10 mg·kg⁻¹ atrazine. Biochar addition changed the basic physiochemical properties of soils. Soil organic carbon (SOC) and cation exchange capacity (CEC) were significantly increased by biochars, compared with the control. Biochars inhibited the transport of atrazine in soil, with greater effects in BCst than in SCse. The stronger adsorption and less transport of atrazine were observed in the soils with higher biochar additions. The leaching rate of atrazine was greater in sandy soil than in clayey soil. Correlation analysis suggested that SOC and CEC in the top soil (0~5 cm) had significantly negative relationship with the content of atrazine in the subsoil (15~20 cm) and the leaching of atrazine into groundwater. These results suggest that biochars could be used as artificially adsorbent to efficiently control the migration and leaching of atrazine in soils.

Keywords: atrazine; sandy soil; clayey soil; biochar; leaching

阿特拉津 (Atrazine, AT) 分子式 C₈H₁₄ClN₅, 分子量为 215.69^[1], 属均三氮苯类农药。作为苗前、苗后除

草剂^[2]在我国农业生产中应用十分广泛,在北方粮食作物玉米、高粱和南方果园、茶园生产中都有应用^[3],但其残留时间长,在土壤和水中残留时间超过一年^[4],且在土壤中吸附量较低,很容易穿透包气带污染地下水^[5]。微量的阿特拉津对人和动物有毒性作用^[6]。已有研究发现,一定剂量下,阿特拉津对小鼠生殖细胞可能存在遗传损伤^[7],对鱼类可导致其机体产生较强的氧化压力,进而影响鱼类的正常生长发育^[8]。

生物炭是在缺氧条件下生物质热裂解的一种产

收稿日期:2014-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41461091);广西自然科学基金项目(2014GXNSFAA18039);广西有色金属及特色材料加工重点实验室项目(GXKFJ12-15);广西大学科研基金项目(XJZ130367)

作者简介:曹美珠(1989—),女,山西晋中人,硕士研究生,从事环境污染控制与修复研究。E-mail:18377175628@163.com

***通信作者:**张超兰 E-mail:zhangcl@gxu.edu.cn

物^[9],由于其孔隙结构发达、比表面积大^[10]且表面具有-OCOR、-NHCOR、-OH、-CONH₂等官能团^[11]而被广泛应用于修复有机污染的土壤^[12]。有实验表明生物炭对有机农药敌草隆的吸附作用是土壤的400~2500倍^[13],850℃的外源生物炭加入土壤后有隔离农药的效果^[14],添加松针制备的生物炭使累积阿特拉津浸出降低了52%^[15]。目前,生物炭的研究主要集中在对阿特拉津的吸附、解吸以及降解方面^[16-17],对外源生物炭对阿特拉津在土壤中的淋溶与迁移研究少有报道。本论文通过室内培养和模拟土柱淋溶实验,研究外源甘蔗叶和蚕沙制备的生物炭对阿特拉津淋溶与迁移的影响,探讨生物炭对阿特拉津污染土壤修复的可行性,减少其对地下水的污染。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

供试冲积土(砂土)和潮土(粘土)均产自广西南宁。土壤采集后,去除样品中石头、植物根和秸秆碎片等杂物,室温下风干,土壤风干后过10目筛备用。供试土壤的基本理化性质见表1。

1.1.2 供试生物炭

生物炭制备原料:甘蔗叶来源于南宁某农场;蚕沙购买于广西宜州,属于二龄蚕沙。

生物炭的制备:将甘蔗叶洗净后,65℃烘干,备用;购买的蚕沙已经过清洁处理。采用500℃高温热解法制备生物炭,即马弗炉充氮气缺氧炭化5h,冷却后取出,混匀研磨过100目筛备用。

生物质炭的pH测定参考《木质活性炭试验方法:pH值的测定》^[18],表面含氧官能团用Boehm滴定法定量测定^[19],阳离子交换量(CEC)采用乙酸钠交换

法,总有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定^[20],比表面积采用比表面积仪(NOVA4200e)测定。供试生物炭的主要特性见表2。

1.2 试验方法

1.2.1 淋溶试验装置

选用内径10cm、高30cm的圆柱形有机玻璃柱制备淋溶装置。首先制备阿特拉津浓度为10mg·kg⁻¹的污染土壤,然后分别添加0.2%、0.5%的甘蔗叶生物炭和蚕沙生物炭,混匀,放入(25±1)℃恒温培养箱,培养一周,备用。将过10目筛的未受污染的土壤装入土柱,土柱高15cm;然后在未受污染土柱上层分别填加5cm含阿特拉津10mg·kg⁻¹和添加不同处理生物炭的污染土壤。为了保证淋溶液均匀地流过土柱、防止实验过程中土壤的逸出,土柱上下端各放置滤纸和尼龙网后,分别添加一层石英砂。从底部加水饱和土壤,平衡24h后,从顶部加去离子水进行淋溶,采用间歇淋溶方式,每100mL采集一次淋溶液,淋溶液总体积为1500mL。每个处理设两个重复。

淋溶结束后,取出土柱,将土柱分为0~5、5~10、10~15、15~20cm四层。每层土壤风干并过筛,用于测定各层中阿特拉津的含量。

1.2.2 阿特拉津的分析测定方法

淋溶液的净化:淋溶液用0.45μm水系滤膜过滤后,用高效液相色谱测定滤液中阿特拉津的浓度。

土样中阿特拉津的提取和净化:准确称取风干土样5.000g,加入干燥的无水硫酸镁0.3000g,加入10mL乙腈(色谱纯),涡旋混合1min,40℃超声15min后5000r·min⁻¹离心5min,上清液过0.45μm滤膜后用高效液相色谱测定其中阿特拉津的浓度。

测定条件:高效液相色谱工作使用的色谱柱为AGLIENT SB-C18柱,流动相为甲醇:水=60:40,流速为0.9mL·min⁻¹,柱温为40℃,检测波长为228nm,进样量为20μL。采用外标法由色谱处理软件根据峰面积进行定量。

1.3 数据处理方法

实验所得数据用Excel 2007处理,用SPSS 17.0进行相关性分析。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of tested soils

土壤类型	pH	总有机碳/ g·kg ⁻¹	阳离子交换量/ cmol·kg ⁻¹	机械组成/%		
				粘粒	粉砂	砂粒
冲积土(砂土)	7.54	18.87	15.50	3.46	38.76	57.78
潮土(粘土)	7.95	11.99	7.65	60.18	35.79	4.03

表2 供试生物炭的主要特性

Table 2 Main characteristics of biochars

生物炭	pH	总有机碳/ g·kg ⁻¹	碱性官能团/ mmol·g ⁻¹	酸性官能团/ mmol·g ⁻¹	酚羟基/ mmol·g ⁻¹	羧基/ mmol·g ⁻¹	阳离子交换量/ cmol·kg ⁻¹	比表面积/ m ² ·g ⁻¹
甘蔗叶生物炭	9.44	629.85	1.098	0.726	0.520	0.205	27.85	197.48
蚕沙生物炭	10.40	340.52	4.020	0.590	0.480	0.110	71.59	9.80

2 结果与分析

2.1 生物炭对阿特拉津淋溶的影响

添加生物炭对土壤中阿特拉津的固定效果明显(图 1)。当生物炭添加量一致时,添加甘蔗叶生物炭对土壤中阿特拉津的固定效果较蚕沙生物炭明显,并且随着添加量的增加固定效果更显著。不同处理土壤中阿特拉津的淋出量从小到大依次是 0.5%甘蔗叶生物炭、0.5%蚕沙生物炭、0.2%甘蔗叶生物炭、0.2%蚕沙生物炭和对照。与对照相比,添加 0.5%甘蔗叶生物炭、0.5%蚕沙生物炭、0.2%甘蔗叶生物炭和 0.2%蚕沙生物炭后,砂土(图 1a)中阿特拉津淋出总量分别是 0.021 4、0.092 0、0.108 9、0.166 6 mg, 分别是对照的 5.92%、25.47%、30.14%、46.12%;粘土(图 1b)阿特拉津淋出总量分别为 0.007 9、0.037 3、0.105 1、0.113 3 mg,分别是对照的 2.24%、10.58%、29.81%、32.13%。

对于两种土壤而言,添加生物炭的砂土中阿特拉津淋出率均高于粘土,粘土中添加生物炭对阿特拉津的固定效果较砂土更明显(图 2)。淋溶实验结束时,添加 0.5%甘蔗叶生物炭、0.5%蚕沙生物炭、0.2%甘蔗叶生物炭和 0.2%蚕沙生物炭的砂土中(图 2a)阿特拉津的淋出率分别为 0.39%、1.66%、1.97%、3.01%, 分别比

对照减少了 6.15%、4.87%、4.56%、3.52%;而粘土(图 2b)中分别是 0.15%、0.72%、2.02%、2.18%,分别比对照减少了 6.63%、6.06%、4.76%、4.60%。

2.2 生物炭对阿特拉津在土壤中垂直运移的影响

由图 3 可以看出,添加生物炭对表层土壤(0~5 cm)阿特拉津有强烈的固定作用,明显减少表层土壤阿特拉津向下垂直迁移,不同深度土层阿特拉津的分布为 0~5 cm 土层最高,随着深度的增加阿特拉津含量减少。由图 3a 可以看出,砂土中添加 0.5%甘蔗叶生物炭、0.5%蚕沙生物炭、0.2%甘蔗叶生物炭和 0.2%蚕沙生物炭四种处理,表层土壤中阿特拉津的残留量依次为 8.282、7.860、7.606、7.311 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占各处理土壤中阿特拉津总残留量的 95.92%、90.80%、84.30%和 74.19%, 分别比对照增加了 2.234、1.812、1.558、1.263 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;底层土壤(15~20 cm)中阿特拉津的含量则分别比对照减少了 0.450、0.406、0.334、0.071 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于粘土(图 3b)而言,阿特拉津在土柱中垂直变化规律与砂土相同,但是所有处理中表层土壤阿特拉津的含量均高于砂土的,均占各处理总残留量的 90%以上。与对照相比,添加 0.5%甘蔗叶生物炭、0.5%蚕沙生物炭、0.2%甘蔗叶生物炭和 0.2%蚕沙生物炭的底层土壤(15~20 cm)中阿特拉津的含量分别降低了

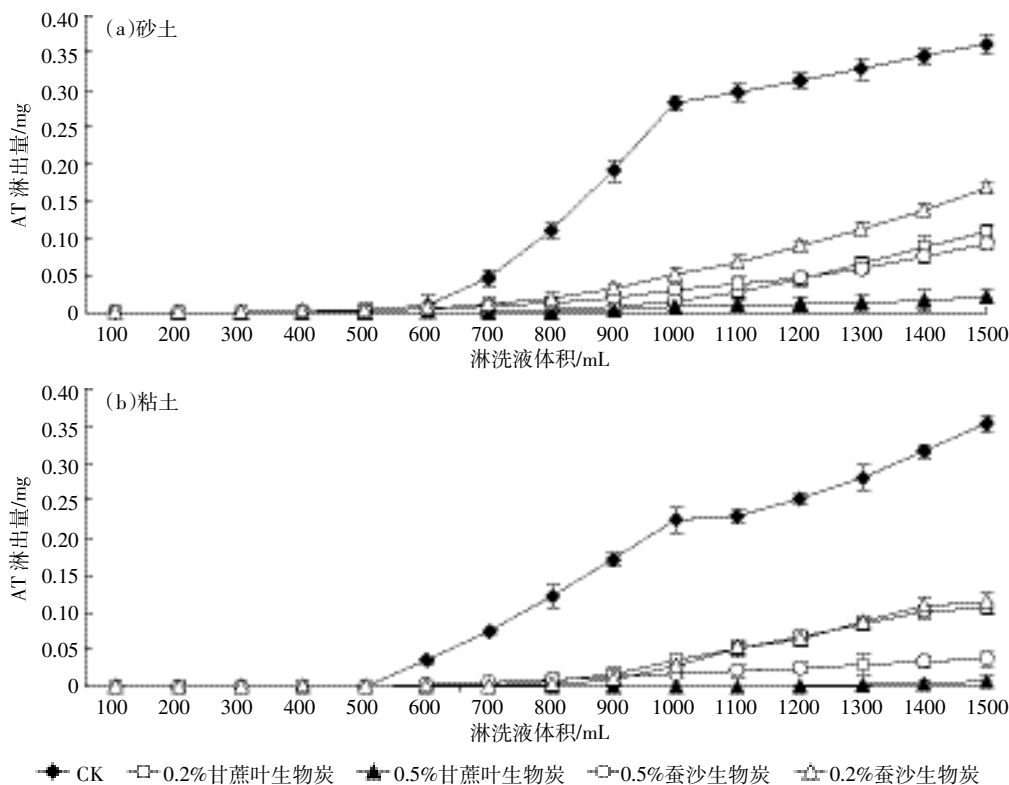


图 1 生物炭的添加对土壤中阿特拉津淋溶的影响

Figure 1 Effect of biochar additions on leaching of atrazine in soils

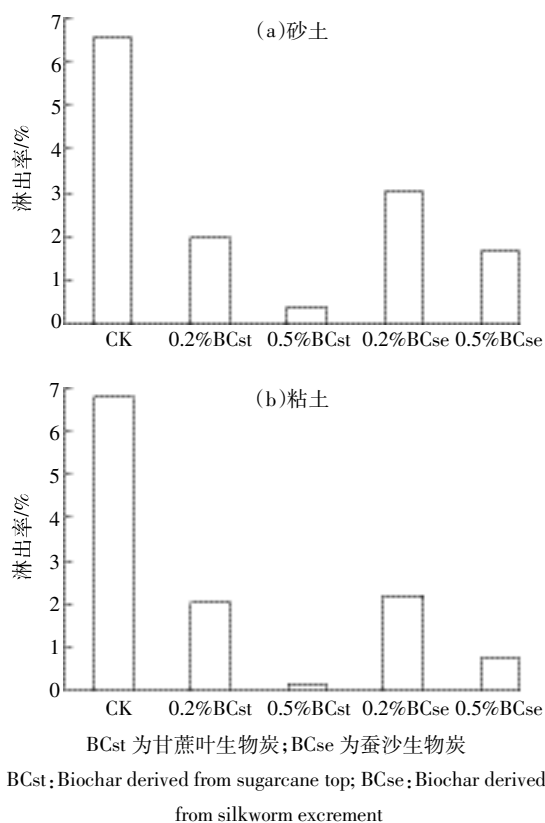


图2 不同处理 AT 的淋出率

Figure 2 Leaching rates of atrazine under different treatments

0.170、0.157、0.126、0.102 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 相关性分析

相关性分析表明,无论在砂土还是粘土中,淋溶土柱底层土壤的阿特拉津含量与表层土壤的阳离子交换量、土壤有机碳含量均呈显著负相关(图4),淋溶液中阿特拉津累积量与表层土壤的阳离子交换量和土壤有机碳也呈显著负相关(图5)。可见,添加生物质炭影响土壤中阿特拉津的淋溶与迁移的原因之一可能是:生物质炭通过改变土壤的有机碳、阳离子交换量等土壤的基本性质进而影响土壤对阿特拉津的吸附固定,减少了其淋溶与迁移。

3 讨论

影响阿特拉津在土壤中吸附行为的主要因素有土壤有机碳、粘粒、阳离子交换量等(图4、图5),通过表2可以看出,制备的甘蔗叶生物炭和蚕沙生物炭的有机碳含量、阳离子交换量都较高。随着生物炭的加入,土壤有机碳和阳离子交换量等都高于对照,其变化规律均为 0.5% 甘蔗叶生物炭 > 0.5% 蚕沙生物炭 > 0.2% 甘蔗叶生物炭 > 0.2% 蚕沙生物炭。

实验结果表明,生物炭的添加可以增加土壤对阿特拉津的吸附,抑制其纵向迁移。这一方面可能是

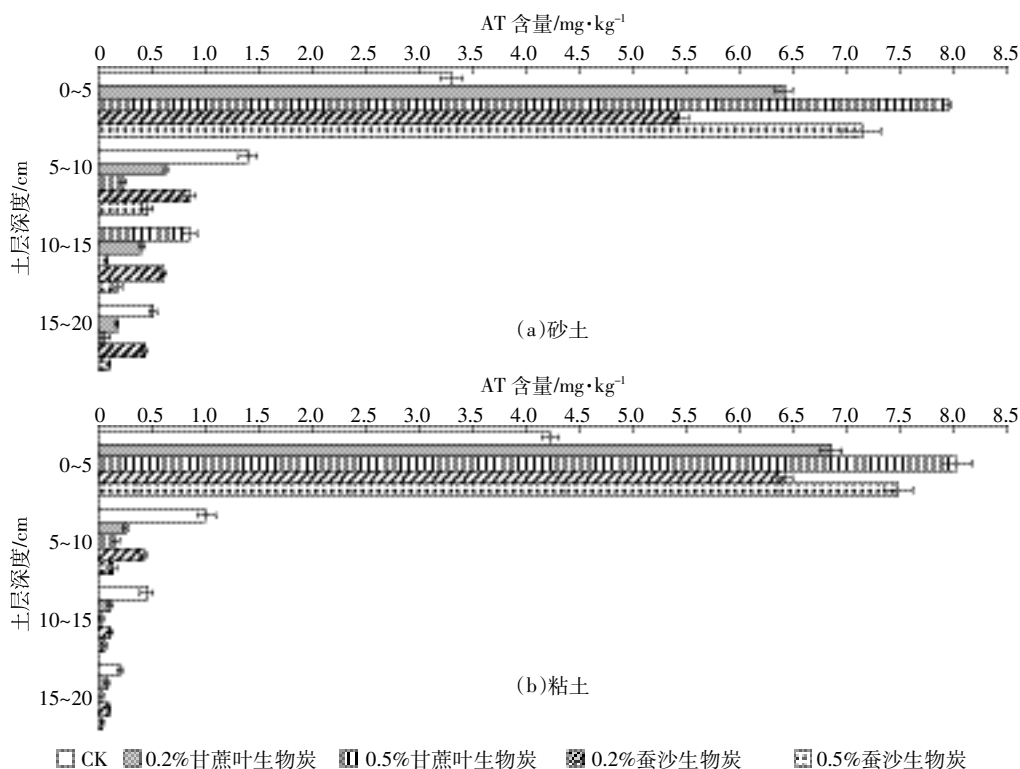
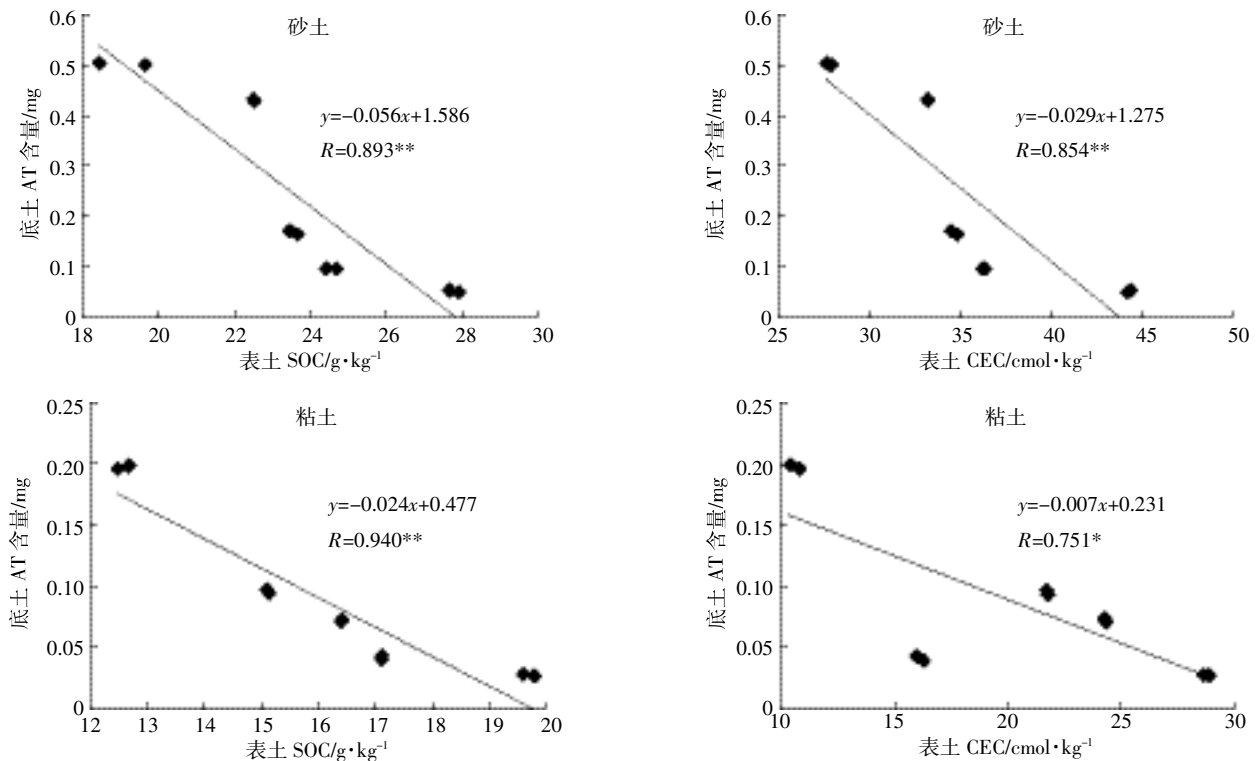


图3 不同土层深度 AT 的分布

Figure 3 Distribution of atrazine in soil profile



土柱从上往下, 0~5 cm 土层为表土; 15~20 cm 土层为底土。* 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同
Top figures: 0~5 cm surface soils; Bottom figures: 15~20 cm subsoils. * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same below

图 4 土柱表土 SOC、CEC 与底土 AT 含量的相关性

Figure 4 Correlation of SOC and CEC in surface soil with atrazine content in subsoil

因为生物炭孔隙结构发达、比表面积大, 可通过表面吸附^[21]影响阿特拉津在土柱中的淋溶与迁移的特性; 另一方面阿特拉津在土壤中的吸附作用主要受土壤有机质的支配^[22], 生物炭的添加使得土壤有机碳含量升高以致吸附位点增加^[5], 进而提高土壤对阿特拉津的吸附容量。同时生物炭丰富的含氧官能团所产生的表面负电荷使得制备的生物炭有较高的阳离子交换量, 加入土壤后能够与土壤颗粒结合, 形成的土壤团聚体和有机无机复合体使得土壤阳离子交换量增大^[23], 增强了对阳离子的吸附能力。此外, 生物炭的添加可能会影响土壤中微生物的活动, 减缓阿特拉津的降解, 使得添加生物炭的土壤中阿特拉津残留量较高。

通过图 1 和图 2 可以看出, 生物炭的添加量越大, 阿特拉津在土壤表层的残留量越高, 累积淋出量越少。添加量相同, 甘蔗叶生物炭的添加对抑制阿特拉津的淋溶与迁移作用更大。这可能是因为甘蔗叶生物炭的有机碳含量比蚕沙高, 比表面积相对更大, 进而有利于对土壤中阿特拉津的吸附。此外, 阿特拉津是弱碱性化合物, 是极性分子, 在吸附过程中受溶液

pH^[24]和酸性官能的影响, pH 越大, 酸性官能团越少、越不利于生物炭对阿特拉津的吸附。甘蔗叶生物炭 pH 较蚕沙生物炭略小, 使得添加甘蔗叶生物炭的土壤 pH 略低, 且甘蔗叶生物炭酸性官能团含量相对较高, 比表面积更大。这都可能是甘蔗叶生物炭对阿特拉津吸附效果更好的原因。

土壤中的粘粒物质是相对活跃的组分, 粘粒含量高的土壤可吸附阿特拉津的比表面积相对较大, 土壤对阿特拉津的吸附量也大^[25]。对比两种不同质地土壤阿特拉津的淋出率可以发现(图 2), 对照中砂土(图 2a)的阿特拉津淋出率较粘土(图 2b)略低。这可能是因为砂土的有机碳含量和阳离子交换量比粘土大, 更有利于阿特拉津的吸附, 以致其淋溶与迁移作用相对较弱。而添加生物炭的 4 种处理土壤中, 砂土的阿特拉津淋出率均比粘土高, 说明生物炭的添加对粘土中阿特拉津的淋溶与迁移影响更大, 更有利于阿特拉津的固定。与砂土不同的是, 粘土(图 1b)中添加 0.5% 蚕沙生物炭的土柱中阿特拉津的淋出量比添加 0.2% 甘蔗叶生物炭的土柱明显减少。这可能是由于粘土本身的有机质含量比较低, 生物炭添加量的变化对其土壤

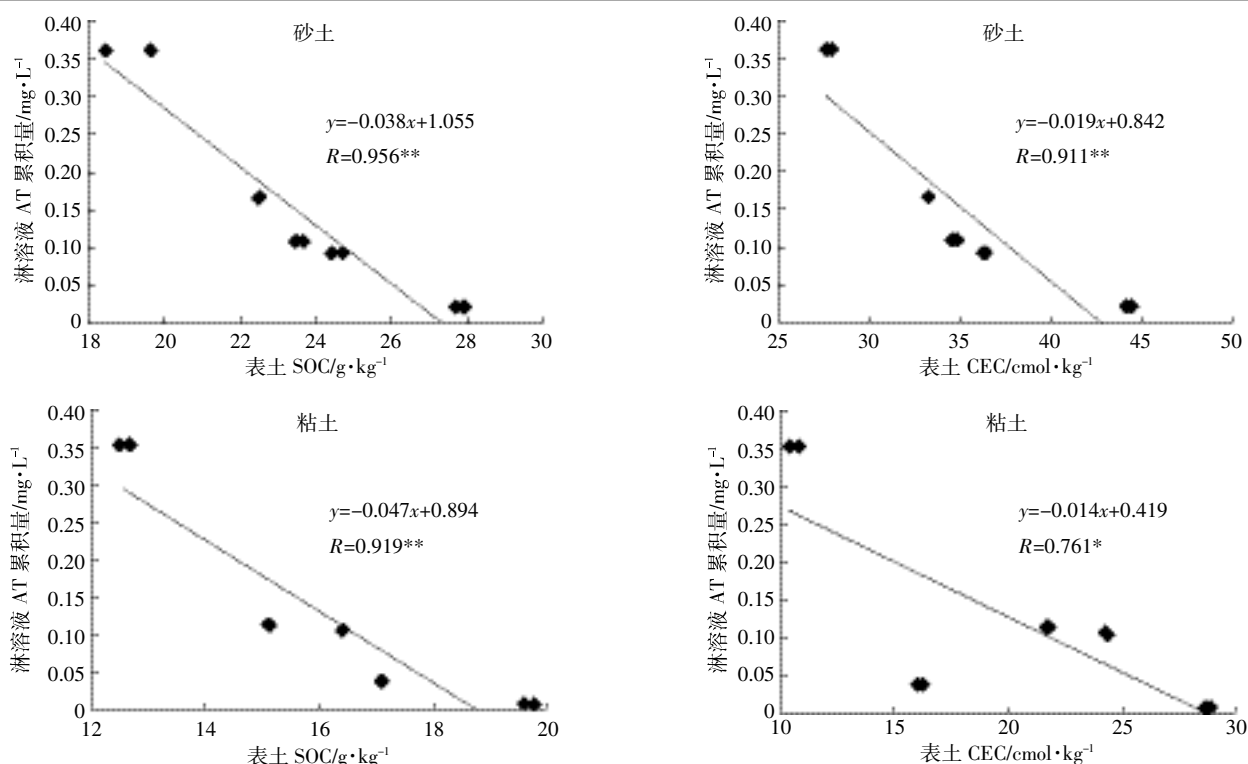


图5 土柱表土 SOC、CEC 与淋溶液 AT 累积量的相关性

Figure 5 Correlation of SOC and CEC in surface soil with atrazine in leachates

性质影响较大。添加 0.2% 两种生物炭的土柱中阿特拉津的淋出量相差不大, 表明对于粘粒含量很高的土壤, 生物炭添加量越低对生物炭的性质效果差异越不明显。图 3 中, 粘土表层土壤阿特拉津含量较高, 而下层含量比砂土略低, 可能是因为粘土的粘粒含量较高, 淋溶过程中透水性较差, 土壤有机质矿化作用缓慢^[26], 抑制了阿特拉津随水下移。

通过实验发现, 生物炭的加入可以使土壤表层的理化性质发生改变, 缓冲效果明显, 使土壤对除草剂阿特拉津的吸附能力增强, 相应增强了阿特拉津从土壤中解吸的迟滞作用, 吸附于土壤中的阿特拉津不易随土壤间隙水发生垂直迁移, 以致减少了阿特拉津在土壤中的流失并降低了阿特拉津在土壤中的淋溶深度, 进而有效减少了阿特拉津的淋溶流失。

4 结论

(1) 添加甘蔗叶生物炭和蚕沙生物炭(500℃)明显减少了土壤中阿特拉津的淋溶与迁移, 本实验条件下高添加量更有利于抑制阿特拉津的淋溶与迁移; 添加量相同条件下, 甘蔗叶生物炭固定效果较蚕沙炭好; 阿特拉津在粘土中的淋溶与迁移作用比砂土弱。

(2) 土柱表层土壤的有机碳、阳离子交换量与底

层土壤阿特拉津含量、淋溶液中阿特拉津的累积量均呈显著负相关。添加生物炭增加了土壤有机碳含量和阳离子交换量, 进而降低了阿特拉津在土壤中的淋溶与迁移。可见, 通过添加生物炭修复阿特拉津污染土壤, 减少其淋溶与迁移、保护土壤和地下水是行之有效的方法。

参考文献:

- [1] 弓爱君, 叶常明. 除草剂阿特拉津(atrazine)的环境行为综述[J]. 环境科学进展, 1997, 5(2): 37-47.
GONG Ai-jun, YE Chang-ming. Behavior of herbicide atrazine in environment[J]. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(2): 37-47.
- [2] 叶新强, 鲁岩, 张恒. 除草剂阿特拉津的使用与危害[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(8): 95-98.
YE Xin-qiang, LU Yan, ZHANG Heng. The usage and permiciousness of the herbicide atrazine[J]. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(8): 95-98.
- [3] 许人骥, 吴国平, 胡伟, 等. 环境样品阿特拉津及降解产物分析方法进展[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3): 32-36.
XU Ren-ji, WU Guo-ping, HU Wei, et al. Process of analysis atrazine and its degradation products in environment samples[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(3): 32-36.
- [4] 陈建军, 何月秋, 祖艳群, 等. 除草剂阿特拉津的生态风险与植物修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 289-293.
CHEN Jian-jun, HE Yue-qiu, ZU Yan-qun. The research progress in

- ecological risk and phyto-remediation of atrazine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl):289-293.
- [5] 秦传玉,赵勇胜,刘娜,等.阿特拉津在土壤中的吸附行为[J].环境污染防治,2007,29(3):165-167.
- QIN Chuan-yu, ZHAO Yong-sheng, LIU Na, et al. Adsorption of atrazine in soil slurry samples[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(3):165-167.
- [6] 刘燕.莠去津的潜在危害及其毒理学影响[J].贵阳金筑大学学报,2003,51(3):112-113.
- LIU Yan. The potential risk of atrazine and a review of the toxicology[J]. *Journal of Jinzh University of Guiyang*, 2003, 51(3):112-113.
- [7] 金焕荣,段志文.阿特拉津的遗传毒性研究[J].工业卫生与职业病,1999,25(6):341-343.
- JIN Huan-rong, DUAN Zhi-wen. Study on the genotoxicity of atrazine[J]. *Industrial Health and Occupational Diseases*, 1999, 25(6):341-343.
- [8] 陈家长,孟顺龙,胡庚东,等.低浓度阿特拉津对鲫鱼过氧化氢酶(CAT)活性的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(3):1151-1156.
- CHEN Jia-zhang, MENG Shun-long, HU Geng-dong, et al. Effects of low concentration of atrazine on catalase activity in *Carassius auratus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1151-1156.
- [9] 王宁,侯艳伟,彭静静,等.生物炭吸附有机污染物的研究进展[J].环境化学,2012,31(3):287-295.
- WANG Ning, HOU Yan-wei, PENG Jing-jing, et al. Research progress on sorption of organic contaminants to biochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(3):287-295.
- [10] 文曼,郑纪勇.生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J].水土保持研究,2012,19(1):46-50.
- WEN Man, ZHENG Ji-yong. Effects of different sizes of biochar and their addition rates on soil shrinkage characteristics[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1):46-50.
- [11] 刘莹莹.不同原料生物炭基本性质及其对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 吸附特性的研究[D].南京:南京农业大学,2012:2-3.
- LIU Ying-ying. A study on characteristics and adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} in aqueous solution by biochars produced from the pyrolysis of different crop feedstock[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012:2-3.
- [12] 吴林强,夏广洁,李亮,等.pH及苯影响下生物炭吸附毒莠定的行为[J].农业环境科学学报,2013,32(1):69-74.
- WU Lin-qiang, XIA Guang-jie, LI Liang, et al. Effect of pH and benzene on picloram adsorption to biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):69-74.
- [13] Yang Y N, Sheng G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(16):3635-3639.
- [14] Yu X Y, Ying G G, Kookana R S. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(5):665-671.
- [15] Delwiche K B, Lehmann J, Todd Walter M. Atrazine leaching from biochar-amended soils[J]. *Chemosphere*, 2014, 95:346-352.
- [16] 邓惠,俞花美,李昉泽,等.木薯渣基生物炭对土壤中阿特拉津吸附特性的影响[J].广东农业科学,2014,41(4):79-84.
- DENG Hui, YU Hua-mei, LI Fang-ze, et al. Sorption properties of atrazine by biochars prepared from manioc wastes in soil[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(4):79-84.
- [17] 范玉超,刘文文,司友斌,等.竹炭固定化微生物对土壤中阿特拉津的降解研究[J].土壤,2011,43(6):954-960.
- FAN Yu-chao, LIU Wen-wen, SI You-bin, et al. Biodegradation of atrazine in soils by bamboo charcoal immobilized a degradation bacterium[J]. *Soils*, 2011, 43(6):954-960.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 12496.7—1999 木质活性炭试验方法:pH值的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC, Standardization Administration of PRC. GB/T 12496.7—1999 Test method of wooden activated carbon: Determination of pH[S]. Beijing: China Standards Press, 1999.
- [19] Boehm. Acidity of carbon characterized by their continuous pH[J]. *Carbon*, 1977, 35(1):83-94.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2008.
- BAO Shi-dan. Soil agrochemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [21] Cao X D, Ma L N, Gao B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(9):3285-3291.
- [22] Spark K M, Swift R S. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 298(1):147-161.
- [23] 易卿,胡学玉,柯跃进,等.不同生物炭黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(1):88-94.
- YI Qing, HU Xue-yu, KE Yue-jin, et al. Impact of different biomass black carbon amendments on retention capacity of cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):88-94.
- [24] 李剑锋,高大文.改性木屑对阿特拉津的吸附特性[J].东北林业大学学报,2011,39(6):44-46.
- LI Jian-feng, GAO Da-wen. Adsorption characteristics of modified sawdust on atrazine[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(6):44-46.
- [25] 王静,赵莲莲,刘子圣,等.丁吡吗啉在土壤中的吸附及淋溶特性[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2128-2132.
- WANG Jing, ZHAO Lian-lian, LIU Zi-sheng, et al. Adsorption and leaching behavior of pyrimorph in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2128-2132.
- [26] 张琦.不同土质中的阿特拉津残留分析[J].干旱环境监测,2008,22(1):56-58.
- ZHANG Qi. Analysis on atrazine remains in different soil texture[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2008, 22(1):56-58.