

生物炭对盐碱土氮淋溶的影响

杨放^{1,2}, 李心清^{1*}, 刑英³, 程红光¹, 张立科^{1,2}, 何云勇^{1,2}, 王兵¹

(1.中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.贵州师范大学, 贵阳 550001)

摘要:生物炭对某些高度风化的热带土壤和温带酸性土壤有改善土壤结构, 减少营养元素淋失的作用, 但关于温带干旱区的盐碱土的改良效果却很少报道。以新疆绿洲盐碱土为对象, 研究玉米秸秆生物炭对氮淋溶的影响。采用室内土柱淋滤试验, 土柱包含炭土比(W/W)0%、1%、5%和10%四个处理, 模拟大气降雨, 定期收集淋滤液, 分析其中的氮素指标。结果显示, 5%和10%添加比例分别减少了土壤氨态氮的淋失量31.14%和52.43%, 1%的添加比例增加了铵态氮淋失。对比空白, 10%处理的铵态氮、硝态氮和总氮减少淋失量分别达到52.43%、50.01%和33.83%, 1%和5%处理土柱的硝态氮和总氮在试验10 d内(降雨量140 mm)就基本淋失完, 而10%处理土柱则显得较为平缓, 几乎到25 d(降雨量290 mm)时才基本淋失完。四个土柱的铵态氮的淋失都较为平缓。另外, 生物炭可以减少土柱的溶液淋失量(20.95%), 增加土壤持水能力。上述结果表明, 生物炭施用于干旱区盐碱土能明显减少硝态氮和总氮淋失并延长其在土壤中的停留时间, 增强土壤的持续供氮能力。

关键词:生物炭; 玉米秸秆; 盐碱化; 硝态氮; 总氮

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-0972-06 doi:10.11654/jaes.2014.05.021

Effect of Biochar Amendment on Nitrogen Leaching in Saline Soil

YANG Fang^{1,2}, LI Xin-qing^{1*}, XING Ying³, CHENG Hong-guang¹, ZHANG Li-ke^{1,2}, HE Yun-yong^{1,2}, WANG Bing¹

(1.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Guizhou Normal University, Guiyang 550001)

Abstract: Biochar has been showed to improve soil structure and reduce nutrient leaching in highly weathered tropical soils and acidic temperate soils. However, there is little information available about the effect of biochar on temperate alkaline and/or saline soils in arid areas. In a laboratory study, ammonium and nitrate in soil leachate were monitored at different simulated precipitation after treatment with biochar. An alkaline soil was collected from Kashgar oasis, Xinjiang autonomous region. Biochar was produced from corn stover at 550 °C, and mixed thoroughly with the soil at 0%, 1.0%, 5.0% and 10.0% (W/W) ratio. Compared with the control, applications of biochar at 5% and 10% reduced ammonium leaching by 31.14% and 52.43%, respectively, while biochar addition at 1% increased ammonium leaching by 85.95%. Accumulated leaching of ammonium-nitrogen increased with accumulated precipitation. The leaching losses of nitrate-nitrogen and total nitrogen were reduced by 24.79% and 38.19%, 50.01% and 16.13%, and 29.98% and 33.83% for 1.0%, 5.0% and 10.0% biochar additions, respectively, as compared with the control. The leaching of nitrate-nitrogen and total nitrogen occurred most during the first three precipitation events or about the first 140 mm of precipitation, and phased out at about 190 mm precipitation in 0%, 1.0%, and 5.0% biochar treatments. However, this phaseout was postponed at about 290 mm precipitation in 10% biochar treatment. The application of biochar also increased soil water-holding capacity by an average of 20.95%. These results indicate that biochar application in saline and/or alkaline soils in arid areas could significantly reduce the leaching losses of nitrogen and enhance soil water holding capacity.

Keywords: biochar; corn straw; salinity; nitrate nitrogen; total nitrogen

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 中国科学院战略性科技先导专项(XDA05070400); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079号); 中科院院地合作和科技支撑项目; 国家重大科学研究计划(2013CB956700-2); 环境地球化学国家重点实验室开放课题; 贵州国际科技合作计划项目(黔科合外 G 字[2012]7050号)

作者简介: 杨放(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为生物炭技术的应用。E-mail: sunerpi@126.com

* 通信作者: 李心清 E-mail: xinqinglee@hotmail.com

农业土壤氮肥利用率低会造成资源浪费、大气污染和地下水富营养化等问题^[1],提高氮肥的利用效率是当前农业和环境研究的热点之一^[2-4]。世界范围内氮肥的作物利用率约为33%^[5-6],我国约为35%,但施用量从1980年的934.2万t上升到2011年的2381.4万t^[7],损失率约为45%^[8-9]。氮肥损失造成资源浪费,加重环境负担,引发环境水体富营养化和大气N₂O、NO和NH₃的污染^[1],增加农业生产成本^[10]。因此,寻求减少土壤氮素流失的科学方法,提高氮素在土壤、尤其是根际层中的积累量具有重要的意义。

农业土壤N的损失途径主要包括气态损失(N₂、N₂O、NO、NH₃)、无机氮(铵态氮和硝态氮)损失以及有机氮损失,硝态氮的淋失已经成为了中国农业生态系统N的主要损失途径^[10]。硝酸根的大量淋失会导致地下水的浓度升高进而造成水体富营养化^[11]和诸如高铁血红蛋白症和糖尿病之类的疾病^[12]。

已有研究表明,由生物质在高温厌氧热解条件下产生的生物炭^[13]能有效地减少土壤氮素的淋失^[14-15]。Dempster等^[15]对添加生物炭(桉树)的亚热带酸性农业土壤观测表明:生物炭显著降低土壤中氮的矿化和反硝化速率,减少无机氮损失,认为生物炭增加土壤中氮的微生物固定以及对无机氮的直接吸附。Zheng等^[16]用生物炭(芦竹)对山东青岛的酸性土壤氮循环研究报道:添加生物炭减少土壤的氮淋失,增强土壤持水能力,加强了氮的固定。然而,也有报道称生物炭对土壤N淋失无影响甚至会增加其淋失。Bruun等^[16]研究小麦和稻草生物炭对酸性砂土氮淋失影响表明,生物炭对土壤硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)的淋失没有明显的影响。而Laird等^[17]用生物炭(橡树、山核桃)对美国酸性农业土壤的营养元素淋失观测发现,生物炭(20 g·kg⁻¹)添加导致土柱硝态氮淋失量增加了26%(相比空白对照),并归因于生物炭促进了微生物呼吸和腐殖质矿化。上述研究表明:不同的土壤和生物炭可能导致土壤中氮素地球化学行为的差异。但上述研究对象主要以温带以及亚热带的中酸性土壤^[17-22]为主,对干旱-半干旱地区的碱性土壤却很少报道^[23],仅Zhang等报道过生物炭(玉米芯)改良温带碱性土的试验发现,生物炭对土壤的持水能力、N的固

持能力和作物产量没有明显的影响^[24]。

中国的盐碱化土地面积巨大,尤以新疆的盐碱化状况最为严重。由于独特的气候条件和特殊的地质水文等自然因素,加之近年来的人类开发,加剧了土壤盐碱化。据统计,区内现有耕地398.78万hm²(不包括旱地),其中盐碱地达127.90万hm²,约占耕地面积总数的32.07%。其中南疆的盐碱化土壤占土地总面积90%以上^[25]。目前主要治理方法是大水漫灌将盐分淋洗至土壤底部或地下水,该方法虽然在短时间内满足了作物生长需求,却难以持久,同时造成了水资源的浪费并带来地下水污染隐患。冯兆忠等^[26]研究秋季灌水对盐碱土氮和地下水的影响发现,灌水将土壤中大量的硝酸根从土壤根际层淋失至地下水,导致了地下水硝酸根浓度上升并超过了健康标准。

本研究将生物炭施用于南疆典型的盐碱土,通过室内土柱模拟试验,观测生物炭对新疆典型盐碱土氮淋失的影响。争取为提高新疆盐碱化地区氮素利用率探索一条新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤采自新疆喀什农业技术推广中心试验场(39°23'45"N,75°58'43"E)。当地气候类型为大陆性暖温带干旱气候。年均气温约为13.6℃,年降雨量约为55.3 mm。按《中国土壤分类系统》^[27],土壤类型为盐化灌淤土,是南疆绿洲农业典型土壤类型。土壤采自表层0~15 cm,自然风干,过2 mm筛。

生物炭是玉米秸秆(四单19号)的碳化产物。碳化过程的升温速率为18℃·min⁻¹,限氧,最高温550℃(30 min),研磨过2 mm筛。生物炭和土壤性质见表1。

1.2 实验方法

1.2.1 淋溶试验装置

模拟试验采用PVC圆柱管作为淋滤土柱,其底面积为60 cm²,高度为30 cm。下端铺3 cm厚石英砂(粒径3 mm,起过滤作用),在底部管口处垫上尼龙网(孔径0.5 mm),将圆柱管底部封紧。按照约1.2 g·cm⁻³的容重将土壤装入圆柱管中,每个土柱土壤质量为900 g。将生物炭与土壤混匀,尿素均匀施入表层5 cm内。

表1 土壤和生物炭基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the tested soil and biochar

项目	pH	C/g·kg ⁻¹	N/g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	C:N	Sand/%	Silt/%	Clay/%
土壤 Soil	7.62	27.04	1.54	12.73	95.95	17.56	54.74	42.28	2.98
生物炭 Biochar	10.45	732.50	11.70	5.47	5.41	62.61			

1.2.2 实验设计

土柱分为4个处理:C0:无生物炭;C1:生物炭/干土为1%;C5:生物炭/干土为5%;C10:生物炭/干土为10%。每个处理设3个重复。据蔬菜基地常规施肥量,每个土柱添加尿素0.309 g。

1.2.3 淋溶试验

结合实际大水漫灌量和样品测试需要,每个土柱每天添加相当于降水量10 mm的去离子水,持续6 d,待到有淋溶液淋出时,加大模拟降雨量至每天20 mm,持续4 d,这时搜集的淋滤液为一个样。之后每天添加10 mm降水量,持续25 d,每5 d的淋溶液为一个样。每次收集到的淋溶液用洗净塑料瓶(100 mL)装好,保存至冰箱(0~4 °C)待测。

1.2.3 测试方法

土壤和生物炭的C和N采用元素分析仪(vario Macro CNS;Elementar, Germany)测定。土壤和生物炭pH使用Pioneer 65型便携式多参数仪(雷迪美特,法国)测定,土壤和生物炭pH测定溶液分别采用土水比1:2.5(W/V)和炭水比1:10(W/V)。淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测试方法为纳氏试剂光度法(HJ 535—2009); $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用离子色谱法^[28];TN采用过硫酸钾氧化-双波长紫外分光光度法(HJ 636—2012);土壤和生物炭的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定^[29]; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则采用酚二磺酸比色法^[30]。分光光度法所采用仪器为Thermo AquaMate紫外多功能水质分析仪(美国,Thermo公司)。

1.2.4 数据处理

试验数据采用Origin 8.0和SPSS 17.0软件进行统计分析。各处理之间的显著性差异采用单因素方差分析法(One-way ANOVA),显著性水平为0.05。

2 试验结果

2.1 土柱的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和C:N

表2所列为四个土柱的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和C:N含量。土柱的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量基本相当(生物炭中含量较低),TN和C:N随添加比例增加而增大。其中C:N的N包含了尿素所含的N(144.20 mg)。

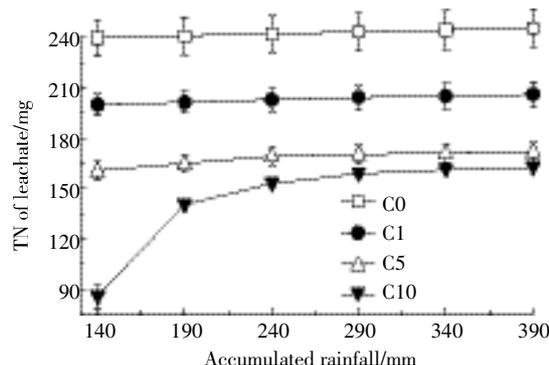
2.2 生物炭对土壤总N淋失的影响

如图1所示,C0、C1、C5和C10四个土柱的TN淋失量分别是245.89、206.23、172.18、162.72 mg。与C0的TN淋失量相比,C1、C5和C10分别降低了16.13%、29.98%和33.83%,且四者之间均达到了显著

表2 土柱的氮素含量

Table 2 Contents of nitrogen in soil column

土柱	C0	C1	C5	C10
$\text{NH}_4^+\text{-N/mg}$	11.46	11.51	11.70	11.95
$\text{NO}_3^-\text{-N/mg}$	86.35	86.40	86.60	86.84
Soil total N/g	1.39	1.49	1.91	2.44
Soil total C/g	24.34	30.93	57.30	90.26
Soil C:N	15.90	18.92	27.86	34.94



前140 mm为一个样,之后50 mm一个样,纵坐标为累积淋失量。下同
The first sample was collected at accumulated 140 mm rainfall, then at every 50 mm. The same below

图1 生物炭对土壤TN淋失的影响

Figure 1 Effects of biochar additions on total N leaching

性差异。C0和C1两个土柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失基本只集中在前10 d(140 mm),C5在20 d(240 mm)内淋失完全,C10则到第25 d(290 mm)才淋失完全(图2);C0、C1、C5和C10四个土柱在前10 d(140 mm)的TN淋失量分别占累计淋失量的97.5%、97.1%、93.4%和52.6%。

2.3 生物炭对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失的影响

在本试验中,C0、C1、C5和C10四个土柱的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量分别是234.9、176.7、145.2、117.4 mg。与C0的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量相比,C1、C5和C10三个土柱的淋失量分别降低了24.79%、38.19%和50.01%(图3),且

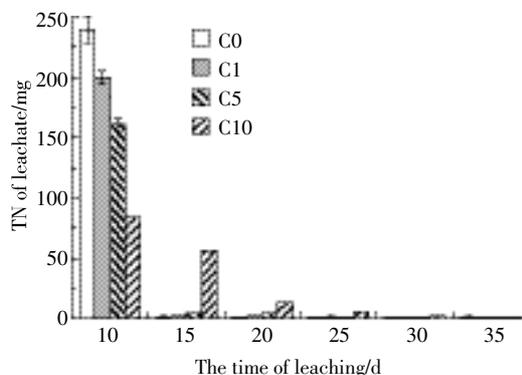


图2 分批次淋滤液的TN含量

Figure 2 Contents of total N in leachates at different leaching times

C0与另外三者之间均达到了显著性差异 ($P < 0.01$)。C0和C1两个土柱的 NO_3^- -N的淋失基本只集中在前10 d(140 mm),C5也基本在15 d(190 mm)内就淋失完全,C10到第25 d(290 mm)才淋失完全(图4);C0、C1、C5和C10四个土柱在前10 d(140 mm)的TN淋失量分别占累计淋失量的98.8%、98.4%、93.7%和62.6%。

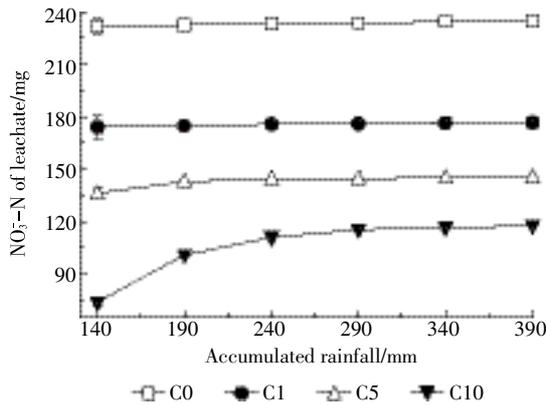


图3 生物炭对土壤 NO_3^- -N淋失的影响

Figure 3 Effects of biochar additions on NO_3^- -N leaching

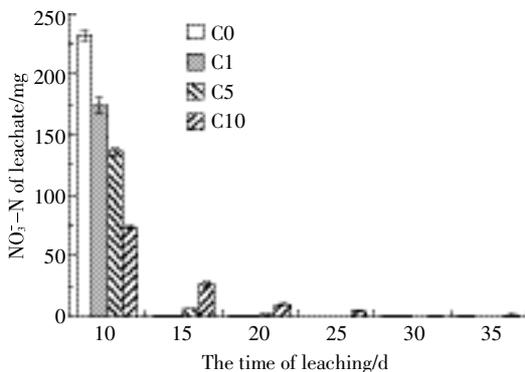


图4 分批次淋滤液的 NO_3^- -N含量

Figure 4 Contents of NO_3^- -N in leachates at different leaching times

2.4 生物炭对土壤 NH_4^+ -N淋失的影响

如图5所示,C0、C1、C5和C10的淋失量分别是1.85、3.44、1.20、0.88 mg。4个处理的淋失随时间变化较为均匀,C1的土柱淋失量比C0多85.95%,而C5和C10的淋失量比C0分别少了31.14%和52.43%,其中C0与C1和C10达到了显著性差异。

2.5 生物炭对淋滤量的影响

如图6所示,C0、C1、C5和C10四个土柱的淋滤量分别是2119、2063、1913、1676 mL。与C0相比,C1、C5和C10分别降低了2.68%、9.75%、20.95%,但四者之间均未达到显著性差异。

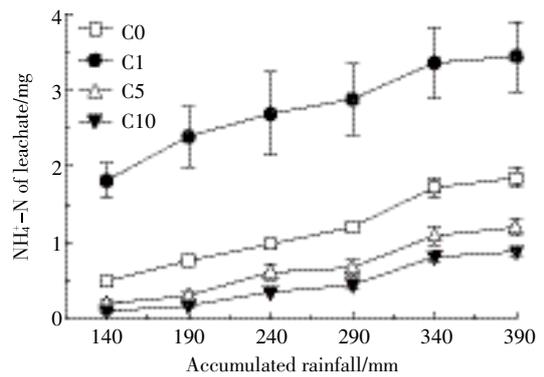


图5 生物炭对土壤 NH_4^+ -N淋失的影响

Figure 5 Effects of biochar additions on NH_4^+ -N leaching

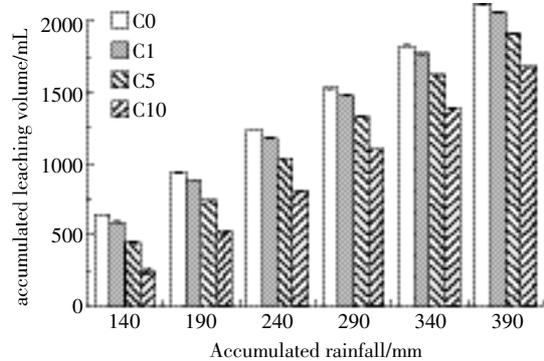


图6 生物炭对土壤淋滤液体积的影响

Figure 6 Effects of biochar additions on leaching volume of soil

3 讨论

3.1 TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N

C1、C5和C10的TN淋失量相对于C0分别降低了16.13%、29.98%和33.83%,且四者之间均达到了显著性差异。这表明生物炭的添加显著降低了土柱的TN淋失量,且随添加比例上升淋失量下降。C0和C1两个土柱的 NO_3^- -N的淋失基本只集中在前10 d(140 mm);C5在20 d(240 mm)内淋失完全,C10则到第25 d(290 mm)才淋失完全(图2);C0、C1、C5和C10四个土柱在前10 d(140 mm)的TN淋失量分别占累计淋失量的97.5%、97.1%、93.4%和52.6%,说明C10的添加比例在淋失的初期能够有效地吸持氮素阻止其淋失,而C1和C5则可能因为添加比例的原因效果并不明显。因此,一定比例生物炭的添加明显降低了初期降雨的淋失量,从而增加N素在土壤根际层停留时间,增强土壤对作物的供N能力。

盐碱土中作物的生长受到盐分和氮磷钾等营养元素共同影响。棉花在整个生长期主要受控于盐分的高低,特别是在出苗和早期生长阶段,在中低盐分浓

度下,其不利影响会因 N 浓度的升高得到缓解;在高盐度胁迫下,盐分会降低植株对 N 的吸收,此时过量的 N 输入已无意义且还会加重土壤的盐碱化^[31];Nadlan 等^[32]对盐碱地甘蔗生长的研究也得出,在低的氮肥比例下,甘蔗重量、根长度和干重与盐度呈反相关,在低盐度下,N 浓度的增加会缓解盐度对作物的不利影响,但在高盐度下,过量的 N 亦不会被作物吸收。因此,在合适的土壤盐度下,添加生物炭可能会增加土壤中 N 的作物吸收,提高 N 素的利用效率。

试验中 NO_3^- -N 与 TN 的淋失规律比较一致,数量占 TN 一半以上,因此淋滤液中的 N 主要由 NO_3^- -N 组成。C1、C5 和 C10 的 NO_3^- -N 淋失量相对于 C0 分别降低了 24.79%、38.19% 和 50.01% (图 3),且 C0 与另外三者之间均达到了显著性差异 ($P < 0.01$)。生物炭的添加显著降低了土柱的 NO_3^- -N 淋失量,且随添加比例上升淋失量下降。C0 和 C1 两个土柱的 NO_3^- -N 的淋失基本只集中在前 10 d (140 mm),C5 也基本在 15 d (190 mm) 内就淋失完全,C10 到第 25 d (290 mm) 才淋失完全(图 4);C0、C1、C5 和 C10 四个土柱在前 10 d (140 mm) 的 TN 淋失量分别占累计淋失量的 98.8%、98.4%、93.7% 和 62.6%。

四个土柱的 NO_3^- -N 淋失量均超过了试验开始时土柱的 NO_3^- -N 含量(表 2)。关于生物炭影响土壤 NO_3^- -N 淋失的研究较多,但结果不一。Laird 等^[33]对添加了生物炭的农业土壤营养元素淋失的观测表明,在未施用猪粪时,添加生物炭增强了土柱 NO_3^- -N 的淋失,归因于生物炭刺激有机氮矿化并促进微生物呼吸和腐殖质矿化^[20, 22];而生物炭与猪粪结合施用能明显降低 NO_3^- 的淋失,这是生物炭吸附了 NH_4^+ 和可溶有机物的结果。也有报到指出,生物炭施入森林土壤会促进土壤中的硝化反应,增加 NO_3^- -N 的淋失^[12]。

添加生物炭影响了土柱 NH_4^+ -N 淋失量,其淋失过程较为均匀,没有出现类似于 NO_3^- -N 和 TN 的趋势,说明土壤中铵根的溶解和淋失较为缓慢。与 C5 和 C10 减少其淋失不同,C1 增加了土壤 NH_4^+ -N 的淋失量,原因可能是土壤对于外来物质的加入有一定的承受能力,C1 添加比例可能刺激了土壤中有有机氮矿化^[34]而产生 NH_4^+ ,但其本身不足以吸附产生的 NH_4^+ ;C5 和 C10 淋失量比 C0 分别少了 31.14% 和 52.43%,与很多研究结果一致^[14, 35]。

本试验显示 NH_4^+ -N 淋失占 TN 淋失量比例较小 (<2%),因此土壤中 NH_4^+ -N 淋失变化不会对 N 素淋失产生较大影响。

3.2 淋失体积

本试验中,生物炭的添加减少了土柱的溶液淋失量,增加了土壤的持水能力。已有研究证明生物炭的这种作用^[36-37],特别对于干旱土壤^[38],其作用机制是:添加生物炭增加了土壤容重、孔隙度和比表面积,加上其本身对水分子强大的吸附力,从而影响土壤溶液的迁移流动^[39-40]。由于砂质土壤的保水能力弱,对于砂质含量较高的土壤效果更为明显^[41]。这对于本试验研究区的意义重大,由于降雨量小,蒸发强烈,该地区农业用水主要来源于地下水和河水,这导致了地下水的过度开采,同时不断的漫灌和蒸发,最终导致更严重的土壤次生盐碱化和地下水富营养化^[1, 11-12]。因此,添加生物炭可提高土壤持水力的作用,可能会一定程度上缓解这种情况。

4 结论

生物炭施用于干旱区盐碱土能明显减少 NO_3^- -N 和 TN 淋失并延长了其在土壤中的停留时间,增强了土壤的持续供氮能力。玉米秸秆生物炭可显著减少土壤中 NO_3^- -N 和 TN 的淋失量,且减少量与生物炭添加比例呈正相关。对比空白,添加 10% 生物炭的土柱的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 减少淋失量分别达到 52.43%、50.01% 和 33.83%。不添加、添加 1% 和添加 5% 生物炭的土柱 NO_3^- -N 和 TN 的淋失集中在试验 10 d 内(降雨量 140 mm),而添加 10% 生物炭的土柱则显得较为平缓,几乎持续到 25 d (降雨量 290 mm)。 NH_4^+ -N 占总氮的淋失量较小 (<2%),对土壤 N 素淋失贡献较小。另外,添加生物炭会增加土壤持水能力。

参考文献:

- [1] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [2] Garnett T, Conn V, Kaiser B N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(9): 1272-1283.
- [3] Sylvester-Bradley R, Kindred D R. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(7): 1939-1951.
- [4] Hirel B, Le Gouis J, Ney B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: Towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369-2387.
- [5] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 132-140.
- [6] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(3): 357-363.

- [7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴: 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
The National Bureau of Statistics of China, China statistical yearbook: 2012[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2012.
- [8] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2–3): 117–127.
- [9] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778–783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783.
- [10] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, 206: 32–39.
- [11] Huang X P, Huang L M, Yue W Z. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47(1): 30–36.
- [12] Feleke Z, Sakakibara Y. A bio-electrochemical reactor coupled with adsorber for the removal of nitrate and inhibitory pesticide[J]. *Water research*, 2002, 36(12): 3092–3102.
- [13] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Earthscan, 2009.
- [14] Clough T J, Condon L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1218–1223.
- [15] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1–2): 311–324.
- [16] Bruun E W, Petersen C, Strobel B W, et al. Nitrogen and carbon leaching in repacked sandy soil with added fine particulate biochar[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1142–1148.
- [17] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3–4): 443–449.
- [18] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(6): 2061–2069.
- [19] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205–212.
- [20] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110–115.
- [21] Xu R K, Zhao A Z, Yuan J H, et al. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 494–502.
- [22] Steiner C, Glaser B, Geredes Teixeira W, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893–899.
- [23] Artiola J F, Rasmussen C, Freitas R. Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass[J]. *Soil Science*, 2012, 177(9): 561–570.
- [24] Zhang Q Z, Wang X H, Du Z L, et al. Biochar impact on nitrate accumulation in an alkaline soil[J]. *Soil Research*, 2013.
- [25] 加孜拉, 阿山, 王修贵, 等. 新疆土壤盐碱化治理技术初步研究[J]. 节水灌溉, 2011, 11: 50–52.
JIA Zi-la, A Shan, WANG Xiu-gui, et al. A preliminary study on controlling soil salinization in Xinjiang[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011, 11: 50–52.
- [26] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71(2): 131–143.
- [27] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
GONG Zi-tong. Chinese soil taxonomy: Theory·method·practice[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [28] Haddad P R, Jackson P E. Ion chromatography: Principles and applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 1990.
- [29] Dorich R A, Nelson D W. Direct colorimetric measurement of ammonium in potassium chloride extracts of soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(4): 833–836.
- [30] Henriksen A, Selmer-Olsen A R. Automatic methods for determining nitrate and nitrite in water and soil extracts[J]. *Analyst*, 1970, 95(1130): 514–518.
- [31] Chen W, Hou Z, Wu L, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1–2): 61–73.
- [32] Nadian H, Nateghzadwh B, Jafari S. Effect of salinity and nitrogen fertilizers on some quantity and quality parameters of sugarcane (*Saccharum sp.*) [J]. *J Food Agric Environ*, 2012, 10: 470–474.
- [33] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3–4): 436–442.
- [34] Nelissen V, Rutting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 55: 20–27.
- [35] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395–419.
- [36] Blackwell P, Krull E, Butler G, et al. Effect of banded biochar on dry-land wheat production and fertilizer use in south-western Australia: An agronomic and economic perspective[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6–7): 531–545.
- [37] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6–7): 526–530.
- [38] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols[J]. *Soil Science*, 2012, 177(5): 310–320.
- [39] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1–2): 81–84.
- [40] Karhu K, Mattila T, Bergstrom I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1–2): 309–313.
- [41] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1–2): 1–18.