

生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟^{*}

邢英^{1,2} 李心清^{1**} 王兵¹ 周志红^{1,2} 程红光¹ 程建中¹ 房彬^{1,2}

(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中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 土壤氮素的淋失作用不仅造成土壤营养元素的损失, 而且对河流和湖泊等环境水体的富营养化具有重要贡献。采用土柱室内模拟方法, 通过模拟降雨淋滤, 研究了生物炭对土壤淋溶液体积、pH 和电导率以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶的影响。试验中所用的生物炭是以桉树木屑为原料制成, 分别按照炭土质量比 1%、2%、4%、10% 施用于土壤中。结果显示, 与对照相比, 向土壤添加 10%、4%、2%、1% 生物炭分别减少土壤水分损失 14%、0.03%、0.02% 和 0.01%; 随生物炭添加量增加, 淋溶液的 pH 和电导率也逐渐增加; 土壤生物炭添加量为 10%、4%、2% 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量分别增加 235%、28.1%、31.6%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量分别增加 4.2%、14.5%、25.6%; 但生物炭添加量为 1% 的土柱 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量减少 15.8%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量减少 19.2%。本研究表明, 桉树生物炭对土壤氮淋溶与其施用量有关, 1% 施用量能减少氮淋溶, 过量施用将增加氮淋溶, 这种作用是否与生物炭种类有关有待进一步研究。

关键词 生物炭; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$

中图分类号 S154.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)11-2483-06

Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column. XING Ying^{1,2}, LI Xin-qing^{1**}, WANG Bing¹, ZHOU Zhi-hong^{1,2}, CHENG Hong-guang¹, CHENG Jian-zhong¹, FANG Bin^{1,2} (¹ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2483-2488.

Abstract: Soil nitrogen leaching not only causes soil nitrogen loss, but also has great contribution to the water body eutrophication. By the method of laboratory simulation test, this paper studied the effects of applying biochar on the leachate volume, pH, electrical conductivity (EC), and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentrations in a batch of yellow soil columns under simulated raining condition. The biochar was made from eucalyptus chips, and its application rates were 1%, 2%, 4%, and 10% of soil mass. Comparing with the control, applying 10%, 4%, 2%, and 1% biochar decreased the leachate volume by 14%, 0.03%, 0.02%, and 0.01%, respectively. With the increasing amount of applied biochar, the leachate pH and EC increased. Under the application of 10%, 4%, and 2% biochar, the leachate $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations increased by 235%, 28.1% and 31.6%, and 4.2%, 14.5% and 25.6%, respectively, while under the application of 1% biochar, the leachate $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations decreased by 15.8% and 19.2%, respectively. This study showed that the effects of applying eucalyptus chips on the nitrogen leaching of yellow soil depended on the applied amount of the biochar. The addition of 1% biochar reduced the nitrogen leaching, while excessive biochar increased the nitrogen leaching. Whether the species of biochar materials may affect soil nitrogen leaching would be an issue to be investigated in the future.

Key words: biochar; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen.

* 国家自然科学基金项目(40721002, 40872212, 41021062)、贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字[2011]3079 号)、中国科学院院地合作项目和“碳专项”项目资助。

** 通讯作者 E-mail: xinqinglee@hotmail.com

收稿日期: 2011-04-07 接受日期: 2011-07-12

随着农业的发展,利用矿质肥料促进作物生长成为一种常用手段。据统计,仅我国2008年消耗氮肥量多达2302.9万t(中华人民共和国国家统计局,2009),占世界氮肥消费总量的1/3(朱兆良,2008)。虽然氮肥的使用在一定程度上保证了我国的粮食安全,但长期以来氮肥用量大、效率低等问题却给我国的资源与环境等方面带来了负面影响。以稻田为例,我国目前水稻田氮素当季平均损失率为30%~70%(朱兆良,2000)。如此高的损失率给周围环境带来严重的影响,比如,导致湖泊水体富营养化、地下水 NO_3^- 含量超标以及大气中温室气体 N_2O 排放增加等一系列问题(陈怀满,2005)。

贵州位于我国西南,处于典型的喀斯特地区。据统计,全省喀斯特面积为10.91万 km^2 ,占全省总面积的61.9%。黄壤是省内喀斯特区域分布面积最大的土壤类型,总面积有737.37万 hm^2 ,是贵州省农业生产的主要土壤类型(蒋太明和魏朝富,2006)。贵州喀斯特地区位处太平洋季风和印度洋季风交汇影响的边缘地带,加之低纬度的区位与高海拔的地势,冷暖空气在此交汇,雨量十分充沛,贵州地区年平均降水量达1100~1400mm。但由于喀斯特地区地质环境脆弱、土壤保肥持水能力差,丰富的降雨量导致了该区土壤营养元素严重流失、土壤异常贫瘠,农业生产水平降低(Pleysier & Juo, 1981; 王世杰,2003)。而当地农民为了保证粮食产量,大量施用无机氮肥,加剧了氮素的流失。因此,建立一种行之有效的方法防止土壤的氮素流失并提高作物利用氮素的能力迫在眉睫。

近年来研究发现,在巴西亚马逊盆地的印第安黑土(Terra Preta),与周围典型热带地区的贫瘠土壤相比,作物长势良好(Glaser *et al.*, 2001)。研究表明,该地区土壤中含有大量黑炭,其组份灰分元素如K、Ca、Mg均呈可溶态,能提高酸性土壤的盐基饱和度和pH值(Glaser *et al.*, 2001)。这种“黑碳”施用到土壤中,不仅可以显著提高土壤阳离子交换量(Tryon, 1948),而且能促进作物对N和P的吸收,提高了土壤肥力并增加农作物产量(Lehmann *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2006; Lehmann, 2007)。生物炭可以吸附土壤中的 NH_4^+-N ,减少铵氮淋失(Lehmann *et al.*, 2003),而且与单独施加矿物肥料的土壤相比,生物炭与矿质肥料混施更能促进作物生长,粮食产量倍增(Steiner *et al.*, 2007)。生物炭添加到土壤中能改善土壤理化性质,影响土壤肥力,

但是其在土壤中作用机理尚不清楚。将生物炭技术应用到我国西南喀斯特地区,其效果还有待进一步的验证。因此,本研究拟通过室内模拟土柱降雨实验,研究不同比例生物炭下土柱淋溶液中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量变化规律,分析生物炭对氮素淋失的影响因素,以探明生物炭对氮肥淋失的控制机理,为生物炭在喀斯特地区的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 生物炭 由桉树木屑烧制成的黑炭,研磨过2mm筛,生物炭性质:C含量 $600\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,N含量 $14.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (其中 NH_4^+-N $1.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, NO_3^--N $4.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),H含量 $18.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,S含量 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 供试土壤 试验用土采自贵阳市乌当区永乐乡干井村蔬菜基地的代表性旱地耕作层(0~20cm)土壤,地处 $26^\circ35'58.2''\text{N}$, $106^\circ50'24.9''\text{E}$,土壤区年均降水量为1118mm,属于亚热带湿润温和型气候。将采集的土壤样品自然风干,挑去肉眼可见的细根和石块后过4mm筛保存备用。

1.1.3 淋溶试验装置 模拟土柱的面积为 60 cm^2 ,高度为30cm PVC圆柱管,在圆柱管下端铺上3cm厚的用去离子水洗净的干燥石英砂(起过滤水样作用),在底部管口处铺上尼龙网,将圆柱管底部封紧。按照 $1.16\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的田间容重将已处理好的风干土壤后装入圆柱管中,形成约20cm的模拟土柱(1.37kg干土)。添加生物炭的质量比分别为1%、2%、4%、10%,带入 NH_4^+-N 0.023、0.046、0.092、0.23mg, NO_3^--N 0.067、0.134、0.268、0.670mg。装土柱时,将土壤分两层装入,0~5cm为一层,5~20cm为一层。同层内土壤与生物炭混合均匀,压实装入土柱中;肥料的加入方法是将0~5cm的土壤与生物炭充分混匀后,再添加尿素混匀,填装在土柱表面(沈仁芳和赵其国,1995)。安装土柱时,特别注意将土柱壁边缘的土壤压实,以确保无贴壁水流入渗,尽量减少边缘效应的产生。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 5个处理:1)不添加生物炭(CK);2)添加生物炭量为土壤全重(干重)的1%;3)添加生物炭量为土壤全重的2%;4)添加生物炭量为土壤全重的4%;5)添加生物炭量为土壤全重的10%。每个处理设3个重复。实验施肥量与蔬

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical characteristics of the test soil

类型	总 N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 C ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH	土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘粒 (%)	粉砂粒 (%)	沙粒 (%)
黄壤	2.98	16.21	27.34	5.62	1.16	64.7	27.3	7.8

菜基地常规施肥量一致,即每个土柱加 0.293 g 尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)相当于每公顷地施用 225 kg N 肥。

1.2.2 淋溶试验 开始 7 d,每天用去离子水模拟降雨 60 ml,折合降雨量为 10 mm,让尿素在土壤中充分反应。待到淋溶液淋出时,降 60 mm 大雨,用塑料瓶收集淋溶液。方法是每隔 7 d 降水一次 120 ml(折合降雨量 20 mm) 26 d 后每 10 d 降水一次 120 ml,其中第 46 天降水为 360 ml(折合降雨量 60 mm)。试验从 2009 年 6 月 13 日—2009 年 8 月 30 日止,共模拟降雨 290 mm,试验中降雨量和降雨强度参照贵阳市 7—8 月平均降雨量(293 mm)及降雨强度而设定。每次收集到的淋溶液充分混匀后,测量淋溶液体积、电导率、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量。其中,土壤淋溶液中每次 NO_3^--N (NH_4^+-N) 淋溶量 = 每次淋溶液中 NO_3^--N (NH_4^+-N) 浓度 \times 淋溶液体积,累计 NO_3^--N (NH_4^+-N) 淋溶量 = 每次淋溶液中 NO_3^--N (NH_4^+-N) 淋溶量之和。

1.2.3 土壤基本理化性质及 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 测定 土壤中基本理化性质参照刘光崧方法测定(刘光崧,1996)(表 1);土壤总碳、总氮用 PE2400-II 型元素分析仪测定(美国,PE 公司)。水样中 pH 电导率采用法国 Radiometer Analytical 公司生产的多参数测定仪 pION65 测定。 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量分别用纳氏试剂法和紫外分光光度法(鲁如坤,2000)测定,采用 Thermo AquaMate 紫外多功能水质分析仪(美国,Thermo 公司)。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 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 结果与分析

2.1 生物炭对土壤淋溶液体积及电导率的影响

由图 1 可见,土柱中淋溶液体积由小到大依次为 10% < 4% < 1% < 2% < 对照。添加生物炭比例 10% 的土柱淋溶液体积与其他比例相比显著减少,与对照相比减少了 14% ($P < 0.05$),而其他比例与

对照相比无显著性差异。由此可见,添加生物炭能降低土壤水分的淋失,提高土壤的持水能力,生物炭添加量越高的土柱持水效果越好,淋溶液淋失量最少。这是由于生物炭疏松多孔的特性使之在土壤中能吸附更多的水分,提高了土壤的持水能力。

由图 2 可见,随着淋滤时间的增加,pH 和电导率呈现先上升后下降的趋势,随着添加生物炭比例的增加,土柱淋溶液中 pH 和电导率逐渐升高,添加生物炭比例 10% 的土柱淋溶液中 pH 和电导率最高。这主要与生物炭性质有关,生物炭中含有的大量的灰分元素如 K、Ca、Mg 等,都以可溶态赋存于生物炭中,施入土壤可以提高酸性土壤的盐基饱和度,以提高土壤的 pH、降低酸性土中铝的饱和度(Liang *et al.*, 2006),在连续降雨条件下这些离子随水下渗,提高了淋溶液的电导率。

2.2 生物炭对淋溶液中 NH_4^+-N 浓度的影响

从图 3 可以看出,淋溶液中 NH_4^+-N 浓度呈先升高后下降的趋势,在第 19 天时, NH_4^+-N 浓度达到最高,CK、1%、2%、4%、10% 土柱淋溶液中 NH_4^+-N 浓度分别为 1.68、1.04、1.74、1.91、4.71 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随后,淋溶液中 NH_4^+-N 浓度迅速下降,最后趋于稳定,26 d 后 NH_4^+-N 浓度随着生物炭添加比例的升高而升高,66 d 时,各处理土柱淋溶液中 NH_4^+-N 浓度基本趋于一致,浓度在 0.05 ~ 0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。整个淋滤过程中,淋溶液中 NH_4^+-N 浓度比较低,淋失

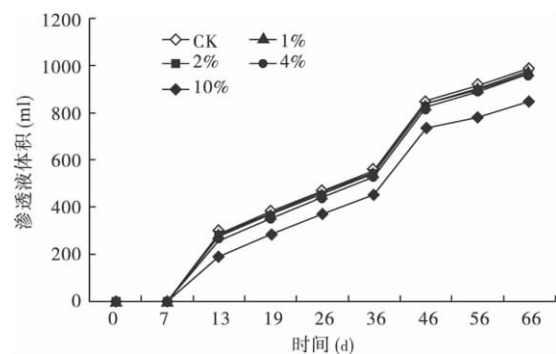


图 1 不同处理下土柱累积淋溶液体积

Fig. 1 Cumulative water leaching volume under different treatments

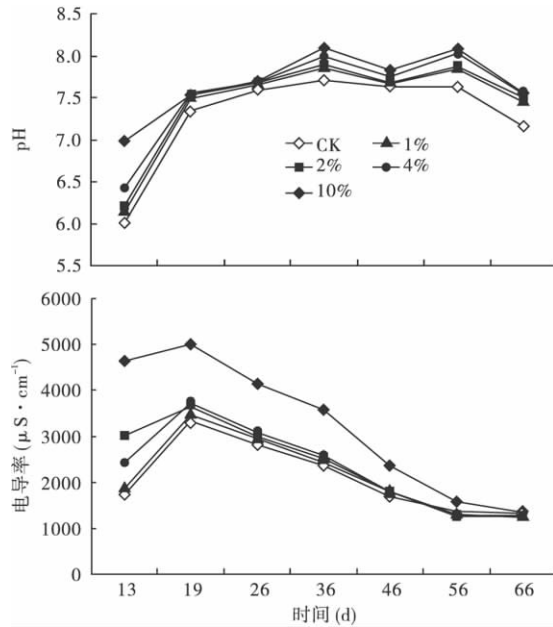


图2 不同处理下淋溶液中pH和电导率的变化
Fig. 2 pH and electrical conductivity in leachate under different treatments

量较少。尿素在土壤中一般经过7 d左右就能在土壤生物酶作用下转化成易被作物生长所吸收利用的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，这说明在淋滤试验过程中，尿素中的N素大部分在生物酶的作用下转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被淋失了。

由图4可见，在连续降雨的过程中，土柱中累计 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量由大到小依次是：10% (1.91 mg)、4% (0.75 mg)、2% (0.73 mg)、对照 (0.57 mg)、1% (0.48 mg)。生物炭施用比例为1%生物炭的土柱中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋溶量最低，而生物炭比例为2%、4%和10%的土柱中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比例要略高于对照，但是仅比例为10%的土柱经统计检验有显著差异 ($P < 0.05$)。Lehmann (2003) 与刘世杰和窦森 (2009) 研

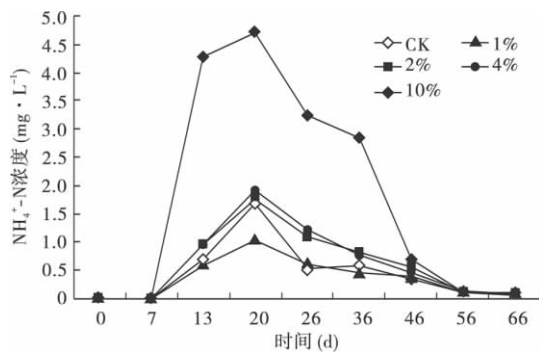


图3 不同处理下淋溶液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度
Fig. 3 Concentration of ammonium nitrogen under different treatments

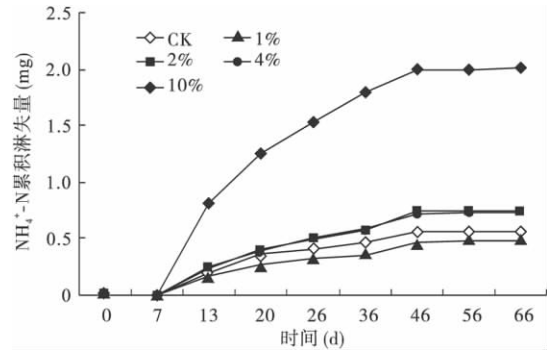


图4 不同处理下淋溶液中累积 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量
Fig. 4 Mass of cumulative ammonium nitrogen in leachate under different treatments

究结果表明，在生长有作物的土壤中进行淋溶试验，加入生物炭能显著降低土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋溶，提高作物的生物量以及对氮肥的吸收率。这与本研究结果有一定的差异性，本试验中除添加比例为1%的生物炭外，其他比例与没有加生物炭的土柱相比其淋溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度要高，这可能与生物黑炭中含有更多的阳离子，不能有效吸附土壤中 NH_4^+ 离子有关。

2.3 生物炭对淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的影响

由图5可见，13 d时，不同比例生物炭的土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度达到峰值，除生物炭比例为1%的土柱外，淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随生物炭的含量增加而升高。CK、1%、2%、4%、10%土柱淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为466.0、418.6、791.7、798.9、1023.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但由于生物炭含量10%土柱持水能力强，淋溶液体积较小，因此，土柱 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量并不是所有土柱中最大的。第1次淋滤完成后， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量由大到小依次是：2%、4%、10%、CK、1%。随后，淋溶液中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度迅速下降，其

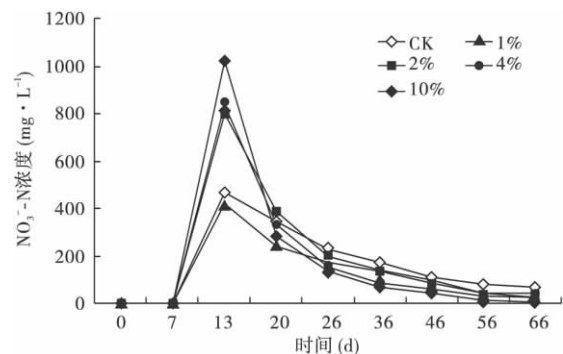


图5 不同处理下淋溶液中历次 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化
Fig. 5 Concentration of nitrate nitrogen under different treatments

中 10% 的土柱淋溶液中 NO_3^- -N 浓度下降最快, 而后趋于稳定。26 d 后, 淋溶液中 NO_3^- -N 浓度随着黑炭比例的增加而减少。66 d 时, CK、1%、2%、4%、10% 生物炭添加比例的土柱淋溶液中 NO_3^- -N 浓度分别为 67.5、40.9、27.0、21.6、6.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。整个淋滤过程中, 开始淋溶液中 NO_3^- -N 浓度随土柱中生物炭比例的增加而增加, 其中 1% 与其他比例相比浓度略低。26 d 后, NO_3^- -N 浓度随土柱中生物炭比例的增加而减少, 添加比例越高的其 NO_3^- -N 浓度也下降最快。这可能是由于在土壤中添加了生物炭增加了土壤孔隙度, 提高了土壤的通氧量, 增强了硝化作用反应速率, 因而导致淋滤初期淋溶液中 NO_3^- -N 浓度随生物炭比例的增加而增加。随着降雨量的增加, 土壤湿度增加, 微生物活动减弱, 土壤硝化作用减弱, 这就有利于土壤微生物发生还原反应 (Ruser *et al.*, 2006), 生物炭中有机添加剂能促进厌氧型细菌的增加 (Birk *et al.*, 2005), 抑制了土壤硝化作用, 导致土柱中生物炭含量高的 NO_3^- -N 淋溶液浓度低。

由图 6 可以看出, 在同样的施肥条件下, 添加生物炭比例为 1% 的土柱累积 NO_3^- -N 淋溶量最低, 依次是 CK、10%、4%、2%。土柱淋溶液中累积 NO_3^- -N 淋溶量由小到大依次是 1% (196.0 mg)、CK (242.6 mg)、10% (252.9 mg)、4% (277.9 mg)、2% (306.9 mg)。生物炭比例为 2%、4% 和 10% 的土柱中 NO_3^- -N 比例要略高于对照, 添加比例为 1% 生物炭的土柱中 NO_3^- -N 的淋溶量显著低于其他比例 ($P < 0.05$)。在本试验中, NO_3^- -N 的累积淋失量占 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 淋失总量的 99.25% ~ 99.77%, NH_4^+ -N 的淋失量可以忽略不计。在淋滤初期, 均发现 1% 的土柱淋滤液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度低于

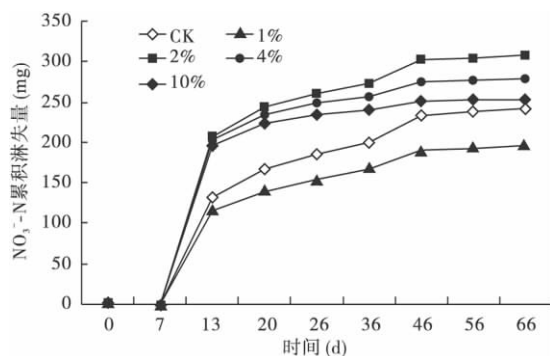


图 6 不同处理下淋溶液中累积 NO_3^- -N 淋溶量变化
Fig. 6 Mass of cumulative nitrate nitrogen in leachate under different treatments

表 2 淋溶液中氮淋溶与水化学参数的相关矩阵

Table 2 Correlation of nitrogen leaching with water quality parameter in leachate

	体积	EC	pH	NH_4^+ -N	NO_3^- -N
体积	1	-0.975**	-0.816	-0.971**	0.054
EC		1	0.840	0.994**	0.157
pH			1	0.797	0.261
NH_4^+ -N				1	0.153
NO_3^- -N					1

$n = 5$, ** $P < 0.01$, 其中 EC、pH 为 7 次淋滤液的平均值, 体积、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 为 7 次累积淋失量的平均值。

其他比例, 这可能是由于添加少量比例的生物炭能够有利于土壤中氮的固定, 减少了氮素的流失, 而高含量生物炭添加到土壤中, 能够改善土壤的物理性质, 增大土壤颗粒的孔隙度, 会导致有机氮更容易矿化为无机氮, 因此导致土壤中无机氮淋溶的增加。

2.4 氮淋溶与水化学参数之间的相关性

由表 2 可见, 淋溶液中 NH_4^+ -N 与电导率呈显著正相关关系, 与淋溶液体积呈显著负相关关系, 而说明生物炭中含有大量的阳离子, 导致铵离子不容易被吸附因而被淋失掉。淋溶液中 NO_3^- -N 与电导、pH 及体积之间无明显的相关关系, 说明土壤中 NO_3^- -N 的淋溶受以上化学参数因素影响不大。

3 结论

生物炭能提高土壤持水能力, 能够减少降雨时由于淋溶作用产生水分的淋失, 而且随着生物炭添加比例增加, 淋溶液淋失量越少。随着生物炭添加比例的增加, 淋溶液中电导率逐渐增强, pH 值逐渐升高, 以 10% 生物炭土柱最大。

通过分析不同比例生物炭的土柱淋溶液中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 淋失量发现, 添加比例为 1% 生物炭的土柱中 NH_4^+ -N 的淋溶量最低, 而生物炭比例为 2%、4% 和 10% 的土柱中 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 比例要略高于对照, 但是仅比例为 10% 的土柱经统计检验有显著差异 ($P < 0.05$); 添加比例为 1% 生物炭的土柱中 NO_3^- -N 的淋溶量显著低于其他比例 ($P < 0.05$)。本试验结论仅是由桉树生物炭在室内模拟试验的条件下得来的, 然而这种作用是否与生物炭种类有关有必要进行更多的实验研究。

参考文献

- 陈怀满. 2005. 环境土壤学. 北京: 科学出版社.
蒋太明, 魏朝富. 2006. 贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究. 水土保持学报, 20(6): 25-29.

- 刘光崧. 1996. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社.
- 刘世杰, 奚森. 2009. 黑炭对玉米成长和土壤养分吸收与淋失的影响. 水土保持学报, **23**(1): 79-82.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 沈仁芳, 赵其国. 1995. 红壤土柱中营养元素的流失. II. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失. 土壤, (4): 178-181.
- 王世杰. 2003. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. 矿物岩石地球化学通报, **22**(2): 120-126.
- 中华人民共和国国家统计局. 2009. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- 朱兆良. 2000. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, **9**(1): 1-6.
- 朱兆良. 2008. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, **45**(5): 778-783.
- Birk JJ. 2005. Einfluss von Holzkohle und Düngung auf die mikrobielle Zersetzungsgemeinschaft und den Streuumsatz in amazonischen Ferralsols (Master thesis). Germany: University of Bayreuth.
- Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. 2001. The Terra Preta phenomenon a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, **88**: 37-41.
- Lehmann J, da Silva Pereira J, Steiner C, et al. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, **249**: 343-357.
- Lehmann J. 2007. A handful of carbon. *Nature*, **447**: 143-144.
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, **70**: 1719-1730.
- Pleysier J, Juo A. 1981. Leaching of fertilizer ions in a Ultisol from the high rainfall tropics: Leaching through undisturbed soil columns. *Soil Science Society of America Journal*, **45**: 754-760.
- Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. 2006. Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**: 263-274.
- Steiner C, Teixeira W, Johannes L, et al. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, **291**: 275-290.
- Tryon EH. 1948. Effect of charcoal on certain physical, chemical and biological properties of forest soils. *Ecological Monographs*, **18**: 81-115.

作者简介 邢英女, 1985年生, 博士研究生。主要从事生物质炭对土壤中营养元素的淋失研究。E-mail: xy31034@163.com
责任编辑 魏中青
